



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/06.19.17.14-TDI

**UM NOVO PARADIGMA DE OCUPAÇÃO
PRÉ-COLOMBIANA NA AMAZÔNIA: DETECÇÃO
COM LIDAR E MODELAGEM DA OCORRÊNCIA DE
ESTRUTURAS ARQUEOLÓGICAS OCULTADAS PELO
DOSSEL FLORESTAL**

Vinícius Peripato Borges Pereira

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelo Dr. Luiz Eduardo Oliveira e
Cruz de Aragão, aprovada em 18
de junho de 2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3TG9D5P>>

INPE
São José dos Campos
2019

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Gabinete do Diretor (GBDIR)
Serviço de Informação e Documentação (SESID)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/06.19.17.14-TDI

**UM NOVO PARADIGMA DE OCUPAÇÃO
PRÉ-COLOMBIANA NA AMAZÔNIA: DETECÇÃO
COM LIDAR E MODELAGEM DA OCORRÊNCIA DE
ESTRUTURAS ARQUEOLÓGICAS OCULTADAS PELO
DOSSEL FLORESTAL**

Vinícius Peripato Borges Pereira

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelo Dr. Luiz Eduardo Oliveira e
Cruz de Aragão, aprovada em 18
de junho de 2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3TG9D5P>>

INPE
São José dos Campos
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Pereira, Vinícius Peripato Borges.

P414n Um novo paradigma de ocupação pré-colombiana na Amazônia: detecção com lidar e modelagem da ocorrência de estruturas arqueológicas ocultadas pelo dossel florestal / Vinícius Peripato Borges Pereira. – São José dos Campos : INPE, 2019. xxviii + 118 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/06.19.17.14-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.
Orientador : Dr. Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão.

1. LiDAR. 2. Arqueologia. 3. Pré-colombiano. 4. Geoglifos.
5. Método de Entropia Máxima (MaxEnt). I.Título.

CDU 528.8:902



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

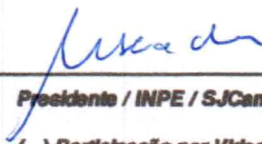
Aluno (a): **Vinicius Peripato Borges Pereira**

Título: "UM NOVO PARADIGMA DE OCUPAÇÃO PRÉ-COLOMBIANA NA AMAZÔNIA: DETECÇÃO COM LIDAR E MODELAGEM DA OCORRÊNCIA DE ESTRUTURAS ARQUEOLÓGICAS OCULTADAS PELO DOSSEL FLORESTAL"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Mestre** em

Sensoriamento Remoto

Dra. Maria Isabel Sobral Escada

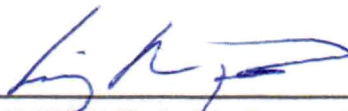


Presidente / INPE / SJCampos - SP

() Participação por Video - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dr. Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão



Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

() Participação por Video - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dr. José Iriarte

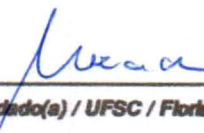


Convidado(a) / University of Exeter / Inglaterra - UK

() Participação por Video - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dra. Carolina Levis



Convidado(a) / UFSC / Florianópolis - SC

Participação por Video - Conferência

Aprovado () Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 18 de junho de 2019

“Em algum lugar, alguma coisa incrível está esperando para ser conhecida.”
“Somewhere, something incredible is waiting to be known.”

Carl Sagan

Àqueles que acreditaram em mim, mesmo quando eu não acreditava.

AGRADECIMENTOS

A meus pais Renato e Rita, agradeço por todos os ensinamentos que me tornaram a pessoa que sou hoje. Aos meus irmãos Willian e Larissa pelos momentos de euforia. À Adriana Maria da Silva pelo amor, apoio, incentivo, paciência e sacrifício em todos os momentos. Obrigado por fazerem parte de mais essa conquista!

Ao meu orientador Dr. Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão por ter me guiado durante essa trajetória, e por ter se posicionado em aspectos cruciais da pesquisa. Obrigado pelos ensinamentos, oportunidades, dedicação, disposição e pela amizade sincera.

A todos os membros do grupo TREES Lab. que contribuíram no desenvolvimento de análises e abordagens científicas de maneira direta ou indireta durante a realização deste trabalho.

Aos amigos da turma SERE de 2017, pelo apoio e incentivo nos momentos difíceis, vocês me deram inspirações e descontrações que tornaram este período mais feliz.

Ao Me. Mauro Lúcio Rodrigues de Assis que se mostrou sempre solícito frente a qualquer aspecto relativo aos dados de LiDAR. Ao docente Dr. José Iriarte, pesquisador Dr. Mark Robinson, e discente Me. Jonas Gregorio De Souza da Universidade de Exeter pelo auxílio na interpretação de infraestruturas pré-colombianas.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Especiais (INPE) pela oportunidade e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Aos Projetos Paisagens Sustentáveis, grupo de pesquisa de Estimativa de Biomassa na Amazônia (EBA) e ao grupo Pesquisa TRopical Ecosystems and Environmental Sciences (TREES) pela disponibilização de dados.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

RESUMO

Diversas pesquisas já realizadas na floresta Amazônica apresentam evidências da extensa população pré-colombiana que habitou a área. Desses achados, 96,8% ocorreram em áreas submetidas ao desmatamento, 2,7% em bordas florestais, e somente 0,5% em áreas preservadas das ações antrópicas contemporâneas. Atualmente, a descoberta desses sítios arqueológicos ainda ocorre, majoritariamente, posterior ao desmatamento e a degradação ambiental, que removem o dossel florestal e revelam as estruturas. Essas ações antrópicas destroem elementos arqueológicos importantes que possibilitariam compreender os estilos de vida humana passada. A detecção de sítios arqueológicos preservados da era pré-colombiana sob florestas densas, tem o potencial de abrir novas fronteiras de conhecimento na antropologia, arquitetura, arqueologia, ecologia, novas hipóteses sobre o funcionamento e resiliência florestal às mudanças climáticas globais. Assim, o principal objetivo do estudo foi detectar áreas com presença de estruturas arqueológicas inexploradas sob o dossel florestal e modelar o potencial de ocorrência destes sítios na Amazônia. Para isso, cerca de 6.000 km² de dados de Light Detection And Ranging (LiDAR), coletados em diferentes regiões foram processados e inspecionados. Esta análise culminou na descoberta de 24 novas possíveis estruturas pré-colombianas na floresta Amazônica. Destas, 22 foram encontradas sob a cobertura do dossel florestal amazônico. Após esta etapa foi utilizado o modelo preditivo MaxEnt para determinar o potencial de ocorrência dos sítios arqueológicos na Amazônia. Modelos foram desenvolvidos para estabelecer a distribuição potencial dos sítios, um baseado somente nos dados de ocorrências antigas, e outro modelo foi desenvolvido contemplando também as novas descobertas desta dissertação. Foram utilizadas variáveis edáficas e topográficas como preditoras, que revelaram um aumento da área de distribuição de sítios no escudo da Guiana, na calha do rio Amazonas (na Amazônia central) e no sul da Amazônia. Como resultado, as novas estruturas arqueológicas identificadas aumentaram em 733% a quantidade de estruturas localizadas em áreas preservadas das ações antrópicas contemporâneas, e a modelagem indica que elas ainda podem ser encontradas em mais de um quarto dos territórios atualmente inexplorados da floresta Amazônica. Pode-se concluir que a Amazônia possui distribuição abrangente de áreas que no passado foram submetidas à terraplanagem para abrigar assentamentos pré-colombianos, localizados estrategicamente em áreas de floresta de terra firme e várzea.

Palavras-chave: LiDAR. Arqueologia. Pré-colombiano. Geoglifos. Método de Entropia Máxima (MaxEnt).

A NEW PARADIGM OF PRE-COLUMBIAN OCCUPATION IN THE AMAZONIA: LIDAR DETECTION AND MODELING OCCURRENCE OF ARCHAEOLOGICAL STRUCTURES HIDDEN BENEATH THE CANOPY

ABSTRACT

Several researches already developed in the Amazon forest present evidences of extensive pre-Columbian population that inhabited the area. Of these, 96.8% occurred in areas subject to deforestation, 2.7% in forest border, and only 0.5% in areas preserved from contemporary anthropogenic actions. Currently, the discovery of these archaeological sites still occurs, mostly after deforestation and degradation, which remove the forest canopy and reveal the structures. These anthropic actions destroy important archaeological elements that would enable a broader understand of past human life. Detection of archaeological sites preserved from the pre-Columbian era under dense forests has the potential to open new frontiers of knowledge in anthropology, architecture, archeology, ecology, new hypothesis about forest functioning and resilience to global climate change. Thus, the main objective of the study was to detect areas with unexplored archaeological structures beneath the forest canopy and model their potential occurrence over the Amazonia. For this, 6,000 km² of Light Detection And Ranging (LiDAR) data collected in different regions were processed and inspected. This analysis culminated into the discovery of 24 possible new pre-Columbian infrastructures in the Amazonia forest. Of these, 22 were found beneath the forest canopy. After this step the predictive model MaxEnt was used to define the potential of occurrence of other archaeological sites in the Amazon. Models were develop to establish the potential distribution of sites, one based only on old occurrences data, and another model was developed that also contemplates the new findings of this dissertation. Edaphic and topographic variables were used as predictors which revealed an increase of the sites distributions on the Guyana shield, along the Amazon River channel (in central Amazonia) and southern Amazonia. As a result, the newly identified archaeological structures increased by 733% the amount of structures located in areas preserved from contemporary anthropogenic actions, and the modelling indicates that they can still be found in more than a quarter of the currently uncharted territories of the Amazon rainforest. It can be concluded that the Amazon has a wide distribution of areas that in the past were subjected to earthwork construction for pre-Columbian settlements, located strategically on areas of upland and floodplain forests.

Keywords: LiDAR. Archeology. Pre-Columbian. Geoglyph. Maximum Entropy Methods (MaxEnt).

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Primeiras ilustrações publicadas por Dias Júnior e Carvalho (1988) dos geoglifos identificados através do PRONAPABA.	8
Figura 2.2 – Vestígios pré-colombianos em áreas desmatadas da floresta Amazônica vistos por imagens de satélite orbitais.	10
Figura 2.3 – Visão aérea dos geoglifos localizados na Fazenda Colorada no município de Senador Guimard (AC).	12
Figura 2.4 – Retornos dos pulsos laser em sensores de LiDAR aerotransportados de ondas contínuas (full-waveform) emitidos sobre o dossel.	17
Figura 2.5 – Configurações de varredura.	18
Figura 2.6 – Fração da nuvem de pontos do transecto NP_T-0414 do projeto de Monitoramento Ambiental por Satélite no Bioma Amazônia (MSA), evidenciando área de geoglifo em área já desmatada (sem floresta).	21
Figura 3.1 – Fluxograma geral das etapas metodológicas desenvolvidas.	23
Figura 3.2 – Localização da área de estudo.	24
Figura 3.3 – Distribuição espacial dos dados de sensores de LiDAR do projeto MSA.	26
Figura 3.4 – Distribuição espacial dos dados de sensores de LiDAR do programa de pesquisa e desenvolvimento Paisagens Sustentáveis, omitindo áreas de Santa Catarina e São Paulo. ...	29
Figura 3.5 – Distribuição espacial dos dados de sensores de LiDAR grupo de pesquisa <i>Tropical Ecosystems and Environmental Sciences</i> (TREES).	32
Figura 3.6 – Infraestruturas pré-colombianas cravadas no relevo em área de dados LiDAR de conhecimento prévio à pesquisa, localizados no município de Senador Guimard (AC).	37
Figura 3.7 – Distribuição espacial das infraestruturas pré-colombianas já reportadas na literatura.	41
Figura 4.1 – Simulação de classificação única de pontos de solo em transecto de dados do projeto MSA.	45
Figura 4.2 – Pontos observados pelo software LAStools por etapa de processamento.	45
Figura 4.3 – Diagrama aluvial da nuvem de pontos de LiDAR ao longo da dupla classificação de pontos de solo.	46
Figura 4.4 – Histograma da média de pontos de solo por metro quadrado de cada base de dados de LiDAR.	47

Figura 4.5 – Correlações entre a classificação original do projeto Paisagens Sustentáveis e a desenvolvida no estudo.	48
Figura 4.6 – Exemplos de resultados do processamento dos dados de LiDAR.....	49
Figura 4.7 – Distribuição espacial das novas infraestruturas pré-colombianas reportadas pela pesquisa.	51
Figura 4.8 – Estruturas descobertas utilizando dados de LiDAR no sul da Amazônia (SA), norte rotacionado a 68,37°.	52
Figura 4.9 – Infraestrutura pré-colombiana MTE-01 identificada usando dados de LiDAR no sul da Amazônia (SA).....	53
Figura 4.10 – Infraestrutura pré-colombiana MTE-02 identificada usando dados de LiDAR no sul da Amazônia (SA).....	54
Figura 4.11 – Infraestrutura pré-colombiana MTE-03 identificada usando dados de LiDAR no sul da Amazônia (SA).....	54
Figura 4.12 – Infraestrutura pré-colombiana MTE-04 identificada usando dados de LiDAR no sul da Amazônia (SA).....	55
Figura 4.13 – Infraestrutura pré-colombiana MTE-05 identificada usando dados de LiDAR no sul da Amazônia (SA).....	56
Figura 4.14 – Infraestrutura pré-colombiana MTE-06 identificada usando dados de LiDAR no sul da Amazônia (SA).....	56
Figura 4.15 – Exemplo de padrões característicos das vegetações observadas através dos dados de LiDAR e no modelo de altura de dossel.....	57
Figura 4.16 – Relevo sombreado indicando as estruturas identificadas usando dados de LiDAR no sudoeste da Amazônia, norte rotacionado a 43°.	59
Figura 4.17 – Infraestrutura pré-colombiana ACE-01 identificada usando dados de LiDAR no sudoeste da Amazônia (SWA).	60
Figura 4.18 – Infraestrutura pré-colombiana ACE-02 identificada usando dados de LiDAR no sudoeste da Amazônia (SWA).	60
Figura 4.19 – Infraestrutura pré-colombiana ACE-03 identificada usando dados de LiDAR no sudoeste da Amazônia (SWA).	61
Figura 4.20 – Infraestrutura pré-colombiana ACE-04 identificada usando dados de LiDAR no sudoeste da Amazônia (SWA).	62
Figura 4.21 – Infraestrutura pré-colombiana ACE-05 identificada usando dados de LiDAR no sudoeste da Amazônia (SWA).	62
Figura 4.22 – Infraestrutura pré-colombiana ACE-06 identificada usando dados de LiDAR no sudoeste da Amazônia (SWA).	63
Figura 4.23 – Infraestrutura pré-colombiana ACE-07 identificada usando dados de LiDAR no sudoeste da Amazônia (SWA).	64

Figura 4.24 – Infraestrutura pré-colombiana ACE-08 identificada usando dados de LiDAR no sudoeste da Amazônia (SWA).	65
Figura 4.25 – Infraestrutura pré-colombiana ACE-09 identificada usando dados de LiDAR no sudoeste da Amazônia (SWA).	65
Figura 4.26 – Infraestrutura pré-colombiana ACE-10 identificada usando dados de LiDAR no sudoeste da Amazônia (SWA).	66
Figura 4.27 – Relevo sombreado indicando as estruturas identificadas usando dados de LiDAR no escudo da Guiana (GS), norte rotacionado a 0°.	68
Figura 4.28 – Infraestrutura pré-colombiana APE-01 identificada usando dados de LiDAR no escudo da Guiana (GS).	69
Figura 4.29 – Infraestrutura pré-colombiana APE-02 identificada usando dados de LiDAR no escudo da Guiana (GS).	70
Figura 4.30 – Infraestrutura pré-colombiana APE-03 identificada usando dados de LiDAR no escudo da Guiana (GS).	70
Figura 4.31 – Infraestrutura pré-colombiana APE-04 identificada usando dados de LiDAR no escudo da Guiana (GS).	71
Figura 4.32 – Infraestrutura pré-colombiana APE-05 identificada usando dados de LiDAR no escudo da Guiana (GS).	72
Figura 4.33 – Infraestrutura pré-colombiana APE-06 identificada usando dados de LiDAR no escudo da Guiana (GS).	72
Figura 4.34 – Relevo sombreado indicando as estruturas identificadas usando dados de LiDAR na Amazônia central (CA), norte rotacionado a 0°.	74
Figura 4.35 – Infraestrutura pré-colombiana AME-01 identificada usando dados de LiDAR na Amazônia central (CA).	75
Figura 4.36 – Infraestrutura pré-colombiana PAE-01 identificada usando dados de LiDAR na Amazônia central (CA).	76
Figura 4.37 – Matriz de correlação de Pearson para as variáveis edáficas.	77
Figura 4.38 – Matriz de correlação de Pearson para as variáveis topográficas.	78
Figura 4.39 – Curvas de resposta dos dados de ocorrência para as variáveis edáficas incluídas no modelo preditivo MaxEnt.	83
Figura 4.40 – Curvas de resposta dos dados de ocorrência para as variáveis topográficas incluídas no modelo preditivo MaxEnt.	84
Figura 4.41 – Frequência de infraestruturas pré-colombianas em relação a distância à massa d'água mais próxima, considerando a facilidade de acesso para cada região.	85
Figura 4.42 – Teste <i>jackknife</i> para avaliar a importância relativa das variáveis do modelo.	86

Figura 4.43 – Modelo de máxima entropia (MaxEnt) da distribuição de infraestruturas pré-colombianas.....	88
Figura 4.44 – Áreas projetadas pela sensibilidade máxima de treinamento mais especificidade em cada interação do modelo.....	89
Figura 4.45 – Valor do AUC extraído da modelagem que desconsidera novas ocorrências (Figura 4.43b) no local dos sítios arqueológicos detectados.....	91

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 – Parâmetros dos dados do sensor de LiDAR do projeto MSA.....	27
Tabela 3.2 – Parâmetros dos dados de sensores de LiDAR do programa de pesquisa e desenvolvimento Paisagens Sustentáveis.	31
Tabela 3.3 – Parâmetros dos dados de sensor de LiDAR do grupo de pesquisas TREES.	33
Tabela 3.4 – Parâmetros de filtragem no processamento de dados LiDAR.....	35
Tabela 4.1 – Variáveis edáficas consideradas para compor o modelo de máxima entropia MaxEnt.....	79
Tabela 4.2 – Variáveis topográficas consideradas para compor o modelo de máxima entropia MaxEnt.....	80
Tabela 4.3 – Percentual de contribuição e importância de permutação das camadas ambientais incluídas nos modelos de máxima entropia (MaxEnt). ...	82
Tabela A. 1 – Projeção para a quantidade de infraestruturas escondidas sob o dossel da floresta amazônica.....	112
Tabela B. 1 – Extensão total dos dados de LiDAR considerando áreas com sobreposição de dados.	117
Tabela B. 2 – Extensão total dos dados de LiDAR, desconsiderando áreas com sobreposição de dados.	117
Tabela B. 3 – Percentual de áreas inspecionadas, desconsiderando áreas com sobreposição de dados.	118

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AC	Acrisolo
ADE	Terra preta de índio (do inglês <i>Amazonian Dark Earth</i>)
AP	Antes do Presente
AUC	<i>Área Under the receiving operator Curve</i>
BNDES	Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social
CA	Amazônia central (do inglês <i>Central Amazonia</i>)
CCST	Centro de Ciência do Sistema Terrestre
CNA	Centro Nacional de Arqueologia
CNSA	Cadastro Nacional de Sítios Arqueológicos
CO ₂	Dióxido de carbono
CTC	Capacidade de Troca de Catiônica
DGPS	GPS diferencial (do inglês <i>Differential GPS</i>)
EA	Leste da Amazônia (do inglês <i>Eastern Amazonia</i>)
EBA	Estimativa de Biomassa na Amazônia
Embrapa - CNPQ	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Centro Nacional de Pesquisa de Monitoramento por Satélite
ERC	<i>European Research Council</i>
Funarbe	Fundação Arthur Bernardes
GL	Gleissolo
GPS	Sistema de Posicionamento Global (do inglês <i>Global Positioning System</i>)
GS	Escudo da Guiana (do inglês <i>Guiana Shield</i>)
HAND	Distância vertical à drenagem mais próxima (do inglês <i>Height Above the Nearest Drainage</i>)
HydroSHEDS	<i>Hydrological data and maps based on SHuttle Elevation Derivatives at multiple Scales</i>
IMU	Unidade de Medição Inercial (do inglês <i>Inertial Measurement Unit</i>)

INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INS	Sistema Inercial de Navegação (do inglês <i>Inertial Navigation System</i>)
IPHAN	Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional
JRC	<i>Joint Research Centre Data Catalogue</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LiDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
LP	Leptosolo
MDA	Modelo Digital de Altura
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
MSA	Monitoramento Ambiental por Satélites no Bioma Amazônia
NWA	Noroeste da Amazônia (do inglês <i>NorthWestern Amazonia</i>)
PAST	<i>Pre-columbian Amazon-Scale Transformations</i>
PDOP	Diluição da Precisão de Posição (do inglês <i>Position Dilution of Precision</i>)
PDOP	<i>Position Dilution of Precision</i>
pH	Potencial Hidrogeniônico
PRODES	Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia
PRONAPABA	Programa Nacional de Pesquisa Arqueológica na Bacia Amazônica
PT	Plintossolo
REM	Radiação Eletromagnética
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
SA	Sul da Amazônia (do inglês <i>Southern Amazonia</i>)
SGPA	Sistema de Gerenciamento do Patrimônio Arqueológico
SOTERLAC	<i>Soil and Terrain database for Latin America and the Caribbean</i>
SRA	Margem Sul da Amazônia (do inglês <i>Southern Rim of the Amazon</i>)

Sub.	Camada de solo da superfície
Sup.	Camada de solo do subsolo
SWA	Sudoeste da Amazônia (do inglês <i>SouthWestern Amazonia</i>)
TIN	<i>Triangular Irregular Network</i>
TPI	Índice de posição topográfica (do inglês <i>Topographic Position Index</i>)
TREES	<i>TRopical Ecosystems and Environmental Sciences</i>
TRI	Índice de rugosidade do terreno (do inglês <i>Topographic Ruggedness Index</i>)
UNESCO	Organização para a Educação, a Ciência e a Cultura das Nações Unidas (do inglês <i>United Nation Educational, Scientific and Cultural Organization</i>)
USAID	Agência dos Estados Unidos para o Desenvolvimento Internacional (do inglês <i>United States Agency for International Development</i>)
USFS	Serviço Florestal Americano (do inglês <i>United States Forest Service</i>)
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

LISTA DE SÍMBOLOS

H ₂ O	Água
AP	Antes do Presente
≈	Aproximadamente
arcseg	Arco-segundo
cmol.kg ⁻¹	Centimol de carga por quilograma
dS.m ⁻¹	Decisiemens por metro
°	Graus
≥	Maior ou igual
±	Mais ou menos
m	Metro
m a.s.l.	Metro acima do nível do mar (do inglês <i>meters above sea level</i>)
m ²	Metro quadrado
µm	Micrômetro
N°	Número
ppm	Parte por milhão
Pontos.m ⁻²	Pontos por metro quadrado
%	Porcentagem
%wt.	Porcentagem de massa
%vol.	Porcentagem de volume
kg.dm ⁻³	Quilograma por decímetro cúbico
kHz	Quilohertz
km	Quilômetro
km ²	Quilômetro quadrado

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	5
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1 Infraestruturas pré-colombianas na Amazônia.	7
2.2 Sensores de Light Detection And Ranging (LiDAR).	14
2.2.1 Sensor laser.	16
2.2.2 Sistema inercial de navegação.....	19
2.2.3 Sistema de Posicionamento Global.....	19
2.2.4 Processamento de dados.....	20
3. MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1 Área de estudo.	24
3.2 Conjunto de dados LiDAR.	25
3.2.1 Projeto de Monitoramento Ambiental por Satélites no Bioma Amazônia.....	25
3.2.2 Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Paisagens Sustentáveis.	27
3.2.3 Grupo de Pesquisa TRopical Ecosystems and Environmental Sciences.	32
3.3 Processamento dos dados de LiDAR.....	33
3.4 Identificação de infraestruturas pré-colombianas.	36
3.5 Modelagem de distribuição de infraestruturas pré-colombianas. ...	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1 Processamento de dados de LiDAR.	44
4.2 Descobertas de infraestruturas pré-colombianas.	50
4.2.1 Descobertas no sul da Amazônia (SA).....	51
4.2.2 Descobertas no sudoeste da Amazônia (SWA).	58
4.2.3 Descobertas no escudo da Guiana (GS).....	67
4.2.4 Descobertas na Amazônia central (CA).	73
4.3 Modelagem de distribuição de infraestruturas pré-colombianas. ...	77
4.3.1 Seleção das variáveis preditoras para modelagem.....	77
4.3.2 Modelagem da distribuição de infraestruturas pré-colombianas. ...	81

5. CONCLUSÕES.....	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	96
ANEXO A – TABELA DA PROJEÇÃO DAS INTERAÇÕES DA MODELAGEM MAXENT PARA NOVAS INFRAESTRUTURAS PRÉ- COLOMBIANAS.	112
ANEXO B – TABELA DE ÁREAS DOS CONJUNTOS DE DADOS DE LIDAR.	117

1. INTRODUÇÃO

A ecologia histórica considera a floresta Amazônica como um local onde há assentamentos humanos, densos e complexos, com paisagens domesticadas em toda a sua extensão, que se desenvolveram ao longo dos séculos (BALÉE; ERICKSON, 2006; MAEZUMI et al., 2018; MCMICHAEL et al., 2012; SILVERMAN; ISBELL, 2008). A Amazônia contém o maior reservatório de carbono tropical da Terra, contudo ainda existem incertezas sobre quais fatores determinam sua capacidade de remoção de C atmosférico pela vegetação. Esta questão, em aberto, pode ter duas explicações, uma ecológica e outra arqueológica. A hipótese ecológica, relaciona o sumidouro de C Amazônico à fertilização de C atmosférico, que por sua vez, aumenta a eficiência de uso do C pelas plantas. A hipótese arqueológica, por outro lado, afirma que este sumidouro é uma consequência de distúrbios florestais relacionados a ocupação pretérita da Amazônia, que atualmente se encontra em processo de regeneração (HECKENBERGER et al., 2003; PHILLIPS et al., 2009a).

Definir o quão natural ou o quão manejada a floresta Amazônica se apresenta atualmente é crítico para a compreensão e modelagem das respostas da vegetação tropical às atuais mudanças da composição atmosférica de gases de efeito estufa e climática, afetando diretamente na resiliência ambiental deste bioma (BRIENEN et al., 2015; HUNTINGFORD et al., 2013). Assim, é crucial compreender o desenvolvimento humano passado, junto com a sua dinâmica histórica, para melhor compreender possíveis respostas da vegetação e ordenar tomadas de decisões para o futuro (BARLOW et al., 2012; MAYLE; IRIARTE, 2014; WATLING et al., 2018).

Padrões de assentamentos associados às infraestruturas construídas no relevo, terra preta de índio (ADE do inglês *Amazonian Dark Earth*), terraços, campos elevados, redes de transporte e comunicação, e manejo hídrico para piscicultura, são conhecidos e demonstram a construção e modificação de

feições no terreno para o uso da terra no período pré-colombiano (antes da chegada e/ou contato com os europeus) que resistiram ao longo do tempo (BLATRIX et al., 2018; ERICKSON, 2000; MCKEY et al., 2016; SILVERMAN; ISBELL, 2008). A descoberta de infraestruturas e cerâmicas localizadas no leste da Amazônia no século XIX, e no oeste no século XX, fortaleceu a visão da floresta amazônica como um parque cultural, que teve em seu passado um amplo desenvolvimento social e ambiental (BUSH et al., 2015; DERBY, 1879; ERICKSON, 2000; HECKENBERGER et al., 2003; HOOPE; BARNETT, 1995; SCHAAN, 2012).

Estes legados pré-colombianos foram descobertos majoritariamente na floresta Amazônica, de leste a sudoeste, devido ao avanço do arco do desmatamento, que há décadas elimina a cobertura florestal e permite a observação das estruturas, ocultadas pelo dossel. As ocorrências contemplam diferentes habitats, como as savanas localizadas em Llanos de Moxos ao norte da Bolívia, as florestas de várzea no estado do Acre, as florestas de terra firme localizadas no Alto Xingu no estado brasileiro de Mato Grosso, e até mesmo fora da floresta amazônica em savanas ao sul do Brasil (ERICKSON, 2000; HECKENBERGER et al., 2003; IPHAN, 2018; IRIARTE et al., 2010; SCHAAN, 2012).

A região de Llanos de Moxos apresenta infraestruturas conhecidas como valas circulares (do inglês *ringed ditches*) que desempenhavam funções defensivas (paliçadas). Há também campos elevados (do inglês *raised fields*) associados à terraplanagem para apreender ou armazenar água perto de áreas agrícolas e habitacionais (BLATRIX et al., 2018; SAUNALUOMA, 2010; WALKER, 2008).

No estado do Acre, infraestruturas pré-colombianas conhecidas como geoglifos (do inglês *geoglyphs*) são formas geométricas e simétricas construídas no terreno. Estes são interpretados como construções defensivas devido ao posicionamento estratégico no relevo, ou para encontros religiosos

comunitários, devido à presença de urnas funerárias identificadas em alguns sítios (WATLING et al., 2017).

Estruturas do Alto Xingu são interpretadas como assentamentos fortificados (do inglês *fortified settlements*), reunidos em um padrão multicêntrico, assentados em volta de grandes praças centrais, onde eram desenvolvidas as atividades políticas e religiosas. Além disto, alguns destes locais teriam a função de cemitério ou lares dos chefes hereditários. Os lares eram comumente estabelecidos em pontos-chave ao redor da praça central. Esses centros eram interligados, por redes de estradas, às outras infraestruturas que exerciam outras funções sociais fundamentais. Os arranjos desses assentamentos são semelhantes ao padrão atual das comunidades indígenas do Parque Indígena do Xingu (DE SOUZA et al., 2018; HECKENBERGER, 2005; HECKENBERGER et al., 2003, 2008).

Até agora mais de 820 infraestruturas construídas foram relatadas para a Amazônia, descobertas principalmente pelo avanço do desmatamento e degradação florestal (DE SOUZA et al., 2018; IPHAN, 2018; JACOBS, 2018; RAMPANELLI, 2016). A descoberta desses sítios arqueológicos em áreas desmatadas, apesar de trazerem inúmeros benefícios em várias áreas da ciência, ainda entrava a compreensão dos efeitos da vida humana passada na atual composição da floresta Amazônica.

A busca de novos sítios arqueológicos em locais não desmatados, na vasta quantidade de territórios inexplorados pelos povos contemporâneos, é essencial para subsidiar um melhor conhecimento da história da Amazônia. O entendimento em larga escala, depende da exploração destas estruturas em florestas de terra firme, que representam ≈83% da área da bacia Amazônica (HAUGAASEN; PERES, 2006; HESS et al., 2003). Com informações mais completas sobre a distribuição destes sítios, torna-se possível fazer inferências mais robustas sobre como as práticas dos povos pré-colombianos foram capazes de sustentar grandes populações sedentárias, através da

domesticação da floresta e, como este antigo manejo da floresta pode, ainda, estar influenciando a atual composição e o funcionamento florestal (HECKENBERGER et al., 2003; LEVIS et al., 2017; PÄRSSINEN et al., 2009; PÄRSSINEN et al., 2003; STENBORG et al., 2012; WATLING et al., 2015).

Os elementos moldados na paisagem amazônica deixados por comunidades pré-colombianas podem fazer parte de um sistema muito mais amplo, presente por toda a floresta. O conhecimento atual da distribuição de infraestruturas construídas na direção Leste-Oeste na borda sul da Amazônia tem relação direta com o avanço do arco do desmatamento sob áreas, que até então, eram inexploradas (CLEMENT et al., 2015; LEVIS et al., 2017). Assim, comprovar a extensa distribuição dessas estruturas em florestas de várzea e terra firme fortalecera as visões de que a composição e estrutura florística moderna foi influenciada pela atividade humana passada (BARLOW et al., 2012; CLEMENT et al., 2015; GEDDES, 2009; HECKENBERGER et al., 2003, 2007, 2008, 1999; LEVIS et al., 2017; MAYLE; IRIARTE, 2014; ROOSEVELT et al., 2012; SCHAAN, 2012; WATLING et al., 2017, 2018). A ampliação de nosso conhecimento atual limita-se pela nossa capacidade de explorar assentamentos ocultos pelo dossel da floresta Amazônica. Contudo, tecnologias modernas como o *Light Detection And Ranging* (LiDAR), podem transformar o conhecimento atual sobre a ocupação amazônica.

Alinhado a essa perspectiva, este estudo utilizou dados de LiDAR e modelagem matemática para: (i) detectar novas estruturas pré-colombianas no território Amazônico, preenchendo vazios na distribuição catalogada na pela literatura, (ii) apresentar novos padrões da ocupação pré-colombiana ao longo de territórios inexplorados sob a floresta, e (iii) avaliar a distribuição desse sistema por toda a Amazônia.

1.1 Objetivos

Esta pesquisa foca em duas hipóteses fundamentais. A primeira (H1) é de que ainda existem estruturas arqueológicas não descobertas ocultas pelo dossel florestal. A validação da primeira hipótese, permite testar a segunda hipótese (H2) do trabalho que afirma que a extensão de ocorrência dos sítios arqueológicos é mais ampla do que a distribuição atualmente conhecida. Portanto, este estudo visa comprovar que os vestígios moldados na paisagem amazônica deixados por comunidades pré-colombianas, atualmente identificados, fazem parte de um sistema muito mais amplo, presente por toda a extensão da floresta Amazônica.

Assim, o objetivo geral desta dissertação foi quantificar o potencial arqueológico pré-colombiano existente em áreas inexploradas da Amazônia através do uso de LiDAR, para a identificação de infraestruturas construídas sob o dossel florestal, e da modelagem matemática para quantificar a distribuição potencial de sítios arqueológicos na região amazônica.

Buscando cumprir o objetivo geral da dissertação, os objetivos específicos foram estabelecidos de forma sequencial:

- 1) Desenvolver uma metodologia de classificação de pontos de solo em nuvem de pontos de sensores de *Light Detection And Ranging* (LiDAR) que inclua a detecção de pequenas variações no relevo.
- 2) Identificar e caracterizar novas ocorrências de infraestruturas pré-colombianas sob o dossel da floresta Amazônia a partir dos dados de LiDAR.
- 3) Modelar a probabilidade de distribuição potencial de outras infraestruturas pré-colombianas ao longo da floresta Amazônica, analisando a influência da inclusão das novas estruturas detectadas.
- 4) Avaliar a importância das variáveis ambientais para o estabelecimento dos sítios arqueológicos.

- 5) Projetar a quantidade de infraestruturas que ainda possam existir em áreas ainda inexploradas, pela sociedade contemporânea, da floresta Amazônica.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Infraestruturas pré-colombianas na Amazônia

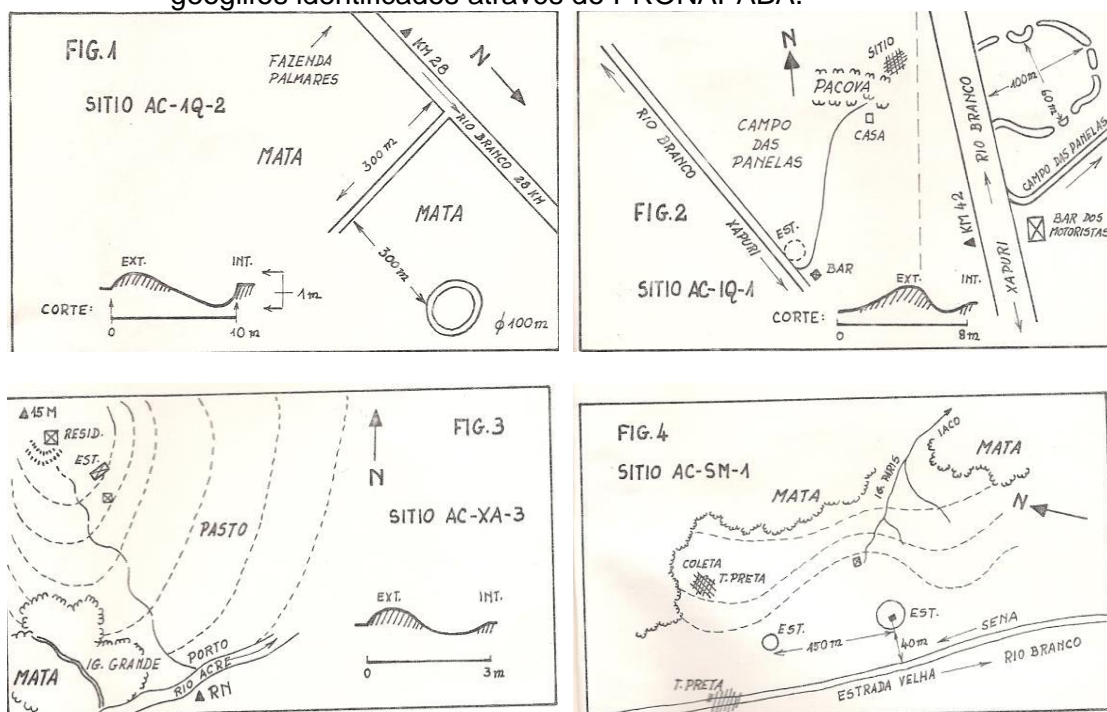
Em toda a Amazônia, pesquisas arqueológicas têm sido desenvolvidas desde o século XIX, sendo a mesorregião do Baixo Amazonas o enfoque principal das pesquisas nesse período (DERBY, 1879; FERREIRA PENNA, 1876, 1877; HARTT, 1871). Ao longo dos anos, muita coisa mudou no modo de pensar e pesquisar a história da floresta, que no final da década de 1970, passou a sofrer consequências da expansão da ocupação territorial brasileira. Esta expansão foi estimulada pelo governo brasileiro, resultando no avanço do desmatamento sob áreas, até então, florestais (FEARNSIDE, 2017; SCHAAN, 2012).

O desmatamento no estado do Acre levou à descoberta dos primeiros sítios arqueológicos da Amazônia ocidental através do Programa Nacional de Pesquisa Arqueológica na Bacia Amazônica (PRONAPABA), promovido por uma equipe de acadêmicos afiliados ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Instituto Smithsonian (MANN, 2008; RAMPANELLI, 2016; SCHAAN, 2012). Em 1988, Dias Júnior e Carvalho publicaram a primeira caracterização de oito (8) estruturas circulares identificadas no Acre durante a execução do PRONAPABA, apresentadas na Figura 2.1 (DIAS JÚNIOR; CARVALHO, 1988). O diâmetro dessas estruturas variou entre 50 e 120 m, com trincheiras (valas) de 2 a 10 m de largura e 1 m de profundidade. Estas foram identificadas em áreas antropizadas pelo desenvolvimento da agricultura e pecuária (DIAS JÚNIOR; CARVALHO, 1988; MANN, 2008; PÄRSSINEN et al., 2009; SCHAAN, 2012).

Apesar das descobertas, a comunidade científica ignorou essas estruturas em áreas de terra firme, e o debate sobre suas implicações para a complexidade social foi evitado por um tempo. As pesquisas arqueológicas continuaram a seguir a visão tradicional de que a população pré-colombiana se concentrava

em planícies de inundações (várzea), ricas em recursos (DE SOUZA et al., 2018; LATHRAP, 1970; MEGGERS, 1971; SCHAAN, 2012). A descoberta de Dias Júnior e Carvalho (1988) só foi reconhecida nacional e internacionalmente no início do século XX, quando foram apresentadas novas tendências e evidências que fortaleceram a visão da floresta Amazônica como um parque cultural construído, adaptado e povoado (HECKENBERGER et al., 2003, 2008; RAMPANELLI, 2016).

Figura 2.1 – Primeiras ilustrações publicadas por Dias Júnior e Carvalho (1988) dos geoglifos identificados através do PRONAPABA.



Esboços que indicam a localização dos primeiros geoglifos ao longo da rodovia para a cidade de Xapuri (saindo de Rio Branco), no estado do Acre. É destacado o perfil topográfico das estruturas, com o acúmulo de sedimento na borda exterior (“ext.”) e trincheira na borda interior (“int.”)

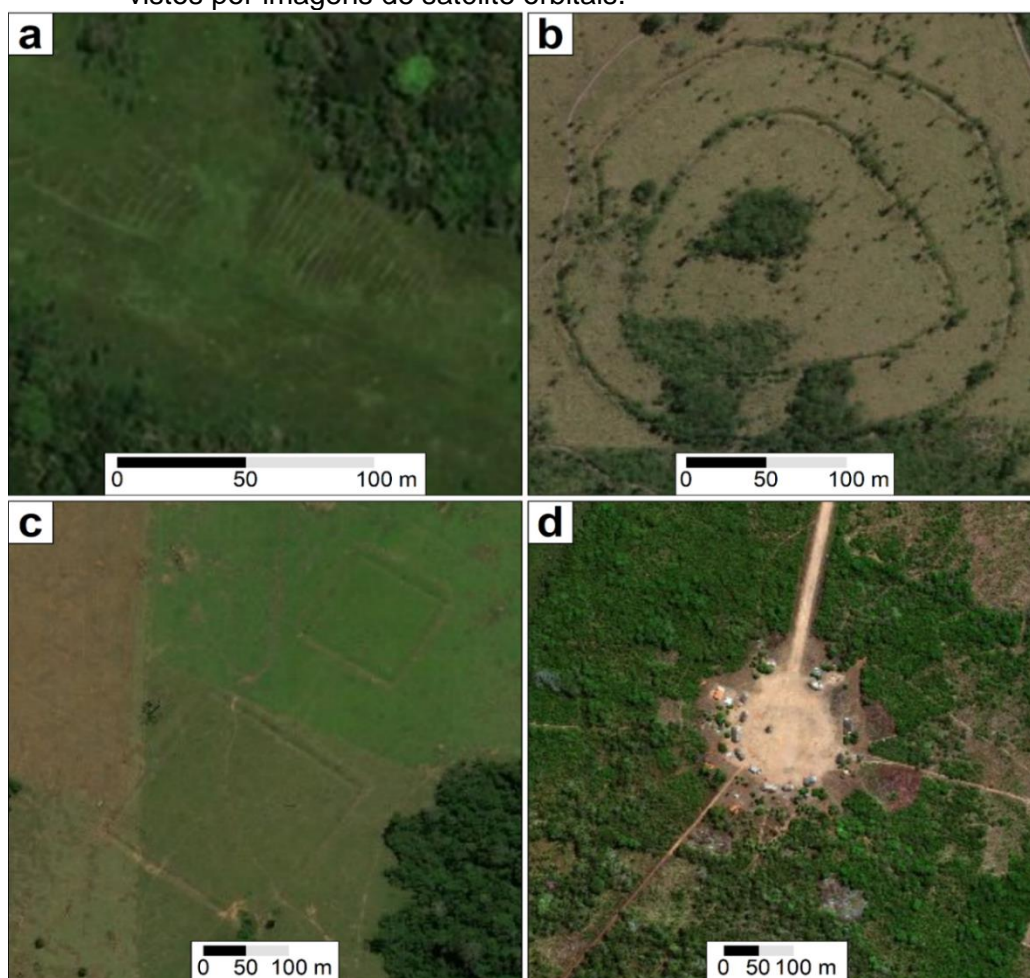
Fonte: Adaptado de Dias Júnior e Carvalho (1988).

