

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

GEOAMBIENTES, GEOARQUEOLOGIA E CENÁRIOS DE MUDANÇAS
CLIMÁTICAS NA ILHA DE MARAJÓ, AMAZÔNIA BRASILEIRA

RENATA JORDAN HENRIQUES

Belo Horizonte
2022

RENATA JORDAN HENRIQUES

GEOAMBIENTES, GEOARQUEOLOGIA E CENÁRIOS DE MUDANÇAS
CLIMÁTICAS NA ILHA DE MARAJÓ, AMAZÔNIA BRASILEIRA

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação do Departamento de Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do Título de Doutora em Geografia.

Área de Concentração: Análise Ambiental

Linha de Pesquisa: Geografia Física

Orientador: Prof. Dr. Fábio Soares de Oliveira (UFMG)

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer (UFV)

Belo Horizonte
2022

H519g
2022

Henriques, Renata Jordan.

Geoambientes, geoarqueologia e cenários de mudanças climáticas na Ilha de Marajó, Amazônia Brasileira [manuscrito] / Renata Jordan Henriques. – 2022.

200 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientador: Fábio Soares de Oliveira.

Coorientador: Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Geografia, 2022.

Área de concentração: Análise Ambiental.

Linha de pesquisa: Geografia Física.

Bibliografia: f. 182-200.

1. Arqueologia – Teses. 2. Geociências – Teses. 3. Antiguidades – Teses. 4. Mudanças climáticas – Marajó, Ilha de (PA) – Teses. I. Oliveira, Fábio Soares de. II. Schaefer, Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Geografia. IV. Título.

CDU: 551.583(811.5)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
COLEGIADO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

FOLHA DE APROVAÇÃO

**GEOAMBIENTES, GEOARQUEOLOGIA E CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA ILHA DE MARAJÓ,
AMAZÔNIA BRASILEIRA**

RENATA JORDAN HENRIQUES

Tese de Doutorado defendida e aprovada, no dia **20 de outubro de 2022**, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores:

Caroline Delpupo Souza

(IFMG-OP)

Márcio Rocha Francelino

(UFV)

Roberto Célio Valadão

(UFMG)

Fábio Soares de Oliveira - Orientador

(UFMG)

Belo Horizonte, 20 de outubro de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Roberto Celio Valadao, Professor do Magistério Superior**, em 20/10/2022, às 18:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fabio Soares de Oliveira, Professor do Magistério Superior**, em 20/10/2022, às 18:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cristiane Valeria de Oliveira, Professora do Magistério Superior**, em 20/10/2022, às 19:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Caroline Delpupo Souza, Usuário Externo**, em 25/10/2022, às 13:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Rocha Francelino, Usuário Externo**, em 25/10/2022, às 21:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1811800** e o código CRC **2200DC7E**.



À ciência ...

AGRADECIMENTOS

O processo de uma tese merece o reconhecimento de diversas pessoas que ajudaram no processo da pesquisa.

Primeiramente, os devidos créditos aos principais professores que orientaram a pesquisa, na pessoa de Fábio Soares de Oliveira, pela UFMG, e de Carlos Ernesto Schaefer, pela UFV. Essa proximidade a duas importantes universidades permitiu que o trabalho adquirisse vigor e transversalidade para contribuir para a proteção da complexa paisagem e história natural-social da foz do rio Amazonas. Agradecimentos também ao Márcio Francelino, professor na UFV, Paulo Canto, arqueólogo no Museu Paraense Emílio Goeldi, e demais que fazem parte da equipe e ajudaram no percurso do trabalho e em suas discussões.

Agradecimentos especiais aos órgãos federais financiadores dessa pesquisa, referentes à Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de doutorado 88882.184275/2018-01 do Programa PROEX, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo financiamento pela chamada Pública MCTIC/CNPq nº 21/2017. Ainda que em tempos penosos para a ciência, são instituições que sobrevivem e fornecem o fôlego a uma ciência brasileira que espera o dia em que será curada de uma pandemia de apatia e controvérsias políticas. Agradecimentos ainda aos participantes da 2ª Oficina de Avaliação e Monitoramento dos projetos “Pesquisa e Desenvolvimento em Ações Integradas e Sustentáveis nas Baías do Brasil” realizada em Brasília na sede do CNPq em 2019, principalmente na pessoa de Margareth Carvalho, organizadora da ação coletiva.

Àqueles amigos e colegas que estiveram mais próximos. Cito aqui alguns, como Prímula Viana, bióloga, uma simpatia de gente que sempre me recebeu de boa vontade por um longo semestre em Viçosa! Rodrigo Gorsani, também biólogo, que me apresentou o software R e pude fazer essas estatísticas elaboradas! Eduardo Senra, pedólogo, que ajudou nas coletas das amostras na Ilha do Marajó! Caroline Delpupo, geógrafa, que pude esclarecer diversas dúvidas de um universo pedogeoquímico, do qual meu contato ainda era recente! Samuel Ribeiro, geógrafo e paraense, que nossas conversas ajudaram bastante a entender seu ecossistema fluvial! Fernando Costa, técnico no Instituto de Geociências, sempre atencioso e animado em descobrir novas possibilidades químicas analíticas! Ao grupo de Pesquisa PEDOGEO e seus integrantes, pelas ricas discussões e companheirismos que ajudam a todos a se aprimorarem enquanto pessoas e cientistas. Àqueles que não mencionei, mas que acompanharam e incentivaram a longa trajetória de um doutoramento e torcem para que tudo dê certo, agradeço!

Financiamento, suporte e apoio



BIOGRAFIA



Foto: Rio Negro (Parque Nacional de Anavilhanas) - Amazonas (18 de outubro de 2014).

Natural de Belo Horizonte, terras das Minas Gerais, do pão de queijo, dos mares pré-cambrianos. De nascimento em 1991, foram trilhados caminhos por entre águas do conhecimento científico, nem sempre previsíveis. Águas que na graduação lapidaram litoestruturas geotectônicas, arquitetaram relevos regionais. Águas pelo mestrado que erodiram heranças carbonáticas dos mares das Gerais. Águas pelo doutorado que chegaram à foz do Rio Amazonas e orquestraram a formação de um povo, ameríndio, em essência, sul-americano. Águas que tiveram a Universidade Federal de Minas Gerais como principal leito por onde manaram esses desdobramentos. Caminhos que fluem como um perene fluxo de matéria, energia, singularidades, enquanto arranjos da melodia de uma composição harmônica planetária.

RESUMO

A Ilha de Marajó, localizada na foz do Rio Amazonas no estado do Pará, integra um dos maiores arquipélagos fluvio-estuarino do planeta. Seus mais de 30.000 mil km² resguardam heranças de sua evolução humana e ambiental durante o Holoceno, que culminaram em múltiplas geodiversidades em sua paisagem. O objetivo principal dessa pesquisa foi investigar as múltiplas heranças geoambientais e antropogênicas da ilha e seus significados para a evolução da paisagem marajoara, além de possibilitar prever cenários futuros para a região. Como metodologia foram (i) amostrados e descritos 20 perfis de solo em dezembro de 2018, e realizadas suas análises laboratoriais físicas e químicas; (ii) datadas amostras de carvão e matéria orgânica pelo isótopo ¹⁴C; (iii) realizados procedimentos por sensor remoto, tais como reconhecimento de assinaturas espectrais da superfície, compartimentação de geoambientes e seções topográficas. Os principais resultados desse trabalho foram: (i) a identificação e caracterização de 21 principais geoambientes que formam as paisagens da ilha; (ii) o reconhecimento de diferentes Terras Pretas de Índio, com e sem cerâmica, que remetem a processos históricos de ocupação e agricultura; (iii) o mapeamento da espacialidade de solos salinos e suas respostas espectrais; (iv) os indicadores nos solos e vegetação de um Holoceno Inferior quente e mais seco que passa para maior umidade e temperatura no Holoceno Superior; (v) a identificação de vulnerabilidades frente às mudanças climáticas e elevação do nível médio dos oceanos, sendo reconhecidas tendências erosivas na região costeira da ilha; (vi) a apresentação de ações para atenuar possíveis impactos humanos, geoarqueológicos e ambientais em relação às mudanças climáticas. Como expectativas na continuação da pesquisa após a defesa: (i) o aprimoramento e divulgação das discussões sobre os solos salinos, sua mineralogia e geoquímica; (ii) avanços nas discussões sobre vulnerabilidades climáticas futuras; (iii) a ampliação da investigação de um universo microscópico, mediante uso de lâminas delgadas de solos e couraças e morfoscopia de grãos; (iii) além da confecção da síntese do projeto por meio de livro ou demais recursos para facilidade de divulgações futuras e contribuições para o maior conhecimento sobre as baías do Brasil, dentre as quais a Ilha de Marajó.

Palavras-chave: Ilha do Marajó; Geoambientes; Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS); Mudanças climáticas; Amazonia

ABSTRACT

Marajó Island, located at the mouth of the Amazon River in the state of Pará, is part of one of the largest river-estuarine archipelagos on the planet. Its more than 30,000 thousand km² safeguard the legacies of its human and environmental evolution during the Holocene, which culminated in multiple geodiversity in its landscape. The main aims of this research were to investigate the multiple geoenvironmental and anthropogenic legacies of the island and their meanings for the evolution of the Marajoara landscape, in addition to making it possible to predict future scenarios for the region. As a methodology, 20 soil profiles were sampled and described in December 2018, and their physical and chemical laboratory analyses were carried out; (ii) dated charcoal and organic matter samples by ¹⁴C isotope; (iii) performed procedures by remote sensor, such as recognition of surface spectral signatures, compartmentalization of geoenvironments and topographic sections. The main results of this work were: (i) the identification and characterization of 21 main geoenvironments that form the Marajó island's landscapes; (ii) the recognition of different Terras Pretas de Índio, with and without ceramics, which refer to historical processes of occupation and agriculture; (iii) mapping the zone occurrence of saline soils and respective spectral responses; (iv) indicators in soils and vegetation from a warmer and drier Lower Holocene to wet and hottest temperatures in the Late Holocene; (v) the identification of climate change vulnerabilities and the rise of the oceans water level at the global coasts, beyond recognizing erosion trends in the coastal region of Marajó Island; (vi) the presentation of actions to mitigate possible human, geoarchaeological and environmental impacts in relation to climate change. As expectations for the continuation of the research later the thesis conclusion: (i) the improvement and dissemination of discussions on saline soils, their mineralogy and geochemistry; (ii) advances in discussions of future climate vulnerabilities in the region; (iii) the expansion of the investigation of a microscopic universe, through the use of thin sections of soils and shells and grains morphoscopy; (iii) in addition, a synthesis of the project through a book, or other visual resources, to facilitate disclosures and contributions to knowledge about the bays of Brazil, beyond Marajó estuary.

Keywords: Marajó Island; Geoenvironments; Sustainable Development Goals (SDG); Climate change; Amazon

Lista de Ilustrações

Figura 1: Sede do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), em Brasília, e Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS-Agenda 2030) da Organização das Nações Unidas (ONU), os quais norteiam as ações da chamada nº 21/2017.	17
Figura 2: Localização da área de estudo.....	23
Figura 3: Representação esquemática das principais zonalidades da Bacia Hidrográfica Amazônica, em seu domínio de cabeceiras até sua foz no Oceano Atlântico	24
Figura 4: Representação esquemática da extensão da província magmática (CAMP), há cerca de 200Ma, e registros ígneos nos continentes. Momento da formação da Margem Equatorial Atlântica.....	26
Figura 5: Movimentos distensivos entre as placas Sul-Americana e Africana, formação do Gráben de Marajó associado ao soerguimento do Arco de Gurupá.....	27
Figura 6: Arranjos da bacia hidrográfica do Rio Amazonas e interações entre as placas Sul-Americana e de Nazca, a oeste, responsáveis por edificar a cordilheira dos Andes e influenciar a dinâmica hidrológica na América do Sul.	30
Figura 7: Arranjo estrutural dos sistemas de grábens durante os eventos que formaram a Margem Equatorial Atlântica e seus Arcos adjacentes.	31
Figura 8: Sequências sedimentares associadas ao Grupo Barreiras e pós-Barreiras comumente encontrada no setor costeiro da região Norte.	32
Figura 9: Distribuição espacial dos sedimentos pós-Barreiras na foz do rio Amazonas e associações a depósitos holocênicos no setor oriental da Ilha de Marajó.	33
Figura 10: Sequências deposicionais do pós-Barreiras em relação às variações oceânicas dos último 140 mil anos na região da Ilha de Marajó.....	34
Figura 11: Organização sedimentar da foz do rio Amazonas e coberturas detrito lateríticas associadas, de diferentes temporalidades.	35
Figura 12: Couraças ferruginosas datadas pelo método (UTh) He	37
Figura 13: Principais exemplos da tipologia da arte da cerâmica marajoara, destaque para a cobra enquanto animal mítico símbolo dessa cultura indígena.	38
Figura 14: Em A <i>mound</i> Guajará identificado e mapeado por Roosevelt (1993); em B <i>mound</i> identificado em campo em 2018 com presença de Terra Preta de Índio.	39
Figura 15: Cartografia histórica da Ilha do Marajó desde os primeiros registros durante o período das Grandes Navegações no século XV.	41
Figura 16: Vestígios arqueológicos observado em Joanes durante expedição de campo em dezembro de 2018 na Ilha de Marajó.	42
Figura 17: Temperatura média global nos últimos séculos e padrões de tendências de aquecimento.....	44
Figura 18: Medições das taxas de dióxidos de carbono nos últimos séculos e projeções de cenários de temperatura.	45
Figura 19: Nível médio global dos oceanos medidos em diferentes cidades costeiras e projeções futuros de comportamento.	46
Figura 20: Nível médio global dos oceanos e tendências futuras de elevação.....	47
Figura 21: Cartografia histórica náutica e a presença de Ilhas que nos dias atuais estariam submersas, podendo ser indicador de alterações no nível global oceânico nos dias atuais em	

relação há 300 anos. Destaque para as Ilhas de Ascensão, Trindade, Martin Vaz, Santa Maria e Picos.....	48
Figure 22: Study area, sampling soil, geological structure and altitude above sea level.	55
Figure 23: Marajó Island geoenvironmental stratification and regional topographic section.	59
Figure 24: Representative geoenvironments of Marajó Island. G1 Low terraces and plains with saline-sodic Gleysols, G2 Apicum, G3 Mangrove with Gleysols, G4 Old salt-plain terrace with fluvial-lacustrine sediments, G10 Sandy domain with Spodosols and savanna, G14 Fluvio-marine plains with grassy herbaceous vegetation, G17 Western Marajó plateau with dense alluvial rainforest, G18 Alluvial dense rainforest domain with Euterpe Oleracea, G19 Plateau with Oxisols and diversity vegetation and also Jesuitical buildings from 1750 in Joanes city.....	60
Figure 25: Principal Component Analysis of soils and geoenvironments	61
Figure 26: Representative profiles of Marajó Island. P1 Xanthic Haploperox, P2 Typic Haplorthods, P4 Typic Sulfiwassents, P5 Typic Quartzipsamments, P6 Sodic Hydraquents, P7 Typic Haploperox, P8 Sodic Hydraquents, P11 Sulfic Hydraquents, P12 Sodic Hydraquents, P13 Typic Haploperox, P14 Typic Hydraquents, P16 Typic Udipsamments, P17 Xanthic Haploperox, P19 Plintic Haploperox, P20 Typic Dystrudepts.....	64
Figura 27: Localização da área investigada na Ilha de Marajó, Pará, Brasil.	92
Figura 28: Organização da paisagem da área de estudo e coleta de amostras.	97
Figura 29: Índices salinos e NDVI aplicados para a área investigada.	98
Figura 30: Resultados da técnica de regressão linear múltipla aplicado aos índices espectrais e os dados laboratoriais de condutividade e saturação por sódio.	99
Figure 31: Study area at Marajó Island.	106
Figure 31: Salt-affect soil map of eastern Marajó Island, Brazilian Amazonia.....	116
Figure 32: Main environments related, with the presence of <i>Sesuvium portulacastrum</i> and Carnaúba (<i>Copernicia prunifera</i> (Miller) H. E. Moore (Arecaceae).	117
Figure 33: Spectral salinity curves	117
Figure 34: Plots of PCA1 and PCA2 axes of relations between environment groups and soil attributes and respective correlation matrix of soil variables.	118
Figure 35: Principal component analysis and environmental groups.	119
Figura 37: Localização da área de estudo na Ilha de Marajó, Pará, Brasil.	127
Figura 38: Seção topográfica regional e respectivos geoambientes.....	130
Figura 39: Setor II da área investigada.	131
Figura 40: Setor oeste da área investigada.	133
Figure 41: Architecture of methodological procedures	141
Figure 42: Main landscapes of Marajó Island and its inhabitants and archaeological mounds.	143
Figure 43 - Flood scenarios and their associated environmental and social impacts.....	150
Figure 44 - Soil chemical and physical attributes at East Marajó Island.	152
Figure 45: Coastline evolution and changes during past 46 years at Marajó Island.....	154
Figure 46: Barra Velha Beach at Marajó Island and tidal impacts of the last decade.	155
Figure 47: Components for the development of scenarios at sea level and possible anthropic mitigation interventions.	156

Figura 48: Terras Pretas de Índio com vestígios de cerâmica degradada incorporada à pedogênese dos solos. Em profundidade presença de couraça ferruginosa.	161
Figura 49: Vestígios arqueológicos observados em campo, destaque para Terra Preta de Índio de A, B, E. No distrito de Joanes observa-se edificações de antigas missões jesuíticas de meados do século XVI. Em F destaque para cerâmica encontrada no Perfil 7 em E.	162
Figura 50: Alinhamentos regionais de cordões arenosos do Holoceno.	163
Figura 51: Domínio de antigos cordões arenosos com formação de espodosolos e estabelecimento de cerrado <i>strictu sensu</i>	164
Figura 52: Seção topográfica vertical Espodosolo, em A dados obtidos por GPR (Ground Penetration Radar) e B seção lateral do Espodosolo.	165
Figura 53: Latossolos sob influência de antigas couraças ferruginosas e materiais geoarqueológicos em superfície. Em A couraças associadas ao Grupo Barreiras fortemente erodida e intemperizada, em D evidências de degradação de couraças ferruginosas.	166
Figura 54: Domínio de manguezais, em B amostragem do Perfil 3 de solo.	167
Figura 55: Bordas do manguezal nas margens da Baía de Marajó e impactos marinhos recentes.	168
Figura 56: Domínio de apicum adjacente ao manguezal. Em C destaque para extensas planícies salinas associadas.	169
Figura 57: Planícies interiores não salinas submetidas a inundação anual por precipitação.	171
Figura 58: Grãos de areia amostrados da Ilha do Marajó.	172
Figura 59: Estatísticas sobre o grau de arredondamento e esfericidade dos grãos de quartzo por geoambiente.	173
Figura 60: Estatísticas referentes ao grau de arredondamento e esfericidade dos grãos de quartzo por geoambiente.	174
Figura 61: Estatísticas referentes ao grau de arredondamento e esfericidade dos grãos de quartzo por geoambiente.	174
Figura 62: Planície herbácea salina/apicum adjacente ao manguezal da região de Soure, destaque para o Perfil 8 e seus horizontes arenosos enterrado.	176
Figura 63: Evidências da dissecação das margens do manguezal solos por meio de “falésias” de mangue.	178
Figura 64: À esquerda da foto, <i>rizophora mangle</i> tombadas pelo efeito de maré, à direita e ao fundo rarefação do adensamento do manguezal.	178
Figura 65: Habitações típicas de palafitas presentes por quase toda a Ilha de Marajó.	180
Figura 65: Planícies herbáceas interiores passíveis de serem primeiramente afetadas por meio de cheias severas decorrentes do aumento do nível global dos oceanos.	180

Lista de tabelas

Table 1: General aspects and classification of studied soils at Marajo Island, Brazilian Amazonia.	62
Table 2: Morphological and physical attributes of studied soils at Marajo Island, Brazilian Amazonia.	66
Table 3: Chemical attributes of studied soils at Marajo Island, Brazilian Amazonia.	71
Table 4: Chemical attributes (micronutrients) of the studied soils at Marajo Island, Brazilian Amazonia.	75
Tabela 5: Equações utilizadas para análise da salinidade por meio da imagem Sentinel-2A ..	94
Table 6: Salinity indexes for regional environment spectral salt-signature.....	108
Table 7: Soil salinity classes, their effects on crops (Brown et al. 1954) and salinity map classes defined adapted from Gorji 2017 and Brown 1954.	108
Table 8: Physical and chemical attributes of selected soil pedons at Marajo Island, Brazilian Amazonia.	110
Tabela 10: Atributos físicos e químicos dos solos estudados na área.	132
Table 11: Main environmental risks of the rising sea-levels 21th century predictions.	145
Table 12: Main population risks of the rising sea-levels 21th century predictions.	147

Sumário

1. PRIMEIRAS PALAVRAS	16
1.1 Do projeto à tese, da tese ao projeto	16
1.2 Questão, hipótese e objetivos.....	18
1.3 Estrutura da tese	19
2. ORGANIZAÇÃO METODOLÓGICA.....	20
2.1 Trabalho de campo e compilados de literatura	20
2.2 Procedimentos laboratoriais	21
2.3 Análise dos resultados e sua organização	21
3. O ESTADO DA ARTE SOBRE A ILHA DO MARAJÓ.....	23
3.1 Localização na bacia hidrográfica amazônica	23
3.2 Singularidades geoambientais do Marajó.....	25
3.2.1 Heranças da individualização da Plataforma Sul-Americana	25
3.2.2 Reativações tectônicas e atual foz do rio Amazonas	28
3.2.4 Os últimos 30 mil anos sedimentares da Ilha do Marajó.....	32
3.2.3 Couraças ferruginosas e dinâmicas paleoclimáticas	35
3.3 Heranças indígenas e a consolidação do território brasileiro.....	37
3.3.1 Arqueologia da Ilha de Marajó	37
3.3.2 Heranças da colonização portuguesa	40
3.4 Mudanças climáticas e a Ilha do Marajó	43
3.4.1 Projeções globais de temperatura e nível dos oceanos	43
4. GEOAMBIENTES DA ILHA DO MARAJÓ	50
4.1 Soils and Landscapes of Marajó Island, Brazilian Amazonia: Holocene evolution, ge archaeology and climatic vulnerability (Environemntal Earth Sciences); https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-022-10310-2	50
4.1.1 Abstract.....	50
4.1.2 Introduction	51
4.1.3 Material and Methods	53
4.1.3.1 Study area.....	53
4.1.3.2 Remote sensing and geoenvironmental map.....	55
4.1.3.3 Soil sampling and field data.....	56
4.1.3.3 Radiometric dating of soil by ¹⁴ C.....	56
4.1.3.3 Physical and chemical analyses	56
4.1.5 Discussion	79
4.1.6 Conclusions	85
5. AMBIENTES SALINOS E IMPLICAÇÕES NA PAISAGEM DA ILHA DO MARAJÓ.....	88
5.1 Salinidade e heranças hidro-pedogeomorfológicas na Ilha de Marajó, Foz do rio Amazonas, Pará, Brasil	88
5.1.1 Resumo	88
5.1.2 Introdução	89

5.1.3 Área de estudo.....	91
5.1.4 Metodologia	93
5.1.5 Resultados e discussões.....	95
5.1.6 Considerações finais	100
5.2 Salt-affected soils as indicative of fluvial-marine landscape evolution, Marajó Island, Brazilian Amazonia	103
5.2.1 Abstract.....	103
5.2.2 Introduction	103
5.2.3 Methodology	105
5.2.3.1 Study area.....	105
5.2.3.2 Soil sampling and laboratory procedures.....	106
5.2.3.2 Environment salt-plains.....	107
5.2.3.3 Soil statistical analysis	109
5.2.4 Results.....	109
5.3.4.1 Physical and chemical soil attributes.....	109
5.3.4.1 Salt-affected soil map.....	114
5.3.4.4 Soil statistical analysis	117
5.2.5 Discussions.....	120
5.2.6 Conclusions.....	123
6. AMBIENTES LATERÍTICOS E IMPLICAÇÕES NA EVOLUÇÃO DA PAISAGEM.....	124
6.1 Interações pedogeomorfológicas e evolução do Grupo Barreiras na Ilha de Marajó, foz do rio Amazonas, Pará, Brasil	124
6.1.1 Resumo	124
6.1.2 Introdução	124
6.1.3 Área de estudo.....	126
6.1.4 Metodologia	127
6.1.5 Resultados e discussões.....	129
6.1.6 Considerações finais	134
7. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SEUS IMPACTOS	136
7.1 Impacts of Anthropocene sea-level rise on People, Environments, and Archaeological legacies at Marajó Island, Brazilian Amazonia	136
7.1.1 Abstract.....	136
7.1.2 Introduction	137
7.1.3 Materials and methods.....	139
7.1.3.1 Study area.....	139
7.1.3.2 Data acquisition and social-environmental analyses	140
7.1.3.3 Coastline morphology changes	141
7.1.3.4 Soil sample and laboratory procedures.....	142
7.1.4 Results.....	142
7.1.4.1 Marajó Island landscape.....	142
7.1.4.2 Sea-level rise scenarios and consequences.....	144
7.1.4.3 Soil aspects	151
7.1.4.4 Coastline morphology change	153
7.1.5 Discussions and conclusions	155
8. DISCUSSÕES E PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DA TESE.....	160
8.1 A heterogeneidade da paisagem da Ilha de Marajó	160
8.2 Evolução geoambiental da Ilha de Marajó.....	172

8.3 O futuro dinâmico da Ilha de Marajó e mudanças climáticas.....	177
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	182
REFERÊNCIAS.....	183

1. PRIMEIRAS PALAVRAS

1.1 Do projeto à tese, da tese ao projeto

Os caminhos que levaram a essa tese de doutorado começam na Chamada Pública nº 21/2017, intitulada “Pesquisa e Desenvolvimento em Ações Integradas e Sustentáveis nas Baías do Brasil”, realizada e financiada pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). O contexto se insere em um país que possui consideráveis fragilidades ecossistêmicas em seus sistemas hidrológicos, sejam eles costeiros ou interiores, e tem como cerne a integração e geração de conhecimentos sobre as mais diversas Baías brasileiras, como a Baía de Todos os Santos, na Bahia, a Baía de Guanabara, no Rio de Janeiro, e a Baía do Marajó, na foz do rio Amazonas.

O principal objetivo dessa ação foi o apoio à pesquisa científica, tecnológica e inovação que agreguem conhecimentos sobre as Baías do Brasil, de maneira a trazer à luz aspectos físicos, sociais e econômicos que hoje representam lacunas no conhecimento do processo do manejo sustentável desses ambientes e de mitigações sobre mudanças climáticas. A chamada teve como meta integrar os diversos segmentos da esfera pública, da iniciativa privada, da comunidade acadêmica e da sociedade civil, a partir de um esforço para promover a conservação da biodiversidade e o desenvolvimento econômico, social e sustentável das Baías brasileiras (Figura1).

A ação atende a alguns dos principais Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030, sobre a Década dos Oceanos, da Organização das Nações Unidas (ONU), principalmente: (i) ODS1 - Acabar com a pobreza em todas as suas formas, em todos os lugares; (ii) ODS2 - Acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável; (iii) ODS6 - Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável de água e saneamento para todos; (iv) ODS8 - Promover o crescimento econômico sustentado, inclusivo, emprego pleno, produtivo e decente para todos; (v) ODS13 - Tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos; (vi) ODS14 - Conservação e uso sustentável dos oceanos, dos mares e dos recursos marinhos; (vii) ODS17 - Fortalecer os meios de implementação e revitalizar a parceria global para o desenvolvimento sustentável.

Figura 1: Sede do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), em Brasília, e Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS-Agenda 2030) da Organização das Nações Unidas (ONU), os quais norteiam as ações da chamada nº 21/2017.

A



B



Fonte: Em A o autor; em B ONU (2020)

Dentre as propostas aprovadas na chamada MCTIC/CNPq nº 21/2017 está o projeto intitulado “Paisagens Naturais e Antropogênicas da Baía de Marajó: Geoambientes, Biogeoquímica e Geoarqueologia”, sob coordenação do professor Dr. Carlos Ernesto Schaefer, da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Esse projeto buscou focar no estudo da Ilha de Marajó, e como o próprio título retrata, a partir de uma abordagem multitemática e envolvendo uma equipe multidisciplinar. As principais instituições colaboradoras envolvidas foram a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), o Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG) e a Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Essa tese surge dessa parceria e é um dos produtos relacionados ao projeto. De início, o problema científico proposto era o reconhecimento da diversidade de paisagens da Ilha de Marajó através dos seus geoambientes. Mas como um problema leva a outro, na medida em que a paisagem de Marajó foi sendo revelada, ambientes de exceção foram se destacando, e mostrando que a Ilha é um mosaico mais complexo que se esperada. Assim, o caminho tomado pela pesquisa foi a verticalização de alguns desses ambientes, na tentativa de entender suas

especificidades e a maneira como divergem e ao mesmo tempo se integram ao contexto geral. Paulatinamente, foi se verificando a necessidade de avaliar como tais ambientes podem ser impactados em possíveis cenários de mudanças climáticas, já que a compreensão do seu funcionamento também revelou o quão frágeis podem ser. Assim, do projeto à tese, foi sendo construída uma abordagem que perpassou pelos temas – geoambientes – paisagens de exceção – vulnerabilidade ambiental – mudanças climáticas. Da tese e projeto, foram sendo construídas as contribuições para que a Ilha de Marajó, no contexto da Baía em que se insere, pudesse ter suas paisagens mais bem retratadas e pensadas. A importância de conhecer a origem das pesquisas nos movimentou na apresentação dessas primeiras palavras.

1.2 Questão, hipótese e objetivos

Essa pesquisa foi guiada pela seguinte questão norteadora:

“O que as heranças geoambientais e antropogênicas da Ilha do Marajó dizem sobre a evolução das paisagens marajoaras, e como tais heranças podem prever futuros cenários para a região?”

A principal hipótese testada a partir desta indagação é que a Ilha de Marajó apresenta um mosaico bastante heterogêneo de ambientes, modelado pelas dinâmicas humano-natureza em distintas escalas têmporo-espaciais, e cujas interações solo e paisagem são capazes de revelar. Assim, o objetivo geral desta tese foi ampliar os conhecimentos sobre as paisagens marajoaras, considerando uma visão integrada das relações solo-substrato-relevo-vegetação-sociedades, a partir da realização de estudos geoambientais e dos impactos associadas a cenários de possíveis mudanças climáticas.

Como objetivos específicos, buscou-se: (i) estudar a distribuição dos geoambientes da Ilha de Marajó; (ii) analisar as relações entre geoambientes e seus solos predominantes; (iii) compreender, numa perspectiva verticalizada, a importância de alguns ambientes pedogemorfológicos da ilha, destacadamente revelados pela análise geoambiental, como os domínios de solos salinos e domínios lateríticos com couraças ferruginosas; (iv) analisar como a diversidade geoambiental se associa ao

patrimônio arqueológico, sinalizando aspectos da ocupação humana da ilha em tempos pré-históricos e (v) avaliar as ameaças e fragilidades ambientais de Marajó diante de cenários de mudanças climáticas, e como isso pode afetar seu patrimônio natural e arqueológico.

1.3 Estrutura da tese

A estrutura da tese foi organizada em capítulos, conforme descrito a seguir:

O Capítulo 1 foi dedicado à apresentação do contexto da pesquisa, juntamente aos seus principais objetivos. O Capítulo 2 apresenta um panorama geral dos caminhos metodológicos, cujos detalhamentos das técnicas são apresentados em seus respectivos capítulos de resultados. O Capítulo 3 evidencia a compilação das principais informações obtidas em literatura em termos da evolução geotectônica, geomorfológica, pedológica e antropológica da Ilha de Marajó.

Os capítulos 4, 5, 6 e 7 foram dedicados à apresentação dos resultados, e utilizada o formato de manuscrito para publicação. Sendo:

O *Capítulo 4 – Geoambientes da Ilha de Marajó*, refere-se ao primeiro manuscrito publicado no periódico *Environmental Earth Sciences*, intitulado *Soils and Landscapes of Marajó Island, Brazilian Amazonia: Holocene evolution, geoarchaeology and climatic vulnerability* (item 4.1). Esse capítulo apresenta uma perspectiva regional sobre a Ilha de Marajó em seus aspectos geoambientais e humanos no decorrer da história pós-glaciação dos últimos 10 mil anos, até o presente, abordando o contexto histórico indígena, colonizador e as atuais vulnerabilidades climáticas da região.

O *Capítulo 5 - Ambientes salinos e implicações na paisagem da Ilha do Marajó* são apresentadas verticalizações acerca do comportamento da saturação de sais nos principais solos hidromórficos identificados e suas influências na organização espacial da paisagem da região. Dois artigos são apresentados nesse capítulo. O primeiro (item 5.1) é intitulado *Salinidade e heranças hidro-pedogeomorfológicas na Ilha de Marajó, Foz do rio Amazonas, Pará, Brasil*, e o segundo (item 5.2) é intitulado *Salt-affected soils as indicative of fluvial-estuarine landscape evolution, Marajó Island, Brazilian Amazonia*.

O *Capítulo 6 - Ambientes lateríticos e implicações na evolução da paisagem* é dedicado principalmente sobre as discussões de diferentes níveis de ferro endurecido em subsuperfície e os reflexos na cobertura pedológica. Aqui o foco é principalmente aos solos de maior desenvolvimento vertical, boa drenagem como Latossolos e Plintossolos. É apresentado o artigo *Interações pedogeomorfológicas e evolução do Grupo Barreiras na Ilha de Marajó, foz do rio Amazonas, Pará, Brasil* (item 6.1).

O *Capítulo 7 - Mudanças climáticas e seus impactos* tem o objetivo de alertar sobre os diferentes cenários de elevação do nível médio global dos oceanos e seus impactos na foz do rio Amazonas. Nesse capítulo é apresentado o artigo *Impacts of Anthropocene sea-level rise on People, Environments, and Archaeological legacies at Marajó Island, Brazilian Amazonia* (item 7.1), no qual é realizado um aprofundamento acerca das condições dos habitantes da Ilha e suas vulnerabilidades frente às variações eustáticas do nível do mar.

Na composição da tese, foram incluídos, ainda, os capítulos 8 e 9, que abordam, respectivamente, discussões sobre as contribuições gerais do estudo e as considerações finais, como detalhado a seguir:

O *Capítulo 8 - Discussões e principais contribuições da tese* representa a síntese e análise sobre os resultados obtidos nesse trabalho. É apresentado os geoambientes da Ilha do Marajó em seus mais variados aspectos evolutivos e ambientais, bem como suas múltiplas interações entre elementos físicos da natureza e antropogênicos.

Por fim, no *Capítulo 9 - Considerações finais*, é apresentado os últimos comentários acerca do trabalho e sinaliza possíveis caminhos futuros para os estudos aqui iniciados.

2. ORGANIZAÇÃO METODOLÓGICA

2.1 Trabalho de campo e compilados de literatura

O primeiro ano do doutoramento em 2018 foi dedicado aos primeiros compilados em literatura acerca das mais variadas informações ambientais e antropológicas. Nesse momento o interesse era o de contextualizar melhor o objeto de estudo dessa tese, a Ilha de Marajó, ainda que de fato seria mais bem reconhecido a partir do trabalho de campo. Também foram obtidas imagens de satélite de resolução de 30m (Landsat-8) e 10m (Sentinel-2A), além do modelo digital de elevação Alos Palsar para primeiras compartimentações regionais da paisagem da Ilha de Marajó. Em dezembro de 2018, foram dedicados cerca de 15 dias para coleta e reconhecimento local dos geoambientes investigados. Durante o campo também foram refinados como seriam abordados os principais objetivos do projeto, além de ser dimensionado a real escala espacial da foz do rio Amazonas e seus geoambientes. Houve ainda uma segunda campanha de campo realiza pela equipe em outubro de 2019, cujas observações feitas foram importantes para ampliar as discussões mais regionais da Ilha de Marajó.

2.2 Procedimentos laboratoriais

Durante o campo de 2018 foram coletados e descritos 20 perfis de solo, sendo divididos principalmente entre solos espessos e bem drenados e aqueles de comportamento hidromórfico, como os Gleissolos. As amostras foram secas entre dezembro de 2018 a fevereiro de 2019, no Museu Paraense Emílio Goeldi em Belém, sendo transportadas para Minas Gerais (aproximadamente 350kg) para realização das análises laboratoriais. Durante o primeiro e segundo semestre de 2019 as amostras foram analisadas, sendo obtidos os principais resultados físicos e químicos nos laboratórios de solos do Departamento de Solos da UFV, em Viçosa, e de Geomorfologia, do Instituto de Geociências da UFMG, em Belo Horizonte. Os detalhamentos analíticos são apresentados em cada artigo-resultado com fins de melhor organizar quais resultados foram trabalhados em cada item. Ainda foram enviadas amostras de material húmico e de carvão para os Estados Unidos para datação de carbono 14.

2.3 Análise dos resultados e sua organização

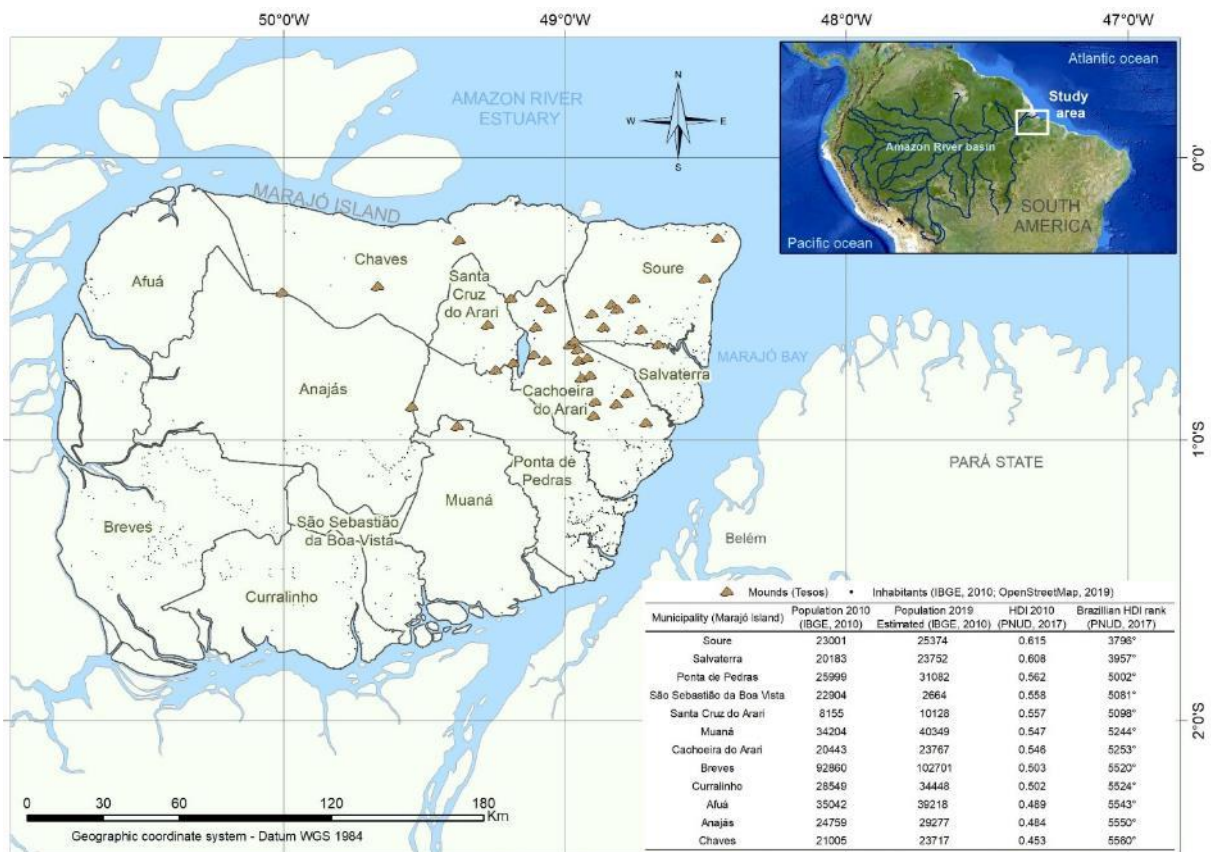
Os primeiros resultados e discussões foram organizados a partir de novembro de 2019 e ao longo do ano de 2020. Foi realizado o refinamento dos principais geoambientes da Ilha de Marajó, sendo analisadas imagens dos últimos 46 anos por meio da Landsat-1,2,5,7 e 8, Sentinel-2A, Cbers-4, além do modelo digital de elevação lançado no início de 2020 com maiores correções de seus pixels. Paralelamente ao primeiro capítulo de resultados sobre a paisagem marajoara foi percebida a necessidade de maiores discussões sobre alguns de seus geoambientes, como aqueles de natureza salina e os ambientes com couraças ferruginosas. A partir deles foram produzidos trabalhos apresentados em eventos científicos nacionais, e artigos científicos ainda não publicados. Esses trabalhos foram produzidos entre 2020 e 2021. Essa verticalização levou também à necessidade de analisar a vulnerabilidade da paisagem marajoara frente às mudanças climáticas globais, que fazem do estuário do rio Amazonas uma das áreas mais arriscadas sobre as consequências da elevação do nível oceânico global. Os investimentos na elaboração desses estudos foram realizados ao longo dos anos de 2021 a 2022. Deles surgiram mais um manuscrito. A escolha por apresentar os principais manuscritos em língua inglesa se deve a esforços de se obter maiores alcances de leitores científicos, visando uma audiência internacional. O Capítulo 9 de síntese das discussões, bem como o Capítulo 4 sobre o estado da arte da Ilha de Marajó, também representam primeiras aproximações para um produto sobre as mais variadas informações obtidas ao final dessa pesquisa.

3. O ESTADO DA ARTE SOBRE A ILHA DO MARAJÓ

3.1 Localização na bacia hidrográfica amazônica

No extremo norte do território brasileiro, na desembocadura das bacias hidrográficas dos rios Amazonas e Tocantins-Araguaia, nos estados do Pará-Amapá, existe Marajó, que integra um imenso complexo de ilhas que formam o maior arquipélago fluvio-marinho-estuarino do planeta. A posição da Ilha do Marajó está entre os paralelos 0° e 2° Sul e meridianos 51° a 48° Oeste (Figura 2), cujas margens são drenadas pelo rio Amazonas, ao norte, pelos rios Pará e Tocantins, ao sul, e pelo Oceano Atlântico na Baía do Marajó a leste-nordeste.

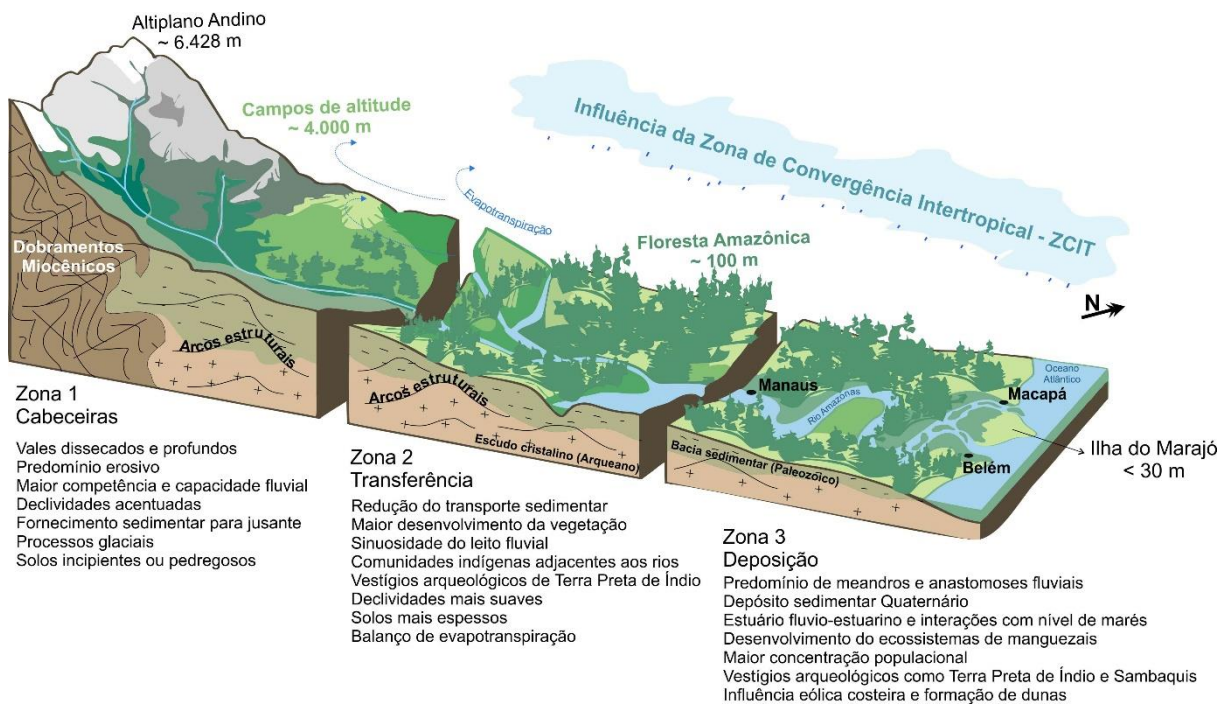
Figura 2: Localização da área de estudo.



Sua grandiosidade e singularidades não passam despercebidas, seja por seus mais de 30.000 km² de área, seja por sua geodiversidade ambiental que permeia desde campos naturais, planícies alagadas até densas florestas ombrófilas de terra firme, além de considerável diversidade pedológica e hidrogeológica (IBGE, 2003; LISBOA, 2012; SCHANN; MARTINS, 2010). A desembocadura da foz do rio Amazonas

representa um reflexo de uma bacia hidrográfica que ocupa cerca de um quarto do continente sul-americano e compreende seis países, tais como Venezuela, Colômbia, Equador, Peru, Bolívia e Brasil (SOARES JR et al., 2012). De nascimento na Cordilheira dos Andes, sul do Peru, a 5.515m de altitude, suas águas drenam por cerca de 6.900 km até sua foz no complexo sistema estuarino fluvio-marinho do arquipélago do Marajó, no Oceano Atlântico (SOARES JR et al., 2012) (Figura 3).

Figura 3: Representação esquemática das principais zonalidades da Bacia Hidrográfica Amazônica, em seu domínio de cabeceiras até sua foz no Oceano Atlântico



Fonte: Elaborado pela autora, baseado na figura de Trista L. Thornberry-Ehrlich, Colorado State University (NPS, 2019).

A bacia hidrográfica amazônica possui significativa heterogeneidade geoambiental, desde suas cabeceiras até sua foz no oceano Atlântico (FREITAS et al., 2001; MARTHA JÚNIOR; CONTINI; NAVARRO, 2011; POKHREL; FAN; MIGUEZ-MACHO, 2014). Esse gradiente é afetado pelas condições climáticas, que envolvem desde dinâmicas glaciais no alto da cordilheira Andina até elevada precipitação e temperatura regidas pela Zona de Convergência Intertropical - ZCIT (SOMBROEK, 2000). A região amazônica possui províncias fitogeográficas características, sendo a principal a floresta tropical úmida (floresta ombrófila densa), de grande biomassa e diversidade (BRAGA, 1979; MARTHA JÚNIOR; CONTINI; NAVARRO, 2011). A região ainda conta com a floresta de terra firme, floresta de várzea, floresta de igapó,

manguezais, campos de várzea, campos de terra firme, campinaranas, vegetação serrana e vegetação de restinga (BRAGA, 1979).

3.2 Singularidades geoambientais do Marajó

3.2.1 Heranças da individualização da Plataforma Sul-Americana

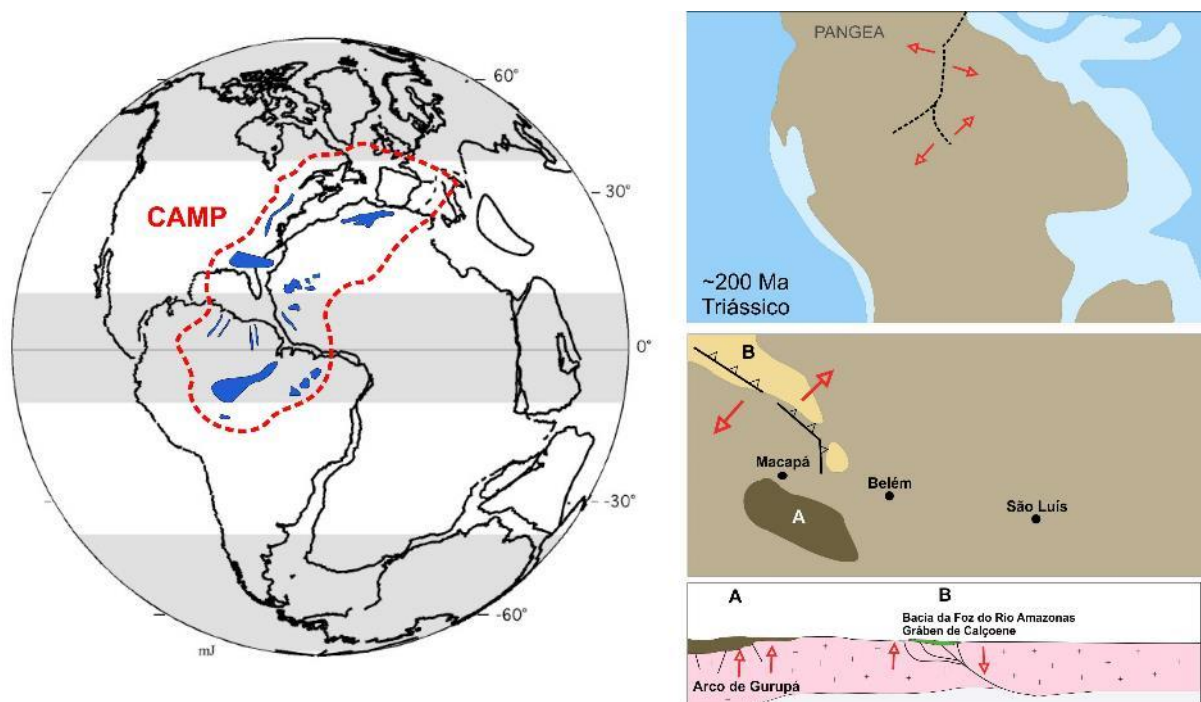
Até que a Baía do Marajó se arquitetasse como o arquipélago que hoje conhecemos, houve uma longa história de cerca de 200 milhões de anos intimamente relacionada à ruptura da *Pangea*, seguida de sua deriva continental entre as placas Sul-Americana e Africana (SOARES JR.; COSTA; HASUI, 2008; SOARES JR et al., 2011; ZALAN, 2007), consolidação da Margem Equatorial Atlântica no setor norte brasileiro (MOHRIAK, 2003; SOARES JR et al., 2011) e a estruturação da bacia hidrográfica do rio Amazonas (ALBERT; VAL; HOORN, 2018; BICUDO, 2017; CARVALHO; GOMES; MARTINS NETO, 2011; SOUZA, 2010). A zona costeira brasileira atualmente tem cerca de 9.200 km de extensão, compartimentada entre a Margem Equatorial Atlântica, de orientação W-E, da qual a Ilha de Marajó faz parte, e a Margem Leste do Atlântico Sul, de orientação N-S (MOHRIAK, 2003; SOARES JR et al., 2011). Para a Margem Equatorial Atlântica são apontados de três (SOARES JR et al., 2011) a quatro (ZALÁN, 2012) principais eventos distensivos regionais que culminaram para quilométricas sucessões sedimentares associadas.

Como primeira fase, segundo Soares Jr. et al. (2011), ocorreram mudanças na dinâmica interna de circulação magmática durante o Triássico-Mesozóico há cerca de 200Ma (NOMADE et al., 2007), cujo evento foi denominado *Central Atlantic Magmatic Province* - CAMP (Figura 4). Essas anomalias ígneas se estenderam por mais de 5.000 km resultando em uma série de esforços magmáticos de ascensão que resultaram em diques, sills, derrames basálticos, que ainda hoje são presentes, além da própria ruptura continental e posterior deriva entre as placas Sul-Americana e Africana (KENT; MUTTONI, 2003; NOMADE et al., 2007).

Esse evento magmático (CAMP) foi responsável em causar diversas anomalias termais de soerguimentos da crosta, representadas pelo Arco de Gurupá (SOARES JR et al., 2011), e pela abertura do Oceano Atlântico Central por meio de centros de espalhamento/junções tríplexes a partir do Golfo do México e Mar do Caribe, o que

propagou alças de rifteamento em direção à América do Sul formando o Gráben do Tacutu (ZALÁN, 2012) e o Gráben de Calçoene na Bacia da Foz do Amazonas, no estado do Amapá (SOARES JR et al., 2011). A Formação Calçoene corresponde, nesse momento, a mega sequências clásticas (SOUZA, 2010). A *Pangea* é então fragmentada e individualizada em Laurásia, ao norte do Oceano Atlântico Central, e na Gondwana, ao sul, na qual África e América do Sul ainda estão conectadas (SOARES JR et al., 2011).

Figura 4: Representação esquemática da extensão da província magmática (CAMP), há cerca de 200Ma, e registros ígneos nos continentes. Momento da formação da Margem Equatorial Atlântica.

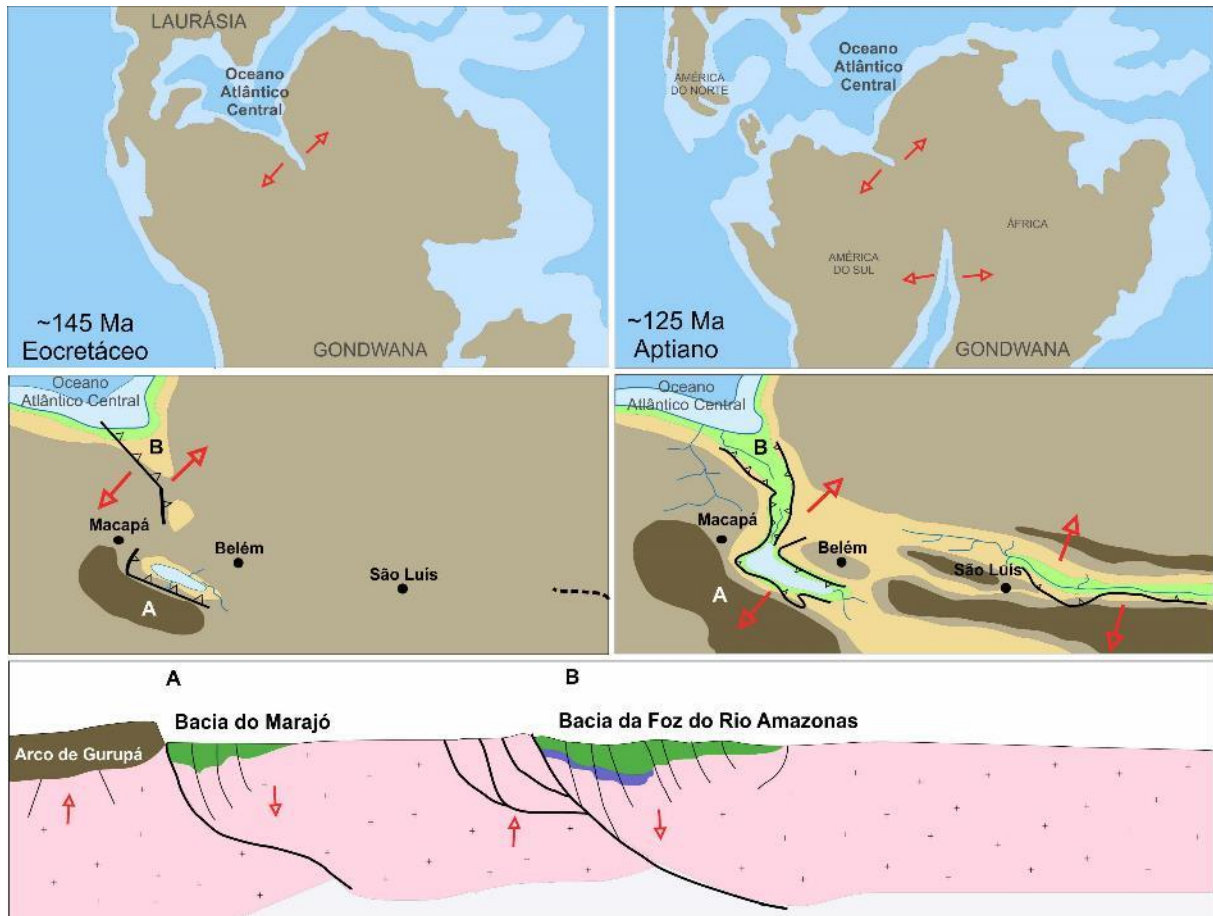


Fonte: Adaptado de Kent e Muttoni (2003) e Nomade et al. (2007).

Como segundo evento (SOARES JR.; COSTA; HASUI, 2008; SOARES JR; HASUI; BEMERGUY, 2012), o prosseguimento distensivo durante o Cretáceo Inferior (Valanginiano, ca. 139Ma) resultou na expansão do Gráben de Calçoene e gênese de outros grábens mais adentro da Plataforma Sul-Americana (Figura 5), sendo um correspondente à Bacia de Marajó, em regime distensivo de baixa intensidade (CAPUTO; SOARES, 2016; COSTA et al., 2002), bem como o Gráben de Grajaú, no Maranhão, e o sistema de grábens de Gurupi. Nesse momento houve a ruptura e individualização do Arco de Gurupá mediante sistemas de falhas que serviram como anteparo e fornecimento sedimentar para o Gráben de Marajó (CAPUTO; SOARES,

2016; SOARES JR.; COSTA; HASUI, 2008). Esse gráben está estruturado por um sistema de falhas de direção NW-SE e NNW-SSE, que influenciam até os dias atuais movimentações neotectônicas, principalmente, de subsidência (ROSSETTI; VALERIANO; THALES, 2007; SAADI, 1993; SUGUIO, 2010; TATUMI et al., 2008).

Figura 5: Movimentos distensivos entre as placas Sul-Americana e Africana, formação do Gráben de Marajó associado ao soerguimento do Arco de Gurupá.



Fonte: Baseado em Soares et al. (2008); Soares et al. (2012).

A partir do Albiano (ca. 113Ma), no Cretáceo Inferior, as atividades tectônicas foram relativamente reduzidas no Gráben do Marajó, cujos esforços distensivos foram deslocados a norte-nordeste equivalente ao atual limite da plataforma continental e seu talude. Nesse período foram desenvolvidos grábens bastante profundos e estreitos que formaram a Bacia da Foz do Amazonas, além de conectar os oceanos Atlântico Equatorial e Atlântico Central. Esse pulso de rifteamento na região, associado a uma condição de semiaridez, imprimiu forte dissecação provenientes de soerguimentos crustais adjacentes, o qual foram depositados até 6km de sequências

sedimentares na bacia da foz do rio Amazonas em um intervalo de no máximo 10Ma (SOARES JR et al., 2011).

Em seguida, pelo Cretáceo Superior (ca. 88Ma), a Bacia do Marajó esteve em baixa taxa de subsidência e distensão, apresentando fases de deposição que envolveram grandes lagos rasos ou curtas transgressões marinhas (Formação Anajás). Os movimentos de extensão no *rift* do Gráben do Marajó foram, portanto, cessadas, cujos esforços foram transferidos preferencialmente para a Bacia da Foz do Amazonas, Pará-Maranhão e Barreirinhas, que culminaram para a fase *drift* de ampliação do oceano Atlântico na região. Com o avançar da deriva continental, deram-se início a movimentações de falhas transcorrentes de direção NE-SW ao longo de toda a margem continental formada (BICUDO, 2017; SOARES JR.; COSTA; HASUI, 2008; SOARES JR; HASUI; BEMERGUY, 2012; SOUZA, 2010).

3.2.2 Reativações tectônicas e atual foz do rio Amazonas

A partir do Cenozoico, ao longo de uma história de 65Ma, ocorreram importantes interações da placa Sul-Americana com a de Nazca, a oeste, que resultaram em diversos desdobramentos tectônicos tanto na porção oeste, mediante a consolidação de um orógeno colisional, quanto no contexto intraplaca, além de variabilidades climáticas e eustáticas que afetaram diretamente no arranjo da atual bacia hidrográfica amazônica e a gênese de um arquipélago em sua foz, do qual está inserida a Ilha de Marajó (ANDERSON et al., 2016; BICUDO, 2017; CAPUTO; SOARES, 2016; COSTA, 1991; HOORN et al., 2010; SAADI, 1993; SOARES JR et al., 2011).

Na passagem Cretáceo-Paleógeno (ca. 66Ma), os arcos de Gurupá e Tocantins passaram por movimentos subsidentes, nos quais, para o Arco de Gurupá, foram geradas falhas normais NW-SE, falhas lístricas e reativações de transcorrências na sinéclise paleozoica da Bacia do Amazonas (SOARES JR et al., 2011). Para o Arco de Tocantins, por sua vez, houve subsidência que favoreceu a formação do Mar Ipixuna, isolando a Plataforma da Ilha de Santana e o Marajó Setentrional, ao norte (SOARES JR et al., 2011). A partir do Campaniano (ca. 72Ma), a Bacia da Foz do Amazonas ainda formou uma espessa plataforma carbonática proximal (Formação Amapá) (SOUZA, 2010).

Sob a perspectiva geotectônica, durante o *drift* continental e a abertura do Oceano Atlântico, as placas de Nazca e Sul-Americana, a oeste, estiveram em franco movimento de convergência desde o Cretáceo (ca. 100Ma), sendo durante o intervalo Paleoceno-Oligoceno (entre 65-30Ma) quando iniciaram, de sul para norte, as deformações colisionais pela subducção de Nazca por debaixo da Sul-Americana, sendo essa alçada e deformada (BICUDO, 2017; HOORN et al., 2010; HORTON, 2018; RODDAZ et al., 2010; SOARES JR et al., 2011). Os soerguimentos andinos ocorreram de maneira diacrônica e em diferentes tempos, principalmente durante o Mioceno (ANDERSON et al., 2016). No Altiplano boliviano há evidências do início das deformações por volta de 40Ma e atenuado em torno de 10Ma (FIORELLA et al., 2015; LEIER et al., 2013), sendo o sul da Colômbia ter atingido cotas de até 3.000m e a Venezuela 4.000m (ANDERSON et al., 2016; BERMÚDEZ et al., 2017).

Essa muralha edificada na borda oeste da Plataforma Sul-Americana, principalmente no Mioceno, foi responsável em mudar padrões atmosféricos e fitogeográficos na América do Sul (HOORN et al., 2010), configurar novos arranjos hidrográficos, fluxos sedimentares (ALBERT; VAL; HOORN, 2018; HOORN et al., 2010; RODDAZ et al., 2010), além do processo regional de colisão ter contribuído para a reativação e criação de novas estruturas no domínio interior da placa Sul-Americana, inclusive na região do Marajó (ROSSETTI; VALERIANO; THALES, 2007; SAADI, 1993).

Foram dois principais eventos tectônicos andinos que mais contribuíram para a organização dessa bacia hidrográfica, denominados como Incaico, no Eoceno (48-34Ma), e o Quéchua, a partir do Oligoceno, que se desdobrou em três momentos, Quéchua I (17-15Ma), Quéchua II (9-8Ma) e Quéchua III (7-5Ma) (ALBERT; VAL; HOORN, 2018; BERMÚDEZ et al., 2017; GREGORY-WODZICKI, 2000; HORTON, 2018; PFIFFNER; GONZALEZ, 2013; STRECKER et al., 2007). Um importante desdobramento foi a estruturação regional da bacia hidrográfica do rio Amazonas e a tendência à subsidência de sua atual foz e, por conseguinte, a formação da Ilha de Marajó. A orogênese Andina na borda oeste provocou, em linhas gerais, a criação de extensas bacias de antepaís (*foreland*), responsáveis por criar um extenso represamento hídrico, sendo posteriormente drenado em direção leste, rumo ao Oceano Atlântico (Figura 6)

Há pouco consenso sobre quando o rio Amazonas tenha se tornado transcontinental e influenciando diretamente o que ocorre na região do Marajó. Albert et al. (2018) realizaram um compilado sobre as principais idades atribuídas para a formação do rio Amazonas tal como é observado nos dias de hoje, que indicam idades desde 12,6Ma, no Mioceno Superior, até 19 mil anos atribuído ao final do Pleistoceno. A maior parte dos autores aponta o intervalo entre 12-8Ma (Mioceno Superior). Para Albert et al. (2018) o rio Amazonas foi estabelecido entre o Mioceno Tardio (ca. 10Ma) e o Plioceno (ca. 5Ma). A cronologia dos sedimentos andinos encontrados no cone fluvial do rio Amazonas, na bacia da foz do Amazonas, corrobora para um início de sedimentação entre 10-9Ma seguido de forte acreção entre 5-4Ma, nos quais esses pulsos na carga sedimentar podem ser explicados por progressivas grandes capturas fluviais e respectivas reversões das águas que drenavam para norte e se voltaram para a direção leste rumo à atual foz.

Figura 6: Arranjos da bacia hidrográfica do Rio Amazonas e interações entre as placas Sul-Americana e de Nazca, a oeste, responsáveis por edificar a cordilheira dos Andes e influenciar a dinâmica hidrológica na América do Sul.



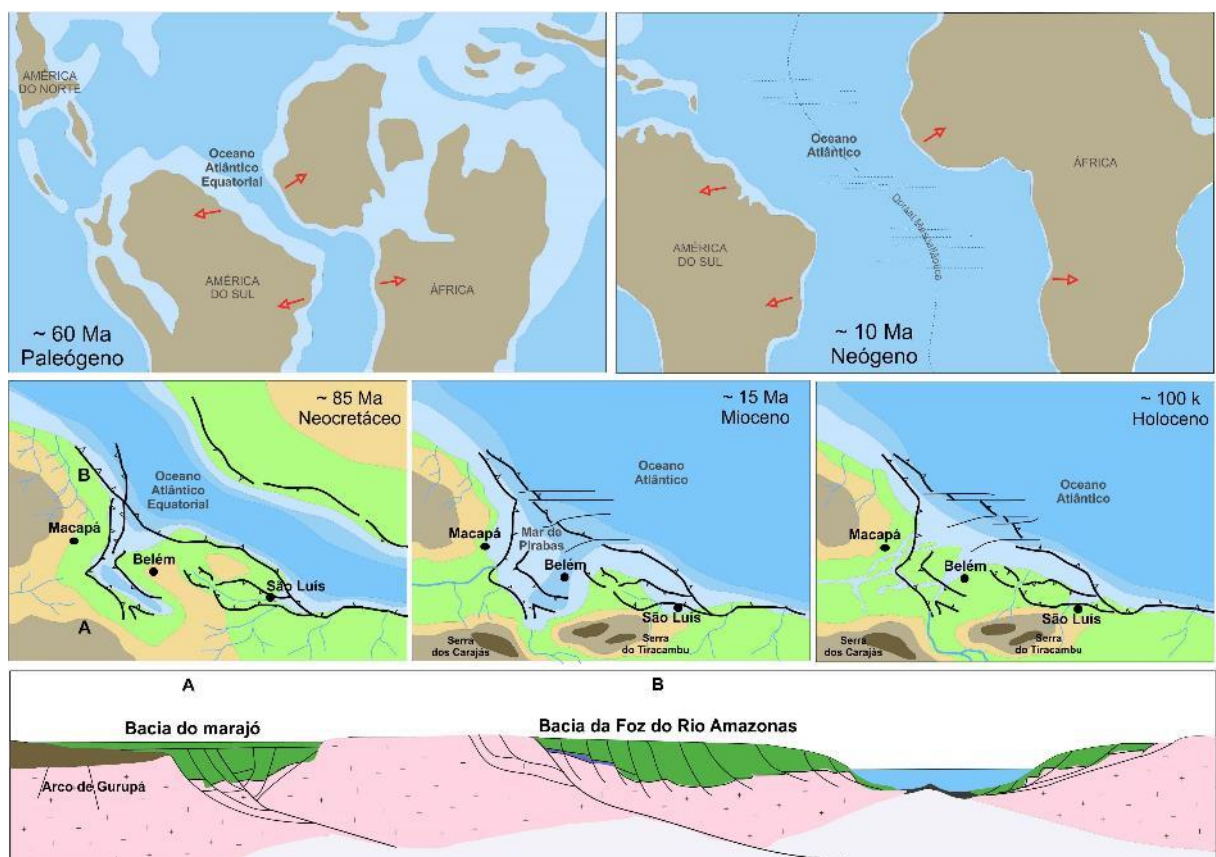
Fonte: Adaptado de Soares Jr et al. (2012).

O Mioceno-Plioceno também foi um importante período de registros sedimentares atualmente presentes na margem costeira brasileira, associado à continuação da deriva continental (SOARES JR et al., 2011). O nordeste do Pará e a parte do Maranhão apresentam sucessões sedimentares da sequência Pirabas-Barreiras, de

fácies carbonáticas a siliciclásticas (ROSSETTI, 2006; SOARES JR.; COSTA; HASUI, 2008; SOARES JR et al., 2011; ZALÁN, 2012). Esses registros sedimentares correspondem a influências provenientes de pulsos tectônicos andinos, que refletem em uma tectônica insurgente nas estruturas gráben do marajó, além de influenciar no arranjo da atual configuração da bacia hidrográfica amazônica e nas flutuações marinhas e climáticas (ARAI, 2006; ROSSETTI, 2006; ROSSETTI; BEZERRA; DOMINGUEZ, 2013; ZALAN, 2007).

As sequências carbonáticas do sistema Pirabas/Barreiras Inferior (Figura 7) representam o período que vai do Oligoceno superior ao Mioceno tardio (ca. 28Ma). Enquanto as sequências em que predominam os siliciclásticos do Grupo Barreiras Superior são do intervalo entre o Meso e Neomioceno (ca. 10Ma).

Figura 7: Arranjo estrutural dos sistemas de gráben durante os eventos que formaram a Margem Equatorial Atlântica e seus Arcos adjacentes.



Fonte: Baseado em Zálan (2004); Soares Jr. et al. (2012); Bicudo (2017).

O Mar de Pirabas foi uma das principais incursões marinhas, de cerca de 150 km a partir da atual linha costeira no Mioceno, cujo Arco de Gurupá funcionou enquanto

anteparo e área fonte sedimentar (Figura 8). Grandes proto-sistemas fluviais dos rios Amazonas e Tocantins interagiram com o Mar de Pirabas, sendo fornecidos sedimentos em uma extensa plataforma de mar raso e aberto. Foi durante esse período Mioceno-plioceno que também ocorreu uma captura fluvial no baixo curso dos rios Tocantins e Araguaia, resultando em sua atual feição angular denominada “Bico de Papagaio”, o que também altera o regime sedimentar na baía e sua dinâmica com as variações eustáticas marinhas (ARAI, 2006; ROSSETTI, 2006; SOARES JR et al., 2011; SOARES JR; HASUI; BEMERGUY, 2012).

3.2.4 Os últimos 30 mil anos sedimentares da Ilha do Marajó

Dentre os vários estratos sedimentares que preenchem a foz do rio Amazonas, em termos pedogeomorfológicos é de se esperar que as sequências superiores são aquelas que mais interagem com processos biogeoquímicos de transformações na superfície (RUBIRA et al., 2019; SCHAETZL; ANDERSON, 2005). Os denominados sedimentos Pós-Barreiras (Figura 8) são relativamente menos investigados quando comparados aos seus estratos subjacentes miocênicos das sequências Pirabas-Barreiras, em vista por serem comumente tratados como manto de alteração do Grupo Barreiras (ROSSETTI et al., 2013). Foram reconhecidos que há distintos depósitos arenosos finos a médios sobre o Grupo Barreiras, associados principalmente a eventos deposicionais derivados de processos eólicos e fluxos de detritos, além de reentrâncias marinhas costeiras (ROSSETTI et al., 2013; TATUMI et al., 2008).

Figura 8: Sequências sedimentares associadas ao Grupo Barreiras e pós-Barreiras comumente encontrada no setor costeiro da região Norte.

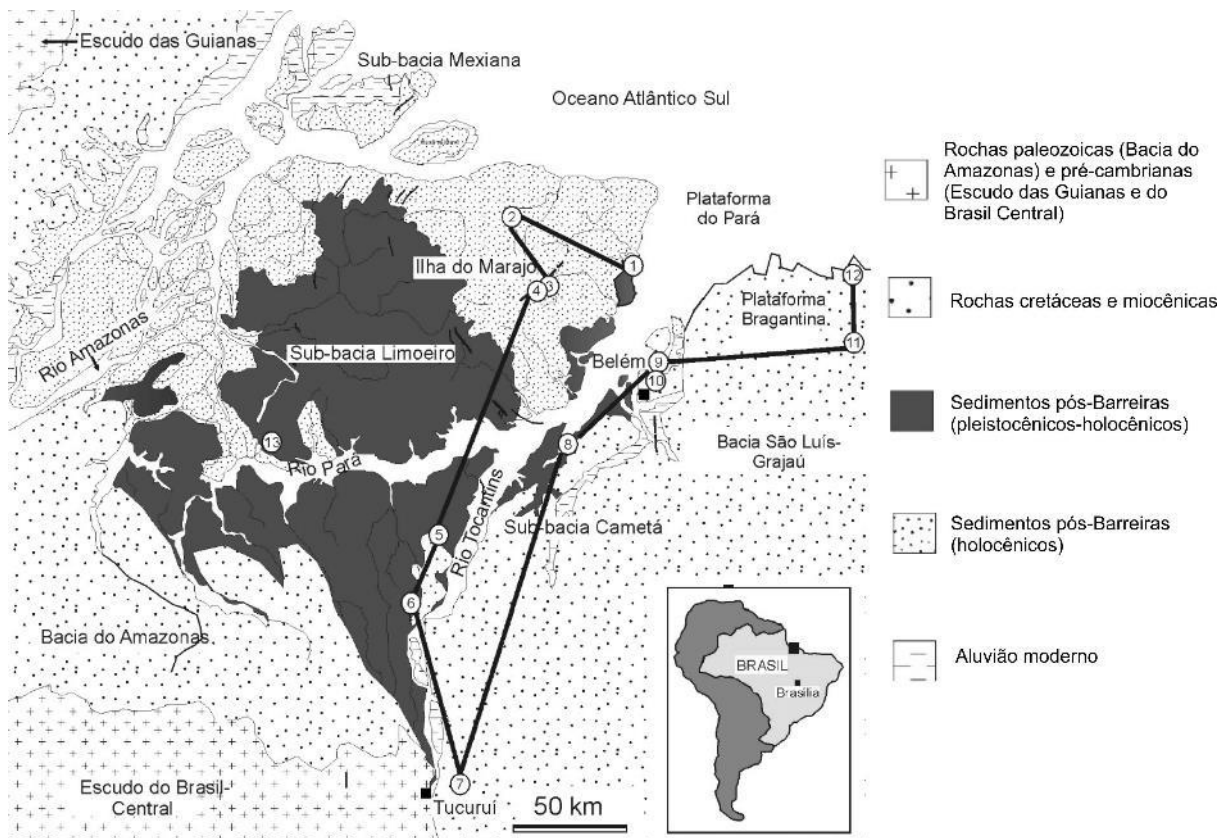


Fonte: Rossetti et al. (2013)

Os sedimentos Pós-Barreiras ocorrem por quase todo o setor oeste da Ilha de Marajó após a foz do sistema hidrográfico Tocantins-Araguaia, nos quais recobrem as

sequências estratigráficas Pirabas-Barreiras e possuem como anteparo estrutural principalmente o Arco de Gurupá (Figura 9). A distribuição espacial desses sedimentos sugerem forte influência tectônica associada à dinâmica do sistema hidrográfico, visto sua dispersão de forma generalizada em direção ao oceano Atlântico, associado a retrabalhamentos e recobrimentos holocênicos posteriores. As sequências mais recentes do Holoceno refletem principalmente variações climáticas e eustáticas locais capaz de alterar a fisiografia das bordas da Ilha de Marajó, bem como seu interior inundável sob influência da carga sedimentar do rio Amazonas (COHEN; BEHLING; LARA, 2005).

Figura 9: Distribuição espacial dos sedimentos pós-Barreiras na foz do rio Amazonas e associações a depósitos holocênicos no setor oriental da Ilha de Marajó.

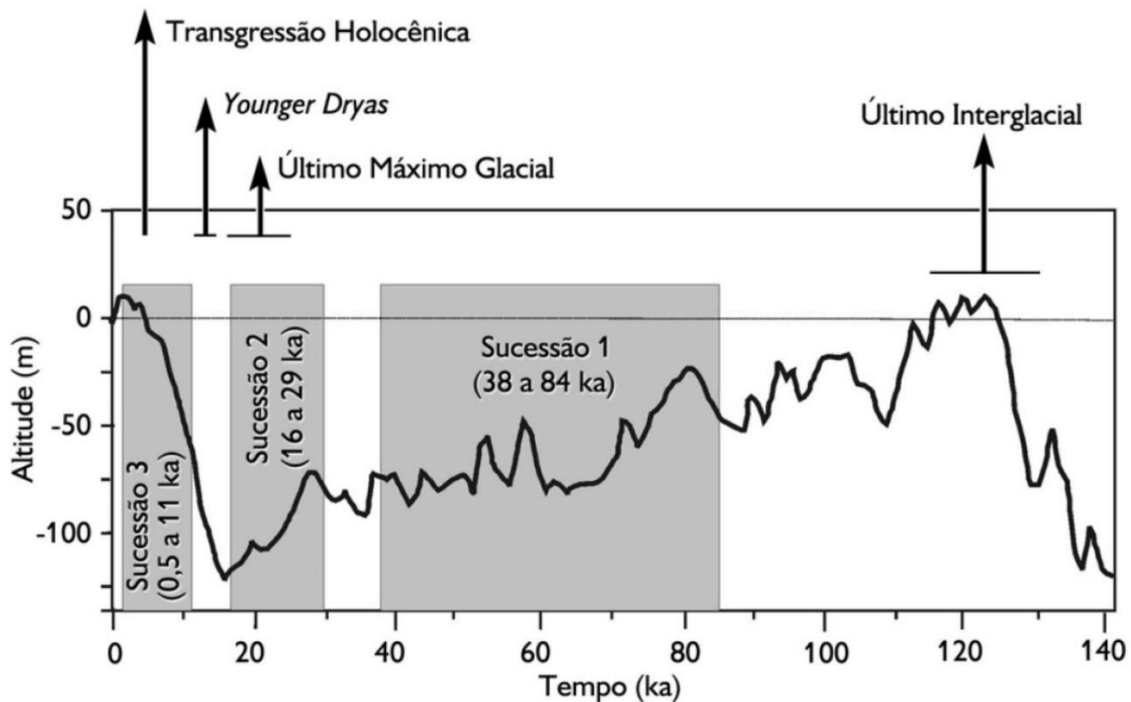


Fonte: Adaptado de Tatumi et al. (2008).

Nos últimos 1000 anos há registro de pelo menos dois períodos de um nível oceânico mais baixo associado, talvez, a condições também menos úmidas derivadas da Pequena Era do Gelo ocorrida entre os séculos XIV a XIX (BEHLING; COHEN; LARA, 2004). Atualmente há evidências manguezais que adentram no continente na região

de Bragança, Pará, o que pode ser indicador de tendências de elevações do nível marinho nas últimas décadas (COHEN; BEHLING; LARA, 2005). De forma geral, para as regiões Norte e Nordeste são reconhecidos pelo menos três episódios de sedimentação entre o final do Pleistoceno e o Holoceno (Figura 10). Conforme Rossetti et al. (2013), a porção basal da sucessão 1 representaria um momento de elevação do nível marinho, ainda que a tendência geral fosse o de rebaixamento derivado do Último Interglacial (ca. 120 ka), com rebaixamento máximo após o Último Máximo Glacial (ca. 20 ka). As sequências da unidade 2 correspondem, portanto, a maiores influências de retrabalhamento eólico associados ao rebaixamento do nível do mar.

Figura 10: Sequências deposicionais do pós-Barreiras em relação às variações oceânicas dos último 140 mil anos na região da Ilha de Marajó.



Fonte: Rossetti et al. 2013

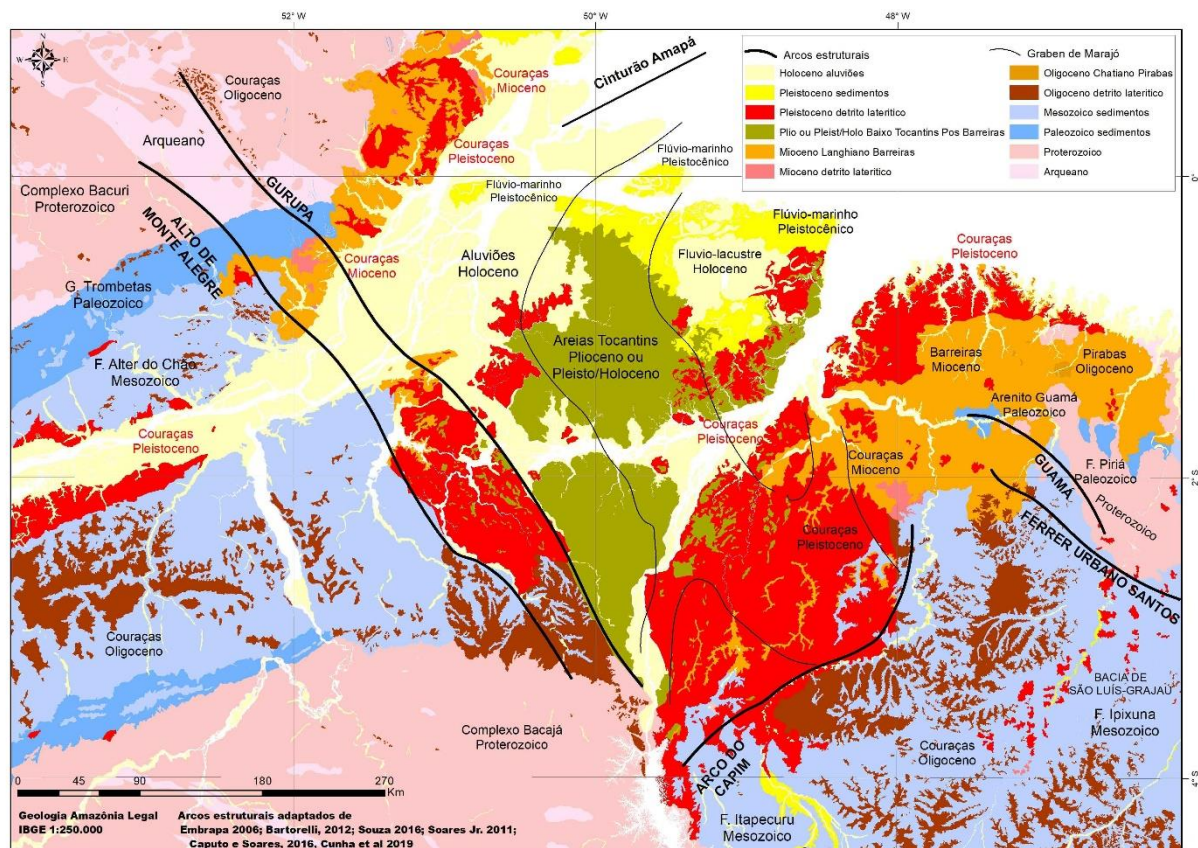
A sucessão 3, por sua vez, também mostra sinais de influências de deposição em dunas eólicas, sem influência marinha, e preenchimentos de depressões e reentrâncias do Grupo Barreiras que ainda afloravam em superfície (ROSSETTI; ROCCA; TATUMI, 2013). Os resultados dessas deposições marcam, portanto, descontinuidades sedimentares entre os sedimentos do Grupo Barreiras, esses por vezes bastante alterado em âmbito geoquímico desde meados do Mioceno, enquanto

os sedimentos denominados pós-Barreiras tendem a assumir aspectos relativamente mais homogêneos e amarelados na superfície (Figura 9).

3.2.3 Couraças ferruginosas e dinâmicas paleoclimáticas

O ferro é um elemento comum presentes nos solos e bastante sensíveis às condições ambientais de alternâncias de regimes hidrológicos, sendo capaz de formar espessos horizontes concrecionados. O processo geralmente envolve a dessilicificação do material originário, associado a condições redox. O ferro passa íon para sua forma reduzida Fe^{2+} tornando-se solúvel e movimentando-se via solução no sistema. Parte do ferro é perdido via lixiviação, sendo parte reprecipitado sob a forma de óxidos a partir das condições que passam de redutoras para oxidantes (OLIVEIRA et al., 2001).

Figura 11: Organização sedimentar da foz do rio Amazonas e coberturas detrito lateríticas associadas, de diferentes temporalidades.



Fonte: Baseado em Embrapa (2006), Bartorelli (2012), Soares Jr. et al. (2011), Caputo e Soares (2016) e Cunha et al. (2019).

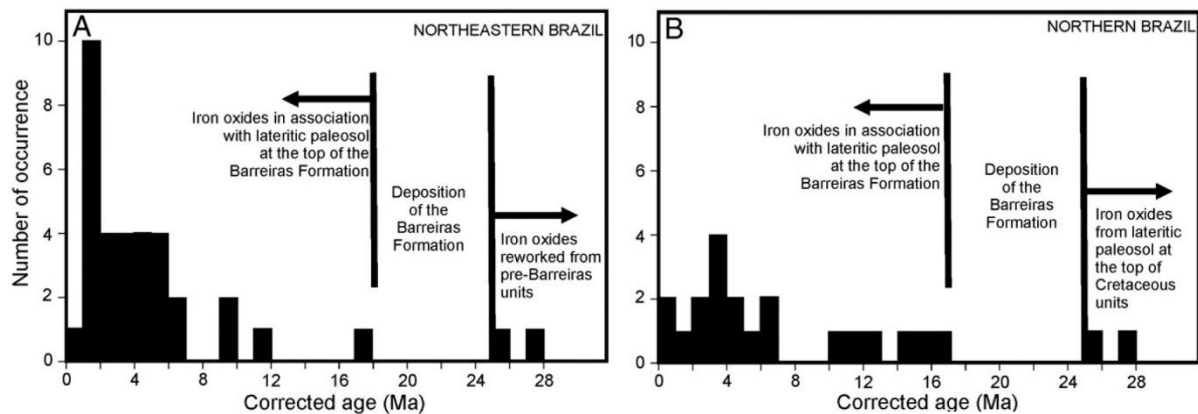
As couraças no domínio amazônico são ricas em Fe e Al e classificados em dois grandes grupos, com base em suas características geoquímicas, mineralógicas e

geoquímicas e seu grau de evolução, sendo elas os lateritos imaturos e maduros autóctones ou alóctones (COSTA, 1991). As couraças mais antigas (lateritos maduros) são mais restritas, de relevo mais movimentado, com maior complexidade mineralógica, geoquímicas, mineralizações e de texturas associadas, o que denota processos policíclicos e epigenéticos em sua formação (COSTA, 1991; KOTSCHOUBEY; TRUCKENBRODT, 1981). As couraças mais recentes (lateritos imaturos), por sua vez, estão distribuídos amplamente e de aspectos menos heterogêneos em relação ao mais antigos (COSTA, 1991).

Milhões de anos significam uma longa temporalidade de processos policíclicos de transformações na paisagem, que imprimem particularidades na superfície terrestre (SCHAEFER et al., 2015). O intervalo Oligo-Mioceno foi um momento no planeta marcado por consideráveis eventos transgressivos-regressivos oceânicos, além de variabilidades nas condições climáticas devido à migração de crosta continental em direção ao polo Sul (ROSSETTI; BEZERRA; DOMINGUEZ, 2013; ZACHOS et al., 2001). Nos depósitos do Grupo Barreiras é notável haver inconformidades marcadas por couraças ferruginosas. Conforme Costa (1991), as couraças mais antigas no domínio amazônico têm seu estabelecimento em meados do Eoceno-Oligoceno, senso retrabalhados durante o Mioceno e Pleistoceno, ao passo que as mais jovens formadas a partir do Pleistoceno no Quaternário (Figura 11).

Datações de goethita pelo método (U\Th) He indicaram um intervalo de 0,97 até 28Ma (Figura 12), sendo notável três principais períodos. O mais antigo se refere às denominadas lateritas maduras ou bauxíticas, sendo presentes principalmente em solos desenvolvidos a partir de rochas anteriores às deposições do sistema Pirabas-Barreiras, no Cretáceo. Há ainda cerca concentração de idades por volta de 12 a 16Ma associado às sequências do Grupo Barreiras, bem como idades mais recentes de até 5Ma desenvolvidas tanto sobre os sedimentos do Grupo Barreiras quanto do pós-Barreiras (ROSSETTI; BEZERRA; DOMINGUEZ, 2013).

Figura 12:Couraças ferruginosas datadas pelo método (UTh) He



Fonte: Adaptado de Rossetti et al. (2013)

Há evidências de que tanto as couraças mais antigas como as quaternárias atualmente passam por fortes efeitos de intemperismo químico decorrente das condições de clima tropical. Um produto comum é um latossolo, que é tratado equivalente à Argila de Belterra, no qual localmente há vestígios da rocha-mãe laterítica (COSTA, 1991). Esses solos desenvolvidos comumente são argilosos ou argilo-arenosos avermelhados a amarelados posicionados sobre horizontes saprolíticos ou crostas encouaçadas ferruginosas ou aluminosas (HORBE; COSTA, 1999).

3.3 Heranças indígenas e a consolidação do território brasileiro

3.3.1 Arqueologia da Ilha de Marajó

A Ilha de Marajó tem diversos registros arqueológicos de ocupações humanas pré-Colombianas, que representam diversos momentos de civilizações primitivas (LISBOA, 2012; LOPES, 1999; MEGGERS, 1992; MEGGERS; DANON, 1988a; MEGGERS; EVANS, 1957; SCHAAN, 2007; SCHANN; MARTINS, 2010). As principais fases indígenas na região são denominadas Ananatuba (1.100 a.C. - 200 d.C.); Mangueiras (1.000 a.C. - 100 d.C.); Formiga (100 a.C. - 400 d.C.); Marajoara (400 d.C. - 1.350 d.C.) e Aruã até os séculos XIV e XVIII (MEGGER; EVANS, 1957). Quando colonizadores tiveram contato com a Ilha se depararam com índios da fase Aruã, sem qualquer menção à cultura ceramista (Figura 14), sendo os primeiros tesos e suas cerâmicas registrados por volta de 1870 (LISBOA, 2012). A cerâmica corresponde principalmente a fase Marajoara, que perdurou em torno de 1.000 anos,

sendo estimadas populações de 100.000 a 200.000, ou até 1 milhão de pessoas a depender do subestimado conhecimento ainda sobre os sítios e sua amplitude regional (ROOSEVELT, 1987).

Figura 13: Principais exemplos da tipologia da arte da cerâmica marajoara, destaque para a cobra enquanto animal mítico símbolo dessa cultura indígena.

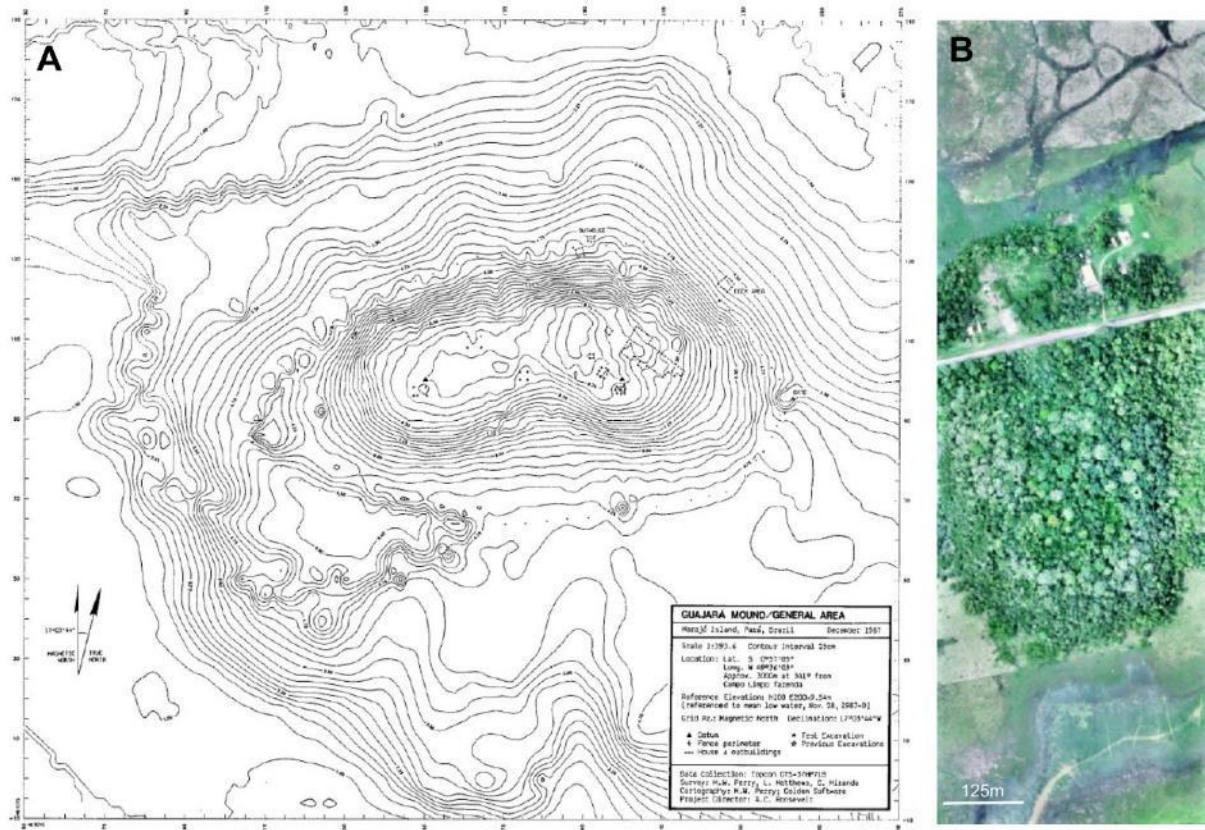


Fonte: Adaptado de Schaan (2007).

As cerâmicas possuem diferenciações na Ilha de Marajó, sendo indicador de diferenças cronológicas entre os sítios, além de certa especificidades sociopolíticas entre distintas áreas geográficas ocupadas naquele período (SCHAAN, 2003). Há relativo consenso que a grafia de simbolismos representada nas artes das cerâmicas possuem conteúdo xamanístico, religiosa e de rituais, cujo contexto funerário e estratos sociais possivelmente eram bem marcados, além de poder representar territórios e fronteiras de comunicação (SCHAAN, 2003). Os *mounds* (Figura 14), também conhecido como têsos (DERBY, 1879; MEGGERS, 1992, 2001; ROSSETTI; GÓES; TOLEDO, 2009), costumam ser elevações relativamente pontuais do terreno, sobretudo no setor dos extensos campos herbáceos da Ilha (MEGERS, 2001). Essas elevações representam tanto formações antrópicas de construção (DERBY, 1879; ROOSEVELT, 1993) quanto estruturas naturais derivadas de antigos cordões

arenosos herdados pelo retrabalhamento fluvial (MEGGER; EVANS, 1957; ROSSETTI; GÓES; TOLEDO, 2009).

Figura 14: Em A *mound* Guajará identificado e mapeado por Roosevelt (1993); em B *mound* identificado em campo em 2018 com presença de Terra Preta de Índio.



Fonte: Em A adaptado de Roosevelt (1993), em B a autora e equipe.

Essas elevações naturais e/ou antrópicas do terreno serviram de suporte às sociedades que ocuparam a região, sobretudo a marajoara, sendo gerenciados os recursos naturais. Havia certo padrão hierárquico nessa sociedade, cujos assentamentos podia variar de populações entre 1000 a 3000 pessoas sob a forma de sociedades regionais ou cacicados, além de diferentes localidades que se destinavam a rituais funerários, centros religiosos, políticos ou de ocupação (SCHAAN, 2003). Os estudos acerca das práticas funerárias sugerem que gênero e idade fossem importantes diferenciações entre os diversos atores sociais desse período, e não status social (SCHAAN, 2003). A divisão de trabalho também é considerada que foi dinâmica em função das variáveis ambientais, sociais e políticas, cujas mulheres podem ter sido as mais responsáveis pela produção da cerâmica. A

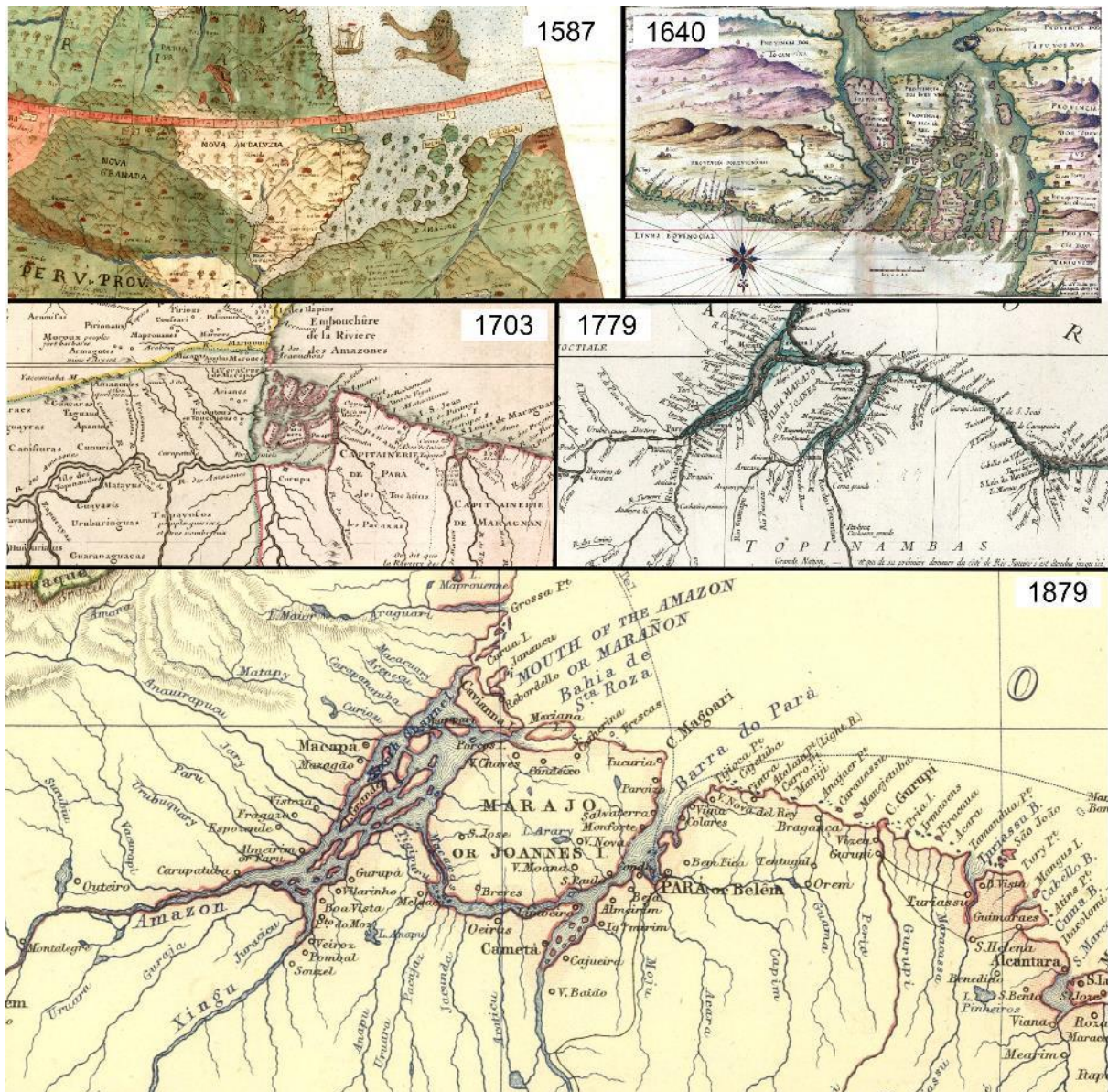
representação da serpente, comum nos artefatos e na sociedades indígenas amazônicas, representa a simbologia da fertilidade, na qual para pode significar principalmente a fartura de peixes, este como principal base econômica da sociedade marajoara (SCHAAN, 2003).

3.3.2 Heranças da colonização portuguesa

A Ilha de Marajó teve diversos nomes durante sua história (LISBOA, 2012). Marajó deriva do nome tupi *Mbarayó*, de significado “anteparo do mar” (TOCANTINS, 1998) e é utilizado desde o período colonial quando portugueses se estabeleceram nas margens do rio Marajó-açu. Ilha Grande de Joannes foi outro nome utilizado por certo tempo e é observado em cartas do século XVIII e XIX (Fig. 16) (LISBOA, 2012). A Ilha de Marajó foi descoberta possivelmente por Vincente Yanez Pinson, em sua viagem pela costa da América do Sul em 1499 (MEGGERS; EVANS, 1957), sendo posteriormente alvo de incursões de franceses, ingleses e holandeses entre 1583 a 1630.

Conflitos pela posse possibilitaram aos portugueses os devidos conhecimentos sobre a ilha e sua definitiva ocupação a partir de 1620, quando pescadores portugueses já dominavam a pesca no Cabo Maguari (Ponta do Amoroso) e no rio Arari, sendo que na década de 1930 já haviam se estabelecido no rio Marajó-Açu (LOPES, 1999; PENNA, 1971). Há registros de 1756 sobre navegações de reconhecimento das terras do Marajó, como a feita por Florentino da Silveira Frade por 22 dias em 1756, descrita por Alexandre Rodrigues Ferreira em 1756, que também percorreu o arquipélago em 1783 (LISBOA, 2012). Cartas elaboradas desde o período das Grandes Navegações no século XV e XVI indicam o conhecimento da foz do rio Amazonas, porém, sem maiores detalhamentos pela carência de expedições com objetivos de ocupação do arquipélago em detrimento do continente (Figura 15).

Figura 15: Cartografia histórica da Ilha do Marajó desde os primeiros registros durante o período das Grandes Navegações no século XV.

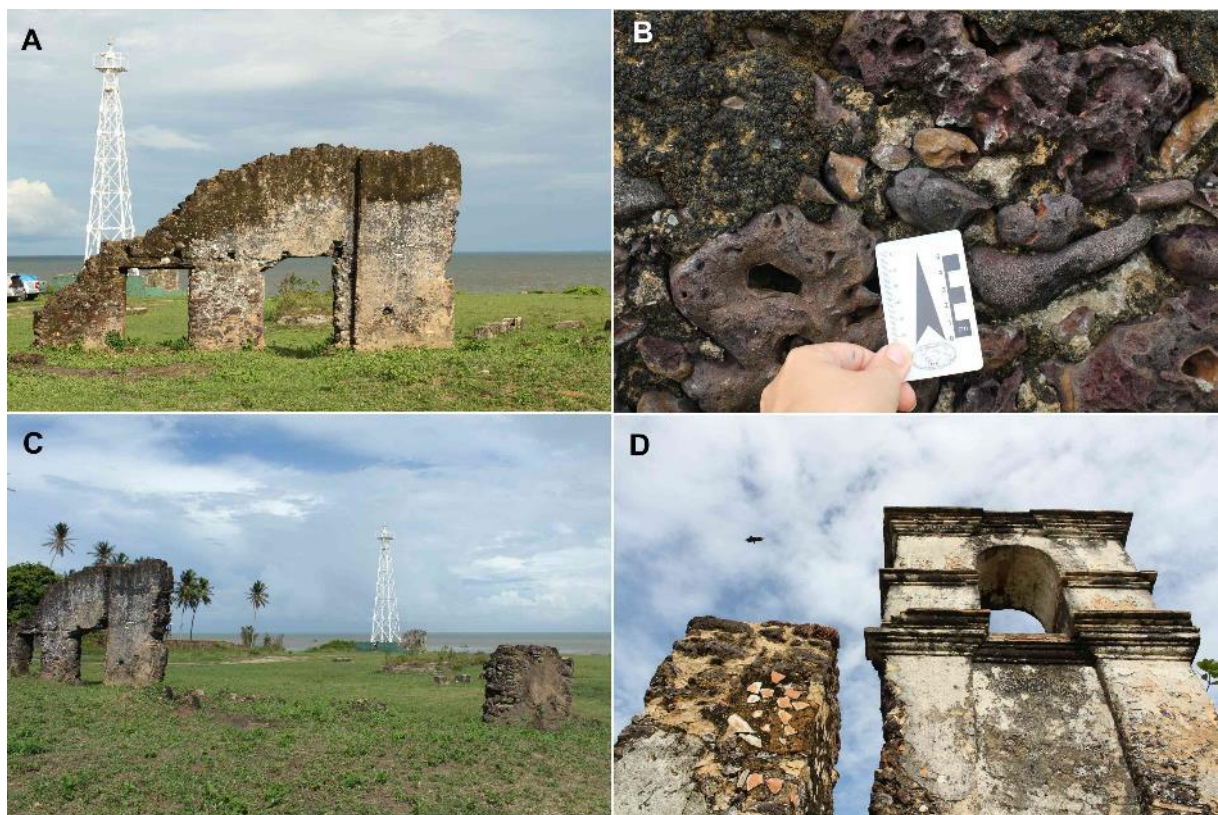


Fonte: Rumsey (2020).

Com o avanço da colonização portuguesa a Ilha foi doada pelo rei de Portugal D. Afonso VI a Antônio de Souza Macedo em 1665, e reincorporada a Portugal em 1754 (Penna, 1971). A Aldeia de Joanes implantada na área leste da Ilha, pertencia ao grupo denominado de Juioanas, provavelmente foi esse grupo que inspirou a denominação inicial de Ilha Grande de Joannes. Esse grupo tinha relação originária com as áreas de campo (FERREIRA, 1974; LOPES, 1999; PENNA, 1971). Pelo risco eminente de guerras entre colonizadores e Aruãs e os habitantes da Costa Norte de Marajó, Caviana e Mexiana, então foi realizada uma aliança entre colonos e os

indígenas de Marajó em 1653, e a proteção acarretou na implantação das missões religiosas no Marajó, dentre elas Joanes, que permaneceu missão religiosa até o ano de 1755, quando ganhou denominação de vila de Monforte, por meio do Diretório (FERREIRA, 1974; LOPES, 1999). O sítio arqueológico denominado Joanes (PA-JO-46) é um dos mais conhecidos na costa leste ilha de Marajó e foi pesquisado inicialmente em 1986 (Figura 16), quando foram coletados vestígios arqueológicos em profundidades que variam entre 1.40cm a 1.80cm.

Figura 16: Vestígios arqueológicos observado em Joanes durante expedição de campo em dezembro de 2018 na Ilha de Marajó.



Fonte: A autora e equipe.

Nesse sítio também foi identificada a existência de Terra Preta de Índio a cerca de 80cm de profundidade seguida por Latossolo Amarelo no topo, sendo ainda percebida a presença de Terra Preta de Índio em profundidades de até 160-180cm em alguns pontos (COSTA NETO, 1986), explicado pelo possível revolvimento histórico do solo (LOPES, 1999). A estratigrafia associada aos vestígios arqueológicos, seus remanescentes de construção e a expansão do núcleo urbano possibilitaram definir quatro momentos distintos da ocupação local, o primeiro relacionado ao assentamento

ameríndio; o segundo e o terceiro a implantação da missão religiosa e a transformação em vila (período colonial, imperial e republicano) e o quarto o atual, com a expansão do núcleo urbano (LOPES, 1999).

Além das estruturas de antigas residências expostas pela superfície do solo, as ruínas da igreja de Nossa Senhora do Rosário e os poços em alvenaria de pedra, foram localizados vestígios arqueológicos variados como: cerâmica indígena, de torno e cabocla, além de louças, porcelana, faianças, metais e ossos de animais. Esses vestígios estão acondicionados na Reserva Técnica de Arqueologia do Museu Paraense Emílio Goeldi. As cerâmicas indígenas relacionam-se ao período pré-colombiano, sendo artefatos de uso cotidiano e em prováveis rituais, e atualmente bastante fragmentados, o que limita suas análises. Muito dos fragmentos foram analisados e algumas vasilhas foram reconstituídas, por meio do desenho de perfil de borda, associada muitas vezes a corpo e base, com o propósito de demonstrar o possível uso como cozinhar, acondicionar, servir e transportar.

As vasilhas foram tigelas abertas, vasos globulares, vasos simples, vasos carenados, pratos e bancos com traços marajoaras (LOPES, 1999). Cerâmica de torno com influência europeia foi produzida possivelmente pelos missionários em uma olaria implantada em Soure ou no rio Arari. As que foram reconstituídas são panelas e vasos para cozinhar e servir (Idem). Cerâmica cabocla, por sua vez, foi confeccionada exclusivamente para uso doméstico, com aproveitamento de técnicas indígenas pelos grupos familiares locais, que não necessariamente são descendentes diretos de indígenas.

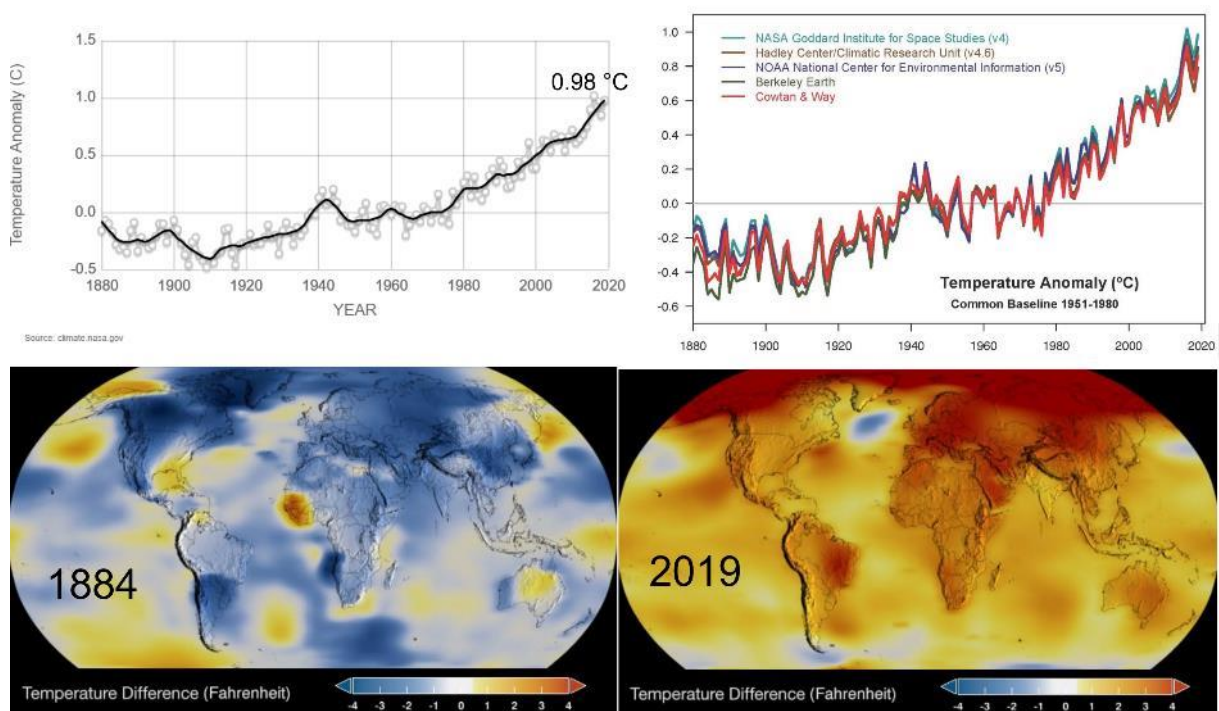
3.4 Mudanças climáticas e a Ilha do Marajó

3.4.1 Projeções globais de temperatura e nível dos oceanos

O século XXI é marcado por certa preocupação sobre as condições climáticas globais e por maiores monitoramentos das condições marinhas e atmosféricas. Os registros mais antigos revelam que em pouco mais de 140 anos houve considerável aumento da temperatura média global associado ao aumento do nível dos oceanos e taxas de emissão de carbono. Desde o início dos registros foi adotado o intervalo entre 1951 a 1980 como linha base de comparação, sendo que houve um incremento de 0.98 C°

até 2020 e até 1.5 C° quando comparado a 1880 (Figura 17). As projeções para 2100 a partir desses dados medidos sugerem tendências de um aquecimento de até 4.1 a 4.8 C°, sem que haja qualquer medida de contenção, e de cerca de 2.8 C° nas condições mais otimistas. A última década foi marcada por sucessões de recordes de temperatura (OPPENHEIMER et al., 2019), especialmente no hemisfério norte, sendo 2016 e 2019 como aqueles anos que mais apresentaram tendências de anomalias positivas na temperatura média global.

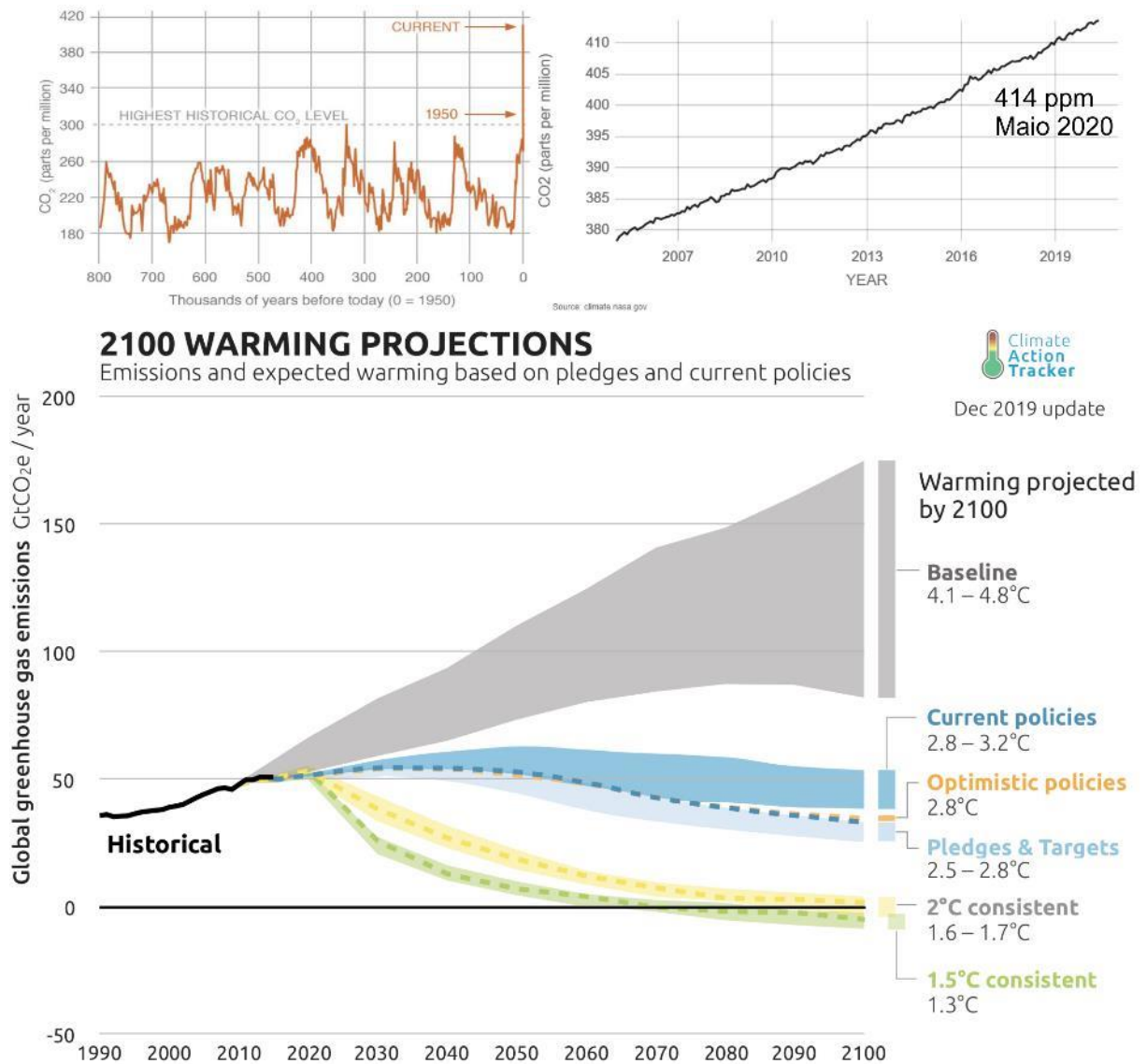
Figura 17: Temperatura média global nos últimos séculos e padrões de tendências de aquecimento.