Atualmente, após grandes avanços científicos nessa temática, já se tem conhecimento da existência de mais de 820 infraestruturas construídas localizadas nos estados do Acre, Rondônia, Amazonas e Mato Grosso no

Brasil, e também na região de Llanos de Moxos na Bolívia, a exemplo da Figura 2.2 (RAMPANELLI, 2016).

A datação por radiocarbono das estruturas pré-colombianas localizadas no estado do Acre mostrou que elas podem ser antigas, tendo suas formações ocorrendo entre 120 a 400 anos depois de cristo (DC). As formações localizadas próximas ao estado do Mato Grosso, por outro lado, são mais recentes, datando de 1250 a 1500 D.C. (DE SOUZA et al., 2018; MANN, 2008). Nesse sentido, essas estruturas são definidas como pré-colombianas, pois foram construídas antes da chegada e/ou contato com os europeus, que ocorreu por volta dos anos de 1500 D.C. (SANTOS et al., 2018).

Figura 2.2 – Vestígios pré-colombianos em áreas desmatadas da floresta Amazônica vistos por imagens de satélite orbitais.



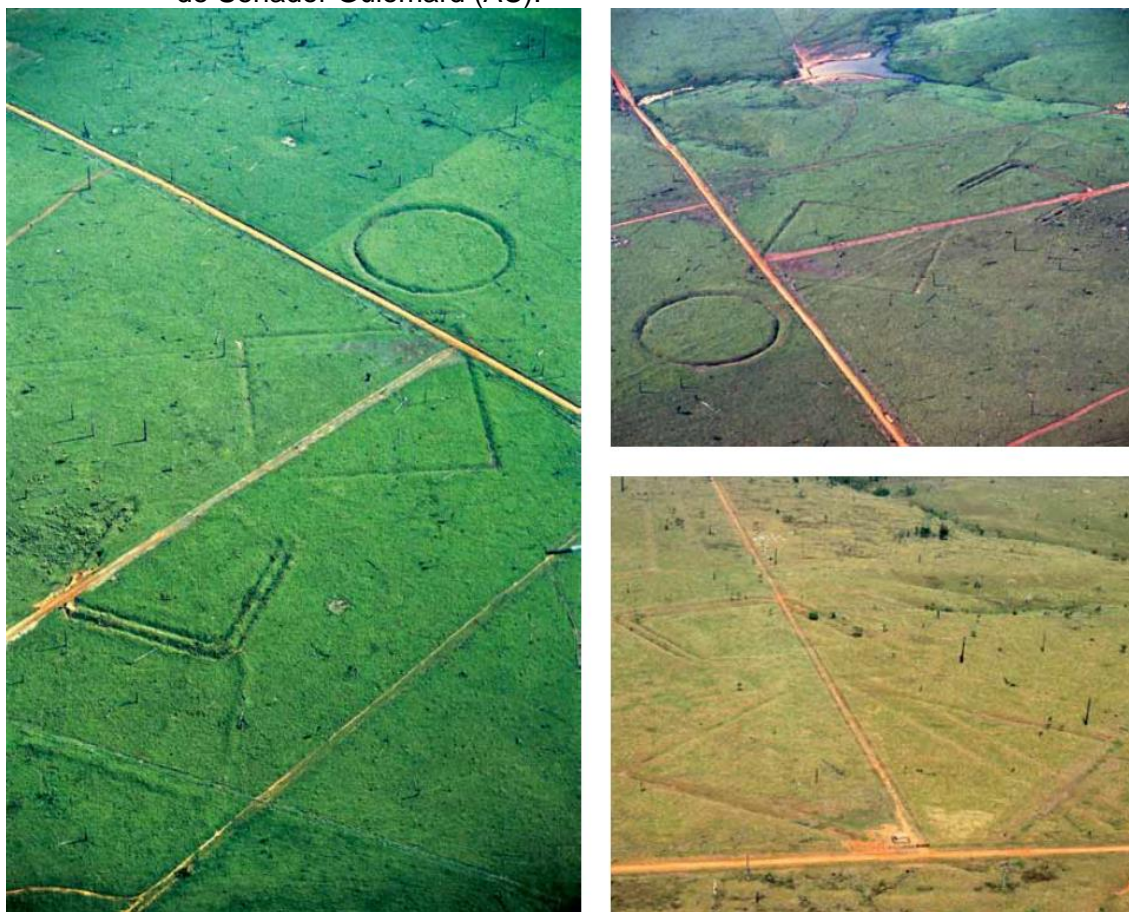
Infraestruturas pré-colombianas identificadas em imagens orbitais da Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, USDA FSA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, e da comunidade de usuários GIS. (a) Campos elevados na Bolívia. (b) Valas circulares na Bolívia. (c) Geoglifos retangulares com estradas radiantes na Fazenda Paraná, localizada no estado do Acre. (d) Praça central contemporânea no Alto Xingu, localizado no estado do Mato Grosso (MT).
Fonte: Produção do autor.

Estas infraestruturas constituídas por montes ou valas no solo foram denominadas de “geoglifos” por Ranzi, geógrafo e paleontólogo que desde o programa PRONAPABA as estuda. Suas formas são melhores visualizadas a partir de uma vista aérea (Figura 2.3), similares aos geoglifos do deserto de Nazca no Peru (MANN, 2008; RAMPANELLI, 2016; SCHAAN, 2012). Apesar de apresentarem semelhança visual, essas estruturas têm diferentes

formações e funcionalidades, tendo sido desenvolvida assim, uma variedade de terminologias na literatura que são associadas às infraestruturas pré-colombianas da Amazônia (RAMPANELLI, 2016; SANTOS et al., 2018).

As infraestruturas construídas pelos povos pré-colombianos abordadas nessa pesquisa incluem assentamentos, montes de terra, valas e trincheiras, diques, estradas, etc. que foram referidas na literatura como: (1) estruturas de terra delimitadas por trincheiras (SCHAAN et al., 2010a); (2) *geometrically patterned ditched enclosures* (SCHAAN et al., 2010b, 2008); (3) construções geométricas em terra (SCHAAN et al., 2008); (4) valas circulares (ERICKSON et al., 2008), (5) aterros e valas (HECKENBERGER et al., 2007; SAUNALUOMA, 2010; WALKER, 2008); (6) geoglifos (MCMICHAEL et al., 2014a; PAPPAS, 2017; SAUNALUOMA et al., 2018); entre outros.

Figura 2.3 – Visão aérea dos geoglifos localizados na Fazenda Colorada no município de Senador Guiomard (AC).



Fonte: Adaptado de Schaan, Ranzi e Barbosa (2010).

Essas estruturas são, desde 2015, candidatas a se tornarem patrimônio histórico e material pela Organização para a Educação, a Ciência e a Cultura das Nações Unidas (UNESCO do inglês *United Nation Educational, Scientific and Cultural Organization*) (UNESCO, 2015). No Brasil, essas estruturas (geoglifos) são patrimônios culturais brasileiros reconhecidos pela Constituição Federal de 1988 (art. 216), definidos e protegidos pela Lei Federal nº 3.924, de 26 de julho de 1961, sendo função do Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) efetuar a proteção e a promoção dos bens culturais do país (BRASIL, 1961, 1988).

A catalogação dessas estruturas é realizada pelo IPHAN através do Cadastro Nacional de Sítios Arqueológicos (CNSA), que compõe o Sistema de Gerenciamento do Patrimônio Arqueológico (SGPA), sendo necessária a validação da área de registro e o cadastro no Centro Nacional de Arqueologia (CNA) (IPHAN, 2018).

Apesar do crescente interesse popular e dos avanços científicos sobre a temática, ainda existe um desconhecimento da abrangência espacial, uma vez que essas infraestruturas pré-colombianas são encontradas, principalmente, em áreas desmatadas e de acesso mais facilitado (DE SOUZA et al., 2018; SANTOS et al., 2018). Isto ocorre, em parte, por conta da maior facilidade em identifica-las em campo quando há a ausência de vegetação (SANTOS et al., 2018).

A grande extensão da floresta Amazônia e a dificuldade de executar buscas em campo ou por sobrevoo em áreas de floresta dificultam a identificação de estruturas em ambientes preservados. Porém, com o desenvolvimento de tecnologias emergentes, é possível detectar remotamente ações antrópicas, mesmo em áreas sob adensamento da cobertura florestal (SANTOS et al., 2018).

Nesse sentido, o sensoriamento remoto é uma ferramenta valiosa que pode ajudar a preencher lacunas no conhecimento entre cientistas do sistema terrestre (SANTOS et al., 2018). O uso de imagens de sensores orbitais de alta resolução espacial tem viabilizado a busca por essas estruturas a partir da inspeção visual. Mais recentemente, foi demonstrado que sensores de *Light Detection and Ranging* (LiDAR), em plataformas sub-orbitais, permitem a identificação de infraestruturas pré-colombianas sob o dossel denso de florestas tropicais (BEWLEY et al., 2005; CHASE et al., 2011, 2012, 2014a, 2014b; DE SOUZA et al., 2018; DEVEREUX et al., 2008; EVANS et al., 2013; HESSE, 2010; KHAN et al., 2017; MCCOY et al., 2011; MCKEY et al., 2010; SANTOS et al., 2018; ŠTULAR et al., 2012; WATLING et al., 2017).

2.2 Sensores de Light Detection And Ranging (LiDAR)

O *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, mais conhecido como LASER, teve a sua ideia concebida por volta de 1905 por Albert Einstein. Baseado na teoria quântica de Planck do ano de 1900, Einstein estabeleceu que a partir da interação de átomos, íons e moléculas com a Radiação Eletromagnética (REM), por meio da emissão estimulada de luz seriam emitidos fótons, e que tais emissões resultariam em uma fonte de luz altamente concentrada, brilhante e poderosa (NASCIMENTO JÚNIOR et al., 2006).

Partindo dessa teoria, vários estudos foram realizados visando desenvolver os mais variados tipos de LASER, empregando diferentes tipos de materiais como emissores de pulsos lasers. O primeiro apresentava seu meio ativo constituído por um cristal de rubi, buscando estimar o tempo gasto pela luz para deslocar-se do transmissor até o alvo e retornar ao receptor (NASCIMENTO JÚNIOR et al., 2006).

O *Light Detection And Ranging*, mais conhecido como LiDAR, é um sensor que utiliza pulsos lasers que, desde a década de 1980, passou a ser utilizado juntamente com as Unidades de Medição Inercial e permitiu o rápido amadurecimento da tecnologia. Hoje, tem-se utilizado o LiDAR para estudos e atividades que buscam a representação tridimensional de superfícies e distâncias (PACHECO et al., 2011).

Os sensores de LiDAR emitem milhares de pulsos por segundo, geralmente, na faixa espectral do infravermelho próximo (1.040 a 1.060 μm) para levantamentos topográficos e na faixa do espectro visível azul/verde (532 μm) para levantamento batimétrico devido à capacidade de penetração na água (JENSEN, 2009). O sensor calcula distâncias e a intensidade de energia refletida pelo alvo a partir da altitude do feixe de captura, resultando em uma nuvem de pontos composta pelo registro contínuo de coordenadas cartesianas (X, Y e Z) que correspondem à localização de feições e objetos localizados

sobre o terreno (GIONGO et al., 2010; LEITOLD et al., 2015; PEREIRA et al., 2019).

Os pulsos enviados pelo sensor podem ter retornos únicos ou múltiplos, de forma que dependendo da altitude e do ângulo de envio possam penetrar por pequenas aberturas no dossel de florestas, adquirindo informações tanto da cobertura e estrutura vegetal, quanto do relevo da área sob o dossel da vegetação (GIONGO et al., 2010; LEITOLD et al., 2015; SU; BORK, 2006).

Contudo, apesar de apresentarem rápido processo de coleta de dados sobre uma determinada área, sensores de LiDAR apresentam limitação quanto a reflectância dos materiais presentes na cena. Assim, se o pulso laser não for refletido adequadamente por um determinado material, não ocorre o cálculo da coordenada (ou intensidade) referente ao pulso (BALTSAVIAS, 1999; JENSEN, 2009; MOSTAFA; HUTTON, 2001; NASCIMENTO JÚNIOR et al., 2006; WEHR; LOHR, 1999). Portanto, para obtenção de dados em áreas com alvos de alta reflectância, a aplicação do sensor de LiDAR é realizada utilizando menores frequências de pulsos para reduzir a quantidade de múltiplas reflexões. Áreas de alta reflectância têm ocorrência tanto no meio urbano, causadas por prédios espelhados, quanto no meio rural, causadas por terras alagadas e pelo orvalho sobre as plantas, gerando uma camada de água sobre a vegetação (BALTSAVIAS, 1999; JENSEN, 2009; WEHR; LOHR, 1999).

As informações coletadas através do LiDAR podem ser adquiridas em níveis orbitais ou suborbitais, como plataformas estáticas, terrestres e aéreas (GIONGO et al., 2010; JENSEN, 2009).

Nesse sentido, nas seções 2.2.1 a 2.2.3 é realizado o detalhamento dos componentes e de como é realizado o registro de informações através desse sensor, para que haja uma maior compreensão ao longo da análise desses dados. De acordo com Giongo et al. (2010), sensores de LiDAR são compostos basicamente por sensor laser, sistema inercial de navegação e Sistema de Posicionamento Global (GPS). Os conceitos aplicados no processo de

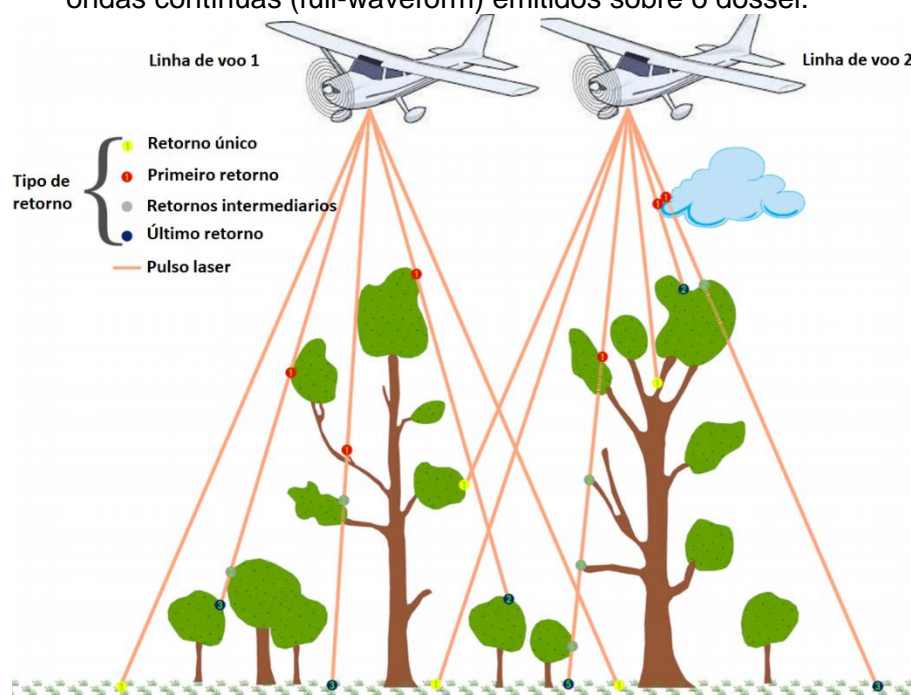
classificação de pontos de solo (processamento de dados) são identificados em seguida, na seção 2.2.4, para fundamentar as questões que devem ser consideradas a fim de atender o primeiro (1º) objetivo proposto de desenvolvimento de metodologia para classificação de nuvem de pontos de sensores de LiDAR.

2.2.1 Sensor laser

A coleta de dados da superfície é realizada a partir da repetição do pulso laser em uma determinada frequência de operação. Ao atingir um alvo, parte do pulso emitido é refletido de volta ao sensor, assim, a radiação refletida em direção ao sensor é coletada através de um sinal analógico registrado pelo sistema receptor do sensor. Em seguida, o sinal analógico é convertido em digital e passa por um filtro de suavização para verificar se o sinal recebido possui a mesma intensidade que o sinal emitido (GIONGO et al., 2010).

A informação de retorno coletada por sistemas LiDAR é distinguida em duas classes: (1) a de retorno discreto, capaz de registrar um pequeno número de retornos (primeiro e últimos), tendo como característica o diâmetro do ponto projetado no solo (*footprint*), pequeno, entre 0,2 a 0,9 m; (2) a de ondas contínuas (*full-waveform*) capaz de registrar vários retornos (primeiro, último e intermediários) e com *footprint* maior, entre 8 a 70 m, conforme a Figura 2.4 (GIONGO et al., 2010; LEITOLD, 2014; LEITOLD et al., 2015).

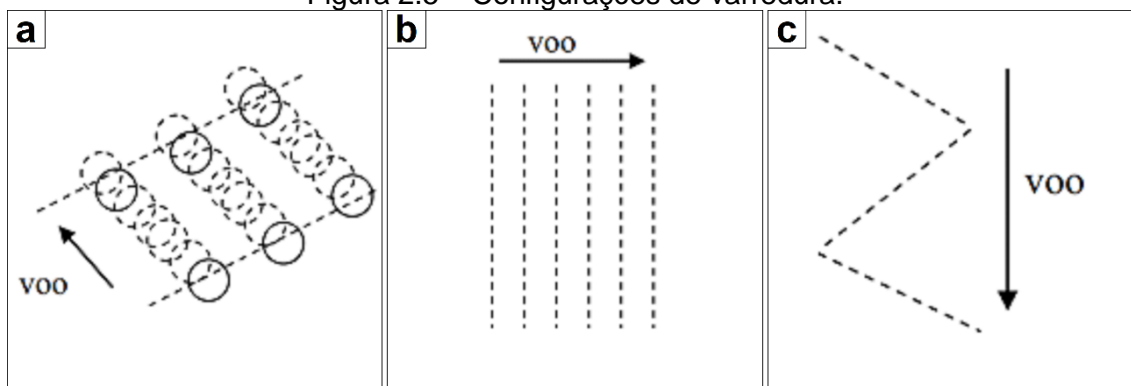
Figura 2.4 – Retornos dos pulsos laser em sensores de LiDAR aerotransportados de ondas contínuas (full-waveform) emitidos sobre o dossel.



Fonte: Adaptado de Martin Isenburg (2015).

A varredura da superfície é efetuada através do conjunto óptico do sistema, composto por lentes e espelhos ótico-mecânicos, que realiza o redirecionamento e recepção sequencial dos pulsos. As configurações dos espelhos de varredura produzem padrões em elipsoides, linhas paralelas e “zigue-zague”, conforme a Figura 2.5.

Figura 2.5 – Configurações de varredura.



Configuração (a) Varredura palmer. (b) Polígono rotatório. (c) Espelho oscilante.
 Fonte: Adaptado de Galvanin e Dal Poz (2013).

A varredura é realizada em sentido transversal à linha de voo, assim, para estimar o tamanho da faixa de varredura, deve ser considerado o ângulo formado pelos espelhos que redirecionam o feixe, através da Equação 2.1 (BALTSAVIAS, 1999; BRANDALIZE, 2002; WEHR; LOHR, 1999).

$$L = 2 \cdot H \cdot \tan \beta \quad (2.1)$$

Onde L é a largura da faixa de varredura; H é a altura de voo em metros; $\tan \beta$ é o ângulo de abertura.

Dado que a frequência da varredura e de pulsos lasers determina a densidade do perfil, ou seja, determina a distribuição dos pontos na superfície, afetando o espaçamento entre eles, quanto maior a frequência, maior é a densidade e menor é o espaçamento entre pontos. O espaçamento entre pontos pode ser estimado através da Equação 2.2 (BALTSAVIAS, 1999; BRANDALIZE, 2002; WEHR; LOHR, 1999).

$$E_{\text{perfil}} = \frac{N^{\circ}_{\text{perfil}} \cdot f_{\text{perfil}} \cdot L}{f_{\text{oper}}} \quad (2.2)$$

Onde $N^{\circ}_{\text{perfil}}$ é o número de perfis transversais (1 = unidirecional; 2 = bidirecional); f_{perfil} é a frequência do conjunto ótico do sistema; f_{oper} é a frequência de pulsos lasers; e L é a largura da faixa de varredura.

É importante ressaltar a necessidade de conhecimento sobre a operação do sistema, cujo intuito é determinar parâmetros de voo que resultarão na aquisição de informação válida e exata para o estudo.

2.2.2 Sistema inercial de navegação

O Sistema Inercial de Navegação (INS do inglês *Inertial Navigation System*) é composto por uma Unidade de Medição Inercial (IMU do inglês *Inertial Measurement Unit*) que é formada por um conjunto de giroscópios e acelerômetros, um circuito de digitalização e uma unidade de cálculo (GIONGO et al., 2010).

Os giroscópios analisam a posição e desvios em torno dos eixos posicionais de pitch, roll e heading (eixos X, Y e Z) da aeronave, fornecendo a orientação azimutal, e os acelerômetros são responsáveis pela velocidade incremental (aceleração) da aeronave (BRANDALIZE, 2002; GIONGO et al., 2010).

Através das informações de movimentos de rotação e de velocidade da aeronave, a integração do sistema inercial com o Sistema de Posicionamento Global (GPS) possibilita a orientação em tempo real para a aeronave. Nota-se também que o sistema inercial tem a necessidade de ser instalado o mais próximo possível do sensor LiDAR para garantir maior precisão (BRANDALIZE, 2002; GIONGO et al., 2010; MOSTAFA; HUTTON, 2001).

2.2.3 Sistema de Posicionamento Global

O receptor GPS localizado na aeronave é responsável por registrar a posição do sensor em intervalos fixos. Para estabelecer maior precisão é utilizado

receptor de dupla frequência (L1 e L2), sendo interno e de baixo ruído, permitindo um rastreamento mais preciso por posicionamento Real Time Kinematic (RTK). Esses receptores, que empregam código C/A e o código P na dupla frequência (L1 e L2) têm precisão típica de 1 parte por milhão (ppm) resultando em um melhor desempenho e precisão, além de operarem com capacidade e sem interrupção (TIMBÓ, 2000).

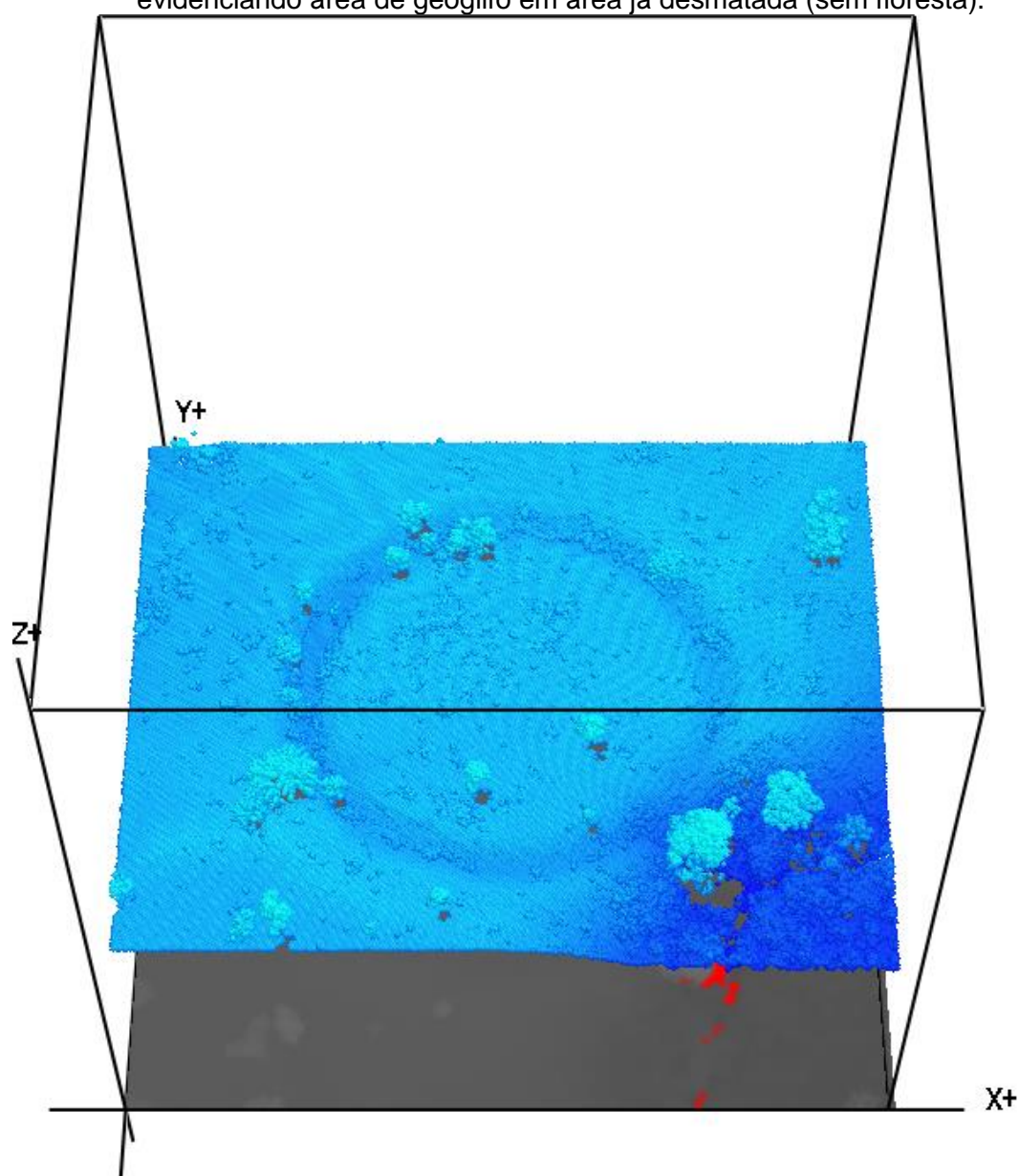
Em terra se estabelece uma rede de estações base, responsáveis pela correção diferencial do GPS (DGPS). A correção aprimora os dados posicionais do GPS através da correção de erros inerentes ao processo, realizando a determinação de posição mais precisa (GIONGO et al., 2010; TIMBÓ, 2000).

É recomendável não operar a aeronave em distâncias superiores a 20 km das estações de base. Também recomenda-se realizar a coleta de dados sob visada de no mínimo cinco satélites do sistema de posicionamento global e um Position Dilution of Precision (PDOP), para obter uma maior exatidão dos pontos levantados a partir do sensor de LiDAR instalado em plataformas aéreas (GIONGO et al., 2010; GUTIÉRREZ et al., 2001).

2.2.4 Processamento de dados

A coleta de dados do terreno a partir de sensores de LiDAR gera como produto final uma nuvem de pontos, composta pelo registro contínuo de coordenadas cartesianas (X, Y e Z) que correspondem à localização de feições e de objetos sobre o terreno, conforme a Figura 2.6.

Figura 2.6 – Fração da nuvem de pontos do transecto NP_T-0414 do projeto de Monitoramento Ambiental por Satélite no Bioma Amazônia (MSA), evidenciando área de geoglifo em área já desmatada (sem floresta).



Fonte: Produção do Autor.

A representação espacial pode ser realizada através de Modelos Digitais de Superfície (MDS) que importam todas as estruturas existentes sobre a superfície do terreno como edificações e vegetação, ou seja, o modelo contém todos os dados brutos coletados pelo sensor. Já os Modelos Digitais de Terreno (MDT) são uma representação estatística contínua apenas do terreno, removendo estruturas e vegetação. Ou ainda, a representação pode ser

realizada pelos Modelos Digitais de Altura (MDA), resultado da subtração do MDE pelo MDT. O MDA representa os elementos presentes acima de uma superfície normalizada, muito utilizado para analisar o dossel da vegetação (MORO; CENTENO, 2010).

As representações espaciais dos MDT podem ser obtidas a partir de métodos de classificação e filtragem, tendo como parâmetros principais:

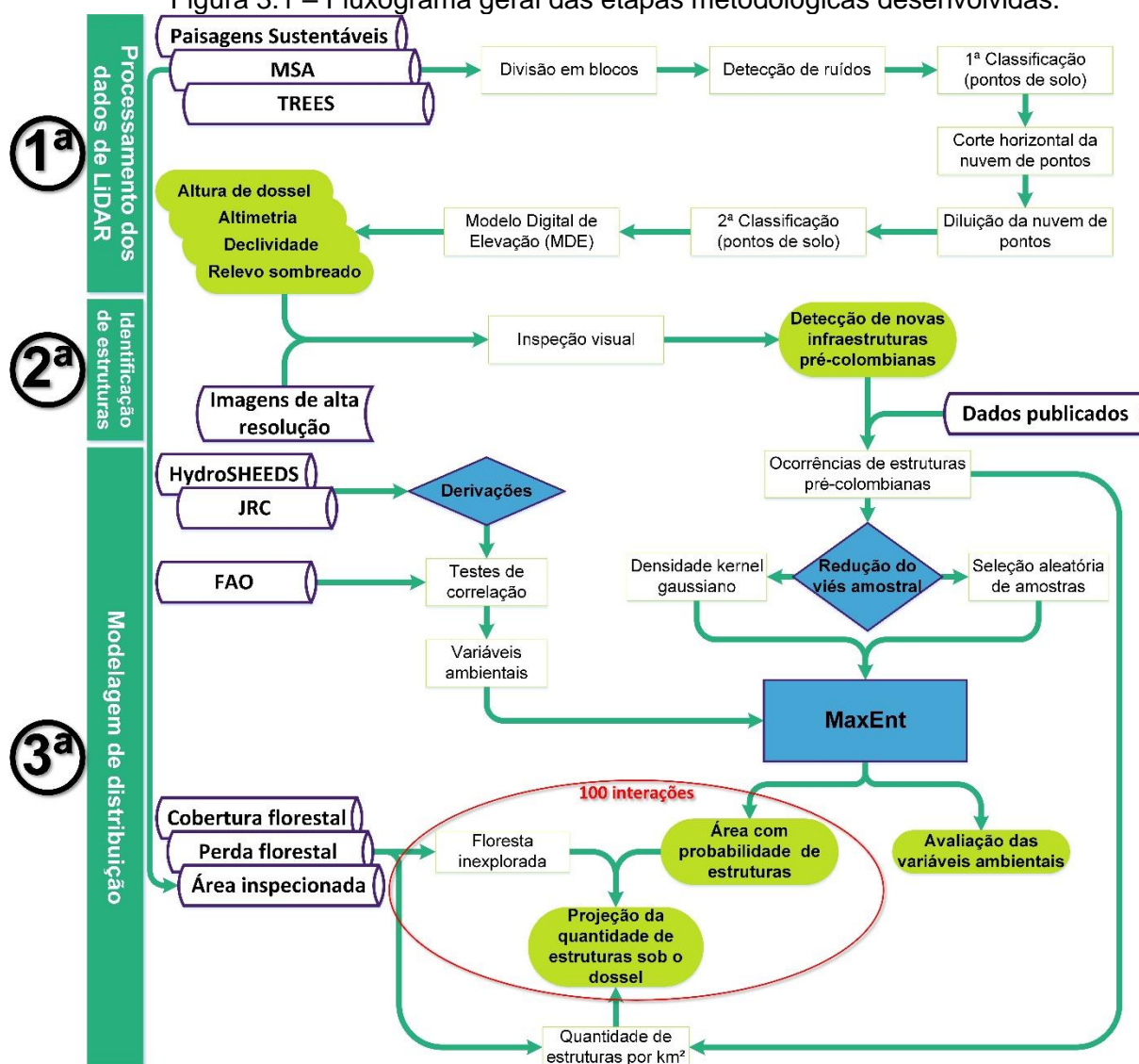
- Superfície: Os pontos de retorno único são considerados como pertencentes ao terreno, dando origem a um modelo inicial. Posteriormente, mais pontos são adicionados a partir de um limiar pré-estabelecido de altitude entre o modelo inicial e os demais pontos.
- Declividade: Considerando a diferença de altura entre dois pontos, a probabilidade de o ponto mais alto não pertencer ao terreno aumenta com a diminuição da distância linear entre eles.
- Bloco mínimo: Em um plano horizontal da nuvem de pontos se estabelece um “*buffer*” que contém pontos supostamente do terreno. Os pontos vizinhos são considerados como pertencentes ao terreno, se a diferença de altitude entre eles estiver dentro de um limiar de tolerância.
- Segmentação: Utilizada para detecção e quantificação de objetos não pertencentes ao terreno. Trata-se do conjunto de dados inicialmente segmentado e depois classificado, considerando que se a altura do segmento estiver acima dos segmentos na vizinhança, o mesmo não pertence ao terreno.

Assim, a escolha do método de classificação está diretamente ligada às características da área a ser analisada e ao objetivo de estudo. Dependendo da aplicação, torna-se necessário utilizar o sensor de LiDAR em conjunto com dados de outros sensores. Contudo, para a aplicação topográfica que busca representar um terreno sem a vegetação, o sensor de LiDAR é suficiente na coleta de informações necessárias para produzir modelos digitais (SHAN; TOTH, 2018).

3. MATERIAL E MÉTODOS

O fluxograma apresentado na Figura 3.1 representa a metodologia geral que foi utilizada no processamento e análise dos dados de acordo com os objetivos propostos. De modo geral, o trabalho foi realizado em três etapas sequenciais para atender aos objetivos específicos, todos em destaque na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Fluxograma geral das etapas metodológicas desenvolvidas.

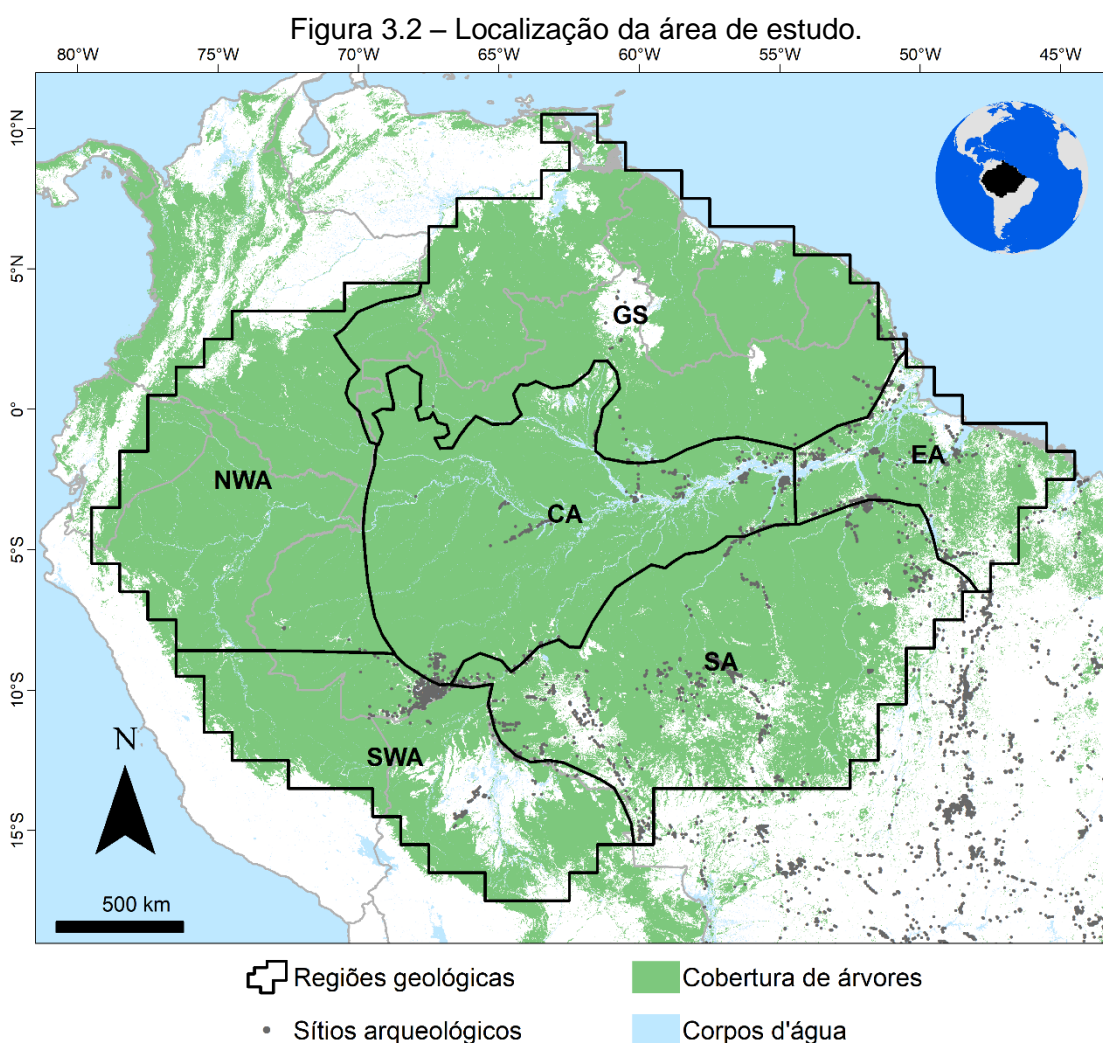


Em destaque encontram-se as etapas da metodologia e os objetivos específicos. No processamento de dados de LiDAR, as siglas MSA e TREES correspondem à bases de dados de LiDAR utilizadas. Na modelagem de distribuição, HydroSHEDS indica o produto de elevação utilizado em conjunto com o produto JRC de massa d'água. A cobertura e perda florestal foram derivadas através do produto de cobertura vegetal do Global Forest Change.

Fonte: Produção do Autor.

3.1 Área de estudo

Considerou-se como área de estudo a área proposta por Fittkau (FITTKAU, 1971; LEVIS et al., 2017), que corresponde às seis regiões geológicas da floresta Amazônica: (1) sul da Amazônia (SA do inglês southern Amazonia); (2) sudoeste da Amazônia (SWA do inglês southwestern Amazonia); (3) escudo da Guiana (GS do inglês Guiana Shield); (4) Amazônia central (CA do inglês central Amazonia); (5) noroeste da Amazônia (NWA do inglês northwestern Amazonia); e (6) leste da Amazônia (EA do inglês *eastern Amazonia*), conforme a Figura 3.2. A área total apresenta uma extensão de 6.927.878 km².



Informações de sítios arqueológicos do IPHAN (2018), cobertura de árvores de Hansen et al. (2013), e corpos d'água de Pekel et al. (2016).

Fonte: Produção do Autor.

3.2 Conjunto de dados LiDAR

A fim de identificar infraestruturas pré-colombianas no relevo de áreas sob florestas foram utilizados três conjuntos de dados de sensores de LiDAR coletados em nível suborbital acoplados à plataforma aérea de aeronaves tripuladas e não tripuladas (VANTs): (1) projeto de Monitoramento Ambiental por Satélites no Bioma Amazônia (MSA); (2) programa de pesquisa e desenvolvimento Paisagens Sustentáveis (Embrapa-CNPq); e (3) grupo de pesquisa *Tropical Ecosystems and Environmental Sciences* (TREES). Todos os dados são de acesso livre à pesquisa.

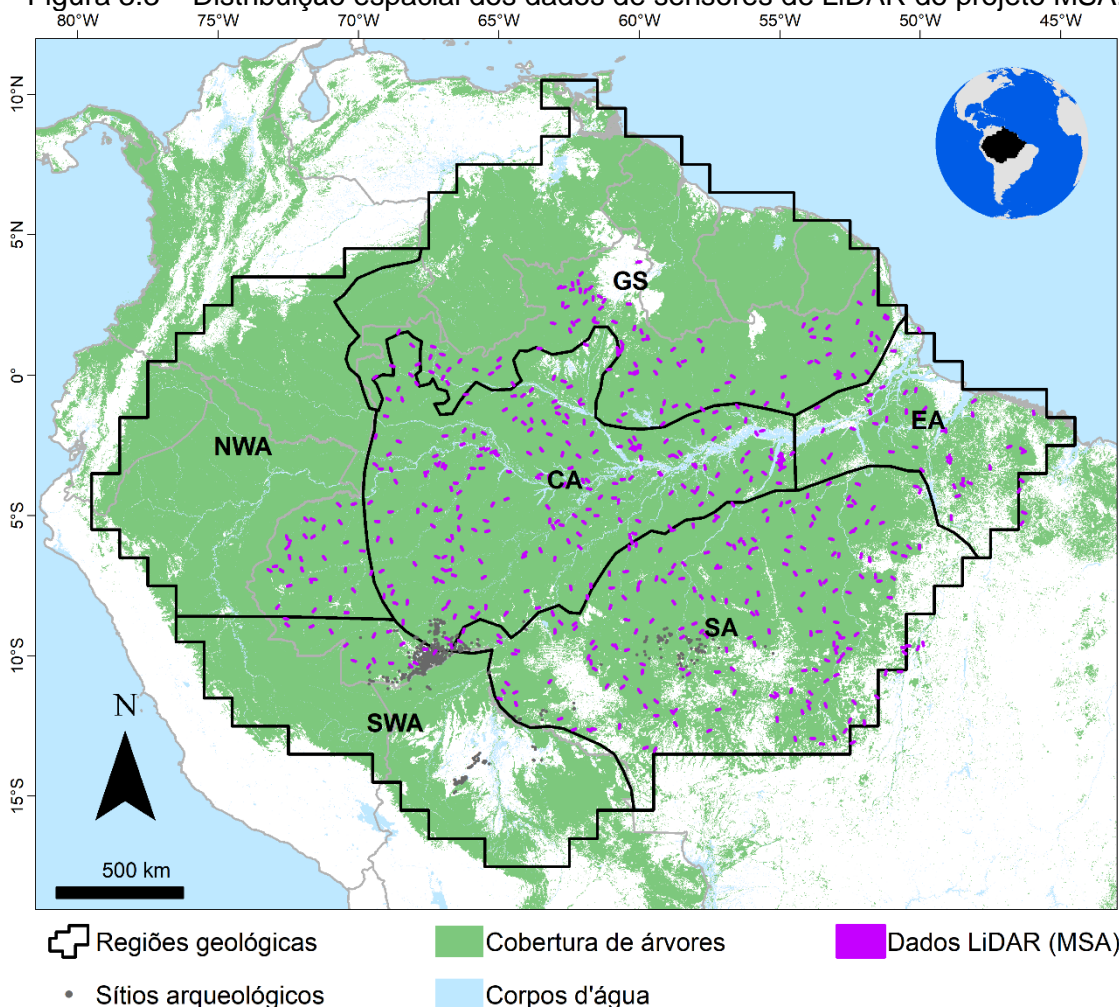
3.2.1 Projeto de Monitoramento Ambiental por Satélites no Bioma Amazônia

O projeto de Monitoramento Ambiental por Satélite no Bioma Amazônia (MSA) foi financiado pelo Fundo Amazônia com recursos do Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). Os dados utilizados correspondem ao Subprojeto 7 de melhoria dos métodos de estimativa de biomassa e de modelos de estimativa de emissões por mudança de uso da terra, executado pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), através do grupo de pesquisa de Estimativa de Biomassa na Amazônia (EBA). Os dados de sensores de LiDAR do Subprojeto 7 encontram-se disponíveis através de solicitação ao coordenador do projeto.