Fonte: NASA (2020).

Juntamente às mensurações e modelos de cenários futuros sobre a temperatura, também são acompanhados principalmente o nível médio global dos oceanos e a concentração de gás carbônico (CO₂) presente na atmosfera. Os dados para as taxas de concentração de CO₂ indicam que no último milênio havia um padrão de oscilação médio entre 180 a 300ppm, sendo a partir de 1950 houve uma ruptura com tal padrão e um rápido incremento que fez atingir até o patamar de 414ppm em maio de 2020. A concentração desse gás, bem como de outros, são apontados como principais causadores da maior retenção da radiação solar na atmosfera imprimindo o progressivo aquecimento global (MARENGO; SOARES, 2003).

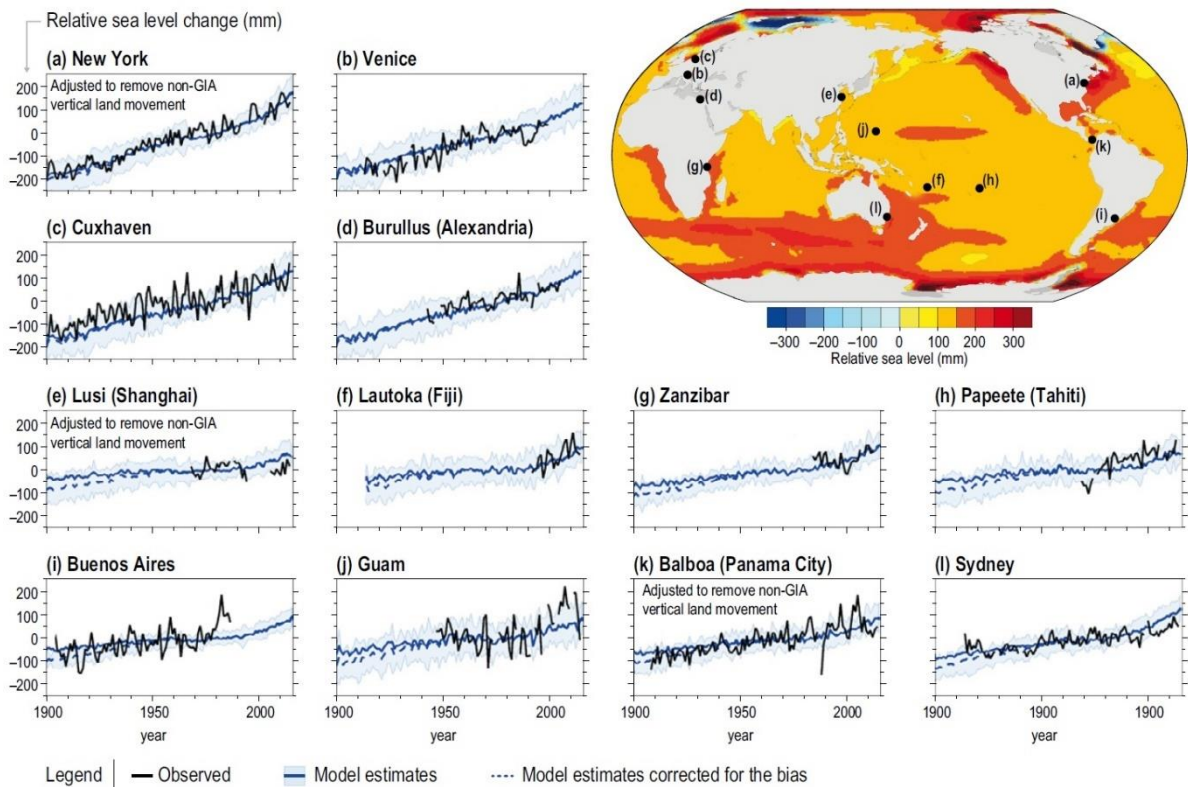
Figura 18: Medições das taxas de dióxidos de carbono nos últimos séculos e projeções de cenários de temperatura.



Fonte: NASA (2020).

Assim como a temperatura, os dados registrados do nível oceânico desde 1880 indicam que foram quase 250mm de elevação em 140 anos, cujos últimos 25 anos houve um acelerado incremento c que resultou em torno de 93mm de elevação até janeiro de 2020 a uma taxa média de 3.3mm anuais (Figura 20). De forma generalizada, estações espalhadas pelos continentes apresentaram valores médios cada vez mais elevados comparando-se a 1900, sendo que somente áreas no hemisfério norte próximas ao Equador tiveram menor incremento (Figura 19), bem como localmente na região da Groelândia que pontualmente houve o decréscimo.

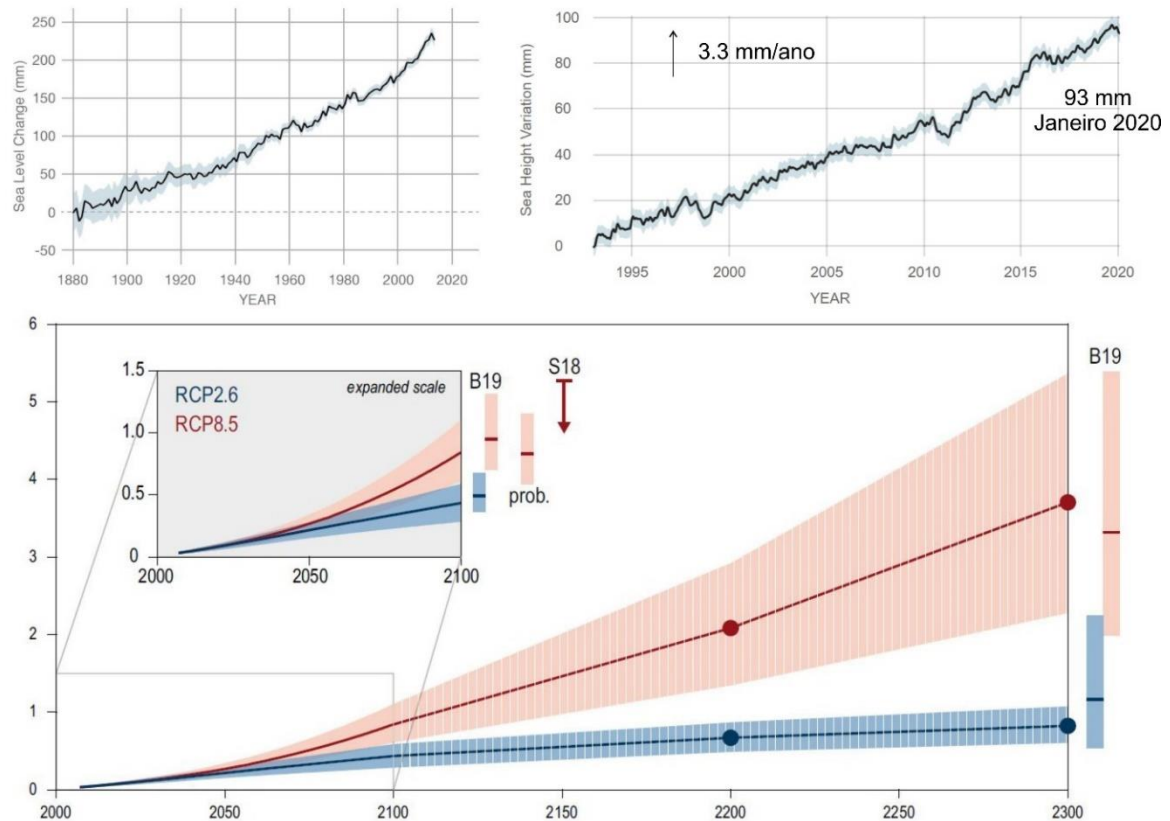
Figura 19: Nível médio global dos oceanos medidos em diferentes cidades costeiras e projeções futuros de comportamento.



Fonte: Adaptado de Oppenheimer et al. (2019).

O oceano não é uma massa de água uniforme e há diversas variantes e fatores ambientais que interferem para os valores médios do nível oceânico, todavia, é notável que houve principalmente a elevação em menor ou maior intensidade. Projeções para 2100 e os séculos seguintes (Figura 20) indicam que o nível médio dos oceanos irá aumentar pelo menos 1m, sendo possível que determinadas localidades atinjam valores ainda mais significativos de até 6m (KOPP et al., 2014). São modelados diversos cenários na literatura, sendo o relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climática (IPCC) como uma das principais referências. A Figura 20 apresenta o cenário mais otimista (RCP2.6) e o mais pessimista (RCP8.5) também para os séculos posteriores a 2100, o que notadamente mostra o potencial cumulativo a médio e longo prazo das mudanças em curso que é possível se medir atualmente. Já houve mudanças significativas nos últimos 10 mil anos, todavia, modelos que sugerem alterações significativas em um intervalo de poucas centenas de anos é relativamente preocupante.

Figura 20: Nível médio global dos oceanos e tendências futuras de elevação.



Fonte: Adaptado de Oppenheimer et al. (2019).

Para além dos dados oficialmente registrados, outros tipos de registros podem corroborar com as constatações de que há importantes mudanças em curso para os próximos anos. A cartografia histórica é um desses elementos e passou por forte reformulação a partir do século XV pelo advento das expedições de além-mar das nações europeias. As navegações demandavam maiores precisões posicionais, o que impulsionou a formulação de mapas cada vez menos oníricos e mais representativos da realidade planetária. Muito de nosso atual sistema de orientação geodésico evoluiu da sistematização e representações espaciais da Terra realizadas há cerca de 500 anos por meio de planos cartesianos e linhas imaginárias, tais como paralelos e meridianos. Observa-se pelas cartas náuticas que o ato de localizar ilhas ou rochedos emersos no caminho dos navegantes era importante por diversas razões, como ponto de parada, referencial posicional, abrigo de tempestades etc.

Na costa brasileira há um alinhamento de extintos vulcões submersos de rochas alcalinas derivados de um *hotspot* entre 72 a 50Ma (THOMAZ-FILHO; RODRIGUES,

1999). As Ilhas da Trindade e Martin Vaz são os principais pontos de elevação acima do nível marinho, cujos demais edifícios vulcânicos estão submersos. Em cartas náuticas encontradas entre 1570 e 1776 há a presença de possíveis outras ilhas para além daquelas atualmente emersas. Isso significa que em pelo menos 206 anos são apontadas cerca de 5 ilhas, sendo elas a Ilha da Ascensão, Ilha da Trindade, Ilha de Martin Vaz, Ilha de Santa Maria e Ilha dos Picos (Figura 21). A Ilha de Santa Maria e Ilha dos Picos, devido à suas posições próximas às Ilhas da Trindade e Martin Vaz, podem indicar atualmente pequenos rochedos que estão emersos. Ao passo que a Ilha da Ascensão, mais próxima ao continente e também acompanhando o alinhamento de ilhas, estaria atualmente completamente submersa.

Figura 21: Cartografia histórica náutica e a presença de Ilhas que nos dias atuais estariam submersas, podendo ser indicador de alterações no nível global oceânico nos dias atuais em relação há 300 anos. Destaque para as Ilhas de Ascensão, Trindade, Martin Vaz, Santa Maria e Picos.



Fonte: Rumsey (2020), Google Earth © (2020).

Ainda que a cartografia do século XV e XVI demandasse maiores rigores posicionais em comparação a hoje, a confiabilidade na indicação de ilhas oceânicas presente nessas cartas é considerável. Comparando outros afloramentos de rocha emersos próximo à região dos Açores, nota-se que atualmente não há qualquer sinal de terra firme emersa. Bem como entre a costa Brasileira e Africana há ainda uma Ilha de São Mateus que atualmente não é aparente, todavia, há lineamentos submersos da dorsal mesoatlântica que pode sugerir que já houve algum tipo de emersão de rochas acima do nível do mar. Assumindo-se que essas antigas cartas náuticas possam fornecer indicadores de um passado, sobretudo, marítimo, o desaparecimento de algumas ilhas ou rochedos pode corroborar com os dados medidos desde meados do século XIX, sobre o nível médio marinho global. Isto é, pode-se formular a hipótese de que os cerca de 250mm de elevação média marinha ocorridos desde 1880 possam ter impactado diretamente as porções de rochedos e terra firme que estavam presentes no tempo das Grandes Navegações. Enquanto possibilidade de investigações futuras, tal hipótese pode revelar um quadro sintomático derivado de condições globais climatológicas, nos quais envolvem, ainda, uma pequena fase de resfriamento (Pequena Era Glacial), que pode ter de algum modo alterado os níveis oceânicos, e posterior aquecimento pós Revolução Industrial em meados de 1850, que segue para o quadro que observados nos dias atuais.

4. GEOAMBIENTES DA ILHA DO MARAJÓ

Nesse capítulo o objetivo é apresentar um panorama acerca dos principais geoambientes identificados na foz do rio Amazonas, com destaque para o Holoceno pós Último Máximo Glacial. Para isso são apresentadas as principais heranças da evolução ambiental associada a influência antrópica desde seu período pré-colonizador até as ocupações portuguesas na região e como afetaram a paisagem. É ainda apresentada as primeiras aproximações acerca das vulnerabilidades da Ilha de Marajó frente às mudanças climáticas, nas quais são melhor abordadas no capítulo 8. Esse capítulo representa o artigo já publicado no periódico *Environmental Earth Sciences*.

4.1 Soils and Landscapes of Marajó Island, Brazilian Amazonia: Holocene evolution, geoarchaeology and climatic vulnerability (Environmental Earth Sciences);
<https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-022-10310-2>

4.1.1 Abstract

Marajó Island is located in the Amazon river mouth, representing the largest and diverse fluvio-marine archipelago worldwide. We investigated soils and geoenvironments of Marajó in close interplay with present and past human occupation, emphasizing the environmental relationships, aiming to subsidize conservation policies and improving people's livelihood. Twenty soil pedons were sampled, described and classified according U.S. Soil Taxonomy. Soil morphological, physical and chemical attributes were analysed, and results pointed to a complex landscape formed by a range of soil-geomorphic process affected by a long-term anthropogenic colonization and signals of Holocene climate and fluvio-estuarine oscillations. Human presence resulted in geoarchaeological sites, show Indian Black Earth (IBE) with high amounts of P⁺, Ca²⁺, K⁺ and Mg²⁺. In the eastern uplands, the IBEs were intensive degraded by colonial human colonization, while the IBEs located in the inner lowlands are comparatively more preserved. Our study suggest the Marajó soils have clear evidences of drier early to mid-Holocene, which shifted to wetter conditions in the late Holocene, corroborated by soil 14C dating, pointing to well-drained soil formation and duricrust degradation at around 4510 years (BP). Also, ancient sandy deposits were

transformed into Spodosols with ages of 3300 years (BP), and currently covered by savanna, in contrast with other Amazonian Spodosols covered by grassy Campinarana. The Marajó mangrove-apicum system presented well-developed saline-sodic soils and all island is highly vulnerable to climate change, rising sea-levels and human impacts. The geoenvironmental stratification contributes to identifying the need to pursue policies to preservation of the complex island environments.

4.1.2 Introduction

The Brazilian Amazonia possesses the largest fluvio-marine archipelago in the world located at Amazon River mouth (ROSSETTI; VALERIANO; THALES, 2007). Marajó Island is its largest island and has a unique landscape mosaic with rainforests, savannas, grasslands, mangroves and sandy restingas vegetation (BRASIL, 1974; BUSH; COLINVAUX, 1988; CASTRO; ROSSETTI; RUIZ PESSEDA, 2010; COHEN; BEHLING; LARA, 2005; COHEN et al., 2015; FRANÇA et al., 2019; FRANCISQUINI et al., 2014; LIMA et al., 2005; LISBOA, 2012; ROSSETTI; VALERIANO; THALES, 2007). Climate changes from late Pleistocene to the Holocene combined with neotectonics events, sea level variations and human colonization resulted in a complex soil-geomorphological scenario, with varying regional climate-edaphic gradients (BEHLING; COHEN; LARA, 2004; CASTRO; ROSSETTI; RUIZ PESSEDA, 2010; COHEN et al., 2015; FRANÇA et al., 2019; FRANCISQUINI et al., 2014; LIMA et al., 2005; LISBOA, 2012; MAYLE; POWER, 2008; MEGGERS, 1992, 2001; MIRANDA; ROSSETTI; PESSEDA, 2009; ROSSETTI; BEZERRA; DOMINGUEZ, 2013; SCHAAN, 2010; SILVA et al., 2018; ZANI et al., 2012).

Amazonia is in centre of the discussions on global climate change (BARROS; ALBERNAZ, 2014; CARMO; NUNES, 2008; FEARNSIDE, 2009; FRANÇA et al., 2012; MARENGO et al., 2010; MARENGO; SOUZA JR., 2018; SHUKLA; NOBRE; SELLERS, 1990; VOUSDOUKAS et al., 2020; WIT; FREITAS, 2019) and is considered as a large-scale component of the Earth system that may pass a tipping point (LENTON et al., 2008; WIT; FREITAS, 2019). Marajó Island is a multidimensional fluvial-estuarine landscape, representing an area very susceptible to climate changes in Amazonia (BARROS; ALBERNAZ, 2014; BUSH; COLINVAUX, 1988; CARMO; NUNES, 2008; FEARNSIDE, 2009; MARENGO; SOUZA JR., 2018; MIRANDA;

ROSSETTI; PESSEDA, 2009; VOUSDOKAS et al., 2020). While the people in Marajó island traditionally depends on ecosystem services to sustain their live hoods (CARMO; NUNES, 2008; LISBOA, 2012; MACHADO, 2009; MURRIETA; DUFOUR; SIQUEIRA, 1999). Climate projections to island indicate most Marajó alluvial lowlands might be flood in the coming decades (BARROS; ALBERNAZ, 2014; CARMO; NUNES, 2008; MARENGO; SOARES, 2003). According to Vousdoukas et al. (2020), the mean global sea level rise in the last century have greatly increased in the last 25 years, with a trend of intensive coastline erosion worldwide, affecting the mouth of the Amazon river.

Marajó Island is also recognized as a key archaeological hotspot in Brazil, with a legacy of long-term ancient human occupation, characterized by a succession of cultures (DERBY, 1879; IBÁÑEZ-BONILLO, 2019; LISBOA, 2012; MEGGERS, 1992, 2001; MEGGERS; EVANS, 1957; MEGGERS; DANON, 1988b; ROSSETTI; GÓES; TOLEDO, 2009; SCHAAN, 2010; SCHANN; MARTINS, 2010). Most sites are either high hills (mounds), locally known as tesos. Areas of representatives Indian Black Earth (IBE - Anthrosol) or shell mounds (Sambaquis) representing one of major complex culture in Pre-Colombian South America (DERBY, 1879; IBÁÑEZ-BONILLO, 2019; LISBOA, 2012; MACHADO, 2009; MEGGERS, 1992, 2001; ROSSETTI; GÓES; TOLEDO, 2009; SCHANN; MARTINS, 2010; SCHMIDT et al., 2014).

Beginning from least 2000 years ago (BP), indigenous population occupied the extensive open grassland plains of eastern Marajó, and practice an intense water management at landscape scale (LISBOA, 2012; SCHAAN, 2010). Fish was the basic food for the Marajoara Phase (400-1350 A.D.) together with agriculture associated with mound building serving various functions such as habitation, ceremonial place and burial (MACHADO, 2009; MEGGERS, 1992, 2001; SCHAAN, 2008; SCHANN; MARTINS, 2010). The ceramic art manufacture is an important element of the Marajoara culture phase and is found buried many across the island (LISBOA, 2012; MACHADO, 2009; MEGGERS, 1992; SCHAAN, 2008; SCHANN; MARTINS, 2010).

Despite the broad of the recognition scientific, environmental and social importance of Marajó Island and its complex interplays, soil-geomorphic studies in relation with human-ecological relationships are very scarce, with emphasis on the geological

aspects (ALBERT; VAL; HOORN, 2018; BEHLING; COHEN; LARA, 2004; COHEN et al., 2015; COSTA et al., 2002; FRANÇA et al., 2012; ROSSETTI; BEZERRA; DOMINGUEZ, 2013; ROSSETTI; VALERIANO; THALES, 2007; SOARES JR.; COSTA; HASUI, 2008; SOARES JR et al., 2011; TATUMI et al., 2008; ZALAN, 2007). Our study focused on the geoenvironment stratification of Marajó Island, disentangling the links with present and past social/environmental conditions, to increase the knowledge of this key fluvio-marine ecosystem of Brazilian Amazonia. To this aim, we selected soils of all representative morphological, chemical and physical analysis, evaluating the pedogeomorphological interactions, and pedoarchaeological indicators of landscape changes by human occupation.

4.1.3 Material and Methods

4.1.3.1 Study area

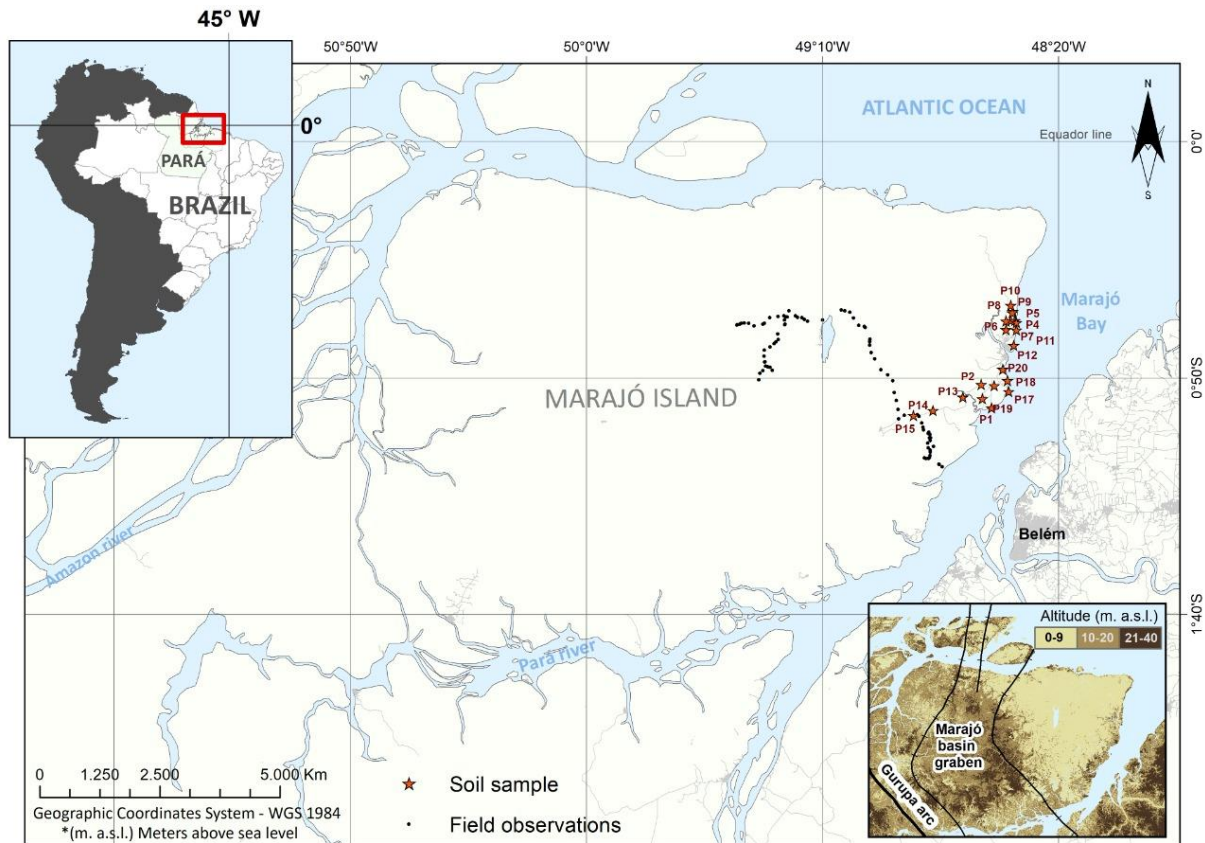
The Marajó Island is the largest fluvio-marine archipelago worldwide at Amazon River mouth, located between parallels 1°N and 2°S and meridians 51°W and 49°W (Fig.22). The Island is bordered by the Amazon river to the west, by the Tocantins river at the south and southeast, and faces the Atlantic Ocean in the north-northeast (Fig. 22). Marajó Island can be stratified into two main zones: the well-drained highlands (10 to 35 m a.s.l.) at the western and eastern parts under rainforest, and the waterlogged lowlands (1 to 9 m a.s.l.) subjected to annual flooding with grasslands, open savannas and mangroves (BRASIL, 1974; LIMA et al., 2005; LISBOA, 2012; MURRIETA; DUFOUR; SIQUEIRA, 1999). According to Köppen classification (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007), the climate is transitional between Am and Aw, from forest to savanna, with average annual temperature ranges from 25°C to 29°C and mean rainfall between 2.000 to 4.000mm (LIMA et al., 2005). The Marajó lowlands are affected by tide and large seasonal groundwater oscillations affected by rainfall and fluvial dynamics (LIMA et al., 2005; LISBOA, 2012; MURRIETA; DUFOUR; SIQUEIRA, 1999).

Geotectonically, Marajó Island is part of a deep graben (ca. 11km depth) following the supercontinent Gondwana fragmentation in the Mesozoic (ca. 130 Ma), resulting in the formation of the Equatorial Atlantic Margin (SOARES JR.; COSTA; HASUI, 2008; SOARES JR et al., 2011; ZALAN, 2007). This tectonic depression of Marajó basin was

filled by Cretaceous sediments (Breves, Jacarezinho, Anajás, Limoeiro, and Ipixuna formations (SOARES JR et al., 2011), eventually capturing rivers in the Neogene when tectonic reactivation of the South America plate inverted the Amazon river flow to its current mouth in Pará (ALBERT; VAL; HOORN, 2018; SCHOBENHAUS; NEVES, 2003). In the Miocene this region was covered by Pirabas and Barreiras groups (SOARES JR et al., 2011), following in Pleistocene-Holocene by post-Barreiras sediments, locally known as Tucunaré formation (COSTA et al., 2002), and Holocene fluvio-lacustrine and alluvial sediments (ROSSETTI; BEZERRA; DOMINGUEZ, 2013; TATUMI et al., 2008). The main soils are hydromorphic (Gleysols) with varying fluvial or marine influences, with unusual saline-sodic soils in the north and eastern, Spodosols in some sandy areas, and concretionary Oxisols (BRASIL, 1974).

In terms of population, three of twelve municipalities of Marajó are among the 10 worst in the Human Development Index (HDI) Brazilian list (PNUD, 2017) Melgaço city has the worst HDI in Brazilian territory (0.418), while Soure, capital of the island, presents 0.615 and occupies 3796^o position (IBGE, 2015a). In comparison, Brazil presents 0.755 HDI and occupies 75^o position in Global HDI ranking (PNUD, 2014). Population distribution is rarefied and presents 533.397 inhabitants concentrated near coastline and main rivers, with most of inhabitants as riverine (IBGE, 2015a; LISBOA, 2012; MURRIETA; DUFOUR; SIQUEIRA, 1999).

Figure 22: Study area, sampling soil, geological structure and altitude above sea level.



4.1.3.2 Remote sensing and geoenvironmental map

Geoenvironments of Marajó Island were, firstly, identified and characterized based on analysis of Sentinel-2A and Landsat 8-OLI. The image satellites were acquired in September 2016 and October 2019 from Copernicus (EUROPEAN SPACE AGENCY, 2019) and Earth Explorer website (USGS, 2019). Sentinel-2A has 10 m spatial resolution and Landsat-8 OLI 30 m. DOS1 atmospheric correction was applied to the Sentinel-2A and Landsat-8 images using the SCP plugin available in QGIS 3.10 software. Were used the red, green, blue and Infrared combination bands of each satellite image to recognized main spectral signatures and geoenvironments definition. Was used the NASADEM Merged DEM Global 1 arc second V001, with 30m of spatial resolution (NASA JPL, 2020). Information of local inhabitants information was obtained in OpenStreetMap (2019) and (IBGE, 2015a) data base. After, the geoenvironments were recognized in the field and the limits between them have been refined.

4.1.3.3 Soil sampling and field data

The field work was conducted in December 2018 and 2019, and the selection of sites for soil sampling were performed according the hydro-soil-landforms-biologic variations of the studied area. Twenty soil pedons were described and collected according Schoeneberger et al. (2012), and their horizons soil colours were determined by Munsell Soil Colour Charts (2009). Soils were classified according to U.S. Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2014) and Brazilian Soil Classification System (SANTOS et al., 2018). Aerial photogrammetry was performed using an unmanned aerial vehicle (UAV). The aerial photographs were processed and obtained the orthophoto mosaic and digital elevation model in centimetre resolution of each soil profile region. Vegetation was observed and registered according the landscape variation.

4.1.3.3 Radiometric dating of soil by ^{14}C

Five samples in different soil pedons (P1 Bw3 charcoal, P2 Bhsm humic horizon, and Ap1, Ap2 and Ap3 horizon of P16) were dating by ^{14}C . The samples were sent to Beta Analytic laboratory (Miami, USA) for dating by Mass Spectrometry with Accelerator method. Calibration was performed using specific databases (HOGG et al., 2013).

4.1.3.3 Physical and chemical analyses

The physical and chemical analyses were performed according Teixeira et al. (2017). The soil granulometry was determined by pipette method after dispersion with 0.1 NaOH mol L⁻¹; coarse and fine sands were separated by sieving, and clay and silt by differential sedimentation and pipetting. After, the particle-size distributions (texture class) were obtained by texture triangle interpolation (Schoeneberger et al., 2012).

The pH in water was measured by the potentiometric method at a soil-solution ratio of 1:2.5 (TEIXEIRA et al., 2017). Exchangeable bases (Ca^{2+} , Mg^{2+} and Al^{3+}) were obtained with KCl 1 mol L⁻¹ extract, at a proportion of soil:solution 1:10 and quantified by atomic absorption spectroscopy (TEIXEIRA et al., 2017). Available phosphorus was determined by Atomic Absorption Spectrophotometry and K^{+} and Na^{+} by Flame Emission Photometry, both with Mehlich⁻¹ (0.05 HCL mol L⁻¹ + 0.025 H₂SO₄ mol L⁻¹) extraction at a soil:solution ratio of 1:10. Potential acidity (H^{+} + Al^{3+}) was extracted with

0.5 mol L⁻¹ calcium acetate at pH 7.0, being quantified by titration with 0.05 NaOH mol L⁻¹ (TEIXEIRA et al., 2017).

After chemical analyses, the following indexes were calculated: sum of bases (SB=Ca²⁺+ Mg²⁺+ K⁺+ Na⁺), potential Cation Exchange Capacity (CEC_{pt}=SB+Al³⁺+H⁺) at pH 7, effective Cation Exchange Capacity at soil pH (CEC_{ef}=SB+Al³⁺) Percentage of Base Saturation (PBS=100.SB/CEC_{pt}); Aluminium Saturation (Al sat%=100 Al³⁺/(SB+Al³⁺)); and Exchangeable Sodium Percentage (ESP =100.Na⁺/CEC_{pt}) (TEIXEIRA et al., 2017).

Total organic carbon (TOC) was determined by the wet combustion method (YEOMANS; BREMNER, 1988). The micronutrients Mn, Cu, Fe, Zn, Cr, Ni, Cd and Pb were determined by flame Atomic Absorption Spectroscopy (DEFILIPO; RIBEIRO, 1997), and P adsorption capacity by stirring for 1 h with 2.5 g of soil in 0.01 CaCl₂ mol L⁻¹ containing 60 mg of P mol L⁻¹. The suspension was filtered and the remaining P in solution (P_{rem}) was determined by Photocolorimetry (ALVAREZ et al., 2000). Electrical conductivity (EC) was obtained for each soil sample by saturated paste method. The paste was prepared with addition of deionized water until obtained a homogeneous mass which flows lightly with free sliding movement of the spatula. The saturated paste overnight and obtained the extract to measure de EC (USDA, 2014).

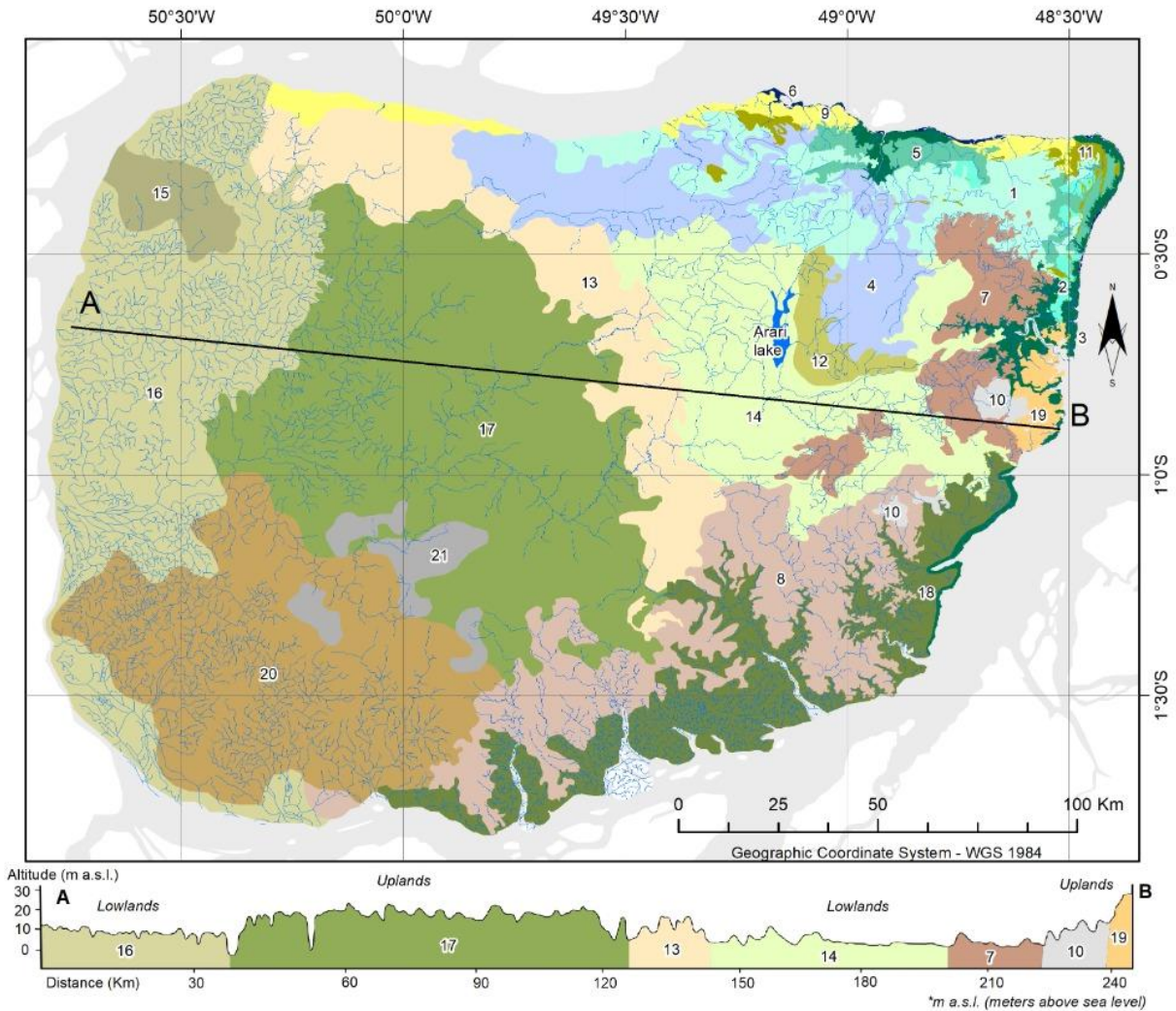
4.1.4 Results

4.1.4.1 Geoenvironmental stratification

Marajó Island has twenty-one geoenvironments representing the most diverse Holocene fluvio-lacustrine and fluvio-marine landscape in Brazil (39.244 km²). The eastern Marajó sector has the greatest diversity, with sixteen domains, while western forested zone has five (Fig.23). Lowlands (0 - 9 m a.s.l.; 58.73%) and Uplands (10 - 35 m a.s.l.; 41.27%) are clearly recognized at Marajó, each with its geoenvironmental particularities. The eastern Marajó upland sector has a narrow-elongated strip above 15 m, forming a low plateau with deep soils and ironstones (petroplinthite) at the bottom profile, with abundant archaeological evidence (Fig. 24; G19). This sector showed the most complex ecosystems and concentrate the majority of population, while the western has the densest rainforest vegetation and greater river floods.

The following geoenvironments were identified at lowlands: salt-affected areas (4965 km²; 12.65%) as i) Mangroves with Gleysols (3; 552 km²); ii) Apicum with Gleysols and halophytes plants (2; 114 km²); iii) Low terraces and plains with saline-sodic Gleysols (1; 1643 km²); iv) Old salt-plain terrace with fluvial-lacustrine sediments (4; 2198 km²); v) Salt-plains with paleo dunes (5; 414 km²); and vi) Coastal muddy plain (6; 44 km²). The weathered lateritic domain (4333 km²; 11.04%) is represented by: (i) Terraces with hydromorphic Plinthosol cover by fluvial-lacustrine sediments (7; 1133 km²) and Hills and low tableland with Plinthosols under alluvial rainforest (8; 3201 km²). The sandy-soil areas (1261 km²; 3.21%) are: i) Active sandy dunes with marine and fluvial plains (9; 540 km²); ii) Sandy domain with Spodosols and savanna (10; 168 km²); iii) Active sandy dunes and paleo dunes (11; 166 km²); iv) Central inland paleo-estuary (12; 387 km²) near the Arari Lake (Fig.23). The inland plains (12489 km²; 31.82%) are represented by: i) Transition zone between savanna and rainforest (13; 2846 km²); ii) Fluvio-marine plains with grassy herbaceous vegetation (14; 3347 km²); iii) Amazon river floodplain with eutrophic Gleysols (15; 552km²), and iv) Amazon river floodplain with indiscriminate Gleysols (16; 5745 km²). The Uplands geoenvironments were: High dense vegetation (10275; 26.18%) represented by i) Western Marajó plateau with dense alluvial rainforest (17; 7682 km²); ii) Alluvial dense rainforest domain with *Euterpe oleracea* (18; 2594 km²); iii) Plateau with Oxisols and diversity vegetation (19; 223 km²), with abundant archaeological evidence (Fig.24); iv) Potential zone of concretionary soils associated with Gleysols (20; 5062 km²), and Sandy-soils areas (636 km²; 1.62%) with i) Potential zone of Spodosols under open rainforest (21; 636km²).

Figure 23: Marajó Island geoenvironmental stratification and regional topographic section.



Lowlands (0 - 9 m a.s.l.; 58.73%)

Salt-affected areas (4965 km²; 12.65%)

- 1 Low terraces and plains with saline-sodic Gleysols (1643 km²)
- 2 Apicum with Gleysols and halophytes plants (114 km²)
- 3 Mangrove with Gleysols (552 km²)
- 4 Old salt-plain terrace with fluvial-lacustrine sediments (2198 km²)
- 5 Salt-plain with paleo dunes (414 km²)
- 6 Coastal muddy plain (44 km²)

Weathered lateritic domain (4333 km²; 11.04%)

- 7 Terraces with hydromorphic Plinthosol cover by fluvial-lacustrine sediments (1133 km²)
- 8 Hills and low tableland with Plinthosols under alluvial rainforest (3201 km²)

Sandy-soil areas (1261 km²; 3.21%)

- 9 Active sandy dunes with marine and fluvial plains (540 km²)
- 10 Sandy domain with Spodosols and savanna (168 km²)
- 11 Active sandy dunes and paleo dunes (166 km²)
- 12 Central inland paleo-estuary (387 km²)

Inland plains (12489 km²; 31.82%)

- 13 Transition zone between savanna and rainforest (2846 km²)
- 14 Fluvio-marine plains with grassy herbaceous vegetation (3347 km²)
- 15 Amazon river floodplain with eutrophic Gleysols (552 km²)
- 16 Amazon river floodplain with indiscriminate Gleysols (5745 km²)

Uplands (10 - 35 m a.s.l.; 41.27%)

High dense vegetation (10275 km²; 26.18%)

- 17 Western Marajó plateau with dense alluvial rainforest (7682 km²)
- 18 Alluvial dense rainforest domain with *Euterpe oleracea* (2594 km²)

Weathered lateritic domain (5285 km²; 13.47%)

- 19 Plateau with Oxisols and diversity vegetation (223 km²)
- 20 Potential zone of concretionary soils associated with Gleysols (5062 km²)

Sandy-soils areas (636 km²; 1.62%)

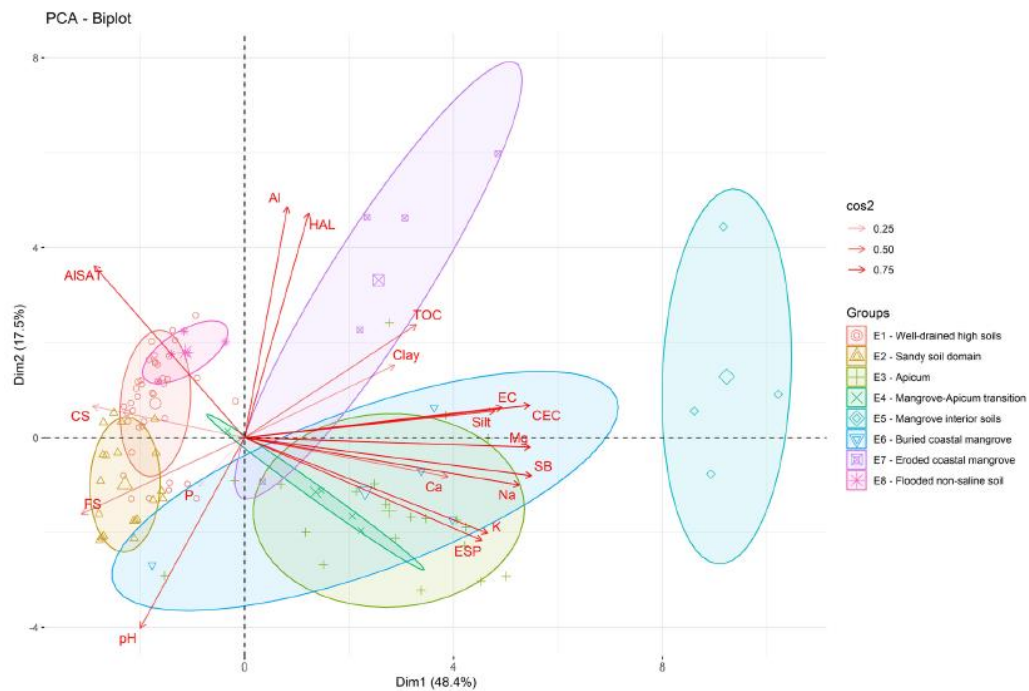
- 21 Potential zone of Spodosols under open rainforest (636 km²)

Figure 24: Representative geoenvironments of Marajó Island. G1 Low terraces and plains with saline-sodic Gleysols, G2 Apicum, G3 Mangrove with Gleysols, G4 Old salt-plain terrace with fluvial-lacustrine sediments, G10 Sandy domain with Spodosols and savanna, G14 Fluvio-marine plains with grassy herbaceous vegetation, G17 Western Marajó plateau with dense alluvial rainforest, G18 Alluvial dense rainforest domain with *Euterpe Oleracea*, G19 Plateau with Oxisols and diversity vegetation and also Jesuitical buildings from 1750 in Joanes city.



The Principal Component Analysis (PCA) explained 48.4% of environmental differentiation in the first axis (x), and 17.5% in the second (y), totaling 65.9% of the geoenvironmental gradient, represented by Fig. 25. The analysis showed strong physical and chemical differentiation of Marajó soils. The E1 Well-drained high soils, E2-Sandy soils domain, and E8-Flooded non-saline soils are strongly related to a higher contribution of sands from weathered Barreiras Group (coarse sands) or Holocene deposits (Fine sand) in the inner island. The flooded soils represented by E3-Apicum, E4-Mangrove-Apicum transition, E5-Mangrove interior soils, E6-Buried coastal mangrove, and E7-Eroded coastal mangrove are related to higher contents of clays, silts, and nutrients, typical of the richer coastal environment.

Figure 25: Principal Component Analysis of soils and geoenvironments



4.1.4.2 General soil aspects

Well-drained soils have thick horizons with concretionary (ironstone) layers at the bottom profile (P1, P7, P13, P17, P18, P19, P20). These soils were classified as Xanthic Haploperox (P1, P17), Typic Haploperox (P7, P13), Plinthic Haploperox (P18, P19) and Typic Dystrudepts (P20) (SOIL SURVEY STAFF, 2014) (Table 1). Soils affected by groundwater varying and daily tidal oscillations are represented by gleying process, and has a clayey texture under mangrove or herbaceous vegetation (P3, P4, P6, P8, P9, P10, P11, P12, P14).

Most of the flooded (waterlogged) soils are salt-affected with influences of sulphate. At the coastline soils were classified as Sulfic Hydraquents and Sodic Hydraquents (P11, P12) (SOIL SURVEY STAFF, 2014). Salt-affected soils on mangrove-apicum and extensive central salt plains were classified as Sulfic Psammowassents (P3), Typic Sulfiwassents (P4) and Sodic Hydraquents (P6, P8, P9, P10) (SOIL SURVEY STAFF, 2014). The waterlogged P14 soil on the central lowlands and distant from the sea influences, had no salt accumulation and was classified as Typic Hydraquents (SOIL SURVEY STAFF, 2014) (Table 1).

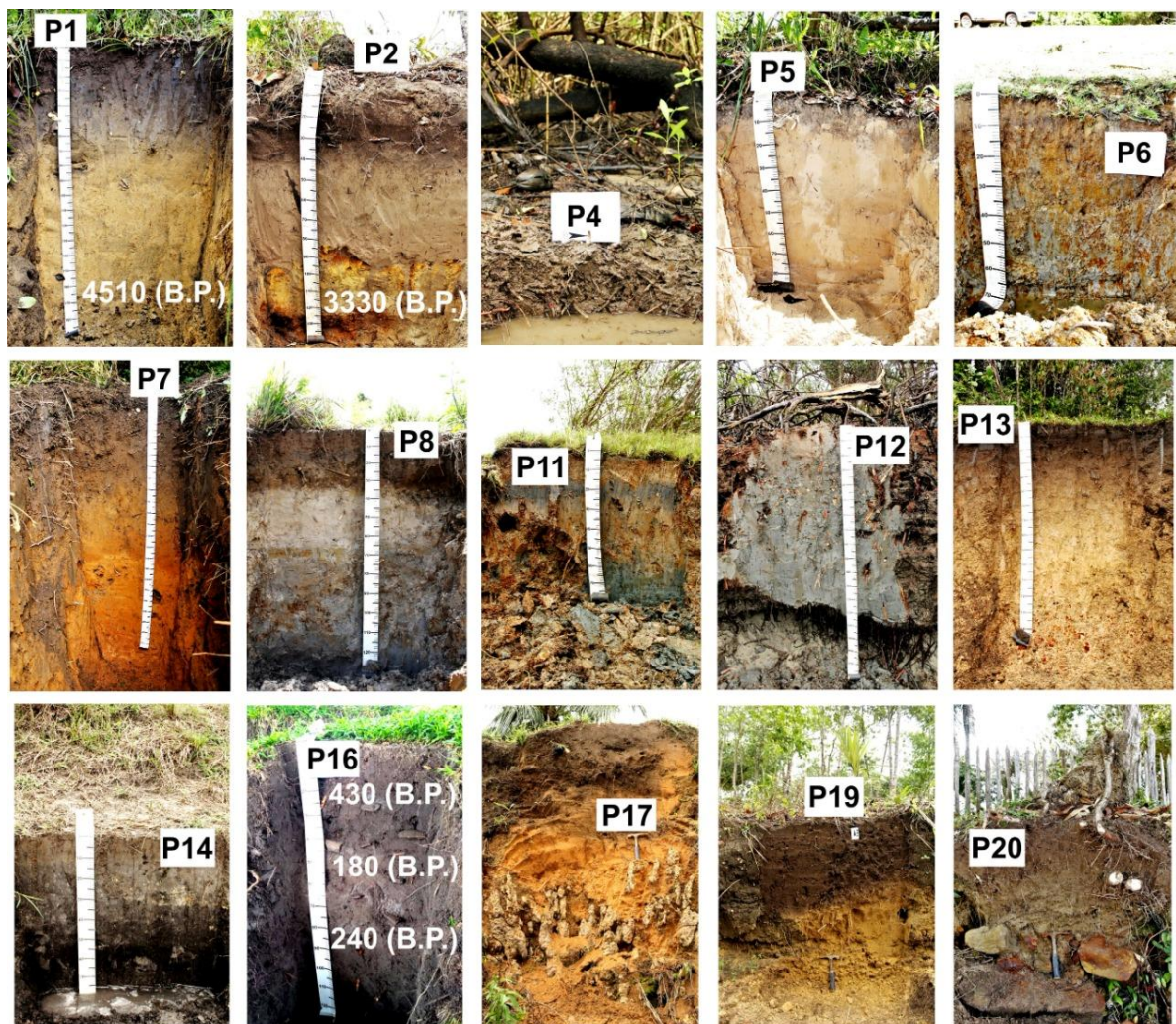
Table 1: General aspects and classification of studied soils at Marajo Island, Brazilian Amazonia.

Pedon	US Soil taxonomy (Soil Survey Staff, 2014)	Brazilian soil classification system (Santos et al., 2018)	Altitude (above sea level)	Mean temperature (°C)	Mean precipitation (mm)	Vegetation	Parent material	Geographic position	
1	Xanthic Haploperox	<i>Latossolo Amarelo Distrófico plintossólico</i>	12 m	27.3	2492	Ombrophilous amazon forest	Pleistocene/Holocene quartz sediments	-48.6018 0794	-0.906 3465
2	Typic Haplorthods	<i>Espodosolo Ferri-Humilúvico Órtico espessarênico</i>	7 m	27.3	2533	Savanna	Holocene fluvial-eolic quartz sand	-48.6059 7968	-0.8562 8938
3	Sulfic Psammowassents	<i>Gleissolo Sálico Sódico típico</i>	4 m	27.4	2840	Mangrove	Holocene tide-swamp fine quartz	-48.4871 0232	-0.6313 5189
4	Typic Sulfiwassents	<i>Gleissolo Sálico Sódico tiônico</i>	4 m	27.4	2852	Mangrove	Holocene tide-swamp fine quartz	-48.5020 2478	-0.6314 3145
5	Ustic Quartzipsamments	<i>Neossolo Quartzarênico Órtico típico</i>	2 m	27.4	2840	Restinge	Unconsolidated quartz sand at coastline	-48.4819 2714	-0.6386 2537
6	Sodic Hydraquents	<i>Gleissolo Sálico Sódico típico</i>	7 m	27.4	2852	Sal-herbaceous	Holocene fluvial-tide fine quartz	-48.5179 8838	-0.6327 4073
7	Typic Haploperox	<i>Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico plintossólico</i>	6 m	27.4	2852	Ombrophilous amazon forest with Arecaceae	Pleistocene/Holocene quartz sediments	-48.5181 8001	-0.6633 0087
8	Sodic Hydraquents	<i>Gleissolo Háptico Sódico neofluvissólico</i>	3 m	27.4	2881	Salt-herbaceous, Copernicia prunifera	Holocene fluvial-tide fine quartz	-48.4942 6439	-0.5990 1528
9	Sodic Hydraquents	<i>Gleissolo Sálico Sódico típico</i>	4 m	27.4	2881	Salt-herbaceous, Copernicia prunifera	Holocene fluvial-tide fine quartz	-48.4963 8989	-0.6043 4000
10	Sodic Hydraquents	<i>Gleissolo Háptico Sódico salino</i>	5 m	27.4	2882	Herbaceous,	Holocene fluvial-tide fine quartz	-48.5014 5687	-0.5774 6141
11	Sulfic Hydraquents	<i>Gleissolo Sálico Sódico tiônico</i>	1 m	27.4	2840	Herbaceous, mangrove	Holocene fluvial-tide fine quartz	-48.4818 5162	-0.6641 3201

12	Sodic Hydraquents	<i>Gleissolo Háplico Sódico salino</i>	4 m	27.4	2377	Mangrove	Holocene tide-swamp fine quartz	-48.4913 3162	-0.7181 9657
13	Typic Haploperox	<i>Plintossolo Háplico Distrófico espesso</i>	5 m	27.3	2453	Savanna	Pleistocene/Holocene quartz sediments	-48.6709 4033	-0.9015 6470
14	Typic Hydraquents	<i>Gleissolo Háplico</i>	4 m	27.2	2394	Herbaceous, gramineous	Holocene fluvial fine quartz	-48.7761 0238	-0.9482 2531
15	Typic Udipsamments	<i>Neossolo Quartzarênico Órtico típico</i>	22 m	27.2	2394	Ombrophilous amazon forest with Arecaceae	Holocene fluvial fine quartz	-48.8450 4097	-0.9664 2324
16	Typic Udipsamments	<i>Neossolo Quartzarênico Órtico típico</i>	10 m	27.2	2562	Ombrophilous amazon forest with Arecaceae	Pleistocene/Holocene quartz sediments	-48.5696 0227	-0.9386 6678
17	Xanthic Haploperox	<i>Latossolo Amarelo Distrófico antrópico</i>	12 m	27.2	2562	Ombrophilous amazon forest with Arecaceae	Pleistocene/Holocene quartz sediments	-48.509 1547	-0.8817 7059
18	Plinthic Haploperox	<i>Latossolo Amarelo Distrófico antrópico</i>	11 m	27.2	2562	Ombrophilous amazon forest with Arecaceae	Pleistocene/Holocene quartz sediments	-48.5125 4698	-0.8432 0468
19	Plinthic Haploperox	<i>Plintossolo Háplico</i>	12 m	27.2	2545	Savanna with Arecaceae	Pleistocene/Holocene quartz sediments	-48.5594 9829	-0.8602 0992
20	Typic Dystrudepts	<i>Plintossolo Háplico Distrófico leptofragmentário</i>	5 m	27.3	2609	Herbaceous and mangrove	Holocene quartz sediments	-48.5294 0786	-0.8029 3846

Coastal sandy soils under *restinga* vegetation were classified as Ustic Quartzipsamments (P5). The central lowlands under savanna and strong podzolization has Typic Haplorthods (P2). P15 is located on an archaeological mound and classified as Typic Udipsamments (Soil Survey Staff, 2014). P16 represent a thick Indian Black Earth of eastern Marajó highlands and was classified as Typic Udipsamments (SOIL SURVEY STAFF, 2014) (Fig. 26). Anthropogenic A soil horizons (Indian Black Earth) are widespread in the eastern sector, at the highest topographic position. The Anthropogenic horizons are considerably thick (ca. 25 cm), and possess common ceramic fragments and charcoal.

Figure 26: Representative profiles of Marajó Island. P1 Xanthic Haploperox, P2 Typic Haplorthods, P4 Typic Sulfiwassents, P5 Typic Quartzipsamments, P6 Sodic Hydraquents, P7 Typic Haploperox, P8 Sodic Hydraquents, P11 Sulfic Hydraquents, P12 Sodic Hydraquents, P13 Typic Haploperox, P14 Typic Hydraquents, P16 Typic Udipsamments, P17 Xanthic Haploperox, P19 Plintic Haploperox, P20 Typic Dystrudepts.



4.1.4.3 Radiometric dating of soil by ^{14}C

The ^{14}C dating of the B_{hsm} horizon (P2) reached 3330 yr. B.P., while surface Anthropogenic Ap P16 have 430 (Ap1), 180 (Ap2) and 240 (Ap3) yr. B.P. For charcoal (P1) present in B_{w3} dating has 4510 years B.P., with error margin of ± 30 years for all (Fig. 26). This indicates the pedogenesis range of mid to late Holocene.

4.1.4.4 Physical and morphological soil attributes

Sixteen soil profiles have sandy clay loam to sandy texture (P1, P2, P3, P5, P7, P8, P10, P12, P13, P14, P15, P16, P17, P18, P19, P20). The sands present in Marajó soils have different sources, associated with soil processes and environmental conditions. At the coastal zone, beach deposits with incipient pedogenesis (P5) supports Restinga vegetation. The greatest developed soils of eastern Marajó highlands (P1, P7, P17, P18, P19) have granular and subangular block structures and B horizons deeper than 50cm (Table 2). P2 and P15 have fine sand predominance, with organic matter and strong biological activity. P2 represent an ancient spodosol formation, with subsurface B_{hsm} organic horizon, now out of phase with *Cerrado* vegetation. P15 has an anthropic A horizon resembling an Indian Black Earth, similar to IBEs of lower Amazon.

Soils with high contents of fine particles (silt and clay) indicates lentic low energy environments (floodplain), with intense pedobiological processes. Mangrove/apicum soils (P3, P4, P6, P8, P9, P10, P11, P12) exhibited a textural range from silty clay loam to clay. The permanent or semi-permanent water saturation leads to organic matter accumulation and histic horizon formation. When soils dry, form a massive structure of low density. Salt accumulation, if present, increases the firmness/hardness of the massive soil structure.

P8, P11 and P14 have signs of depositional stratification subjected to further pedological processes under varying environmental conditions. P8 present a sandy at 35-65 cm depth (Cg1), while the other horizons have clay texture (A, Cg2, Cg3). Coastal soil has sand and silty-clay horizons that illustrated the marine progradation and retraction dynamic (P11). In the inner lowlands (P14), soils showed sand and clay interbedding suggesting a dynamic of changing flooding and channel bars depositions.

Table 2: Morphological and physical attributes of studied soils at Marajo Island, Brazilian Amazonia.

Hor.	Depth	Color			CS	FS	Silt	Clay	Texture	Structure	FS/CS
	cm	Matiz	V/C dried	V/C moist	%						
Ap	0-8	10YR	4/1	3/2	36.9	32.9	5.8	24.3	Sandy clay loam	1 m gr	0.89
A2	ago/20	10YR	5/2	3/2	32.6	34.8	11.9	20.7	Sandy clay loam	1 f/m sb	1.07
AB	20-40	10YR	5/2	3/2	33.4	34.5	11.4	20.7	Sandy clay loam	1 m/c sb	1.03
BA	40-65	10YR	5/3	4/3	27.1	36.6	13.1	23.1	Sandy clay loam	1 m/c sb	1.35
Bo1	65-100	10YR	7/4	6/6	29	33	10.6	27.4	Sandy clay loam	1 m sb	1.14
Bo2	100-130	10YR	7/4	7/6	28	34.3	22.6	15.1	Sandy loam	1 m sb	1.23
Bo3	130-164	10YR	8/4	7/6	32.9	30.4	8.2	28.5	Sandy clay loam	1 f/m sb	0.92
Cc	165-190+	10YR	8/4	7/4	29	29.4	11.6	30.1	Sandy clay loam	1m/c/vc sb	1.01
A1	0-15	10YR	3/1	2/2	46.5	43	4.9	5.7	Sand	1 m/c/vc sb	0.92
A2	15-32	10YR	3/1	2/2	37.9	50.3	5.3	6.6	Loamy sand	1 m/c/vc sb	1.33
AE	32-45	10YR	4/2	3/2	39.1	48.6	5.9	6.4	Loamy sand	sg	1.24
E	45-90	7.5YR	7/2	5/2	33.9	54.2	6.2	5.7	Sand	sg	1.6
Bsm1	90-110	10YR	6/4	6/6	34.1	50.7	7.6	7.6	Loamy sand	2 c/vc sb	1.49
Bsm2	110-130	10YR	4/4	3/6	33.4	51.2	6.8	8.7	Loamy sand	1 m/c/vc sb	1.53
Bhsm	130+	5YR	5/1	3/3	52.5	39.2	3.2	5.1	Sand	1 m/c sb	0.75
Cg1	0-20	7.5YR	5/1	3/2	1.4	72.1	9.3	17.2	Sandy loam	ma	51.5
Cg2	20-40	10YR	5/1	3/3	1.7	71.7	9	17.6	Sand loam	ma	42.18
Cg3	40-60	7.5YR	5/1	3/2	1.9	81	5.8	11.3	Loamy sand	ma	42.63
Cg4	60-80+	7.5YR	6/1	4/2	2.2	91.7	1.3	4.8	Sand	ma	41.68
Cg1	0-20	7.5YR	5/2	3/3	0.5	6.4	56.2	36.9	Silty clay loam	ma	12.8
Cg2	20-40	10YR	5/1	3/2	0.5	5.5	62.6	31.4	Silty clay loam	ma	11
Cg3	40-60	7.5YR	5/2	3/1	0.6	6	59.6	33.8	Silty clay loam	ma	10
Cg4	60-80+	7.5YR	6/1	5/1	0.4	6.4	60.9	32.3	Silty clay loam	ma	16
A	0-12	10YR	7/2	6/1	4.2	92	1.9	1.9	Sand	sg	21.9
C1	12-45	10YR	8/1	8/3	4.2	93.4	0.5	1.9	Sand	sg	22.24
C2	45-80	10YR	8/1	8/3	1.4	96.1	0.8	1.7	Sand	sg	68.64
C2	80-120	10YR	8/1	7/3	5.1	93.2	0.5	1.2	Sand	sg	18.27

C2	120-140+	10YR	8/1	7/3	2.5	93.1	2.1	2.3	Sand	sg	37.24
A	0-12	10YR	7/3	5/2	1.6	20.2	47.6	30.6	Clay loam	1 m sb	12.63
AB	dez/17	10YR	7/3	4/2	0.6	16.3	55.5	27.6	Silty clay loam	2 m sb	27.17
Bgw	17-25	10YR	6/2	4/3	0.8	31.9	42.2	25.1	Loam	2 m/c/vc sb	39.88
Cg1	25-40	10YR	6/2	5/2	0.8	16.2	49.9	33.1	Silty clay loam	1 f/m sb	20.25
Cg2	40-70+	10YR	6/3	5/1	1.1	28.7	43.4	26.8	Loam	1 f sb	26.09
Ap	0-15	10YR	3/2	2/2	31.8	36.5	17.1	14.6	Sandy loam	2 m gr	1.15
AB	15-60	10YR	4/2	3/3	27.6	35	15	22.4	Sandy clay loam	1 m sb	1.27
BA	60-80	10YR	5/3	3/3	26.4	32.5	16.7	24.4	Sandy clay loam	1 m sb	1.23
Bo1	80-110	7.5YR	6/6	4/6	27.3	35.9	13.7	23.2	Sandy clay loam	2 m/c/vc gr/sb	1.32
Bo2	110-140	5YR	6/6	4/3	25.6	35.3	14.8	24.3	Sandy clay loam	2 m/c/vc gr/sb	1.38
Bo3	140-195	5YR	6/6	5/8	23.9	31.9	13.9	30.3	Sandy clay loam	2/3 c/vc gr/sb	1.33
Cc	195-250+	5YR	7/6	5/8	20.9	30.4	12.7	36.1	Sandy clay loam	2/3 c/vc sb	1.45
A	0-30	7.5YR	6/2	4/2	0.2	23.3	57.8	18.7	Silt loam	1 f sb	116.5
Bw	30-35	10YR	6/1	4/2	0.4	14.1	47.8	37.6	Silty clay loam	1 f sb	35.25
Cg1	35-65	10YR	8/1	8/2	5.5	90.6	2.6	1.3	Sand	sg	16.47
Cg2	65-110	10YR	6/1	5/2	0.6	11.4	58.8	29.2	Silty clay loam	ma	19
Cg3	110-130+	10YR	5/1	4/1	0.1	13.4	56.6	29.9	Silty clay loam	ma	134
Cg1	0-20	10YR	6/1	4/1	2.2	48.5	31.5	17.8	Loam	ma	22.05
Cg2	20-40	10YR	6/1	4/2	1.6	33.5	31.7	33.3	Clay loam	ma	20.94
Cg3	40-60	10YR	6/4	4/2	0.7	20.1	41.7	37.5	Clay loam	ma	28.71
Cg4	60-80	10YR	6/4	5/4	0.7	19.3	41.7	38.4	Silty clay loam	ma	27.57
Cg5	80-100	10YR	6/4	5/4	0.8	17.6	43.1	38.5	Silty clay loam	ma	22
Cg6	100-120	10YR	6/4	5/4	0.8	17.4	44.2	37.6	Silty clay loam	ma	21.75
A	0-10	10YR	5/3	4/3	0.4	49.8	38.3	11.5	Loam	1 f sb	124.5
Cg1	out/25	10YR	6/3	4/2	0.9	20.3	57.7	21.2	Silt loam	ma	22.56
Cg2	25-40	10YR	6/3	5/3	1.3	20.9	53.2	24.7	Silt loam	ma	16.08
Cg3	40-110+	10YR	7/2	6/3	0.3	40.5	43.8	15.3	Loam	ma	135
Cg1	0-15	10YR	6/2	5/4	0.6	56.3	31.8	11.3	Sandy loam	ma	93.83
Cg2	15-28	10YR	6/2	4/1	0.5	36	42.3	21.2	Loam	ma	72
Cg3	28-55	10YR	6/3	5/2	0.2	47.1	38.8	13.9	Loam	ma	235.5

Cg4	55-80+	10YR	6/3	4/3	0.4	14.7	54.4	30.6	Silty clay loam	ma	36.75
A	0-15	10YR	6/2	4/2	8.4	86.2	2.4	2.9	Sand	sg	10.26
Cg1	15-80	10YR	5/1	3/2	8.3	3.9	59.2	28.6	Silty clay loam	1 m/c sb	0.47
Cg2	80-130	10YR	5/1	3/2	1.4	7.6	61.3	29.8	Silty clay loam	1 m/c sb	5.43
Cg3	130-180+	10YR	5/1	3/2	3.3	13.8	52.4	30.5	Silty clay loam	1 m/c sb	4.18
Ap	0-15	10YR	3/2	2/1	7.4	44.4	14.8	33.5	Sandy clay loam	2 f/m sb	6
AB	15-30	10YR	4/1	3/2	7.6	44.8	13.4	34.2	Sandy clay loam	1/2 f/m sb	5.89
BA	30-42	10YR	5/1	4/2	7.3	46.1	14.2	32.5	Sandy clay loam	1/2 f/m sb	6.32
Bw	42-70	10YR	5/6	4/3	7.3	46.7	14.9	31.1	Sandy clay loam	2 f/m sb	6.4
Bwv1	70-100	10YR	7/4	5/4	6.3	44.9	14.6	34.2	Sandy clay loam	2 f/m sb	7.13
Bwv2	100-125	10YR	7/4	5/4	5.4	35.9	15.3	43.3	Clay	2 m/c/vc sb	6.65
Bwv3	125-150+	10YR	7/6	5/4	5.5	31	14.4	49.1	Clay	2/3 m/c pl	5.64
Ap	0-12	10YR	3/1	2/1	2.8	40.6	34.8	21.8	Loam	1 f/m sb	14.5
A2	dez/32	10YR	4/1	3/1	7.4	48.9	25.6	18.1	Sandy loam	2 m sb	6.61
A3	32-55	10YR	4/1	3/1	2.1	47.6	33.9	16.5	Loam	1 m/c/vc sb	22.67
ACg	55-80	10YR	4/1	3/2	4	49	29.4	17.6	Sandy loam	1 m/c/vc sb	12.25
Cg1	80-140+	10YR	7/3	7/4	6.8	29.8	21.6	41.8	Clay	1m/c/vc sb	4.38
1	0-10	2.5Y	4/2	5/2	0.6	80	4	15.5	Sandy loam	2 m/c/vc sb	133.33
3	20-30	2.5Y	4/2	5/2	0.9	81.4	3.2	14.5	Sandy loam	2 m/c/vc sb	90.44
4	30-40	2.5Y	4/2	5/2	0.5	81.7	3.5	14.3	Sandy loam	2 m/c/vc sb	163.4
6	50-60	2.5Y	8/1	7/6	0.6	84.4	1.2	13.8	Loamy sand	1 m sb	140.67
9	80-90	2.5Y	8/1	7/6	0.6	82.7	3.7	13	Loamy sand	1 m sb	137.83
13	120-130	2.5Y	8/1	7/6	0.2	86.6	4.6	8.6	Loamy sand	1 m sb	433
15	140-150	2.5Y	8/1	7/6	0.2	86.4	4.7	8.7	Loamy sand	1 m sb	432
18	170-180	2.5Y	8/1	4/3	0.5	87.3	3.6	8.6	Loamy sand	1m sb	174.6
Ap1	0-15	10YR	4/1	3/2	61.5	26.7	5.2	6.6	Loamy sand	1 f sg	0.43
Ap2	15-40	10YR	4/1	3/2	62	22.3	6.5	9.3	Loamy sand	1 f sb	0.36
Ap3	40-75	10YR	4/2	3/2	52.3	23.9	9	14.8	Sandy loam	1 f sg	0.46
AC	70-120+	10YR	4/2	3/2	49.3	25.5	8.8	16.4	Sandy loam	1 f sg	0.52
Ap	0-58	10YR	5/1	4/3	33.9	48	6.3	11.8	Loamy sand	3 f/m gr	1.42
AB	58-78	10YR	5/1	4/4	35.7	43.2	7.1	14	Sandy loam	1/2 m gr/sb	1.21

Bo	78-133	7.5YR	7/4	5/6	41.6	33.3	1.6	23.5	Sandy clay loam	1/2 m gr/sb	0.8
Ap	0-22	10YR	5/3	3/3	28.3	45.1	6.9	19.7	Sandy loam	1/2 f/m sb	1.59
AB	22-38	10YR	5/3	3/4	32.9	42.2	9.2	15.7	Sandy loam	2 m sb	1.28
Bo	38-88	7.5YR	6/4	5/6	31.1	38.7	10.2	20	Sandy clay loam	1 m sb	1.24
Ap	0-52	7.5YR	4/1	2.5/1	31	41.4	13	14.7	Sandy loam	3 f gr	1.34
BA	52-67	10YR	5/3	3/3	28.9	43.1	11	17.1	Sandy loam	1 m sb	1.49
Bw	67-97	10YR	7/4	6/6	28.7	40.2	14	17	Sandy loam	1 m sb	1.4
Bc	97-120+	10YR	8/4	7/6	42	31.7	10	16.3	Sandy loam	1 m sb	0.75
Ap	0-21	10YR	4/2	3/2	25.3	40.3	16.2	18.3	Sandy loam	2 m sb	1.59
AB	21-38	10YR	6/2	4/3	23.1	40.6	16.6	19.7	Sandy loam	1 m sb	1.76
BA	38-63	10YR	6/2	4/3	19.7	40.7	16.5	23.1	Sandy clay loam	2 m sb	2.07
Bw	63-80+	10YR	7/2	5/3	18.9	38.8	18.5	23.8	Sandy clay loam	2 m sb	2.05

4.1.4.5 Chemical soil attributes

All soils are acid with pH ranging from 2.71 (P4) to 6.39 (P6) (Table 3). The most acid are those with gleying (P3, P4, P11, P12), where sulfurization occurs. Base saturation is variable, with high values (> 50%) in P3, P4, P5, P6, P8, P9, P10, P11 and P12. Most soils are sodium (Na⁺) affected, with high contribution in the base saturation. Na⁺ range between 0 to 22.32 cmol_c.kg⁻¹ (with many high values > 4 1000 cmol_c.kg⁻¹) in the mangrove and inundated salt plain (P3, P4, P6, P8, P9, P10, P11, P12). The Electric Conductivity (EC) is also variable (0 to 42.70 dS m⁻¹). The ESP range from 0 to 60.76%, and most soils with high Na⁺ have salt-affected characteristics (EC > 4.00 dS m⁻¹; ESP > 15%), such as P3, P4, P6, P8, P9, P10, P11 and P12.

Available phosphorous (P) exist in low to high values (0.3 to 1230.4 mg.kg⁻¹). High P (> 50 mg.kg⁻¹) were detected in P15, P16, P17 and P18, on well-drained uplands. Potassium (K⁺) ranged from 0 to 367 mg.kg⁻¹, with high values in flooded soils (P3, P4, P6, P8, P9, P10, P11). Aluminium saturation is also very variable (0 to 90.4%), with high contents (> 70 %) in P1, P2, P7, P13, P14 and P19 with Al³⁺ ranging of 0 to 7.28 cmol_c.kg⁻¹. Calcium (Ca²⁺) varied from 0.11 to 3.87 cmol_c.kg⁻¹ and Magnesium (Mg²⁺) from 0.02 to 12.14 cmol_c.kg⁻¹. High Ca²⁺ and Mg²⁺ are found in P3, P4, P6, P8, P9, P10, P11 and P12. The organic carbon contents vary according to vegetation cover, landscape position and anthropogenic influences, being commonly high in most surface horizons (3.15 to 70.19 g kg⁻¹) and some subsurface horizon (3.89 to 56.32 g.kg⁻¹) excepting the C horizons (0.75 to 2.37 g.kg⁻¹). In P4, P8 and P12, the organic carbon contents increased in subsurface (Table 3), by podzolization process.

Heavy metals such as lead (Pb), cadmium (Cd), nickel (Ni) and Chromium (Cr) were detected in most soils (Table 4). The Pb has great adsorption (MILLER; MC FEE, 1983; PARKER; FEE; KELLY, 1978), less mobility and accumulate at surface (CHANEY, 1991). Pb high values concentrates at the surface of most upland anthropogenic soils of Marajó Island, such as P16 (29.81 mg.kg⁻¹), P17 (8.77 mg.kg⁻¹), P18 (2.29 mg.kg⁻¹), P20 (2.07 mg.kg⁻¹). In P15 high values to Pb occurs in subsurface (120 cm depth, 0.34 mg.kg⁻¹). Chromium was not detected in P1, P17 and P19, with low Cr values in P18 and P20 in subsurface (0.03 to 0.16 mg.kg⁻¹), while P7 and P15 present higher values (0.02 to 1.25 mg.kg⁻¹).

Table 3: Chemical attributes of studied soils at Marajo Island, Brazilian Amazonia.

Hor.	Depth.	pH	pH	P	K	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	BS	CECef	CECpt	PBS	Al ³⁺	ESP	EC	TOC	P-rem
	cm	H ₂ O	KCl	mg.kg ⁻¹											sat.				
cmolc.kg ⁻¹																			
P1 Xanthic Haploperox																			
Ap	0-8	4.88	3.63	2.7	0.05	0	0.38	0.2	1.51	9.4	0.63	2.14	10.03	6.3	70.6	0	0.15	25.46	29
A2	8-20	5.05	3.82	1.1	0.02	0	0.21	0.1	1.32	7.8	0.34	1.66	8.14	4.2	79.5	0	0.08	17.75	25.6
AB	20-40	4.64	3.87	1.1	0,01	0	0.13	0.07	1.32	7.6	0.21	1.53	7.81	2.7	86.3	0	0.04	17	21.9
BA	40-65	4.73	4	0.6	0	0	0.21	0.04	0.95	5.1	0.25	1.2	5.35	4.7	79.2	0	0.13	6.96	20.8
Bo1	65-100	4.97	4	0.4	0	0	0.14	0.03	0.76	2.8	0.17	0.93	2.97	5.7	81.7	0	0.04	1.57	25.5
Bo2	100-130	4.81	4.99	0.4	0	0	0.19	0.02	0.76	2.2	0.21	0.97	2.41	8.7	78.4	0	0.03	2.32	27.6
Bo3	130-164	4.72	3.98	0.4	0	0	0.11	0.02	0.76	2.2	0.13	0.89	2.33	5.6	85.4	0	0.08	1.57	27.4
Cc	165-190+	4.71	4	0.3	0	0	0.19	0.02	0.76	2	0.21	0.97	2.21	9.5	78.4	0	0.02	1.57	27.8
P2 Typic Haplorthods																			
A1	0-15	4.99	3.95	2.9	0.04	0	0.37	0.16	0.66	4.7	0.57	1.23	5.27	10.8	53.7	0	0.12	12.35	35.5
A2	15-32	5.08	4.1	2.7	0,01	0	0.22	0.05	0.66	5.5	0.28	0.94	5.78	4.8	70.2	0	0.08	10.03	24.9
AE	32-45	5.2	4.27	1.7	0	0	0.17	0.04	0.28	2.8	0.22	0.5	3.02	7.3	56	0	0.06	6.15	34.9
E	45-90	5.09	4.42	0.9	0	0	0.13	0.02	0.09	1.6	0.15	0.24	1.75	8.6	37.5	0	0.04	2.32	40.7
Bsm1	90-110	5.13	4.59	1.4	0	0	0.27	0.03	0.19	4.2	0.3	0.49	4.5	6.7	38.8	0	0.05	6.15	13.5
Bsm2	110-130	5.06	4.55	1.1	0	0	0.15	0.01	0.19	2.8	0.16	0.35	2.96	5.4	54.3	0	0.05	3.89	27.5
Bhsm	130+	5.04	4.55	1.1	0	0	0.21	0.02	0.38	5.1	0.23	0.61	5.33	4.3	62.3	0	0.04	6.15	20.9
P3 Sulfic Psammowassents																			
Cg1	0-20	4.97	4.5	6.7	0.38	7.26	1.72	4.23	0	3.3	13.6	13.6	16.9	80.5	0	42.98	11.29	24.71	49.5
Cg2	20-40	4.96	4.52	6.9	0.41	7.96	1.64	4.53	0	2.5	14.55	14.55	17.05	85.3	0	46.7	14.21	18.5	51
Cg3	40-60	4.17	3.77	6.2	0.24	6.82	1.37	3.04	0.28	3.6	11.48	11.76	15.08	76.1	2.4	45.26	14.55	17.75	44.1
Cg4	60-80+	3.03	2.96	4.4	0,01	3.76	0.69	1.43	1.51	3.4	5.9	7.41	9.3	63.4	20.4	40.48	8.43	6.96	45.9
P4 Typic Sulfiwassents																			
Cg1	0-20	4.58	4.25	12.7	0.9	15.53	3.54	9.11	0	8.6	29.09	29.09	37.69	77.2	0	41.21	29.2	70.19	29
Cg2	20-40	3.67	3.39	17.8	0.66	22.32	3.87	12.14	0.76	8.3	39	39.76	47.3	82.5	1.9	47.19	42.7	47.85	31.9
Cg3	40-60	4.9	4.69	30.8	0.93	20.56	3.18	9.2	0	5.1	33.88	33.88	38.98	86.9	0	52.75	30.2	56.32	34.4

Cg4	60-80+	2.71	2.47	16.5	0.07	18.81	3.37	11.97	3.88	13.7	34.23	38.11	47.93	71.4	10.2	39.25	40.7	48.61	29.4	
P5 Typic Quartzipsamments																				
A	0-12	5.6	4.44	10.4	0.08	0,01	1.19	0.59	0	1.7	1.89	1.89	3.59	52.6	0	0.5	0.1	8.47	59	
C1	12-45	5.23	3.92	4.4	0.01	0	0.32	0.13	0	0.5	0.46	0.46	0.96	47.9	0	0	0.06	1.57	58.6	
C2	45-80	5.24	4.02	2.4	0	0	0.18	0.14	0	0.3	0.33	0.33	0.63	52.4	0	0	0.05	1.57	57.1	
C2	80-120	4.97	3.92	4.1	0.02	0	0.32	0.22	0.19	0.6	0.56	0.75	1.16	48.3	25.3	0	0.08	1.57	58.2	
C2	120-140+	5.2	4.08	3.1	0	0	0.23	0.18	0	0.5	0.41	0.41	0.91	45.1	0	0	0.05	1.57	54	
P6 Sodic Hydraquents																				
A	0-12	4.02	3.45	2.1	0.21	10.06	1.36	5.58	1.04	6.2	17.22	18.26	23.42	73.5	5.7	42.99	14.08	16.18	25.9	
AB	12-17	3.98	3.42	2.8	0.27	12.69	1.65	5.83	0.95	5.1	20.44	21.39	25.54	80	4.4	49.69	20	10.03	24.7	
Bgw	17-25	4.97	4.25	2.9	0.32	8.75	1.77	6.17	0.19	2.2	17.02	17.21	19.22	88.6	1.1	45.56	12.33	6.15	30.9	
Cg1	25-40	5	4.27	1.8	0.45	10.94	1.78	6.41	0	2.3	19.58	19.58	21.88	89.5	0	50.01	11.01	6.15	30.4	
Cg2	40-70+	6.39	5.59	3.1	0.51	10.28	1.68	6.08	0	0.3	18.56	18.56	18.86	98.4	0	54.54	12.86	2.32	36.3	
P7 Typic Haploperox																				
Ap	0-15	5.1	3.87	5.4	0.13	0	2.85	0.67	0.66	9.4	3.67	4.33	13.07	28.1	15.2	0.07	0.11	25.46	28.8	
AB	15-60	4.91	3.81	1.5	0.01	0	0.43	0.14	1.61	6.9	0.59	2.2	7.49	7.9	73.2	0	0.1	9.28	17.1	
BA	60-80	4.85	3.82	0.8	0.01	0	0.3	0.09	1.61	6.2	0.41	2.02	6.61	6.2	79.7	0	0.09	8.47	16.4	
Bo1	80-110	4.87	3.87	0.6	0.01	0	0.24	0.05	1.61	4.4	0.3	1.91	4.7	6.4	84.3	0	0.05	4.64	15.7	
Bo2	110-140	4.88	3.84	0.4	0.01	0	0.28	0.06	1.89	3.1	0.35	2.24	3.45	10.1	84.4	0	0.06	2.32	24.9	
Bo3	140-195	4.88	3.75	0.4	0.01	0	0.21	0.05	1.89	3.4	0.27	2.16	3.67	7.4	87.5	0	0.07	1.57	22.4	
Cc	195-250+	4.85	3.72	0.5	0	0	0.2	0.05	2.46	3.9	0.26	2.72	4.16	6.2	90.4	0	0.08	1.57	15.7	
P8 Sodic Hydraquents																				
A	0-30	5.97	3.81	8.4	0.27	1.41	1.05	2.46	0.28	4.2	4.92	5.2	9.12	53.9	5.4	12.51	0.3	20.07	35.9	
Bw	30-35	5.33	4.08	2.8	0.49	3.93	1.61	4.99	0.19	4.2	11.03	11.22	15.23	72.4	1.7	25.87	2.27	13.86	31.1	
Cg1	35-65	5.38	4.8	2.1	0.04	1.4	0.28	0.38	0	0.2	2.11	2.11	2.31	91.3	0	60.76	3.41	1.57	58.6	
Cg2	65-110	4.91	3.94	3.5	0.42	5.6	1.47	4.88	0.19	2	12.38	12.57	14.38	86.1	1.5	38.95	5.38	6.15	37.3	
Cg3	110-130+	3.19	2.73	3.2	0.21	4.2	1.46	4.91	2.93	7.6	10.79	13.72	18.39	58.7	21.4	22.85	4.54	16.18	33.1	
P9 Sodic Hydraquents																				
Cg1	0-20	5.19	4.21	6	0.25	5.77	1.12	3.04	0	2.2	10.19	10.19	12.39	82.2	0	46.62	4.03	6.15	42.5	
Cg2	20-40	4.89	4.1	6	0.39	12.25	1.58	5.07	0	3	19.3	19.3	22.3	86.5	0	54.95	7.32	8.47	38.8	
Cg3	40-60	4.75	3.92	5.4	0.46	14.44	1.58	5.56	0	1.9	22.05	22.05	23.95	92.1	0	60.3	7.2	4.64	38.1	

Cg4	60-80	5.22	4.41	4.6	0.51	14.44	1.71	5.65	0	1.6	22.32	22.32	23.92	93.3	0	60.37	5.8	3.89	39.6
Cg5	80-100	6.24	5.35	6	0.54	15.09	1.93	6.73	0	0.9	24.3	24.3	25.2	96.4	0	59.91	9.69	2.32	36.1
Cg6	100-120	6.12	5.25	8	0.53	16.19	2.27	8.13	0	1.1	27.12	27.12	28.22	96.1	0	57.37	9.8	4.64	36.2
P10 Sodic Hydraquents																			
A	0-10	5.42	3.77	6	0.14	0.37	1.86	1.64	0.47	3.9	4.02	4.49	7.92	50.8	10.5	4.75	4.02	12.35	37.9
Cg1	10-25	4.89	3.66	2.6	0.24	3.94	1.81	6.1	0.28	2.7	12.09	12.37	14.79	81.7	2.3	26.64	3.21	5.39	35.1
Cg2	25-40	5.6	4.43	6	0.47	5.95	2.12	6.76	0	2.2	15.31	15.31	17.51	87.4	0	33.99	4.94	3.89	32.8
Cg3	40-110+	5.72	4.55	3.4	0.32	5.34	1.25	4.57	0	0.6	11.48	11.48	12.08	95	0	44.2	4.99	0.75	47.4
P11 Sulfic Hydraquents																			
A	0-15	2.76	2.52	30.2	0.01	3.94	2.43	6.27	6.24	11.2	12.66	18.9	23.86	53.1	33	16.51	12.9	17.75	31.5
Cg1	15-28	2.75	2.55	20.4	0.02	3.15	1.95	4.56	5.58	12.3	9.68	15.26	21.98	44	36.6	14.34	11.8	24.71	28.5
Cg2	28-55	2.75	2.47	36.9	0.03	5.16	2.43	8.7	7.28	13.7	16.33	23.61	30.03	54.4	30.8	17.2	18.7	30.86	27.2
Cg3	55-80+	3.04	2.67	29.4	0.02	3.5	2.54	6.33	3.5	7.5	12.39	15.89	19.89	62.3	22	17.61	10.56	10.03	30.9
P12 Sodic Hydraquents																			
A	0-15	5.78	4.89	2.1	0.09	0.84	0.49	0.55	0	0.6	1.97	1.97	2.57	76.7	0	32.68	4.21	4.64	54
Cg1	15-80	3.7	3.07	14.1	0.56	6.47	1.79	5.99	1.7	5.6	14.82	16.52	20.42	72.6	10.3	31.71	4.05	10.03	23.9
Cg2	80-130	4.35	3.47	17.7	0.56	5.42	2.19	6.45	0.66	3.7	14.63	15.29	18.33	79.8	4.3	29.6	3.31	3.07	15.2
Cg3	130-180+	4.69	3.83	22.4	0.82	6.56	2.58	7.86	0.09	2.7	17.83	17.92	20.53	86.8	0.5	31.97	3.48	3.07	25.6
P13 Typic Haploperox																			
Ap	0-15	4.85	3.92	1.8	0.02	0	0.25	0.1	1.61	10	0.38	1.99	10.38	3.7	80.9	0	0.05	27.78	5.9
AB	15-30	4.87	3.94	1.4	0.01	0	0.24	0.03	1.61	8	0.28	1.89	8.28	3.4	85.2	0	0.04	16.18	8.7
BA	30-42	4.75	3.92	2.4	0.01	0	0.27	0.03	1.42	6.9	0.31	1.73	7.21	4.3	82.1	0	0.03	12.35	10.2
Bw	42-70	4.72	3.88	1.3	0	0	0.29	0.05	1.32	4.8	0.35	1.67	5.15	6.8	79	0	0.04	6.96	12.7
Bwv1	70-100	4.77	3.82	1.7	0	0	0.26	0.05	1.23	3.6	0.31	1.54	3.91	7.9	79.9	0	0.05	3.89	18
Bwv2	100-125	4.75	3.78	1	0	0	0.25	0.03	1.61	3.4	0.28	1.89	3.68	7.6	85.2	0	0.02	2.32	16.2
Bwv3	125-150+	4.83	3.77	0.6	0	0	0.23	0.04	1.42	3.4	0.27	1.69	3.67	7.4	84	0	0.02	2.32	15.8
P14 Typic Hydraquents																			
Ap	0-12	5	3.73	7.6	0.11	0.05	0.55	0.25	1.51	9.2	0.97	2.48	10.17	9.5	60.9	0.52	0.23	33.93	19.4
A2	12-32	4.77	3.83	2.5	0.02	0	0.31	0.04	1.51	5.5	0.37	1.88	5.87	6.3	80.3	0	0.09	7.71	21.3
A3	32-55	4.31	3.73	4.1	0.01	0	0.23	0.02	1.7	8.1	0.26	1.96	8.36	3.1	86.7	0	0.05	17	19.4
ACg	55-80	4.47	3.73	2.3	0.01	0	0.3	0.02	1.7	6.7	0.33	2.03	7.03	4.7	83.7	0	0.11	11.6	21.3

Cg1	80-140+	5.07	3.66	0.9	0.02	0	0.36	0.61	2.74	5.5	0.99	3.73	6.49	15.3	73.5	0	0.08	3.89	12.3	
P15 Typic Udipsammments																				
1	0-10	4.59	3.45	313.9	0.35	0	0.91	0.19	0.95	6.9	1.45	2.4	8.35	17.4	39.6	0	-	10.79	37.3	
3	20-30	4.99	3.6	681.3	0.41	0.01	1.5	0.22	0.76	7.3	2.17	2.93	9.47	22.9	25.9	0.19	-	8.47	37.3	
4	30-40	5.21	3.77	1230.4	0.35	0.05	2.3	0.39	0.47	7.2	3.1	3.57	10.3	30.1	13.2	0.51	-	6.96	39.1	
6	50-60	5.14	3.87	852.9	0.18	0.07	2.4	0.51	0.28	5.9	3.17	3.45	9.07	35	8.1	0.78	-	6.15	39.7	
9	80-90	5.13	4.07	541.6	0.1	0.05	1.7	0.55	0.19	4.8	2.4	2.59	7.2	33.3	7.3	0.72	-	3.89	39.4	
13	120-130	5.51	4.16	488.7	0.14	0	1.5	0.4	0.19	3.9	2.03	2.22	5.93	34.2	8.6	0	-	3.13	47.3	
15	140-150	5.53	4.17	352.1	0.15	0	1.4	0.28	0.19	3.4	1.86	2.05	5.26	35.4	9.3	0	-	1.57	49	
18	170-180	5.29	4.21	399.2	0.18	0.07	1.5	0.32	0.19	3.1	2.11	2.3	5.21	40.5	8.3	1.34	-	0.75	48	
P16 Typic Udipsammments																				
Ap1	0-15	5.48	4.74	63.6	0.14	0	3.3	0.36	0	3.3	3.79	3.79	7.09	53.5	0	0	0.09	10.9	49.1	
Ap2	15-40	5.46	4.33	306.2	0.05	0	3.1	0.43	0	4.8	3.63	3.63	8.43	43.1	0	0.1	0.08	7.77	43.3	
Ap3	40-75	5.62	4.42	405.1	0.07	0.03	4.2	0.84	0	4.2	5.13	5.13	9.33	55	0	0.37	0.09	7.02	44.9	
AC	70-120+	5.35	4.17	164.5	0.05	0.01	3.5	0.36	0	4.1	3.96	3.96	8.06	49.1	0	0.22	0.07	5.45	48.4	
P17 Xanthic Haploperox																				
Ap	0-58	4.81	3.82	143.5	0.02	0	0.88	0.06	0.57	5.9	0.97	1.54	6.87	14.1	37	0.13	0.13	11.72	40.9	
AB	58-78	5.02	3.87	8.1	0.11	0.04	0.6	0.31	0.66	5	1.07	1.73	6.07	17.6	38.2	0.72	0.13	10.15	37.1	
Bo	78-133	5.33	4.39	34.1	0.01	0	0.77	0.1	0	0.9	0.88	0.88	1.78	49.4	0	0	0.08	1.57	52.2	
P18 Plintic Haploperox																				
Ap	0-22	5.48	4.38	98.8	0	0	1.32	0.1	0	2.7	1.42	1.42	4.12	34.5	0	0	0.16	3.89	45.5	
AB	22-38	4.75	3.85	4.1	0.01	0.04	0.35	0.11	1.04	4.5	0.52	1.56	5.02	10.4	66.7	0.87	0.15	5.45	34	
Bo	38-88	4.74	3.88	3.4	0.03	0.04	0.45	0.23	0.76	3	0.77	1.53	3.77	20.4	49.7	1.38	0.22	3.89	40.1	
P19 Plintic Haploperox																				
Ap	0-52	5.14	4.09	1.6	0.01	0	0.38	0.04	1.13	8.4	0.43	1.56	8.83	4.9	72.4	0	0.08	21.81	15.6	
BA	52-67	5.06	4.24	1	0	0	0.27	0.02	0.76	5.6	0.29	1.05	5.89	4.9	72.4	0	0.06	13.23	16	
Bw	67-97	5.1	4.35	0.3	0	0	0.34	0.03	0.28	2.8	0.37	0.65	3.17	11.7	43.1	0	0.06	3.89	22.3	
Bc	97-120+	5.26	4.37	0.1	0	0	0.38	0.15	0.19	1.4	0.53	0.72	1.93	27.5	26.4	0	0.05	2.32	33.5	
P20 Typic Dystrudepts																				
Ap	0-21	4.93	3.82	8	0.18	0.07	1.09	0.76	1.04	8.4	2.1	3.14	10.5	20	33.1	0.66	0.17	23.38	30.5	
AB	21-38	4.97	3.84	2.8	0.1	0.03	0.57	0.25	1.32	6.6	0.95	2.27	7.55	12.6	58.1	0.46	0.12	11.72	22.2	

BA	38-63	4.94	3.88	1.6	0.05	0.04	0.35	0.16	1.32	5	0.61	1.93	5.61	10.9	68.4	0.78	0.14	7.02	22.8
Bw	63-80+	5.04	3.87	2.3	0.07	0.09	0.64	0.34	1.04	4.2	1.15	2.19	5.35	21.5	47.5	1.79	0.22	7.02	29

BS - bases sum, CECef - effective cation exchange capacity, CECpt - potential cation exchange capacity, PSB - percent of base saturation, Alsat - percent of Al saturation, EPS - Exchangeable Sodium Percentage, EC - Electric conductivity, TOC - total organic carbon, P-rem – remain phosphorus.

Table 4: Chemical attributes (micronutrients) of the studied soils at Marajo Island, Brazilian Amazonia.

Pedon	Hor.	Depth cm	Cu	Mn	Fe	Zn	Cr	Ni	Cd	Pb
			mg/kg ⁻¹							
1	Ap	0-8	0.72	0.7	87.4	1.1	0	0	0	1.32
	A2	8-20	0.33	0.2	66.2	0	0	0	0	1
	AB	20-40	0.25	0.2	104.7	0.35	0	0.15	0	1.16
	BA	40-65	0.29	0.2	101.5	0.19	0	0.17	0	1.08
	Bo1	65-100	0.34	0.1	125.4	0.15	0	0	0	1.08
	Bo2	100-130	0.42	0.1	80.3	0.29	0	0.2	0	1.38
	Bo3	130-164	0.38	0.1	58.5	0.24	0	0.09	0	1.27
	Cc	165-190+	0.47	0.1	28.8	0.02	0	0	0	1.24
2	A1	0-15	0.36	0.7	10.9	0.38	0	0.45	0	1.2
	A2	15-32	0.29	0.4	11.4	0.33	0	0.35	0	1.05
	AE	32-45	0.29	0.3	5.8	0.28	0.02	0.35	0	1.39
	E	45-90	0.47	0.3	8.4	0.01	0.13	0	0	4.42
	Bsm1	90-110	0.43	0.2	37.9	0.41	2.8	0.56	0.17	1.26
	Bsm2	110-130	0.34	0.2	21.7	0.38	1.15	0.48	0	1.57
	Bhsm	130+	0.35	0.3	20.8	0.17	1.82	0.08	0	1.31
3	Cg1	0-20	0.97	3.2	111.3	1.29	0	0.75	0.02	1.28
	Cg2	20-40	0.87	3	87.6	1.1	0	0.99	0	1.51
	Cg3	40-60	0.87	4.6	169.8	2.49	0	1.41	0	1.13
	Cg4	60-80+	0.85	1.8	163.9	5.64	0.01	2.77	0	1.12
4	Cg1	0-20	1.7	11.6	1369.3	4.56	0.26	1.99	0	0.75

5	Cg2	20-40	2.14	20.7	1002.9	8.55	0.23	3.43	0	1.8
	Cg3	40-60	1.65	14.2	1251	5.22	0.24	2.31	0	1.43
	Cg4	60-80+	1.29	47.8	969.8	11.48	0.28	3.98	0	0.3
	A	0-12	0.5	8.8	96.7	1.87	0	0.59	0	1.33
	C1	12-45	0.36	6.7	139.8	1.25	0.06	0.61	0	1.35
	C2	45-80	0.4	3.7	99.2	1.06	0.04	0.56	0	0.95
	C2	80-120	0.38	9	120.5	3.79	0	0.57	0	1.04
6	C2	120-140+	0.38	4.9	103.5	1.3	0.05	0.59	0	1.04
	A	0-12	0.81	3.2	364.4	1.97	0.29	1.32	0	1.28
	AB	12-17	1.14	4.6	573.7	2.55	0.49	1.2	0	1.63
	Bgw	17-25	1.69	11.4	960.2	2.32	0.54	1.21	0	1.64
7	Cg1	25-40	1.41	5.5	119.7	1.26	0.12	0.85	0	1.64
	Cg2	40-70+	1.68	7.1	171.9	1.33	0.33	0.95	0	1.47
	Ap	0-15	0.64	6.5	131.8	1.54	0.33	0.68	0	0.92
	AB	15-60	0.45	1.5	159.2	5.23	0.44	0.72	0	1.25
	BA	60-80	0.47	1.3	122.4	3.13	0.39	0.57	0	1.25
	Bo1	80-110	0.54	1.9	142.9	0.92	0.65	0.76	0	1.42
	Bo2	110-140	0.49	0.4	39.4	0.92	0.43	0.48	0	1.62
8	Bo3	140-195	0.22	0.1	19.9	0.77	1.08	0.62	0	0
	Cc	195-250+	0.19	0.1	29.7	0.34	0.98	0.58	0	0.06
	A	0-30	1.09	11.5	152.2	2.2	1.28	1.17	0	0
	Bw	30-35	1.42	2.4	146.8	1.64	1.35	1.39	0	10.4
	Cg1	35-65	0.48	0.4	15.7	0.6	0.32	0.62	0	1.29
	Cg2	65-110	1.48	0.9	107.7	0.95	0.31	0.86	0	1.54
	Cg3	110-130+	2.19	2.5	155	2.44	0.46	5.48	0	1.74
9	Cg1	0-20	1.5	1.6	127.2	1.52	0.4	1.45	0	1.28
	Cg2	20-40	1.17	1.5	75.4	1.6	0.47	1.38	0	1.83
	Cg3	40-60	1.27	0.9	41.6	1.02	0.41	0.92	0	1.75
	Cg4	60-80	1.26	1.9	82	1.08	0.4	1.02	0	1.21
	Cg5	80-100	1.19	4.6	107.4	0.98	0.48	0.92	0	1.71
	Cg6	100-120	1.28	6.3	156	1.27	0.55	0.88	0	1.92

10	A	0-10	0.97	7.4	565.1	1.98	0.55	1.67	0	0.88
	Cg1	10-25	1.18	7.2	50	1.84	0.48	0.47	0	0
	Cg2	25-40	1.21	16.1	92.6	2.29	0.6	0.42	0	0
	Cg3	40-110+	0.65	4.4	51.2	0.59	0.47	0.53	0	0
11	Cg1	0-15	1.36	9.8	157.7	11.25	1.08	3.66	0	0
	Cg2	15-28	1.09	6.7	158.8	16.78	0.98	4.71	0	0
	Cg3	28-55	1.6	12.3	167.4	12.6	1.35	4.33	0	0
	Cg4	55-80+	2.08	20.6	159.7	9.73	1.14	2.94	0	0
12	A	0-15	0.29	0.3	95.1	0.3	0.56	0.29	0	0
	Cg1	15-80	2.22	19.5	152.9	2.66	0.81	1.27	0	0
	Cg2	80-130	2.49	34.6	153.2	2.45	0.76	1.18	0	0.31
	Cg3	130-180+	2.76	15.1	160.6	1.67	0.93	1.34	0	0.54
13	Ap	0-15	0.1	0.7	23.9	0.34	0.91	0.45	0	0.17
	AB	15-30	0.23	0.6	34.8	0.57	0.9	0.45	0	0.11
	BA	30-42	0.1	0.4	55.4	0.31	0.97	0.37	0	0.07
	Bw	42-70	0.13	0.4	78.5	0.34	1.11	0.48	0	0
	Bwv1	70-100	0.18	0.2	48.6	0.38	1.13	0.49	0.08	0
	Bwv2	100-125	0.14	0.1	10	0.27	0.8	0.49	0	0
	Bwv3	125-150+	0.32	0.2	7.6	0.4	0.81	0.49	0	0.23
14	Ap	0-12	0.37	3.7	118	1.2	0.97	0.65	0.01	0.17
	A2	12-32	0.17	0.7	23.2	0.48	1.06	0.62	0	0.28
	A3	32-55	0.12	0.5	27.2	0.38	0.93	0.66	0.03	0.52
	Acg	55-80	0.07	0.5	20	0.03	0.87	0.11	0	0.58
	Cg1	80-140+	0.33	1	59.3	0.44	1.1	0.48	0.03	0.1
15	1	0-10	1.53	27.7	121.8	3.23	0.97	0.65	0.06	0
	3	20-30	1.73	50.3	100.4	19.19	1.15	0.93	0	0
	4	30-40	2.41	36.3	113.2	32.35	1.23	1.15	0	0
	6	50-60	2.29	23.7	97.7	19.63	1.25	0.85	0.03	0
	9	80-90	1.64	16.8	114.7	7.93	0.02	1.09	0.42	0
	13	120-130	1.39	7.2	117.3	3.6	0	0.72	0.4	0.34
	15	140-150	1.16	5.6	114.7	1.58	0.18	1.08	0.38	0.38

	18	170-180	1.16	8.6	179.9	1.42	0.03	0.83	0.36	0.63
16	Ap1	0-15	1.91	33.9	82.5	8.02	0	1.03	0.48	29.81
	Ap2	15-40	3.33	14.4	71.3	16.09	0	0.84	0.41	3.56
	Ap3	40-75	2.05	10	120	3.99	0	0.98	0.36	1.2
	AC	70-120+	1.59	6.2	127	2.25	0	0.9	0.45	1.11
17	Ap	0-58	2.17	15.5	101.3	8.29	0	0.99	0.4	8.77
	AB	58-78	0.7	3	155.2	1.05	0	0.74	0.36	2.47
	Bo	78-133	0.6	0.4	7.3	0.82	0	0.7	0.29	0.88
18	Ap	0-22	22.94	5.3	37.1	42.72	0	0.92	0.36	1.88
	AB	22-38	0.72	3.6	323.1	1.14	0	0.74	0.28	2.29
	Bo	38-88	0.6	1.4	149.8	1.04	0.15	0.85	0.22	1.24
19	Ap	0-52	0.39	0.6	61.4	0.93	0	1.02	0.4	0.97
	BA	52-67	0.44	0.3	70	0.91	0	1.01	0.3	1.34
	Bw	67-97	0.45	0.3	107.3	0.72	0	0.94	0.38	0.92
	Bc	97-120+	0.48	0.4	14.6	0.75	0	0.76	0.23	1.43
20	Ap	0-21	0.57	1.8	121.2	3.01	0	0.89	0.15	2.07
	AB	21-38	0.51	0.8	97.1	1.12	0.03	0.94	0.22	1.7
	BA	38-63	0.46	0.6	99	0.91	0.16	0.89	0.09	1.67
	Bw	63-80+	0.62	1.1	53.9	1.31	0.02	1.11	0.19	1.54

4.1.5 Discussion

4.1.5.1 Pedo-geomorphological evolution and ^{14}C radiometric dating

The Marajó Island landscape show the combined influences of fluvial, marine and climate, forming vegetation gradients subjected to long-term anthropic processes that affected soil genesis and evolution during the Holocene (FRANÇA et al., 2012; MIRANDA; ROSSETTI; PESSEDA, 2009; SCHAAN, 2010; SILVA et al., 2018). Upland soils (>10m a.s.l) usually have thicker B horizon (P1, P7, P17, P18, P19), episodically affected by marine incursions during Holocene (BEHLING; COHEN; LARA, 2004; CASTRO; ROSSETTI; RUIZ PESSEDA, 2010), with concretionary (degraded) ironstone with depth (HORBE; COSTA, 1997; ROSSETTI; BEZERRA; DOMINGUEZ, 2013).

Deep ironstones represent old surface “ferruginous duricrusts” (Cangas), forming petroplinthic concretions, with ages from Oligocene to Holocene (28-0 Ma), formed by ancient groundwater oscillations (ROSSETTI; BEZERRA; DOMINGUEZ, 2013). The wet rainforest and long-term humid tropical climate in Amazonia favoured weathering of these duricrusts, resulting in Latossols formation (COSTA, 1991; HORBE; COSTA, 1997, 1999). The process consists in duricrust degradation, kaolinite formation by the combined aluminium and silica released by the dissolution of minerals and pedobioturbation under wet climate and forest cover conditions (HORBE; COSTA, 1997, 1999). Previous studies suggest this duricrust as a paleosoil mantle that marks the post-Barreiras sedimentary environment (ROSSETTI; BEZERRA; DOMINGUEZ, 2013; TATUMI et al., 2008).

P1 and P7 are located at eastern Marajó Island highland under rainforest, not submitted to annual flooded and with signs of soil formation from duricrust. Both soils present size gradient decrease of duricrusts fragments from the base horizon (Cc) to organic horizon (AB), present typical granular and subangular block, bichrome in P7 soil (yellowish superficial horizon and reddish subsurface horizon) and P1 ^{14}C dating of depth charcoal (Bw3, 150cm) shows 4510 years (BP). It was interpreted P1 and P7 were developed from duricrust degradation, by geochemical and pedobioturbation

process by the Holocene climatic oscillations in the late Holocene. The thicker and older soils in Marajó Island showed high Al^{3+} saturation (> 70%) combined to acid pH (4.64 to 5.33). Thus, most of CEC are occupied by exchangeable Al^{3+} reaching toxic levels (ABREU JR.; MURAOKA; LAVORANTE, 2003), resulting from the kaolinitic mineralogy under Holocene climate (Ikiriko et al., 2016).

The intense soil formation at the sandy domain at the transition between uplands and floodplain at eastern Marajó (P2), is characterized by a SW-NE arrangement pattern of sandy hills recognized with UAV images. These soils occupy an ancient broad estuarine depositional system of late Pleistocene to Holocene (CASTRO; ROSSETTI; RUIZ PESSEDA, 2010; ROSSETTI; VALERIANO; THALES, 2007), with dating ages of formation ranging from 3400 to 3184 yr. B.P. (CASTRO; ROSSETTI; RUIZ PESSEDA, 2010; TATUMI et al., 2008). The illuvial nature of organic matter in P2 is revealed by well-formed subsurface B_{hsm} rich in illuvial humus impregnations complex by iron and aluminium no inactive and fossil B_{hsm}. The ^{14}C dating of subsurface spodic horizon (B_{hsm}) present 3330 yr. B.P. and indicates podzolization process superimposed on fluvial sandy deposits in the late Holocene. Vegetation is a hydromorphic savanna, very contrasting with most podzolized soils in the Amazon basin, that are usually under *Campinarana* ecosystems (MENDONÇA et al., 2015). At present, P2 does not possess enough waterlogging to allow for B_{hs} formation, and the savanna vegetation cover indicate the present day dry-and-wet climate.

Salt flat terraces occurs in 4254 km² of the lowlands, representing 11.1% of Marajó Island. The Apicum is a specific sandy salt flat at the transition ecosystem just above the mangrove, represented by a grassy herbaceous vegetation, Na^+ affected soils and limited shallow tidal effects (ALBUQUERQUE et al., 2014; VIEILLEFON, 1969). The continuum Mangrove-Apicum is part of a complex and fragile hotspot for reproduction and shelter of key marine species, sustaining the riverside fishing/collecting of communities. (FRANÇA et al., 2012).

Many halophytes plants are present at Apicum, such as *Sesuvium portulacastrum*. The Apicum present *Carnaúba* (*Copernicia prunifera* (Miller) H. E. Moore (Arecaceae)), that is recognized as a typical palm tree from the Brazilian semiarid region (SOUSA et al., 2015) for the first time described in Amazonia. If is a natural occurrence, indicates

drier Early-Mid Holocene at the lower Amazon when *Carnaúba* expanded to the Amazon mouth. The late Holocene transition for wetter equatorial conditions kept the NE Marajó as a relict of high salt concentrations and high evapotranspiration, where *Carnaúba* trees still occur. As a second possibility, the intense economic exploitation for export and production of the *Carnaúba* wax, usually in the Brazilian Semiarid (LIMA, 2007), also may have introduced this species at Marajó in past centuries by anthropic occupies.

There is a consensus that Amazonia experienced drier tropical condition in early to mid-Holocene (8900 to 4460 yr. B.P.), with savanna expansion, followed by wetter climates in the late Holocene, with forest development (ABSY et al., 1991; BEHLING; HOOGHMSTRA, 1998; BERRÍO; BEHLING; HOOGHMSTRA, 2000; BUSH; COLINVAUX, 1988; DESJARDINS et al., 1996; FRANCISQUINI et al., 2014; FREITAS et al., 2001; HERMANOWSKI et al., 2012; MAYLE; POWER, 2008; MOREIRA et al., 2012). On the other hand, other studies suggest that there is no evidence for significant climatic change during most the Holocene (IRION et al., 2006; MIRANDA; ROSSETTI; PESSEDA, 2009; SILVA et al., 2018; ZANI et al., 2012). Our study highlights the Marajó soils have unquestionable pedological indicators that corroborate the hypothesis of a transition of drier early-mid Holocene to wetter conditions in the late Holocene, maintaining a relict of a seasonal climate patterns at the north-eastern sector of the island.

4.1.5.2 Geoarchaeology evidences

Marajó Island landscape has geoarchaeological vestiges of ancient human occupation represented by soils with thick surface organic horizons of Indian Black Earth (P1, P7, P13, P15, P16, P17, P18, P19, P20). Field observations, physical-chemical attributes as available phosphorous (P^+), calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), soil structure, texture, metals as Cr, Ni, Cd, Pb, Cu, Mn, Fe, Zn, and presence of ceramic indicates Indian Black Earth (IBE) had different genesis and evolution. Habitation, funeral and agriculture are the main primitive uses of archaeological sites whose components were incorporated by geomorphic and pedogenesis processes during Holocene (IBÁÑEZ-BONILLO, 2019; LISBOA, 2012; ROSSETTI; GÓES; TOLEDO, 2009; SCHAAN, 2010; SCHMIDT et al., 2014).

The extensive floodplain at the lowlands and the uplands of eastern Marajó are the place of intensive landscape management by human actives in the last 2000 yr. B.P., compared to the western forested zone of the island (MEGGERS, 1992; SCHAAN, 2010; SCHANN; MARTINS, 2010). Both lowlands and uplands show geoarchaeological legacies from pre-Colombian epochs (ca. 2000 yr. B.P.), and reaching the times of early Portuguese colonization (ca. 400 yr. B.P.) (IBÁÑEZ-BONILLO, 2019; LISBOA, 2012; MEGGERS; EVANS, 1957; ROSSETTI; GÓES; TOLEDO, 2009) (Fig. 24). The presence of high fertility IBE are the most outstanding feature in Amazonia, presenting a signature of high P^+ , Ca^{2+} , K^+ and Mg^{2+} amounts (LIMA et al., 2002; SCHAEFER et al., 2004; SOUZA et al., 2009), due to long term deposition of organic rich midden, and incomplete burning.

Recent cultivation promoted a mixing of soil archaeological and artifacts at Marajó. The drainage incision on ancient IBE and the absence of tidal influence favoured agricultural practices and human occupation in the uplands of Marajó, resulting in greater soil carbon accumulation. For example, P19 soil (Joanes) has thick organic horizon and cultivation until present day. The soil has low values of available P^+ (0.1 to 1.6 $mg.kg^{-1}$), Ca^{2+} (0.27 to 0.38 $cmol_c.kg^{-1}$) and high aluminium saturation (26.4 to 72.4%), with little visible ceramic fragments. The P17 soil is on the steep cliff edge at the old village of Joanes, adjacent to the Jesuit buildings from 1750 (LISBOA, 2012). This soil showed a rich pottery shards accumulation, combined with greater available P^+ (8.1 to 143.5 $mg.kg^{-1}$), but low amounts of Ca^{2+} (0.60 to 0.88 $cmol_c.kg^{-1}$) and Al^{3+} saturation smaller than P19 (0 to 38.2%). In many cases, the archaeological soils are not rich as IBE soils normally are.

The physic-chemical differences between P17 and P19 may be explained by the original inputs of organic materials incorporated into the soil, and post-abandonment anthropic cultivation. Near the coastline fishing is abundant and indigenous dwellings can accumulate nutrients and rich materials, with high Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ (LIMA et al., 2002; SCHAEFER et al., 2004), whereas inland areas far from the rivers or sea, have a much lower nutrients supply. In addition, the long-term cultivation and other human impacts affect soil nutrient status. Cultivation may have exhausted most of the available nutrients in Archaeological soils, so that, P19 presented lower nutrient figures compared with P17, due to its more intense cultivation after IBE formation.