Os levantamentos de dados de sensores de LiDAR do projeto foram realizados de maneira aleatória em áreas de floresta do bioma Amazônia, desconsiderando áreas mapeadas pelo Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia (PRODES, 2014), mas considerando áreas de floresta secundária identificadas pelo TerraClass (2012) e sem sobreposição entre as faixas de voo, conforme observado na Figura 3.3 (INPE/CCST, 2018).

Assim, o conjunto de dados utilizados provenientes do projeto MSA corresponde aos dados da primeira campanha de voo, realizada nos anos de 2016 e 2017, que totalizam 624 transectos.

Figura 3.3 – Distribuição espacial dos dados de sensores de LiDAR do projeto MSA.



Informações de sítios arqueológicos do IPHAN (2018), cobertura de árvores de Hansen et al. (2013), e corpos d'água de Pekel et al. (2016).

Fonte: Produção do Autor.

A aquisição de dados foi realizada pela empresa Fototerra a partir de sensor de LiDAR aerotransportado que distingue a informação de retorno em ondas contínuas (*full-waveform*). A conversão dos dados de ondas contínuas (*full-waveform*) para dados discretos resultou em nuvens de pontos com extensão

média de 0,5 km de largura por 15 km de comprimento (7,5 km²). A Tabela 3.1 apresenta detalhes do levantamento de dados com sensores de LiDAR do projeto MSA.

Tabela 3.1 – Parâmetros dos dados do sensor de LiDAR do projeto MSA.

<i>Base de dados LiDAR</i>	<i>MSA</i>
<i>Modelo do scanner</i>	TRIMBLE, RIEGL Q680I
<i>Frequência do scanner</i>	5 - 200 Hz
<i>Modelo do GNSS</i>	APPLANIX, AV510
<i>Frequência GNSS</i>	1 Hz
<i>Modelo do IMU</i>	APPLANIX, AV510
<i>Frequência do IMU</i>	200 Hz
<i>Altitude de voo</i>	600 m
<i>Sobreposição das faixas de voo</i>	0%
<i>FOV</i>	22,5°
<i>Densidade média de pontos (apenas ultimo retorno)</i>	7 pontos.m ⁻²

Fonte: Produção do Autor.

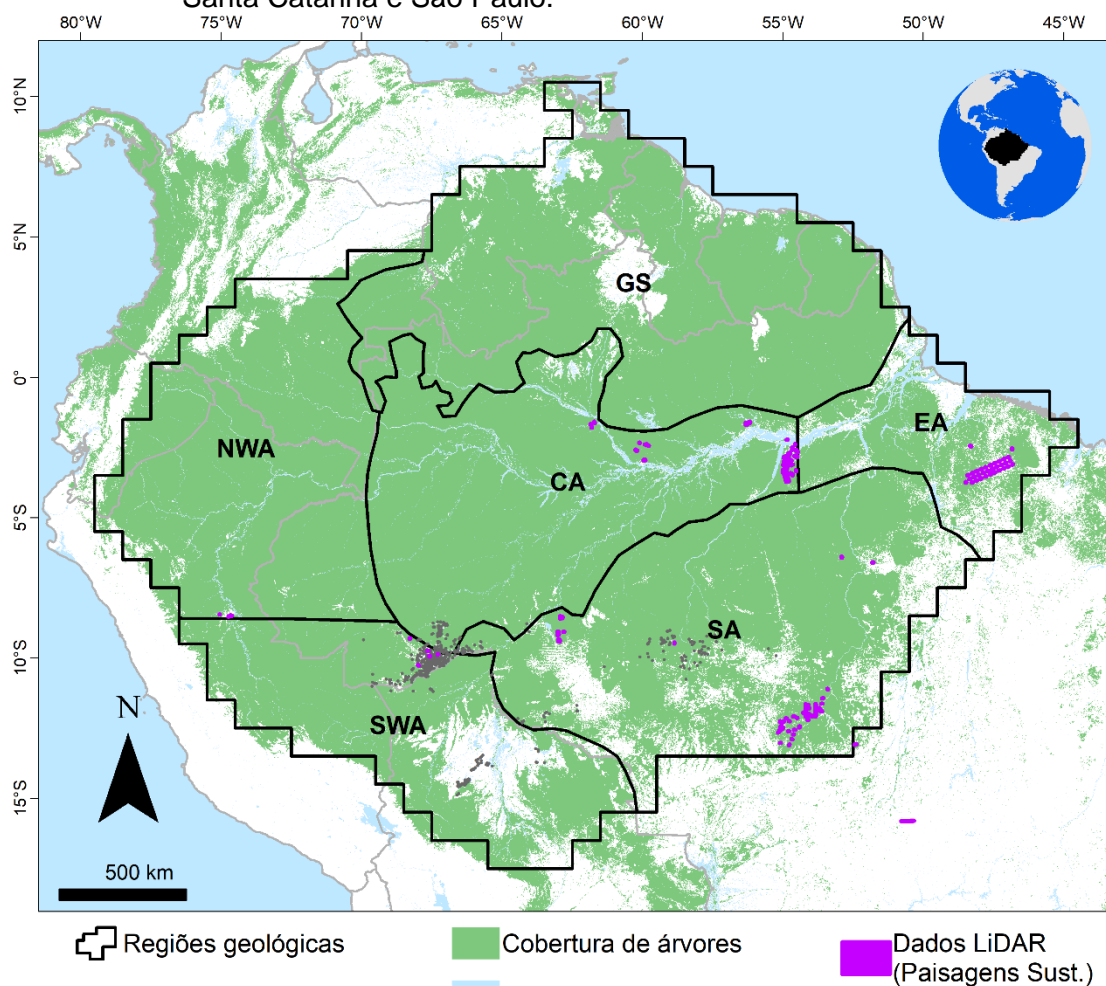
O conjunto de dados de LiDAR dos 624 transectos provenientes do projeto MSA cobriram uma área total de 5.022,41 km² (com sobreposição), e abrange uma área total de 4.928,73 km² (sem sobreposição) da área de estudo, que corresponde a 0,07% da Amazônia.

3.2.2 Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Paisagens Sustentáveis

O programa de pesquisa e desenvolvimento Paisagens Sustentáveis foi um convênio de cooperação técnica e financeira entre o Serviço Florestal Americano (USFS do inglês *United States Forest Service*), órgão vinculado ao Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa-CNPq) e à Fundação Arthur Bernardes (Funarbe). O programa visou desenvolver capacidade técnica, baseada em geotecnologias, para medir e mitigar os efeitos do dióxido de carbono (CO₂) e outros gases responsáveis pelo efeito estufa (EMBRAPA, 2017; EMBRAPA VIA SATÉLITE, 2011a, 2011b).

Financiado pela Agência dos Estados Unidos para o Desenvolvimento Internacional (USAID do inglês *United States Agency for International Development*) o programa envolveu o Serviço Florestal Brasileiro, universidades, diferentes centros da Embrapa e instituições governamentais e não governamentais, sendo coordenado pelo cientista do USFS Michael Keller (EMBRAPA, 2017; EMBRAPA VIA SATÉLITE, 2011a, 2011b). Os dados de sensores de LiDAR do programa de pesquisa e desenvolvimento Paisagens Sustentáveis encontram-se disponíveis através de solicitação via correio eletrônico.

Figura 3.4 – Distribuição espacial dos dados de sensores de LiDAR do programa de pesquisa e desenvolvimento Paisagens Sustentáveis, omitindo áreas de Santa Catarina e São Paulo.



Informações de sítios arqueológicos do IPHAN (2018), cobertura de árvores de Hansen et al. (2013), e corpos d'água de Pekel et al. (2016).

Fonte: Produção do Autor.

Os levantamentos de dados de sensores de LiDAR do projeto foram realizados em áreas dos estados brasileiros do Acre, Amazonas, Bahia, Goiás, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Santa Catarina e São Paulo, e em Ucayali no Peru (Figura 3.4).

Os levantamentos de dados desse projeto foram realizados entre 2008 a 2017 através de diversas empresas e utilizando instrumentos e parâmetros diferentes, conforme mostra a Tabela 3.2.

O conjunto de dados de LiDAR das 85 áreas de pesquisas do projeto Paisagens Sustentáveis incluíram uma extensão de 808,13 km² (com sobreposição), e abrange uma área total de 468,05 km² (sem sobreposição) da área de estudo, que corresponde a 0,007% da Amazônia.

Tabela 3.2 – Parâmetros dos dados de sensores de LiDAR do programa de pesquisa e desenvolvimento Paisagens Sustentáveis.

Base de dados
LiDAR

Sustainable Landscapes

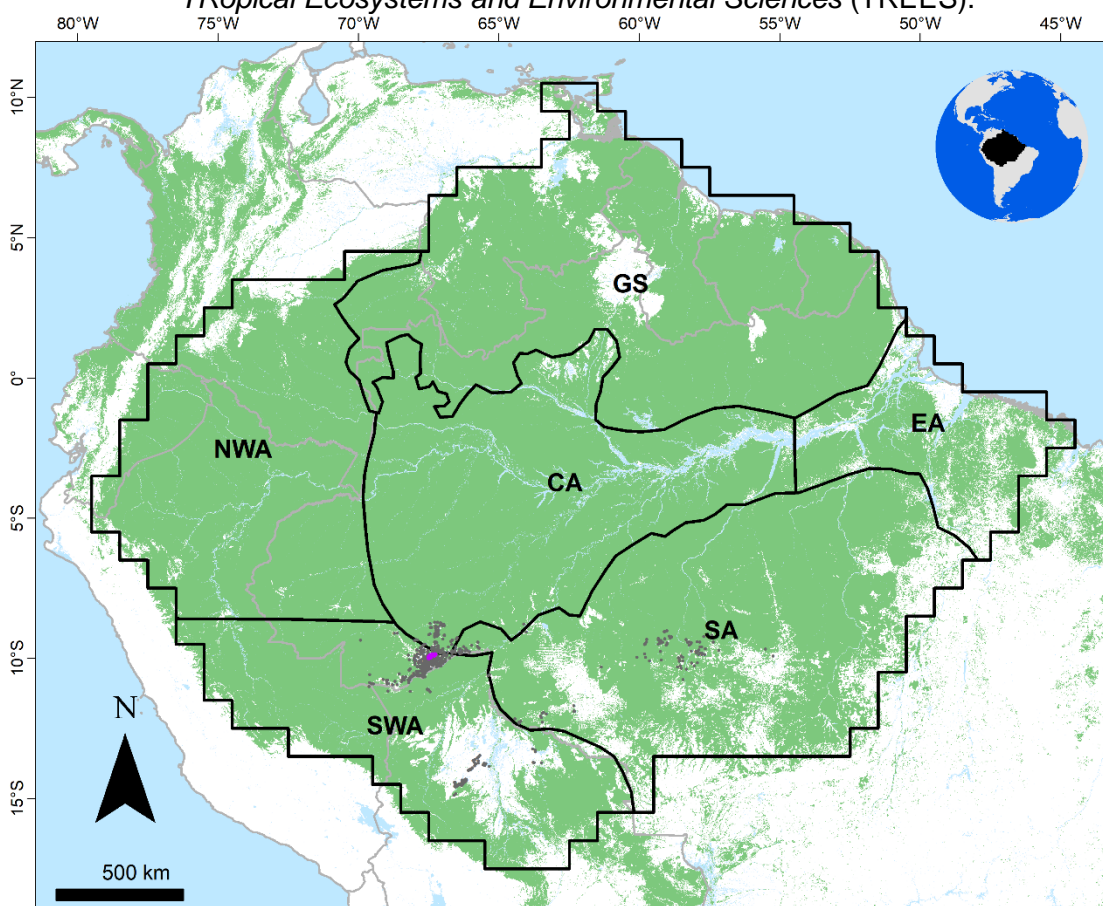
Ano de aquisição	2008	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Modelo do scanner	LEICA, ALS-50 PHASE II, SN 52	OPTECH INC., ALTM 3100	OPTECH INC., ALTM 3100	OPTECH INC., ORION M300	OPTECH INC., ORION M300 * TRIMBLE, HARRIER 68I **	OPTECH INC., ALTM 3100	OPTECH INC., ALTM 3100	OPTECH INC., ALTM 3100
Frequência do scanner	58 - 90 Hz	59,8 Kz	59,8 Kz	61,4 a 67,5 Hz	83 Hz * 400 kHz **	40 - 55 Hz	40 Hz	40 Hz
Modelo do GNSS	NOVATEL, OEMV4	APPLANIX, 09SEN243	APPLANIX, 09SEN243	APPLANIX, 09SEN243	APPLANIX, 09SEN243 * APPLANIX, AV510 **	OMNISTAR, PGPS16	OMNISTAR, PGPS16	OMNISTAR, PGPS16
Frequência GNSS	2 Hz	5 Hz	5 Hz	5 Hz	5 Hz * 1 Hz **	1 Hz	1 Hz	1 Hz
Modelo do IMU	IMAR, LN200	LITTON, 413996	LITTON, 413996	LITTON, 413996	LITTON, 413996 * APPLANIX, AV510 **	APPLANIX, AV510	APPLANIX, AV510	APPLANIX, AV510
Frequência do IMU	200 kHz	100 kHz	100 kHz	100 kHz	100 kHz * 200 Hz **	200 kHz	200 kHz	200 kHz
Altitude de voo	805 m	850 m	850 m	860 m	850 m * 500 m **	700 m	750 m	850 m
Sobreposição das faixas de voo	27%	65%	65%	65%	65%	70%	70%	70%
FOV	10 - 24°	11°	11°	10 - 11 °	10 - 12° * 15° **	15°	15°	15°
Densidade média de pontos (apenas últimos retornos)	15 pontos.m ⁻²	15 pontos.m ⁻²	16 pontos.m ⁻²	13 pontos.m ⁻²	20 pontos.m ⁻²	37 pontos.m ⁻²	23 pontos.m ⁻²	15 pontos.m ⁻²

Fonte: Adaptado de EMBRAPA-CNPM (2019).

3.2.3 Grupo de Pesquisa TRopical Ecosystems and Environmental Sciences

O grupo de pesquisa *TRopical Ecosystems and Environmental Sciences* (TREES) com sede no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) desenvolve pesquisas para avaliar os impactos das mudanças ambientais nos ecossistemas tropicais usando sensoriamento remoto e levantamentos de campo, sob coordenação do Dr. Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão.

Figura 3.5 – Distribuição espacial dos dados de sensores de LiDAR grupo de pesquisa *TRopical Ecosystems and Environmental Sciences* (TREES).



- Regiões geológicas
- Cobertura de árvores
- Dados LiDAR (TREES)
- Sítios arqueológicos
- Corpos d'água

Informações de sítios arqueológicos do IPHAN (2018), cobertura de árvores de Hansen et al. (2013), e corpos d'água de Pekel et al. (2016).

Fonte: Produção do Autor.

Os dados de LiDAR do grupo de pesquisa *TREES* (Figura 3.5), foram adquiridos a partir da cooperação com a Universidade de Exeter, dentro do projeto *Pre-columbian Amazon-Scale Transformations* (PAST), financiado pelo *European Research Council* (ERC) sob coordenação do Prof. Dr. José Iriarte. Este foram os únicos dados coletados através de aeronave não tripulada (VANT) equipada com o sensor LiDAR. A Tabela 3.3 apresenta detalhes sobre os instrumentos e parâmetros utilizados na coleta de dados.

Tabela 3.3 – Parâmetros dos dados de sensor de LiDAR do grupo de pesquisas TREES.

<i>Base de dados LiDAR</i>	<i>TREES</i>
<i>Modelo do scanner</i>	RIEGL, VUX-1UAV
<i>Frequência do scanner</i>	50 - 550 kHz
<i>Modelo do GNSS</i>	APPLANIX, APX15
<i>Frequência GNSS</i>	1 Hz
<i>Modelo do IMU</i>	APPLANIX, APX15
<i>Frequência do IMU</i>	APPLANIX, APX15
<i>Altitude de voo</i>	300 m
<i>Sobreposição das faixas de voo</i>	0%
<i>FOV</i>	35°
<i>Densidade média de pontos (apenas últimos retornos)</i>	8 pontos.m ²

Fonte: Produção do Autor.

O conjunto de dados corresponde a 3 voos realizados entre as cidades de Rio Branco, Senador Guimard e Porto Acre (AC) e 3 voos realizados no município de São Carlos (SP). Os dados têm extensão de 29,49 km² (com sobreposição), e abrange uma área total de 28,89 km² (sem sobreposição) da área de estudo, que corresponde a 0,0004% da Amazônia.

3.3 Processamento dos dados de LiDAR

O conjunto de dados de LiDAR compreende um total de 6.020,98 km², porém, desconsiderando os dados com sobreposição, o conjunto de dados representa

5.351,20 km² de área da floresta amazônica, valor equivalente a 0,08% da área de estudo (ANEXO B).

Todo o processamento dos dados LiDAR foi realizado no software LAStools (versão 180.605). A partir da combinação de diferentes recursos disponíveis (lasnoise, lasground, lasheight, lasthin) foram definidas rotinas para classificar os pontos de solo, preservando as variações suaves do relevo.

O processamento dos dados LiDAR foi realizado nas seguintes etapas sequenciais: (1) os arquivos LiDAR (.laz) foram divididos em blocos para habilitar o processamento em paralelo (*multithread*) nas etapas posteriores com a ferramenta lastile; (2) filtragem dos pontos de ruído com a ferramenta lasnoise, na configuração padrão; (3) primeira classificação de pontos de solo para adquirir pontos de controle esparsos com a ferramenta lasground; (4) corte horizontal da nuvem de pontos para criar uma nova classe com todos os pontos próximos aos pontos de solo (1ª classificação) com a ferramenta lasheight; (5) diluição da nuvem para indicar os pontos com menor altimetria em uma determinada área com a ferramenta lasthin, procedimento realizado três vezes sequencialmente; (6) segunda classificação de pontos de solo observando apenas os pontos indicados na etapa anterior com a ferramenta lasground; e para finalizar, (7) interpolação dos pontos de solo (2ª classificação) do MDT sobre uma grade regular com a ferramenta blast2dem que cria o Modelo Digital de Elevação (MDE), o qual permite gerar produtos de altimetria, declividade, e de relevo sombreado (*hillshade*), com resolução espacial de 0,5 m.

Em consequência da utilização de diferentes bases de dados com especificações de coleta diferentes, existe uma variação na densidade de pontos, assim, a Tabela 3.4 apresenta os parâmetros de filtragem utilizados na filtragem da nuvem de pontos de cada base de dados de LiDAR.

Tabela 3.4 – Parâmetros de filtragem no processamento de dados LiDAR.

Função	Ferramenta	Comando	Valores por base de dados (m)		
			Paisagens Sustentáveis	MSA	TREES
Divide a nuvem de pontos em <i>tiles</i>	lastile	-tile_size	400	400	200
		-buffer	50	50	50
Detecta ou remove pontos de ruído	lasnoise		Configuração padrão		
Detecta e classifica de pontos de solo	lasground	-step	8	10	8
		-stddev	0,5	0,5	0,5
		-spike	0,5	1	0,5
		-offset	0,1	0,1	0,1
Calcula a altura dos pontos a partir da normalização da nuvem de pontos	lasheight	-classify_between	-5	-10	-5
		-classify_above	1	1	1
Detecta os pontos com menor altimetria no interior de uma grade uniforme	lasthin	-step	0,25	0,25	0,25
		-percentile	50%	50%	50%
	lasthin	-step	0,5	0,5	0,5
		-percentile	50%	50%	50%
	lasthin	-step	1	1	1
		-percentile	50%	50%	50%
Detecta e classifica de pontos de solo	lasground	-step	0,85	0,85	0,85
		-stddev	0,5	0,5	0,5
		-spike	0,2	0,2	0,2
		-offset	0,1	0,1	0,1
Triangula os pontos da nuvem sobre um <i>Triangular Irregular Network</i> (TIN) contínua	blast2dem	-step	0,5	0,5	0,5
		-elevation	-	-	-
		-hillshade	-	-	-
		-slope	-	-	-

Fonte: Produção do Autor.

O processamento desenvolvido buscou uma filtragem mais minuciosa dos pontos de solo, utilizando a combinação de métodos diferentes para reduzir ruídos de solo (*low noise*) e de pontos de solo sobre floresta densa (causando a modelagem errônea de terreno), para a detecção de geoglifos abaixo do dossel da floresta Amazônica.

Foram processados 877 arquivos (.laz), sendo necessárias ≈480 horas (20 dias) para a realização de todo o processamento das três bases de dados de dados de LiDAR.

3.4 Identificação de infraestruturas pré-colombianas

A detecção de infraestruturas pré-colombianas construídas no terreno foi realizada através da inspeção visual utilizando os dados de relevo sombreado (gerados a partir do MDE) combinados, quando necessário, com imagens de alta resolução espacial ESRI.

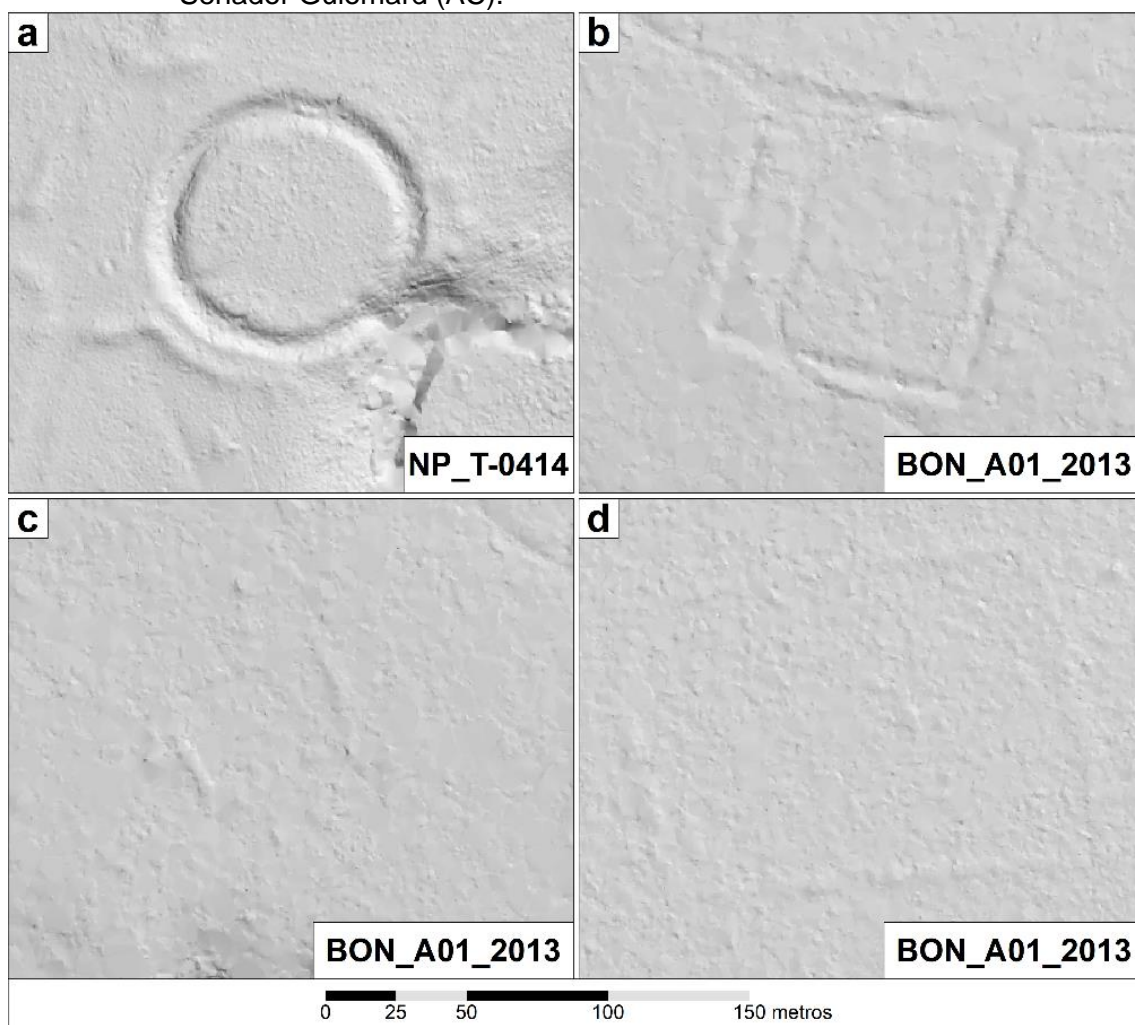
Durante o processo de inspeção visual não foi realizada a manipulação do histograma das imagens de inspeção, e o zoom mínimo de operação foi de 1:2000, assim feições de 100 m (dimensão média dos geoglifos) seriam visualizadas como feições de 5 cm durante a inspeção visual.

A localização espacial dos arquivos de inspeção não foi informada para que o conhecimento do espectador sobre a distribuição de geoglifos catalogados não interferisse, pois sabe-se que geoglifos ocorrem com maior frequência nos estados brasileiros do Acre, Mato Grosso e Rondônia, para manter a mesma acuidade ao longo de toda inspeção. No entanto, contexto das áreas inspecionadas foi observado através das imagens orbitais de alta resolução espacial.

Fatores como fadiga mental e visual também foram considerados, sendo analisado um número máximo de 50 imagens por dia, buscando por formas geométricas padronizadas não congruentes com o relevo, conforme a Figura 3.6.

A Figura 3.6a apresenta geoglifo catalogado no Cadastro Nacional de Sítios Arqueológicos (CNSA), já as Figura 3.6b,c,d apresentam geoglifos reportados por Khan, Aragão e Iriarte (2017) que evidenciaram a capacidade de detectar as estruturas sob o dossel florestal a partir de dados de LiDAR.

Figura 3.6 – Infraestruturas pré-colombianas cravadas no relevo em área de dados LiDAR de conhecimento prévio à pesquisa, localizados no município de Senador Guiomard (AC).



(a) Geoglifo localizado em área desmatada. (b, c, d) Geoglifos localizados sob floresta. Fonte: Produção do Autor.

Foram necessárias ≈ 432 horas (18 dias) para a realização da inspeção visual ao longo de todos os produtos gerados a partir do MDE dos dados de sensores de LiDAR.

3.5 Modelagem de distribuição de infraestruturas pré-colombianas

A potencial extensão de ocorrência das infraestruturas pré-colombianas por toda a floresta Amazônica foi modelada utilizando o algoritmo de máxima entropia, uma modelagem de distribuição de espécies que é baseada somente em dados de presença combinados com variáveis (camadas) ambientais. A modelagem de máxima entropia tem sido utilizada para prever, principalmente, distribuições de plantas (PHILLIPS et al., 2017, 2006, 2004). Contudo, ela também já foi utilizada para prever a distribuição de infraestruturas construídas e naturais de existências humanas passadas, sobretudo pela problemática de estipular dados de ausência (DE SOUZA et al., 2018; HOWEY et al., 2016; MCMICHAEL et al., 2014a, 2014b, 2017).

Foi utilizado o MaxEnt (versão 3.4.1) para modelar a distribuição de infraestruturas pré-colombianas pela floresta Amazônica. Para compor as camadas ambientais do modelo foram utilizadas as bases de dados do *Harmonized World Soil Database* (FAO, 2012), e do *Soil and Terrain database for Latin America and the Caribbean* (SOTERLAC) (DIJKSHOORN et al., 2005) como variáveis edáficas, e produtos derivados do dado de altimetria do *Hydrological data and maps based on SHuttle Elevation Derivatives at multiple Scales* (HydroSHEDS) (LEHNER et al., 2008) e do *Joint Research Centre Data Catalogue* (JRC) (PEKEL et al., 2016) para compor as variáveis topográficas.

As variáveis topográficas de aspecto do terreno, rugosidade, declividade, índice de posição topográfica (TPI do inglês *Topographic Position Index*) e índice de rugosidade do terreno (TRI do inglês *Topographic Ruggedness Index*) foram derivadas utilizando a função *'terrain'* da biblioteca *'raster'* no software R, versão 3.4.4 (FLEMING; HOFFER, 1979; HORN, 1981; RITTER, 1987; WILSON et al., 2007). A distância topográfica para a rugosidade ou declividade maior que um determinado limiar foi derivada utilizando dados de elevação e rugosidade ou declividade através da ferramenta de Análise Espacial do

software ArcGIS. A distância vertical à drenagem mais próxima (HAND do inglês *Height Above the Nearest Drainage*) (NOBRE et al., 2011; RENNÓ et al., 2008) foi derivada usando dados de elevação e de águas superficiais através das ferramentas hidrológicas do software TerraHidro. A distância do caminho até rios permanentes foi calculada utilizando dados de elevação, águas superficiais e declividade através da ferramenta de Análise Espacial do software ArcGIS.

Foram utilizadas as variáveis edáficas para analisar indicadores físicos e de qualidade do solo, para inferir sobre a sua fertilidade. Já as variáveis topográficas foram utilizadas para observar a localização dessas infraestruturas e o movimento e o fluxo dessas populações para acesso à recursos hídricos.

Variáveis bioclimáticas não foram utilizadas para compor parte das camadas ambientais da modelagem de distribuição. A grande concentração de ocorrências na borda sul da Amazônia (região fortemente caracterizada pela sazonalidade climática) afeta drasticamente o viés amostral em modelos preditivos baseados somente em dados de presença (BLATRIX et al., 2018; HECKENBERGER et al., 2003; SAUNALUOMA, 2010; WALKER, 2008; WATLING et al., 2017). Além disso, existe a ocorrência de infraestruturas pré-colombianas ao longo de toda a América do Sul, e ainda há incerteza sobre a influência da variabilidade hidroclimática no nascimento e colapso pré-colombiano (DOUGLAS et al., 2016; EVANS et al., 2018).

Os dados matriciais foram reamostrados e registrados, quando necessário, para coincidirem com a mesma resolução espacial de 1 km (30 arco-segundo) e recortados na extensão das seis regiões geológicas da floresta Amazônica (Figura 3.2). Foram realizados testes de correlação entre os conjuntos de variáveis edáficas e topográficas utilizando a função *'layerstats'* da biblioteca *'raster'* no software R (versão 3.4.4) para remover as camadas ambientais

altamente correlacionadas do modelo, e também preservando aquelas de melhor interpretação.

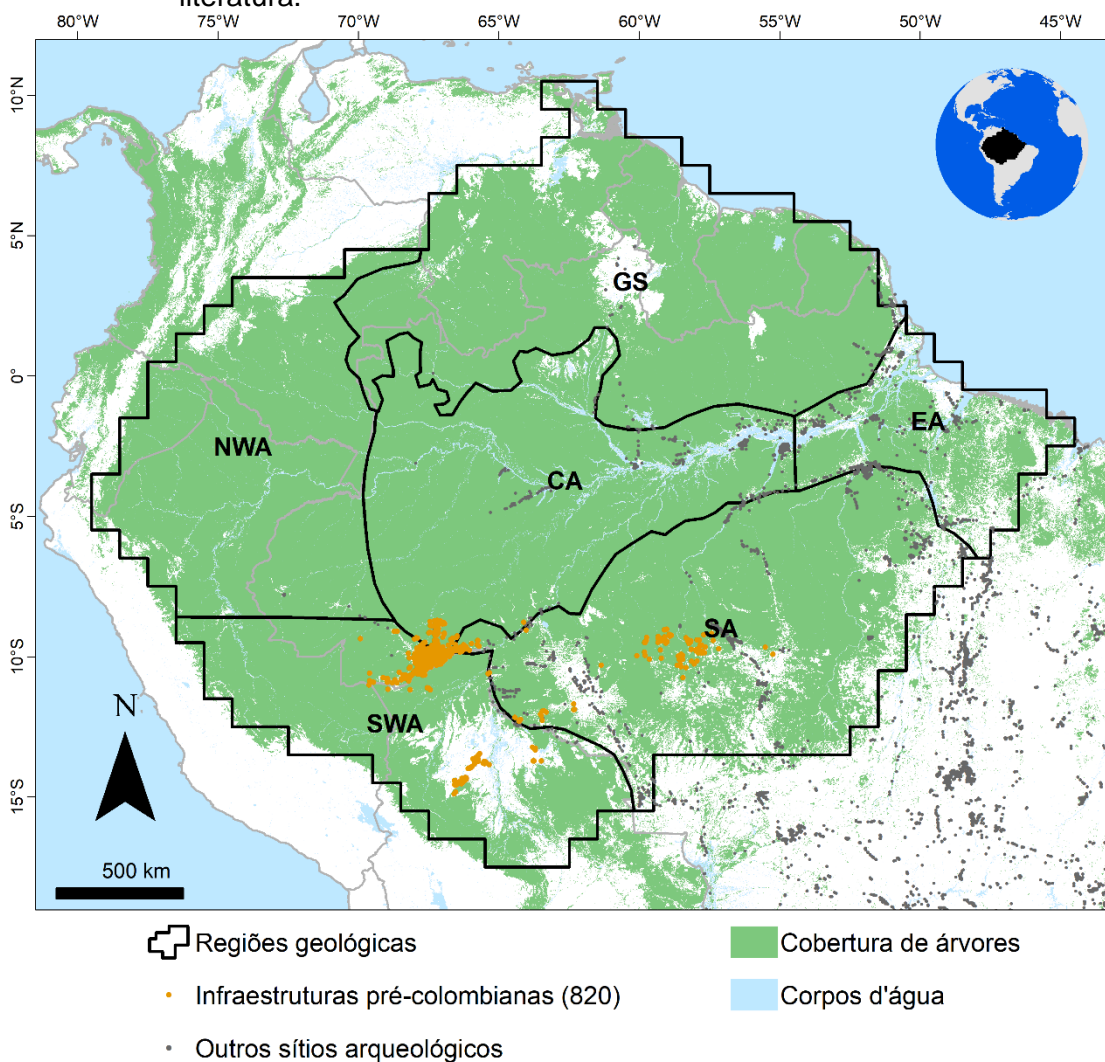
Modelos preditivos baseados somente em dados de presença (*presence only*) dependem de um conjunto de dados (população) imparcial, uma vez que eles são restritos a serem associados a qualquer escala espacial ou temporal (ELITH et al., 2011; MEROW et al., 2013; RADOSAVLJEVIC; ANDERSON, 2014). Nesse sentido, para reduzir os efeitos do viés amostral na modelagem de máxima entropia foram consideradas as seguintes metodologias: (1) incorporação de uma superfície de probabilidade da amostragem no modelo; ou (2) filtragem da população a partir de seleção aleatória (amostragem sistemática).

A superfície de probabilidade atua como uma grade de polarização, regulando o peso dos dados de fundo aleatórios do modelo, produzida através da derivação da distribuição da densidade gaussiana da população (DUDÍK et al., 2006; ELITH et al., 2010; FOURCADE et al., 2014; PHILLIPS et al., 2009b). A amostragem sistemática reduz a agregação espacial da população, e segundo Kramer-Schadt et al. (2013) é um método que pode ser mais efetivo que a manipulação de pontos de fundo do modelo, porém, o método não corrige a ausência de dados que ocorre devido ao baixo esforço de amostragem em algumas áreas, e ainda pode subestimar a contribuição de áreas adequadas onde a alta densidade de registros (dados) reflete a verdade (BORIA et al., 2014; FOURCADE et al., 2014; HIJMANS; ELITH, 2013; IHLOW et al., 2012; VELOZ, 2009).

Assim, os dados de ocorrência de infraestruturas pré-colombianas ao longo da floresta Amazônica foram compilados utilizando os dados do: (1) Cadastro Nacional de Sítios Arqueológicos (CNSA) (IPHAN, 2018); (2) estudo desenvolvido por De Souza et al. (2018); e (3) dados compilados por Jacobs (2018). Os dados foram verificados um a um, realizando a filtragem de

sobreposições, totalizando 700 geoglifos e 120 campos elevados (*raised fields*), compreendendo 820 pontos de ocorrência (Figura 3.7).

Figura 3.7 – Distribuição espacial das infraestruturas pré-colombianas já reportadas na literatura.



Informações de sítios arqueológicos do IPHAN (2018), infraestruturas pré-colombianas compilada de De Souza et al. (2018), IPHAN (2018) e Jacobs (2018), cobertura de árvores de Hansen et al. (2013), e corpos d'água de Pekel et al. (2016).

Fonte: Produção do Autor.

Observou-se que a distribuição dos sítios arqueológicos ocorre de maneira tendenciosa em regiões onde há levantamento mais intenso, que na Amazônia ocorre geralmente em áreas desmatadas (DE SOUZA et al., 2018). Nesse sentido, para reduzir os efeitos do viés amostral da modelagem de máxima entropia (MaxEnt) optou-se pela incorporação de uma superfície de probabilidade da amostragem no modelo gerada pela ferramenta SDMtoolbox (versão 2.3), uma extensão para o software ArcGIS (BROWN et al., 2017).

Foram realizadas duas modelagens de distribuição, utilizando: (1) dados de novas ocorrências descobertos por essa pesquisa, compilados com dados já publicados; e (2) apenas dados já publicados. Para avaliar o comportamento médio do modelo, foram realizadas 100 interações de cada conjunto de dados de ocorrência, selecionando aleatoriamente 75% dos locais como amostra de treinamento e 25% como amostra de teste, aumentando o número máximo de interações para não interromper o treinamento ao atingir determinada quantidade de interações do algoritmo de otimização. Curvas de resposta e o teste jackknife foram utilizados para medir a importância das camadas ambientais (ESFANJANI et al., 2018; QIN et al., 2017).

A eficiência do modelo de máxima entropia (MaxEnt) foi avaliada pelo AUC (do inglês *Area Under the Receiving Operator Curve*), uma das estatísticas mais comuns para avaliar o desempenho de modelos. Ela representa a probabilidade de que uma célula de presença tenha um valor de predição mais elevado que uma célula de ausência, onde ambas são escolhidas aleatoriamente (ELITH et al., 2006; ESFANJANI et al., 2018; FOURCADE et al., 2014; QIN et al., 2017).

Para estimar a quantidade de possíveis infraestruturas escondidas sob o dossel em áreas com cobertura de dossel na Amazônia, foi utilizada de cada interação a máxima sensibilidade de treinamento mais especificidade como limiar para projetar a área de distribuição. Este método objetivo otimiza a

discriminação entre presença e ausência, e não entre presença e pontos aleatórios (LIU et al., 2005, 2016, 2013). Por fim, a área de distribuição foi reamostrada para coincidir com a resolução do dado do *Global Forest Change* (HANSEN et al., 2013) de 30 m (1 arco-segundo), e calculada a área que apresentava mais que 75% de cobertura de dossel que não sofreu perda florestal durante o período de 2000 a 2017.

Foram necessárias ≈144 horas (6 dias) para realizar as 100 interações dos dois conjuntos de dados na modelagem de distribuição (MaxEnt) de infraestruturas pré-colombianas. Já, para calcular a possível quantidade de infraestruturas existentes em áreas com floresta preservada foram necessárias ≈576 horas (24 dias).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

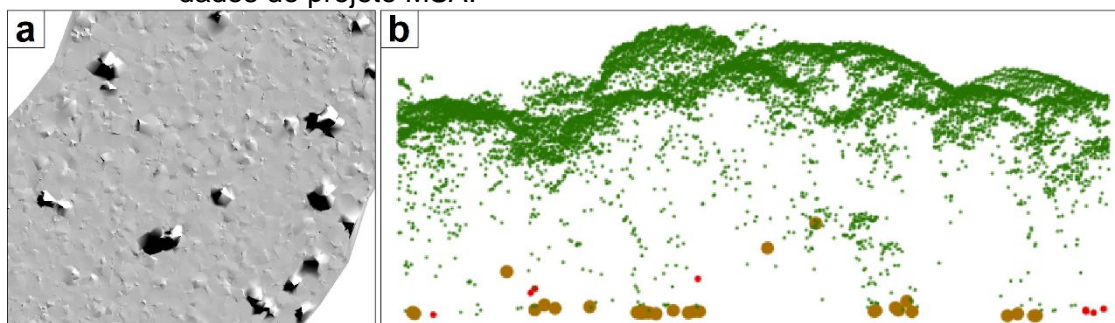
4.1 Processamento de dados de LiDAR

O processamento realizado no software LAStools (versão 180.605) identificou que o parâmetro de '*spike*' descreve a distância acima do *Triangular Irregular Network* (TIN) a partir do qual os pontos serão aceitos no solo, mostrando-se significativamente influente no resultado adquirido. A diminuição do valor do parâmetro, resulta na remoção de pequenos objetos (picos) (LUGMAYR, 2019). Já o '*step*', também bastante influente no resultado, apresentou-se proporcional à suavidade da superfície, porém, foi observado que alguns elementos da superfície podem ser desconsiderados quando utilizados valores elevados deste parâmetro (LUGMAYR, 2019).

Os outros parâmetros como o '*stddev*' que estabelece o limiar do desvio padrão entre os pontos da estimativa atual do solo sob uma superfície planar, e o '*offset*' que estabelece o limiar dos pontos acima da estimativa atual do solo que podem ser incluídos, não apresentaram influência significativa sobre os resultados desta etapa (LUGMAYR, 2019).

Apesar da interpretação de cada parâmetro utilizado durante o processo de classificação dos pontos de solo, a variância na densidade de pontos entre as diferentes bases de dados, e principalmente ao longo do mesmo transecto, a exemplo dos dados LiDAR do projeto MSA, inviabilizou a utilização de um único procedimento de classificação. Áreas de vegetação densa onde há baixa penetração do pulso laser no dossel da floresta, resulta em representações ruidosas do relevo, conforme ilustrado na Figura 4.1a. O ruído é causado pela descontinuidade e incoerência dos pontos classificados como solo (Figura 4.1b).