P16 is located in Monsarás area, close to the Joanes plateau, and is represented by a thick IBE archaeological site rich in pottery fragments, aged between 180 and 430 yr. B.P. The post-colonial ages indicate the maintenance of an ancient settlement site with IBE since pre-Colombian timer, following the Portuguese colonization (MACHADO, 2009). This is a common feature of all IBE sites, which tend to become the preferential sites of colonial villages (MEGGERS; EVANS, 1957). The variable ages in P16 depth corroborant the long human occupation which turned and mixed its components. High Ca^{2+} (3.29 to 4.18 $\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$) and P^+ amounts (63.6 to 405.1 $\text{mg}.\text{kg}^{-1}$) corroborates great agricultural potential of some IBEs in easter Marajó.

While the well-drained uplands of eastern Marajó Island present a complex historical development of IBEs, the lowlands also present peculiarities. The inner lowlands were less disturbed by post-Colombian colonization compared to easter uplands (IBÁÑEZ-BONILLO, 2019; LISBOA, 2012). As a consequence, IBE would show higher values of nutrients. Anthropic soils are commonly found on Marajoara mounds (*tesos*). Mounds are considered as geoarchaeological floodplain sites built by Amazonian indigenous (DERBY, 1879; HECKENBERGER; NEVES, 2009; MEGGERS, 1992) and by natural process of fluvial and tidal-influenced resulted in channel and bar deposition during Pleistocene and Holocene (ARCO et al., 2006; MEGGERS; EVANS, 1957; ROSSETTI; GÓES; TOLEDO, 2009).

The P15 is located on a large mound of 22 meters high and shows soil-geomorphological evidences of natural pre-existing hill, refashioned by anthropogenic impacts. In P15, fine sand prevails, ranging from 0.800 to 0.873 g/kg, in an elongated landform (channel bar) surrounded by extensive floodplains. Pedological and anthropic process resulted in a well-developed IBE, with many ceramic fragments and rich organic matter. Available phosphorous present high values (313.9 to 1230.4 $\text{mg}.\text{kg}^{-1}$) and Ca^{2+} (1.4 to 2.3 $\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$) compared to all others anthropogenic soils studied. This unexpected high values of nutrients concentration in the inner areas of Marajó Island floodplain is associated with an ancient Indian hydraulic system for fish management (SCHAAN, 2010). This system was created by excavating depressions, usually near the existing mounds, to dam the waters for fish imprisonment during the flooding period for the dry periods (SCHAAN, 2010).

All the archaeological soils showed a limited bioaccumulation of lead (Pb), nickel (Ni), cadmium (Cd) or chromium (Cr). Most IBE in uplands showed high values of heavy metals compared to inland P13 and P15. Soils adjacent to the coastline (P17, P18, P19) showed an uniform subsurface heavy metals distribution, indicating disturbance and historical agriculture practices in the last five centuries by Portuguese colonization (LISBOA, 2012; SCHAAN, 2010). P7 and P15 with depth Pb, Cr, Ni and Cd variability suggest different moments of human occupation, and changes in the IBE by new addition.

4.1.5.3 Climate vulnerability and Marajó human adaptation

Global climate change has a large potential to impact Marajó Island ecosystem and the livelihood of its inhabitants (BARROS; ALBERNAZ, 2014; MARENGO; SOUZA JR., 2018). The soil-geomorphology evinces of landscape vulnerability reveals the coming of big changes for the next decades. Mangrove ecosystem response to climate change (GODOY; LACERDA, 2015). The coastal mangrove in eastern Marajó displays widespread marine erosion that progressively obliterate its ecosystems. Soil P12 has a physic-chemical discontinuity at the upper first 15 cm as resulted of tide sand deposition (86.2% of fine sand), with decreasing fine sand in subsurface (3.9 to 13.8%). The P11 represents a depositional-eroded dynamic, resulting in variable fine sand (14.7 to 56.3%), silt (31.8 to 54.4%), and clay (11.3 to 30.6%) proportions. P11 showed very acid pH at profile (2.75 to 3.04), that represent process of sulfurization by oxidation of sulphides, promoting sulphuric acid formation derived from intensive coastal marine erosion (FANNING, 1993).

These features corroborate the projections of Voudoukas et al. (2020) for the Brazilian coast, estimating losses between 30-50% of sandy beaches by 2100. Coastal zones with lower sedimentary supply are more vulnerable to wave attacks and increased erosion, resulting in the widespread retreat of mangroves (GOUDIE, 2013). The uplands overlying Barreiras and post-Barreiras sediments will be also affected in the remanent along the Marajó coastline with development of eroded cliffs. Today, beaches adjacent to the cliffs have a concentration of blocks as sign of intensive sea-water progradation (Fig.24).

In the hinterlands of Marajó Island, the ill-drained lowlands are also vulnerable to climate changes (CARMO; NUNES, 2008). Since nearly soil of Marajó Island has less than 4 meters above high tide level, the distribution of salt-affected soils indicates the nature dynamic of marine levels oscillation during the Holocene, resulting from climatic and eustatic variation. Sea-level rise at the coastal areas has the potential to change soil-geomorphic processes regulated by marine erosion. According to Goudie (2013), tidal range, isostatic land subsidence adjustment, and sedimentary processes represent a potential equilibrium disturbance of coastal zones. Global mean sea-level has increased in the last century and accelerated in the last 25 years (VOUSDOUKAS et al., 2020). Climate projections to Marajó Island indicate that most of alluvial lowlands might be flooded as a consequence of changing sea level and river dynamics (BARROS; ALBERNAZ, 2014; CARMO; NUNES, 2008; MARENGO; SOARES, 2003).

Beyond the changing environmental conditions, the local livelihood and food security will ultimately be affected and impacted at different dimension scales. Amazonia has been neglected in Brazilian climate politics in the last years (VIOLA; FRANCHINI, 2018; WIT; FREITAS, 2019), but this region is a key component of the Earth system at a macroscale, influencing global atmospheric circulation and dynamics of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ). Under these uncertainties and unpromising, deforestation is considered as the main vector of ecosystem instability in scenarios. Amazonia hydrological cycle, and climatic simulations highlights significant reductions in rainfall with directly consequences for the local people, already vulnerable (FEARNSIDE, 2009; MARENGO; SOUZA JR., 2018; WIT; FREITAS, 2019). In this regard, Marajó Island is expected to be affected by feedback process from deforestation of the Amazon basin.

4.1.6 Conclusions

1. The geoenvironmental stratification of Marajó Island reveal a unique setting of a complex heterogeneous Amazonian landscape that needs to be preserved and better know.
2. Morphological, physical, and chemical attributes of the Marajo soils reveal many proxies of Holocene landscape evolution. A range of geomorphic process driven by

fluvial-estuarine dynamics have a direct impact on soil formation processes. In addition, the anthropogenesis, landform evolution, pedoclimate, and vegetation are also key factors that influence the regional soil formation.

3. The soil ^{14}C dating suggests the onset of the well-drained soil formation at the mid to late Holocene. At the eastern uplands, soils were formed around 4510 years (BP), showing indicators of development from a former ferricrete surface by soil bichromy, reddening with depth, decreasing presence of concretions (duricrust fragments) to the surface soil, with latosolic (oxic) B horizon material, and organic matter accumulation that all indicate wetter conditions from the last 4000 years.

4. The Marajó mangrove-apicum system shows well-developed saline-sodic soils with *Sesuvium portuacastrum* and occasional *Carnaúba* (*Copernicia prunifera* (Miller) H.E. Moore (*Arecaceae*)) at the salt flats. *Carnaúba* is a native palm tree from Brazilian semiarid region and may indicate ancient drier conditions, now restricted and limited to high salinity soils in local remnants.

5. Extreme podzolization of ancient sandy deposits was dated at 3300 years (BP) by ^{14}C dating, in the late Holocene. At this time, high rainfall and water-table stand resulted in Spodosol formation by complexing organic matter with iron-aluminium. Currently, these sandy soils are covered by savanna, that suggests a complex evolution compared to most Spodosols from elsewhere in Amazonia, under *Campinarana* ecosystems.

6. Recent human land management blend together with widespread geoarchaeological sites of pre-Colombian times. Indian Black Earth (IBE) disturbed by historical agriculture practices are common in the eastern Marajó uplands, while inner lowlands, the IBEs are most preserved. Available P^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} are the main attributes that characterized the Anthropogenic soils and reveals different soil evolution. All archaeological soils showed unusual bioaccumulation of Pb, Ni, Cd and Cr, that suggests long-term human interference in soils. ^{14}C dating (180 to 430 yr. B.P.) reveals the maintenance of IBE associated with similar indigenous practices until colonial times.

7. Marajó Island is highly vulnerable to climate change scenarios, notably resulting from sea-level rising and global feedback process derived from Amazonia

deforestation. Presently, the mangroves are being progressively eroded, and flooding by the rising sea-level. The geoenvironmental stratification is a way of identifying the local needs to policies to food, and preservation of the complex island environments.

5. AMBIENTES SALINOS E IMPLICAÇÕES NA PAISAGEM DA ILHA DO MARAJÓ

Nesse capítulo são apresentados os principais resultados e discussões obtidos sobre a salinidade dos solos e seus significados ambientais. O primeiro item 6.1 corresponde às primeiras aproximações sobre o comportamento espectral de alguns dos principais índices salinos e suas confiabilidades em prever a variabilidade da condutividade elétrica dos solos salinos coletados. O trabalho completo aceito pelo Simpósio Nacional de Geomorfologia, para 2021, tem como foco apresentar a hipótese de gênese das planícies salinas investigadas no setor leste da Ilha, ao passo que ainda há o resumo submetido ao Pedometrics Brazil 2021, que teve como objetivo evidenciar que essa metodologia pode contribuir para o Programa Nacional de Solos do Brasil (Pronasolos). O segundo item 6.2 representa a ampliação dessa metodologia para confecção do mapa geral da salinidade dos campos abertos da Ilha de Marajó, associado às discussões dos atributos geoquímicos e mineralógicos dos solos.

5.1 Salinidade e heranças hidro-pedogeomorfológicas na Ilha de Marajó, Foz do rio Amazonas, Pará, Brasil

5.1.1 Resumo

A concentração de sais pode revelar diversos aspectos evolutivos e particularidades de um geoambiente. A Ilha de Marajó, área de estudo deste trabalho, situa-se no maior arquipélago fluvio-estuarino do planeta, em que se concentra boa parte dos solos salinos do território brasileiro, os denominados *solonchaks*, ou gleissolos salinos sódicos típicos. A execução deste trabalho foi realizada pela análise espectral em imagens Sentinel-2A, visita em campo, coleta de amostras representativas de solo. Para os solos foi obtida a condutividade elétrica e a saturação por sódio. Para as imagens sentinel-2A foram gerados diversos índices salinos e de vegetação. Os dados foram tratados pela técnica estatística da regressão linear múltipla. Os resultados evidenciaram forte correlação entre os índices e a salinidade do solo, sendo possível formular hipóteses acerca do quadro evolutivo holocênico para a área, bem como aprimorar conceitos sobre planícies salinas e apicuns.

5.1.2 Introdução

A acumulação de sais na superfície terrestre é um fenômeno decorrente tanto de processos físicos naturais quanto por causas antrópicas. Os solos são os principais elementos da paisagem que fornecem informações sobre a gênese e evolução da salinidade. Para ser considerado salino, a solução do solo apresenta concentrações de sais solúveis (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}) em níveis prejudiciais às plantas, ao passo que um solo é considerado sódico quando há a predominância do íon Na^+ no complexo de troca (IBGE, 2015b). O excesso de sais solúveis reduz o potencial osmótico da solução do solo, comprometendo a absorção da água e nutrientes pelas plantas (RUIZ et al., 2004). Ao passo que a predominância de altos níveis de sódio trocável gera a desestabilização da estrutura do solo, dispersão da argila e toxidez para as raízes das plantas (VASCONCELOS et al., 2013).

Vários são os cenários percussores para que haja tal acúmulo e, por consequência, a salinização ou sodificação do solo. No semiárido brasileiro o processo ocorre principalmente pela forte evapotranspiração e baixa precipitação pluviométrica, uma vez que os sais se acumulam no sistema e são fracamente lixiviados (VASCONCELOS et al., 2013). No Pantanal o contexto geomorfológico favorece o acúmulo dos sais, cujo clima é úmido e há uma ampla rede hidrológica de anastomoses fluviais de águas com elevadas concentrações de sais (OLIVEIRA JR et al., 2017).

O Altiplano-Puna, na porção central da cordilheira dos Andes, é um exemplo de um sistema hidrogeológico endorreico associado a clima árido a hiper-árido montano, que gerou extensas planícies salinas (MARAZUELA et al., 2019). Em áreas costeiras a salinidade e sodicidade dos solos são influenciadas principalmente pela dinâmica hidrológica marinha, que culmina em diversos ambientes como estuários, lagunas e planícies de marés (PRADA-GAMERO; VIDAL-TORRADO; FERREIRA, 2004). A influência antrópica, por sua vez, é percebida principalmente no semiárido brasileiro, no qual o mal planejamento de irrigação e adição de fertilizantes adicionam sais sem a devida retirada do sistema (VITAL et al., 2005).

A principal maneira de identificar o quanto há de sais solúveis na solução do solo é por meio da análise de condutividade elétrica, realizada tanto na massa do solo quanto na água (GRISSE et al., 2009). O uso de imagens multiespectrais e técnicas de sensoriamento remoto favorecem a identificação e mapeamento de zonas salinas, mediante o reconhecimento da assinatura espectral do sal e suas combinações com demais materiais (BARRETO, 2019; TAGHADOSI; HASANLOU; EFTEKHARI, 2019). Conforme Barreto (2019), quanto maior a concentração de sais no solo, maior a reflectância da região do visível vermelho (R), verde (G), azul (B) e infravermelho próximo (NIR). De forma indireta, a vegetação também é um indicador, pois a redução da reflectância no NIR e aumento no RGB são indicadores da decorrência da menor atividade fotossintética, devido ao ambiente estressante.

A Ilha de Marajó, objeto de estudo deste trabalho, encontra-se no maior arquipélago fluvio-estuarino no mundo, e está sob a influência das águas fluviais dos rios Amazonas, Pará e Tocantins e suas interações com o oceano Atlântico (ROSSETTI; BEZERRA; DOMINGUEZ, 2013). A Ilha de Marajó, maior ilha do arquipélago, apresenta extensas áreas de planície de maré (FRANÇA; SOUZA FILHO; EL-ROBRINI, 2007), uma das maiores manchas de solos da classe GLEISSOLO SÁLICO Sódico típico do território brasileiro e extensa contiguidade de manguezais (IBGE, 2003). Esse contexto ambiental faz da Ilha de Marajó uma área relevante para ser investigar a distribuição espacial de solos salinos-sódicos e suas particularidades, visto que é um ambiente consideravelmente úmido, dinâmico e sob efeito de marés.

Nesse contexto, este trabalho objetiva investigar o domínio de campos salinos do setor leste da Ilha de Marajó, ao norte do município de Soure, e apresentar as principais relações entre dados de amostras de solo e respectivas respostas espectrais de índices salinos. Como objetivo secundário, propor um panorama sobre a gênese e evolução hidro-pedo-geomorfológica desse geoambiente. A principal hipótese que norteia este trabalho é que os campos salinos desse setor da Ilha expressam uma entrância de águas fluvio-marinhas durante o Holoceno, na qual foi responsável por deixar elevadas concentrações de sais solúveis, associada a má lixiviação e forte evapotranspiração. Essa área, portanto, atualmente estaria exercendo a função ecossistêmica de apicum e regida pela dinâmica de marés. Essa hipótese foi elaborada a partir da observação de imagens orbitais de detalhe, de

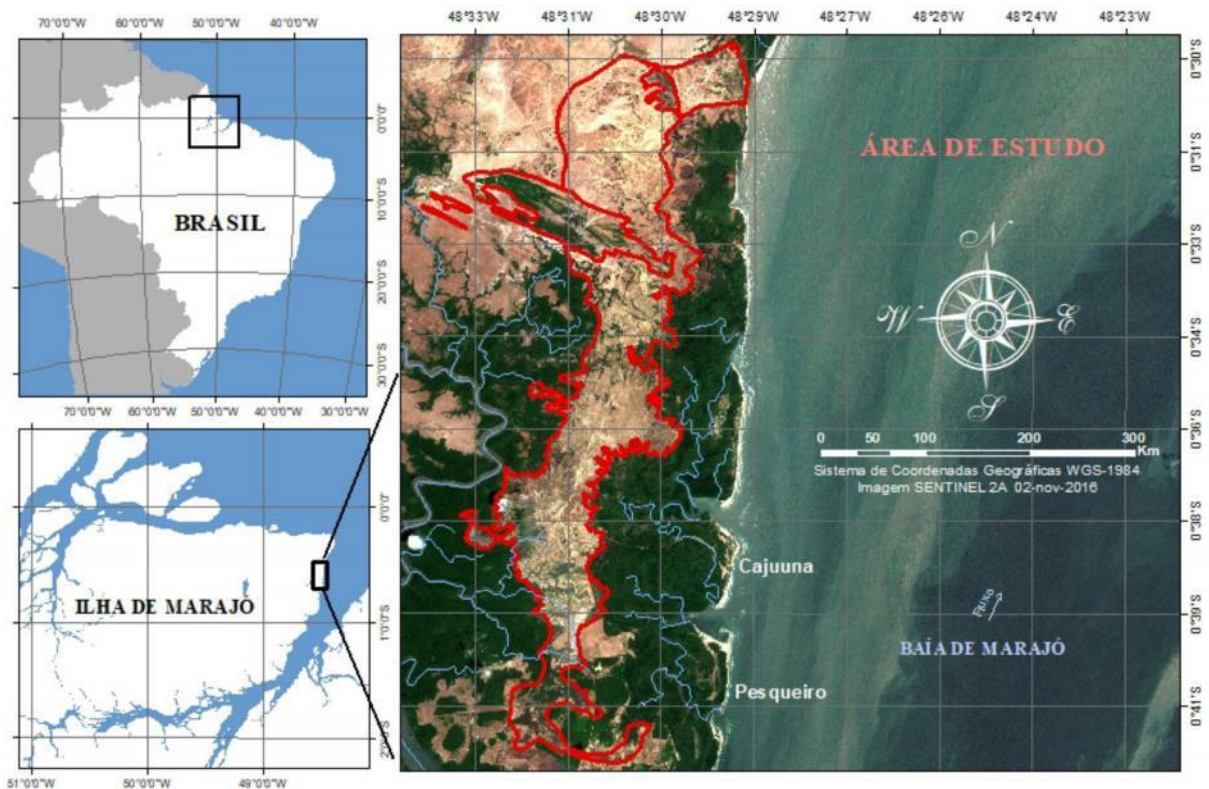
observações in situ na Ilha de Marajó, bem como a partir da estratigrafia holocênica da planície costeira de Soure apresentada por França et al. (2007)

Conceitualmente, o apicum, termo derivado da língua indígena Tupi, apacu, são áreas hipersalinas adjacentes a manguezais e desprovidas de vegetação arbórea (SCHMIDT; BEMVENUTI; DIELE, 2013). Na literatura também é encontrado o termo francês tanne, sendo diferenciados setores de estratos herbáceos a descampados (VIEILLEFON, 1969). São áreas cuja alta salinidade geralmente é associada à evapotranspiração das águas após preamar de sizígia, em momentos de baixa pluviosidade (SCHMIDT; BEMVENUTI; DIELE, 2013). Possui diferentes interpretações sobre sua gênese e evolução, sendo no geral entendido como uma geodinâmica de destruição dos manguezais por meio da retirada progressiva de argilas e siltes, restando os materiais arenosos, que progressivamente faz o mangue ceder e derivar em uma área de campo aberto de elevada salinidade e acidez (SCHMIDT; BEMVENUTI; DIELE, 2013). Plantas halófitas são o principal grupo de espécies adaptadas à salinidade, que possuem mecanismos de eliminação ativa do Na^+ e Cl^- de sua estrutura morfológica por meio de glândulas secretoras, pelos vesiculares ou abscisão de folhas velhas destinadas ao acúmulo (WILLADINO; CAMARA, 2010).

5.1.3 Área de estudo

A área investigada está situada na porção leste da Ilha de Marajó, que integra um complexo arquipélago fluvio-estuarino de 59.308,40km² na foz do rio Amazonas (FERREIRA, 2013). O recorte escolhido fica ao norte do município de Soure e abrange uma área de 59,1 km². Sua localização geográfica fica entre os paralelos 0°30' e 0°41'S e meridianos 48°34' e 48°20'W (Figura 27). O acesso à área é feito pela rodovia PA-154, que atravessa o município de Soure e segue ao norte até o distrito de Cajuuna. Após esse distrito, o acesso é realizado por vias vicinais secundárias não pavimentadas, durante os períodos de estiagem, e por cursos fluviais que drenam o interior dos manguezais.

Figura 27: Localização da área investigada na Ilha de Marajó, Pará, Brasil.



Nos mapas físicos exploratórios da folha Belém SA.22 do Projeto RADAM (BRASIL, 1974), de escala 1:1.000.000, e da folha Soure SA.22-X-B (IBGE, 2003), escala 1:250.000, as áreas de vegetação de porte arbóreo adensado correspondem à região ecológica de formações pioneiras de sub-região litorânea referente ao ecossistema de manguezal. Ao passo que as áreas de campos abertos são formadas pela sub-região do Baixo Amazonas, de ecossistema aluvial campestre. Para os solos são indicadas extensas manchas de solos halomórficos do tipo solonchak, sobretudo no setor norte da Ilha, que, segundo o atual Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SIBCS (SANTOS et al., 2018), são denominados como GLEISSOLO SÁLICO Sódico típico (IBGE, 2003). Ocorrem ainda solos hidromórficos indiscriminados no mangue e LATERITA HIDROMÓRFICA, atualmente denominado como PLINTOSSOLO HÁPLICO Distrófico (IBGE, 2003).

Em termos geológicos, a área de estudo apresenta a predominância generalizada de depósitos de sedimentos fluvio-marinhos pleistocênicos (IBGE, 2003), os quais, a sul, nos municípios de Soure e Salvaterra, afloram os sedimentos miocênicos do Grupo Barreiras (ROSSETTI; ROCCA; TATUMI, 2013), e sequências holocênicas pós-barreiras (FRANÇA; SOUZA FILHO; EL-ROBRINI, 2007). Essa organização estratigráfica confere à ilha de Marajó morfologias suaves onduladas a planas. O mapa exploratório geomorfológico (BRASIL, 1974) indica vastas áreas de planícies fluviais colmatadas por sedimentos holocênicos nas áreas de domínio campestre, sujeitas à inundação periódica.

5.1.4 Metodologia

A execução deste trabalho compreendeu três principais etapas, sendo o (i) levantamento de acervo bibliográfico do contexto geoambiental da Ilha de Marajó, e discussões sobre as potencialidades e limitações do mapeamento de solos salinos por sensoriamento remoto; (ii) trabalho de campo na área de estudo, para coleta de dados e observações do contexto da paisagem, e; (iii) etapa laboratorial analítica e computacional para obtenção de informações e realização de interpretações.

Para definição da área de estudo foi utilizada a imagem do satélite Sentinel-2A, tipo S2MSI1C, processamento nível 1-C, órbita descendente, de 02 de novembro de 2016, imageada às 13h42m. Para essa imagem foi aplicada a correção radiométrica pelo DOS1 no plugin SCP do QGIS 3.10. Na imagem foram identificadas as áreas de maior reflectância espectral nas bandas RGB e NIR, referentes a alvos como sal, areia e nuvem. Com o objetivo de se investigar a salinidade e dinâmica geoambiental, foi observada uma zonalidade salina que margeia a borda leste da baía de Marajó, na qual possui indicadores de ter sido um ambiente de águas rasas salinas durante o Holoceno.

Foi utilizado o modelo digital de elevação do tipo RADAR (Radio Detection and Ranging) do satélite ALOS (Advanced Land Observing Satellite), sensor PALSAR (Phased Arrayed Type L-Band SAR), de 12,5m de resolução. No ArcGIS 10.6.1 (ESRI, 2018) se realizou as correções de incongruências de valores de pixels anômalos. Para tanto, foi identificado o valor inicial negativo (-26m) para a cota das águas fluvio-marinhas da baía de Marajó. Com a ferramenta *Spatial Analyst*

tools>Conditional foi estabelecido que este valor corresponde à cota zero, sendo utilizada a ferramenta *reclassify* para redefinir dos demais valores positivos a partir da cota zero. Por fim, para eliminação de valores de pixel anômalos baseado em seus vizinhos, foi utilizada a ferramenta *Spatial Analyst Tools> Hydrology> Fill* e em seguida *Arc hydro Tools> Terrain Processing> DEM Manipulation> Fill sinks*.

Para o recorte da área foi garantido que a fitofisionomia fosse predominantemente campestre e aberta, pois além de representar a fisionomia típica de apicuns, também auxilia nos estudos de comportamentos espectrais para fins de identificação e análise da salinidade do solo. Para a área de estudo ainda foram aplicados os principais índices salinos presentes na literatura, que são apresentados por Wang et al. (2019). Cada índice foi desenvolvido sob determinado contexto, e apresenta maior ou menor representatividade a depender das condições da área. Dos índices (WANG et al., 2019b), foram selecionados aqueles que melhor evidenciaram as manchas de sal na superfície, sendo eles o re1, In1, SI1, SI1 re1, S3. O NDVI, por sua vez, é voltado para a análise da vegetação, sendo também utilizado como forma de análise indireta entre a correlação entre saúde e/ou estresse vegetal e os meios de forte salinidade (Tabela 5).

Tabela 5: Equações utilizadas para análise da salinidade por meio da imagem Sentinel-2A

ÍNDICE	FÓRMULA	EQUAÇÃO SENTINEL-2	REFERÊNCIA
NDSI re1	Normalized Difference Salinity Index red-edge 1 $(\text{red-edge1} - \text{NIR}) / (\text{red-edge1} + \text{NIR})$	$(B5 - B8A) / (B5 + B8A)$	Wang et al. (2019)
In1	Intensity Index 1 $(G + R) / 2$	$(B3 + B4) / 2$	Triki Fourati et al. (2015)
SI1	Salinity Index 1 $(G \times R) / 0,5$	$(B3 \times B4) / 0,5$	Khan, Rastoskuev et al. (2001)
SI1 re1	Salinity index red-edge 1 $(B + \text{red-edge1}) / 0,5$	$(B3 \times B5) / 0,5$	Wang et al. (2019)
S3	Salinity Index 3 $(G \times R) / B$	$(B3 \times B4) / B2$	
NDVI	Normalized Difference Vegetation index $(\text{NIR} - R) / (\text{NIR} + R)$	$(B4 - B8A) / (B4 + B8A)$	

Em dezembro de 2018 foi realizado trabalho de campo na área, sendo coletados cinco pontos de amostras dos primeiros 30cm de solo para análise da condutividade elétrica e saturação por sódio. Para cada ponto amostrado, em gabinete, foi obtida a assinatura espectral pelas bandas do Sentinel-2A, bem como os valores para cada índice salino gerado, além do NDVI. As amostras foram secas e peneiradas para obtenção de terra fina seca ao ar (TFSA), e realizada a análise de condutividade elétrica no laboratório de Geomorfologia e Recursos Hídricos do Instituto de Geociências, da Universidade Federal de Minas Gerais, e obtida a saturação por sódio

no laboratório de Rotina de Fertilidade de Solo, no Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa.

A saturação por sódio indica a proporção em porcentagem de sódio (Na^+) solúvel em relação a capacidade de troca catiônica total do solo (T), expressa pela fórmula $(100 \times \text{Na}^+) / \text{Valor T}$. Esse valor representa a determinação do caráter sódico ou solódico dos horizontes do solo, e é fundamental para se classificar solos salinos (CAMPOS et al., 2017). O procedimento consiste na obtenção dos elementos do complexo sortivo do solo, que são o conjunto de partículas trocadoras de íons. Por meio da soma de bases trocáveis, isto é, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+ , mais a acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$), se obtém o valor T, referente à CTC total da amostra (TEIXEIRA et al., 2017).

A condutividade elétrica, por sua vez, representa o total de sais solúveis presentes no solo, por meio da medição de cátions e ânions totais no extrato aquoso. O método foi adaptado de Teixeira et al. (2017), no qual foi pesado 100g de solo e adicionados cerca de 70mL de água ultrapurificada, sendo obtida uma pasta saturada. Esta foi deixada em repouso por uma noite, de modo vedado para minimizar a perda de água, e adicionados o restante de água até a marca de 100mL, para na proporção do método 1:1. O extrato, por sua vez, foi filtrado e lido a 25°C em condutivímetro.

Para análise e interpretação dos dados numéricos dos índices espectrais, dos dados laboratoriais de condutividade elétrica (E_c) e porcentagem de saturação de sódio (ISNa), optou-se pelo método de regressão linear múltipla. Esse método estatístico permite a análise de mais de uma variável explicativa, sendo imputados as variáveis de E_c , ISNa, NDVI, NDSI re1, ln1, SI1, SI re1 e S3. Para cada variável foi aplicado o R-quadrado ajustado ($\text{Adj } R^2$), de modo a observar a correlação entre cada componente, sendo quanto mais o R^2 -adj se aproximar de 100%, mais as variáveis são correlacionáveis.

5.1.5 Resultados e discussões

Os dados analíticos laboratoriais, as observações *in situ* na Ilha de Marajó e as análises multiespectrais por meio de técnicas de sensoriamento remoto revelaram um geoambiente predominantemente salino-sódico, cuja distribuição dos sais ocorrem ao

longo de uma extensa planície de cerca de 3 a 4m de altitude, margeada por manguezais compostos principalmente pelos gêneros *Rhizophora mangle*, e em menor proporção, *Avicennia*.

Por quase todo os 59,1 km² de área foram identificadas assinaturas espectrais e padrões de organizações espaciais que denotam a presença de sal. A assinatura espectral do sal na área de estudo apresenta valores em torno de 0,10 de reflectância para o comprimento de onda do azul (490nm), 0,15 para o verde (560nm), 0,20 para o vermelho (665nm) e red-edge1 (705nm), 0,25 para o NIR (842nm) e 0,30 para o red-edge4 (865nm).

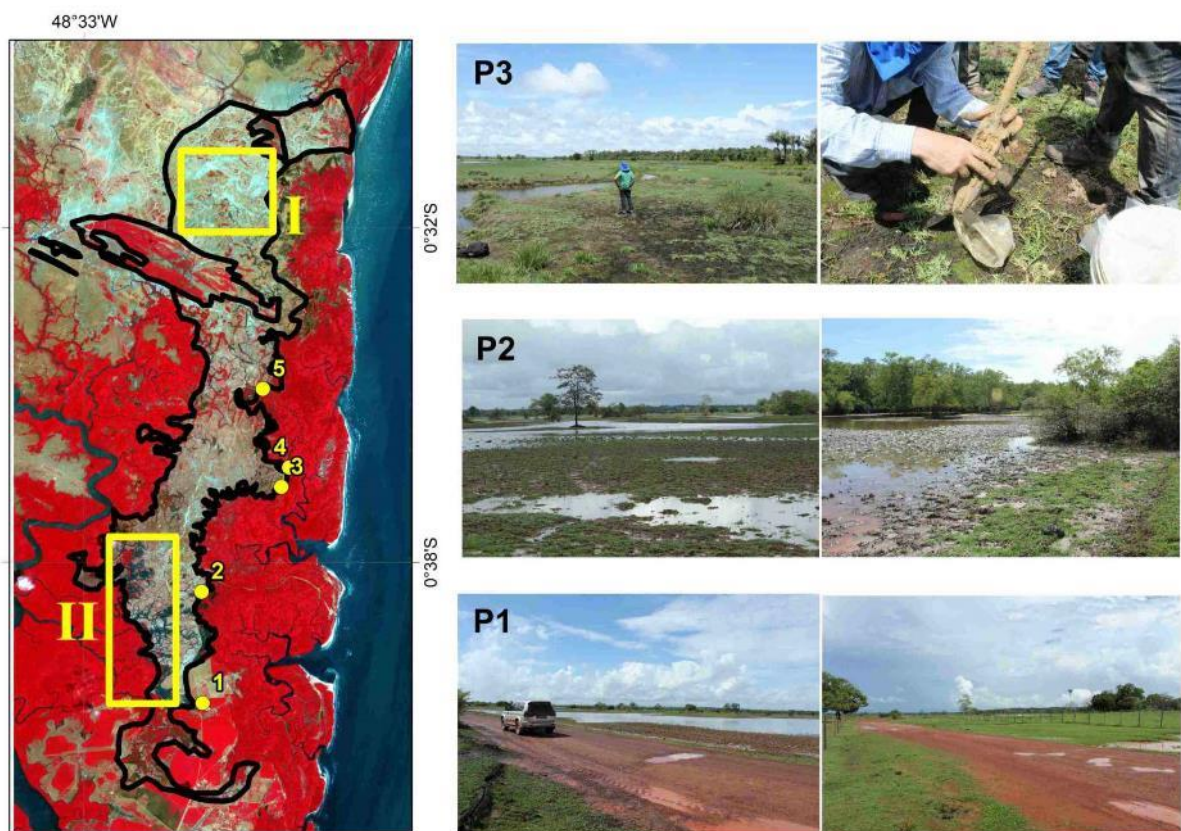
Por meio da imagem de satélite e pelo modelo digital de elevação foi identificado dois principais setores influenciados pela dinâmica de maré e maior retenção hídrica pluvial, sendo um na porção sul na altura da coleta da amostra do perfil 2 (II), e o outro no extremo norte, na inflexão voltada para a baía de Marajó (I), por volta de 3m de altitude (Figura 28). Nessas áreas, ainda que em períodos de menor precipitação, pode-se observar a presença de áreas de maiores de alagamento, cujos sais solúveis ficam dissolvidos nas águas mais próximos da superfície, e possuem a tendência de formar crostas salinas em momento de evaporação intensa. Essa condição confere menor ruído na curva espectral dos sais. As análises laboratoriais corroboraram para essa concentração salina em superfície, revelando maior valor para a condutividade elétrica, de 16,1 mS/cm⁻¹, bem como saturação por sódio (ISNa) de 49,5% (Figura 29).

Nas demais áreas o sal também é presente em quantidades significativas, todavia, se difere por estar presente principalmente incorporada ao arranjo estrutural do solo. A presença de *Sesuvium portulacastrum*, uma espécie de planta halófita rasteira, é indicadora de ambientes salinos e foi encontrada na área de coleta da amostra do ponto 3, sendo comum em zonas de apicuns da região norte (ICMBIO, 2018). Nessa área, a saturação por sódio foi a maior dentre as amostras coletadas, atingindo 55,4 %, além de 7,9 mS/cm⁻¹. Próximo ao ponto 3, adjacente ao curso fluvial e no domínio do manguezal, o ponto 4 apresentou saturação de 25,8%, e 5,03 mS/cm⁻¹.

No setor noroeste da área de estudo foram identificadas morfologias típicas de antigos cordões arenosos, hoje em posição de terra firme, vegetado e em cotas altimétricas

de cerca de 15m, sendo 10m de desnível entre seu topo e a planície de maré. A feição de inflexão voltada para a baía de Marajó, no Norte, indica que essa área foi a principal área de incursão das águas adentro das porções de terra durante o Holoceno, na qual, após sua drenagem, a morfologia ainda está relativamente preservada. De modo geral, a área investigada tem seu piso com variações do relevo capazes de condicionar a dinâmica das águas em superfície e subsuperfície, além de influenciar a distribuição dos sais solúveis.

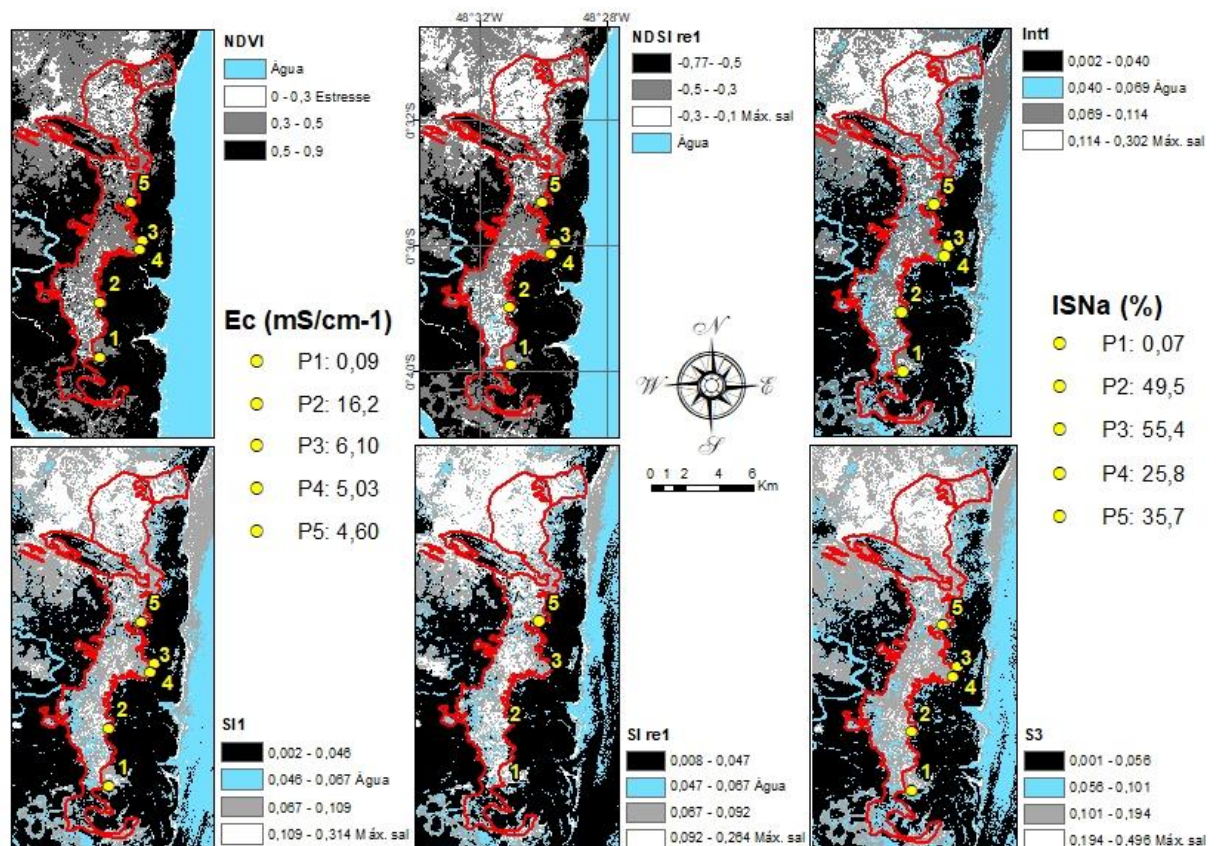
Figura 28: Organização da paisagem da área de estudo e coleta de amostras.



O ponto 1 não faz parte do domínio das áreas alagáveis e salinas, estando em cotas por volta de 9m. Sua condutividade elétrica medida foi de $0,09 \text{ mS/cm}^{-1}$ e ISNa de 0%, bem como o arranjo da estrutura desse solo se difere completamente daqueles encontrados no interior da zona de apicum. Enquanto o Ponto 1 apresenta características referentes à classe de LATOSSOLO, os demais pontos figuram como GLEISSOLOS. Esse ponto 1 serve para calibragem dos testes do modelo de regressão linear múltipla aplicada aos dados obtidos pelas equações de índices de salinidade e vegetação.

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) evidencia a menor atividade fotossintetizante ao norte do P5, bem como ao sul na altura de P2, revelando essas áreas de maior estresse para a maioria das formações vegetais. Essas áreas também foram identificadas no Índice de Salinidade por Diferença Normalizada com a banda red-edge1 (NDSI re1), no Índice de Intensidade 1 (Int1) e nos Índices Salinos 1, re1 e 3 (SI1, SI re1, S3) (Figura 29). Por meio da aplicação dos índices, notadamente é possível observar ampla distribuição espacial dos sais solúveis na área investigada.

Figura 29: Índices salinos e NDVI aplicados para a área investigada.



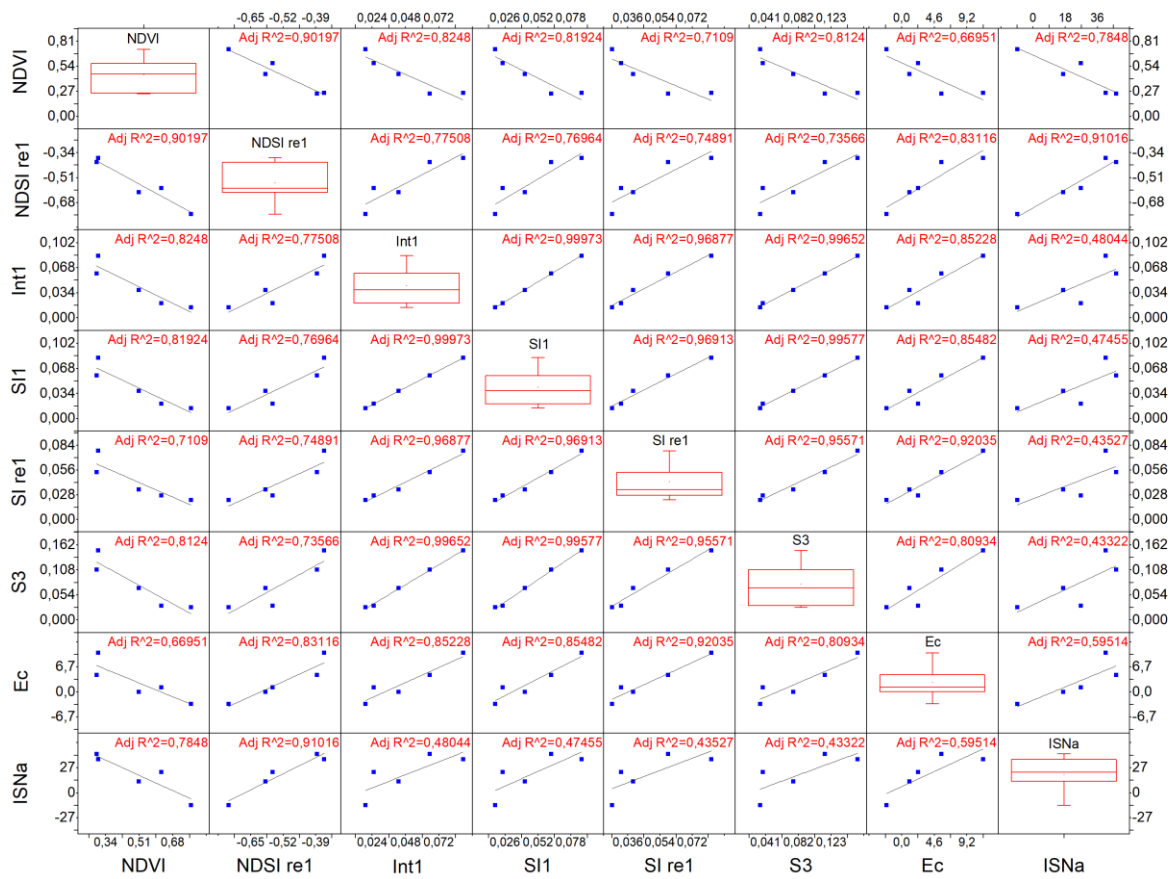
No setor norte os índices apresentaram valores de elevada salinidade, para além dos limites da área de estudo, o que sugere que a dinâmica de concentração de sais solúveis na Ilha de Marajó se estende por maiores extensões de terra. Mapa de solos (BRASIL, 1974; IBGE, 2003) corroboram ao apresentar áreas de GLEISSOLO SALINO Sódico típico nesses setores.

A área de apicum se restringe ao trecho associado aos manguezais, que abrange de P2 até o P5, as demais áreas salinas ao norte consideradas como planícies salinas.

Isso em razão de apicuns, conceitualmente, estar necessariamente vinculado ao manguezal (SCHMIDT; BEMVENUTI; DIELE, 2013). Se para fins conceituais esses ambientes se diferem, em termos de análises geoambientais as condições de salinidade-sodicidade identificadas conferem à área caráter único para o contexto do território brasileiro.

O método estatístico de regressão linear múltipla evidenciou boa correlação entre a maioria dos seis índices aplicados (NDVI, NDSI re1, Int1, SI1, SI re1 e S3), a condutividade elétrica (E_c) e a saturação por sódio (ISNa). O NDVI apresentou 90% de correlação com o NDSIre1, mais de 80% com Int1, SI1, S3, e menos relação com SIre1 (71%). A condutividade elétrica teve baixa relação direta com o NDVI (R^2 adj 0,66), sendo melhor explicada pelos índices salinos NDSIre1 (R^2 adj 0,83), Int1 (R^2 adj 0,85), SI1 (R^2 adj 0,85), SIre1 (R^2 adj 0,92) e S3 (R^2 adj 0,80). Isso se deve ao NDVI ser uma maneira indireta de se identificar a salinidade, visto que esse índice evidencia as condições fotossintetizantes. Ao passo que para os índices salinos, quanto maior a condutividade, mais os índices evidenciaram relação direta (Figura 30).

Figura 30: Resultados da técnica de regressão linear múltipla aplicado aos índices espectrais e os dados laboratoriais de condutividade e saturação por sódio.



Os índices que mais se correlacionaram foram Int1, SI1, SIre1 e S3, com R^2 adj superior a 96% (Figura 30). A condutividade elétrica foi melhor explicada por SIre1 (R^2 adj 0,92), cujos demais índices salinos apresentaram mais de 80% de correlação. A saturação por sódio (ISNa) depende de demais fatores, como organização estrutural do solo e macronutrientes, sendo seus valores mais dificilmente explicados diretamente pelo sensoriamento remoto. Somente o índice salino NDSIre1 apresentou melhor relação (R^2 adj 0,91), cujos demais ficam em torno de 45%.

O NDVI, por sua vez, apresentou correlação mediana (R^2 adj 0,78), sendo explicado pelo fato de quanto maior o solo estiver saturado por sódio, maior o estresse das comunidades vegetais. Todavia, a menor atividade fotossintetizante serve apenas como indicadora de que haja um estresse, e não necessariamente a saturação de sódio no solo. Entre a condutividade elétrica (Ec) e a saturação por sódio (ISNa) houve pouca correlação direta (R^2 adj 0,59).

5.1.6 Considerações finais

Notadamente, as técnicas de sensoriamento remoto evidenciaram a distribuição espacial da concentração dos sais solúveis, sobretudo, na superfície. Os resultados evidenciaram que para a identificação da saturação por sódio (ISNa) os melhores índices para serem utilizados foram o NDSI re1 e o NDVI, ao passo que para a condutividade elétrica, os melhores foram os índices salinos NDSI re1, In1, SI1, SI re1 e S3. A resolução espacial e espectral da imagem de satélite também foram fundamentais para que os índices apresentassem bons resultados, visto que quanto maior a resolução espacial (10m para o Sentinel-2A), melhor identificáveis os pixels correspondentes às manchas salinas na superfície. A maior resolução espectral, por sua vez, permite o uso de mais comprimentos de onda de reflectância, sendo para a área de estudo boas respostas para as bandas 2 (B),3 (G),4 (R), 5 (SWIR1 red edge 1) e 8A (red edge 4) do Sentinel-2A.

O reconhecimento da distribuição dos sais na área de estudo permitiu a formulação de hipóteses sobre a gênese e evolução desse geoambiente. A morfologia esguia e arqueada, cujo setor norte se volta para o deságue na Baía de Marajó, é um indicador regional de uma entrância de águas, possivelmente salobras, responsáveis pela maior parte da concentração de sódio atual. França et al. (2007) também evidenciaram, por meio da estratigrafia, que parte dessa área possui sequências regressivas e transgressivas durante o Holoceno. O reconhecimento dessas áreas salinas e sua evolução contribui para as definições e diferenciações de apicum e planície salina, visto que o primeiro é necessariamente associado ao bioma manguezal e sua evolução. Em termos ecossistêmicos, a investigação de áreas fortemente salinas-sódicas contribui para estudos de comunidades vegetais endêmicas, bem como sobre a evolução costeira do norte do território brasileiro.

5.2 Salt-affected soils as indicative of fluvial-marine landscape evolution, Marajó Island, Brazilian Amazonia

5.2.1 Abstract

Marajó Island is located in the Amazon river mouth, Brazil. The fluvial-marine ecosystem of Marajó Island's archipelago has one of the largest areas of soil-salinity worldwide. The main goal of this manuscript is to present the applicability of spectral indices to recognize surface salinity using Sentinel-2 and climate change discussions. The paper was developed in three main stages: (i) fieldwork for soil sampling; (ii) geochemical laboratory procedures; and (iii) digital processing of Sentinel-2 for obtained the salt plains data environment. As result, salinity analysis are satisfactory for recognize salt-affected soils and its particularities. Climate change it is clearly evidenced through the saline-salt plains of Marajó Island's archipelago, with expressive tendence of salinization increasement for the next centuries.

5.2.2 Introduction

Soil salinity is induced by natural factors and human activities that represent a considerable environmental hazard (GORJI; SERTEL; TANIK, 2017; METTERNICHT; ZINCK, 2003). It is estimated 1 billion hectares of salt-affected areas worldwide, which represent 7% of the earth's continental extent (METTERNICHT; ZINCK, 2003). Most of the salinity areas are concentrated in arid and semi-arid regions (GORJI; SERTEL; TANIK, 2017; MARAZUELA et al., 2019), but also occupy humid regions, such as Pantanal in Brazil (FURQUIM et al., 2017), and coastlines around the world (GORJI; SERTEL; TANIK, 2017; PAZ et al., 2020; WU et al., 2018; YU et al., 2014). Saline soils at coastline are a result of seawater fluctuation, intensive evapotranspiration or improper soil and water management (GLIŃSKI; HORABIK; LIPIEC, 2011; PAZ et al., 2020; WU et al., 2018). The excess of soluble salts (saline soils), the dominance of exchangeable sodium in the soil exchange complex (sodic soils) and both combination (saline-sodic) can affect several chemical and physical soil properties, besides inducing degradation process as erosion trends, vegetation stress, and economic damages (GORJI; SERTEL; TANIK, 2017; METTERNICHT; ZINCK, 2003; PAZ et al., 2020).

Soil salinity is influenced mainly by soil texture, groundwater fluctuations, and the salt's ascendant into soil profile by capillary due to evaporation at the surface (LI; CHANG; SALIFU, 2014; WU et al., 2018). Salt-affected soil is usually characterized by chemical properties which the salinity is expressed by the electric conductivity of saturated soil paste extract (EC_s), while the sodicity is obtained by sodium adsorption ratio (SAR), exchangeable sodium percentage (ESP), and potentiometric determination (pH) (KERTÉSZ; TÓTH, 1994; PAZ et al., 2020). Physical properties are also affected by salt (GLIŃSKI; HORABIK; LIPIEC, 2011; LI; CHANG; SALIFU, 2014; WU et al., 2017). Particle size and the cation exchange capacity (CEC) affect the soil adsorbing cations (RICHARDS, 1954).

Saline soils commonly present intensive osmotic pressure that difficult plants to absorb water with relative maintenance of its porosity and permeability. The vegetation covers indirect or directly indicate the salt land concentration, and halophytic plants the main salt-affected soil indicator (FERNÁNDEZ-BUCES et al., 2006). Excess of exchangeable sodium and low concentration of soluble salts is aspects of sodic soils that can form a low permeability layer making it difficult the root growth and potentialize the surface erosion (GLIŃSKI; HORABIK; LIPIEC, 2011; PAZ et al., 2020).

Spatial-temporal variability of soil salinity is supported by remote sensing techniques that identify salt land distribution, available the salinity and sodic soil characteristics, recognize mineral patterns, monitoring and mapping the salt on the surface (CROWLEY, 1993; FERNÁNDEZ-BUCES et al., 2006; GORJI; SERTEL; TANIK, 2017). Visible and near-infrared (Vis-NIR) spectral imaging has the potential for mapping soil properties and predicts soil salt content (CROWLEY, 1993; WU et al., 2018). Many saline minerals have reflectance spectra into near-infrared absorption bands (Vis-NIR), and support recognizes the crystallographic structure of halite hydrate phases (CROWLEY, 1993). Vegetation covers and photosynthetic activity also impacts directly in the spectral reflectance curve (ZHANG et al., 2015).

Marajó Island is located in a humid tropical zone (LIMA et al., 2005; PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007) at the estuary of the Amazon river in South America, and has one of the largest continuous areas of natural saline-sodic soils in Brazilian territory (IBGE, 2003). Since the Last Glacial Maximum (LGM) during Quaternary (ca

30 ka), the ocean and climatic fluctuation affected the sediment deposition, the groundwater dynamics, evapotranspiration, vegetation dynamics, pedogenesis, and ancient human occupation (CLARK et al., 2009; COHEN; BEHLING; LARA, 2005; COHEN et al., 2015; FRANÇA et al., 2012; FRANCISQUINI et al., 2014; FREITAS et al., 2001; GUIMARÃES; COHEN; FRANÇA, 2010; MEGGERS; DANON, 1988a; ROSSETTI; BEZERRA; DOMINGUEZ, 2013; ROSSETTI; VALERIANO; THALES, 2007; SCHAAN, 2010; SCOTT; COLLINS, 1996; TATUMI et al., 2008). This paper issue to be elucidated the environmental significance of saline and saline-sodic soils for landscape evolution. Here we aimed to map the salinity areas of the eastern Marajó Island, using remote sensing techniques, and from that to understand how such saline areas participate in the evolution of the island's landscape.

5.2.3 Methodology

5.2.3.1 Study area

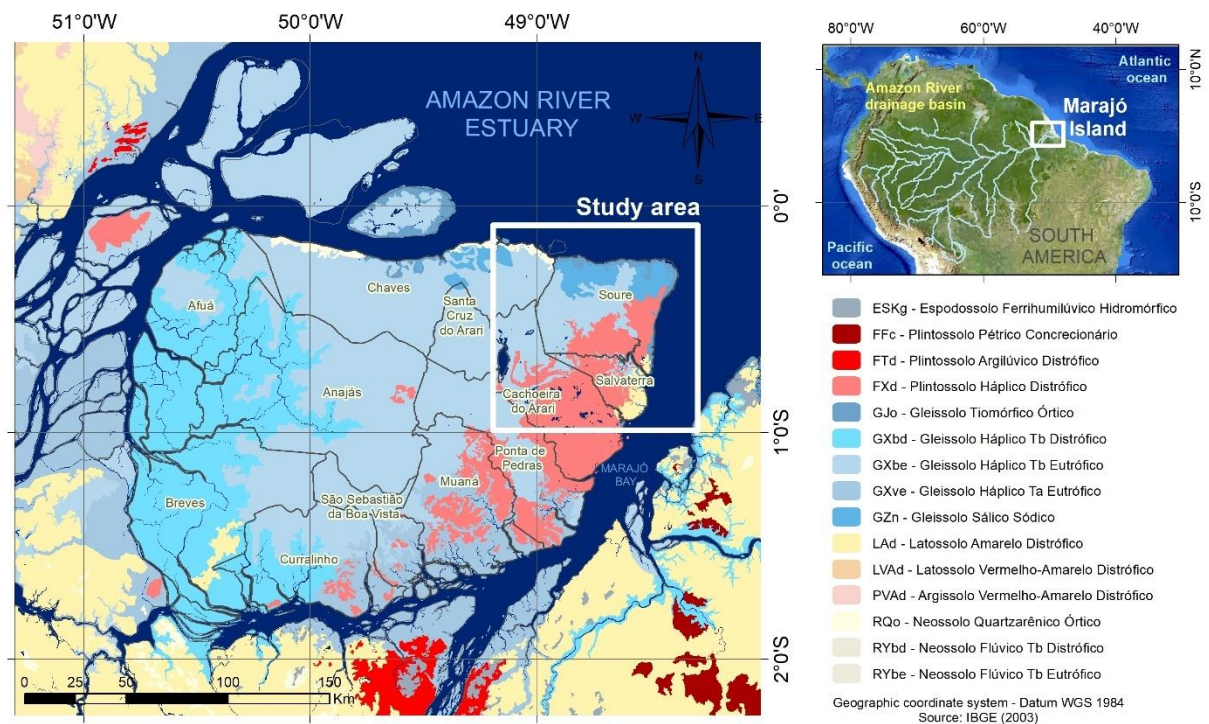
Marajó Island is located in the Amazon river mouth, north's Brazil, between Pará and Amapá state, reaching the 1°N and 2°S parallels, and 51°W and 49°W meridians (Fig. 31). The Marajó Island archipelago is bordered by the Amazon river through its north and west. In the south and southeast, is bordered by Pará and Tocantins rivers (BRASIL, 1974). The archipelago is formed by a complex landscape, with twenty-one geoenvironments identified by Henriques et al. (2022).

The regional landscape has extensive flat surfaces with grasslands and open savannas at the lowlands, associated with annual flood dynamics (BRASIL, 1974; LIMA et al., 2005; MURRIETA; DUFOUR; SIQUEIRA, 1999). Highlands are present mainly at the west of the island with dense rainforests (BRASIL, 1974; LIMA et al., 2005). Mangrove ecosystem, restinga compose the coastlines of Marajó Island (COHEN; BEHLING; LARA, 2005; FRANÇA et al., 2012; GUIMARÃES; COHEN; FRANÇA, 2010; LIMA et al., 2005; SILVA et al., 2010).

Regional climate type transition from Am to Aw with warmer and humid with characteristics of tropical savanna (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007). The annual precipitation varying from 2.000 to 4.000 mm, while the average annual temperature ranges from 25°C to 29°C (LIMA et al., 2005). Soils are represented

mainly by Gleysols affected by the Amazon river discharge flow and by the annual lowlands flood dynamics. Saline-sodic soils have a great extension at the east, while Oxisols with iron duricrust at the base of soils occur mainly in the highlands (IBGE, 2003) (Fig. 31). Geology is composed by Cretaceous sediments, follow by Miocene Pirabas-Barreiras Group deposition (SOARES JR et al., 2011), Pleistocene-Holocene post-Barreiras sediments (COSTA et al., 2002) and Holocene fluvial-lacustrine deposits in the lowlands (TATUMI et al., 2008).