Figura 4.1 – Simulação de classificação única de pontos de solo em transecto de dados do projeto MSA.

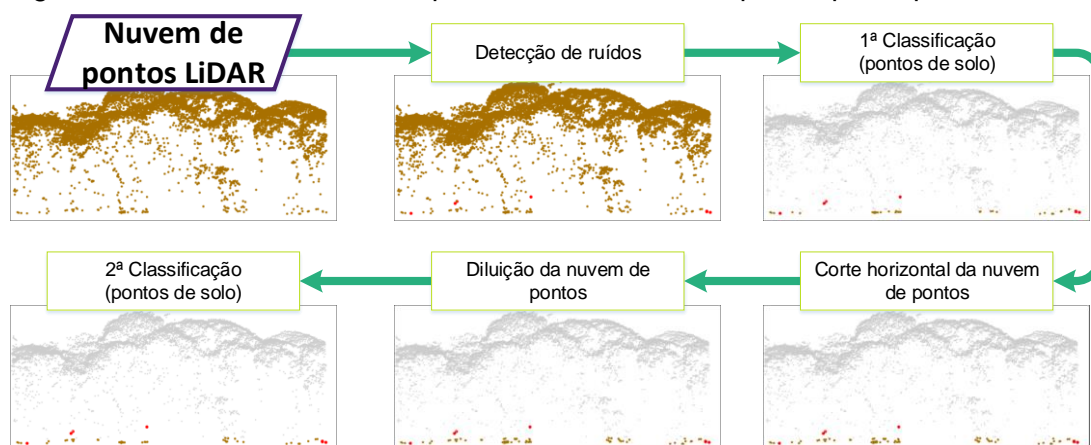


(a) Representação do relevo com ruídos. (b) Classificação de pontos de solo em marrom sobre área com menor densidade de pontos.

Fonte: Produção do Autor.

Por isso, uma dupla classificação de pontos de solo foi desenvolvida para indicar os pontos com maior probabilidade de pertencerem ao solo. Este método orientou a classificação removendo da análise os pontos com altimetria elevada e, principalmente, os pontos que interceptam o dossel da floresta. A Figura 4.2 mostra os pontos considerados pelo software em cada etapa do processamento.

Figura 4.2 – Pontos observados pelo software LAStools por etapa de processamento.

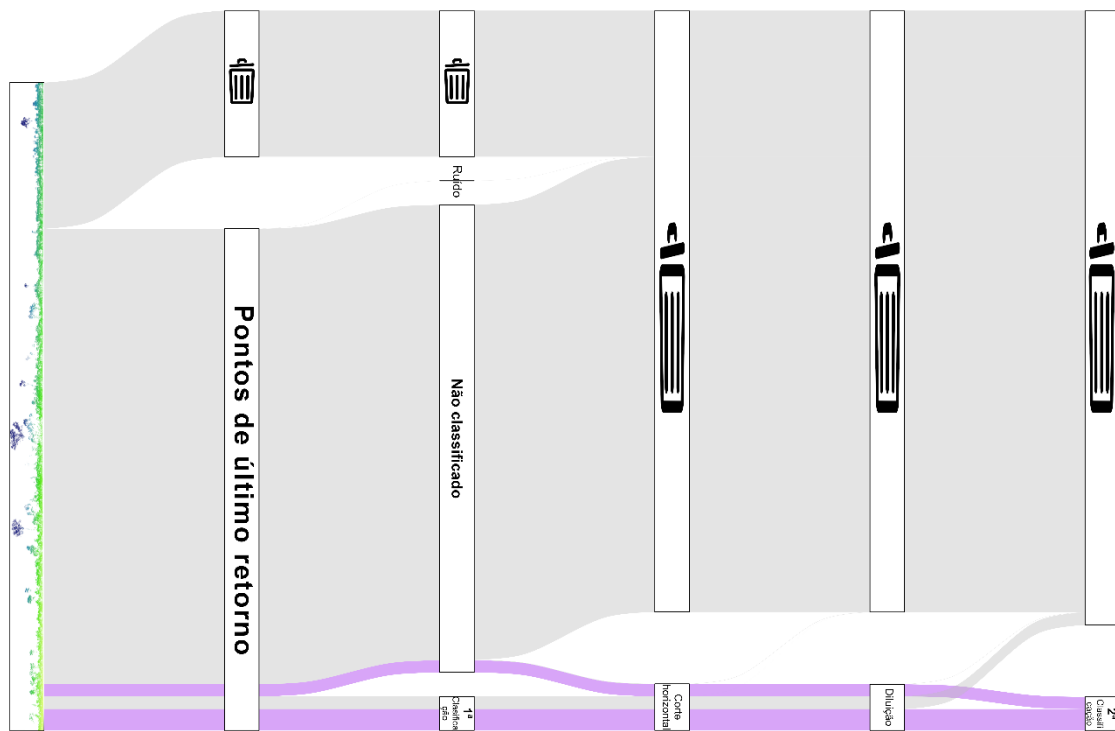


Em marrom estão representados os pontos que foram considerados pelo software em cada etapa do processamento, em cinza os desconsiderados, e em vermelho aqueles classificados como ruído.

Fonte: Produção do Autor.

O diagrama aluvial (Figura 4.3) mostra a proporção e o fluxo dos pontos durante o processo de dupla classificação de pontos de solo, evidenciando a quantidade de pontos desconsiderados e reinseridos durante o processamento. Após a primeira classificação de pontos de solo, parte dos pontos que não foram classificados foram reinseridos para reavaliação no software, orientando e reduzindo a quantidade de informação a ser considerada para a segunda classificação. O resultado final apresenta uma influência considerável dos pontos reinseridos.

Figura 4.3 – Diagrama aluvial da nuvem de pontos de LiDAR ao longo da dupla classificação de pontos de solo.



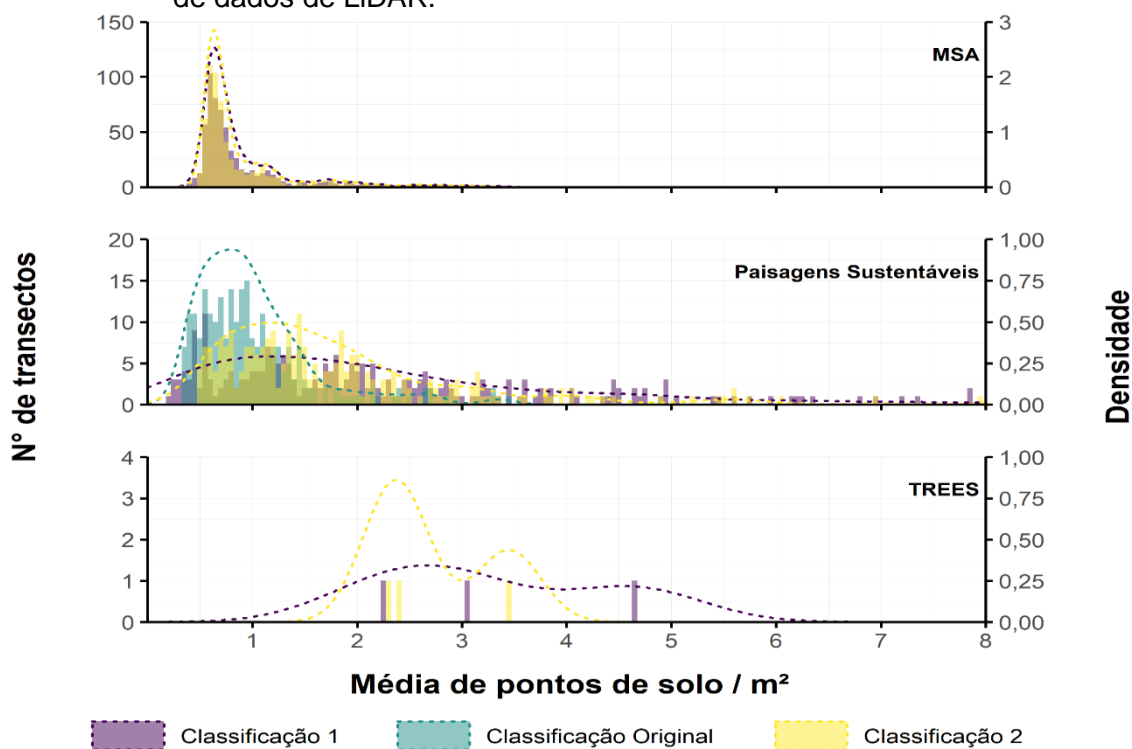
Destaque em roxo para o fluxo dos pontos de solo da 2ª classificação.

Fonte: Produção do Autor.

Com a segunda classificação de solo foi possível atingir uma representação satisfatória do relevo em todos os dados analisados, majoritariamente livres de ruídos e incoerências. Por outro lado, em termos absolutos, a segunda classificação diminuiu a quantidade de pontos classificados como solo, conforme observado na Figura 4.4.

A concentração de vários pontos de solo em pequenas áreas pode aumentar a rugosidade do relevo gerado, assim, a metodologia desenvolvida para o processamento de dados de LiDAR buscou, além de aprimorar a continuidade dos pontos, obteve também uma distribuição mais uniforme, criando superfícies com menor rugosidade, justificando a redução da quantidade de pontos de solo na segunda classificação (classificação 2 na Figura 4.4).

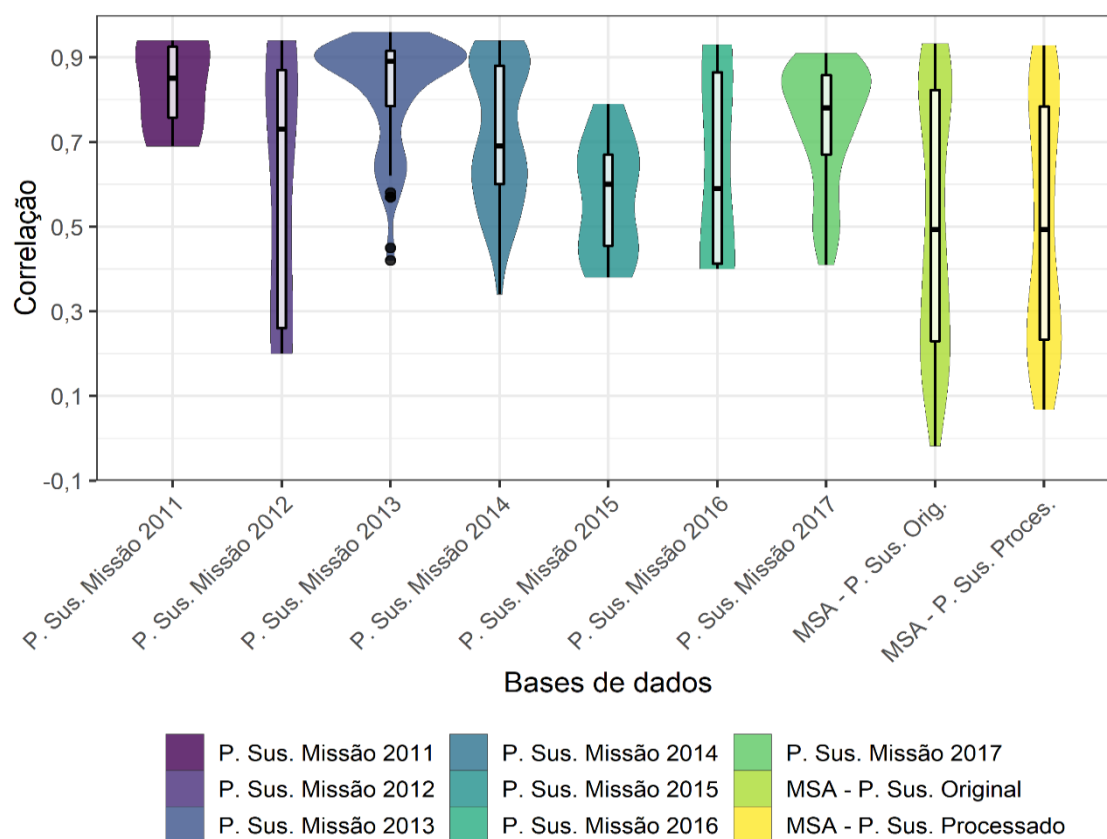
Figura 4.4 – Histograma da média de pontos de solo por metro quadrado de cada base de dados de LiDAR.



Fonte: Produção do Autor.

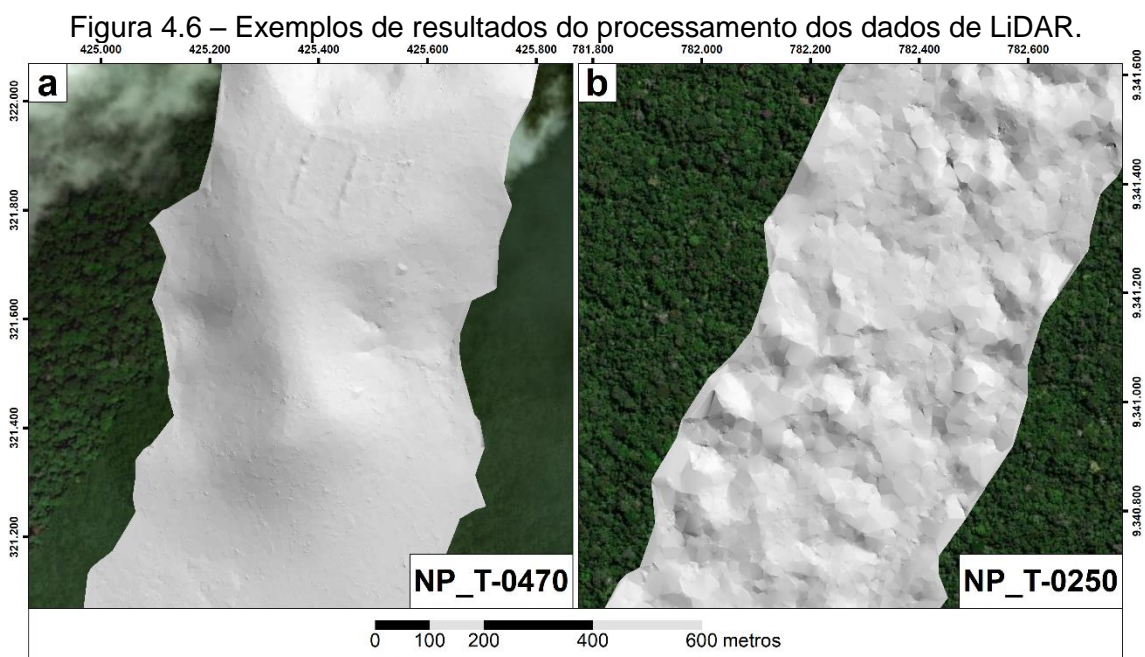
A base de dados do projeto Paisagens Sustentáveis conta com os dados de LiDAR já classificados a partir do ano de 2011, assim, no intuito de analisar a acuidade da metodologia utilizada para o processamento de dados de LiDAR, foi calculada a correlação utilizando dados matriciais (*rasters*) de declividade gerados a partir da classificação original, com aqueles gerados à partir da metodologia desenvolvida. O resultado é ilustrado na Figura 4.5. Nota-se que a correlação com dados do projeto MSA foi realizada apenas nas áreas onde há sobreposição com o projeto Paisagens Sustentáveis.

Figura 4.5 – Correlações entre a classificação original do projeto Paisagens Sustentáveis e a desenvolvida no estudo.



Fonte: Produção do Autor.

A derivação da declividade utilizando a metodologia de classificação de nuvem de pontos apresentou média de correlação de 0,74 com os dados originais do projeto Paisagens Sustentáveis, mostrando uma compatibilidade considerável entre os dois métodos. Por outro lado, as áreas de sobreposição do projeto MSA com o Paisagens Sustentáveis apresentaram correlação média de 0,5 (comparados tanto com a classificação original e a classificação desenvolvida nesta dissertação). Neste caso, a baixa correlação entre os dados pode ser resultado da baixa densidade de pontos, causada principalmente pela ausência de sobreposição dos dados do projeto MSA, gerando a declividade, um índice sensível as variações topográficas, com pouca concordância com dados de maior densidade que permitiriam uma melhor representação do relevo.



Resultados sobrepostos a imagens orbitais da Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, USDA FSA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, e da comunidade de usuários GIS. (a) Resultado do processamento em área de relevo plano. (b) Resultado do processamento em área de relevo irregular.

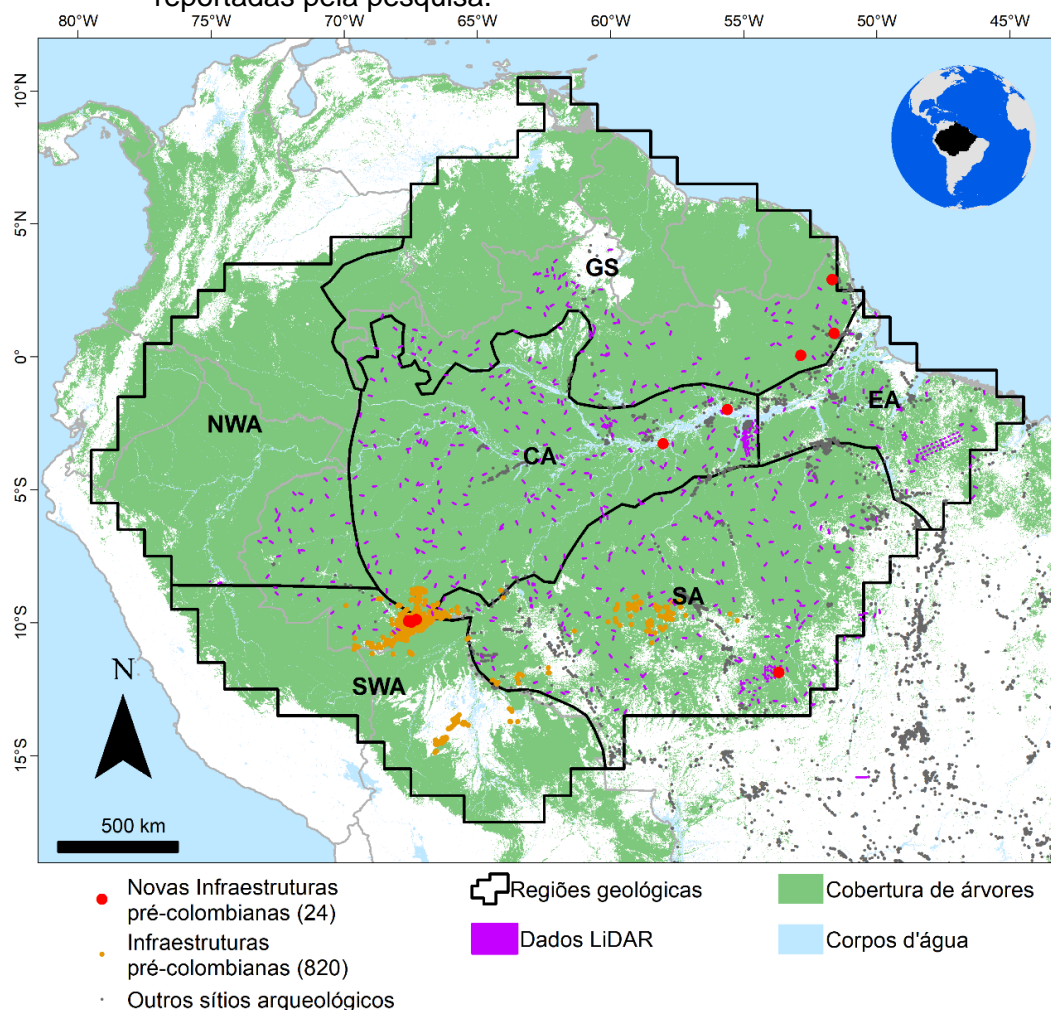
Fonte: Produção do Autor.

Entretanto, a metodologia desenvolvida para realizar o processamento de dados de LiDAR resultaram em representações satisfatórias do relevo, principalmente em áreas de relevo pouco acidentado, conforme observado na Figura 4.6, que possibilitou a posterior identificação de estruturas e feições mesmo quando localizadas abaixo do dossel da floresta. Por outro lado, também foi identificado que em alguns transectos localizados em regiões mais acidentadas (com constantes variações altimétricas), os parâmetros de '*spike*' e '*step size*' utilizados não foram aptos a gerar representações adequadas do relevo. Contudo, é importante frisar que a ocorrência de geóglifos em áreas de relevo acidentado é atípica, e que em apenas 8 transectos (0,9% dos dados) analisados, todos oriundos de dados do projeto MSA, apresentaram tal característica.

4.2 Descobertas de infraestruturas pré-colombianas

A investigação por infraestruturas pré-colombianas realizada através da inspeção visual de dados matriciais de relevo sombreado, gerados a partir do MDE LiDAR, possibilitou a identificação de 24 novas infraestruturas pré-colombianas distribuídas ao longo das regiões geológicas do sul da Amazônia (SA), sudoeste da Amazônia (SWA), escudo da Guiana (GS) e Amazônia central (CA), conforme ilustrado na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Distribuição espacial das novas infraestruturas pré-colombianas reportadas pela pesquisa.



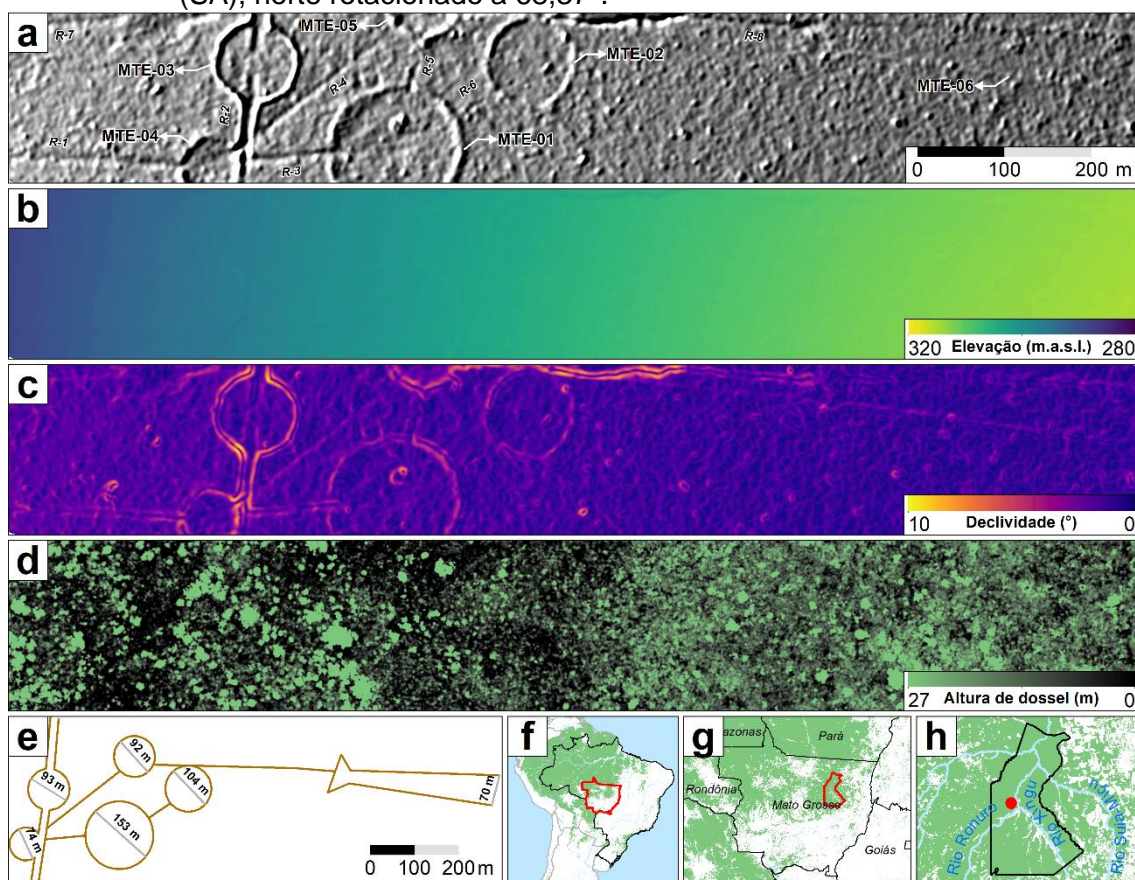
Informações de sítios arqueológicos do IPHAN (2018), infraestruturas pré-colombianas compilada de De Souza et al. (2018), IPHAN (2018) e Jacobs (2018), cobertura de árvores de Hansen et al. (2013), e corpos d'água de Pekel et al. (2016).

Fonte: Produção do Autor.

4.2.1 Descobertas no sul da Amazônia (SA)

A investigação identificou parte de uma antiga praça localizada no município de Feliz Natal, próximo ao rio Lamaçu, em uma área situada dentro do Parque Indígena do Xingu, localizado na região geológica sul da Amazônia, no estado brasileiro de Mato Grosso (Figura 4.8).

Figura 4.8 – Estruturas descobertas utilizando dados de LiDAR no sul da Amazônia (SA), norte rotacionado a 68,37°.



(a) Relevo sombreado indicando as estruturas e estradas identificadas. (b) Elevação em metros acima do nível do mar. (c) Declividade em graus. (d) Altura de dossel em metros. (e) Desenho esquemático das estruturas identificadas. (f) Localização do estado de Mato Grosso. (g) Localização do Parque Indígena do Xingu. (h) Localização dos sítios arqueológicos.

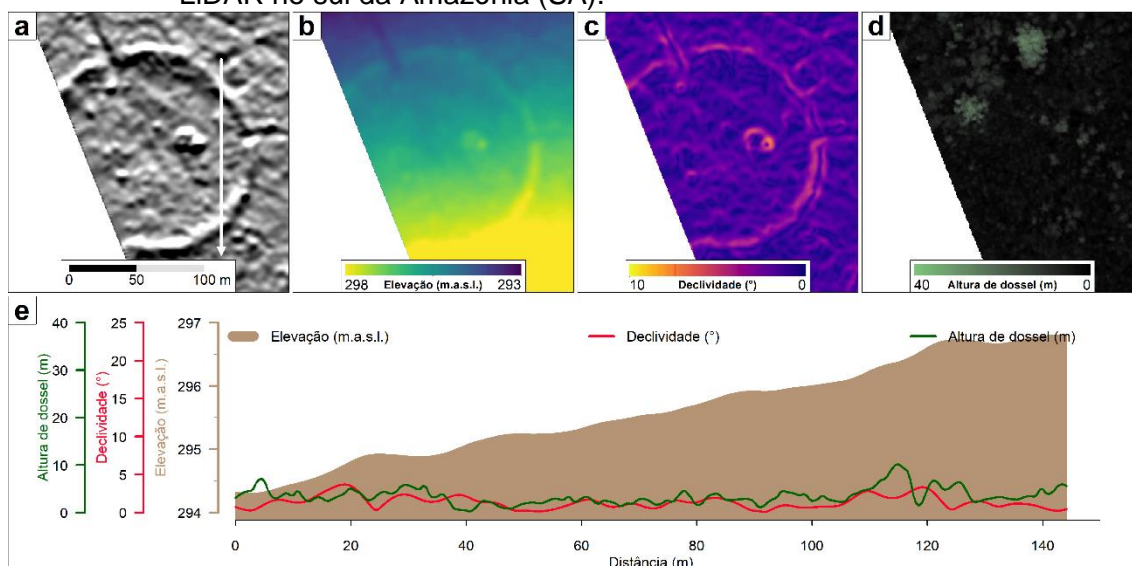
Fonte: Produção do Autor.

A região já é conhecida por abrigar sociedades complexas, densamente povoadas, que floresceram durante o final da pré-história. Datações de radiocarbono já indicaram a presença de populações densas, sedentárias e integradas que se desenvolveram durante o último milênio ao longo dessa bacia sedimentar, que contém uma gama diversificada de recursos hídricos (HECKENBERGER et al., 2003, 1999).

A remoção digital do dossel revelou uma configuração espacial de 5 praças perfeitamente circulares (70 a 150 m de diâmetro) com montes posicionados às margens ($\approx 0,5$ m de altura), 1 figura retangular com 18.500 m², 1 estrada principal (8 a 20 m de largura) margeada por montes ($\approx 0,5$ m de altura) e 6 estradas secundárias (com até 10 m de largura e 240 m de comprimento) construídas por valas ($\approx 0,35$ m de profundidade).

Três orientações cardiais foram reconhecidas no posicionamento das estradas por correspondência de azimuth, os eixos das estradas R-4/6 estão posicionados em $\approx 120^\circ/300^\circ$, R-1/3/7/8 a $\approx 160^\circ/340^\circ$ e o R-2/5 a $\approx 80^\circ/260^\circ$. As estradas R-1 e R-7 levam a um caminho de 200m (se linear) até o rio lamaçu.

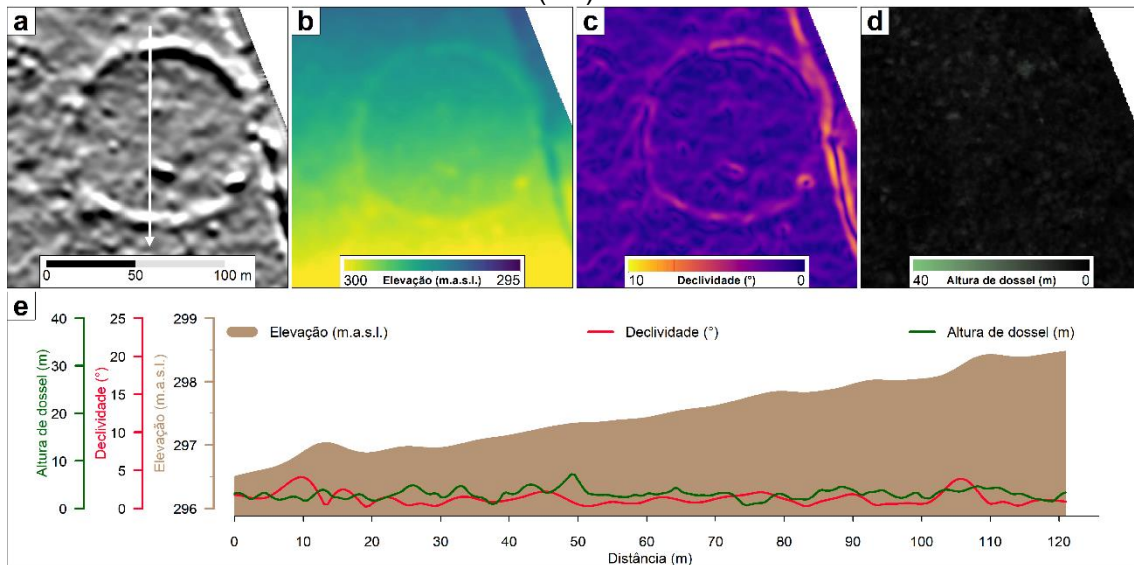
Figura 4.9 – Infraestrutura pré-colombiana MTE-01 identificada usando dados de LiDAR no sul da Amazônia (SA).



(a) Relevo sombreado indicando o perfil topográfico. (b) Elevação em metros acima do nível do mar. (c) Declividade em graus. (d) Altura de dossel em metros. (e) Perfil topográfico que indica as variações na elevação, declividade e de altura de dossel na estrutura identificada.

Fonte: Produção do Autor.

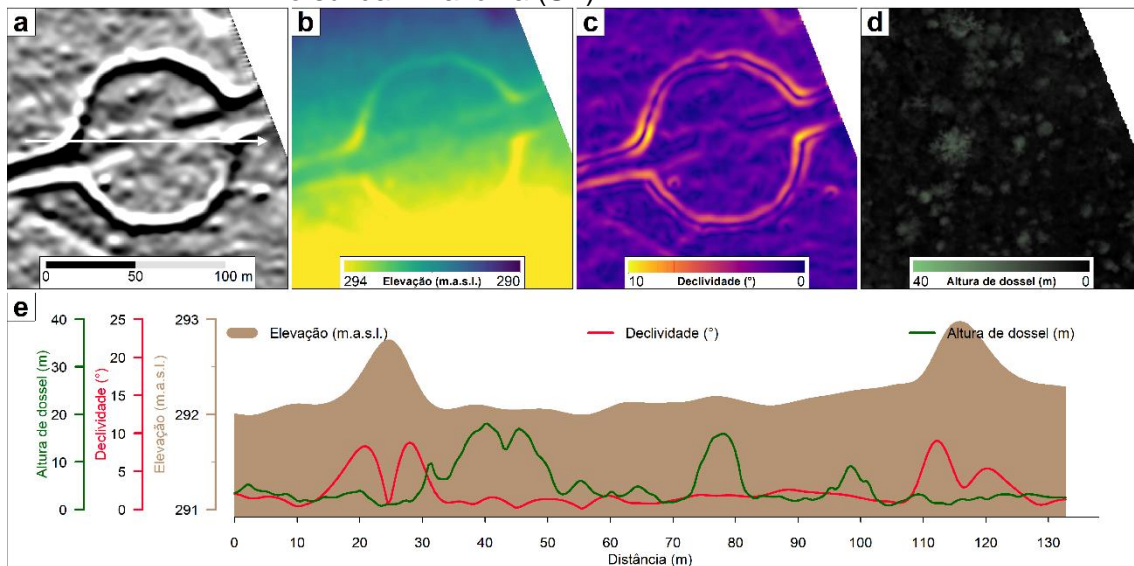
Figura 4.10 – Infraestrutura pré-colombiana MTE-02 identificada usando dados de LiDAR no sul da Amazônia (SA).



(a) Relevo sombreado indicando o perfil topográfico. (b) Elevação em metros acima do nível do mar. (c) Declividade em graus. (d) Altura de dossel em metros. (e) Perfil topográfico que indica as variações na elevação, declividade e de altura de dossel na estrutura identificada.

Fonte: Produção do Autor.

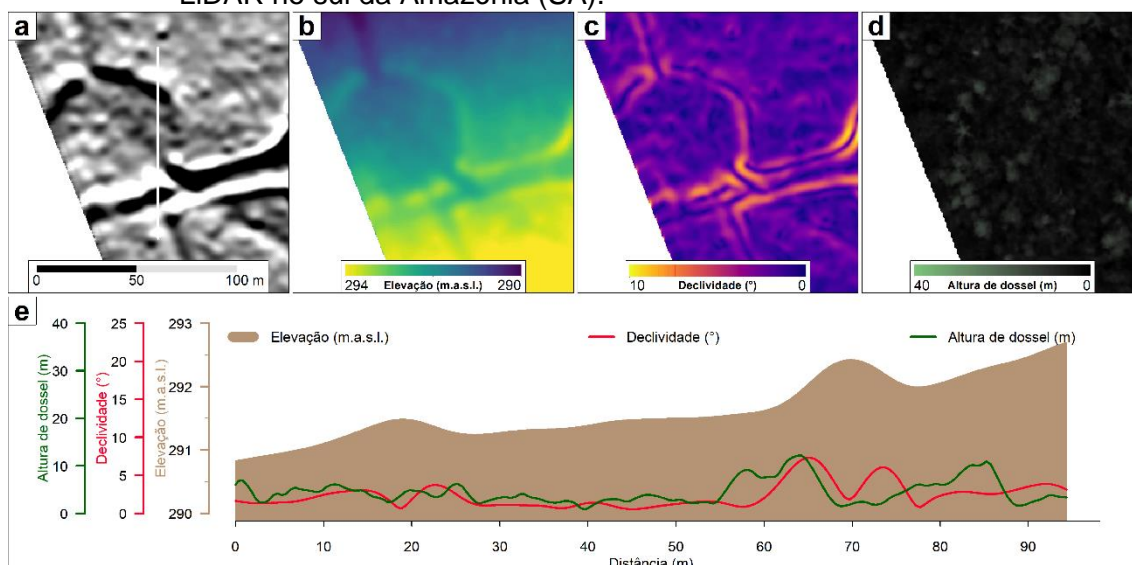
Figura 4.11 – Infraestrutura pré-colombiana MTE-03 identificada usando dados de LiDAR no sul da Amazônia (SA).



(a) Relevo sombreado indicando o perfil topográfico. (b) Elevação em metros acima do nível do mar. (c) Declividade em graus. (d) Altura de dossel em metros. (e) Perfil topográfico que indica as variações na elevação, declividade e de altura de dossel na estrutura identificada.

Fonte: Produção do Autor.

Figura 4.12 – Infraestrutura pré-colombiana MTE-04 identificada usando dados de LiDAR no sul da Amazônia (SA).



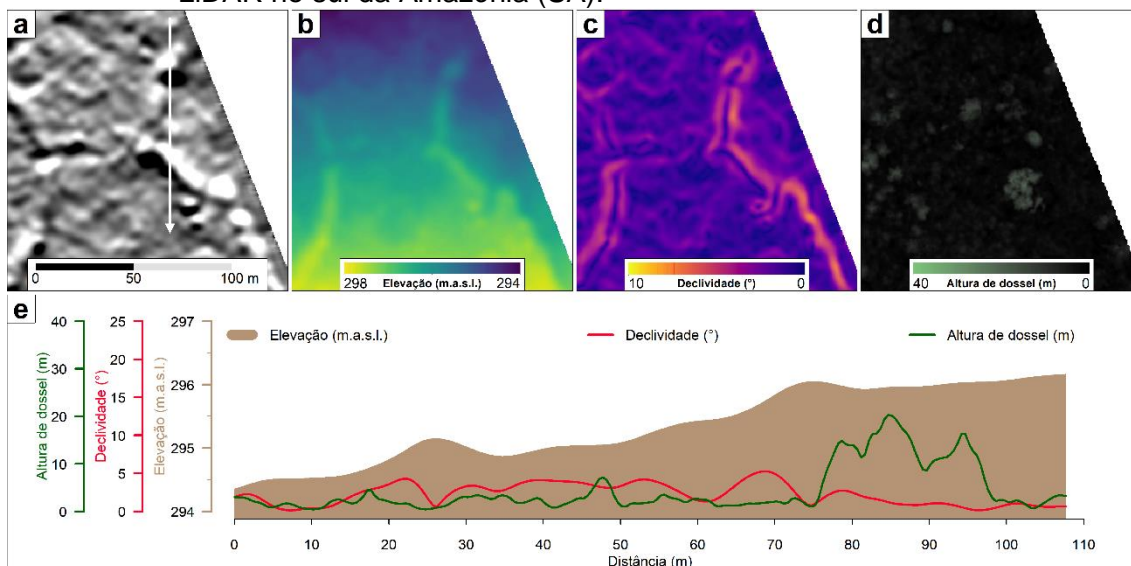
(a) Relevo sombreado indicando o perfil topográfico. (b) Elevação em metros acima do nível do mar. (c) Declividade em graus. (d) Altura de dossel em metros. (e) Perfil topográfico que indica as variações na elevação, declividade e de altura de dossel na estrutura identificada.

Fonte: Produção do Autor.

Perto das praças circulares há a presença dos maiores indivíduos arbóreos identificados, possíveis castanheiras com 23 e 28 m de altura. A figura retangular (MTE-06 na Figura 4.14) apresenta uma vegetação de pequeno porte, mais densa. Devido ao formato característico das palmeiras, foram identificadas ocorrências em toda a área, com altura de até 20 m nos dados do Modelo de Altura do Dossel (Figura 4.8d e Figura 4.15).

Todas as infraestruturas estão localizadas em altitudes entre 285 a 305 m (Figura 4.8b) em uma paisagem plana com 3° de declividade média. Já as estruturas identificadas apresentam declividade com até 14° em suas bordas (Figura 4.8c).

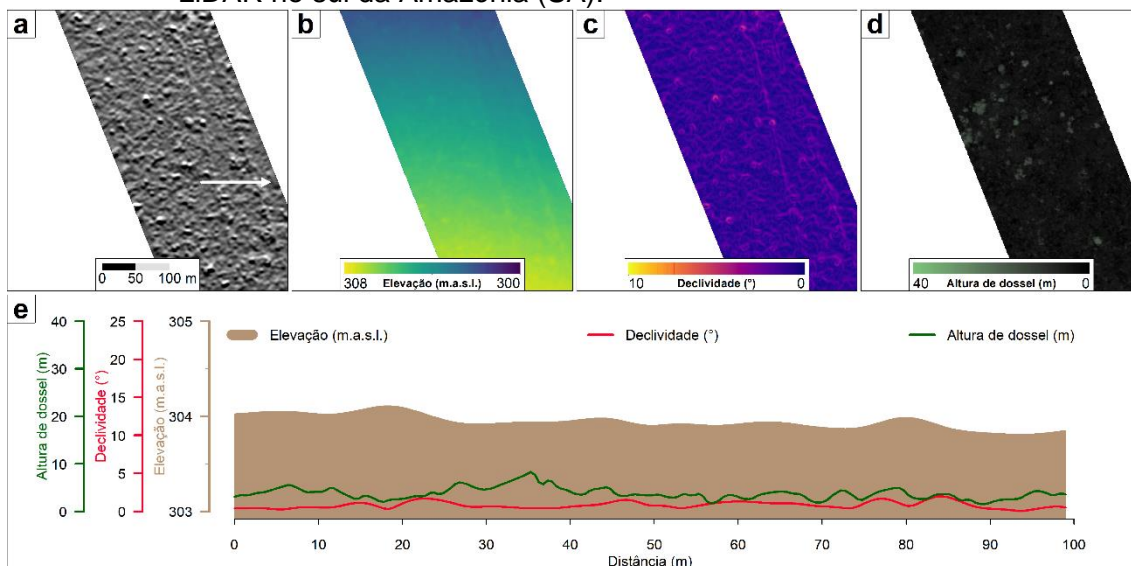
Figura 4.13 – Infraestrutura pré-colombiana MTE-05 identificada usando dados de LiDAR no sul da Amazônia (SA).



(a) Relevo sombreado indicando o perfil topográfico. (b) Elevação em metros acima do nível do mar. (c) Declividade em graus. (d) Altura de dossel em metros. (e) Perfil topográfico que indica as variações na elevação, declividade e de altura de dossel na estrutura identificada.

Fonte: Produção do Autor.

Figura 4.14 – Infraestrutura pré-colombiana MTE-06 identificada usando dados de LiDAR no sul da Amazônia (SA).