Figure 31: Study area at Marajó Island.



5.2.3.2 Soil sampling and laboratory procedures

Fourteen soil pedons, including eight salt-affected and six unaffected-salt soils, were sampled in November 2018 during less humid conditions. Soils were described according to Schoeneberger et al. (2012), and classified based on U.S Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2014) and Brazilian Soil Classification System (SANTOS et al., 2018). Soil horizons were air-dried and obtained fine-earth fraction by 2mm sieve for chemical and physical analysis. The texture was determined by the pipette method (TEIXEIRA et al., 2017). The pH was determined in distilled water measured by potentiometric method at a soil-solution ratio of 1:2.5 (TEIXEIRA et al., 2017). Available phosphorus was determined by Atomic Absorption Spectrophotometry and K^+ and Na^+

determined by Flame Emission Photometry by extraction through Mehlich⁻¹ (0.05 M HCl + 0.025 M H₂SO₄) at a soil: solution ratio of 1:10 (TEIXEIRA et al., 2017). Potential acidity (H⁺ + Al³⁺) was extracted with 0.5 mol/L⁻¹ calcium acetate at pH 7.0, being quantified by titration with 0.05 M NaOH (TEIXEIRA et al., 2017). Exchangeable bases (Ca²⁺, Mg²⁺ and Al³⁺) were obtained with 1 M KCl extract, at a proportion of soil: solution 1:10 and quantified by atomic absorption spectroscopy (TEIXEIRA et al., 2017).

Total organic carbon (TOC) was determined by combustion (YEOMANS; BREMNER, 1988). Were determined the Mn, Cu, Fe, Zn, Cr, Ni, Cd, and Pb by flame Atomic Absorption Spectroscopy (DEFILIPO; RIBEIRO, 1997). The potential of cation exchange capacity at pH 7 (CEC) was calculated by the sum of bases (Na²⁺, K⁺, Ca²⁺ and Mg²⁺) and potential acidity (H⁺ + Al³⁺) (TEIXEIRA et al., 2017). Were also obtained the aluminium saturation (Al sat%=100 Al³⁺/(SB+Al³⁺)) and exchangeable sodium percentage (ESP =100.Na⁺/CEC) (Teixeira et al., 2017).

Electrical conductivity (ECs) was obtained by the saturated paste method. The paste was prepared with the addition of deionized water until obtained a homogeneous mass, which flows lightly with the free sliding movement of the spatula. The saturated paste overnight and obtained the extract to measure de ECs (USDA, 2014). From saturated past solution were measured the pH by potentiometric, determined the Na⁺ and K⁺ by flame photometry, and Ca²⁺, and Mg²⁺ by atomic absorption spectroscopy (AAS). The sodium adsorption ratio (SAR) was calculated by $Na^{2+} / [(Ca^{2+} + Mg^{2+})/2]0.5$ (STRAWN; BOHN; O'CONNOR, 2019).

5.2.3.2 Environment salt-plains

Field observations in November 2018 and Sentinel-2 MSI data acquired on November 2, 2016, were used to perform regional environment soil-salinity map. The Sentinel-2 MSI has 13 spectral bands, being four visible and near-infrared (Vis-NIR) bands at 10m spatial resolution, six red-edge and SWIR bands at 20m, and three bands of coastal aerosol, water vapor, and cirrus at 60m (ESA, 2015) (Table 5). The Sentinel Application Platform (SNAP) version 7.0 (<http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>) with the Sen2Cor plugin version 2.8.0, were used for pre-processing atmospheric correction (LOUIS et al., 2016). The algorithm parameters were selected according to the user manual (MÜLLER-WILM, 2017), to converting Sentinel-2 Level-1C image from the Top

of Atmosphere (TOA) reflectance values into Level-2A data of Bottom of Atmosphere (BOA).

Table 6: Salinity indexes for regional environment spectral salt-signature.

Acronym	Spectral Indices	Formula	Sentinel-2 equation	References	p-value residuals	p-value regression	Significance	R ² Adj	Salt map factor
SI1 re1	Salinity Index 1 red-edge 1	$(G \times \text{red-edge } 1) / 0.5$	$(B3 \times B5) / 0.5$	Wang et al. (2019)	0.2161	6.62E-06	***	0.9217	5
S3	Salinity Index III	$(G \times R) / B$	$(B3 \times B4) / B2$	Abbas and Khan (2007)	0.298	8.34E-06	***	0.917	5
SI3	Salinity Index 3	$[(R)^2 + (G)^2] / 0.5$	$[(B4)^2 + (B3)^2] / 0.5$	Douaoui et al. (2006)	0.736	2.58E-05	***	0.8902	4
Int1	Intensity Index 1	$(G + R) / 2$	$(B3 + B4) / 2$	Douaoui et al. (2006)	0.736	3.23E-05	***	0.884	4
SI1	Salinity Index 1	$(G \times R) / 0.5$	$(B3 \times B4) / 0.5$	Douaoui et al. (2006)	0.7075	4.13E-05	***	0.8767	3
S7	Salinity Index 7	$(G \times R) / B$	$(B3 \times B4) / B2$	Elhag (2016)	0.7075	4.13E-05	***	0.8767	3
S4	Salinity Index 4	$(B \times R) / 0.5$	$(B2 \times B4) / 0.5$	Abbas and Khan (2007)	0.869	1.86E-04	**	0.8215	2
SI	Salinity Index	$(B + R) / 0.5$	$(B2 + B4) / 0.5$	Douaoui et al. (2006)	0.8655	6.41E-04	**	0.7583	1
NDSI	Normalized Difference Salinity Index	$(R - NIR) / (R + NIR)$	$(B4 - B8a) / (B4 + B8a)$	Khan et al. (2005)	0.2507	5.55E-02	*	0.3083	Not-used
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	$(NIR - R) / (NIR + R)$	$(B8a - B4) / (B8a + 4)$	Peñuelas et al. (1997)	0.2507	5.55E-02	*	0.3083	Not-used
S5	Salinity Index V	$(B \times R) / G$	$(B2 \times B4) / B3$	Abbas and Khan (2007)	0.9796	3.49E-04	*	0.7915	Not-used
Int2	Intensity Index 2	$(G + R + NIR) / 2$	$(B3 + B4 + B8a) / 2$	Douaoui et al. (2006)	0.1057	1.68E-02	*	0.4724	Not-used
S2	Salinity Index II	$(B - R) / (B + R)$	$(B3 - B4) / (B3 + B4)$	Abbas and Khan (2007)	0.2784	2.92E-02	*	0.401	Not-used
S1	Intensity Index I	(B/R)	$(B2/B4)$	Khan et al. (2005)	0.4083	6.33E-02	*	0.2881	Not-used
S6	Salinity Index VI	$(R \times NIR) / G$	$(B4 \times B8a) / B3$	Abbas and Khan (2007)	0.02552	6.79E-02	-	0.2772	Not-used
MSI	Modified salinity Index	$(SWIR1/NIR)$	$(B11/B8a)$	Tajgardan et al. (2009)	0.2507	2.10E-01	-	0.08665	Not-used
SI2	Salinity Index 2	$[(G)^2 + (R)^2 + (NIR)^2] / 0.5$	$[(B3)^2 + (B4)^2 + (B8a)^2] / 0.5$	Douaoui et al. (2006)	0.3053	2.69E-01	-	0.04337	Not-used
SI2 re3	Salinity Index 2 red-edge 3	$[(G)^2 + (\text{red-edge } 3)^2 + (NIR)^2] / 0.5$	$[(B3)^2 + (B7)^2 + (B8a)^2] / 0.5$	Wang et al. (2019)	0.03634	6.74E-01	-	-0.09882	Not-used
-	Salt-affected soil map	$(SI1 \text{ re } 1 \times 5) + (S3 \times 5) + (SI3 \times 4) + (Int1 \times 4) + (SI1 \times 3) + (S7 \times 3) + (S4 \times 2) + (SI \times 1)$	-	This study	0.8438	4.57E-05	***	0.9073	-

Seventeen spectral salinity indices and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was applied using the Sentinel-2 bands to recognize the spectral signature of salt-affected soils in Marajó Island (WANG et al., 2019b). We mapped 6751.5 km², using EC_s values from the soil horizons of P1, P2, P6, P7, P8, P9, P10, P13, and P14 (Henriques et al., 2022), to test the regional salt landscape distribution at Marajó Island’s surface according each saline index (HONG et al., 2019; WANG et al., 2019b). As a result of statistical tests, eight spectral salinity indices were selected and ordered from highest to lowest significance that explains the variation of the EC_s according to the soil varying to obtain the surface salinity map (Table 6).

Table 7: Soil salinity classes, their effects on crops (Brown et al. 1954) and salinity map classes defined adapted from Gorji 2017 and Brown 1954.

Soil salinity classes	EC range	Description	Salt map classes	EC salt-soil map range
1.Non-saline	< 2 dS/m	Salinity effects are negligible	1.Indiscriminate terrain with dense vegetation	< 4 dS/m
2.Slightly saline	2-4 dS/m	Salt tolerant species. No salt/crystals evidences		
3.Moderately saline	4-8 dS/m	Many crops are affected and restricted	2.Potential moderately saline zone	4-8 dS/m
4.Highly saline	8-16 dS/m	Only tolerant crops bear this condition	3.High saline zone	8-16 dS/m
5.Extremely saline	> 16 dS/m	Only a few very torelant crops resists	4.Extremaly saline zone	> 16 dS/m

Salinity classes were selected based on spectral pixel values and divided into four classes: (i) Indiscriminate terrain with dense vegetation; (ii) Potential moderately saline zone (4 dS/m); (iii) High saline zone (8 dS/m), and (iv) Extremely saline zone (16 dS/m) (Table 6). Topographic values above sea level (a.s.l.) were obtained with digital elevation model from NASADEM Merged DEM Global 1 arcsec of 30m spatial resolution (NASA JPL, 2020).

5.2.3.3 Soil statistical analysis

The multivariate statistical technique of Principal Component Analysis (PCA) and correlation matrix were applied to physic-chemical soil parameters with R version 3.5.1 (R CORE TEAM, 2018) with finality to examine the relationships among the variables. The soils were grouped in nine classes according to environmental aspects and salt content, represented by (i) 1. Non-saline oxisols; (ii) 2. Non-saline spodosol; (iii) 3. Non-saline arenosol; (iv) 4. Non-saline gleysol of interior fluvial plains; (v) 5. Sulfic soil of coastline mangrove eroded; (vi) 6. Saline-sodic soil of coastline mangrove eroded; (vii) 7. Saline-sodic soils of plains and apicum; (viii) 8. Saline-sodic soils of mangrove to apicum; and (ix) 9. Saline-sodic soils of interior mangrove.

5.2.4 Results

5.3.4.1 Physical and chemical soil attributes

The results are presented comparing only unaffected and salt-affected soils (Table 7). In the first group, sandy soils predominate, with a pH in H₂O close to 5, with low exchangeable P values for all horizons, except for those that show human intervention, such as the Ap horizons of P5 and P14 profiles. The soils are mostly dystrophic, except for the P5 profile. This one also differs from the others because it is the only one that does not present high values of aluminum saturation. In the other profiles, values above 50% occur, reaching almost 90%. The TOC is moderate to high for most surface horizons, reaching 34 g/kg. Sodium saturation is null in these soils, or very low, which implies equally low values of conductivity (Table 7).

Table 8: Physical and chemical attributes of selected soil pedons at Marajo Island, Brazilian Amazonia.

Hor.	Depth	CS	FS	Silt	Clay	Texture	pH	P	BS	CECef	CECpt	PBS	Al ⁺ sat.	ESP	EC	TOC
	cm						%	H ₂ O		mg.kg ⁻¹	cmolc.kg ⁻¹				%	
UNAFFECTED-SALT SOILS																
P1 Xanthic Haploperox																
Ap	0-8	36.9	32.9	5.8	24.3	Sandy clay loam	4.88	2.7	0.63	2.14	10.03	6.3	70.6	0	0.15	25.46
A2	ago/20	32.6	34.8	11.9	20.7	Sandy clay loam	5.05	1.1	0.34	1.66	8.14	4.2	79.5	0	0.08	17.75
AB	20-40	33.4	34.5	11.4	20.7	Sandy clay loam	4.64	1.1	0.21	1.53	7.81	2.7	86.3	0	0.04	17
BA	40-65	27.1	36.6	13.1	23.1	Sandy clay loam	4.73	0.6	0.25	1.2	5.35	4.7	79.2	0	0.13	6.96
Bo1	65-100	29	33	10.6	27.4	Sandy clay loam	4.97	0.4	0.17	0.93	2.97	5.7	81.7	0	0.04	1.57
Bo2	100-130	28	34.3	22.6	15.1	Sandy loam	4.81	0.4	0.21	0.97	2.41	8.7	78.4	0	0.03	2.32
Bo3	130-164	32.9	30.4	8.2	28.5	Sandy clay loam	4.72	0.4	0.13	0.89	2.33	5.6	85.4	0	0.08	1.57
Cc	165-190+	29	29.4	11.6	30.1	Sandy clay loam	4.71	0.3	0.21	0.97	2.21	9.5	78.4	0	0.02	1.57
P2 Typic Haplorthods																
A1	0-15	46.5	43	4.9	5.7	Sand	4.99	2.9	0.57	1.23	5.27	10.8	53.7	0	0.12	12.35
A2	15-32	37.9	50.3	5.3	6.6	Loamy sand	5.08	2.7	0.28	0.94	5.78	4.8	70.2	0	0.08	10.03
AE	32-45	39.1	48.6	5.9	6.4	Loamy sand	5.2	1.7	0.22	0.5	3.02	7.3	56	0	0.06	6.15
E	45-90	33.9	54.2	6.2	5.7	Sand	5.09	0.9	0.15	0.24	1.75	8.6	37.5	0	0.04	2.32
Bsm1	90-110	34.1	50.7	7.6	7.6	Loamy sand	5.13	1.4	0.3	0.49	4.5	6.7	38.8	0	0.05	6.15
Bsm2	110-130	33.4	51.2	6.8	8.7	Loamy sand	5.06	1.1	0.16	0.35	2.96	5.4	54.3	0	0.05	3.89
Bhsm	130+	52.5	39.2	3.2	5.1	Sand	5.04	1.1	0.23	0.61	5.33	4.3	62.3	0	0.04	6.15
P5 Typic Quartzipsamments																
Ap	0-12	4.2	92	1.9	1.9	Sand	5.6	10.4	1.89	1.89	3.59	52.6	0	0.5	0.1	8.47
C1	12-45	4.2	93.4	0.5	1.9	Sand	5.23	4.4	0.46	0.46	0.96	47.9	0	0	0.06	1.57
C2	45-80	1.4	96.1	0.8	1.7	Sand	5.24	2.4	0.33	0.33	0.63	52.4	0	0	0.05	1.57
C2	80-120	5.1	93.2	0.5	1.2	Sand	4.97	4.1	0.56	0.75	1.16	48.3	25.3	0	0.08	1.57
C2	120-140+	2.5	93.1	2.1	2.3	Sand	5.2	3.1	0.41	0.41	0.91	45.1	0	0	0.05	1.57
P7 Typic Haploperox																
Ap	0-15	31.8	36.5	17.1	14.6	Sandy loam	5.1	5.4	3.67	4.33	13.07	28.1	15.2	0.07	0.11	25.46
AB	15-60	27.6	35	15	22.4	Sandy clay loam	4.91	1.5	0.59	2.2	7.49	7.9	73.2	0	0.1	9.28

BA	60-80	26.4	32.5	16.7	24.4	Sandy clay loam	4.85	0.8	0.41	2.02	6.61	6.2	79.7	0	0.09	8.47
Bo1	80-110	27.3	35.9	13.7	23.2	Sandy clay loam	4.87	0.6	0.3	1.91	4.7	6.4	84.3	0	0.05	4.64
Bo2	110-140	25.6	35.3	14.8	24.3	Sandy clay loam	4.88	0.4	0.35	2.24	3.45	10.1	84.4	0	0.06	2.32
Bo3	140-195	23.9	31.9	13.9	30.3	Sandy clay loam	4.88	0.4	0.27	2.16	3.67	7.4	87.5	0	0.07	1.57
Cc	195-250+	20.9	30.4	12.7	36.1	Sandy clay loam	4.85	0.5	0.26	2.72	4.16	6.2	90.4	0	0.08	1.57
P13 Typic Haploperox																
Ap	0-15	7.4	44.4	14.8	33.5	Sandy clay loam	4.85	1.8	0.38	1.99	10.38	3.7	80.9	0	0.05	27.78
AB	15-30	7.6	44.8	13.4	34.2	Sandy clay loam	4.87	1.4	0.28	1.89	8.28	3.4	85.2	0	0.04	16.18
BA	30-42	7.3	46.1	14.2	32.5	Sandy clay loam	4.75	2.4	0.31	1.73	7.21	4.3	82.1	0	0.03	12.35
Bw	42-70	7.3	46.7	14.9	31.1	Sandy clay loam	4.72	1.3	0.35	1.67	5.15	6.8	79	0	0.04	6.96
Bwv1	70-100	6.3	44.9	14.6	34.2	Sandy clay loam	4.77	1.7	0.31	1.54	3.91	7.9	79.9	0	0.05	3.89
Bwv2	100-125	5.4	35.9	15.3	43.3	Clay	4.75	1	0.28	1.89	3.68	7.6	85.2	0	0.02	2.32
Bwv3	125-150+	5.5	31	14.4	49.1	Clay	4.83	0.6	0.27	1.69	3.67	7.4	84	0	0.02	2.32
P14 Typic Hydraquents																
Ap	0-12	2.8	40.6	34.8	21.8	Loam	5	7.6	0.97	2.48	10.17	9.5	60.9	0.52	0.23	33.93
A2	dez/32	7.4	48.9	25.6	18.1	Sandy loam	4.77	2.5	0.37	1.88	5.87	6.3	80.3	0	0.09	7.71
A3	32-55	2.1	47.6	33.9	16.5	Loam	4.31	4.1	0.26	1.96	8.36	3.1	86.7	0	0.05	17
ACg	55-80	4	49	29.4	17.6	Sandy loam	4.47	2.3	0.33	2.03	7.03	4.7	83.7	0	0.11	11.6
Cg1	80-140+	6.8	29.8	21.6	41.8	Clay	5.07	0.9	0.99	3.73	6.49	15.3	73.5	0	0.08	3.89
SALT-AFFECTED SOILS																
P3 Sulfic Psammowassents																
Cg1	0-20	1.4	72.1	9.3	17.2	Sandy loam	4.97	6.7	13.6	13.6	16.9	80.5	0	42.98	11.29	24.71
Cg2	20-40	1.7	71.7	9	17.6	Sand loam	4.96	6.9	14.55	14.55	17.05	85.3	0	46.7	14.21	18.5
Cg3	40-60	1.9	81	5.8	11.3	Loamy sand	4.17	6.2	11.48	11.76	15.08	76.1	2.4	45.26	14.55	17.75
Cg4	60-80+	2.2	91.7	1.3	4.8	Sand	3.03	4.4	5.9	7.41	9.3	63.4	20.4	40.48	8.43	6.96
P4 Typic Sulfiwassents																
Cg1	0-20	0.5	6.4	56.2	36.9	Silty clay loam	4.58	12.7	29.09	29.09	37.69	77.2	0	41.21	29.2	70.19
Cg2	20-40	0.5	5.5	62.6	31.4	Silty clay loam	3.67	17.8	39	39.76	47.3	82.5	1.9	47.19	42.7	47.85
Cg3	40-60	0.6	6	59.6	33.8	Silty clay loam	4.9	30.8	33.88	33.88	38.98	86.9	0	52.75	30.2	56.32
Cg4	60-80+	0.4	6.4	60.9	32.3	Silty clay loam	2.71	16.5	34.23	38.11	47.93	71.4	10.2	39.25	40.7	48.61

P6 Sodic Hydraquents

A	0-12	1.6	20.2	47.6	30.6	Clay loam	4.02	2.1	17.22	18.26	23.42	73.5	5.7	42.99	14.08	16.18
AB	dez/17	0.6	16.3	55.5	27.6	Silty clay loam	3.98	2.8	20.44	21.39	25.54	80	4.4	49.69	20	10.03
Bgw	17-25	0.8	31.9	42.2	25.1	Loam	4.97	2.9	17.02	17.21	19.22	88.6	1.1	45.56	12.33	6.15
Cg1	25-40	0.8	16.2	49.9	33.1	Silty clay loam	5	1.8	19.58	19.58	21.88	89.5	0	50.01	11.01	6.15
Cg2	40-70+	1.1	28.7	43.4	26.8	Loam	6.39	3.1	18.56	18.56	18.86	98.4	0	54.54	12.86	2.32

P8 Sodic Hydraquents

A	0-30	0.2	23.3	57.8	18.7	Silt loam	5.97	8.4	4.92	5.2	9.12	53.9	5.4	12.51	0.3	20.07
Bw	30-35	0.4	14.1	47.8	37.6	Silty clay loam	5.33	2.8	11.03	11.22	15.23	72.4	1.7	25.87	2.27	13.86
Cg1	35-65	5.5	90.6	2.6	1.3	Sand	5.38	2.1	2.11	2.11	2.31	91.3	0	60.76	3.41	1.57
Cg2	65-110	0.6	11.4	58.8	29.2	Silty clay loam	4.91	3.5	12.38	12.57	14.38	86.1	1.5	38.95	5.38	6.15
Cg3	110-130+	0.1	13.4	56.6	29.9	Silty clay loam	3.19	3.2	10.79	13.72	18.39	58.7	21.4	22.85	4.54	16.18

P9 Sodic Hydraquents

Cg1	0-20	2.2	48.5	31.5	17.8	Loam	5.19	6	10.19	10.19	12.39	82.2	0	46.62	4.03	6.15
Cg2	20-40	1.6	33.5	31.7	33.3	Clay loam	4.89	6	19.3	19.3	22.3	86.5	0	54.95	7.32	8.47
Cg3	40-60	0.7	20.1	41.7	37.5	Clay loam	4.75	5.4	22.05	22.05	23.95	92.1	0	60.3	7.2	4.64
Cg4	60-80	0.7	19.3	41.7	38.4	Silty clay loam	5.22	4.6	22.32	22.32	23.92	93.3	0	60.37	5.8	3.89
Cg5	80-100	0.8	17.6	43.1	38.5	Silty clay loam	6.24	6	24.3	24.3	25.2	96.4	0	59.91	9.69	2.32
Cg6	100-120	0.8	17.4	44.2	37.6	Silty clay loam	6.12	8	27.12	27.12	28.22	96.1	0	57.37	9.8	4.64

P10 Sodic Hydraquents

A	0-10	0.4	49.8	38.3	11.5	Loam	5.42	6	4.02	4.49	7.92	50.8	10.5	4.75	4.02	12.35
Cg1	out/25	0.9	20.3	57.7	21.2	Silt loam	4.89	2.6	12.09	12.37	14.79	81.7	2.3	26.64	3.21	5.39
Cg2	25-40	1.3	20.9	53.2	24.7	Silt loam	5.6	6	15.31	15.31	17.51	87.4	0	33.99	4.94	3.89
Cg3	40-110+	0.3	40.5	43.8	15.3	Loam	5.72	3.4	11.48	11.48	12.08	95	0	44.2	4.99	0.75

P11 Sulfic Hydraquents

Cg1	0-15	0.6	56.3	31.8	11.3	Sandy loam	2.76	30.2	12.66	18.9	23.86	53.1	33	16.51	12.9	17.75
Cg2	15-28	0.5	36	42.3	21.2	Loam	2.75	20.4	9.68	15.26	21.98	44	36.6	14.34	11.8	24.71
Cg3	28-55	0.2	47.1	38.8	13.9	Loam	2.75	36.9	16.33	23.61	30.03	54.4	30.8	17.2	18.7	30.86
Cg4	55-80+	0.4	14.7	54.4	30.6	Silty clay loam	3.04	29.4	12.39	15.89	19.89	62.3	22	17.61	10.56	10.03

P12 Sodic Hydraquents

A	0-15	8.4	86.2	2.4	2.9	Sand	5.78	2.1	1.97	1.97	2.57	76.7	0	32.68	4.21	4.64
---	------	-----	------	-----	-----	------	------	-----	------	------	------	------	---	-------	------	------

Cg1	15-80	8.3	3.9	59.2	28.6	Silty clay loam	3.7	14.1	14.82	16.52	20.42	72.6	10.3	31.71	4.05	10.03
Cg2	80-130	1.4	7.6	61.3	29.8	Silty clay loam	4.35	17.7	14.63	15.29	18.33	79.8	4.3	29.6	3.31	3.07
Cg3	130-180+	3.3	13.8	52.4	30.5	Silty clay loam	4.69	22.4	17.83	17.92	20.53	86.8	0.5	31.97	3.48	3.07

BS - bases sum, CECef - effective cation exchange capacity, CECpt - potential cation exchange capacity, PSB - percent of base saturation, Alsat - percent of Al saturation, EPS - Exchangeable Sodium Percentage, EC - Electric conductivity, TOC - total organic carbon.

The second group, characterized by soils affected by salts, has a texture dominated by finer particles, with a predominance of the silt fraction. The pH in H₂O shows shallow values in the Sulfiwassents and Sulfic Hydraquents, reaching 2.7 (Table 7). In the other soils, it occurs between 3 and closes to 6, generally with higher values in deeper horizons. The extractable P content presents similar behavior to soils not affected by salts, except for the profiles in which the salts involve the presence of sulfur, in which higher P values were observed, reaching 36.9 mg.kg⁻¹. Unlike the first group, all soils are eutrophic (Table 7), and aluminum saturation is low or null. The organic carbon content is high in practically all profiles, reaching maximum values of 70.19 g.kg⁻¹. As expected, sodium saturation is high, with values always above the limit for the definition of sodium character, resulting in increased conductivity, whose lowest and highest averages, per profile, were, respectively, 3.18 to 35.7 dS m⁻¹.

5.3.4.1 Salt-affected soil map

The salinity map represents 90.7% (R² Adj.) of soil saline varying according to the indices. Marajó Island has greater saline-sodic zones with lower topographic values (until 4m a.s.l) represented by the extremally saline zone (Fig. 31). The area occupies 357.1 km² (5.3% of the study area) that represents electric conductive values of soils higher than 16 dS/m⁻¹.

The *Sesuvium portulacastrum* is a common halophyte plant observed in the salt-plains and apicum domain. The *L. Carnaúba* (*Copernicia prunifera* (Miller) H. E. Moore (Arecaceae)) is a native palm tree from the Brazilian semiarid region (SOUSA et al., 2015) and is also present in the study area. Higher saline zones (8-16 dS/m⁻¹) occur in an extensive area of 1285.4 km² (19%) in the north of the study area, with considerable occurrence inside the island near the Arari Lake at the centre of the Marajó Island (Figs. 31 and 32). The borders of the Marajó Island are constituted by dense vegetation of mangrove, rainforest, savanna, and restinga (Henriques et al., 2021) represented by 2607.1 km² (38.6%). The interior of Marajó Island is constituted by potential moderately saline zone (4-8 dS/m⁻¹, 2501.9 km², 37.1%) in which is observed not saline areas jointly to saline zones.

Image analysis and field observations highlights salt crusts at the surface (Fig.31 and 32C). Halite (NaCl) is a mineral formed by salt in which its electromagnetic spectrum

has intensive reflectance in almost all of the wavelengths (MATINFAR; ZANDIEH, 2016). The salinity map spectral curve indicated for grassland salt-plains a greater reflectance from the 705 wavelengths (B5 red-edge1) with a maximum peak in 1610 wavelength (B11 SWIR1 Sentinel-2 band) (Fig. 33).

The spectral comportment is similar to the salt crust reflectance curve presented by Aboukarima et al. (2018), from Landsat-7 band analysis. The salinity areas of Marajó Island have different spectral signatures compared to the coastline restinga sandy domain. Dense vegetation of mangrove and rainforest also revealed the typical spectral response of healthy vegetation, with maximum reflectance at the near-infrared band (MAŠKOVÁ; ZEMEK; KVĚT, 2008).

Figure 31: Salt-affect soil map of eastern Marajó Island, Brazilian Amazonia.

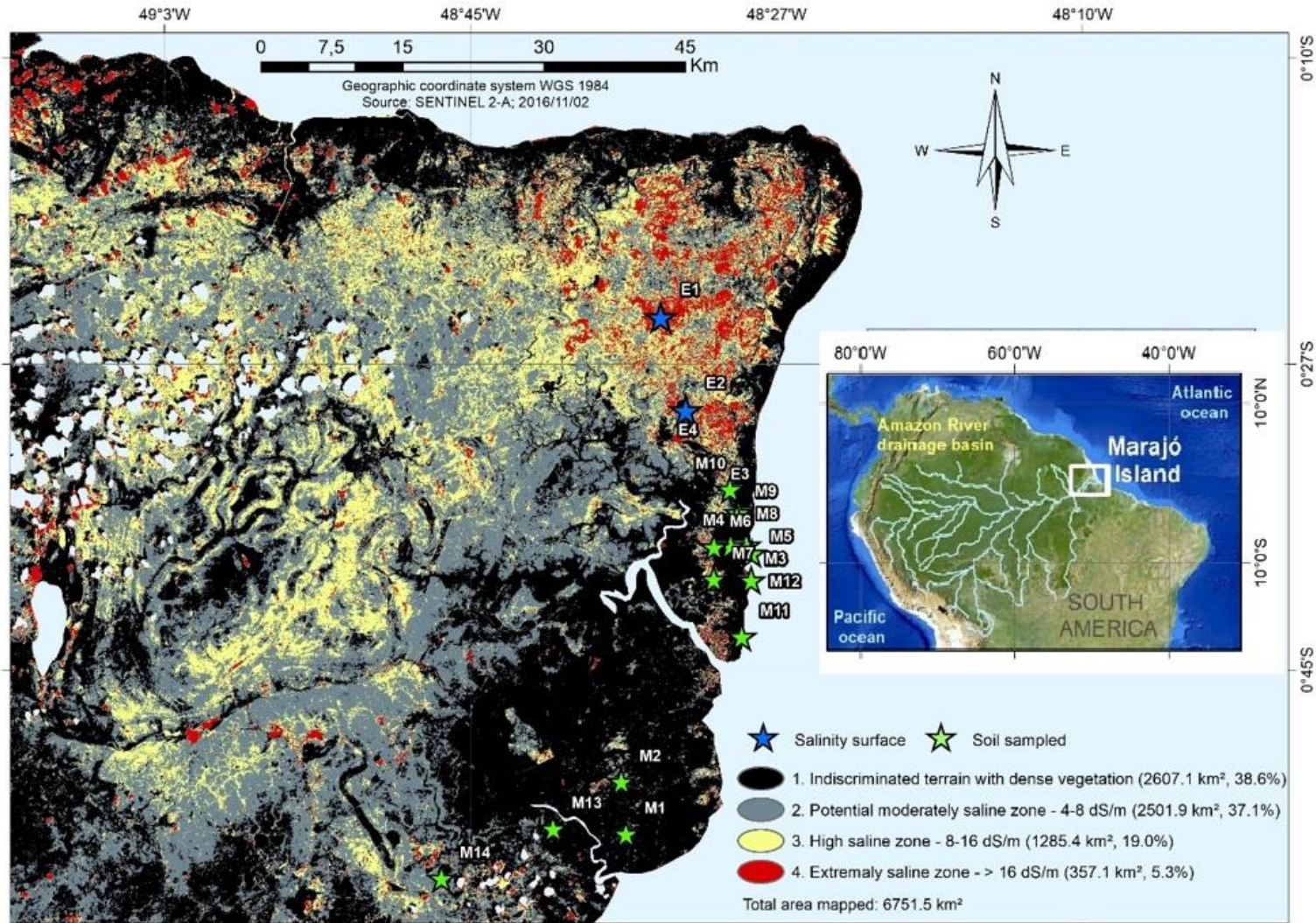
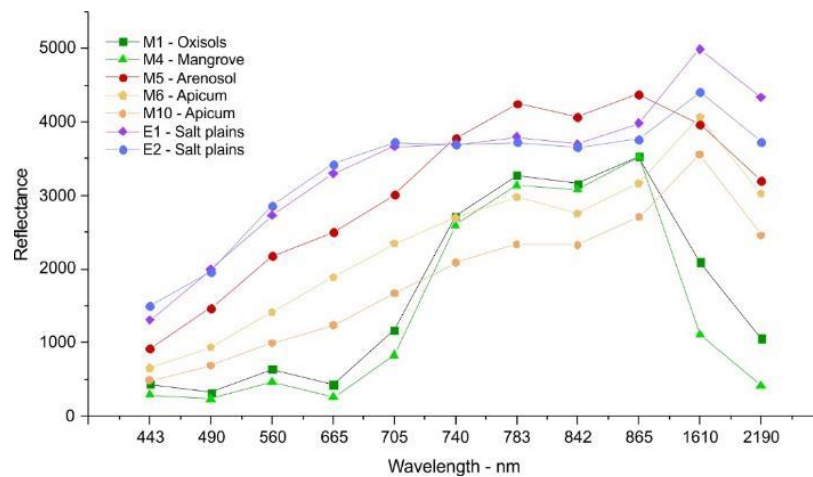


Figure 32: Main environments related, with the presence of *Sesuvium portulacastrum* and Carnaúba (*Copernicia prunifera* (Miller) H. E. Moore (Arecaceae)).



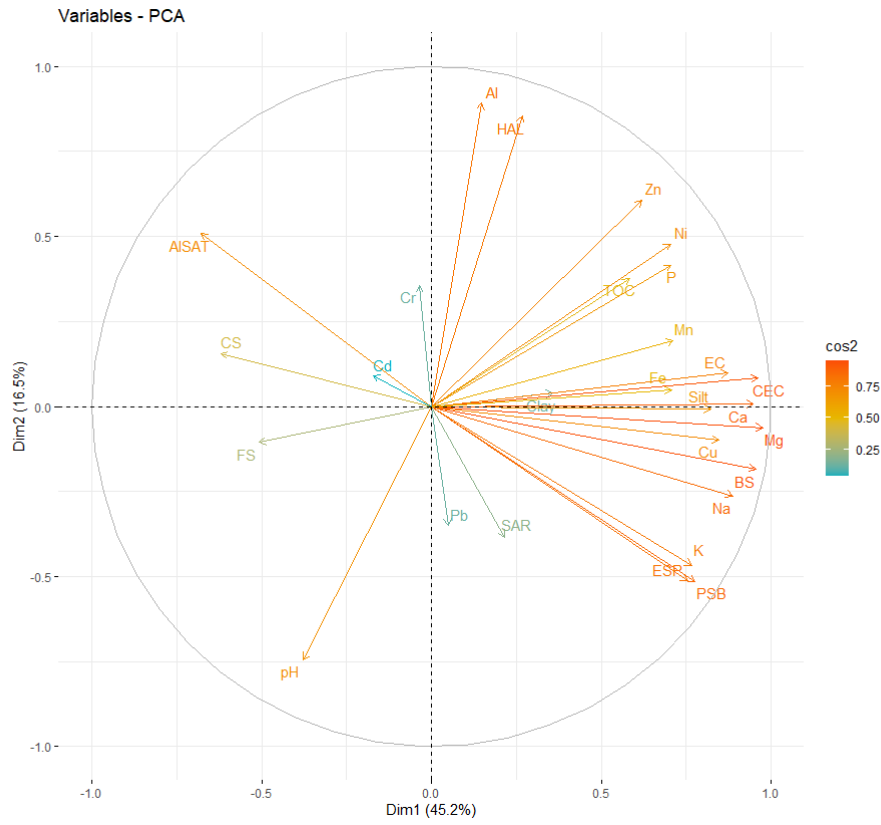
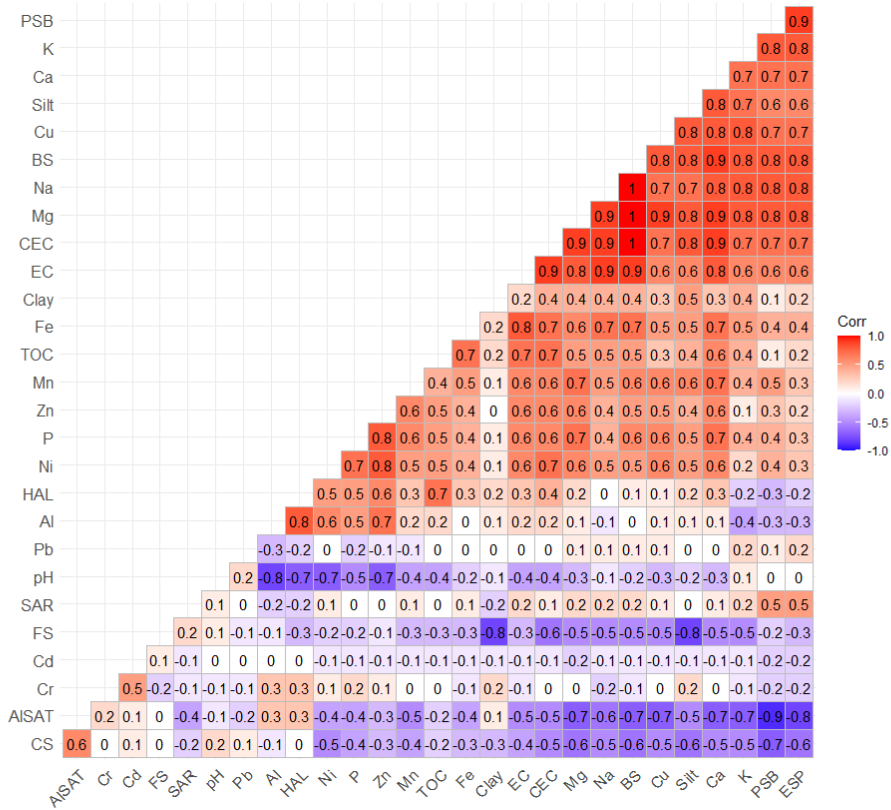
Figure 33: Spectral salinity curves



5.3.4.4 Soil statistical analysis

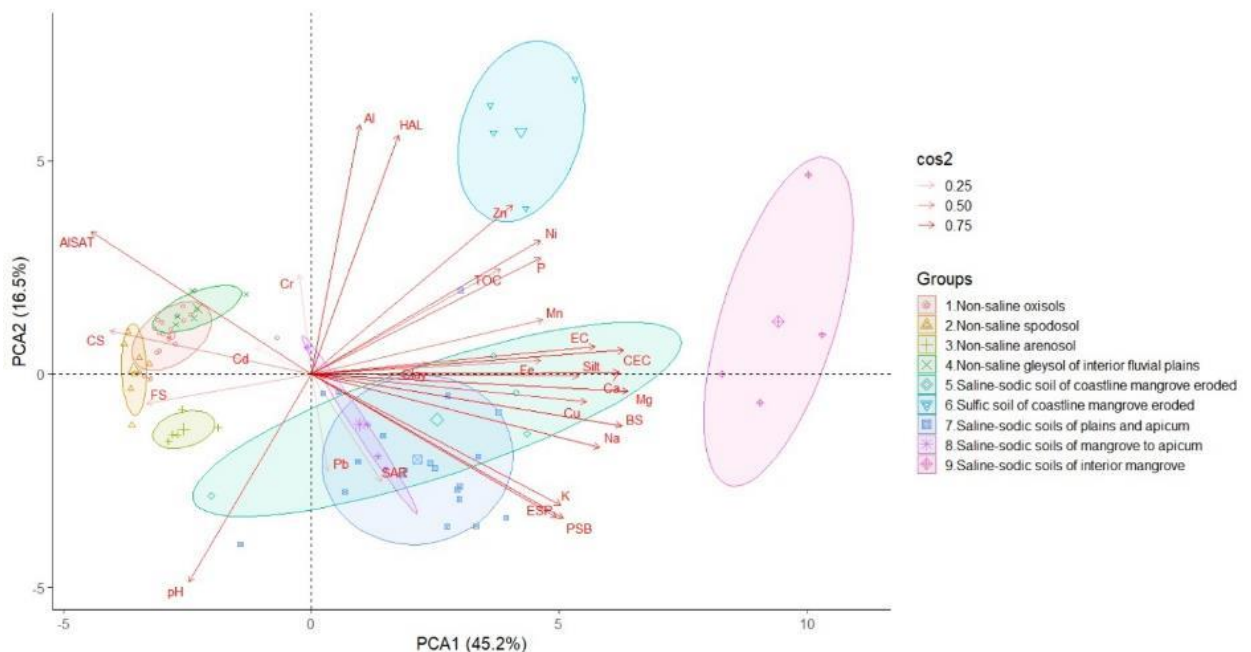
The results of the Principal Component Analysis (PCA) highlight the main two principal components explain 45.2% in PC1 (Dim.1) and 16.5% in PC2 (Dim.2) of the soil variability at Marajó Island. Most of the saline and sodic attributes are explained by the PC1, with marked opposite relations between chemical and physical aspects. The PC1 revealed that most of the variables has positive correlations (Fig. 34). The PC2 explains better chemical relations among Al^{3+} and pH, and influence of metals.

Figure 34: Plots of PCA1 and PCA2 axes of relations between environment groups and soil attributes and respective correlation matrix of soil variables.



The ellipses show differences between the non-saline and saline-sodic soil environmental groups (Fig. 35). The soils affected by salt has positive relations mainly to chemical attributes associated to silt and clay textures. The chemical attributes differentiate and indicate the heterogeneity of the landscape of the studied area. The most saturated soils in sodium are within the mangrove domain, represented by the group 9. The coastine mangrove border also has differences, with sulfic soils (group 6) most related to acid pH values compared to the others saline-sodic soils. The group 5 also represent the mangrove coastline border, with inheritances of interior mangrove domain chemical attributes associated to tide affects that influence on texture and pH values.

Figure 35: Principal component analysis and environmental groups.



The salt herbaceous plains and apicuns also evidenced consider environmental differences, with intensive sodium concentration at soil solution associated to sodium adsorption in the exchangeable complex. The salinity results are similar to the saline estuary of Tejo and Sorraia rivers in Portugal (PAZ et al., 2020) that highlights strong relationships between base accumulation and salinity. The principal component analysis also evidenced the most dependence of the non-saline soils to texture, lower base saturation and higher aluminium saturation, that indicates better drained soils.

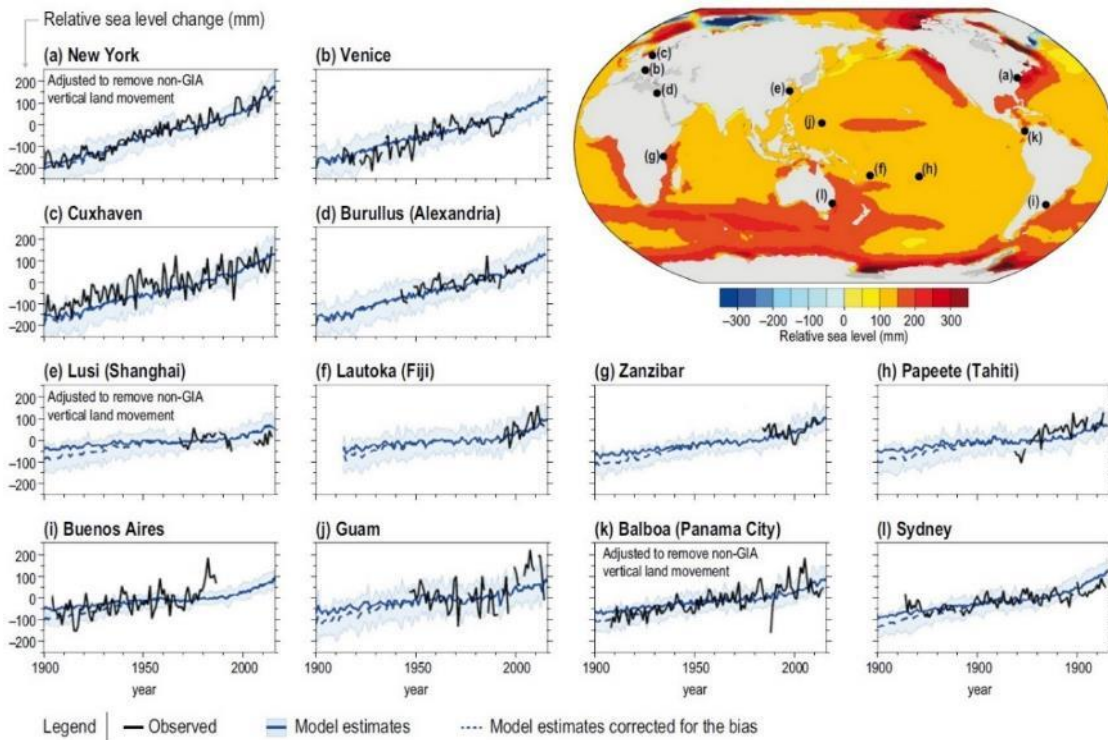
5.2.5 Discussions

Since the Last Glacial Maximum (LGM), during the Quaternary (ca 30 ka), the ocean and climatic fluctuation affected sediment deposition, groundwater dynamics, evapotranspiration, vegetation dynamics, pedogenesis, and ancient human occupation (Clark et al., 2009; Cohen et al., 2015; Cohen and Lara, 2003; França et al., 2012; Francisquini et al., 2014; Freitas et al., 2001; Guimarães et al., 2010; Meggers and Danon, 1988; Rossetti et al., 2013, 2007; Schaan, 2010; Scott and Collins, 1996; Tatumi et al., 2008).

The results of remote sensing evince the saline-sodic occurs over extensive areas and has non-random patterns of the soil spatial distribution. Most saline soil concentrations are located in the northeast of the study area, associated with extensive herbaceous surface plains with shallow groundwater (Henriques et al., 2022). The area has considered salt at the surface, capable of forming salt crusts visible through satellite images. In the north, the salt surfaces are combined with herbaceous plant communities of Restinga vegetation (Silva et al., 2010). The Restinga in Marajó Island is an indicator of an ancient mangrove zone disturbed and replaced during the mid-Holocene by water intrusion from the north-northeast sector of the island. Was also recognized second important salinity domain extended from the north and northeast, until the center of the island near Arari Lake, where was identified a paleoestuary system recognized by Rossetti et al. (2007) and Rossetti et al. (2008), from the Upper Pleistocene to Holocene.

Since the Last Glacial Maximum (LGM) from 21.000 B.P., models indicate the worldwide's mean sea level has risen to 120 m compared to the present mean global sea level (Clark et al., 2009; Dougherty et al., 2019; Milne and Mitrovica, 2008), with the tendency of progressive increasing for the next centuries (Fig. 36). Between 8.000 to 5.000 B.P. has also evidence of 3m to 6.5 m local sea-level risen that affected several coastal ecosystems (Long, 2001; Shennan et al., 2000).

Figure 36. Marine levels measured in the last century.



Considering the mid-Holocene as an important moment of increasing global sea level (MIRANDA; ROSSETTI; PESSEDA, 2009; ROSSETTI et al., 2008), the high salt concentration in Marajó Island has evidence of significant marine incursion in the region. The paleo estuary system located near Arari Lake is an inheritance of mid-Holocene marine incursion in the region (ROSSETTI et al., 2008), which corroborate with the results for the north and northeast of marine incursion. Subsidence trends by the Amazon River sediment weight from the north Marajó Island sector may also affect the amplitude and extent of the mid-Holocene sea-level rise that flooded the region.

Soil chemical and physical analysis highlight that soil properties has considerable differences, with variances according to the environment. The extensive salt plains and apicum near to mangrove have high values of sodium adsorption ratio, higher values of sodium saturation and Electric conductivity. The sodium adsorption affects the soil porosity, its structure, and its swelling with the water presence. The consequences are soils are extremally compacted during dry moments, that difficult for the root development of plants. The sodium concentration in the soil solution also represents an osmotic imbalance, whose plant is unable to absorb nutrients and water properly.

Sesuvium portulacastrum is a common halophyte plant in the apicum and salt plains, that has different adapted mechanisms to survive. The L. Carnaúba (*Copernicia prunifera* (Miller) H. E. Moore (Arecaceae)) is present in the apicum domain and is a native palm tree from the Brazilian semiarid and its salinity environmental condition (Sousa et al., 2015). Here we exposed two main possibilities to explain the Carnaúba in the current humid conditions. First, the plants can be indicative of a drier early to mid-Holocene climate condition in the Amazon (Mayle and Power, 2008), which favored the expansion of its vegetation type. Second, the palms were planted by human colonizers during the past years. In both situations, the environmental aspects of salinity, and intensive annual sun radiation associated with evapotranspiration provide a local specific condition to keep the typical vegetation of Brazilian semi-arid. Marine and tidal dynamics during Holocene has the potential to promote its high base saturation. The apicum has signs of ancient marine water intrusion associated with sandy soil horizon buried in the P8, and regional topography near the current sea level.

The mangrove at Marajó Island near Soure is dating from 2400 to 640 BP (Behling et al., 2004; França et al., 2012), which represents an ancient system domain associated with the highest salinity saturation in its soils. The P4 represents the most established mangrove zone with higher base saturation (Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , Na^+) with sodium as a significant component in the cation exchangeable complex (CEC), associated with clay and silt texture. Soils of the mangrove margins have different aspects affected by the marine and tide dynamics. The P12 represents erosive trends that progressively dismantle the mangrove, with a thin sandy layer deposition on top. Under 15cm, the P12 has chemical and texture characteristics similar to P4, which means ancient established hydromorphic soil current affected by sea-level rise. The P11 is also on the mangrove border, with considerable sulphuric process motivated by the erosive tide dynamics and explosion of its soil substrate. The main indicator is the acid pH from 3.04 to 2.75 associated with field evidence of typical smell in the air, and vegetation erosion.

The chemical and texture values of the non-saline soils groups indicate a strong relationship to pH and Al^{3+} saturation, associated with coarse and fine sand from post-Barreiras and Barreiras Group and its iron duricrust formed (Fig. 35). The non-saline oxisols (group 1) are most affected by the long-term pedogenetic processes since the

mid to late Holocene, with regard to strong relations to coarse sands. Coastline sandy deposition represented by arenosols (group 3) and interior land spodosols (group 2) is related to coarse and fine sandy texture and lower values of base saturation, including negligible values for sodium. The statistical analysis indicates a considerable difference compared to a saline-sodic domain, which indicates interior fluvial dynamics affected the Holocene soil and environmental evolution. The sandy soil of group 2 has savanna vegetation and podzolization process, which is an indicator of ancient fluvial deposits or ancient coastline eolian dynamic processes. Hydromorphic soil of interior non-saline plains (group 4) is affected by fluvial dynamics and relationships to high aluminum saturation, and sandy textures, and is not influenced by current saline accumulation.

5.2.6 Conclusions

1. Remote sensing has the potential to recognize spectral signatures of salt-affected soil and its environmental conditions. Salinity indices have resulted in mapping herbaceous salt plains, being a necessary choice for the most representative indices with statistical methods and soil samples results.
2. The saline-sodic soils of Marajó Island have inheritances of sea-level rise during the Holocene. The spatial distribution of salt associated with chemical and physical soil characteristics are the indicators of the regional landscape evolution. The sodium concentration affected directly and indirectly the pedogenesis process in the fluvial-estuary ecosystem domain.
3. The Principal Component Analysis (PCA) and correlation matrices are significant statistical methods to recognize the soil and environment's physical and chemical properties.
4. The soil attributes evidenced the influence of Holocene sea-level variation and tide contribution to soil affected by salt in Marajó Island. Local environmental conditions are important to regard ancient inheritances process and vegetation.

6. AMBIENTES LATERÍTICOS E IMPLICAÇÕES NA EVOLUÇÃO DA PAISAGEM

Esse capítulo apresenta os primeiros esboços sobre as discussões das couraças ferruginosas e seus solos associados na Ilha de Marajó. O propósito é, a partir dessa primeira proposta, ampliar as discussões e análises acerca dos processos de degradação das couraças e estruturação de solo a partir dessas. Trata-se, nesse contexto, da verticalização em uma das unidades geoambientais que se destacaram na evolução da paisagem da Ilha.

6.1 Interações pedogeomorfológicas e evolução do Grupo Barreiras na Ilha de Marajó, foz do rio Amazonas, Pará, Brasil

6.1.1 Resumo

As coberturas pedológicas, seu contexto geomorfológico e condições edafoclimáticas podem fornecer diversos indicadores acerca do quadro evolutivo de uma paisagem. Para a Ilha de Marajó foi realizado transecto de 15km no setor leste, que abrangeu desde a margem costeira, de 20m de altitude, até o interior por volta de 4m. Foi realizado trabalho de campo e coletada amostras de solo, que foram analisados seus atributos químicos e físicos. Como resultado, foram observadas consideráveis transformações da paisagem, marcadas principalmente nos solos. Há heranças geoarqueológicas, referentes principalmente à presença das terras-pretas-de-índio. As couraças ferruginosas costeiras, por sua vez, possuem indicadores de uma longa história, associadas a solos que se desenvolvem de seus materiais. A vegetação evidencia como os geoambientes resguardam heranças edafoclimáticas, sendo observado campos arenosos dominados por cerrado, em detrimento de campinaranas típicas do domínio amazônico.

6.1.2 Introdução

Ambientes costeiros são extremamente mutáveis e heterogêneos, regidos pela dinâmica hidrológica fluvial, pluvial e marinha. Expressam o espaço de interações entre as porções terrestres e marítimas, nos quais ambos se influenciam mutuamente no decorrer do tempo (RODRÍGUEZ; WINDEVOXHEL, 1998). Os ecossistemas que findam nessa interface possuem delicado equilíbrio na interação de seus

componentes, que se ajustam constantemente em constantes fluxos de matéria e energia nas mais variadas escalas dimensionais e temporais.

Os elementos que integram a paisagem são as formas do relevo, as coberturas superficiais pedológicas/saprolíticas, a vegetação, as águas em seus múltiplos estados físicos, o arcabouço litoestrutural e os organismos vivos, nos quais estão incluídos os seres humanos (CHRISTOFOLETTI, 1999; LIMBERGER, 2006). A investigação desses elementos pode indicar os ritmos das transformações evolutivas da paisagem, os quais fornecem importantes indicadores sobre a dinâmica costeira ao longo dos anos.

A Ilha de Marajó, objeto de estudo deste trabalho, tem sua posição estabelecida na desembocadura do rio Amazonas, e está no contexto do maior arquipélago fluvio-estuarino do planeta (FERREIRA, 2013). Esse contexto espacial faz sua dinâmica costeira ser bastante fluida e heterogênea, sendo regida pela intensidade de forças e interações entre as águas fluviais continentais e as águas salinas/salobras do oceano Atlântico. Diferentes tempos estão marcados na paisagem da região, especialmente na Ilha de Marajó, maior ilha do arquipélago (FRANÇA; SOUZA FILHO; EL-ROBRINI, 2007; ROSSETTI; ROCCA; TATUMI, 2013), cujos solos e o relevo fornecem importantes indicadores sobre seus aspectos evolutivos, sobretudo, durante o Holoceno.

Do ponto de vista geológico, a sucessão Pirabas-Barreiras (Neógeno) e suas sequências sedimentares posteriores (Pleistoceno-Holoceno) representam as facies estratigráficas superiores que arquitetam e influenciam nos processos pedogenéticos-geomorfológicos da Ilha de Marajó. Conforme Tatumi et al. (2008), a Ilha de Marajó possui os sedimentos pós-Barreiras de idade pleistocênica-holocênica, fase I e II, denominado localmente como Formação Tucunaré (COSTA et al., 2002), posicionados sobre a sucessão Pirabas-Barreiras (Formação Marajó) (TATUMI et al., 2008). Essas sequências se localizam principalmente no setor meridional da Ilha, bem como por uma estreita faixa na porção leste. Para o restante da Ilha, por sua vez, predominam-se sedimentos holocênicos fluviais colmatados (IBGE, 2003).