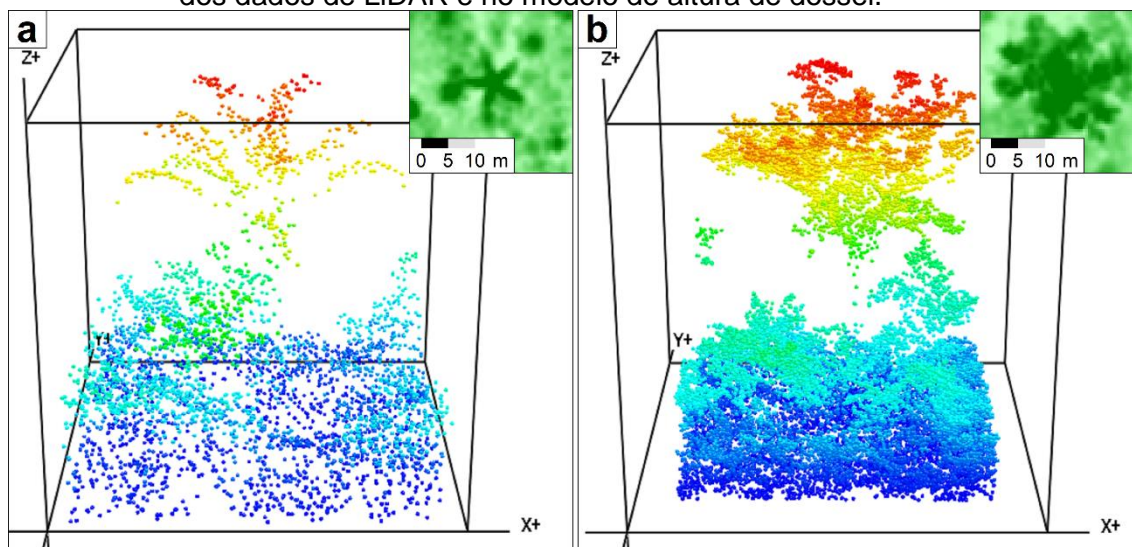
(a) Relevo sombreado indicando o perfil topográfico. (b) Elevação em metros acima do nível do mar. (c) Declividade em graus. (d) Altura de dossel em metros. (e) Perfil topográfico que indica as variações na elevação, declividade e de altura de dossel na estrutura identificada.

Fonte: Produção do Autor.

Pode-se observar que as estruturas possuem continuidade, porém, os dados de LiDAR de 200 m de largura restringiram a total delimitação dessas formações pré-colombianas (Figura 4.8e).

O posicionamento das estruturas é semelhante ao de outras aldeias indígenas da Margem Sul da Amazônia (SRA do inglês *Southern Rim of the Amazon*), que podem constituir um padrão multicêntrico de cidades e aldeias de praças que foram desenvolvidas antes do contato europeu no Alto Xingu (DE SOUZA et al., 2018; HECKENBERGER et al., 2003, 2008). A maior praça identificada (com 153 m de diâmetro) pode ter atuado como o centro gravitacional do ambiente construído, provavelmente o palco de atividades religiosas e políticas, além do cemitério e lares dos chefes hereditários estabelecidos em pontos chave ao redor da praça, e em áreas adjacentes para os demais (HECKENBERGER et al., 2008, 1999).

Figura 4.15 – Exemplo de padrões característicos das vegetações observadas através dos dados de LiDAR e no modelo de altura de dossel.



(a) Palmeira de 11 metros. (b) Castanheira de 25 metros.

Fonte: Produção do Autor.

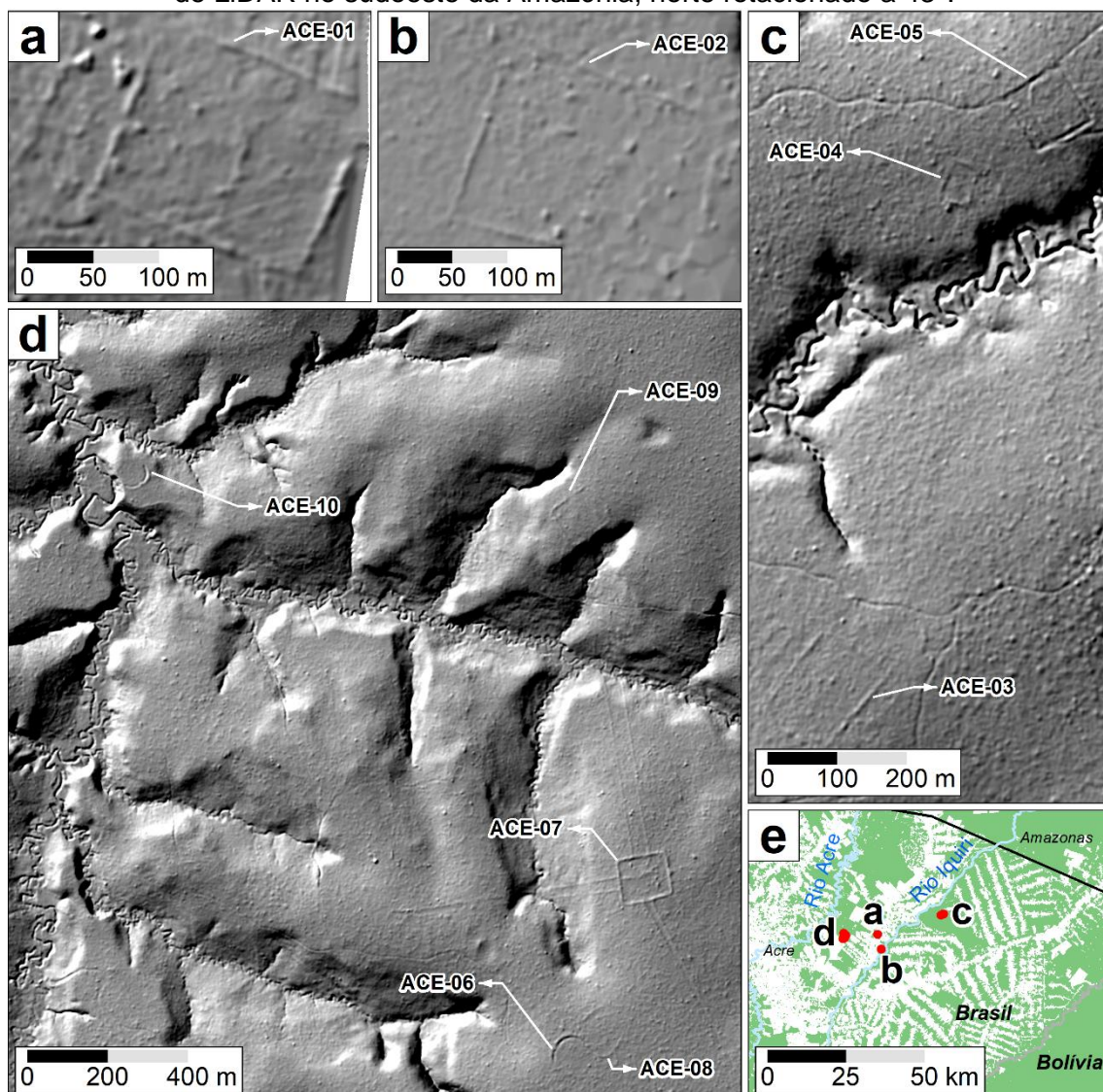
A antiga presença de comunidades sedentárias ao longo dessas estruturas mostra que esses locais podem conter artefatos domésticos e terra preta de

índio, reafirmando a ocupação permanente do local. Já a presença disseminada de palmeiras e castanheiras (Figura 4.15) também pode reforçar os indícios que este ambiente tenha sido modificado e desenvolvido através desses assentamentos antigos, assim como já foi mostrado em muitos outros sítios arqueológicos já identificados ao longo do Alto Xingu (CLEMENT et al., 2015; DE SOUZA et al., 2018; HECKENBERGER et al., 2003, 2008, 1999; HECKENBERGER; NEVES, 2009).

4.2.2 Descobertas no sudoeste da Amazônia (SWA)

O sudoeste da Amazônia já é conhecido por suas infraestruturas em terra, os geoglifos, revelados principalmente após os programas de colonização da Amazônia nos anos de 1970, que promoveu o desmatamento em grandes escalas. Esses geoglifos estão localizados de modo disperso pelos planaltos bem drenados dos afluentes dos rios Purus e Madeira, com datas de radiocarbono indicando suas construções há cerca de 2000 anos (AP) (SAUNALUOMA et al., 2018; SCHAAN et al., 2012). A pesquisa também identificou 10 estruturas entre as cidades de Rio Branco e Senador Guimard, no estado do Acre, Brasil (Figura 4.16).

Figura 4.16 – Relevo sombreado indicando as estruturas identificadas usando dados de LiDAR no sudoeste da Amazônia, norte rotacionado a 43°.

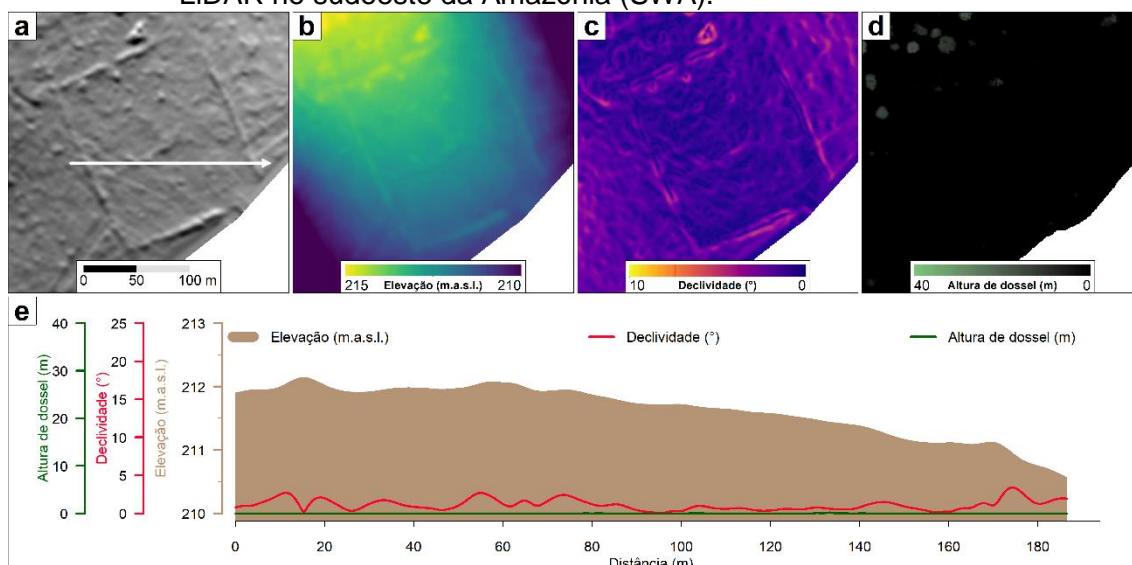


(a) Estrutura em área desmatada em Senador Guiomard. (b) Estrutura em área desmatada em Senador Guiomard. (c) Estruturas em área sob floresta em Senador Guiomard. (d) Estruturas em área sob floresta em Rio Branco. (e) Localização das estruturas identificadas.

Fonte: Produção do Autor.

As estruturas ACE-01/02 (Figura 4.17 e Figura 4.18) estão localizadas em áreas antropizadas, margeadas por pequenos montes ($\approx 0,2$ m de altura) com vegetação fragmentada apenas em parte do ACE-02.

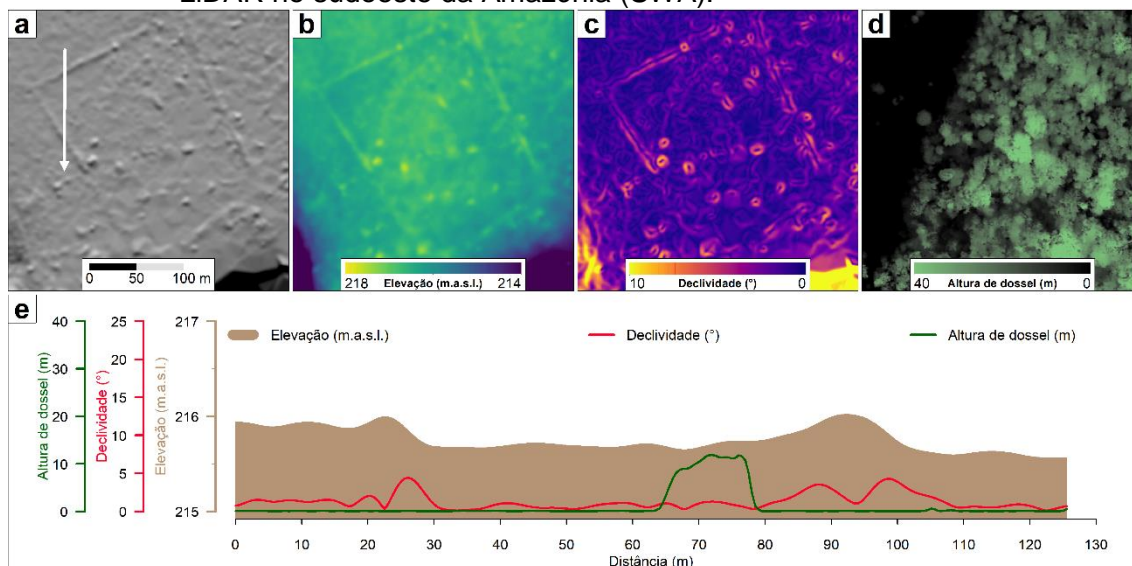
Figura 4.17 – Infraestrutura pré-colombiana ACE-01 identificada usando dados de LiDAR no sudoeste da Amazônia (SWA).



(a) Relevo sombreado indicando o perfil topográfico. (b) Elevação em metros acima do nível do mar. (c) Declividade em graus. (d) Altura de dossel em metros. (e) Perfil topográfico que indica as variações na elevação, declividade e de altura de dossel na estrutura identificada.

Fonte: Produção do Autor.

Figura 4.18 – Infraestrutura pré-colombiana ACE-02 identificada usando dados de LiDAR no sudoeste da Amazônia (SWA).

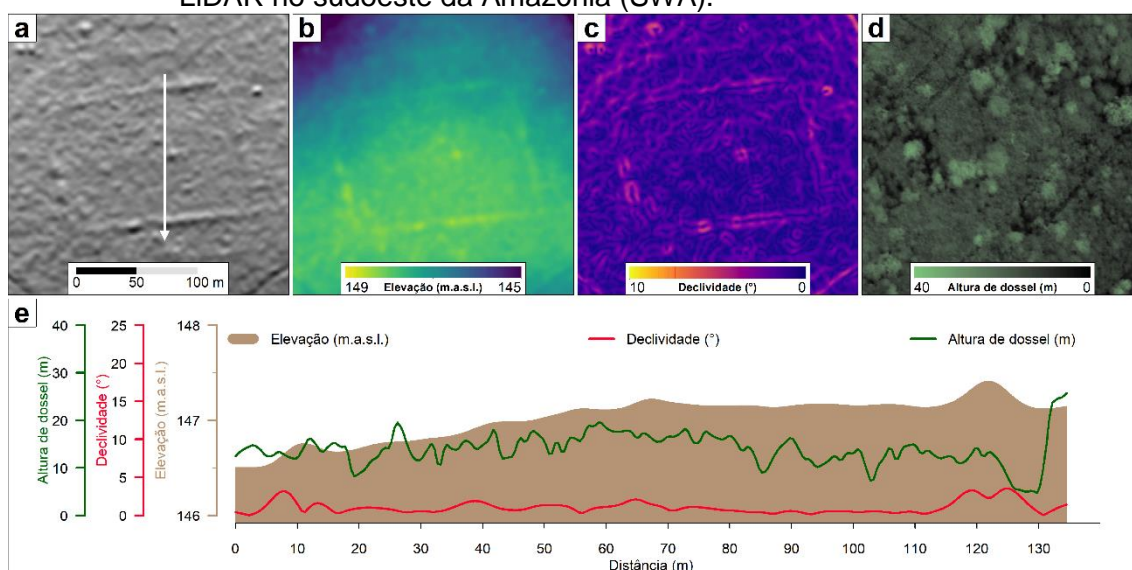


(a) Relevo sombreado indicando o perfil topográfico. (b) Elevação em metros acima do nível do mar. (c) Declividade em graus. (d) Altura de dossel em metros. (e) Perfil topográfico que indica as variações na elevação, declividade e de altura de dossel na estrutura identificada.

Fonte: Produção do Autor.

Os ACE-03/04/05 (Figura 4.19, Figura 4.20 e Figura 4.21, respectivamente) estão localizados a 85 m de um afluente perene do rio Iquiri, com montes de até $\approx 0,3$ m (ACE-03/04) e trincheira de mesma metragem no ACE-05. O padrão de vegetação observado através dos dados de LiDAR mostrou uma menor densidade de indivíduos arbóreos na área das estruturas, e a alta incidência de bambu (*Guadua sp.*) (≈ 10 m de altura) em toda a área.

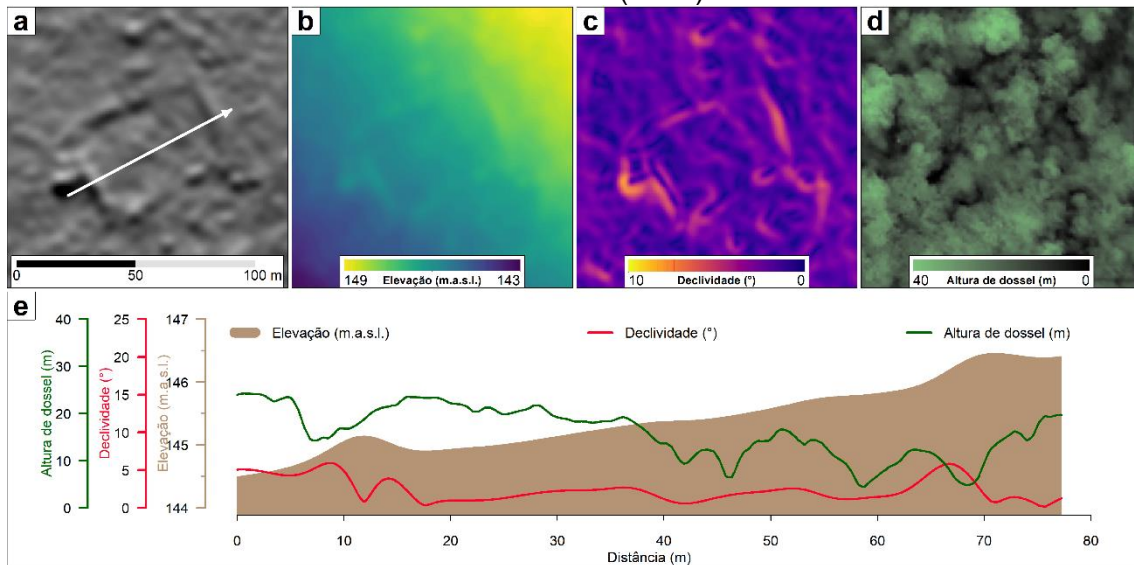
Figura 4.19 – Infraestrutura pré-colombiana ACE-03 identificada usando dados de LiDAR no sudoeste da Amazônia (SWA).



(a) Relevo sombreado indicando o perfil topográfico. (b) Elevação em metros acima do nível do mar. (c) Declividade em graus. (d) Altura de dossel em metros. (e) Perfil topográfico que indica as variações na elevação, declividade e de altura de dossel na estrutura identificada.

Fonte: Produção do Autor.

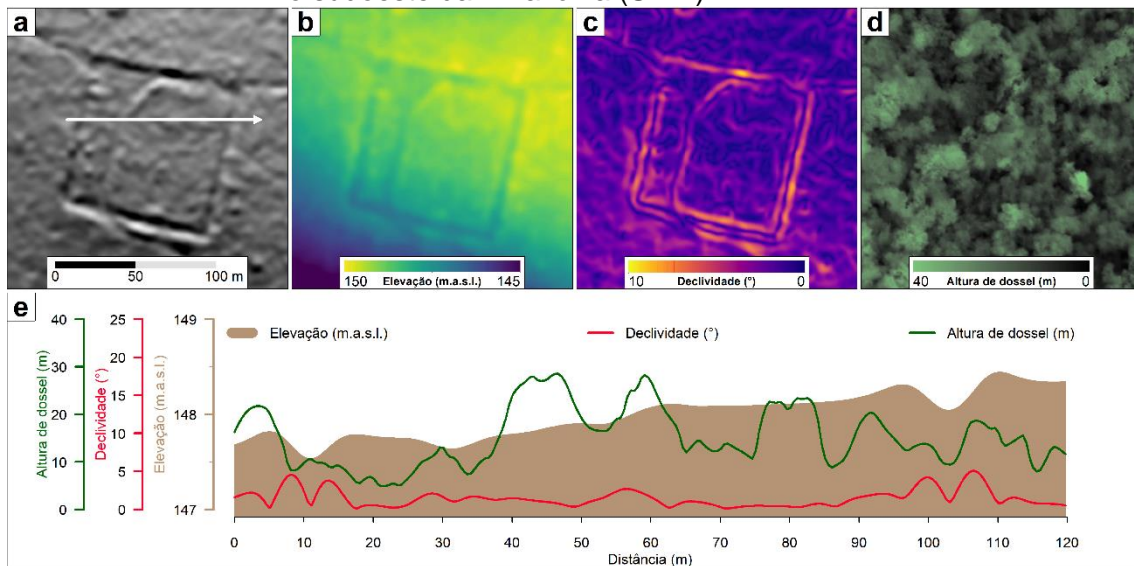
Figura 4.20 – Infraestrutura pré-colombiana ACE-04 identificada usando dados de LiDAR no sudoeste da Amazônia (SWA).



(a) Relevo sombreado indicando o perfil topográfico. (b) Elevação em metros acima do nível do mar. (c) Declividade em graus. (d) Altura de dossel em metros. (e) Perfil topográfico que indica as variações na elevação, declividade e de altura de dossel na estrutura identificada.

Fonte: Produção do Autor.

Figura 4.21 – Infraestrutura pré-colombiana ACE-05 identificada usando dados de LiDAR no sudoeste da Amazônia (SWA).

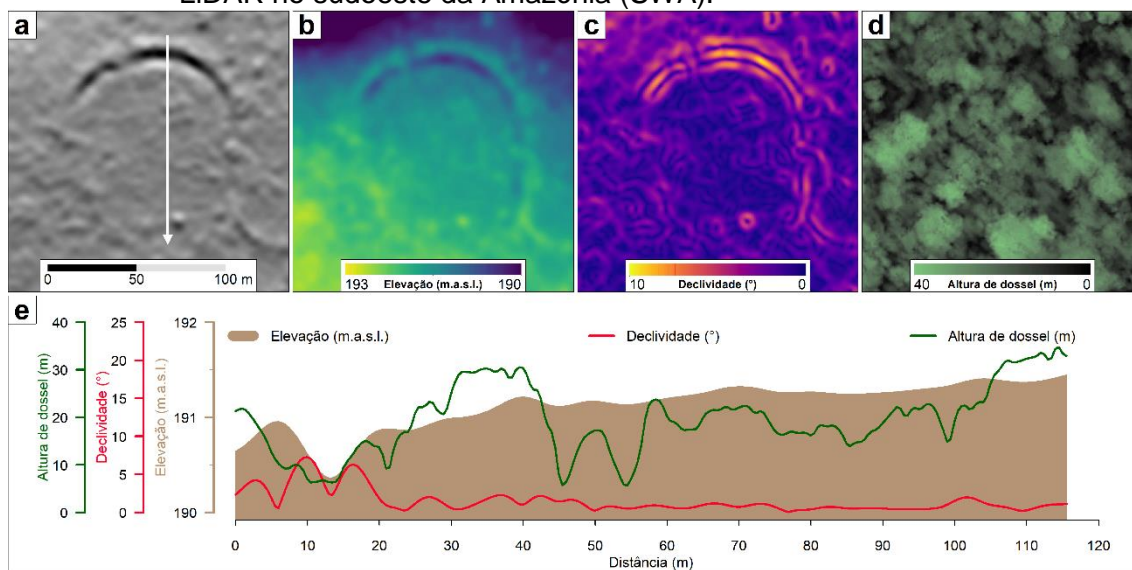


(a) Relevo sombreado indicando o perfil topográfico. (b) Elevação em metros acima do nível do mar. (c) Declividade em graus. (d) Altura de dossel em metros. (e) Perfil topográfico que indica as variações na elevação, declividade e de altura de dossel na estrutura identificada.

Fonte: Produção do Autor.

Outras estruturas (ACE-06 ao 10) apresentam características semelhantes, no entanto, o ACE-07 (Figura 4.16d e Figura 4.23) apresenta montes como subdivisões internas. É possível identificar na porção inferior (sudoeste) que esses montes margeiam 2 estradas, uma na direção sul, que desaparece após 380m em uma feição irregular, e outra na direção oeste por 540m, atravessando um curso d'água e terminando em uma área circular de 35m de diâmetro. Já na divisão superior (norte) os montes existentes também margeiam uma estrada que segue para o norte e desaparece após 455m em um curso d'água perene (Figura 4.16). Além disso, foram identificados padrões incompletos (como semicírculos) no ACE-06/10 (Figura 4.22 e Figura 4.26).

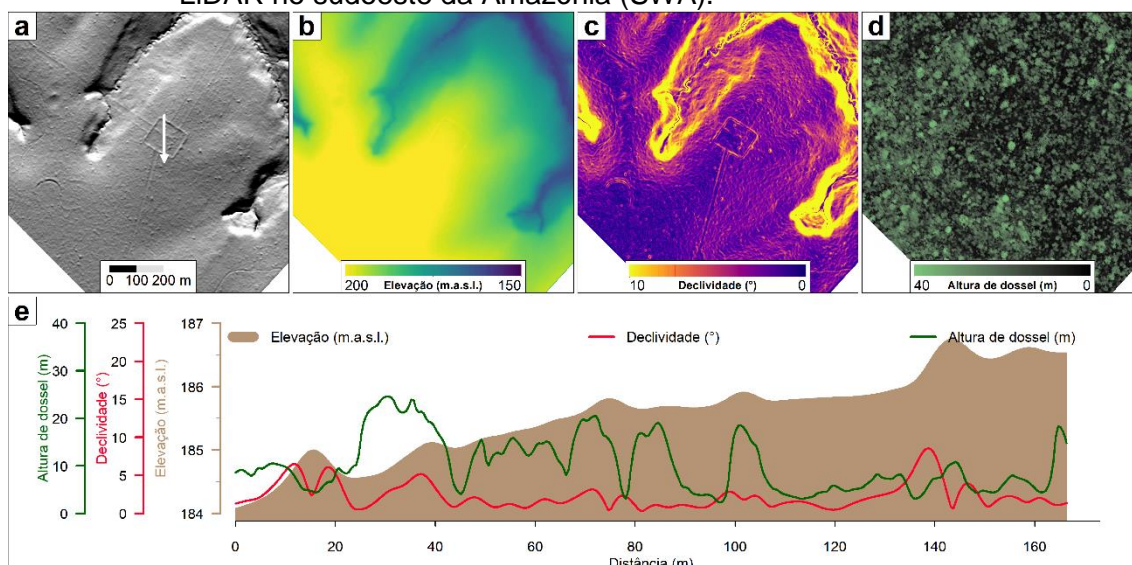
Figura 4.22 – Infraestrutura pré-colombiana ACE-06 identificada usando dados de LiDAR no sudoeste da Amazônia (SWA).



(a) Relevo sombreado indicando o perfil topográfico. (b) Elevação em metros acima do nível do mar. (c) Declividade em graus. (d) Altura de dossel em metros. (e) Perfil topográfico que indica as variações na elevação, declividade e de altura de dossel na estrutura identificada.

Fonte: Produção do Autor.

Figura 4.23 – Infraestrutura pré-colombiana ACE-07 identificada usando dados de LiDAR no sudoeste da Amazônia (SWA).

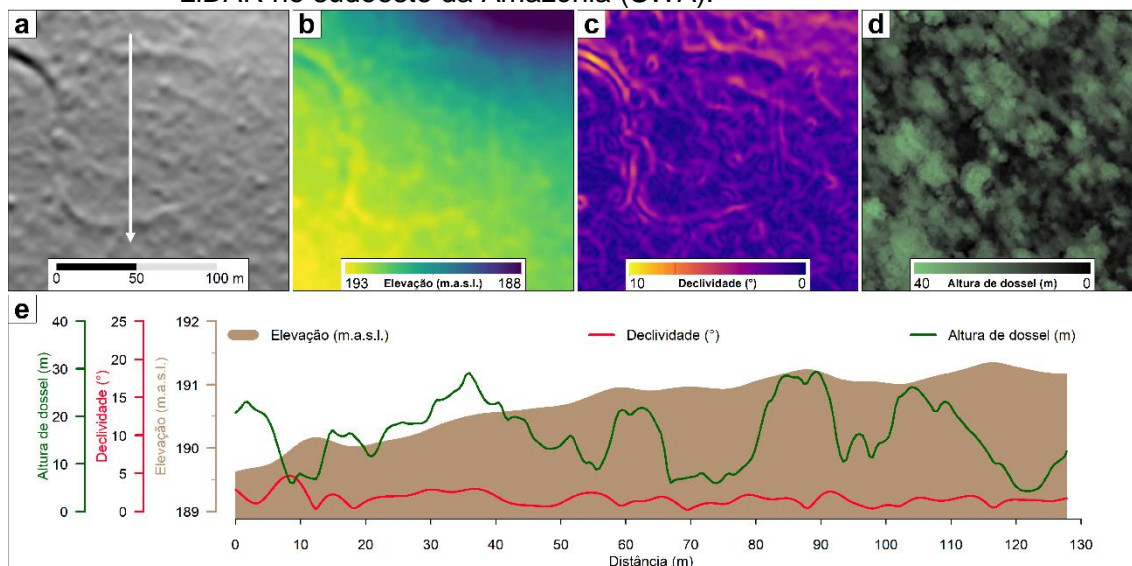


(a) Relevo sombreado indicando o perfil topográfico. (b) Elevação em metros acima do nível do mar. (c) Declividade em graus. (d) Altura de dossel em metros. (e) Perfil topográfico que indica as variações na elevação, declividade e de altura de dossel na estrutura identificada.

Fonte: Produção do Autor.

A orientação dos geoglifos identificados parece estar relacionada à topografia do terreno, com as margens dos montes ou valas posicionadas de acordo com o aspecto topográfico do terreno, possibilitando o controle do escoamento hídrico superficial dentro das áreas adaptadas. Todas as estruturas estão localizadas em altitudes entre 144 e 216 m a.s.l., com variação topográfica de 3,5 m no máximo, sob uma paisagem plana com até 3° de declividade, desconsiderando as margens dos montes ou valas (as margens dos montes e valas atingem até 14° de declividade).

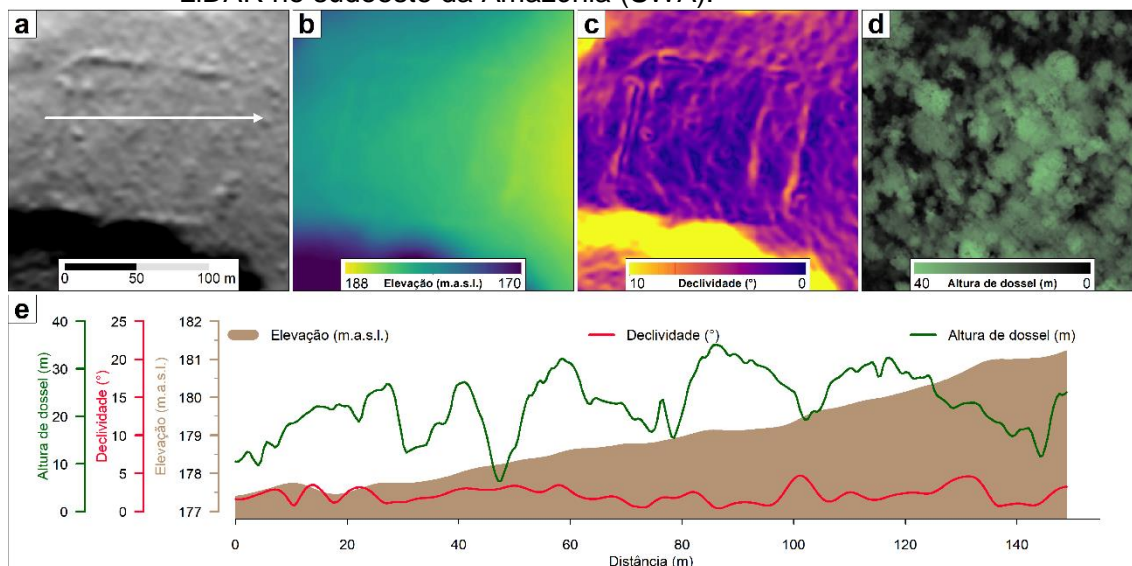
Figura 4.24 – Infraestrutura pré-colombiana ACE-08 identificada usando dados de LiDAR no sudoeste da Amazônia (SWA).



(a) Relevo sombreado indicando o perfil topográfico. (b) Elevação em metros acima do nível do mar. (c) Declividade em graus. (d) Altura de dossel em metros. (e) Perfil topográfico que indica as variações na elevação, declividade e de altura de dossel na estrutura identificada.

Fonte: Produção do Autor.

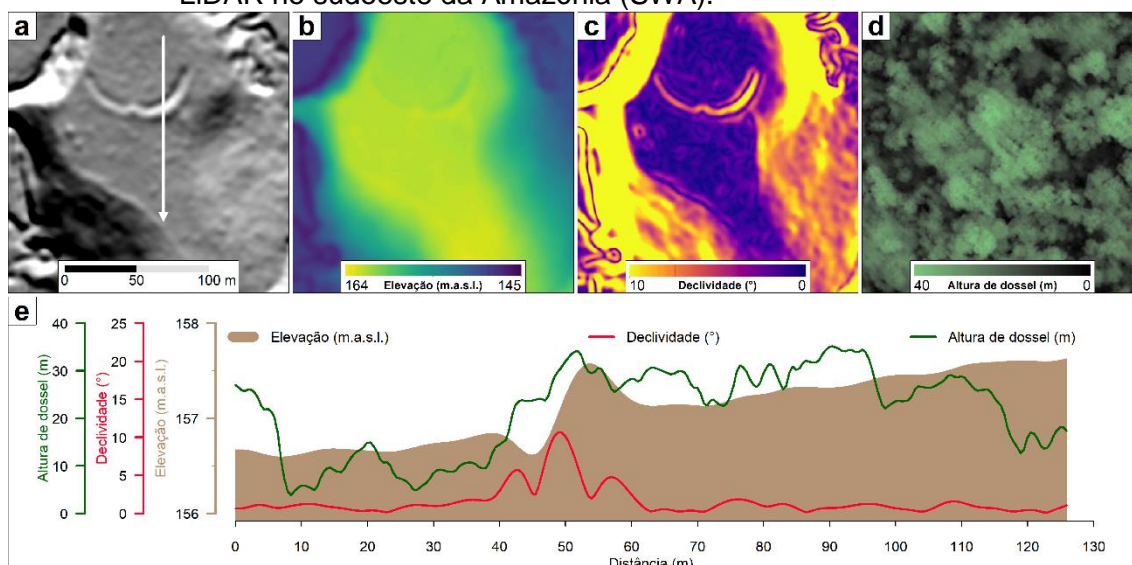
Figura 4.25 – Infraestrutura pré-colombiana ACE-09 identificada usando dados de LiDAR no sudoeste da Amazônia (SWA).



(a) Relevo sombreado indicando o perfil topográfico. (b) Elevação em metros acima do nível do mar. (c) Declividade em graus. (d) Altura de dossel em metros. (e) Perfil topográfico que indica as variações na elevação, declividade e de altura de dossel na estrutura identificada.

Fonte: Produção do Autor.

Figura 4.26 – Infraestrutura pré-colombiana ACE-10 identificada usando dados de LiDAR no sudoeste da Amazônia (SWA).



(a) Relevo sombreado indicando o perfil topográfico. (b) Elevação em metros acima do nível do mar. (c) Declividade em graus. (d) Altura de dossel em metros. (e) Perfil topográfico que indica as variações na elevação, declividade e de altura de dossel na estrutura identificada.

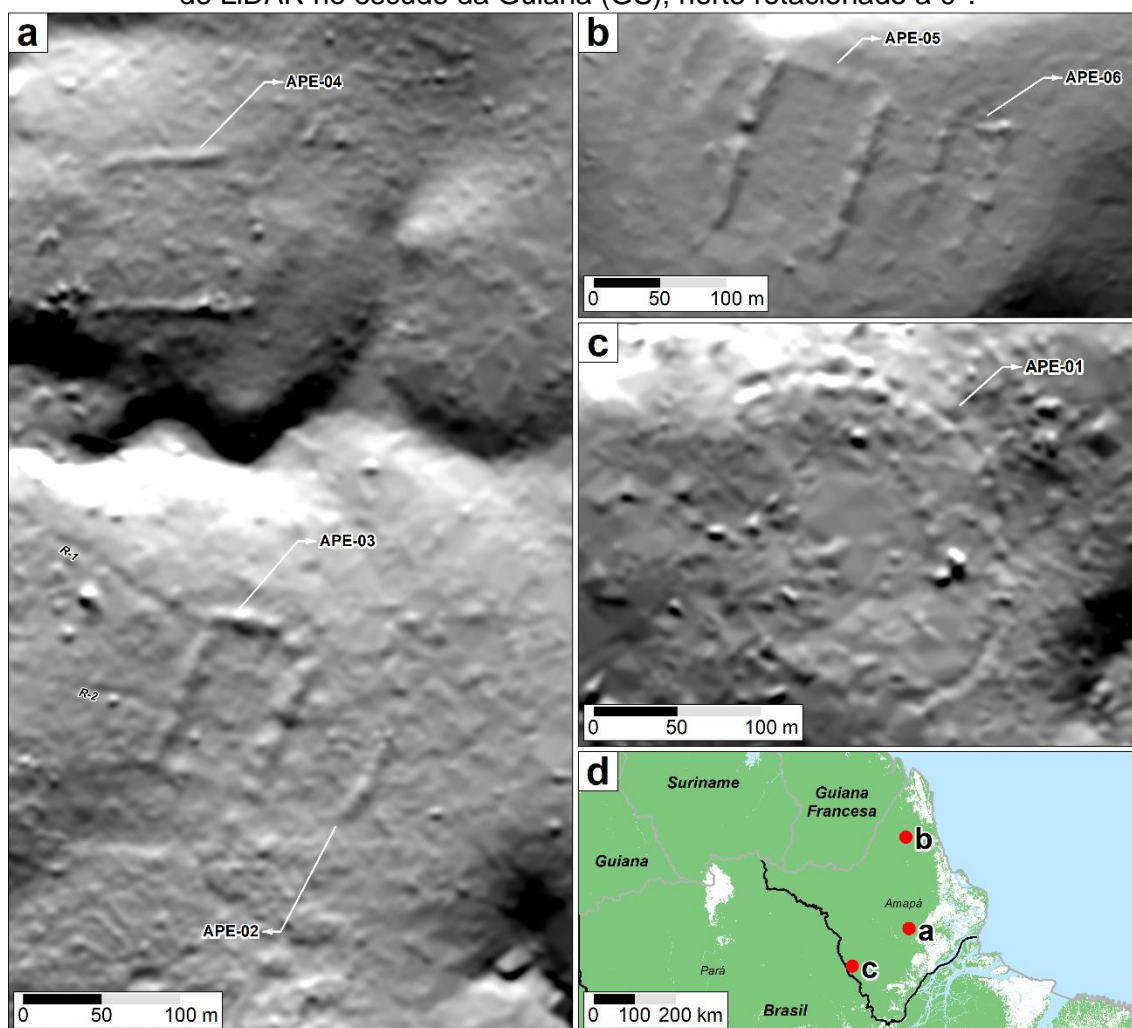
Fonte: Produção do Autor.

Tudo indica que a posição do ACE-10 (Figura 4.16d e Figura 4.26) seja estratégica, uma vez que a baixa declividade (10 m de ganho altimétrico ao longo de 60 m de distância) poderia facilitar o acesso à área através dos rios perenes, e a presença de um posto avançado conseguiria controlar o acesso às outras estruturas identificadas no entorno. O ACE-07 (Figura 4.23) pode ter sido um local de reuniões utilizado para cerimônias religiosas, considerando a existência de estradas com feições em seus extremos, que podem conter urnas cerimoniais. Mesmo que esse arranjo não identifique a presença de solos altamente modificados (terra preta de índio) no local, os geoglifos identificados, que compreendem em sítios religiosos, são aspectos convincentes para a indicação do sedentarismo em regiões próximas, a longo prazo nessas planícies tropicais (SAUNALUOMA et al., 2018; SCHAAN, 2012; WOODS et al., 2008).

4.2.3 Descobertas no escudo da Guiana (GS)

A arqueologia no estado do Amapá no Brasil é conhecida por abrigar estruturas megalíticas dispostas em formas geométricas dispersas ao longo de um trecho de até 100 km da costa (CABRAL; DE MOURA SALDANHA, 2008; CABRAL; SALDANHA, 2008; SCHAAN, 2012). Ocupada por duas antigas civilizações, Aristá ao norte e Mazagão ao sul, estima-se que o desenvolvimento dessas civilizações na região foi iniciado há 2600 A.P. (SILVERMAN; ISBELL, 2008). A busca realizada através da inspeção visual também encontrou três (03) novos possíveis sítios arqueológicos no estado do Amapá, dispersos de norte a sul, nas cidades de Laranjal do Jari, Ferreira Gomes e Oiapoque, localizadas, respectivamente, a 311, 172 e 75 km da costa (Figura 4.27).

Figura 4.27 – Relevo sombreado indicando as estruturas identificadas usando dados de LiDAR no escudo da Guiana (GS), norte rotacionado a 0°.



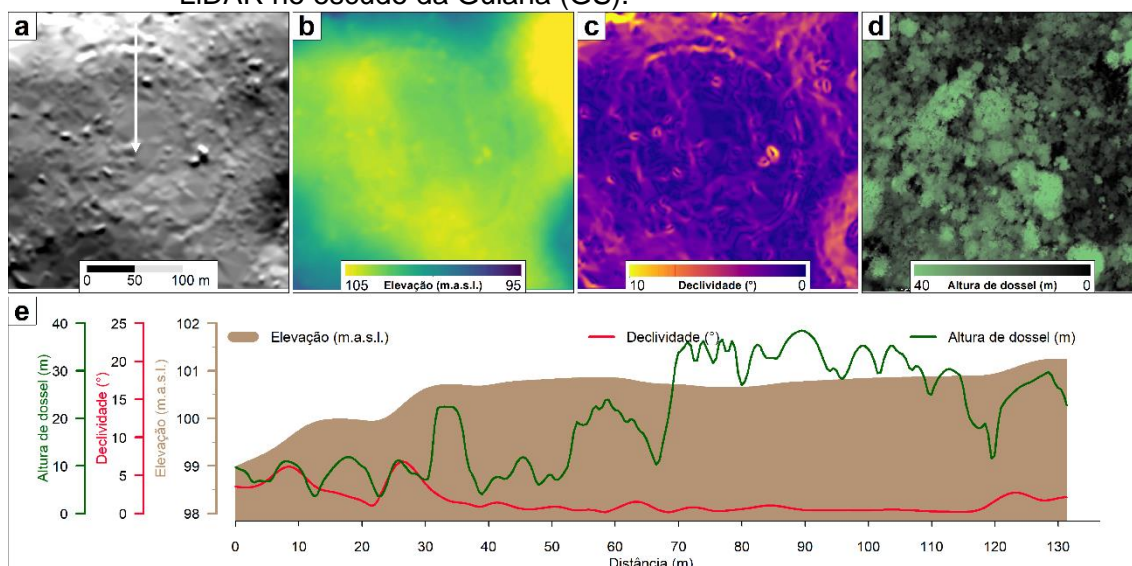
(a) Estruturas em área sob floresta em Ferreira Gomes. (b) Estruturas em área sob floresta em Oiapoque. (c) Estruturas em área sob floresta em Laranjal do Jari. (d) Localização das estruturas identificadas.

Fonte: Produção do Autor.

O APE-01 (Figura 4.27c e Figura 4.28), localizado ao sul do Amapá, consiste em uma estrutura dupla, sendo uma estrutura retangular contida por uma circular. A estrutura circular tem ≈ 180 m de diâmetro sendo margeada por uma trincheira de $\approx 0,35$ m de profundidade, já a estrutura retangular tem $\approx 70 \times 100$ m de dimensão, sendo margeada por trincheiras de $\approx 0,20$ m de profundidade. Ambas as trincheiras têm 10 m de largura e a área está localizada a ≈ 100 m a.s.l. em um planalto situado a 4 m de um curso hídrico perene.

Através dos dados de LiDAR foi possível identificar várias palmeiras e possíveis castanheiras com altura de até 45 m de altura (Figura 4.28).

Figura 4.28 – Infraestrutura pré-colombiana APE-01 identificada usando dados de LiDAR no escudo da Guiana (GS).

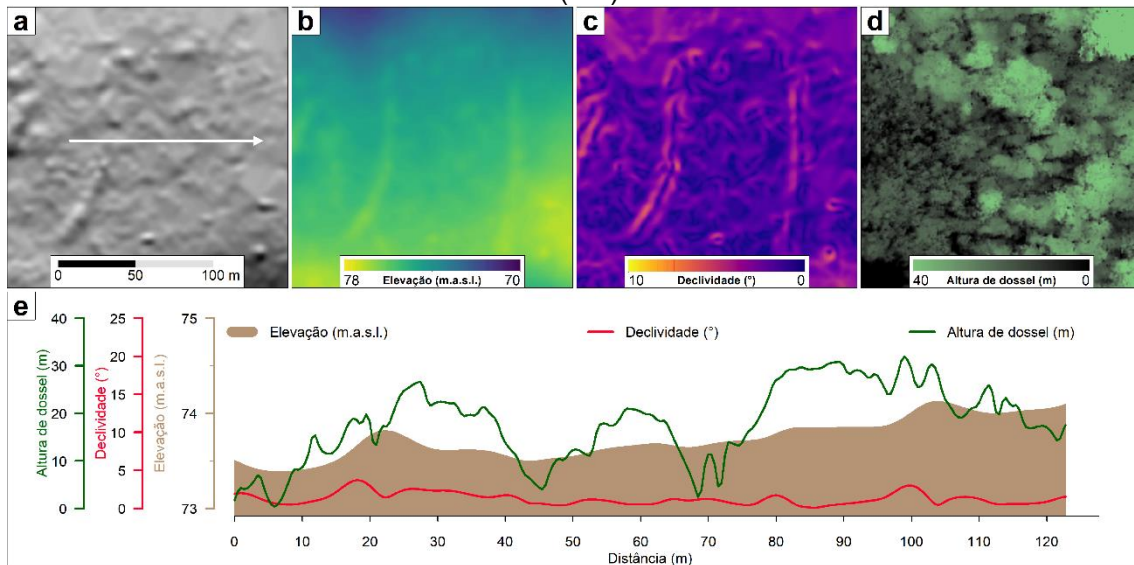


(a) Relevo sombreado indicando o perfil topográfico. (b) Elevação em metros acima do nível do mar. (c) Declividade em graus. (d) Altura de dossel em metros. (e) Perfil topográfico que indica as variações na elevação, declividade e de altura de dossel na estrutura identificada.

Fonte: Produção do Autor.

Ao centro do estado do Amapá foram identificados os possíveis sítios APE-02/03/04 (Figura 4.29, Figura 4.30 e Figura 4.31, respectivamente), que consistem em elementos retangulares com $\approx 80 \times 100$ m de dimensão margeados por montes com 0,30 a 0,75 m de altura e duas estradas (R-1/2) saindo da APE-03 com $\approx 0,10$ m de profundidade. A largura dos montes e das estradas é de $\approx 0,15$ m, e similar à área anterior, estão localizados a ≈ 75 m a.s.l. em um planalto ao lado do rio Araguari. No interior das infraestruturas há uma configuração de vegetação de pequeno porte, menor que 20 m, no entanto, em áreas próximas a vegetação chega a medir 50 m de altura.

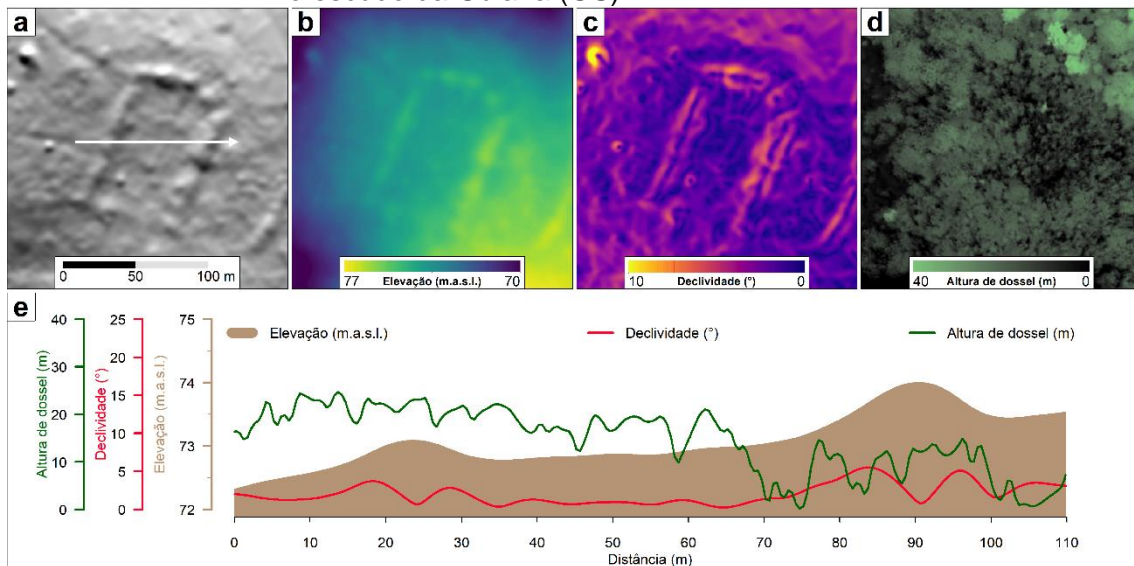
Figura 4.29 – Infraestrutura pré-colombiana APE-02 identificada usando dados de LiDAR no escudo da Guiana (GS).



(a) Relevo sombreado indicando o perfil topográfico. (b) Elevação em metros acima do nível do mar. (c) Declividade em graus. (d) Altura de dossel em metros. (e) Perfil topográfico que indica as variações na elevação, declividade e de altura de dossel na estrutura identificada.

Fonte: Produção do Autor.

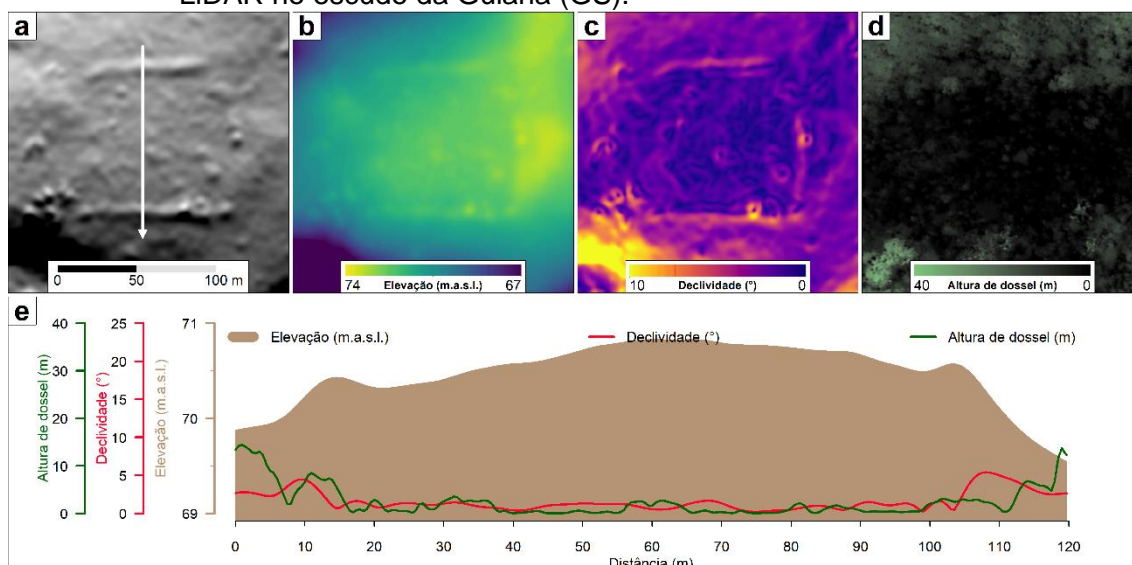
Figura 4.30 – Infraestrutura pré-colombiana APE-03 identificada usando dados de LiDAR no escudo da Guiana (GS).



(a) Relevo sombreado indicando o perfil topográfico. (b) Elevação em metros acima do nível do mar. (c) Declividade em graus. (d) Altura de dossel em metros. (e) Perfil topográfico que indica as variações na elevação, declividade e de altura de dossel na estrutura identificada.

Fonte: Produção do Autor.

Figura 4.31 – Infraestrutura pré-colombiana APE-04 identificada usando dados de LiDAR no escudo da Guiana (GS).

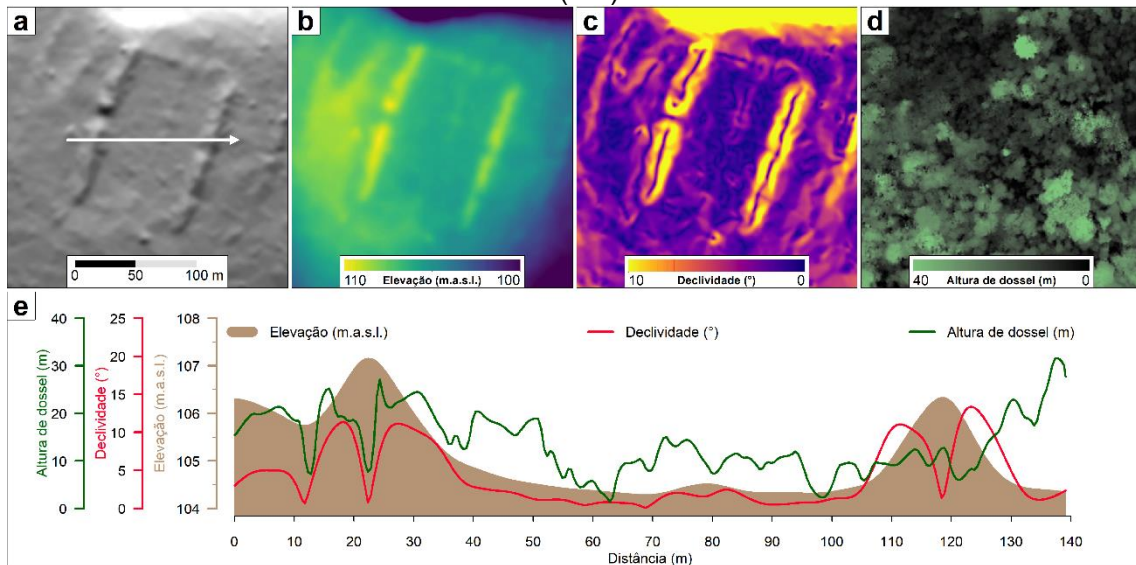


(a) Relevo sombreado indicando o perfil topográfico. (b) Elevação em metros acima do nível do mar. (c) Declividade em graus. (d) Altura de dossel em metros. (e) Perfil topográfico que indica as variações na elevação, declividade e de altura de dossel na estrutura identificada.

Fonte: Produção do Autor.

O APE-05 (Figura 4.32) e o APE-06 (Figura 4.33) estão localizados ao norte do estado do Amapá e são constituídos por estruturas retangulares de $\approx 90 \times 130$ m de dimensão, margeadas por montes com até $\approx 1,5$ m de altura e ≈ 20 m de largura, sendo a maior variação topográfica detectada. A área está localizada a ≈ 100 m a.s.l. em um planalto próximo ao rio Igarapé Cara Grande, onde a vegetação atinge altura de até 45 m.

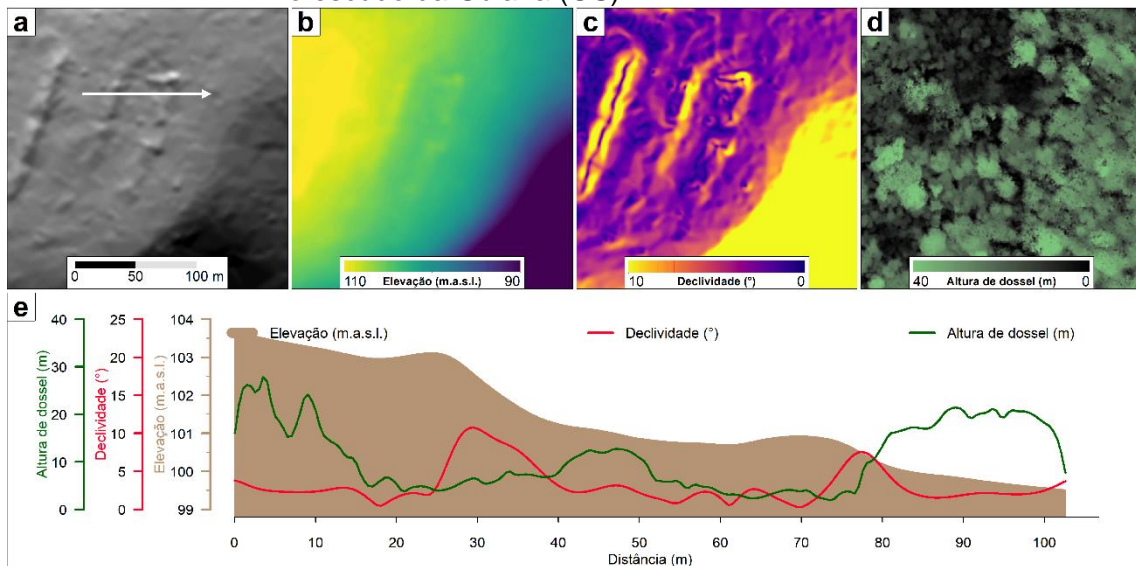
Figura 4.32 – Infraestrutura pré-colombiana APE-05 identificada usando dados de LiDAR no escudo da Guiana (GS).



(a) Relevo sombreado indicando o perfil topográfico. (b) Elevação em metros acima do nível do mar. (c) Declividade em graus. (d) Altura de dossel em metros. (e) Perfil topográfico que indica as variações na elevação, declividade e de altura de dossel na estrutura identificada.

Fonte: Produção do Autor.

Figura 4.33 – Infraestrutura pré-colombiana APE-06 identificada usando dados de LiDAR no escudo da Guiana (GS).



(a) Relevo sombreado indicando o perfil topográfico. (b) Elevação em metros acima do nível do mar. (c) Declividade em graus. (d) Altura de dossel em metros. (e) Perfil topográfico que indica as variações na elevação, declividade e de altura de dossel na estrutura identificada.

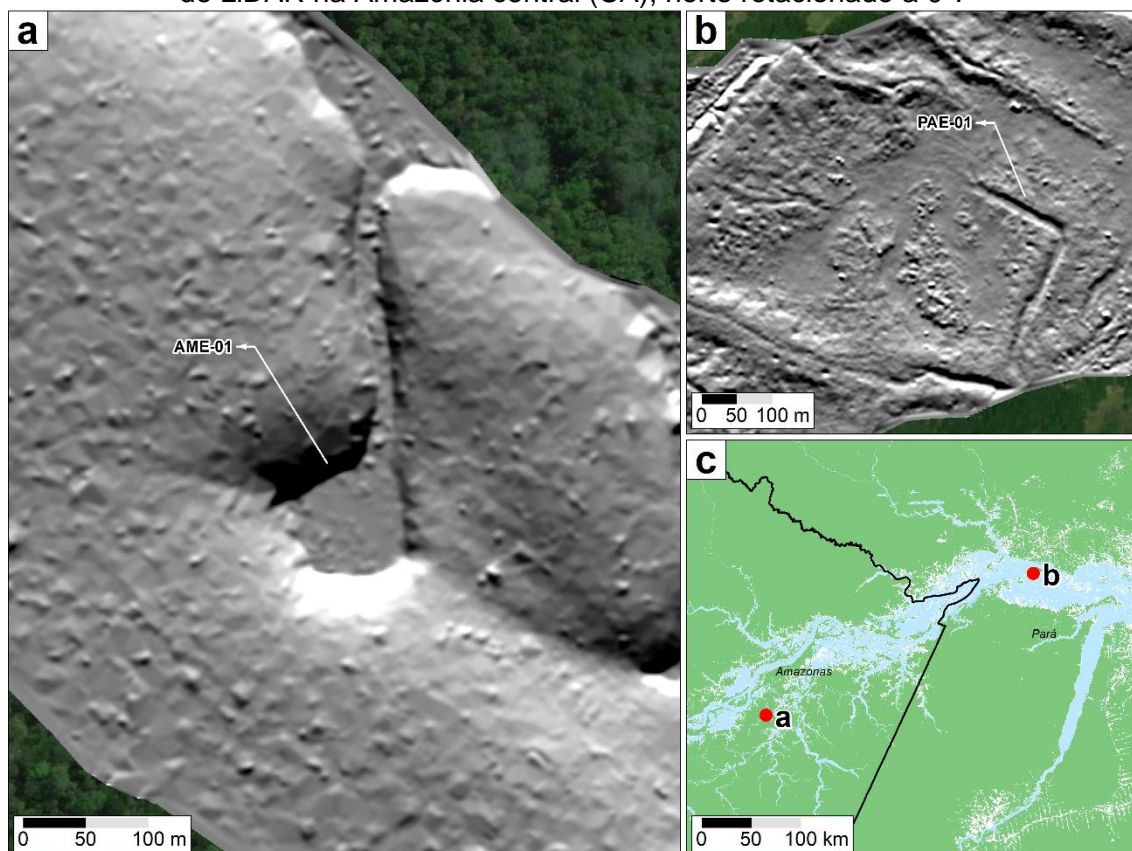
Fonte: Produção do Autor.

Como já mencionado, a porção norte do estado do Amapá possui sítios arqueológicos formados por aglomerados geométricos de pedras de granito. Essas feições estão localizadas no Parque Arqueológico do Solstício, também conhecido como “Stonehenge da Amazônia”, no município de Calçoene, que faz fronteira com o Oiapoque, sede dos sítios APE-05/06 (CABRAL; DE MOURA SALDANHA, 2008; CABRAL; SALDANHA, 2008). A pequena distância (80 km) persuadida pelo padrão de montes com maior elevação detectada sugere que os elementos identificados no APE-05/06 são compostos também por estruturas megalíticas, o mesmo pode se aplicar às APE-02/03/04, que mesmo localizados a 200 km do parque, ainda apresentam padrão de montes com elevação maior que os detectados nas demais regiões.

4.2.4 Descobertas na Amazônia central (CA)

A investigação também fez descobertas em áreas de várzea da região geológica da Amazônia Central, onde dois (02) possíveis sítios arqueológicos foram localizados entre os municípios brasileiros de Manaus (estado do Amazonas) e Santarém (estado do Pará) (Figura 4.34), em um trecho de 500 km, considerado um *hotspot* da arqueologia ribeirinha da Amazônia, que tem como características paisagens domesticadas pré-colombianas de montes, rampas, valas, trincheiras, praças esculpidas e áreas agrícolas (DENEVAN, 1996; HECKENBERGER et al., 1999; SILVERMAN; ISBELL, 2008; STENBORG et al., 2018).

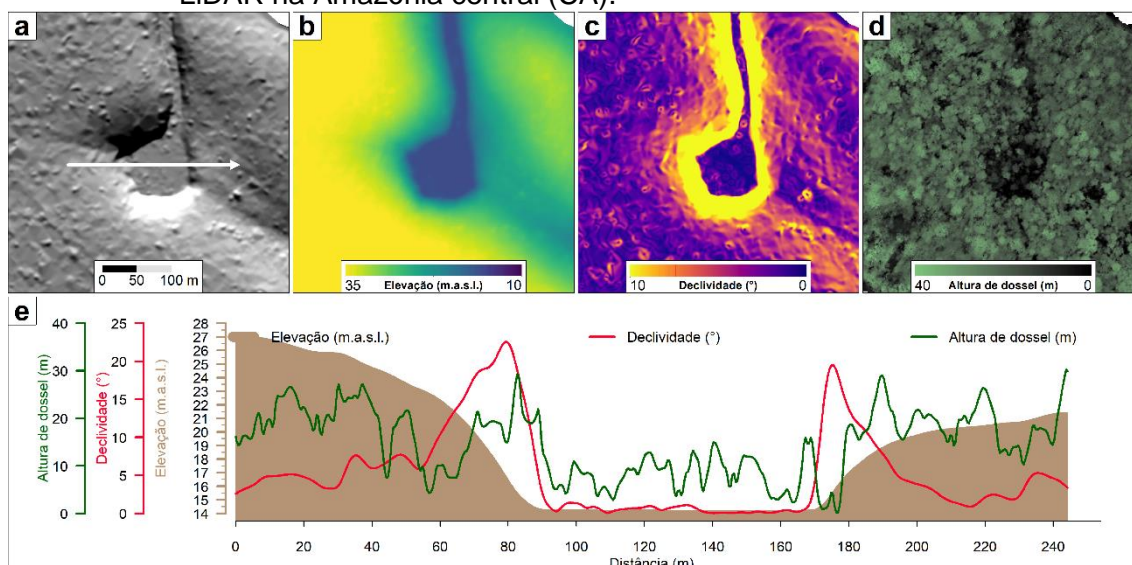
Figura 4.34 – Relevo sombreado indicando as estruturas identificadas usando dados de LiDAR na Amazônia central (CA), norte rotacionado a 0°.



Resultados sobrepostos a imagens orbitais da Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, USDA FSA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, e da comunidade de usuários GIS. (a) Estrutura em área sob floresta em Boa Vista do Ramos, estado do Amazonas, Brasil. (b) Estrutura em área sob floresta em Óbidos, estado do Pará, Brasil. (c) Localização das estruturas identificadas. Fonte: Produção do Autor.

O AME-01 (Figura 4.34a e Figura 4.35) está localizado em Boa Vista do Ramos, a 200 km de Manaus, em um afluente do rio Igarapé Bacabal. A feição geométrica tem 6.500 m² e apresentando uma variação de 5 m em solo, mantendo o terreno plano e contínuo à área de várzea.

Figura 4.35 – Infraestrutura pré-colombiana AME-01 identificada usando dados de LiDAR na Amazônia central (CA).



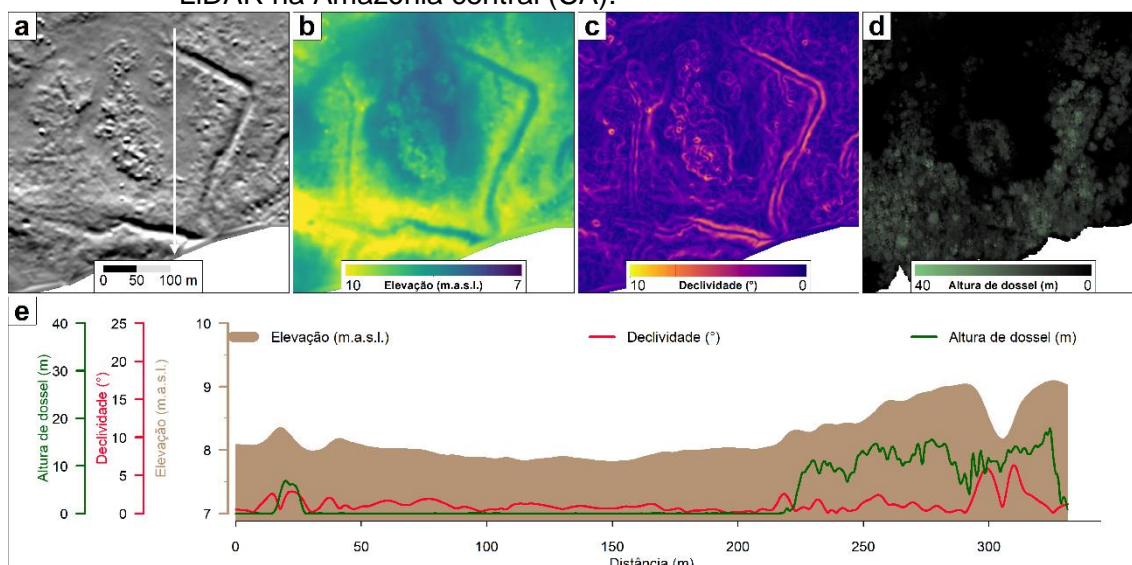
(a) Relevo sombreado indicando o perfil topográfico. (b) Elevação em metros acima do nível do mar. (c) Declividade em graus. (d) Altura de dossel em metros. (e) Perfil topográfico que indica as variações na elevação, declividade e de altura de dossel na estrutura identificada.

Fonte: Produção do Autor.

O PAE-01 (Figura 4.34b e Figura 4.36) também foi interpretado como um possível sítio arqueológico localizado em Óbidos (PA), próximo à divisa com Santarém (PA), em uma área de várzea do rio Amazonas. Considerando suas bordas retilíneas, que formam ângulos de 90° nos vértices, delimitados por valas de $\approx 0,6$ m de profundidade, forma uma estrutura retangular incompleta de $\approx 250 \times 200$ m, o que seria uma provável estrutura feita pelo homem pré-colombiano.

Ambas as estruturas localizadas na Amazônia central (CA) estão situadas em uma paisagem de relevo plano, em baixa altitude, com vegetação de até 30 m de altura.

Figura 4.36 – Infraestrutura pré-colombiana PAE-01 identificada usando dados de LiDAR na Amazônia central (CA).



(a) Relevo sombreado indicando o perfil topográfico. (b) Elevação em metros acima do nível do mar. (c) Declividade em graus. (d) Altura de dossel em metros. (e) Perfil topográfico que indica as variações na elevação, declividade e de altura de dossel na estrutura identificada.

Fonte: Produção do Autor.

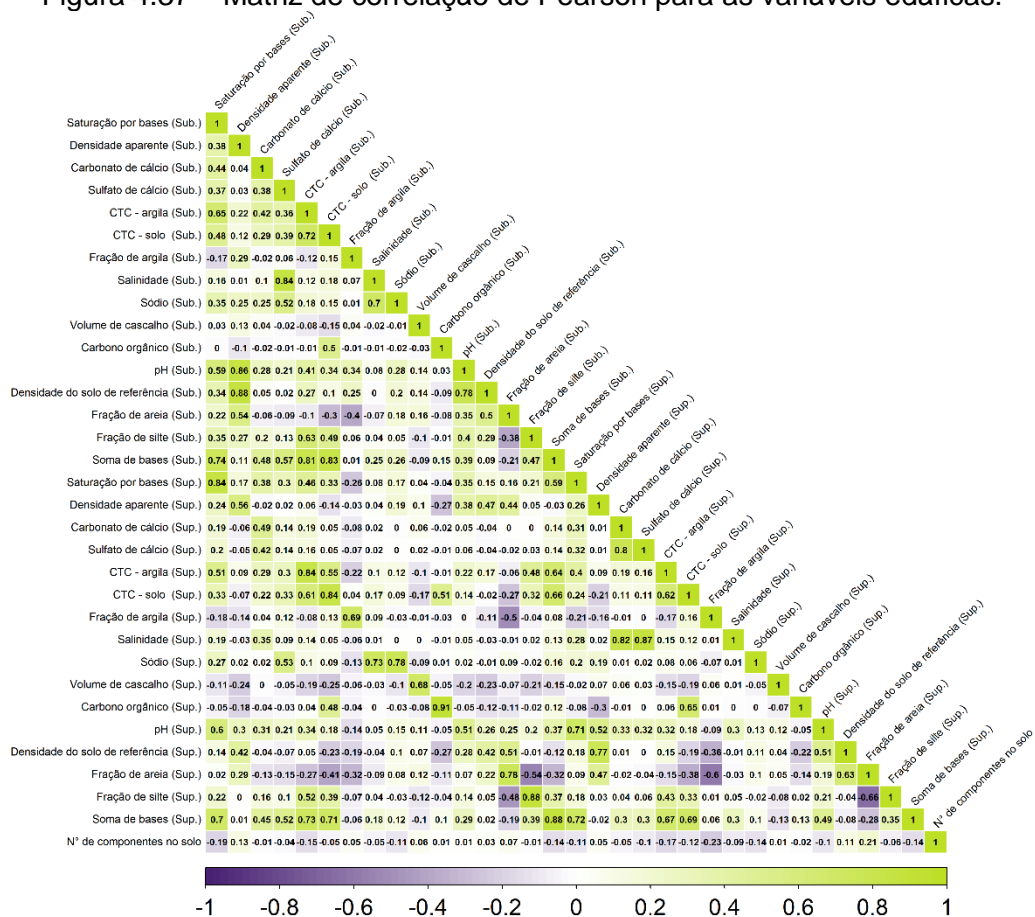
Na Amazônia, assentamentos ribeirinhos apresentam vulnerabilidade devido ao alto risco oferecido pelas enchentes periódicas. Infere-se que as comunidades pré-colombianas tinham conhecimento desse fato, uma vez que mantinham forte interação com locais de terra firme através de estradas e trilhas, a fim de terem acesso a produções suplementares de alimentos (DENEVAN, 1996; NIMUENDAJÚ, 1952a; STENBORG et al., 2018). A ausência de estradas ou trilhas no estreito dado de LiDAR pode colocar determinada descoberta em dúvida, por outro lado, a deposição sedimentar ao longo dos séculos, intensificada pelas inundações periódicas, podem vir a deteriorar essas pequenas feições, deixando apenas as grandes estruturas identificadas que poderiam atuar no manejo hídrico para a gestão da pesca (BLATRIX et al., 2018).

4.3 Modelagem de distribuição de infraestruturas pré-colombianas

4.3.1 Seleção das variáveis predictoras para modelagem

Partindo das bases de dados utilizadas para compor as variáveis ambientais no modelo de máxima entropia (MaxEnt), foram testadas as correlações entre as variáveis edáficas (Figura 4.37) e topográficas (Figura 4.38) para remover aquelas altamente correlacionadas ($\pm 0,8$), de maneira semelhante a outros estudos já desenvolvidos sob a mesma temática (DE SOUZA et al., 2018; FONSECA et al., 2016; KRAMER-SCHADT et al., 2013; MCMICHAEL et al., 2014a, 2014b, 2017; VELOZ, 2009).

Figura 4.37 – Matriz de correlação de Pearson para as variáveis edáficas.

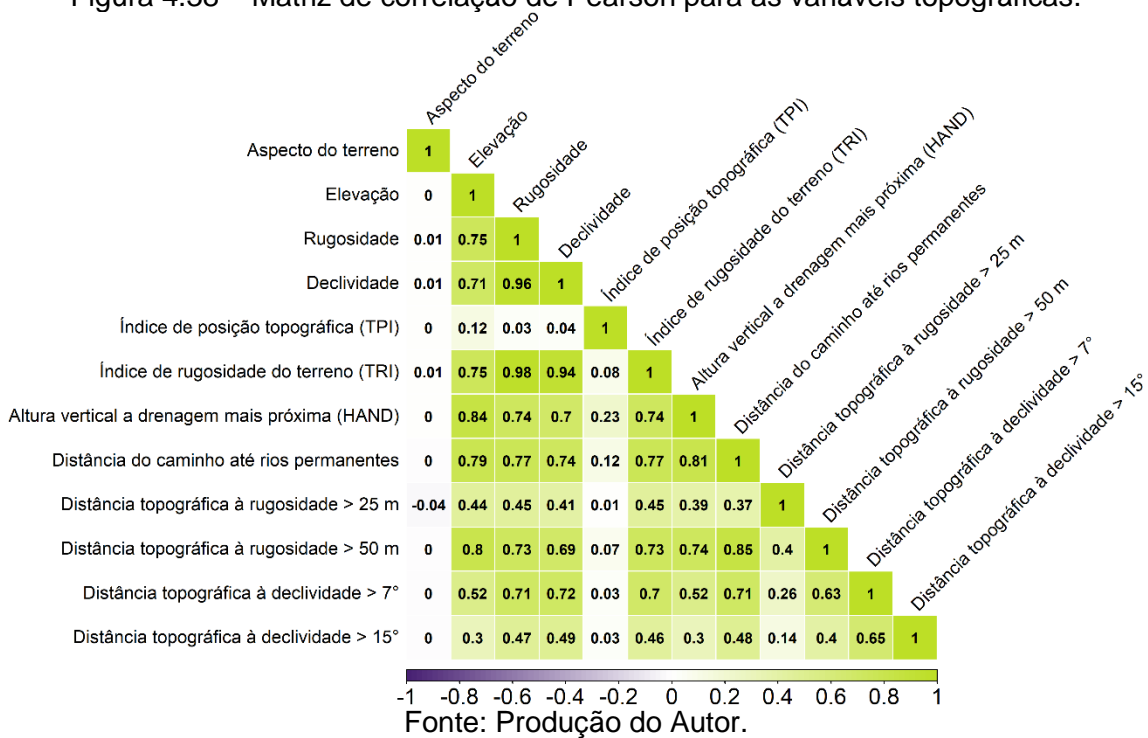


“Sub.” e “Sup.” denominam camadas de solo do subsolo e da superfície, respectivamente.

Fonte: Produção do Autor.

Cada variável edáfica do *Harmonized World Soil Database* (FAO, 2012) encontra-se derivada entre as camadas de solo da superfície (*topsoil*) e do subsolo (*subsoil*), estipulados por regras de taxa-transferência baseadas em taxonomia uniformes (BATJES, 2002; BATJES et al., 1997). Nesse sentido, para reforçar a concisão entre as variáveis de solo da superfície e do subsolo, também foram removidas as variáveis de solo da superfície que apresentaram correlação $\pm 0,5$ com as demais.

Figura 4.38 – Matriz de correlação de Pearson para as variáveis topográficas.



Dada a indicação de variáveis pelos testes de correlação, foram selecionadas as variáveis com maior relevância, e de melhor interpretação, para compor o modelo. Nesse sentido, foram selecionadas as variáveis que são indicadores físicos ou de qualidade, que potencialmente possibilitaram a construção de elementos e o desenvolvimento de comunidades sedentárias. A Tabela 4.1 e Tabela 4.2 apresentam as variáveis selecionadas para compor o modelo final.

Tabela 4.1 – Variáveis edáficas consideradas para compor o modelo de máxima entropia MaxEnt.

<i>Tipo</i>	<i>Variável</i>
Edáfica	Subsolo - Saturação por bases (%) Superfície - Saturação por bases (%)
	Subsolo - Densidade aparente (kg/dm ³) Superfície - Densidade aparente (kg/dm ³)
	Subsolo - Carbonato de cálcio (% wt.) Superfície - Carbonato de cálcio (% wt.)
	Subsolo - Sulfato de cálcio (% wt.) Superfície - Sulfato de cálcio (% wt.)
	Subsolo - CTC (argila) (cmol/kg) Superfície - CTC (argila) (cmol/kg)
	Subsolo - CTC (solo) (cmol/kg) Superfície - CTC (solo) (cmol/kg)
	Subsolo - Fração de argila (% wt.) Superfície - Fração de argila (% wt.)
	Subsolo - Salinidade (ECe) (dS/m) Superfície - Salinidade (ECe) (dS/m)
	Subsolo - Sódio (%) Superfície - Sódio (%)
	Subsolo - Volume de cascalho (%vol.) Superfície - Volume de cascalho (%vol.)
	Subsolo - Carbono orgânico (% wt.) Superfície - Carbono orgânico (% wt.)
	Subsolo - pH (H ₂ O) (-log(H ⁺)) Superfície - pH (H ₂ O) (-log(H ⁺))
	Subsolo - Densidade do solo de referência (kg/dm ³) Superfície - Densidade do solo de referência (kg/dm ³)
	Subsolo - Fração de areia (% wt.) Superfície - Fração de areia (% wt.)
	Subsolo - Fração de silte (% wt.) Superfície - Fração de silte (% wt.)
	Subsolo - Soma de bases (SB) (cmol/kg) Superfície - Soma de bases (SB) (cmol/kg)
	Geomorfologia – dado categórico
	Litologia – dado categórico
	Grupos de solos de referência (FAO88) 1ª ordem – dado categórico
	Número de componentes do solo

As variáveis em negrito são aquelas que apresentaram maiores porcentagens de contribuição e/ou permutação, enquanto que as variáveis em vermelho são altamente correlacionadas com outras de melhor interpretação, e em roxo são aquelas não consideradas como indicador físico ou de qualidade, e não foram incluídas no modelo final.

Fonte: Produção do Autor.

As variáveis edáficas retidas para o modelo final, considerando os indicadores físicos e de qualidade da camada de solo do subsolo foram: (1) Carbonato de cálcio; (2) Capacidade de Troca de Cátions (CTC) da fração de argila; (3)

Capacidade de Troca de Cátions (CTC) do solo; (4) Fração de argila; (5) Volume de cascalho; (6) Carbono orgânico; (7) pH (H₂O); (8) Densidade do solo de referência; (9) Fração de areia; (10) Fração de silte. E da camada de solo superfície foram: (11) Densidade aparente; (12) Carbonato de cálcio. Também foram considerados: (13) Grupos de solos de referência, e (14) Número de componentes do solo, totalizando 14 variáveis edáficas.

Variáveis como sódio, salinidade e sulfato de cálcio foram desconsideradas, pois os solos da Amazônia, em geral, têm conteúdos que variam de muito baixas a baixas. Isto dificilmente impactariam no desenvolvimento de alguma cultura (FAO, 2012). A Saturação por bases foi desconsiderada, pois mesmo não incidindo na área de estudo, ela geralmente apresenta uma correlação quase linear com o pH (FAO, 2012). As variáveis categóricas de geomorfologia e litologia foram descartadas, pois elas sempre mantinham o percentual de contribuição e permutação muito elevado em detrimento das demais variáveis.

Tabela 4.2 – Variáveis topográficas consideradas para compor o modelo de máxima entropia MaxEnt.

<i>Tipo</i>	<i>Variável</i>
Topográfica	Aspecto do terreno (°)
	Elevação (m)
	Rugosidade
	Declividade (°)
	Índice de posição topográfica (TPI)
	Índice de rugosidade do terreno (TRI)
	Distância topográfica à rugosidade > 25 m
	Distância topográfica à rugosidade > 50 m
	Distância topográfica à declividade > 7°
	Distância topográfica à declividade > 15°
	Altura vertical a drenagem mais próxima (HAND)
Distância do caminho até rios permanentes	

A variável em negrito é aquela que apresentou maior percentual de contribuição e/ou permutação, enquanto que as variáveis em vermelho são altamente correlacionadas com outras de melhor interpretação, e não foram incluídas o modelo final.

Fonte: Produção do Autor.

As variáveis topográficas retidas para o modelo final, que visavam considerar o movimento e o fluxo das populações pré-colombianas foram: (1) Aspecto do

terreno; (2) Declividade; (3) Índice de posição topográfica (TPI); (4) Distância topográfica à rugosidade maior que 25 m; (5) Distância topográfica à declividade maior que 15°; (6) Altura vertical a drenagem mais próxima (HAND); e (7) Distância do caminho até rios permanentes. Assim totalizando 7 variáveis edáficas.

4.3.2 Modelagem da distribuição de infraestruturas pré-colombianas.

A modelagem da distribuição de infraestruturas pré-colombianas construídas utilizando as 24 novas infraestruturas compiladas com aquelas já reportadas na literatura, compreendendo um total de 844 ocorrências, mostrou que as variáveis edáficas relacionadas a CTC do solo, fração de silte e os grupos de solos, foram as variáveis que mais contribuíram para a predição da distribuição das estruturas, conforme mostra a Tabela 4.3.

A CTC do solo se apresentou como a variável de maior contribuição percentual, demonstrando que o modelo preditivo segue a tendência de excluir áreas com pouca resiliência, onde não existe a capacidade de acumular estoques de nutrientes do solo, a exemplo das áreas de solo arenoso (FAO, 2012). Assim, a Figura 4.39 indica que na modelagem de distribuição há o destaque das áreas com CTC do solo com valores > 4 cmol/kg.

Fragmentos de silte são compostos majoritariamente por fragmentos/partículas de minerais de quartzo ou feldspato, originados pelo intemperismo mecânico da rocha. A fração de silte no solo tem relação direta com a sua capacidade volumétrica de retenção de água devido ao reduzido tamanho dessas partículas, entre 0,002 mm e 0,05 mm de diâmetro, inferindo assim uma menor taxa drenagem (FAO, 2012; QUESADA et al., 2011). Contudo, a presença de estruturas pré-colombianas em áreas que apresentam uma grande variação desta variável (ilustrado na Figura 4.39) pode indicar que a capacidade de

retenção de água pelo solo não era um aspecto inibidor para a instalação dessas infraestruturas.

Tabela 4.3 – Percentual de contribuição e importância de permutação das camadas ambientais incluídas nos modelos de máxima entropia (MaxEnt).