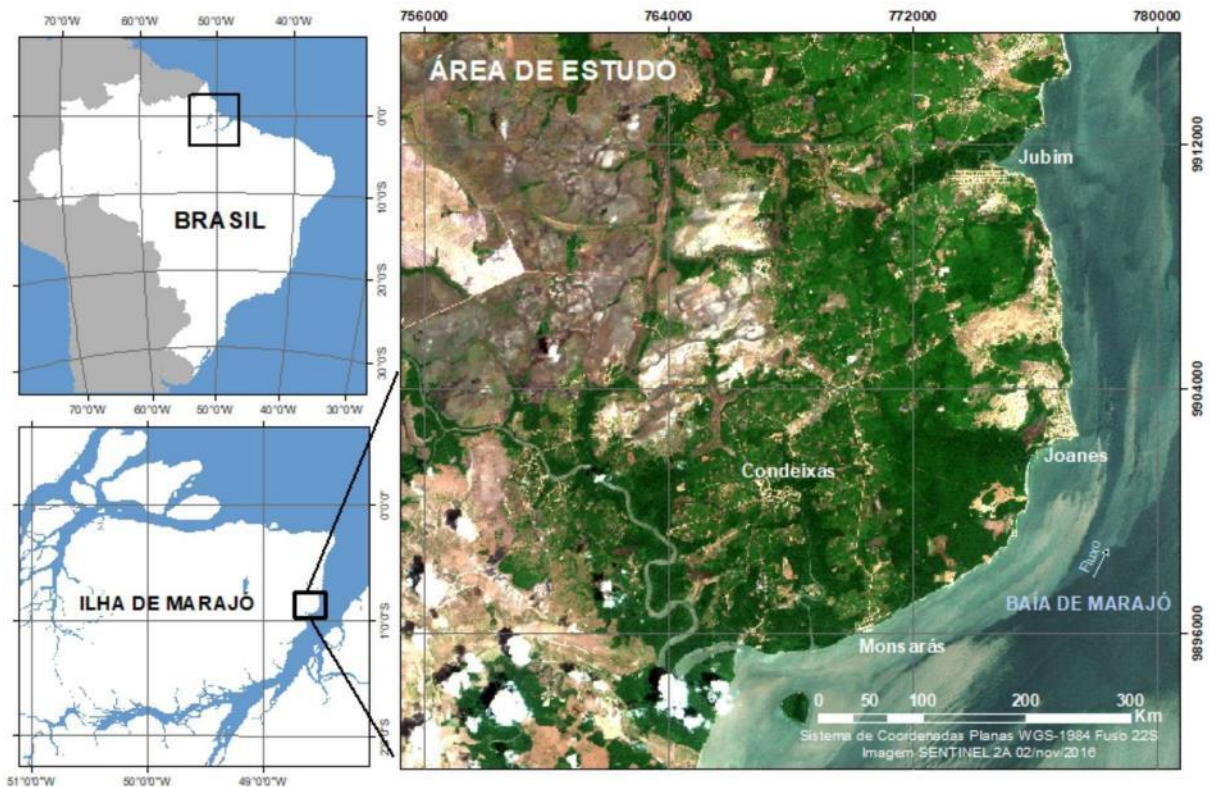
Essas sequências sedimentares quaternárias, são palco dos processos ecossistêmicos da Ilha, cujos solos e as formas do relevo fornecem elementos ao pesquisador para que se compreenda os ritmos de transformações da paisagem da região. É nesse contexto que se insere este trabalho, cujo objetivo principal é o de apresentar o comportamento das coberturas pedológicas e seu contexto geomorfológico, no setor leste da Ilha de Marajó. Os indicadores expressos, principalmente, nos solos, podem fornecer indicadores sobre como se desdobram os processos geoquímicos e hidrológicos na Ilha, motivados pela maré ou pelas chuvas. Bem como podem revelar situações de vulnerabilidades para comunidades ribeirinhas, visto que variações eustáticas podem alterar o nível de base que regula a dinâmica hidrológica superficial e subsuperficial da Ilha, por conseguinte, reverberando-se nos processos pedogenéticos e na circulação das águas.

6.1.3 Área de estudo

A Ilha de Marajó faz parte de um complexo arquipélago fluvio-estuarino de 59.308,40km², que recebe uma vazão média de 209.000 m³/s (ANA, 2009; LIMA et al., 2005). Está situado na foz do rio Amazonas, no nordeste do Estado do Pará, entre os paralelos 0° e 2° S e meridianos 48° e 51° W. A ilha tem suas bordas delimitadas pelo rio Amazonas ao norte e oeste, pelos rios Pará e Tocantins ao sudeste, e pelo Oceano Atlântico na Baía de Marajó, ao leste. A área investigada está situada no município de Salvaterra, e abrange os distritos de Jubim, Joanes, Monsarás e Condeixas (Figura 37).

Regionalmente, a paisagem da Ilha de Marajó expressa duas grandes principais unidades, uma ao sul-oeste, o Marajó Ocidental, de cotas altimétricas em torno de 40m e estrato arbóreo adensado da Floresta Amazônica, de precipitações médias que chegam a 3500mm anuais (LIMA et al., 2005). No domínio centro-norte, por sua vez, encontra-se o Marajó Oriental, com predominância de campos abertos, topografias mais baixas (cerca de 5m), além de manguezais (COHEN; BEHLING; LARA, 2005; ROSSETTI; BEZERRA; DOMINGUEZ, 2013). A temperatura média anual oscila entre 25°C a 29°C, cuja dinâmica ecossistêmica envolve ritmos anuais de inundações fluviais associadas a precipitações que variam de 2000 a 4000mm (LIMA et al., 2005).

Figura 37: Localização da área de estudo na Ilha de Marajó, Pará, Brasil.



A formação da Ilha de Marajó tem suas heranças a partir do processo de fragmentação do supercontinente Gondwana, no Triássico (~130Ma) e estruturação da Margem Atlântica Equatorial (SOARES JR; HASUI; BEMERGUY, 2012; ZALÁN, 2012). Em um primeiro momento, um gráben foi formado, sendo posteriormente preenchido pelas sequências das Formações de Breves, Anajás e Jacarezinho (Eo a Neocretáceo), seguido no Cenozoico (Neógeno) pela deposição das formações Limoeiro, Marajó, Pirabas e Grupo Barreiras (SOARES JR; HASUI; BEMERGUY, 2012). Por fim, o último estágio de deposição foi durante o Quaternário referente à Formação Tucunaré (COSTA et al., 2002), que representa o pós-Barreiras na região (TATUMI et al., 2008).

6.1.4 Metodologia

A execução deste trabalho seguiu três principais etapas, sendo (i) levantamento de informações do contexto geoambiental da Ilha de Marajó e definição do setor investigado; (ii) trabalho de campo para observação e análise da paisagem, bem como coleta de solos; (iii) análises laboratoriais, confecção de modelos esquemáticos de representação e interpretações pedogeomorfológicas.

Para reconhecimento e análise por sensor remoto foi utilizada a imagem Sentinel-2A, level-1C, de 2 de novembro de 2016, de 10m de resolução espacial, e o modelo digital de elevação do tipo RADAR (Radio Detection and Ranging) do satélite ALOS (Advanced Land Observing Satellite), sensor PALSAR (Phased Arrayed Type L-Band SAR), de 12,5m de resolução. Para a imagem Sentinel-2A foi aplicada a correção atmosférica DOS1, por meio do plugin SCP disponível no software QGIS 3.10. Ao passo que foram corrigidos os valores altimétricos dos pixels do modelo digital de elevação no software ArcGIS 10.6.1 (ESRI, 2018), sendo atribuído o valor zero para o nível marinho e aplicada a ferramenta fill sink do plugin Arc hydro tool.

Por meio da imagem Sentinel-2A, do modelo digital de elevação ALOS PALSAR e do mapa pedológico da folha SA-22 de escala 1:1.000.000 (RADAM, 1974), foi identificada a área para realização dos estudos, expressa por um transecto que compreende o setor leste mais elevado da Ilha, estruturada pelas sequências de sedimentos pleistocênicos-holocênicos da Formação Tucunaré associados à Formação Marajó (Grupo Barreiras), e sua rampa de declinação em direção ao setor central da Ilha, modelada sobre sedimentos holocênicos, mais recentes.

Foram identificadas as características geoambientais do setor escolhido, sendo realizado trabalho de campo em dezembro de 2018 para observação, análise e descrição da paisagem. Em campo foi realizada a coleta de dois perfis de solos, um para cada setor geoambiental identificado, cuja descrição morfológica foi baseada em Santos et al. (2015). Foi realizado levantamento aerofotogramétrico com uso de vant (veículo aéreo não tripulado), cujas fotografias aéreas foram processadas no software Agisoft Metashape 1.5.1, sendo obtido o ortofotomosaico, de resolução centimétrica.

Para a etapa laboratorial, as amostras de cada horizonte foram secas e peneiradas para obtenção de Terra Fina Seca ao Ar (TFSA), para análises químicas e físicas. Os procedimentos a seguir foram realizados nos laboratórios de física do solo, fertilidade e de espectrometria de absorção atômica, do Departamento de Solos, da Universidade Federal de Viçosa. A textura foi obtida pelo método da pipeta, no qual se utilizou a solução de 100ml de água deionizada com o dispersante composto por hidróxido de sódio (NaOH 0,01 mol L⁻¹) (RUIZ, 2005), no agitador do tipo Wagner a

50rpm por 16h. Por meio dessa solução de solo dispersa, separa-se as frações areia, silte e argila pelo método da Embrapa (TEIXEIRA et al., 2017).

O pH foi determinado em H₂O e KCl 1mol L⁻¹; as bases Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ foram obtidas pela extração com KCl mol L⁻¹ e realizada a leitura por espectrofotometria de absorção atômica; Na⁺ e K⁺ foram determinados pela extração com solução Mehlich 1 e fotômetro de chama. Nessa etapa laboratorial também foi obtido o fósforo disponível extraído por solução Mehlich 1, quantificado pelo método da calorimetria com ácido ascórbico; a acidez potencial (H+Al), por sua vez, foi realizada pela extração com acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹, a pH 7,0, sendo quantificado por titulometria com NaOH 0,05 mol L⁻¹ (TEIXEIRA et al., 2017). O carbono orgânico (CO) foi determinado via combustão úmida (YEOMANS; BREMNER, 1988). Com esses dados foram calculados a soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) a pH 7 (T), a CTC efetiva (t), a saturação por bases (V%), saturação por Al³⁺ (m%) e saturação por sódio (ISNa).

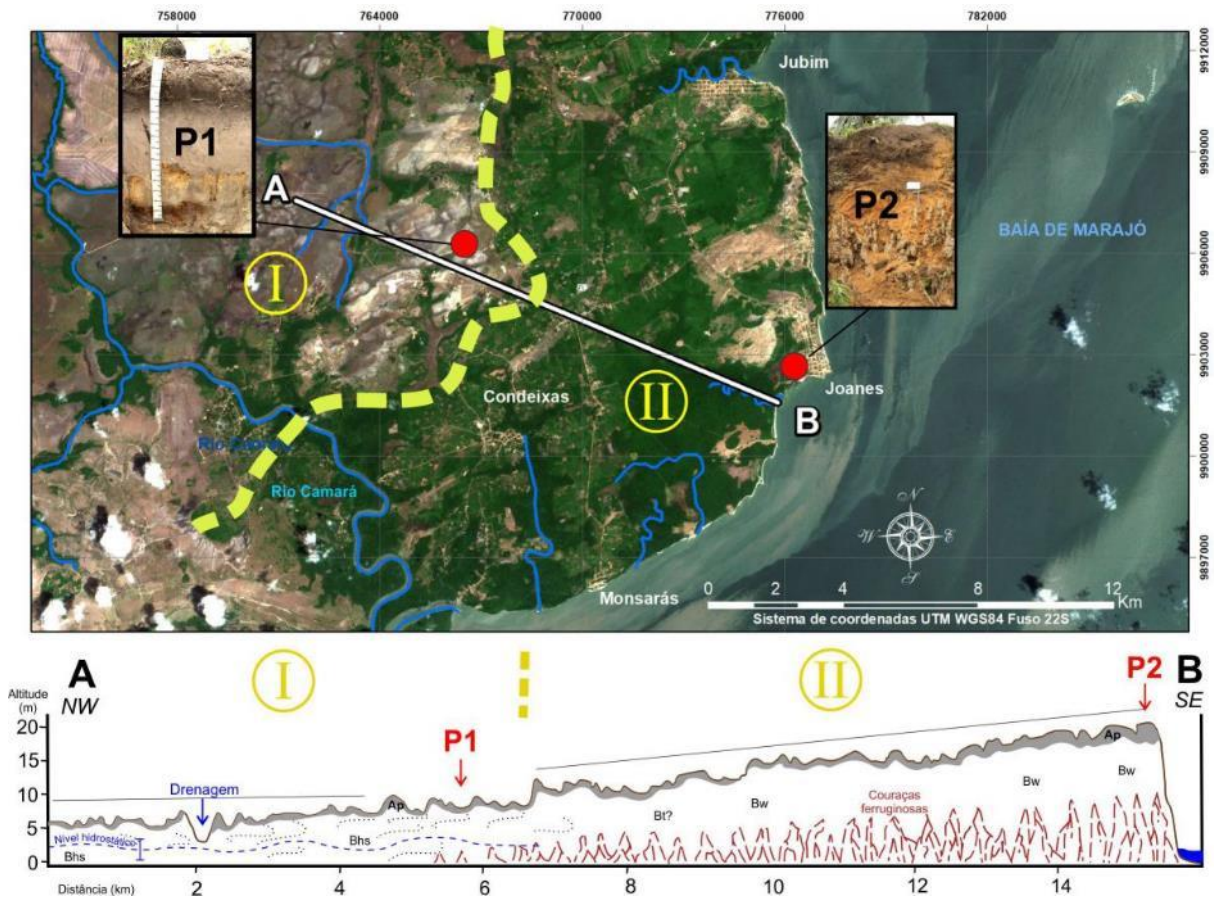
6.1.5 Resultados e discussões

Foram identificados dois principais geoambientes na área investigada, de características e particularidades inerentes a cada. Um a oeste (I), expresso por amplos campos arenosos vegetados por espécies típicas do cerrado strictu sensu, regidos pela saturação de águas pluviais; o outro, a leste (II), de maiores cotas altimétricas, de lençol freático mais profundo, com a presença de espessas couraças ferruginosas degradadas de estrutura colunar. Em termos da organização espacial desses geoambientes, a área investigada é expressa por uma ampla rampa de caimento topográfico rumo ao interior da ilha. As cotas altimétricas mais elevadas estão na margem costeira, cujo front é expresso por falésias de até 20m de altura. Ao passo que o decaimento geral topográfico chega a cotas de 4m em seu trecho mais baixo (Figura 38).

O setor costeiro (II) é arquitetado pelas sequências sedimentares do Grupo Barreiras/Pós-Barreiras, sendo comum nas escarpas das falésias o afloramento de espessas estruturas colunares de couraças ferruginosas. Esses materiais endurecidos são desmantelados progressivamente com a ação fluvio-marinha das águas da Baía de Marajó, que nesse setor é alimentada por uma parte proveniente do

rio Amazonas, outra pelas águas do sistema hídrico Tocantins-Araguaia, bem como a norte pelos avanços e regressões da maré do oceano Atlântico.

Figura 38: Seção topográfica regional e respectivos geoambientes.

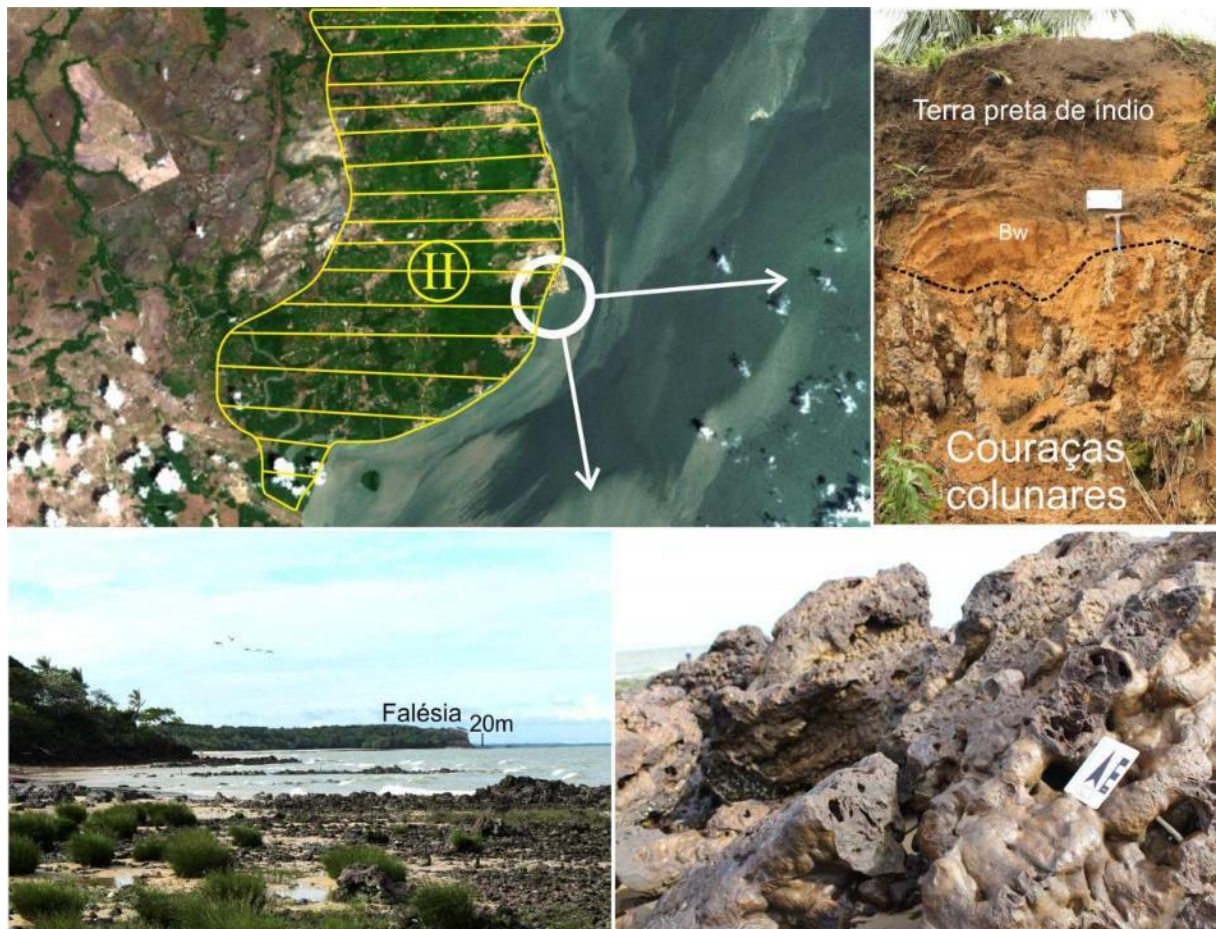


As seqüências sedimentares, portanto, tem a morfogênese de seus materiais condicionada pela regressão lateral da linha de costa, cuja base estruturada por amplas couraças serve como anteparo que reduz a ação da retração lateral das escarpas das falésias. Como sinal desse processo morfogenético, a linha costeira das praias possui grande espriamento de blocos de couraça, tamanho matacão. A ação das águas produziu a suavização das arestas da superfície desses blocos de couraças desmantelados, culminando em superfícies relativamente lisas e estruturas alveolares em seus interiores (Figura 39).

A morfologia do tipo vertical colunar pode representar a dinâmica hidrológica de subsuperfície, uma vez que pode expressar os caminhos preferenciais do deslocamento hídrico em determinado momento na história desses materiais, que pode não corresponder ao contexto atual (o de aflorar em uma margem costeira). Os

processos geoquímicos e biológicos são fortes condicionantes na transformação da paisagem, e podem resultar nas mais variadas heterogeneidades geoambientais. Enquanto as couraças são heranças de oscilações de níveis hidrostáticos, de temporalidades que podem chegar a 16 milhões de anos (ROSSETTI; BEZERRA; DOMINGUEZ, 2013), os processos pedogenéticos são extremamente dinâmicos, sendo capazes de alterar e modelar uma cobertura pedológica em escala de alguns milhares de anos.

Figura 39: Setor II da área investigada.



Esse setor II, mais elevado, próximo da linha da costa, tem seus mantos de alteração influenciados principalmente pela ação da percolação da água das chuvas, em condições de boa drenagem, conferindo ao solo cores relativamente alaranjadas. Em termos biológicos, esse setor da Ilha está a salvo do ritmo anual de inundações típicas do interior da Ilha de Marajó, o que favoreceu tanto a ocupação humana quanto da fauna local. Nesse setor é comum encontrar espessas coberturas superficiais herdadas de terras-pretas-de-índio, com recorrente fragmentos de cacos de cerâmica.

Para a formação dos solos a combinação de processos geoquímicos associados à influência biológica é de fundamental importância. A cobertura pedológica modelada sobre os sedimentos do Grupo Barreiras nesse setor da área de estudo possui aspectos típicos de LATOSSOLO, de estrutura granular, blocos subangulares, boa porosidade e drenagem. A composição granulométrica evidencia o predomínio de areias finas (cerca de 400 dag/kg⁻¹), que em profundidades se tem ligeiro aumento de argilas (183 dag/kg⁻¹ em superfície, 240 dag/kg⁻¹ em 80cm de profundidade). A relação silte/argila apresentou valores entre 0,89 e 0,78 (Tabela 8).

Tabela 10: Atributos físicos e químicos dos solos estudados na área.

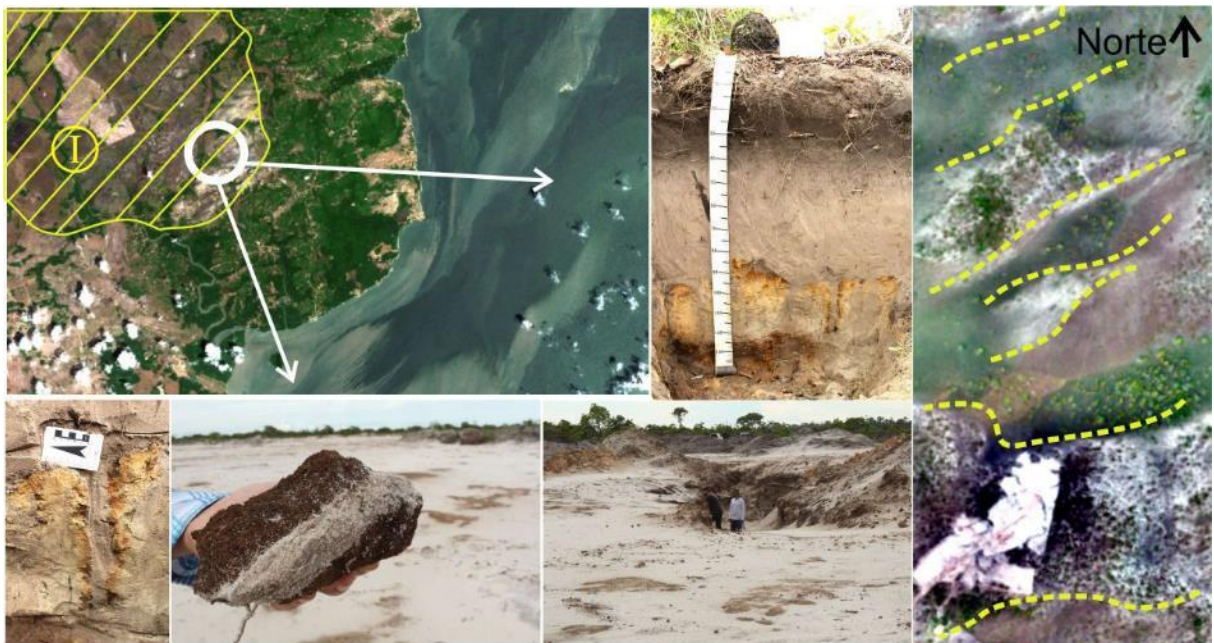
Hor.	Prof. cm	pH H ₂ O	Δ pH KCl	P mg dm ⁻³	K mg dm ⁻³	Na mg dm ⁻³	Ca ²⁺ mg dm ⁻³	Mg ²⁺ mg dm ⁻³	Al ³⁺ mg dm ⁻³	H ⁺ +Al ³⁺ mg dm ⁻³	SB cmol _c dm ⁻³	t	T	V %	m %	ISNa g/kg	Fe dag/kg	MO dag/kg	C org. g/kg	P-Rem. mg L ⁻¹	Areia grossa dag kg ⁻¹	Areia fina dag kg ⁻¹	Silte dag kg ⁻¹	Argila dag kg ⁻¹	Silte/argila	Classe textural	
Perfil 1 - ESPODOSSOLO FERRI-HUMILÚVICO Órtico espessarênico																											
A1	0-15	4.99	3.95	-1.04	2.9	16.0	0.0	0.37	0.16	0.66	4.70	0.57	1.23	5.27	10.8	53.7	0.0	20	2.13	12.35	35.5	0.465	0.430	0.049	0.057	8.8	Areia
A2	15-32	5.08	4.10	-0.98	2.7	5.0	0.0	0.22	0.05	0.66	5.50	0.28	0.94	5.78	4.8	70.2	0.0	20	1.73	10.03	24.9	0.379	0.503	0.053	0.066	9.5	Areia Franca
AE	32-45	5.20	4.27	-0.93	1.7	2.0	0.0	0.17	0.04	0.28	2.80	0.22	0.50	3.02	7.3	56.0	0.0	10	1.06	6.15	34.9	0.391	0.486	0.059	0.064	8.2	Areia Franca
E	45-90	5.09	4.42	-0.67	0.9	1.0	0.0	0.13	0.02	0.09	1.60	0.15	0.24	1.75	8.6	37.5	0.0	20	0.4	2.32	40.7	0.339	0.542	0.062	0.057	8.7	Areia
Bsm1	90-110	5.13	4.59	-0.54	1.4	0.0	0.0	0.27	0.03	0.19	4.20	0.30	0.49	4.50	6.7	38.8	0.0	70	1.06	6.15	13.5	0.341	0.507	0.076	0.076	6.7	Areia Franca
Bsm2	110-130	5.06	4.55	-0.51	1.1	0.0	0.0	0.15	0.01	0.19	2.80	0.16	0.35	2.96	5.4	54.3	0.0	40	0.67	3.89	27.5	0.334	0.512	0.068	0.087	7.5	Areia Franca
Bhsm	130+	5.04	4.55	-0.49	1.1	0.0	0.0	0.21	0.02	0.38	5.10	0.23	0.61	5.33	4.3	62.3	0.0	40	1.06	6.15	20.9	0.525	0.392	0.032	0.051	12.3	Areia
Perfil 2 - LATOSSOLO AMARELO Distrófico antrópico																											
Ap	0-58	4.81	3.82	-0.99	143.5	9.0	2.0	0.88	0.06	0.57	5.90	0.97	1.54	6.87	14.10	37.00	0.13	180	2.02	11.72	40.90	0.339	0.480	0.063	0.118	0.5	Areia Franca
AB	58-88	5.02	3.87	-1.15	8.1	45.0	10.0	0.60	0.31	0.66	5.00	1.07	1.73	6.07	17.60	38.20	0.72	280	1.75	10.15	37.10	0.357	0.432	0.071	0.140	0.5	Franco-Arenosa
Bi	88-133	5.33	4.39	-0.94	34.1	5.0	0.0	0.77	0.10	0.00	0.90	0.88	0.88	1.78	49.40	0.00	0.00	10	0.27	1.57	52.20	0.416	0.333	0.016	0.235	0.1	Franco-Arenosa Argilo-Arenosa
Bpl frag.	133+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Do ponto de vista geoquímico, o fósforo removível apresenta valores elevados em todos os horizontes, de 40,90 mg/L⁻¹ no horizonte mais superficial, 37,10 mg/L⁻¹ entre 58 e 88cm de profundidade e 52,20 mg/L⁻¹ até 1,33m de profundidade. Essa condição é dada pela forte influência indígena que colonizou essa área e pela geração de terras-pretas-de-índio no decorrer do tempo. Também há considerável quantidade de ferro (entre 180 a 280g/kg), o que pode ser justificado pela degradação das couraças subjacentes que culminam em estruturas pedológicas.

Referente ao setor oeste (i) da área investigada, sua dinâmica é bastante distinta do setor leste (II). Pelas imagens Sentinel-2A e o ortofotomosaico, foi observado um

padrão geral de alinhamentos SW-NE de elevações e depressões compostas essencialmente por areias, o que sugere que são paleocordões arenosos (Figura 40). A pedogênese nesse setor revela sua forte contribuição para a gênese e evolução da paisagem. A matéria orgânica proveniente de formações vegetais, a ciclagem de materiais pela atividade biológica, a disponibilidade hídrica pluvial anual, temperaturas relativamente mais elevadas e topografia que favorece o acúmulo, bem como amplas oscilações hidrostáticas em subsuperfície, representam a combinação de fatores que afetam diretamente os processos pedogenéticos sobre essas coberturas superficiais (Pós-Barreiras), em princípio, essencialmente arenosas.

Figura 40: Setor oeste da área investigada.



Na superfície a fitofisionomia predominante é o de cerrado, o que sugere um sistema hidrológico em subsuperfície atualmente mais bem drenado, quando comparado aos demais campos arenosos encontrados na maioria do domínio amazônico, em que se predominam as campinaranas graminosas a florestadas. A presença dessa fitofisionomia nos campos arenosos amazônicos está diretamente associada aos processos de transformações geoquímicas, hídricas e biológicas de subsuperfície, que, segundo Schaefer et al. (2009), são um tipo de domínio semiarbustivo a semiflorestal adaptado ao extremo hidromorfismo desses ambientes arenosos.

O horizonte Bh do perfil descrito na área possui uma estruturação capaz de reter umidade no sistema, o que confere um ambiente menos estressante para o sistema radicular das plantas, e permite seu maior desenvolvimento. Na área de estudo também foi observado que a estruturação pedológica desenvolvida nesses campos arenosos apresenta espessura considerável, de caráter fossilizado, bem como heterogeneidade na distribuição lateral dos horizontes de acúmulo do húmus pela podzolização. A dinâmica edáfica na superfície pode apresentar um ritmo de transformação mais acelerado quando comparado aos processos pedogenéticos, o que também pode ter influenciado a atual ocorrência de um cerrado bem estruturado na área.

Do ponto de vista físico, predominam-se areias finas, seguido de areias grossas em profundidade, e pouco silte e argilas ao longo de todo o perfil descrito. Isso pode indicar ambientes associados à dinâmica fluvial associada a retrabalhamentos eólicos, responsáveis pela organização geral SW-NE percebida pelas imagens de drone. Acerca dos atributos geoquímicos, o fósforo removível apresenta valores acima de 20 mg/L⁻¹ em praticamente todos os horizontes descritos, sendo esses valores relativamente elevados. A saturação por alumínio é elevada, com valores acima de 50% em três dos sete horizontes descritos. O pH em água apresenta valores por volta de 5, o que confere um ambiente não tão ácido para o desenvolvimento radicular. Os valores de cálcio e magnésio são relativamente elevados para esse contexto arenoso, cujo Ca²⁺ apresenta valores entre 0,15 a 0,37 cmolc/dm³, ao passo que Mg²⁺ varia entre 0,01 a 0,16 cmolc/dm³, sendo as maiores concentrações no horizonte mais superficial.

6.1.6 Considerações finais

A organização das coberturas pedológicas, seu contexto geomorfológico e suas condições edafoclimáticas podem revelar condições evolutivas de um dado contexto geoambiental, sobretudo, ao longo do Holoceno. Para a área de estudo, na Ilha de Marajó, o transecto realizado no setor leste da ilha evidencia como esses processos transformaram coberturas essencialmente arenosas, referentes ao grupo Barreiras e suas sequências superiores (pós-barreiras). No setor II mais próximo da costa, as facies sedimentares, que perduram desde o Mioceno, possuem heranças de

encouraçamentos e seus dismantelamentos expressos tanto pela dinâmica marítima quanto pela pedogênese dos materiais. Ao passo que as areias do setor I, mais afastada do litoral, apresentam indicadores de uma condição de disposição mais recente (holocênica), cuja pedogênese também já transformou consideravelmente sua condição sedimentar friável inicial.

Este trabalho evidenciou alguns dos principais aspectos das transformações da paisagem para a área de estudo, bem como sua organização espacial. A investigação de atributos granulométricos e geoquímicos das coberturas pedológicas permite formular cenários acerca da história evolutiva de depósitos associados à dinâmica costeira. Esses materiais também permitem resgatar aspectos da própria colonização humana ao longo do tempo, expresso principalmente por heranças geoarqueológicas de terras-pretas-de-índio, presente ainda hoje na área, e que influenciam diretamente na composição geoquímica dos solos.

7. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SEUS IMPACTOS

Nesse capítulo o objetivo é apresentar os principais cenários de elevação do nível marinho médio global e seus desdobramentos na paisagem ambiental, social e geoarqueológicas da Ilha de Marajó. Para isso são compiladas informações sobre a região, bem como formulados cenários de acordo com as cotas altimétricas da Ilha.

7.1 Impacts of Anthropocene sea-level rise on People, Environments, and Archaeological legacies at Marajó Island, Brazilian Amazonia

7.1.1 Abstract

Coastal and estuaries systems worldwide have several vulnerabilities in front of global accelerated sea-level rise (SLR). The Amazon Delta-Estuary (ADE) has a large archipelago with heterogeneous landscapes inhabited by populations in a rapid urban expansion process. Marajó Island is the mainland and has heritages of ancient pre-Columbian from 4000 B.P. We aimed to provide recognition of human, environment, and archaeology aspects to objective subsidies policy decisions to mitigate consequences of climate change in the Amazon River mouth system. We map landscape environments, estimated floodable areas of 2, 3, and 6 m of SLR, investigated coastline morphology changes between 1973 and 2019, sampled soils at east Marajó Island, and purpose mitigation actions. The result suggests several environments at lowlands affected by permanent inundation and archaeological sites on risk. Mangrove reveals trends of coastal erosion in the last 46 years near Soure, the capital of Marajó Island. The main actions to mitigate the consequences are the data collection information of natural dynamics, effects of climate change, and anthropic factors. Planning, implementation, and monitoring are the next steps to mitigate environmental and human impacts that reflect direct or indirect on regional climatic dynamics. These results provide spatial information regarding the impacts of SLR in ADE and vulnerabilities of environment, human, and archaeology. In addition to contributing to communities' security in front of the most vulnerable population defenseless by the government in the face of climate changes in Brazilian territory.

7.1.2 Introduction

Global climate models highlight trends that gradually affects the environment and humans of the entire latitudes and becomes a problem for the next centuries (CHURCH; WHITE, 2011; DEFRANCE et al., 2020; FAO, 2018; HARDY; HAUER, 2018; KOPP et al., 2014; LEVITUS et al., 2012; MARENGO et al., 2010; MARENGO; SOUZA JR., 2018; OPPENHEIMER et al., 2019; PRASAD; PIETRZYKOWSKI, 2020). Climatic variation causes critical impacts as sea-level rise (SLR), polar ice sheet melting, changes in precipitation regime, temperature variation, salinity, sediment supply, changes proportions of atmospheric gases, causes disturbances in mangrove ecosystems, storm intensification, affect soils and expose the population to risk (BARROS; ALBERNAZ, 2014; DEFRANCE et al., 2020; GODOY; LACERDA, 2015; KONTGIS et al., 2019; OPPENHEIMER et al., 2019; PRASAD; PIETRZYKOWSKI, 2020; SILVA et al., 2018; VOUSDOUKAS et al., 2020; WARD et al., 2010; WU et al., 2017). Estuary and coastal zones are one of the most affected ecosystems by sea-level rising that causes permanent land inundation, mangrove destabilization, coastline erosion and social vulnerabilities (GODOY; LACERDA, 2015; IVAJNŠIČ et al., 2018; KOPP et al., 2014; NICHOLLS et al., 2014; VOUSDOUKAS et al., 2020; WARD et al., 2010).

On a global scale the SLR is considerable variable, varying from 1.9 mm/yr in the Caribbean (NEREM et al., 2017) to 9 mm/yr in the lower Mississippi River Delta (NOAA, 2015). South America sea-level rates have the greatest values in the Amazon estuary with 3.5 mm/yr (WARD et al., 2010) associated to undergoing land subsidence of 0.9 mm/yr (PELTIER, 1999), and 1.34 mm/yr rates of sediment deposition (FERRIER et al., 2017). The global average sea-level has risen 190 mm between 1901 and 2000 (DUTTON et al., 2015), and 210 mm between 1880 to 2009 at an average rate of 3.2 mm/yr (CHURCH; WHITE, 2011). Thermal expansion of ocean and thawing of mountain glaciers and ice sheets are considered as a great contributor to increasing 1.0 to 1.5 m in the global ocean water volume, associated to 1° to 3°C global increased in temperature (DUTTON et al., 2015; LEVERMANN et al., 2013; LEVITUS et al., 2012). The largest deforestation at the Amazon basin also affects the climatic dynamics and potentialize extreme events such as intensification and frequency of El

Niño (BARROS; ALBERNAZ, 2014; MARENGO; SOUZA JR., 2018; WANG et al., 2019a; WARD et al., 2010).

Projections for the global SLR highlight trends of 1.0 to 2.0 m increase until 2100 associated with global greenhouse gas emissions (KOPP et al., 2014, 2017; OPPENHEIMER et al., 2019; STRAUSS et al., 2012). The most pessimistic scenarios also consider 4 to 6 m of SLR until 2300 or more (KOPP et al., 2014; OPPENHEIMER et al., 2019). The last 25 years were marked by an acceleration of global SLR rate and direct perturb most of the coastlines of entire continents (CHURCH; WHITE, 2011; KOPP et al., 2014; VOUSDOUKAS et al., 2020). A few meters increase in marine level can promote significant changes in the landscapes by changes in the regional ocean base level. The marine water millennial timescales oscillations depend mainly on land topography, sediment deposition rates, and gravity field (RUETENIK et al., 2020). The weight of permanent marine water has the potential to likely generate subsidence trends (BORETTI, 2020), further expanding the floodable areas on coastlines (FERRIER et al., 2017; RUETENIK et al., 2020).

The Amazon Delta-Estuary (ADE) has a large archipelago with heterogeneous landscapes inhabited by vulnerable populations in a rapid urban expansion process (DAVIDSON et al., 2012; MANSUR et al., 2018; MARENGO et al., 2010; MARENGO; SOUZA JR., 2018). The Marajó Island is the mainland at Amazon River mouth and has inheritances of a long history of pre-Columbian inhabitants from more than 4000 years before past (B.P.) to present days (BEZERRA, 2012; DERBY, 1879; LISBOA, 2012; MEGGERS, 1992; MEGGERS; DANON, 1988a; OLIVEIRA et al., 2020; ROSSETTI; GÓES; TOLEDO, 2009; SCHANN; MARTINS, 2010; SCHMIDT et al., 2014). The Island concentrates the municipalities with the worsts Human Development Index (HDI) in Brazil (PNUD, 2017) and several communities depends on its ecosystem equilibrium to maintain themselves (BARROS; ALBERNAZ, 2014; CARMO; NUNES, 2008; COHEN et al., 2015; GODOY; LACERDA, 2015; LISBOA, 2012; MACHADO, 2009; MANSUR et al., 2018; MARENGO; SOUZA JR., 2018; MURRIETA; DUFOUR; SIQUEIRA, 1999).

The Marajó Island also comprises one of the most continuous and sensitive mangrove ecosystems of Brazilian territory (BARROS; ALBERNAZ, 2014; COHEN; BEHLING;

LARA, 2005; FRANÇA et al., 2012, 2019; WARD et al., 2010). Most of the inhabitants, archaeological remains, and mangrove ecosystems are located near to the coastline zone or in interior lowlands plains (LISBOA, 2012; MARENGO et al., 2010; SCHAAN, 2010). The SLR projections to the Marajó Island indicate several alluvial lowlands might be flooded until 2100 (BARROS; ALBERNAZ, 2014; CARMO; NUNES, 2008; MARENGO; SOARES, 2003). The scenario makes the Marajó Island one of the most vulnerable area in Brazil in front of global climate change and elevation of marine waters. Identify and quantify land, communities, and infrastructure affected by SLR is the base action to support vulnerability assessments and government policies (CHANG et al., 2018; NICHOLLS; KLEIN, 2005; STRAUSS et al., 2012).

Based on global climate projections and the necessity of local impacts diagnostics, here we provide the recognition of landscape knowledge of human, environment, and archaeological aspects, that objective a framework for policy decisions in front of the main consequences of local SLR at Marajó Island. The purpose is to provide subsidies to fill gaps information on the vulnerabilities of the mouth of the largest river in the world (SOARES JR; HASUI; BEMERGUY, 2012), which is directly affected by changes in global climate conditions (MANSUR et al., 2018; POKHREL; FAN; MIGUEZ-MACHO, 2014). Therefore, the aims of this paper are:

- (1) to estimate different scenarios of marine water elevation, from the most optimistic scenario about 2.0 to 3.0m SLR (OPPENHEIMER et al., 2019) to the most catastrophic conditions of up to 6m SLR (KOPP et al., 2014) to Marajó Island;
- (2) to map coastline morphology changes between 1973 and 2019 and its soil impacts;
- (3) to recognize mainly vulnerabilities of human, environment, and archaeology in front of SLR scenarios and purpose possible mitigations actions.

7.1.3 Materials and methods

7.1.3.1 Study area

This research focuses on Marajó Island at ADE in Pará state, in the north region of Brazil, between parallels 1°N and 2°S and meridians 51°W and 49°W. Marajó is the main island of the ADE archipelago and is bordered by Amazon, Pará and Tocantins

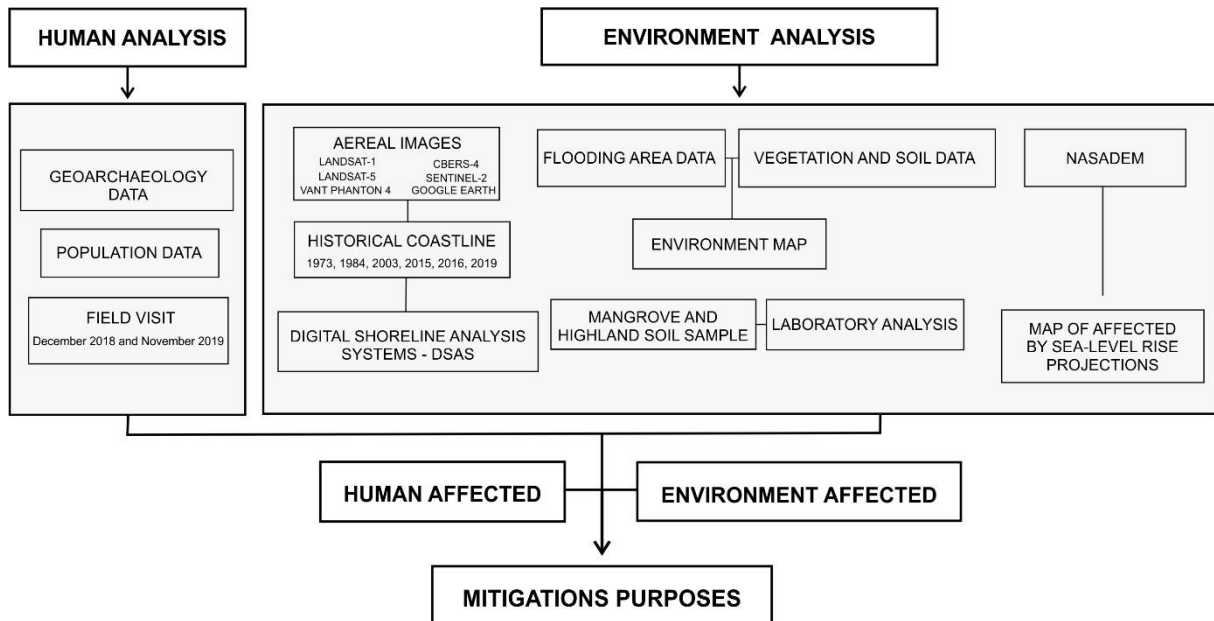
rivers and by the Atlantic Ocean. According to the Köppen classification (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007), climatic type transitions from Am to Aw with warmer and humid and characteristics of tropical savanna. The average annual temperature ranges from 25°C to 29°C and annual rainfall between 2.000 to 4.000 mm (LIMA et al., 2005). Marajó Island presents extensive lowlands affected by natural annual flood dynamics and has rainforests dominance at the west (LIMA et al., 2005; LISBOA, 2012; MURRIETA; DUFOUR; SIQUEIRA, 1999). Archaeological sites comprise mounds (DERBY, 1879; MEGGERS, 1992; SCHANN; MARTINS, 2010), Indian Black Earth (IBE) (OLIVEIRA et al., 2020; SCHANN; MARTINS, 2010), and Portuguese colonization edifications from 16th and 17th centuries (SCHANN; MARTINS, 2010). The island is composed of twelve municipals with a rarefied population that totalling 357.054 inhabitants. Most of the people reside in lowlands, near the coastline or main rivers (IBGE, 2015a; MARENGO; SOUZA JR., 2018). Human quality is considerably lower compared to other regions in Brazil, in which three of twelve municipals of Marajó are among the 10 worst HDI Brazilian list (PNUD, 2017).

7.1.3.2 Data acquisition and social-environmental analyses

Were obtained environment, population, and archaeology data. The human analysis comprised information about geoarchaeological sites of Marajó Island such as mounds and Indian Black Earth (LISBOA, 2012; MEGGERS, 1992; ROSSETTI; GÓES; TOLEDO, 2009; SCHAAN, 2010), population data from Human Development Index (HDI) (PNUD, 2017), total population by municipality (IBGE, 2015a), edifications (IBGE, 2015a; OPENSTREETMAP, 2019), and field observations during December 2018 and November 2019. For environmental analysis was created a regional map based on soil, vegetation, and floodable areas at 1:250.000 (IBGE, 2003). We elaborated SLR projections map of floodable areas considered topographic values of 2m SLR (OPPENHEIMER et al., 2019), 3m SLR (KOPP et al., 2017; OPPENHEIMER et al., 2019) and the worst scenario of 6m SLR (KOPP et al., 2014; OPPENHEIMER et al., 2019) to recognize most vulnerable areas. Each topographic level was segmented using the raster NASADEM Merged DEM Global 1 arc second of 30m spatial resolution (NASA JPL, 2020) with quantified area values in km² and percentage. We also analysed shoreline evolution from the last 46 years (1976 to 2019) and collected soil on the east coastline of the island. Mitigation purposes were indicated to

support future public management policies for those affected by rising sea levels (Fig. 41).

Figure 41: Architecture of methodological procedures



7.1.3.3 Coastline morphology changes

Coastline morphology change analysis was executed with DSAS 5.0 (Digital Shoreline Analysis System) plugin for ArcGIS (USGS, 2019). Historical satellite images were acquired from LANDSAT-1 MSS of 80m spatial resolution (1973/08/22), LANDSAT-5 TM, 30m (1984/07/27; 2003/09/09), CBERS-4 MUX, 20m (2015/08/09; 2016/11/02) and SENTINEL-2 MSI, 10m (2019/08/07) ranging from the less humid months (August to November). Images were acquired from Earthdata (EOSDIS, 2020) and Catálogo de Imagens (INPE, 2020). The shoreline line of each year was drawn from images coastline and created a baseline of 150m from coast buffering. Were determined transects of offshore limited to 900m, which comprise the total variation of historical coastline. Were generated the shoreline results from statistics techniques by the linear regression rate [LRR], ideal to more than two shoreline analyses (SALGHUNA; BHARATHVAJ, 2015), and the net shoreline movement [NSM] between 1973-2019 (46 years). Was also generated trend coastline evolution to the next 10 years or more based in change historical rates.

7.1.3.4 Soil sample and laboratory procedures

Three soil pedons were collected near the coastline at mangrove and highland cliff border during December 2018. We described according to Schoeneberger et al. (2012) and classified according to U.S. Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2014), 2014) and Brazilian Soil Classification System (SANTOS et al., 2018). The soil horizons colors were determined by Munsell Color (2009). Samples from each horizon were dried and sieved at 2mm to physical and chemical analysis. The physic analysis consisted of determining texture by the pipette method (TEIXEIRA et al., 2017). Chemical analysis was pH determined in distilled water (TEIXEIRA et al., 2017). Available phosphorus determined by Atomic Absorption Spectrophotometry and Na^+ and K^+ obtained by Flame Emission Photometry (TEIXEIRA et al., 2017).

Exchangeable bases (Ca^{2+} , Mg^{2+} and Al^{3+}) were quantified by atomic absorption spectroscopy (TEIXEIRA et al., 2017). Total organic carbon (TOC) was determined by combustion (YEOMANS; BREMNER, 1988). Potential acidity (H^+ + Al^{3+}) was extracted according to Teixeira et al. (2017). Electrical conductivity (EC) was obtained by the saturated paste method (USDA, 2014). Were calculated sum of bases ($\text{SB}=\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}+\text{K}^++\text{Na}^+$), effective Cation Exchange Capacity at soil pH 7 ($\text{CEC}_{\text{ef}}=\text{SB}+\text{Al}^{3+}$); Aluminium Saturation ($\text{Al sat}\%=100 \text{ Al}^{3+}/(\text{SB}+\text{Al}^{3+})$) (TEIXEIRA et al., 2017). Aerial photogrammetry was performed using an unmanned aerial vehicle (UAV), in which photos were processed to obtained orthophoto mosaic of P2 soil pedon mangrove coastline context. Images available on Google Earth for 2006/11, 2014/06, 2017/06, 2018/06, and 2018/10 were also consulted.

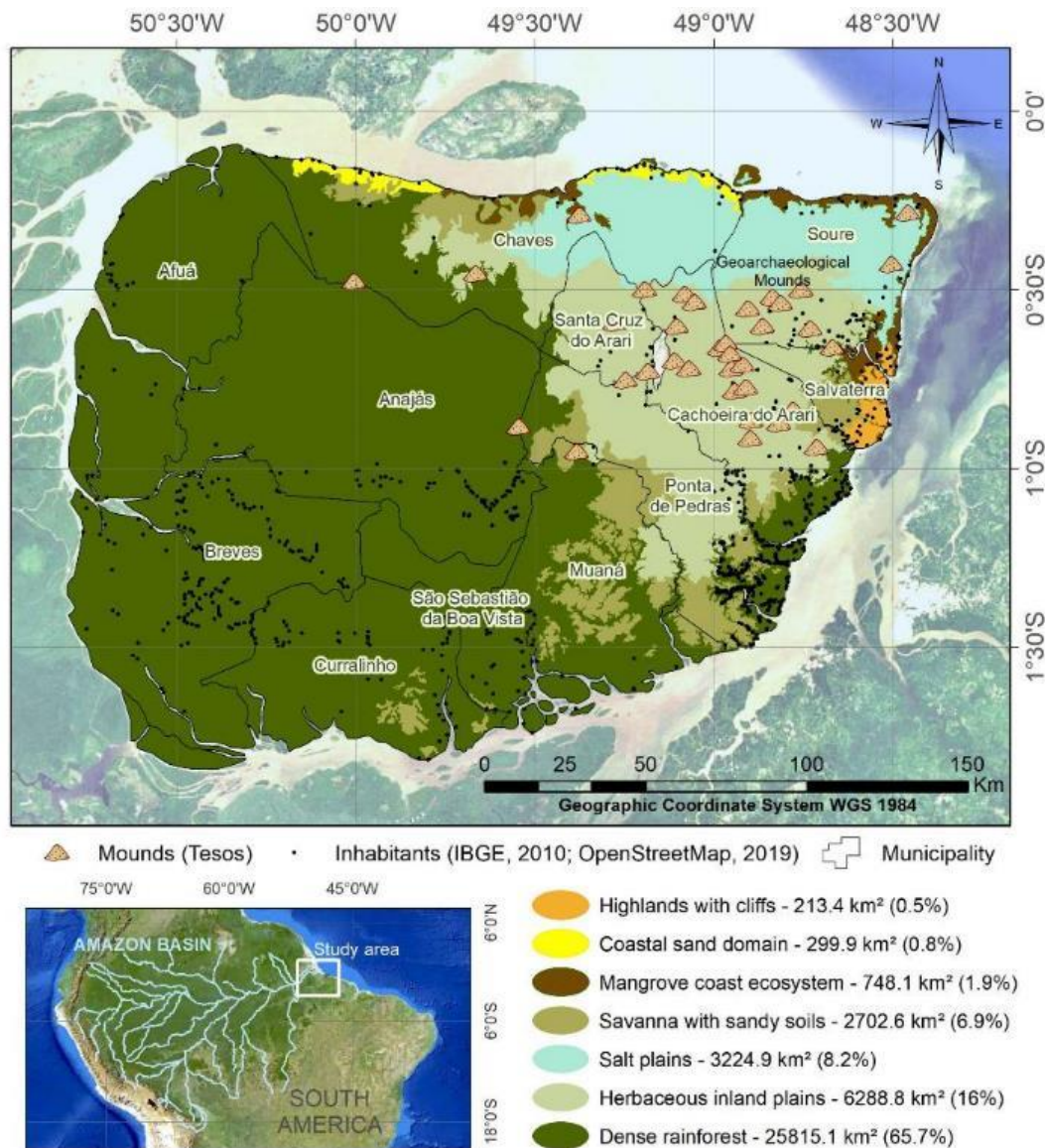
7.1.4 Results

7.1.4.1 Marajó Island landscape

Marajó Island is constituted by seven environment types and occupies 39.292 km² at Amazon river estuary (Fig. 42). The dense rainforest at the west is the larger environment (25.815 km², 65.7%) composed by Alluvial Ombrophiles Dense Forest associated with wetlands, watercourses, and flooded areas (VELOSO; RANGEL-FILHO; J.C., 1991). The east has the most heterogeneous landscapes and has extensive herbaceous inland plains (6288 km², 16%), salt-plains (3224 km², 8.2%), and nucleus of savanna with sandy soils (2701 km², 6.9%). Near the borders are extensive

mangrove ecosystems (748 km², 1.9%) associated with the coastal sand domain (299 km², 0.8%), and highlands with cliffs at the east (213 km², 0.5%). Most of the geoarchaeological mounds (Tesos) are located in herbaceous inland plains that comprise annual groundwater fluctuations process associated with extensive floods and rainfall (LISBOA, 2012; MEGGERS, 1992; MEGGERS; DANON, 1988a; MEGGERS; EVANS, 1957; MIRANDA; ROSSETTI; PESSEDA, 2009) (Fig. 42). The east highlands concentrated most of Indian Black Earth (Anthrosols) and inheritances of the 16th and 17th centuries of Portuguese Jesuit missions at Joanes, district of Salvaterra (SCHANN; MARTINS, 2010).

Figure 42: Main landscapes of Marajó Island and its inhabitants and archaeological mounds.



7.1.4.2 Sea-level rise scenarios and consequences

SLR predictive to Marajó Island highlights floods, environmental disturbances, and human vulnerabilities from more optimistic SLR to most pessimistic and catastrophic scenarios of 6m SLR for the next centuries (Fig. 43). The 2m SLR floods permanently area of 986.14 km² that corresponding to 2.51% of Marajó Island (39.292 km²) (Tab. 9). The most affected environment by flooding is savanna with sandy soils (436.84 km²), herbaceous inland plains (292.68 km²), and salt-plains (119.26 km²). Cachoeira do Arari and Soure are the main municipality affected (Tab. 10). The first consequences are less biodiversity, instability of sandy-soil areas, and groundwater base level up that affects the annual flood cycle and river dynamics. The 2m SLR submerge 6.33 km² of mangroves (Fig. 43, Tab.10). Sedimentary input, increase in salinity, acidification, higher tides, and less plant and animal species are some of the first impacts in the mangrove ecosystem. Interior dense rainforest, in the west at Anajás and Breves, is affected mainly by change in river discharge and height of floods, which affects the width of the floodplains (Fig. 43, Tab. 10). The coastal sand domain and east highlands with cliffs are the less affected by SLR in reason of higher altimetric levels (ca. > 8m a.s.l), however, potentialize the lateral retraction of the cliff's escarpments.

Table 11: Main environmental risks of the rising sea-levels 21th century predictions.

Environment vulnerability										
Enviroment	Total Area (km ²)	2m SLR			3m SLR			6m SLR		
		Area (km ²)	%	impact	Area (km ²)	%	Impact	Area (km ²)	%	Impact
Salt plains	3224.9	119.26	3.7	Extending floods duration associated to groundwater base level up; Salinization increase	1373.28	42.6	Exarcebeted flooding and salinization	3112.07	96.5	Land submersed; Loss of biodiversity adapted to salinity
Herbaceous Inland plains	6288.8	292.68	4.7	Less area of herbaceous fields; Extending annual floods duration	1135.18	18.1	Exarcebeted flooding and salinization; Trends to flooding archaeological sites	5618.23	89.3	Almost entirely submerged; Loss of biodiversity
Savanna with sandy soil	2702.6	436.84	16.2	Flooding and salinization; Less savanna biodiversity; Sandy areas instability	796.62	29.5	Exacerbate flooding and salinization; Increase sandy areas instability; Less savanna biodiversity	1936.29	71.6	Almost entirely submerged; Loss of addapted savanna to sandy areas
Mangrove-coast ecosystem	748.1	6.33	0.8	Higher tides; Increase salinity; Sedimentary input; Acidification	37.35	5.0	Higher tides; water acidification; Increased salinity, erosion and wind exposed; Trends to replacement by riparian flood forest vegetation	182.90	24.4	Higher tides; Water acidification; Increased salinity; Erosion and wind exposed; Trends to replacement by riparian flood forest vegetation; Disturbance of endemic ecosystem
Coastal sand domain	299.9	0.79	0.3	Coastaline form change; Incipient soil instabilization	5.03	1.7	Coastaline form change and retraction by erosion Incipient soil instabilization	38.26	12.8	Coastaline form change and agressive erosion; Incipient soil instabilization

Highlands with cliff	213.4	0.95	0.4	Increased erosion rate by tidal dynamics; Trends to lose coastal archaeological soils	2.49	1.2	Increased erosion rate by tidal dynamics; Trends to lose coastal archaeological soils	14.56	6.8	Environment overexploitation by human migration; Trends to lose coastal archaeological sites
Dense rainforest	25815.0	129.29	0.5	Increase interior river floodplain	202.34	0.8	Change in drainage dynamic and floodplain; Increased evapotranspiration; Change rainfall patterns	906.14	3.5	Retraction forest ecosystem Agressive change in river dynamic and flooplain; Increase magnitude, frequency and duration of rainfall
Total area of Marajó Island	39292.7	986.14	2.5	Elevation of groundwater level; Increase rainfall; Coastline mangrove disturbed; Permanent inundation areas	3552.29	9.0	Exarcebate flooding; Coastline mangrove disturbed; Increase of permanent inundation areas; Erosion or flooding of archaeological sites	11808.43	30.1	Large lowlands areas permanent flooded; Several disturbance at mangrove ecosystem; Changes in interior river dynamics

Table 12: Main population risks of the rising sea-levels 21th century predictions.