<i>Variável</i>	<i>Percentual de contribuição</i>		<i>Importância da permutação</i>	
	<i>844 ocorrências</i>	<i>820 ocorrências</i>	<i>844 ocorrências</i>	<i>820 ocorrências</i>
<i>Subsolo - CTC do solo (cmol/kg)</i>	18,7	18,9	3,4	3,7
<i>Grupos de solos de referência (FAO88) 1ª ordem</i>	9,7	8,8	12,2	12,4
<i>Subsolo - Fração de silte (% wt.)</i>	9,5	11,1	14,4	16,2
<i>Subsolo - Fração de areia (% wt.)</i>	9,5	8,6	7,7	6,9
<i>Subsolo - Fração de argila (% wt.)</i>	8,7	11	8,5	7,8
<i>Número de componentes do solo</i>	8	7,3	3,5	3,4
<i>Superfície - Densidade aparente (kg/dm³)</i>	6,2	3,7	1,2	0,8
<i>Distância do caminho até rios permanentes</i>	6	6,5	6,1	9
<i>Subsolo - Volume de cascalho (%vol.)</i>	5,9	6,9	4,4	1,8
<i>Subsolo - Carbono orgânico (% wt.)</i>	5,1	5,4	9,9	11,9
<i>Subsolo - CTC da argila (cmol/kg)</i>	5	4,9	11,6	11,4
<i>Distância topográfica à rugosidade > 25 m</i>	2,2	2,3	0,3	0,3
<i>Altura vertical a drenagem mais próxima (HAND)</i>	1,9	1,3	4,2	1,4
<i>Subsolo - Densidade do solo de referência (kg/dm³)</i>	1,1	0,7	6,8	4,9
<i>Subsolo - Carbonato de cálcio (% wt.)</i>	1,1	1,4	4,5	7
<i>Aspecto do terreno (°)</i>	0,9	0,5	0,3	0,1
<i>Declividade (°)</i>	0,2	0,2	0,3	0,4
<i>Subsolo - pH (H₂O) (-log(H⁺))</i>	0,2	0,1	0,6	0,8
<i>Superfície - Carbonato de cálcio (% wt.)</i>	0,1	0,1	0	0
<i>Índice de posição topográfica (TPI)</i>	0	0,1	0	0
<i>Distância topográfica à declividade > 15°</i>	0	0	0	0

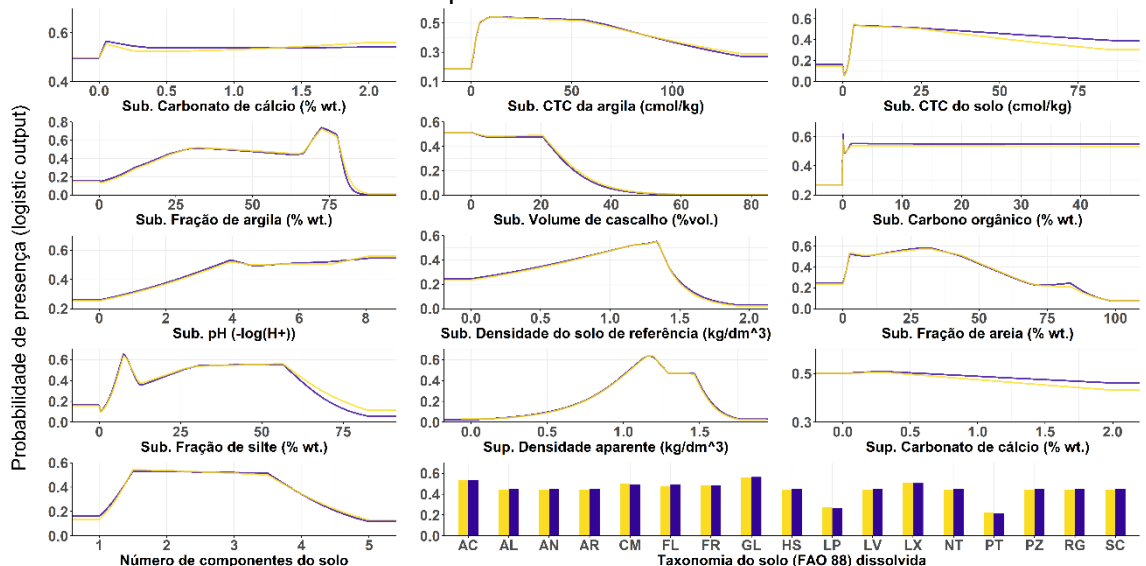
As 844 ocorrências observadas correspondem à modelagem que inclui os novos dados adquiridos ao longo da pesquisa. Já as 820 ocorrências correspondem à modelagem realizada utilizando apenas dados compilados da literatura.

Fonte: Produção do Autor.

Os grupos de solos (Figura 4.39) que sugerem probabilidade de ocorrência menores de infraestruturas pré-colombianas são os Plintossolos (PT) e Leptossolo (LP), que além de rasos, apresentam mistura de minerais endurecidos e conglomerados, características que restringiriam o cultivo. No entanto, áreas de Gleissolos (GL) e Acrissolos (AC), que se distinguem pela capacidade de drenagem (da menor para a maior, respectivamente), apresentaram maior probabilidade de presença nas áreas de ocorrência,

confirmando a dicotomia da presença de infraestruturas pré-colombianas em florestas de várzea ou terra firme (FAO, 2012).

Figura 4.39 – Curvas de resposta dos dados de ocorrência para as variáveis edáficas incluídas no modelo preditivo MaxEnt.

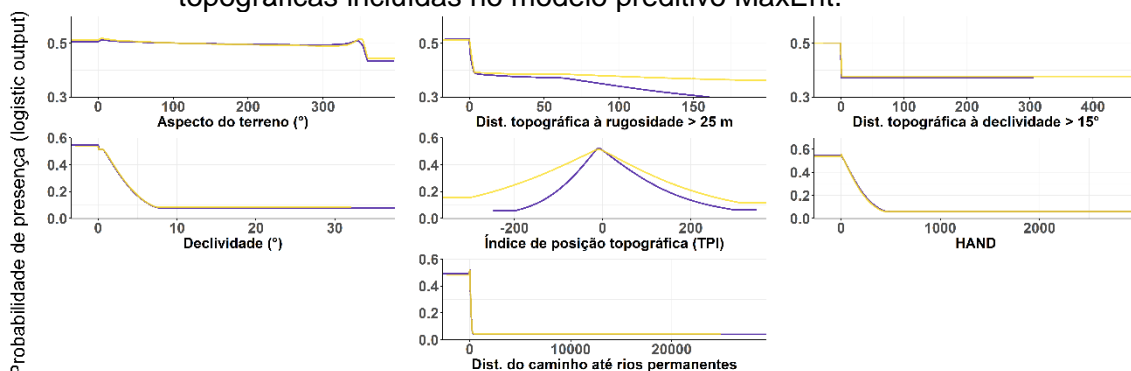


As curvas representam um modelo criado utilizando apenas a variável correspondente, recomendado para facilitar a interpretação da variável. Cor amarela para modelagem com novos dados (844 ocorrências), e roxo para modelagem com apenas dados publicados (820 ocorrências). “Sub.” e “Sup.” denominam camadas de solo do subsolo e da superfície, respectivamente.

Fonte: Produção do Autor.

As variáveis topográficas podem influenciar o movimento e o fluxo das populações, indicando áreas mais aptas a receberem ocupações humanas, que podem ser definidas pela proximidade e facilidade de acesso a recursos naturais. Nesse sentido, a clara contração nos níveis mais baixos das variáveis métricas, e a angular de declividade, observadas na Figura 4.40, sugerem que a topografia local era um aspecto relevante para a construção e estabelecimento de habitação pelas comunidades pré-colombianas.

Figura 4.40 – Curvas de resposta dos dados de ocorrência para as variáveis topográficas incluídas no modelo preditivo MaxEnt.



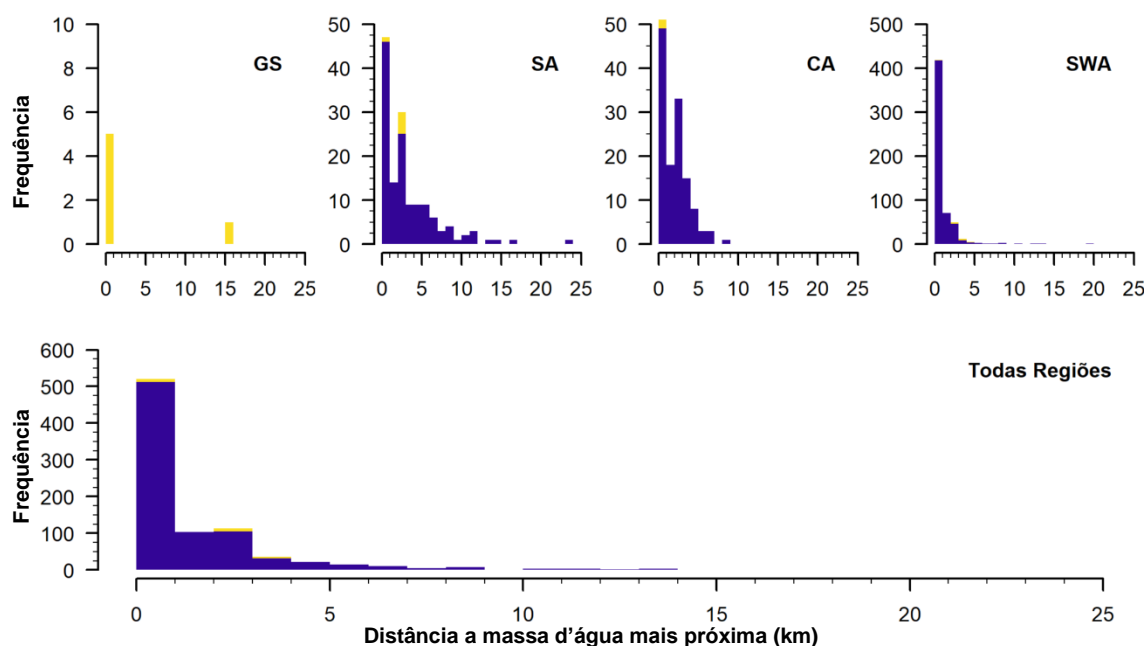
As curvas representam um modelo criado utilizando apenas a variável correspondente, recomendado para facilitar a interpretação da variável. Cor amarela para modelagem com novos dados (844 ocorrências), e roxo para modelagem com apenas dados publicados (820 ocorrências). “Sub.” e “Sup.” denominam camadas de solo do subsolo e da superfície, respectivamente.

Fonte: Produção do Autor.

Desse modo, frente à influência das variáveis topográficas na modelagem destacam-se a distância do caminho até rios permanentes, e a altura vertical à drenagem mais próxima (HAND) como as mais significativas, tanto no percentual de contribuição quanto na importância da permutação (Tabela 4.3). Essas variáveis indicam a disponibilidade e facilidade de acesso aos recursos hídricos, onde as estruturas identificadas encontram-se geralmente próximas e com fácil acesso a massas d’água (Figura 4.41).

O índice de posição topográfica (TPI) próximo a zero (Figura 4.40) indica a provável ocorrência de estruturas em áreas de relevo plano (SALINAS-MELGOZA et al., 2018). Embora a literatura reforce este padrão ocorrência de infraestruturas pré-colombianas em áreas de planícies, há a diferenciação da região da estrutura com a distância aos cursos hídricos (Figura 4.41). As estruturas localizadas em Llanos de Moxos na Bolívia (que se estende pela SWA e parte da SA), encontram-se mais próxima à rios, enquanto as estruturas localizadas nas demais regiões encontram-se mais distantes (BLATRIX et al., 2018; DE SOUZA et al., 2018, 2019; MAEZUMI et al., 2018).

Figura 4.41 – Frequência de infraestruturas pré-colombianas em relação a distância à massa d’água mais próxima, considerando a facilidade de acesso para cada região.

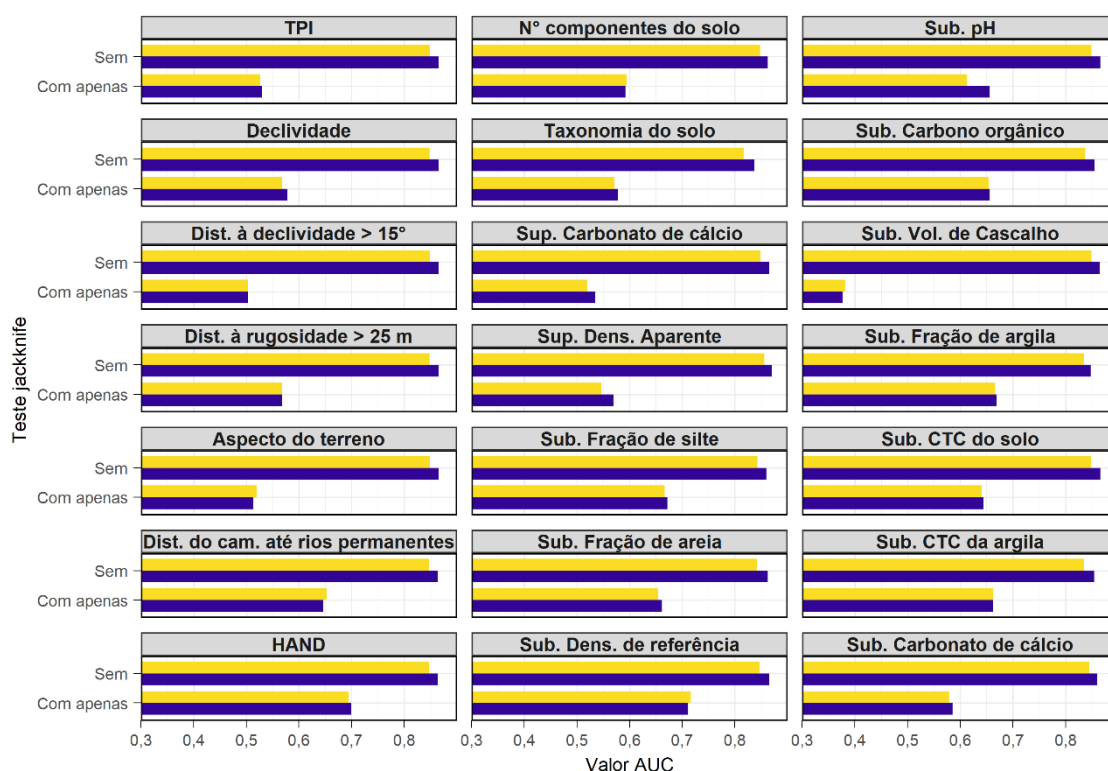


A facilidade de acesso considera as variações topográficas e de declividade para estipular o caminho. A cor amarela destaca a localização das novas estruturas identificadas sobre as outras estruturas. Não há registro de ocorrências de infraestruturas nas regiões geológicas de EA e NWA.

Fonte: Produção do Autor.

A contribuição de cada variável individual nos modelos pode ser observada no teste *jackknife*, apresentado na Figura 4.42, que é comumente utilizado para determinar variáveis que reduzem a confiabilidade do modelo quando omitidas (ESFANJANI et al., 2018; QIN et al., 2017). Assim, é possível inferir que a remoção da variável de volume de cascalho do subsolo, e até mesmo a de aspecto do terreno, podem impactar de maneira positiva o modelo.

Figura 4.42 – Teste *jackknife* para avaliar a importância relativa das variáveis do modelo.



■ Apenas dados já publicados (820 ocorrências) AUC = 0,8694
 ■ Compilação com novos dados (844 ocorrências) AUC = 0,8546

No teste *jackknife*, “Sem” simula o modelo sem a variável, e “Com apenas” simula o modelo com apenas a variável. “Sub.” e “Sup.” denominam camadas de solo do subsolo e da superfície, respectivamente.

Fonte: Produção do Autor.

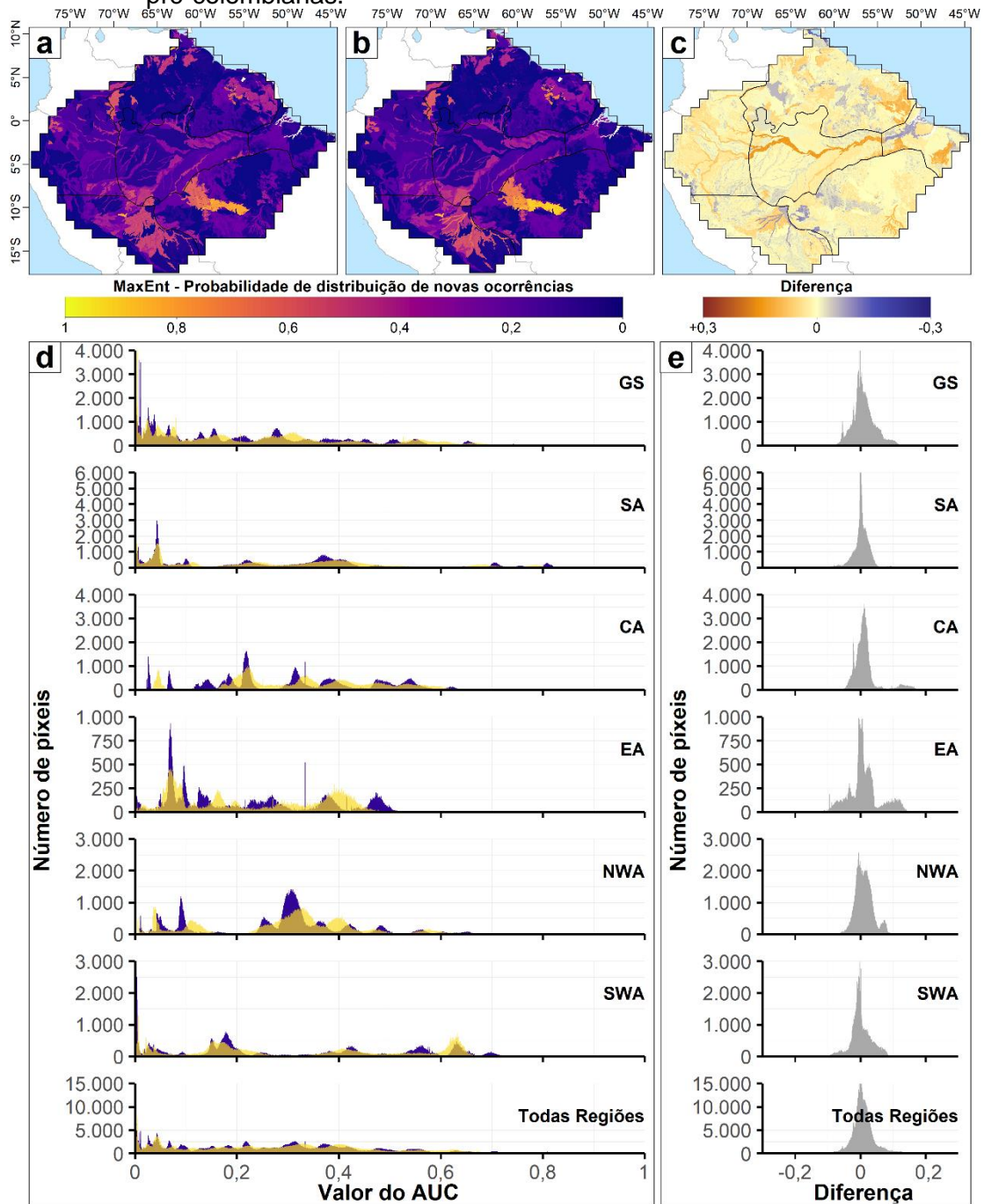
Nesse sentido, a eficiência do modelo de máxima entropia (MaxEnt) é dada pelo AUC (do inglês *área under the Receiving Operator Curve*), uma das estatísticas mais comuns para avaliação do desempenho do modelo, e representa a probabilidade de uma célula de presença ter um valor de predição mais elevado que uma célula de pseudo-ausência, onde ambas são escolhidas aleatoriamente (ELITH et al., 2006; ESFANJANI et al., 2018; FOURCADE et al., 2014; QIN et al., 2017).

Considerando que valores de AUC abaixo de 0,5 indicam que o modelo não teve desempenho melhor que o acaso, e valores próximos a 1 indicam desempenho com discriminação satisfatória. Os valores médios de AUC da modelagem (Figura 4.42) que se mantiveram superiores a 0,85 são potencialmente adequados (ELITH et al., 2006; FOURCADE et al., 2014).

Quanto à área projetada que indica as regiões com maior probabilidade de ocorrência de infraestruturas pré-colombianas, a descoberta de 24 novas ocorrências aumentou a probabilidade de distribuição ao longo das seis regiões geológicas da Amazônia, resultando em uma diferente perspectiva em comparação com outros autores (DE SOUZA et al., 2018; MCMICHAEL et al., 2014b; MCMICHAEL; BUSH, 2019).

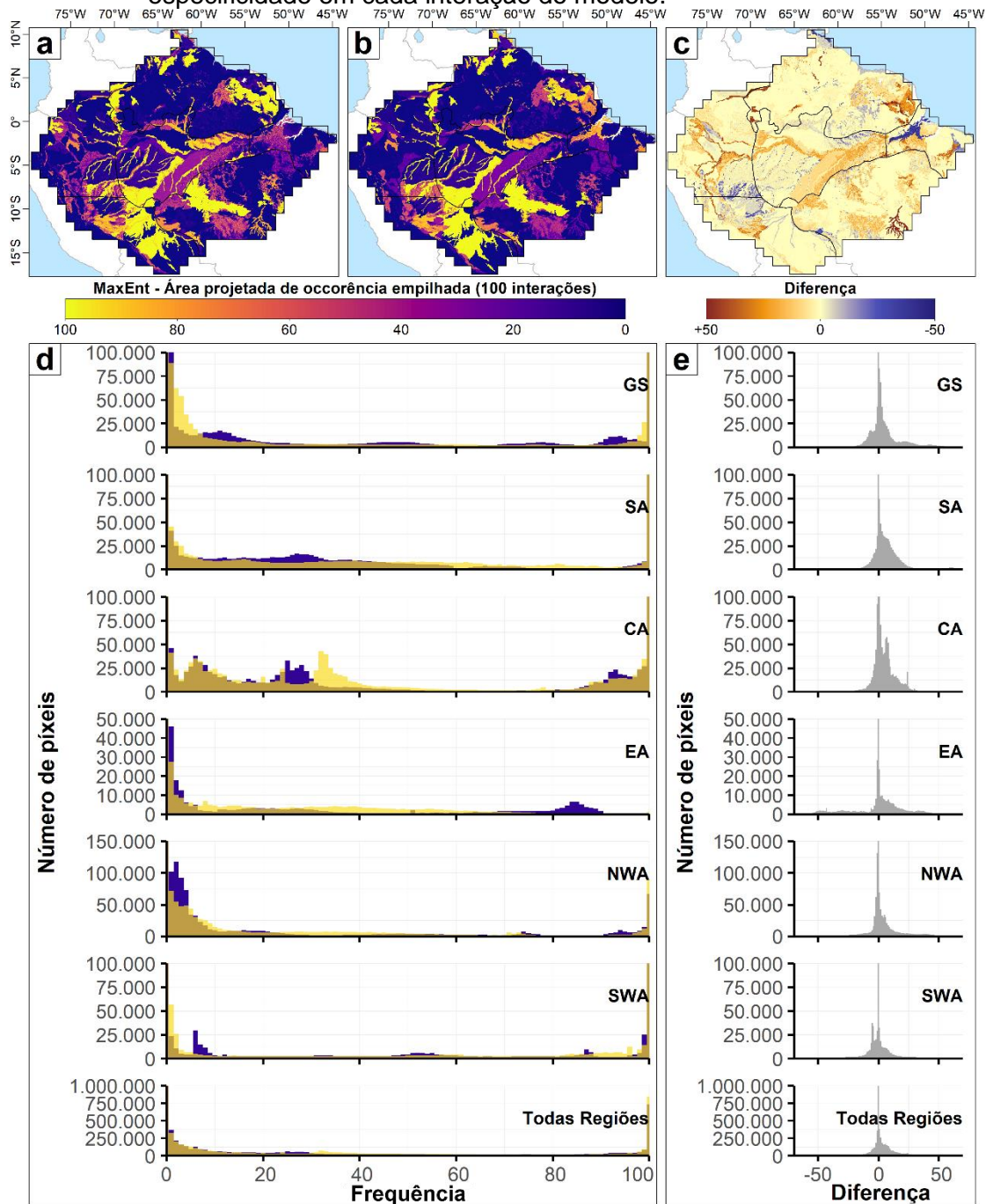
A identificação de novas estruturas em regiões isoladas vem a preencher parte do vazio na informação da ocupação pré-colombiana ao longo da floresta Amazônica. O uso desses novos dados já indica um aumento expressivo da probabilidade de existência de outras estruturas em diferentes regiões da Amazônia, conforme apresentado na Figura 4.43 e Figura 4.44. A disposição de apenas duas (02) estruturas situadas ao longo da calha do rio Amazonas aumentou a probabilidade de distribuição por todo o rio, reforçando aspectos da literatura que indicam a região como *hotspot* da arqueologia ribeirinha (DENEVAN, 1996; HECKENBERGER et al., 1999; SILVERMAN; ISBELL, 2008; STENBORG et al., 2018).

Figura 4.43 – Modelo de máxima entropia (MaxEnt) da distribuição de infraestruturas pré-colombianas.



(a) Projecção utilizando novos dados (844 ocorrências). (b) Projecção utilizando apenas dados publicados (820 ocorrências). (c) Diferença das projecções, subtraído [b] de [a]. (d) Histogramas de projecção por regiões geológicas, na cor amarela para os dados em [a] e em roxo para [b]. (e) Histogramas por regiões geológicas para os dados em [c].
 Fonte: Produção do Autor.

Figura 4.44 – Áreas projetadas pela sensibilidade máxima de treinamento mais especificidade em cada interação do modelo.



(a) Áreas projetadas utilizando novos dados (844 ocorrências). (b) Áreas projetadas utilizando apenas dados publicados (820 ocorrências). (c) Diferença das áreas projetadas, subtraído [b] de [a]. (d) Histogramas das áreas projetadas por regiões geológicas, na cor amarela para os dados em [a] e em roxo para [b]. (e) Histogramas por regiões geológicas para os dados em [c].

Fonte: Produção do Autor.

A Figura 4.43 indica que as novas estruturas identificadas no escudo da Guiana (GS) e no Parque Indígena do Xingu situado no sul da Amazônia (SA) aumentaram a probabilidade de distribuição de estruturas nessas regiões, além do grande impacto causado nas áreas projetadas do modelo (Figura 4.44).

Nesse sentido, a identificação de poucas estruturas e sua incorporação na modelagem de máxima entropia (MaxEnt) reforçou padrões indicados pela literatura (CABRAL; DE MOURA SALDANHA, 2008; CABRAL; SALDANHA, 2008; CLEMENT et al., 2015; DE SOUZA et al., 2018; HECKENBERGER et al., 2003, 2008, 1999; HECKENBERGER; NEVES, 2009; SCHAAN, 2012; SILVERMAN; ISBELL, 2008).

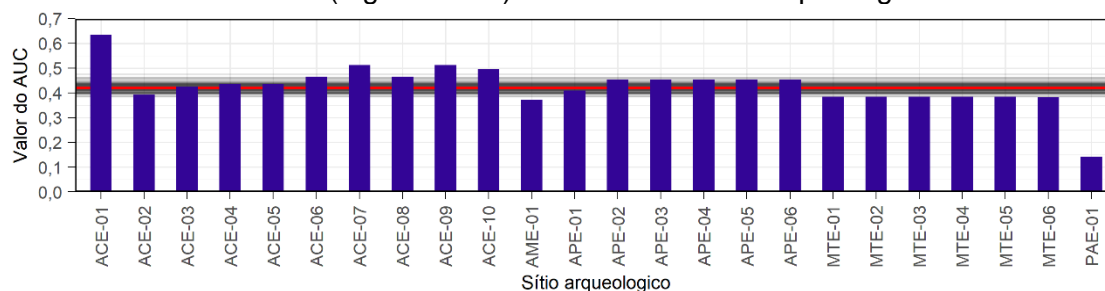
Apesar da modelagem (Figura 4.43) indicar áreas com maior probabilidade de ocorrência no Mato Grosso, Acre e Bolívia, confirmando o padrão que já é observado na literatura, e que segue o arco do desmatamento, também foi indicada a alta probabilidade de ocorrência em áreas em que, até hoje, carecem de dados, como no noroeste da Amazônia (NWA) no Equador, e no escudo da Guiana (GS) na Colômbia, Venezuela e Suriname. Nesse sentido, a inclusão dessas áreas confirma a segunda hipótese desse estudo (H2), indicando que distribuição de infraestruturas pré-colombianas não se limita à direção Leste-Oeste na margem sul da Amazônia.

Mesmo apresentando alta probabilidade de ocorrência em áreas onde acontece o avanço do arco de desmatamento, a indicação em áreas ao norte e noroeste da Amazônia (NWA e GS) demonstra a disseminação desse sistema pela floresta.

Para observar o comportamento da modelagem de distribuição que desconsiderava as novas ocorrências (Figura 4.43b) foi extraído o valor do AUC no local (pixel) das novas ocorrências de infraestruturas pré-colombianas relatadas no estudo. Assim, a Figura 4.45 aponta que ainda é possível

identificar novas ocorrências mesmo em áreas além daquelas indicadas na projeção. As projeções definidas pela máxima sensibilidade de treinamento mais especificidade, estão representadas pelas linhas horizontais pretas e vermelha (média).

Figura 4.45 – Valor do AUC extraído da modelagem que desconsidera novas ocorrências (Figura 4.43b) no local dos sítios arqueológicos detectados.



Linhas horizontais em preto indicam a máxima sensibilidade de treinamento mais especificidade das 100 interações do modelo, em vermelho representa a média dos valores.

Fonte: Produção do Autor.

As novas estruturas identificadas no sul da Amazônia (MTE-01 ao 06), e na Amazônia central (PAE-01 e AME-01) estavam localizadas em áreas além daquelas indicadas na projeção. Portanto, é extremamente necessário continuar a busca por novas ocorrências para gradualmente incorporar e aprimorar modelagens preditivas.

Contudo, em termos gerais, a área projetada utilizando as novas ocorrências de infraestruturas pré-colombianas nas 100 interações do modelo de máxima entropia (Figura 4.44a) variou entre 1.430.126 a 2.359.066 km², apresentando uma média de 1.839.685 km² ($\pm 198,78$). Considerando apenas as áreas com cobertura do dossel acima de 75% e fora das áreas inspecionadas com dados de LiDAR, a área projetada é reduzida na média de 258.595 km² ($\pm 177,47$) (ANEXO A).

Considerando um cenário hipotético, onde todas as infraestruturas pré-colombianas em áreas que sofreram qualquer tipo de ação antrópica

contemporânea tenham suas infraestruturas registradas nas bases científicas utilizadas, e que todas as infraestruturas existentes nos 5.631 km² de dados LiDAR inspecionados também sejam identificadas, ainda é possível existir pelo menos 994 estruturas (0,0006 infraestruturas/km²) localizadas em áreas com cobertura do dossel da floresta amazônica (ANEXO A). Contudo, é importante frisar que a distribuição das infraestruturas pré-colombianas varia ao longo das diferentes regiões geológicas da Amazônia, e que as considerações adotadas neste cenário hipotético fazem com que a projeção da quantidade de sítios arqueológicos desta natureza seja uma subestimação.

5. CONCLUSÕES

Frente ao processamento de dados de sensores de LiDAR de plataformas suborbitais aerotransportadas, a dupla classificação de pontos de solo se mostrou eficiente para elaborar modelos digitais passíveis de detecção de estruturas arqueológicas localizadas abaixo do dossel florestal da Amazônia. No entanto, ainda é possível aprimorar o processamento, mesmo em áreas de relevo acidentado, pelo uso de parâmetros (de *'spike'*, *'step'*, *'stddev'* e *'offset'*) estabelecidos a partir da análise prévia da variação topográfica do relevo.

O uso de métricas como contraste, homogeneidade e dissimilaridade, pode descrever a textura dos produtos exportados e remover parte da subjetividade da qualidade do processamento (HARALICK et al., 1973). Essas implementações podem, em conjunto, atuar na seleção de parâmetros e indicar a capacidade de detectar estruturas pré-colombianas nos dados matriciais (AUGUSTEIJN et al., 1995; HARALICK et al., 1973; HOLYER; PECKINPAUGH, 1989; OLDELAND et al., 2017).

A descoberta de pontos de ocorrência de infraestruturas pré-colombianas ocultadas pelo dossel da floresta Amazônica reforça a possibilidade de integrar múltiplos sensores para a obtenção de informações em maior escala, utilizando esses locais para traduzir e polir os dados coletados por diferentes sensores, tendo em vista a inviabilidade da coleta de dados de LiDAR para toda a floresta (LU et al., 2011; SANTOS et al., 2018).

Além disso, para as descobertas reportadas ao longo desta pesquisa, levantamentos arqueológicos futuros trarão uma visão mais ampla dos seus períodos de construção e ocupação através da datação por radiocarbono, e também, determinarão de maneira mais precisa as medições de todas as estruturas (montes, valas, estradas), que foram minimizadas pela deposição

sedimentar que ocorreu ao longo dos séculos e captadas pelos dados de LiDAR.

O modelo preditivo de distribuição mostrou que a topografia era um aspecto que norteava a instalação dessas estruturas e que, apesar de apresentarem diferentes distribuições ao longo das regiões da Amazônia, a praticidade do acesso à água era uma condição primária, juntamente com aspectos de fertilidade do solo, que atraíam os povos pré-colombianos para habitar esses espaços. Além disso, a incerteza sobre a influência da variabilidade hidroclimática no nascimento e colapso pré-colombiano faz com que as variáveis topográficas sejam mais tateis (até o momento) devido ao tempo geológico que elas estão envolvidas (DOUGLAS et al., 2016; EVANS et al., 2018).

A descoberta de infraestruturas sob o dossel da floresta e a modelagem de distribuição confirmaram as hipóteses de estudo (H1 e H2) e demonstram a maior distribuição desse sistema pela floresta. A descoberta e adição de 22 amostras sob áreas florestais, e 2 em áreas desmatadas, dispersas pelas regiões amazônicas, aumentaram a área de probabilidade de ocorrência em 11,54% (ANEXO A).

As considerações realizadas a fim de inferir a quantidade de infraestruturas que ainda podem ser descobertas foram realizadas visando o cenário mais conservador, principalmente porque há uma grande probabilidade de existirem mais estruturas em áreas desmatadas, ou florestais, que ainda não foram registradas na literatura. Algumas estruturas podem ainda não terem sido relatadas por diversos motivos, como a localização confidencial para realização e proteção de pesquisa, implicações geradas pela existência de sítios arqueológicos dentro de propriedades privadas, e até mesmo a dificuldade de identificação por imagens orbitais pela constante recorrência de nuvens em determinadas áreas, principalmente em regiões equatoriais. Nesse sentido, é

importante ressaltar que a projeção da existência de pelo menos mais 994 infraestruturas em áreas inóspitas da floresta Amazônica representa uma subestimação.

Por fim, cartas publicadas pelo etnólogo Nimuendajú (1952b, 1952a) já evidenciavam a presença de instrumentos do cotidiano com formas geométricas esculpidas, mostrando que havia um significado e uma razão para as formas. Contudo, essas civilizações que não foram tocadas pela idade do ferro tiveram seus instrumentos feitos de madeira e argila, materiais que são degradados e destruídos pelo efeito do tempo. No entanto, a presença de espécies domesticadas é uma das formas de se observar o legado da ocupação humana passada na Amazônia (NEVES; PETERSEN, 2006; SCHARPING, 2019).

Assim, apesar das descobertas, as terras indígenas no Brasil compõem um aspecto chave para melhor abordar e compreender o antigo manejo florestal realizado na floresta, que supriu populações densas e sedentárias, pois ainda formam uma barreira contra o avanço do desmatamento, e guardam um conhecimento ancestral de manejo (HECKENBERGER et al., 2007, 2008; HECKENBERGER; NEVES, 2009).

A expansão da agricultura em áreas inexploradas pode destruir ou fraturar ambientes e estruturas que foram preservadas ao longo do tempo, dificultando a identificação de ocupações antigas, uma vez que os manejos de mandioca (*Manihot esculenta* spp.), pequi (*Caryocar* sp.), grama sapê (*Imperata* sp.), bambu (*Guadua* spp.), e várias palmeiras e castanheiras existentes hoje permeados à floresta são indicadores, e podem ser usados como subsídios de pesquisas sobre o pretérito da floresta Amazônica, suas modificações pelos povos pré-colombianos, e possíveis padrões comportamentais para o futuro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUGUSTEIJN, M. F.; CLEMENS, L. E.; SHAW, K. A. Performance evaluation of texture measures for ground cover identification in satellite images by means of a neural network classifier. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, n. 3, p. 616–626, 1995.

BALÉE, W.; ERICKSON, C. L. (Ed.). **Time and complexity in historical ecology**. [S.l.]: Columbia University Press, 2006.

BALTSAVIAS, E. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n. 2/3, p. 199–214, 1999.

BARLOW, J. et al. How pristine are tropical forests? an ecological perspective on the pre-Columbian human footprint in Amazonia and implications for contemporary conservation. **Biological Conservation**, v. 151, n. 1, p. 45–49, 2012.

BATJES, N. et al. **Soil data derived from WISE for use in global and regional AEZ studies**. Laxenburg, Austria: IIASA, 1997.

BATJES, N. **Soil parameter for the soil types of the world for use in global and regional modelling (Version 2.1)**. Wageningen: ISRIC, 1997.

BEWLEY, R. H.; CRUTCHLEY, S. P.; SHELL, C. A. New light on an ancient landscape: lidar survey in the Stonehenge World Heritage Site. **Antiquity**, v.79, n. 305, p. 636–647, 2005.

BLATRIX, R. et al. The unique functioning of a pre-Columbian Amazonian floodplain fishery. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 5998, 2018.

BORIA, R. A. et al. Spatial filtering to reduce sampling bias can improve the performance of ecological niche models. **Ecological Modelling**, v. 275, p. 73–77, 2014.

BRANDALIZE, A. A. **Perfilamento a LASER: comparação com métodos fotogramétricos**. Curitiba: Esteio Engenharia e Aerolevantamentos, 2002. 26p.

BRASIL. **Constituição Federal de 1988**. Promulgada em 5 de outubro de 1988. 1988. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm>. Acesso em: 20 maio 2019

BRASIL. **Lei N° 3.924**.promulgada em 26 de julho de 1961. 1961. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1950-1969/l3924.htm>. Acesso em: 20 maio 2019

BRIENEN, R. J. W. et al. Long-term decline of the Amazon carbon sink. **Nature**, v. 519, p. 344, 18 mar. 2015.

BROWN, J. L.; BENNETT, J. R.; FRENCH, C. M. SDMtoolbox 2.0: the next generation Python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses. **PeerJ**, p. 1–12, 5 dez. 2017.

BUSH, M. B. et al. Anthropogenic influence on Amazonian forests in pre-history: an ecological perspective. **Journal of Biogeography**, v. 42, n. 12, p. 2277–2288, 2015.

CABRAL, M. P.; SALDANHA, J. D. DE M. Um sítio, múltiplas interpretações: o caso do chamado “Stonehenge do Amapá”. **Revista Arqueologia Pública**, v.3, n. 1, p. 7–13, 2008a.

CABRAL, M.; SALDANHA, J. D. M. Paisagens megalíticas na costa norte do Amapá. **Revista de Arqueologia**, v.21, n.1, 2008b.

CHASE, A. F. et al. Airborne LiDAR, archaeology, and the ancient Maya landscape at Caracol, Belize. **Journal of Archaeological Science**, v. 38, n. 2, p. 387–398, 2011.

CHASE, A. F. et al. Geospatial revolution and remote sensing LiDAR in Mesoamerican archaeology. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 109, n. 32, p. 12916-12921, 2012.

CHASE, A. F. et al. The use of LiDAR in understanding the Ancient Maya Landscape. **Advances in Archaeological Practice**, v. 2, n. 3, p. 208–221, 2014a.

CHASE, F. A. et al. Ancient Maya regional settlement and inter-site analysis: the 2013 West-Central Belize LiDAR survey remote sensing. **Remote Sensing**, v.6, p.8671-8695, 2014b.

CLEMENT, C. R. et al. The domestication of Amazonia before European conquest. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 282, n. 1812, p. 1–9, 2015.

DE SOUZA, J. G. et al. Climate change and cultural resilience in late pre-Columbian Amazonia. **Nature Ecology & Evolution**, v. 3, n. 7, p. 1007–1017, 2019.

DE SOUZA, J. G. et al. Pre-Columbian earth-builders settled along the entire southern rim of the Amazon. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p. 1125, 2018.

DENEVAN, W. M. A bluff model of riverine settlement in Prehistoric Amazonia. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 86, n. 4, p. 654–681, 1996.

DERBY, O. A. The artificial mounds of the Island of Marajo, Brazil. **The American Naturalist**, v. 13, n. 4, p. 224–229, 1879.

DEVEREUX, B. J.; AMABLE, G. S.; CROW, P. Visualisation of LiDAR terrain models for archaeological feature detection. **Antiquity**, v. 82, n. 316, p. 470–479, 2008.

DIAS JUNIOR, O. F.; CARVALHO, E. T. As estruturas de Terra na arqueologia do Acre. **Arqueo-IAB**, v. 1, p. 14–28, 1988.

DIJKSHOORN, J. A.; HUTING, J. R. M.; TEMPEL, P. **Update of the 1:5 million Soil and Terrain Database for Latin America and the Caribbean (SOTERLAC; version 2.0)**: report 2005/01. Wageningen: ISRIC, 2005.

DOUGLAS, P. M. J. et al. Impacts of climate change on the collapse of Lowland Maya Civilization. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 44, n.1, p. 613–645, 2016.

DUDÍK, M.; PHILLIPS, S. J.; SCHAPIRE, R. E. Correcting sample selection bias in maximum entropy density estimation. In: WEISS, Y.; SCHÖLKOPF, B.; PLATT, J. C. (Ed.). **Advances in neural information processing systems 18**. [S.l.]: MIT Press, 2006. p. 323–330.

ELITH, J. et al. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. **Diversity and Distributions**, v. 17, n. 1, p. 43–57, 1 jan. 2011.

ELITH, J. et al. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. **Ecography**, v. 29, n. 2, p. 129–151, 1 abr. 2006.

ELITH, J.; KEARNEY, M.; PHILLIPS, S. The art of modelling range-shifting species. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 1, n. 4, p. 330–342, 1 dez. 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA VIA SATÉLITE. Embrapa e Serviço Florestal Americano assinam convênio de cooperação técnica e financeira. **Boletim Eletrônico da Embrapa Monitoramento por Satélite**, v.19, n.7, ago. 2011. Disponível em: <https://www.cnpm.embrapa.br/vs/vs1907/embrapa_servico_florestal_american_o_assinam_convenio.html>.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA VIA SATÉLITE. Cooperação internacional da Embrapa reforça pesquisa em sistemas agrícolas e florestais. **Boletim Eletrônico da Embrapa Monitoramento por Satélite**, v.19, n.1, jan./fev. 2011. Disponível em: <https://www.cnpm.embrapa.br/vs/vs1901/cooperacao_internacional_sistemas_agricolas.html>.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA-CNPM. **Paisagens sustentáveis**: cooperação entre o Serviço Florestal Americano e a Embrapa. Campinas, SP: Embrapa. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/122974/1/4454.pdf>>.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA-CNPM. **Sustainable landscapes data portal**. Disponível em: <<https://www.paisagenslidar.cnptia.embrapa.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/home>>. Acesso em: 20 maio. 2019.

ERICKSON, C. L. An artificial landscape-scale fishery in the Bolivian Amazon. **Nature**, v. 408, n. 6809, p. 190–193, 2000.

ERICKSON, C.; ALVAREZ, P.; CALLA MALDONADO, S. **Zanjas circundantes**: obras de Tierra Monumentales de Baures en la Amazonia Bolivia. Bolivia: Ministério de Educacion y Culturas, 2008. 108p.

ESFANJANI, J.; GHORBANI, A.; ZARE CHAHOUKI, M. A. MaxEnt modeling for predicting impacts of environmental factors on the potential distribution of *Artemisia aucheri* and *Bromus tomentellus-Festuca ovina* in Iran. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 27, n. 3, p. 1041–1047, 2018.

EVANS, D. H. et al. Uncovering archaeological landscapes at Angkor using Lidar. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 31, p. 12595-12600, 2013.

EVANS, N. P. et al. Quantification of drought during the collapse of the classic Maya civilization. **Science**, v. 361, n. 6401, p. 498-501, 2018.

FEARNSIDE, P. Deforestation in Brazilian Amazonia. In: WOHL, E. (Ed.). . **Oxford Bibliographies in Environmental Science**. [s.l.] Oxford Bibliographies, 2017.

FERREIRA PENNA, D. S. Apontamentos sobre os Ceramios do Pará (carta ao Sr. Dr. Ladisláu Netto). **Arquivos do Museu Nacional do Rio de Janeiro**, v. 2, p. 47–76, 1877.

FERREIRA PENNA, D. S. Breve notícia sobre os sambaquis do Pará. **Arquivos do Museu Nacional do Rio de Janeiro**, v. 1, p. 85–99, 1876.

FITTKAU, E. J. Esboço de uma divisão ecológica da região amazônica. **Symposio Biologia Tropical Amazonica**, p. 363–372, 1971.

FLEMING, M. D.; HOFFER, R. M. Machine processing of Landsat MSS data and DMA topographic data for forest cover type mapping. In: MACHINE PROCESSING OF REMOTELY SENSED DATA SYMPOSIUM, 1979. **Proceedings...** IEEE, 1979. p.377-390.

FONSECA, M. G. et al. Modelling fire probability in the Brazilian Amazon using the maximum entropy method. **International Journal of Wildland Fire**, v. 25, 2016.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED STATES - FAO. **Harmonized world soil database v1.2**. Rome, Italy: FAO. Disponível em: <<http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>>. Acesso em: 7 dez. 2018.

FOURCADE, Y. et al. Mapping species distributions with MAXENT using a geographically biased sample of presence data: a performance assessment of methods for correcting sampling bias. **PLOS One**, v. 9, n. 5, e97122, 2014.

GALVANIN, E. A. S.; DAL POZ, A. P. Sistema LiDAR e métodos de interpolação de dados. **Revista De Geografia (UFPE)**, v. 30, n. 1, p. 91–102, 2013.

GEDDES, L. Ancient Amazon civilisation laid bare by felled forest. **New Scientist**, v. 204, n. 2738, p. 11, 2009.

GIONGO, M. et al. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, 2010.

GUTIÉRREZ, R. et al. Precise airborne LiDAR surveying for coastal research and geohazards applications. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.34, p. 185–192, 2001.

HANSEN, M. C. et al. High-resolution global maps of 21st-Century forest cover change. **Science**, v. 342, n. 6160, p. 850-853, 15 nov. 2013.

HARALICK, R. M.; SHANMUGAM, K.; DINSTEN, I. Textural features for image classification. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v.3, n. 6, p. 610–621, 1973.

HARTT, C. F. The Ancient indian pottery of Marajo, Brazil. **The American Naturalist**, v. 5, n. 5, p. 259–271, 1871.

HAUGAASEN, T.; PERES, C. A. Floristic, edaphic and structural characteristics of flooded and unflooded forests in the lower Rio Purús region of central Amazonia, Brazil. **Acta Amazonica**, v. 36, p. 25–35, 2006.

HECKENBERGER, M. J. et al. Amazonia 1492: pristine forest or cultural parkland? **Science**, v. 301, n. 5640, p. 1710-1714, 19 set. 2003.

HECKENBERGER, M. J. et al. Pre-columbian urbanism, anthropogenic landscapes, and the future of the Amazon. **Science**, v. 321, n. 5893, p. 1214-1217, 29 ago. 2008.

HECKENBERGER, M. J. et al. The legacy of cultural landscapes in the Brazilian Amazon: implications for biodiversity. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 362, n. 1478, p. 197–208, 2007.

HECKENBERGER, M. J.; PETERSEN, J. B.; NEVES, E. G. Village size and permanence in Amazonia: two archaeological examples from Brazil. **Latin American Antiquity**, v. 10, n. 4, p. 353–376, 20 dez. 1999.

HECKENBERGER, M. **The ecology of power: culture, place, and personhood in the Southern Amazon, A.D. 1000-2000.** [S.l.]: Routledge, 2005.

HECKENBERGER, M.; NEVES, E. G. Amazonian archaeology. **Annual Review of Anthropology**, v. 38, n. 1, p. 251–266, 2009.

HESS, L. L. et al. Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, n. 4, p. 404–428, 2003.

HESSE, R. LiDAR-derived local relief models: a new tool for archaeological prospection. **Archaeological Prospection**, v. 17, n. 2, p. 67–72, 2010.

HIJMANS, R.; ELITH, J. **Species distribution modeling with R.** [S.l.: s.n.], 2017.

HOLYER, R. J.; PECKINPAUGH, S. H. Edge detection applied to satellite imagery of the oceans. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 27, n. 1, p. 46–56, 1989.

HOOPEs, J. W.; BARNETT, W. **The emergence of pottery: technology and innovation in ancient societies.** Washington: Smithsonian Institution, 1995.

HORN, B. K. P. Hill shading and the reflectance map. **Proceedings of the IEEE**, v. 69, n. 1, p. 14–47, 1981.

HOWEY, M. C. L.; PALACE, M. W.; MCMICHAEL, C. H. Geospatial modeling approach to monument construction using Michigan from A.D. 1000–1600 as a case study. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 113, n. 27, p. 7443-7448, 2016.

HUNTINGFORD, C. et al. Simulated resilience of tropical rainforests to CO₂-induced climate change. **Nature Geoscience**, v. 6, p. 268, 10 mar. 2013.

IHLOW, F. et al. On the brink of extinction? how climate change may affect global chelonian species richness and distribution. **Global Change Biology**, v. 18, n. 5, p. 1520–1530, 2012.

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL - IPHAN. **National register of archaeological sites**. Disponível em: <<http://portal.iphan.gov.br/sgpa/>>. Acesso em: 7 dez. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. CENTRO DE CIÊNCIA DO SISTEMA TERRESTRE. **Melhoria dos métodos de estimativa de biomassa e de modelos de estimativa de emissões por mudança de uso da terra**. Disponível em: <<http://www.ccst.inpe.br/projetos/eba-estimativa-de-biomassa-na-amazonia/>>. Acesso em: 20 jul. 2018.

IRIARTE, J.; MAROZZI, Ó.; GILLAM, C. Monumentos funerarios y festejos rituales: complejos de recintos y túmulos Taquara/Itararé en Eldorado, Misiones (Argentina). **Arqueología Iberoamericana**, v. 6, p. 25–38, 2010.

JACOBS, J. Q. **Anthropology, archaeology, photography**. Disponível em: <<http://www.jqjacobs.net/>>. Acesso em: 7 dez. 2018.

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment: an earth resource perspective**. 2.ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2009.

KHAN, S.; ARAGÃO, L.; IRIARTE, J. A UAV–lidar system to map Amazonian rainforest and its ancient landscape transformations. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, n. 8/10, p. 2313–2330, 2017.

KRAMER-SCHADT, S. et al. The importance of correcting for sampling bias in MaxEnt species distribution models. **Diversity and Distributions**, v. 19, n. 11, p. 1366–1379, 2013.

LATHRAP, D. W. **The upper Amazon**. London : Thames & Hudson, 1970.

LEHNER, B.; VERDIN, K.; JARVIS, A. New global hydrography derived from spaceborne elevation data. **EOS Transactions**, v. 89, p. 93- 94., 2008.

LEITOLD, V. **Airborne LiDAR-based estimates of tropical forest structure and ground topography in a mountainous area of the Brazilian Atlantic Forest**. 2014. 126p. Dissertation (Master in Remote Sensing) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2014.

LEITOLD, V. et al. Airborne lidar-based estimates of tropical forest structure in complex terrain: opportunities and trade-offs for REDD+. **Carbon Balance and Management**, v. 10, n. 1, p. 3, 2015.

LEVIS, C. et al. Persistent effects of pre-Columbian plant domestication on Amazonian forest composition. **Science**, v. 355, n. 6328, p. 925-931, 2017.

LIU, C. et al. Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. **Ecography**, v. 28, n. 3, p. 385–393, 2005.

LIU, C.; NEWELL, G.; WHITE, M. On the selection of thresholds for predicting species occurrence with presence-only data. **Ecology and Evolution**, v. 6, n. 1, p. 337–348, 2016.

LIU, C.; WHITE, M.; NEWELL, G. Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence-only data. **Journal of Biogeography**, v. 40, n. 4, p. 778–789, 2013.

LU, D. et al. Mapping impervious surfaces with the integrated use of Landsat thematic mapper and radar data: a case study in an urban–rural landscape in the Brazilian Amazon. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 66, n. 6, p. 798–808, 2011.

LUGMAYR, K. A. **Ludwig Boltzmann Institute for Archaeological Prospection and Virtual Archaeology**. Disponível em: <<http://lbi-archpro.org>>. Acesso em: 2 maio. 2019.

MAEZUMI, S. Y. et al. The legacy of 4,500 years of polyculture agroforestry in the eastern Amazon. **Nature Plants**, v. 4, n. 8, p. 540–547, 2018.

MANN, C. C. Ancient earthmovers of the Amazon. **Science**, v. 321, n. 5893, p. 1148-1152, 29 ago. 2008.

MARTIN ISENBURG. **Twitter, Inc. @LAStools**. Disponível em: <<https://twitter.com/lastools/status/648875814105317376>>. Acesso em: 10 jan. 2018.

MAYLE, F. E.; IRIARTE, J. Integrated palaeoecology and archaeology: a powerful approach for understanding pre-Columbian Amazonia. **Journal of Archaeological Science**, v. 51, p. 54–64, 2014.

MCCOY, M. D.; ASNER, G. P.; GRAVES, M. W. Airborne lidar survey of irrigated agricultural landscapes: an application of the slope contrast method. **Journal of Archaeological Science**, v. 38, n. 9, p. 2141–2154, 1 set. 2011.

MCKEY, D. et al. Pre-Columbian agricultural landscapes, ecosystem engineers, and self-organized patchiness in Amazonia. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 107, n. 17, p. 7823-7828, 27 abr. 2010.

MCMICHAEL, C. H. et al. Predicting pre-Columbian anthropogenic soils in Amazonia. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 281, n. 1777, 20132475, 2014a.

MCMICHAEL, C. H. et al. Sparse pre-Columbian human habitation in western Amazonia. **Science**, v. 336, n. 6087, p. 1429-1431, 15 jun. 2012.

MCMICHAEL, C. H.; PALACE, M. W.; GOLIGHTLY, M. Bamboo-dominated forests and pre-Columbian earthwork formations in south-western Amazonia. **Journal of Biogeography**, v. 41, n. 9, p. 1733–1745, 2014b.

MCMICHAEL, C. N. H. et al. Ancient human disturbances may be skewing our understanding of Amazonian forests. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 114, n. 3, p. 522-527, 2017.

MCMICHAEL, C. N. H.; BUSH, M. B. Spatiotemporal patterns of pre-Columbian people in Amazonia. **Quaternary Research**, p. 1–17, 26 mar. 2019.

MEGGERS, B. J. **Amazonia: man and culture in a counterfeit paradise**. Chicago: Aldine Atherton, 1971.

MEROW, C.; SMITH, M. J.; SILANDER JR, J. A. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. **Ecography**, v. 36, n. 10, p. 1058–1069, 2013.

MORO, R. C.; CENTENO, J. A. S. Filtragem e classificação de nuvem de pontos para a geração de Modelo Digital de Terreno. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 3., 2010, Recife, PE. **Anais...** 2010. Disponível em: <https://docs.ufpr.br/~centeno/publications/download/2010/simgeo-A_170.pdf>

MOSTAFA, M.; HUTTON, J. Direct positioning and orientation systems: how do they work? What is the attainable accuracy. In: AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING ANNUAL MEETING, 2001, Saint Louis, Missouri. **Proceedings...** Disponível em: <https://www.applanix.com/pdf/POSAV_2001_04_DirectPositioning.pdf>

NASCIMENTO JÚNIOR, J. O.; SCHULER, C. A. B.; CAVALCANTE, R. B. S. Sistema laser scanner. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO, 3., 2006, Aracaju, SE. **Anais...** 2006. Disponível em: <http://www.cpatc.embrapa.br/labgeo/srgsr3/artigos_pdf/069_t.pdf>

NEVES, E. G.; PETERSEN, J. B. Political economy and pre-Columbian landscape transformations in Central Amazonia. In: BALÉE, W.; ERICKSON, C. L. (Ed.). **Time and complexity in historical ecology: studies in the neotropical lowlands**. New York: Columbia University, 2006. p. 432.

NIMUENDAJÚ, C. The Tapajó. **Kroeber Anthropological Society Papers**, v. 6, p. 1–25, 1952a.

NIMUENDAJÚ, C. **The Tukuna**. Berkeley: University of California, 1952b.

NOBRE, A. D. et al. Height above the nearest drainage: a hydrologically relevant new terrain model. **Journal of Hydrology**, v. 404, n. 1–2, p. 13–29, 29 jun. 2011.

OLDELAND, J. et al. The potential of UAV derived image features for discriminating Savannah tree species. In: DÍAZ-DELGADO, R.; LUCAS, R.; HURFORD, C. (Ed.). **The roles of remote sensing in nature conservation: a practical guide and case studies**. Cham: Springer, 2017. p. 183–201.

PACHECO, A. D. P. et al. Classificação de pontos lidar para a geração do MDT. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 17, n. 3, 2011.

PAPPAS, S. **Mysterious Amazonian geoglyphs were built in already-altered forests**. 2017. Disponível em: <<https://www.livescience.com/57775-humans-altered-amazon-rainforests-geoglyphs.html>>.

PÄRSSINEN, M.; SCHAAN, D. P.; RANZI, A. Pre-Columbian geometric earthworks in the upper Purús: a complex society in western Amazonia. **Antiquity**, v. 83, n. 322, p. 1084–1095, 2009.

PÄRSSINNEN, M. et al. Geometrically patterned ancient earthworks in the Rio Branco region of Acre, Brazil: new evidence of ancient chiefdom formations in amazonian interfluvial terra firme environment. In: KORPISAARI, A.; PÄRSSINEN, M. (Eds.). **Western Amazonia – Amazônia ocidental: multidisciplinary studies on ancient expansionistic movements, fortifications and sedentary life**. Helsinki: University of Helsinki, 2003. p. 97–133.

PEKEL, J.-F. et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. **Nature**, v. 540, n. 7633, p. 418–422, 7 dez. 2016.

PEREIRA, V. P. B.; LOPES, A. P.; SILVA, A. M. Avaliação do modelo digital de elevação TOPODATA a partir de dados LiDAR em uma área da Amazônia central. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19., 2019, Santos, SP. **Anais...São José dos Campos: INPE**, 2019.

PHILLIPS, O. L.; ARAGÃO, L. E. O. C.; LEWIS, S. L. Drought sensitivity of the Amazon rainforest. **Science**, v. 323, p. 1344–1347, 2009a.

PHILLIPS, S. J. et al. Opening the black box: an open-source release of Maxent. **Ecography**, v. 40, n. 7, p. 887–893, 1 jul. 2017.

PHILLIPS, S. J. et al. Sample selection bias and presence-only distribution models: implications for background and pseudo-absence data. **Ecological Applications**, v. 19, n. 1, p. 181–197, 1 jan. 2009b.

PHILLIPS, S. J.; ANDERSON, R. P.; SCHAPIRE, R. E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. **Ecological Modelling**, v. 190, n. 3, p. 231–259, 2006.

PHILLIPS, S. J.; DUDÍK, M.; SHAPIRE, R. E. A maximum entropy approach to species distribution modeling. **Proceedings of the Twenty-first International Conference on Machine Learning**, v. 69, p. 83–99, 2004.

QIN, A. et al. Maxent modeling for predicting impacts of climate change on the potential distribution of *Thuja sutchuenensis* Franch., an extremely endangered conifer from southwestern China. **Global Ecology and Conservation**, v. 10, p. 139–146, 1 abr. 2017.

QUESADA, C. A. et al. Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. **Biogeosciences**, v. 8, n. 6, p. 1415–1440, 1 jun. 2011.

RADOSAVLJEVIC, A.; ANDERSON, R. P. Making better maxent models of species distributions: complexity, overfitting and evaluation. **Journal of Biogeography**, v. 41, n. 4, p. 629–643, 1 abr. 2014.

RAMPANELLI, I. **Las estructuras de tierra delimitadas por zanjas en la Amazonía Occidental**. València: Universitat de València, 2016.

RENNÓ, C. D. et al. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 9, p. 3469–3481, 2008.

RITTER, P. A vector-based slope and aspect generation algorithm. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 53, n. 8, p. 1109–1111, 1987.

ROOSEVELT, A. et al. Early mounds and monumental art in ancient Amazonia: history, scale, function, and social ecology. In: BURGER, R. L.; ROSENSWIG, R. M. (Ed.). **Early new world monumentality**. Gainesville, FL: University of Florida, 2012. p. 256–288.

SALINAS-MELGOZA, M. A.; SKUTSCH, M.; LOVETT, J. C. Predicting aboveground forest biomass with topographic variables in human-impacted tropical dry forest landscapes. **Ecosphere**, v. 9, n. 1, e02063, 2018.

SANTOS, M. J.; DISNEY, M.; CHAVE, J. Detecting human presence and influence on neotropical forests with remote sensing. **Remote Sensing**, v. 10, n. 10, 2018.

SAUNALUOMA, S. Pre-Columbian earthworks in the Riberalta region of the Bolivian Amazon. **Amazônica - Revista de Antropologia**, v. 2, n. 1, p. 106–138, 2010.

SAUNALUOMA, S.; PÄRSSINEN, M.; SCHAAN, D. Diversity of Pre-colonial earthworks in the Brazilian state of Acre, Southwestern Amazonia. **Journal of Field Archaeology**, v. 43, n. 5, p. 362–379, 2018.

SCHAAN, D. et al. Construindo paisagens como espaços sociais: o caso dos geoglifos do Acre. **Revista de Arqueologia**, v. 23, n. 1, p. 30–41, 2010a.

SCHAAN, D. et al. New radiometric dates for precolumbian (2000–700 b.p.) earthworks in western Amazonia, Brazil. **Journal of Field Archaeology**, v. 37, n. 2, p. 132–142, 2012.

SCHAAN, D. P. **Sacred geographies of ancient Amazonia: historical ecology of social complexity**. New York: Routledge, 2012.

SCHAAN, D. P.; RANZI, A.; BARBOSA, A. D. **Geoglifos: paisagens da Amazônia Ocidental**. Rio Branco: KNORONHA, 2010b.

SCHAAN, D.; RANZI, A.; PARSINEN, M. **Arqueologia da Amazônia Ocidental: os geoglifos do Acre**. Belém, Brazil: Universidade Federal do Pará (UFPA), 2008.

SCHARPING, N. The lost world of the Maya is finally emerging from the jungle. **Discover Magazine**, 7 fev. 2019. Disponível em: <<http://discovermagazine.com/2019/march/a-lost-world-emerges>>. Acesso em: 8 fevereiro. 2019.

SHAN, J.; TOTH, C. K. **Topographic laser ranging and scanning: principles and processing**. Boca Raton: CRC Press, 2018. v. 2

SILVERMAN, H.; ISBELL, W. **Handbook of South American archaeology**. New York: Springer, 2008.

STENBORG, P.; SCHAAN, D. P.; FIGUEIREDO, C. G. Contours of the past: LiDAR data expands the limits of late pre-Columbian human settlement in the Santarém region, Lower Amazon. **Journal of Field Archaeology**, v. 43, n. 1, p. 44–57, 2 jan. 2018.

STENBORG, P.; SCHAAN, D. P.; LIMA, M. A. Precolumbian land use and settlement pattern in the Santarém region, lower Amazon. **Amazônica - Revista de Antropologia**, v. 4, n. 1, p. 225–250, 2012.

ŠTULAR, B. et al. Visualization of lidar-derived relief models for detection of archaeological features. **Journal of Archaeological Science**, v. 39, n. 11, p. 3354–3360, 2012.

SU, J.; BORK, E. Influence of vegetation, slope, and LiDAR sampling angle on DEM accuracy. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 72, n.11, p.1265-1274, 2006.

TIMBÓ, M. A. **Levantamentos através do sistema GPS**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2000.

UNESCO. **Geoglyphs of Acre**. Disponível em: <<https://whc.unesco.org/en/tentativelists/5999/>>. Acesso em: 6 maio. 2019.

VELOZ, S. D. Spatially autocorrelated sampling falsely inflates measures of accuracy for presence-only niche models. **Journal of Biogeography**, v. 36, n. 12, p. 2290–2299, 1 dez. 2009.

WALKER, J. H. Pre-Columbian ring ditches along the Yacuma and Rapulo rivers, Beni, Bolivia: a preliminary review. **Journal of Field Archaeology**, v. 33, n. 4, p. 413–427, 2008.

WATLING, J. et al. Impact of pre-Columbian “geoglyph” builders on Amazonian forests. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 114, n. 8, p. 1868 LP – 1873, 21 fev. 2017.

WATLING, J. et al. Subsistence practices among earthwork builders: phytolith evidence from archaeological sites in the southwest Amazonian interfluves. **Journal of Archaeological Science: Reports**, v. 4, p. 541–551, 2015.

WATLING, J.; MAYLE, F. E.; SCHAAN, D. Historical ecology, human niche construction and landscape in pre-Columbian Amazonia: a case study of the geoglyph builders of Acre, Brazil. **Journal of Anthropological Archaeology**, v. 50, p. 128–139, 2018.

WEHR, A.; LOHR, U. Airborne laser scanning: an introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n. 2–3, p. 68–82, 1999.

WILSON, M. F. J. et al. Multiscale Terrain Analysis of Multibeam Bathymetry Data for Habitat Mapping on the Continental Slope. **Marine Geodesy**, v. 30, n. 1–2, p. 3–35, 2007.

WOODS, W. et al. **Amazonian dark Earths**: Wim Sombroek's vision. Berlin: Springer, 2008.

ANEXO A – TABELA DA PROJEÇÃO DAS INTERAÇÕES DA MODELAGEM MAXENT PARA NOVAS INFRAESTRUTURAS PRÉ-COLOMBIANAS.

Tabela A. 1 – Projeção para a quantidade de infraestruturas escondidas sob o dossel da floresta amazônica.

Interação	Projeção realizada em conjunto com novos dados (844 ocorrências)					Projeção realizada apenas com dados da literatura (820 ocorrências)				
	Limiar	Área (km ²)	Área com ≥ 75% de cobertura de dossel (km ²)	Área reduzida	Taxa de omissão	Limiar	Área (km ²)	Área com ≥ 75% de cobertura de dossel (km ²)	Área reduzida	Taxa de omissão
001	0,4074	2.069.817	1.734.745	335.073	2,16%	0,4410	1.558.422	1.337.284	221.138	7,14%
002	0,4479	1.946.105	1.716.876	229.229	3,24%	0,4407	1.384.289	1.178.528	205.762	2,75%
003	0,4347	1.809.475	1.529.222	280.253	1,62%	0,4352	1.684.044	1.408.135	275.908	6,04%
004	0,4074	1.895.639	1.628.522	267.117	8,65%	0,4551	1.636.309	1.378.530	257.779	3,30%
005	0,3872	1.963.238	1.734.202	229.036	3,24%	0,4203	1.469.170	1.252.666	216.504	2,75%
006	0,4059	1.902.172	1.644.665	257.507	7,03%	0,4100	1.512.892	1.290.051	222.841	1,10%
007	0,4075	1.795.973	1.553.026	242.947	4,86%	0,3928	1.606.319	1.362.063	244.256	2,75%
008	0,4325	1.490.920	1.282.493	208.428	3,78%	0,4090	1.703.192	1.470.873	232.319	2,20%
009	0,4145	1.958.190	1.650.015	308.176	6,49%	0,4222	1.486.618	1.268.541	218.077	7,69%
010	0,4189	1.430.126	1.221.094	209.032	9,73%	0,4419	1.268.361	1.082.666	185.695	7,14%
011	0,4117	1.959.870	1.692.613	267.256	8,65%	0,4319	1.343.031	1.130.316	212.715	3,85%
012	0,4126	1.802.547	1.564.496	238.050	1,08%	0,4189	1.763.412	1.508.737	254.675	3,85%
013	0,3903	2.258.660	1.901.843	356.817	7,03%	0,4308	1.644.916	1.391.291	253.625	2,20%
014	0,4275	1.846.953	1.628.026	218.927	6,49%	0,4427	1.669.134	1.455.607	213.526	6,04%
015	0,4274	2.121.331	1.840.360	280.971	4,86%	0,4185	1.491.421	1.301.155	190.265	11,54%
016	0,4101	1.695.635	1.408.599	287.036	5,41%	0,4048	2.163.503	1.822.075	341.428	5,49%
017	0,4180	2.228.869	1.964.147	264.722	4,86%	0,4233	1.893.533	1.639.834	253.700	5,49%
018	0,4099	1.726.170	1.407.383	318.787	5,41%	0,3858	2.031.533	1.675.530	356.003	4,40%
019	0,4269	1.766.630	1.528.437	238.193	4,86%	0,3975	1.743.023	1.445.097	297.926	3,85%
020	0,4110	1.584.543	1.323.999	260.545	0,00%	0,4286	1.651.127	1.342.200	308.927	0,55%
021	0,4126	1.825.192	1.586.688	238.504	4,86%	0,4741	1.159.206	964.077	195.129	5,49%
022	0,4461	1.652.115	1.413.338	238.777	7,57%	0,3992	1.475.227	1.240.397	234.830	2,20%
023	0,4188	1.997.513	1.657.954	339.560	10,81%	0,4248	1.769.230	1.526.600	242.630	6,59%

Interação	Projeção realizada em conjunto com novos dados (844 ocorrências)					Projeção realizada apenas com dados da literatura (820 ocorrências)				
	Limiar	Área (km²)	Área com ≥ 75% de cobertura de dossel (km²)	Área reduzida	Taxa de omissão	Limiar	Área (km²)	Área com ≥ 75% de cobertura de dossel (km²)	Área reduzida	Taxa de omissão
024	0,4212	1.803.728	1.574.940	228.788	3,24%	0,3869	1.709.215	1.481.647	227.568	3,30%
025	0,3987	1.652.639	1.415.697	236.942	4,32%	0,4005	1.387.792	1.178.204	209.588	11,54%
026	0,3842	1.723.703	1.495.264	228.438	10,27%	0,4564	1.310.924	1.152.565	158.360	6,59%
027	0,4167	1.856.450	1.683.567	172.883	7,03%	0,4125	2.044.987	1.710.822	334.165	7,69%
028	0,4487	1.882.085	1.626.062	256.023	5,41%	0,3992	1.355.737	1.162.454	193.283	3,30%
029	0,4102	1.910.323	1.686.310	224.013	4,32%	0,3958	1.407.842	1.173.159	234.683	4,95%
030	0,4241	1.725.808	1.468.061	257.747	7,57%	0,4195	1.501.964	1.277.164	224.800	3,30%
031	0,4556	1.778.780	1.514.032	264.748	5,41%	0,4500	1.597.868	1.426.392	171.476	4,95%
032	0,3956	1.936.420	1.666.812	269.608	3,78%	0,4104	1.702.236	1.474.979	227.257	5,49%
033	0,4072	1.891.867	1.617.189	274.678	3,24%	0,4029	1.719.527	1.427.887	291.641	2,20%
034	0,3865	1.866.536	1.593.232	273.304	6,49%	0,4185	1.653.222	1.386.405	266.816	6,04%
035	0,4093	2.068.941	1.784.547	284.393	5,41%	0,4318	1.629.923	1.356.154	273.769	3,85%
036	0,4211	1.806.276	1.553.164	253.112	2,70%	0,4059	1.913.585	1.674.343	239.243	6,59%
037	0,4413	1.616.230	1.383.868	232.362	4,86%	0,4019	1.806.493	1.583.545	222.949	0,00%
038	0,4176	2.122.680	1.858.814	263.866	5,41%	0,4331	1.465.571	1.234.780	230.791	3,30%
039	0,3830	2.359.066	2.112.013	247.053	2,70%	0,4142	1.830.834	1.578.450	252.384	3,30%
040	0,3819	2.014.237	1.701.951	312.286	3,78%	0,4344	1.541.360	1.336.639	204.721	3,85%
041	0,4231	1.686.587	1.438.314	248.273	8,65%	0,4376	1.735.841	1.424.429	311.412	3,85%
042	0,4321	1.990.052	1.696.887	293.166	4,86%	0,4298	1.687.901	1.436.653	251.249	3,85%
043	0,4155	1.979.840	1.684.591	295.249	4,32%	0,3994	1.930.916	1.694.386	236.530	8,24%
044	0,4254	1.867.379	1.599.391	267.988	8,11%	0,4184	1.722.006	1.468.342	253.665	7,69%
045	0,4267	1.621.491	1.367.621	253.871	6,49%	0,4219	1.905.855	1.596.344	309.511	4,40%
046	0,4225	1.790.488	1.540.426	250.063	2,16%	0,3945	1.693.418	1.443.547	249.871	4,40%
047	0,4116	1.924.099	1.624.978	299.120	5,41%	0,4301	1.484.300	1.236.781	247.520	3,85%
048	0,4294	1.665.010	1.423.100	241.910	4,86%	0,4000	1.830.570	1.559.839	270.731	3,30%
049	0,4083	1.931.838	1.690.278	241.559	4,86%	0,4364	1.861.447	1.540.886	320.561	0,55%
050	0,4111	1.713.973	1.460.552	253.421	5,41%	0,4055	1.859.972	1.632.900	227.073	1,10%
051	0,4130	1.995.046	1.766.112	228.934	3,78%	0,4593	1.381.096	1.205.554	175.542	7,14%

Interação	Projeção realizada em conjunto com novos dados (844 ocorrências)					Projeção realizada apenas com dados da literatura (820 ocorrências)				
	Limiar	Área (km²)	Área com ≥ 75% de cobertura de dossel (km²)	Área reduzida	Taxa de omissão	Limiar	Área (km²)	Área com ≥ 75% de cobertura de dossel (km²)	Área reduzida	Taxa de omissão
052	0,4045	1.656.491	1.443.936	212.555	1,08%	0,4606	1.785.427	1.611.984	173.443	3,30%
053	0,4045	1.644.582	1.443.245	201.337	1,08%	0,4108	1.956.122	1.666.151	289.972	2,20%
054	0,4295	2.045.312	1.736.671	308.640	7,03%	0,4297	1.711.979	1.458.381	253.599	1,65%
055	0,4275	1.656.852	1.448.986	207.866	7,57%	0,4270	1.600.027	1.338.927	261.100	5,49%
056	0,4634	1.597.860	1.398.074	199.786	4,32%	0,4316	1.869.813	1.600.058	269.756	0,55%
057	0,4165	1.575.474	1.359.482	215.992	3,24%	0,4074	1.921.554	1.633.401	288.153	3,30%
058	0,3996	2.048.362	1.841.991	206.371	2,16%	0,4117	1.612.710	1.335.141	277.570	3,30%
059	0,4140	1.799.997	1.544.807	255.190	15,14%	0,4253	1.676.116	1.340.185	335.931	5,49%
060	0,3913	1.905.156	1.584.688	320.467	4,32%	0,4394	1.474.493	1.250.063	224.430	9,89%
061	0,3958	2.285.263	1.939.558	345.706	1,62%	0,4071	1.690.864	1.472.311	218.553	5,49%
062	0,4252	1.984.817	1.693.520	291.298	7,03%	0,4158	1.570.679	1.346.880	223.799	4,95%
063	0,4204	1.864.793	1.606.120	258.674	4,86%	0,4163	1.432.455	1.225.919	206.536	10,99%
064	0,4093	1.699.940	1.447.389	252.551	6,49%	0,4274	1.654.777	1.372.724	282.052	1,10%
065	0,3900	1.903.672	1.609.692	293.980	4,86%	0,4616	1.245.397	1.048.566	196.831	7,14%
066	0,4172	1.860.020	1.593.715	266.305	1,08%	0,4158	1.614.128	1.351.710	262.419	6,04%
067	0,3903	1.603.011	1.362.686	240.326	2,70%	0,4287	1.564.092	1.343.144	220.948	3,85%
068	0,4145	1.769.382	1.532.532	236.849	4,86%	0,4346	2.012.658	1.665.390	347.268	3,30%
069	0,4207	1.663.623	1.353.263	310.360	6,49%	0,3840	1.738.804	1.554.295	184.509	7,69%
070	0,4100	2.178.658	1.890.480	288.178	10,81%	0,4456	1.618.340	1.397.516	220.825	1,10%
071	0,4313	1.662.865	1.438.534	224.331	10,81%	0,4308	1.780.985	1.527.130	253.855	3,85%
072	0,4336	2.088.252	1.753.632	334.620	1,08%	0,4125	1.577.195	1.376.374	200.821	4,95%
073	0,4021	2.287.402	1.994.063	293.339	2,16%	0,4154	1.721.953	1.450.647	271.305	3,30%
074	0,4053	1.787.974	1.548.126	239.849	3,24%	0,4216	1.673.176	1.453.794	219.382	3,85%
075	0,4299	1.720.410	1.508.640	211.771	4,86%	0,4217	1.761.784	1.523.807	237.978	3,30%
076	0,4016	1.846.728	1.578.388	268.339	8,65%	0,4148	1.923.436	1.631.446	291.990	4,40%
077	0,4197	1.930.213	1.625.188	305.024	9,19%	0,4014	1.658.183	1.383.230	274.953	7,69%
078	0,4208	1.575.461	1.301.780	273.681	8,11%	0,4343	1.409.766	1.228.189	181.577	2,20%

Interação	Projeção realizada em conjunto com novos dados (844 ocorrências)					Projeção realizada apenas com dados da literatura (820 ocorrências)				
	Limiar	Área (km²)	Área com ≥ 75% de cobertura de dossel (km²)	Área reduzida	Taxa de omissão	Limiar	Área (km²)	Área com ≥ 75% de cobertura de dossel (km²)	Área reduzida	Taxa de omissão
079	0,4224	1.698.842	1.439.878	258.963	6,49%	0,4014	1.952.154	1.605.651	346.503	2,20%
080	0,4289	1.882.066	1.691.939	190.127	4,32%	0,4071	1.832.896	1.558.853	274.044	1,65%
081	0,4274	1.867.011	1.612.045	254.966	7,57%	0,3984	1.511.135	1.258.307	252.828	3,85%
082	0,4553	1.772.551	1.566.047	206.504	9,19%	0,4018	1.337.375	1.107.367	230.009	6,59%
083	0,4019	2.269.726	1.901.276	368.450	2,70%	0,4355	1.593.444	1.381.160	212.284	3,30%
084	0,4361	1.661.178	1.420.494	240.685	9,19%	0,4370	1.506.078	1.292.691	213.387	5,49%
085	0,4225	1.945.686	1.644.394	301.292	8,65%	0,4250	1.673.252	1.392.610	280.642	6,04%
086	0,4182	1.671.298	1.432.930	238.367	12,97%	0,3949	1.907.315	1.590.210	317.105	3,85%
087	0,4058	1.735.870	1.506.250	229.620	7,03%	0,3972	1.636.905	1.387.460	249.445	6,04%
088	0,4202	1.478.468	1.246.944	231.524	9,19%	0,4241	1.707.357	1.465.754	241.602	2,75%
089	0,4194	2.067.835	1.803.961	263.874	5,95%	0,4068	1.578.729	1.328.786	249.943	3,85%
090	0,4153	1.609.341	1.392.420	216.920	1,62%	0,4351	1.533.019	1.287.960	245.059	4,95%
091	0,3990	2.169.158	1.829.045	340.113	2,16%	0,4231	1.597.931	1.345.369	252.562	2,20%
092	0,4217	1.760.025	1.573.335	186.689	3,24%	0,4145	1.615.462	1.323.486	291.976	3,30%
093	0,4077	1.712.182	1.491.340	220.842	5,41%	0,4121	1.660.558	1.433.083	227.475	3,85%
094	0,4093	1.900.372	1.622.878	277.493	6,49%	0,4186	1.609.475	1.357.587	251.888	3,85%
095	0,4298	1.460.151	1.220.801	239.350	7,57%	0,4234	1.542.638	1.283.752	258.886	2,20%
096	0,4201	1.749.162	1.533.643	215.519	1,08%	0,4444	1.575.610	1.341.218	234.392	1,10%
097	0,3999	2.032.192	1.702.628	329.564	3,24%	0,4403	1.545.898	1.361.132	184.766	6,59%
098	0,4064	1.824.293	1.535.540	288.754	3,24%	0,3958	1.518.978	1.288.764	230.214	4,95%
099	0,4206	1.562.103	1.333.479	228.624	2,70%	0,4102	1.838.549	1.558.415	280.134	3,85%
100	0,4137	1.587.150	1.388.007	199.144	5,95%	0,4189	1.839.777	1.595.569	244.209	2,75%
Raster de Média (resultado)	0,4160	1.616.965	1.391.668	225.297	5,38%	0,4205	1.449.233	1.223.074	226.160	4,39%
Média das interações	0,4160	1.839.685	1.581.090	258.595	5,38%	0,4205	1.651.518	1.404.601	246.917	4,39%

Interação	Projeção realizada em conjunto com novos dados (844 ocorrências)					Projeção realizada apenas com dados da literatura (820 ocorrências)				
	Limiar	Área (km ²)	Área com ≥ 75% de cobertura de dossel (km ²)	Área reduzida	Taxa de omissão	Limiar	Área (km ²)	Área com ≥ 75% de cobertura de dossel (km ²)	Área reduzida	Taxa de omissão
Mínimo	0,3819	1.430.126	1.220.801	172.883	0,00%	0,3840	1.159.206	964.077	158.360	0,00%
Máximo	0,4634	2.359.066	2.112.013	368.450	15,14%	0,4741	2.163.503	1.822.075	356.003	11,54%

Para o “Raster de Média (resultado)” não é dado o limiar, ele foi calculado pela média das 100 interações e projetado no raster da média do resultado da modelagem MaxEnt. A média das interações corresponde apenas às médias dos valores apresentados nas interações. A área com ≥ 75% de cobertura de dossel dentro da área de estudo, que não sofreu perda florestal durante o período de 2000 a 2017, e não inspecionada pelos dados de LiDAR representa 5.556.619 km².

Fonte: Produção do autor.

ANEXO B – TABELA DE ÁREAS DOS CONJUNTOS DE DADOS DE LIDAR.

Tabela B. 1 – Extensão total dos dados de LiDAR considerando áreas com sobreposição de dados.

<i>Database</i>	<i>Extensão total dos dados (com sobreposição) (km²)</i>	<i>Extensão dos dados na Área de estudo (com sobreposição) (km²)</i>	<i>SWA (km²)</i>	<i>SA (km²)</i>	<i>NWA (km²)</i>	<i>GS (km²)</i>	<i>EA (km²)</i>	<i>CA (km²)</i>
<i>PSus</i>	808,13	720,86	41,01	219,79	10,18	0	168,61	281,27
<i>NAURU</i>	190,44	29,49	29,49	0	0	0	0	0
<i>EBA</i>	5.022,41	4.947,76	127,30	1.567,21	239,89	870,05	335,50	1.807,82
<i>TOTAL</i>	6.020,98	5.698,11	197,80	1.787,00	250,08	870,05	504,10	2.089,09

Fonte: Produção do autor.

Tabela B. 2 – Extensão total dos dados de LiDAR, desconsiderando áreas com sobreposição de dados.

<i>Database</i>	<i>Extensão total dos dados (sem sobreposição) (km²)</i>	<i>Extensão dos dados na Área de estudo (sem sobreposição) (km²)</i>	<i>SWA (km²)</i>	<i>SA (km²)</i>	<i>NWA (km²)</i>	<i>GS (km²)</i>	<i>EA (km²)</i>	<i>CA (km²)</i>
<i>PSus</i>	535,29	468,05	36,01	178,37	10,18	0	71,84	171,65
<i>NAURU</i>	78,47	28,89	28,89	0	0	0	0	0
<i>EBA</i>	5.003,38	4.928,73	127,30	1.567,17	239,89	869,78	334,61	1.789,98
<i>TOTAL</i>	5.540,95	5.351,20	182,31	1.729,10	250,08	869,78	399,99	1.919,95

Fonte: Produção do autor.

Tabela B. 3 – Percentual de áreas inspecionadas, desconsiderando áreas com sobreposição de dados.

	Área de estudo	SWA	SA	NWA	GS	EA	CA
Área total (km ²)	6.927.878,0	881.576,5	1.445.716,8	1.165.689,3	1.717.927,6	483.799,5	1.233.168,0
% de área inspecionada	0,0772 %	0,0207 %	0,1196 %	0,0215 %	0,0506 %	0,0827 %	0,1557 %
Quant. de estruturas identificadas	24	10	6	0	6	0	2
Quant. de arquivos de LiDAR com estruturas	10	4	1	0	3	0	2

Fonte: Produção do autor.