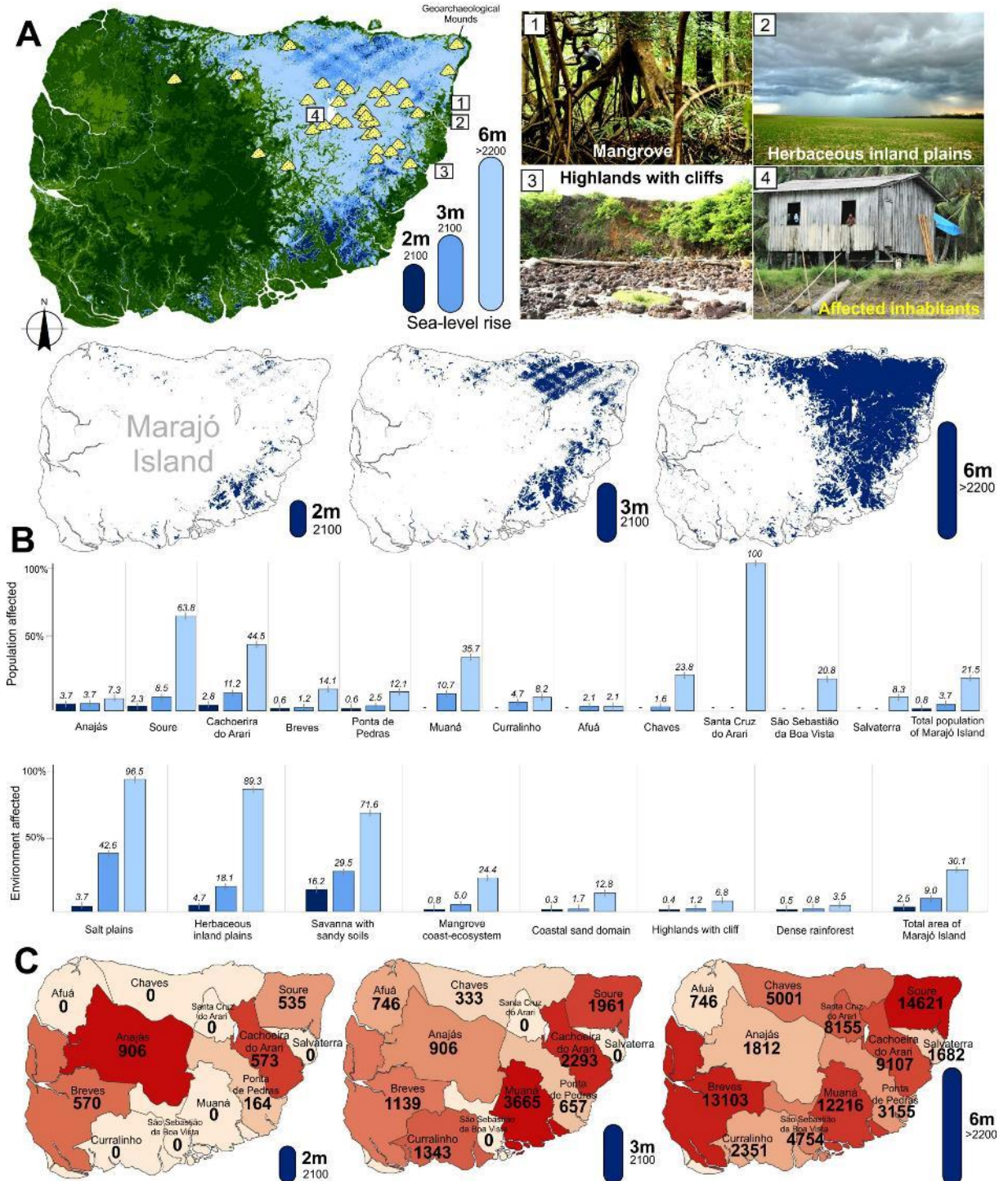
Municipality	HDI 2010 (PNUD, 2017)	Population (IBGE, 2010)	Human vulnerability								
			2m SLR			3m SLR			6m SLR		
			Affected	%	Risks and impact	Affected	%	Risks and impact	Affected	%	Risks and impact
Anajás	0.484	24759	906	3.7	Riverside communities affected; Indirect affected by increased storm	906	3.7	Riverside communities affected; Indirect affected by increased storm; Perturbation on fishing	1812	7.3	Riverside communities affected; Indirect affected by increased storm; Perturbation on fishing
Soure	0.615	23001	535	2.3	Local habitation interferenced by flooding; Risk to archaeological sites	1961	8.5	Potential of habitation inundation; Population migration to higher lands; Risk to archaeological sites	14621	63.6	Habitation permanent flooded; Population migration to higher lands; Archaeological sites submersed
Cachoeira do Arari	0.546	20443	573	2.8	Flooding dwellings in lowlands; Risk to archaeological sites	2293	11.2	Potential of habitation inundation; Population migration to higher lands; Changes in agriculture; Risk to archaeological sites	9107	44.5	Large-scale migration to east higher lands or to Pará continent; Habitation permanent flooded; Archaeological sites submersed
Breves	0.503	92860	570	0.6	Riverside communities affected; Indirect affected by increased storm	1139	1.2	Riverside communities affected; Indirect affected by increased storm; Perturbation on fishing	13103	14.1	Riverside communities affected; Increased magnitude, intensity and frequency of flood and storm
Ponta de Pedras	0.562	25999	164	0.6	Flooding dwellings in lowlands; Indirect affected by increased storm; Risk to archaeological sites	657	2.5	Flooding dwellings in lowlands; Indirect affected by increased storm; Risk to archaeological sites; Population migration	3155	12.1	Flooding dwellings in lowlands; Affected by increased storm; Risk to archaeological sites; Population migration

Muaná	0.547	34204	0	0.0	Potential risk for riverside communities; Indirect affected by increased storm	3665	10.7	Potential risk for riverside communities; Flooding habitations; Indirect affected by increased storm; population migration	12216	35.7	Risk for riverside communities; Flooding habitations; Affected by increased storm; population migration; Risk to archaeological sites
Curralinho	0.502	28549	0	0.0	Potential risk for riverside communities; Indirect affected by increased storm	1343	4.7	Potential risk for riverside communities; Flooding habitations; Indirect affected by increased storm; population migration	2351	8.2	Potential risk for riverside communities; Flooding habitations; Indirect affected by increased storm; population migration
Afuá	0.489	35042	0	0.0	Potential risk for riverside communities; Indirect affected by increased storm	746	2.1	Potential risk for riverside communities; Indirect affected by increased storm	746	2.1	Potential risk for riverside communities; Affected by increased storm
Chaves	0.453	21005	0	0.0	Potential risk for riverside communities; Indirect affected by increased storm; Risk to archaeological sites	333	1.6	Increase in permanent inundation areas; lost of habitations; population migration; Risk to archaeological sites	5001	23.8	Increase in permanent inundation areas; Lost of habitations; population migration; Risk to archaeological sites
Santa Cruz do Arari	0.557	8155	0	0.0	Indirect affected by flooding in lowlands; Risk to archaeological sites	0	0.0	Indirect affected by flooding in lowlands; Risk to archaeological sites	8155	100.0	Permanent inundation areas; Lost of habitations; Risk to archaeological sites; Affected by increased storm
São Sebastião da Boa Vista	0.558	22904	0	0.0	Potential risk for riverside communities; Indirect affected by increased storm; Risk to archaeological sites	0	0.0	Potential risk for riverside communities; Indirect affected by increased storm; Risk to archaeological sites	4754	20.8	Risk for riverside communities; Indirect affected by increased storm; Risk to archaeological sites

Salvaterra	0.608	20183	0	0.0	Local disturbed as coastline and mangrove; Risk to archaeological sites	0	0.0	Local disturbed as coastline and mangrove; Risk to archaeological sites; Economy disturbed; Increase impacts of agriculture	1682	8.3	Agressive disturbed as coastline and mangrove; Risk to archaeological sites; Economy disturbed; Increase impacts of agriculture
Total population of Marajó Island	-	357104	2748	0.8	Inhabitants affected in lowlands by flooding; Local riverside communities affected; Potential of increase storm; Risk to archaeological sites	13044	3.7	Increase in permanent inundation areas; lost of habitations; population migration; Risk to archaeological sites; Mangrove distubed; pertubation on fishing	76702	21.5	Flooding dwellings in lowlands; Affected by increased storm; Risk to archaeological sites; Population migration; Agressive disturbed as coastline and mangrove

One-meter rise growth resulting in 3m SLR and promotes a considerable expansion rate of 260.2% of permanently submerged areas, totalizing 3.552 km², which represents 9.04% of Marajó Island.

Figure 43 - Flood scenarios and their associated environmental and social impacts.



Salt-plains becomes the most impacted environment with 1.373 km², follow by Herbaceous inland plains (1.135 km²) and Savanna with sandy soils (796 km²) (Fig. 43) with consequences of exacerbated flooding and water salinization. Cachoeira do Arari, Soure, and Muaná population is directly impacted with migration movements. Mangrove is considerably impacted by 37.35 km² of flooding (Fig. 43, Tab. 10). The accelerated incursion rate impairs swamp readjustment, which promotes aggressive biodiversity erosion. Highlands with cliffs domain present 2.49 km² disturbed, which represents the aggressive retraction of its scarped borders. Riverside communities increased their vulnerability in front of river flooding change dynamics.

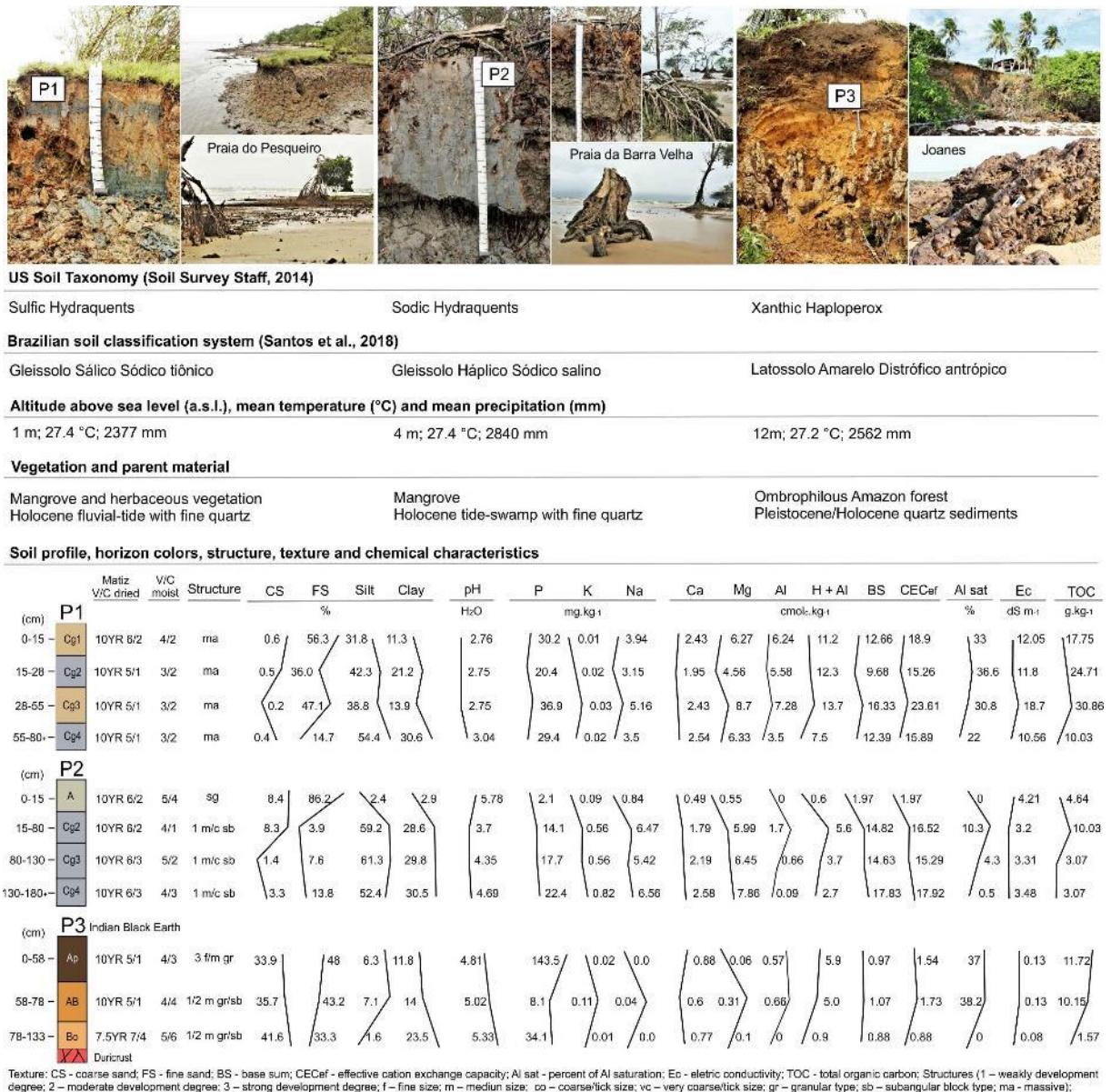
For the most extreme scenario (6m SLR), the lowlands of Marajó Island are almost completely submerged, represented by 11.808 km² (30.05%). Salt-plains (3.112 km²) and herbaceous inland plains (5.618 km²) lose their areas and biodiversity (Fig. 43, Tab. 10). The coastal sand domain is considerably dismantled with 38.26 km² flooded. Mangrove ecosystem (182.90 km²) probably completely lost, which extinguishes several species that depend on their ecosystem and impact on marine biodiversity and alimentary security. All the population is direct or indirect affected, being Santa Cruz do Arari, Soure, Cachoeira do Arari, Muaná, and Chaves the most vulnerable counties (Fig. 42). In the extreme scenario, 76.702 inhabitants are directly impacted in which represents 21.48% of the island population (Tab. 10) with forced population migrations to Marajó Island highlands or to continent.

7.1.4.3 Soil aspects

The three soil pedon collected reveals signs of coastal morphodynamics (Fig. 44). Sulfic Hydraquents (P1) have intercalated horizons with sandy and loam texture predominance from the surface to 55cm, with fine sand ranging from 36% to 56.3%, silt from 31.8% to 58.8% and clay from 11.3% to 21.1%. Deeper than 55cm the texture is silty clay loam, similar to P1, with 54.4% of silt and 30.6% of clay. P1 has the lowest pH values varying from 2.76 at the surface to 3.04 in-depth. Chemical attributes reveal high value to phosphorus (20.4 to 36.9 mg.kg⁻¹), lowest values to potassium (0.01 to 0.03 mg.kg⁻¹), sodium ranging from 3.15 to 5.16 mg.kg⁻¹. Compared to P2, the P1 has the high values of calcium (1.95 to 2.54 cmolc.kg⁻¹), magnesium (4.56 to 6.33 cmolc.kg⁻¹) and aluminium (7.5 to 13.7 cmolc.kg⁻¹). Base sum ranging from 9.68 to 16.33

cmolc.kg⁻¹, with potential cation exchange capacity varying from 19.89 to 30.03%. Exchangeable Sodium Percentage varies from 44 to 62.3%, while Electric conductivity ranging from 10.56 to 18.7 dS.m⁻¹. P2 has the highest values of total organic carbon ranging from 10.03 to 30.86 g.kg⁻¹ (Fig. 44).

Figure 44 - Soil chemical and physical attributes at East Marajó Island.



Sodic Hydraquents (P2) has the predominance of silty clay loam horizons in-depth, with ranging values from 52.4 to 61.3 % of silt and 28.6 to 30.5 % of clay, and a fine sand superficial horizon with 86.5%. P2 has a pH ranging from 3.7 to 5.78. Phosphorus, potassium, sodium, calcium and magnesium increase in depth from 2.1 to 22.4 mg.kg⁻¹, 0.09 to 0.82 mg.kg⁻¹, 0.84 to 6.56 mg.kg⁻¹, 0.49 to 2.58 cmolc.kg⁻¹ and

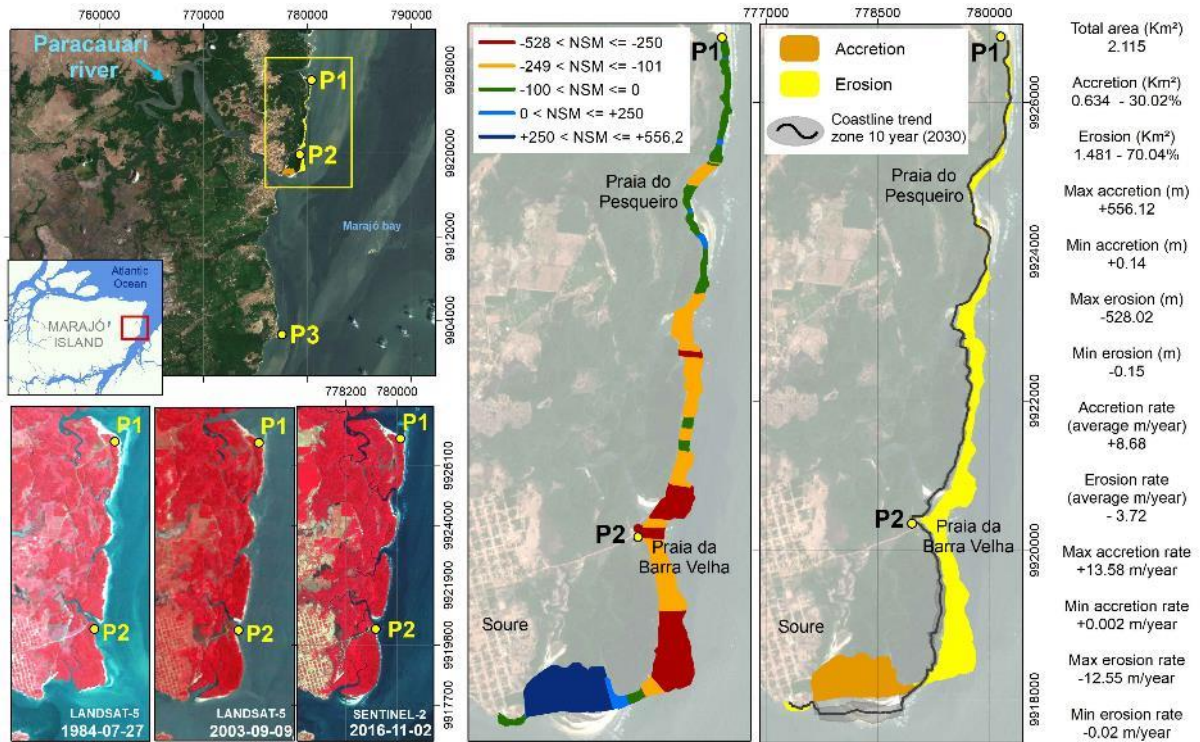
0.55 to 7.68 cmolc.kg⁻¹, respectively. Al³⁺ saturation present high values between 15-55cm (4.3 to 10.3 %). Bases sum and potential cation exchange capacity is considerably lower at surface (1.97 cmolc.kg⁻¹ and 2.57 cmolc.kg⁻¹, respectively), follow by depth horizons ranking of 14.63 to 17.83 cmolc.kg⁻¹ base sum and 18.33 to 20.53 % of potential cation exchange capacity. Exchangeable Sodium Percentage varies from 72.6 to 86.8%, while Electric conductivity ranging from 3.2 to 4.21 dS.m⁻¹ (Fig. 44).

Xanthic Haploperox (P3) is placed at Joanes on Barreiras/post-Barrereiras Group geologic domain. As consequence, P3 has the highest values of coarse sand (33.9 to 41.6%) and fine sand (33.3 to 48%), with the lowest values to silt (1.6 to 7.1%) and clay (11.8 to 23.5%). Texture varying of loamy sand to sandy loam and sandy clay loam, with a pronounced duricrust at profile base. P3 has a superficial geoarchaeological horizon with Indian Black Earth with ceramic. Chemical reveal highest value to phosphorus at surface (143.5 mg.kg⁻¹) follow by low values in-depth (8.1 to 34.1 mg.kg⁻¹). Compared to P1 and P2, the P3 has the lowest chemical values. Potassium ranging from 0.01 to 0.11 mg.kg⁻¹, sodium from 0 to 0.04 mg.kg⁻¹, calcium from 0.6 to 0.88 cmolc.kg⁻¹, magnesium from 0.06 to 0.31 cmolc.kg⁻¹, aluminium from 0 to 0.66 cmolc.kg⁻¹, base sum from 0.97 to 1.73 cmolc.kg⁻¹, potential cation exchange capacity from 0.88 to 1.07%, percent of base saturation of 14.1 to 49.4%, exchangeable sodium percentage from 0 to 38.2%, electric conductive from 0.08 to 0.13 dS.m⁻¹ and total organic carbon from 1.57 to 11.72 g.kg⁻¹ (Fig. 44).

7.1.4.4 Coastline morphology change

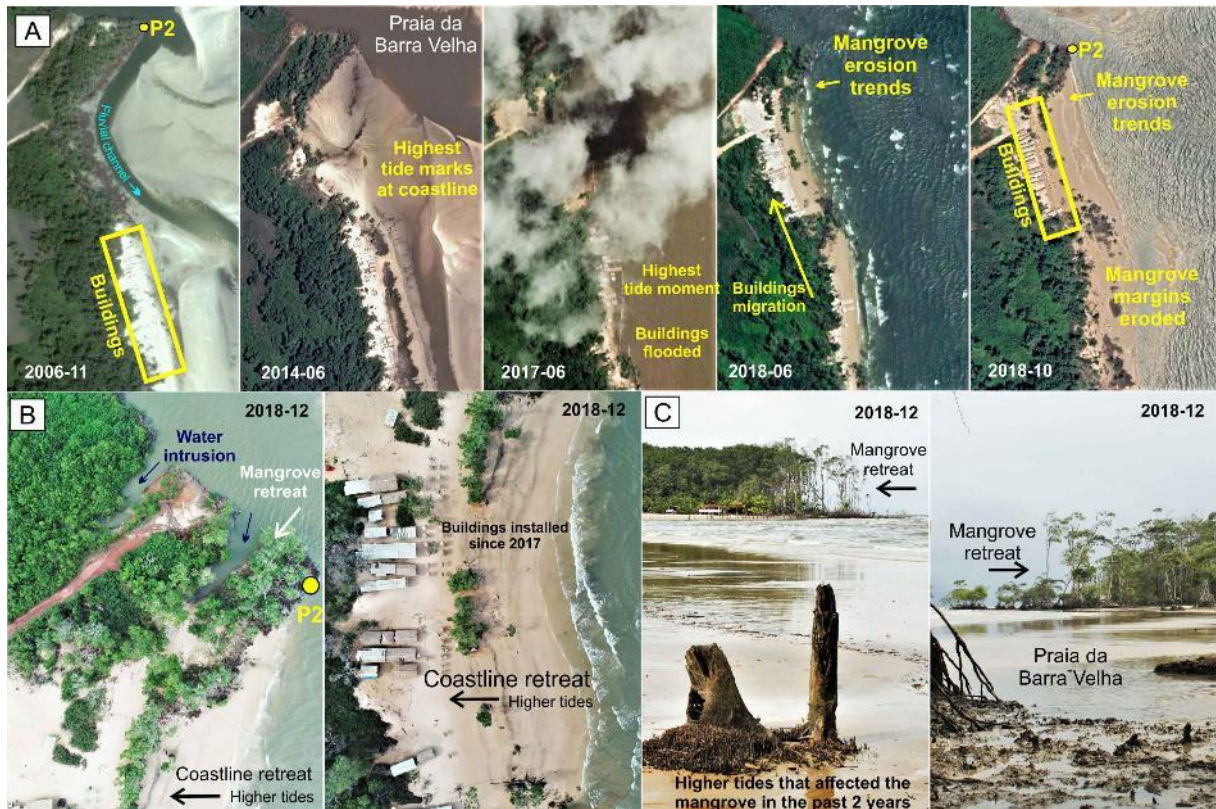
Image satellite analysis from 1973 to 2019 (46 years) highlights erosive majority process in 70.04% (1.48 km²) of 2.11 km² historical coastline area (Fig. 45). The largest coastal regressions occurred on the margins of the mangrove ecosystem, reaching 528.02 m of maximum coastline retraction about 3.72 m/yr mean rate in Praia da Barra Velha. From 2014 to present, tides advance the coastline more intensely, which directly affected the buildings at Praia da Barra Velha and the margins of the mangrove system by coastline erosion with rarefaction of *Rhizophora* mangle density due to tidal erosion (Fig. 46). The population was directly affected which migrate their buildings further north on the beach about since 2017.

Figure 45: Coastline evolution and changes during past 46 years at Marajó Island.



Satellite images from 1984, 2003, and 2016 represent the main changes occurred in the coastline morphology in past 46 years (Fig. 45). Near Soure at the mouth of the Paracauari River intersected to Marajó Bay waters occurred 0.63 km² of accretion with 556 m maximum length and 8.68 m/yr mean rate. The process suggests sedimentary rework affected by the increase in hydrological dynamics of Marajó Bay transporting the eroded materials that formed the borders of the east mangrove (Fig. 46). Projections for 2030 maintain the current trend of majority erosion of almost east mangrove borders and accretion near Soure (Fig. 45).

Figure 46: Barra Velha Beach at Marajó Island and tidal impacts of the last decade.



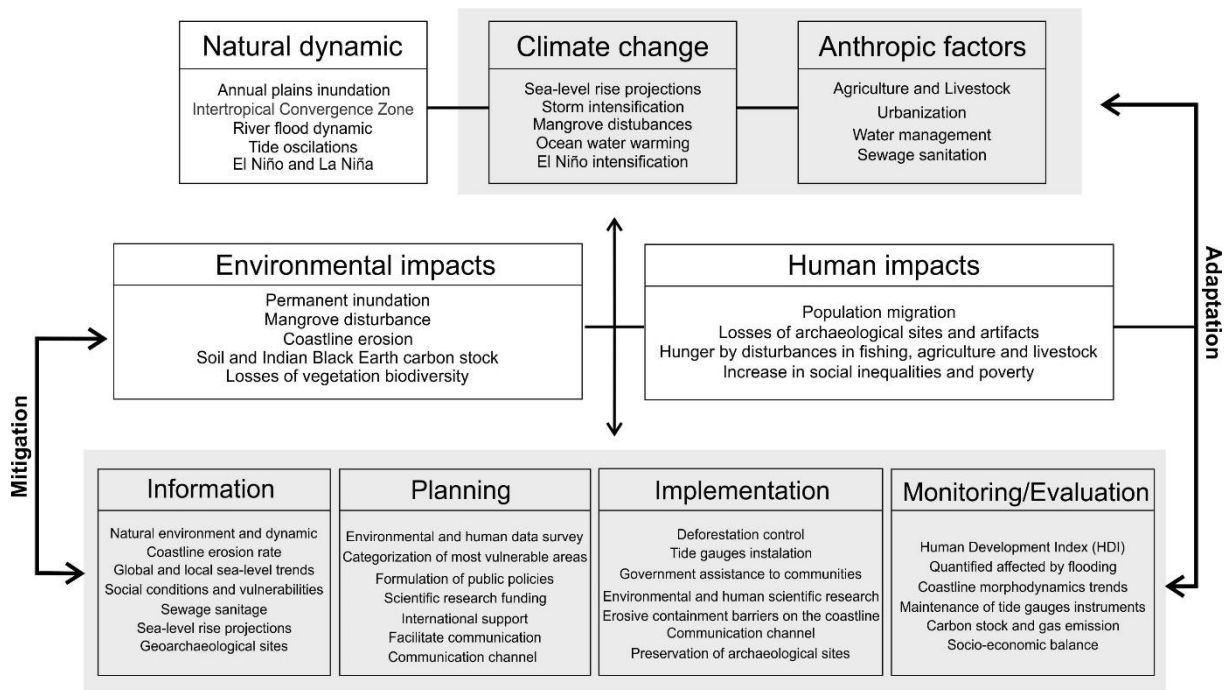
7.1.5 Discussions and conclusions

Climate change is an issue that requires global forces to stem its progress. The Kyoto Protocol brought the concept of a polycentric and multiple (non-) state actor behaved in different dimension scales to collaborate for climate global mitigation (JORDAN et al., 2015). This work highlights the sea-level rising at ADE archipelago causes several human, archaeology, and environmental impacts. Both lowlands and highlands of Marajó Island are affected at various scales linked with environmental feedback processes from the Amazon basin, such as deforestation and fire (MARENGO; SOUZA JR., 2018). The knowledge of the main social-environmental aspects of Marajó Island subsidizes formulations and applications of more effective government actions aimed at environmental protection and local communities' support and security. These actions have the potential to can contribute globally to lower ecosystem degradation and climatic balance (CHANG et al., 2018; STRAUSS et al., 2012).

Knowledge about global climate dynamics is essential to support government plans, associated with recognizing trends in changes in their patterns, and the anthropogenic

factors involved. Among the environmental, human, and archaeological spheres of Marajó Island, here we assess that anthropic factors are the main front of the immediate formulation of mitigation action plans. The knowledge of the anthropogenic factors involves the primary survey of data on agriculture, livestock, basic sanitation, and urbanization that causes historical direct and indirect impacts on population, environment, archaeological sites, and potentially about the global climate regime. Planning is possible with information on the most varied environmental, human, and archaeological scales, followed by their implementation and monitoring of the effectiveness of the proposed actions (Fig. 47).

Figure 47: Components for the development of scenarios at sea level and possible anthropic mitigation interventions.



Soil represents a substantial factor directly related to the historical land use and has considerably carbon stocked in its system (ONTL; SCHULTE, 2012). The soil carbon stock is in constant dynamic equilibrium by interactions between the atmosphere and surface process (CHEN et al., 2018; FAO, 2018; NOVOTNY et al., 2009). Livestock and agriculture production systems associated with fire management were part of the cultural, social, and economic identity of Marajó Island in the last centuries (LISBOA, 2012; MEGGERS; DANON, 1988a). Archaeological vestiges at Marajó Island reveals considerable numbers of Indian Black Earth (IBE) at highlands and lowlands with a

thick black fertile organic horizon with traces of ceramic shards (NOVOTNY et al., 2009; SOUZA et al., 2009). The most sensitive geoarchaeology landscape at east highlands is in the district of Joanes, in which present the P3 IBE site present with high values to phosphorous (143.5 mg.kg^{-1}) that indicates a geoarchaeological site used since pre-Columbian inhabitants until present days by local communities. The IBE is progressively eroded linked with exposure to the risk of losses Jesuitical ruins from the 16th century (BEZERRA, 2012).

The P3 IBE probably occupied a larger area in its origin, where phosphorus values had the potential to be much higher than the present days. Compared to other most preserved sites in the Amazon basin, the IBE phosphorous values commonly reach more than 3.500 mg.kg^{-1} (SCHAEFER et al., 2004; SOUZA et al., 2009). It is conclusive that historic soil management by livestock and agriculture at the island contributed significantly to gas emission with reducing of carbon storage. Data survey, collection, and its research are the first step towards regulating soil preservation and increasing its carbon storage capacity. Such as the IBE of P3, the other soil sites along the east coastal zone are sensitive to an increase in tide and erosion forces. The main consequence is the permanent loss of archaeological materials such as ceramics and bones.

Lowlands plains have several anthropically and natural mounds (MEGGERS, 1992; MEGGERS; DANON, 1988a; ROSSETTI; GÓES; TOLEDO, 2009; SCHAAN, 2010). During the Holocene, these mounds were used to protect indigenous communities from annual flooding dynamics and manage the fish supply (MEGGERS; DANON, 1988a; SCHAAN, 2010). Sea-level variations forced in past the migration and abandonment of these punctual highlands of the interior plains (MEGGERS; DANON, 1988a). In present days, the sea-level rise projections for the next centuries indicate 1.0 m or more sea-level elevation, which has critical potential to permanent flood most of the interior lowland plains that present the geoarchaeological mounds. The inundation of plains submerges and isolate the sites, making their investigations unfeasible.

Human Development Index (HDI) evidenced the extreme social vulnerability of the Marajó Island population in terms of economy, education, security, and environmental

conditions. We identified the most affected people are riverside communities located in the west at Anajás and Breves, which is directly affected by the change in river floods or intensification of rainfalls in the Dense Rainforest domain. People located at lowland municipalities, such as Cachoeira do Arari, Ponta de Pedras and Soure also being affected by land inundation (Tab. 2). This situation highlights a population defenseless by the government in the face of climate changes in one of the largest areas potentially affected by SLR in Brazilian territory. Riverside communities must have direct policies publics to mitigate the consequences of climate change such as more severe floods, material losses, and worsening living conditions. Understand the tide, marine and river flood dynamics of Marajó Island is necessary to purpose mitigations. Tide gauges demand expansion at Marajó Island and are an instrument to collect data over natural multidecadal marine oscillations and measurement the sea-level trends and recognize the contribution of subsidence and the relative sea-level (BORETTI, 2020).

The mangrove ecosystem is one of the most sensitive environments at Marajó Island and directly impacts the human. Chemical and physic properties of P1 and P2 indicate the existence of a long-term established mangrove recognizable by soil signatures. Barra Velha site has P2 with most homogeneous soil horizons and date from 2750 B.P. (BEHLING; COHEN; LARA, 2004), while Praia do Pesqueiro has P1 with heterogeneous soil horizons with mangrove stabilized estimated around 670 B.P (BEHLING; COHEN; LARA, 2004). Here we identified most of the ancient soil established mangrove present silt and clay predominance with values ranging from 52.4 to 61.3% to silt and 28.6 to 30.5% to clay in both P1 and P2. The P2 is the most representative ancient mangrove soil about more than 180 cm deep with silty clay loam texture. The P1 has a considerable variation in the first 55 cm and observed in-depth the signature of ancient soil mangrove established. Currently, the soil has erosive trends with the exposition of basal ancient mangrove soil. In P1 the main result is the sulfurization process by sulfide minerals intensively oxidized by an exposition at the atmosphere (FANNING, 1993), in which pH values are considerably acid ranging from 2.75 to 3.04 associated with characteristic air smell.

Historical coastline morphology analysis highlights the P1 soil has been in an intensive coastal morphodynamics. The coastline morphology had fewer changes during the last century, with the predominance of marine retraction and advance over the mangrove

edges. The P1 soil profile at Praia do Pesqueiro has stratifications from moments of waters intrusion with fine sediment deposition, followed by marine retraction whose mangrove takes over its domain. The P2 in Praia da Barra Velha is different and has trends of persistent coastline retraction with signs of changes in sea-level associated with aggressive tides.

The mangrove ecosystem at Praia da Barra Velha is progressively dismantled by tide and erosion forces and represent the zone in which occurred the most changes in the coastline morphology from the last 46 years. The P2 soil profile reveals a thin sand horizon at the surface constituted by 86.2% of fine sand as a sign of recent sedimentary deposition. The mangrove margins in Praia da Barra Velha present several plant deaths and represent a sign of changes in tide dynamics according Ward et al. (2010). As a possible future consequence, when mangrove is unestablished with freshwater input, mangrove potentially is replaced by riparian flood forest vegetation such as varzea or restinga (França et al., 2012), and represent a risk in the east Marajó Island.

The results presented highlights a complex landscape that affected by sea-level rising in the next centuries. As Kontgis et al. (2019), the governments, scientists, and land-use planners must discover solutions to consequences of global climate change and the extreme vulnerabilities of populations. We recognize to Marajó Island several risks to loss ancient legacies of pre-Columbian inhabitants, such as Indian Black Earth and archaeological sites of mounds at lowlands and highlands of the region. Mangrove disturbance can unbalance a delicate marine ecosystem in ADE. Is projected until 76.702 inhabitants (21.48% of the population) are potentially directly affected by permanent flooding at Marajó Island in the next centuries. The results are the first global perspective of the main impacts in the region, to purpose to fill gaps information and subsidies policy governments decisions.

8. DISCUSSÕES E PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DA TESE

8.1 A heterogeneidade da paisagem da Ilha de Marajó

As informações apresentadas até o momento, desde o estado da arte na literatura (Capítulo 3) até os capítulos de resultados (Capítulos 4, 5, 6 e 7), evidenciaram o quanto a foz do rio Amazonas é significativamente heterogênea em seus vários aspectos ambientais, sociais e históricos. O artigo *Soils and Landscapes of Marajó Island, Brazilian Amazonia: Holocene evolution, geoarchaeology and climatic vulnerability* (Item 4.1) evidencia os vários componentes físicos e humanos que formam o estuário do rio Amazonas, entre os estados do Pará e Amapá. Nesse trabalho foram apresentados os principais compartimentos da paisagem da Ilha de Marajó, sendo totalizados 21 geoambientes e suas principais particularidades. Os geoambientes foram reconhecidos tanto em campo quanto por imagens de satélite. Foram ao todo 20 perfis de solos descritos em campo e realizadas análises laboratoriais físicas, químicas e de datação absoluta por carbono 14 (^{14}C) que revelam heranças de um passado Holocênico, bem como os diferentes momentos de ocupações pré-colombianas e portuguesas mediante registros em sítios arqueológicos.

A dimensão territorial da Ilha de Marajó (33.359 km²) é significativamente extensa, sendo maior que os estados de Sergipe (21.910 km²) e Alagoas (27.758 km²). Reconheceu-se dois principais domínios altimétricos na ilha responsáveis por culminar em diferentes arranjos da paisagem. No setor oriental da ilha se predomina áreas topograficamente mais rebaixadas e maiores variabilidades ambientais e antrópicas, ao passo que o setor ocidental concentra as áreas de maior altitude e densidade florestal. Os vestígios arqueológicos estão presentes de maneira sistêmica em toda a Ilha de Marajó, sendo possível perceber diferentes arranjos espaciais e sociais enquanto herança na paisagem. As Terras Pretas Arqueológicas estão presentes tanto no interior da Ilha, sobretudo nos *mounds* (naturais e/ou antrópicos) quanto em suas margens costeiras. As terras altas do setor leste que compreendem Soure, Salvaterra e seus distritos são marcadas por diversas Terras Pretas, comumente degradadas por cortes de estradas (Figura 48) ou pelo intensivo uso histórico após o início da colonização por navegantes estrangeiros.

Figura 48: Terras Pretas de Índio com vestígios de cerâmica degradada incorporada à pedogênese dos solos. Em profundidade presença de couraça ferruginosa.



Os resultados geoquímicos dos solos indicam que as Terras Pretas podem ter diferentes origens resultando de antigas áreas agricultáveis ou de moradia, devido à presença e/ou ausência de cerâmica, bem como serem afetadas pelo uso colonial (Figura 49). Um exemplo são os perfis 16 e 17 apresentados no item 4.1, no qual são sítios arqueológicos com Terra Preta com bastante fragmentos de cerâmica em sua matriz, cujos dados geoquímicos evidenciam forte esvaziamento de elementos marcadores de ocupação humana, como o fósforo. Em sítios ainda relativamente preservados os solos ainda preservam maiores taxas de fósforo, como é o caso do perfil 15 (Item 4.1; HENRIQUES et al., 2022).

Figura 49: Vestígios arqueológicos observados em campo, destaque para Terra Preta de Índio de A, B, E. No distrito de Joanes observa-se edificações de antigas missões jesuíticas de meados do século XVI. Em F destaque para cerâmica encontrada no Perfil 7 em E.



As datações realizadas para o Perfil 16 em Monsarás, distrito de Salvaterra, revelam o quanto essas terras já foram alteradas e revolvidas pela longa temporalidade de ocupações humanas. Pela técnica do isótopo ^{14}C foram verificadas idades que variam entre 180 a 430 BP, nas quais também se apresentam de forma caótica ao longo do perfil, o que indica a mistura desses materiais. Em Joanes, distrito de Salvaterra, ainda

são encontradas edificações jesuíticas portuguesas, o que denota a forte ocupação no decorrer do tempo na região, e, por conseguinte, impactos nos sítios arqueológicos indígenas antigos.

Sob a perspectiva ambiental, o setor oriental da Ilha de Marajó possui as maiores diversidades. O geoambiente 10 (Figura 24) representa domínios interiores arenosos provenientes de antigos cordões arenosos formados durante o Holoceno. As cotas topográficas de cerca de 15m eximem atualmente esse domínio de influências de maré ou encharcamento permanente de seus solos pelas chuvas. Por imagens de levantamento aéreo (Figura 50), observa-se na região de coleta do Perfil 2 extensos alinhamentos arenosos, de orientação SW-NE. Esses cordões também podem ser observados por diversas áreas no setor nordeste da Ilha associados a campos herbáceos e salinos por meio de imagens de satélite.

Figura 50: Alinhamentos regionais de cordões arenosos do Holoceno.



Nos cordões arenosos observados em campo próximo a Joanes se desenvolveram processos de podzolização, que culminaram na estruturação e formação de horizontes orgânicos subsuperficiais. Ainda há evidências de precipitação e remobilização de óxidos de ferro em vista à dinâmica subsuperficial das águas. Sobre esse sistema arenoso pedológico ainda está presente um estruturado cerrado *strictu sensu* (Figura 51), diferente de outras áreas arenosas que ocorrem no Amazonas que apresentam vegetação de campinarana. A presença dessa fitofisionomia indica tanto

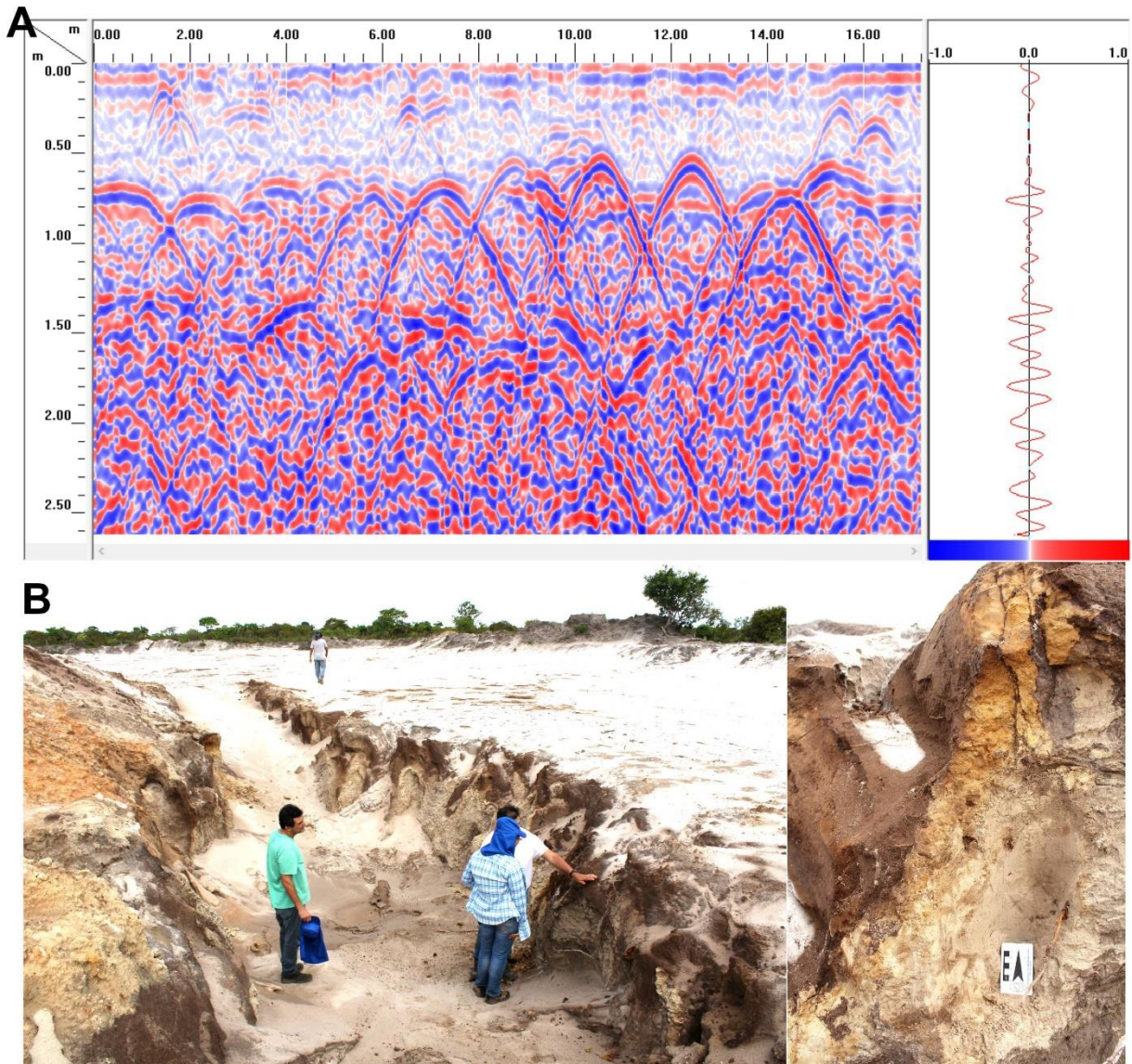
um ambiente de melhor circulação hídrica subsuperficial, bem como condições que permitem que esse porte arbóreo tenha sido mais bem desenvolvido.

Figura 51: Domínio de antigos cordões arenosos com formação de espodosolos e estabelecimento de cerrado *strictu sensu*.



Por meio de dados coletados por GPR (*Ground Penetration Radar*) em 11 de dezembro de 2018, nota-se a marcada descontinuidade entre o horizonte arenoso superior e o espódico, abaixo (Figura 52). O sensor capta as descontinuidades existentes, principalmente, pela diferença de umidade e pelo predomínio de determinadas frações de partículas constituintes (argila, silte e/ou areia).

Figura 52: Seção topográfica vertical Espodossolo, em A dados obtidos por GPR (Ground Penetration Radar) e B seção lateral do Espodossolo.



Seguindo para as cotas topográficas mais elevadas do setor leste da Ilha de Marajó, em cerca de 15m de altitude, são encontrados os solos com maior desenvolvimento pedológico na região (Figura 53), no qual culminou em Latossolos e comumente associados a couraças ferruginosas em profundidade. Esses solos possuem padrão típico do sistema Amazônico bem drenado, nos quais resultam em solos de textura média, relativamente amarelados, saturados por alumínio e distróficos. O sistema Grupo Barreiras e suas coberturas sedimentares associadas imprimem forte condicionante na textura arenosa desses solos. Couraças ferruginosas, de diferentes tempos, também sugerem forte influência no desenvolvimento pedológico. Os perfis 1 e 7 são os melhores exemplos de processos de transformações das coberturas

pedológicas a partir da degradação de diferentes couraças ferruginosas em profundidade. Na porção superior desses solos também é comum a presença de Terra Preta de Índio, o que sugere influências no processo de pedogênese no decorrer do tempo.

Figura 53: Latossolos sob influência de antigas couraças ferruginosas e materiais geoarqueológicos em superfície. Em A couraças associadas ao Grupo Barreiras fortemente erodida e intemperizada, em D evidências de degradação de couraças ferruginosas.



O setor leste da Ilha de Marajó abriga uma das mais extensas áreas contínuas de manguezal no território brasileiro (Figura 54). Os solos são essencialmente hidromórficos e concentrados em bases como cálcio, magnésio, potássio e sódio,

sendo esse último presente em solução e no complexo de troca do solo, o que confere o caráter salino e sódico para os perfis amostrados. Esse aspecto geoquímico promove maior dificuldade para o sistema radicular da maioria das plantas em absorver água e nutrientes, devido à capacidade osmótica de maior saturação de sais dissolvidos. O sódio ainda pode exercer influência direta no comportamento da argila promovendo sua dispersão e modificações na estruturação do solo quando não encharcados.

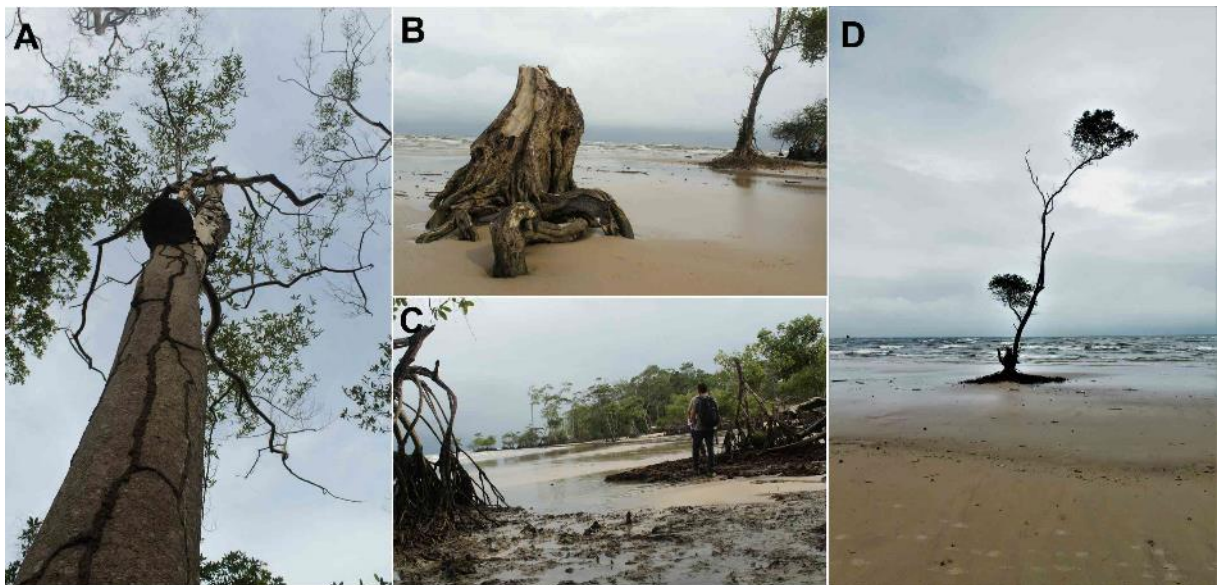
Figura 54: Domínio de manguezais, em B amostragem do Perfil 3 de solo.



A principal espécie encontrada no domínio dos manguezais observado é a *Rizophora mangle* Linn (mangue vermelho), na qual possuem até por volta de 12 metros de altura (Figuras 54 e 55). Na região também são encontradas plantas arbóreas do mangue branco (*Laguncularia racemosa* Gaertn) e do Mangue preto (*Avicennia schaweriana* Stapf & Leechman). O domínio dos manguezais, de forma geral, é integrado por espécies bem adaptadas à influência das marés, salinidade e às condições hidromórficas. Os solos desse geoambiente possuem assinaturas geoquímicas que marcam longa temporalidade da presença desse domínio pelo menos nos últimos 2000 BP, segundo datações presentes na literatura (BEHLING; COHEN; LARA, 2004)

Nas margens da Baía de Marajó, o manguezal ainda resguarda tanto heranças de períodos de estabilidade de seu ecossistema associado a recentes perturbações marinhas que progressivamente erodem as suas margens. O item 7.1, referente ao manuscrito *Impacts of Anthropocene sea-level rise on People, Environments, and Archaeological legacies at Marajó Island, Brazilian Amazonia*, apresenta o quanto as margens do manguezal no setor leste da Ilha de Marajó têm passado por mudanças relativamente recentes e abruptas nos últimos 50 anos (Figura 55). Próximo a Soure a análise temporal dos últimos 46 anos por imagens de satélite evidenciou que há um predomínio de tendências erosivas, nas quais já deslocaram cerca de 500m de linha costeira em direção adentro. Os solos e as bordas do bioma manguezal corroboram para evidenciar tal dissecação, sendo percebido reorganizações de edificações antrópicas, o desmantelamento de espécies antigas de mais de 7m de altura de *Rizophora mangle*. As evidências se expressam nas mais variadas escalas, desde o processo de sulfurização e rebaixamento acentuado do pH na cobertura pedológica até alterações de antigos canais fluviais incorporados às águas da Baía do Marajó.

Figura 55: Bordas do manguezal nas margens da Baía de Marajó e impactos marinhos recentes.



Em direção ao interior da Ilha a partir do manguezal ocorre a zona de apicum, que, por sua vez, representa um ecossistema único e de vegetação rasteira, afetada pela dinâmica de marés e que deriva de uma evolução geodinâmica dos manguezais, nos quais o ambiente progressivamente perde argila e silte restando principalmente campos arenosos de elevada acidez e salinidade. Nesse geoambiente foi encontrado

plantas rasteiras halófitas, ou seja, que possuem adaptações em sua fisiologia para esses ambientes, bem como a carnaúba, que é um tipo de palmeira endêmica do semiárido brasileiro (item 5.2), sendo um possível indicador de mudanças ambientais ocorridas na região durante o Holoceno (Figura 56). Além do apicum também ocorrem extensas planícies herbáceas salinas, que não necessariamente provém de um antigo manguezal, mas sim de intrusões do nível marinho responsáveis por deixar atualmente fortes concentrações de sódio na superfície.

Figura 56: Domínio de apicum adjacente ao manguezal. Em C destaque para extensas planícies salinas associadas.



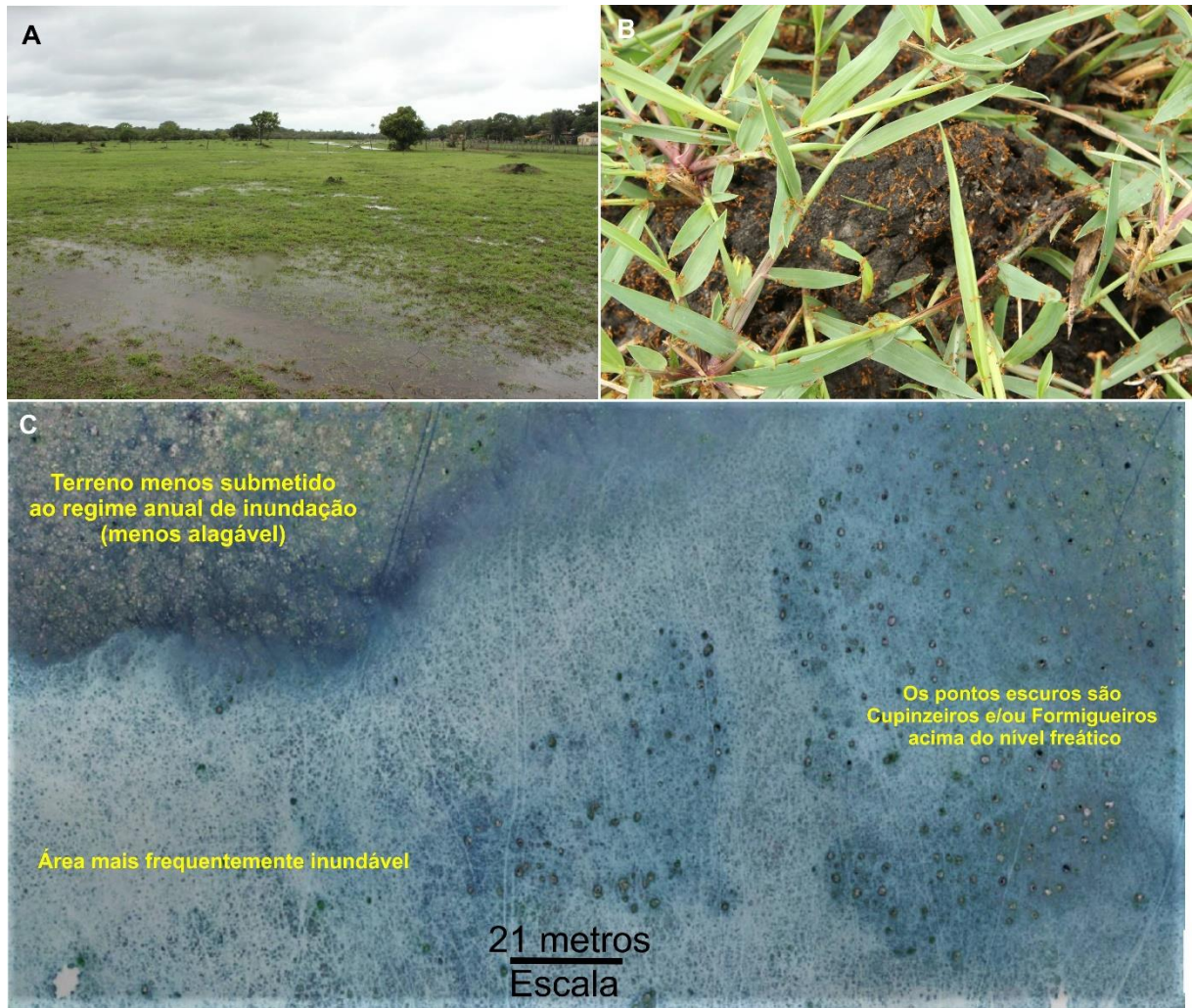
O capítulo 5 foi dedicado às especificidades dos sais, que estão concentrados nos geoambientes identificados na Ilha de Marajó, com destaque para sua distribuição espacial e atributos de suas coberturas pedológicas. Para isso foi apresentado no item 5.1 o trabalho *Salinidade e heranças hidro-pedogeomorfológicas na Ilha de Marajó, foz do rio Amazonas, Pará, Brasil*, nas quais foram realizadas as primeiras aproximações acerca da confiabilidade da aplicação de índices espectrais salinos para identificação da organização espacial do sódio na superfície. O trabalho

evidenciou que índices espectrais realmente podem representar a variação da salinidade da superfície, sobretudo, herbácea, além de uma possível área de entrância de águas provindas da Baía do Marajó. Também foi possível observar padrões de formações de antigos cordões arenosos típicos de deposição costeira e eólica, além de haver diversos setores com acúmulo de águas pluviais de difícil secagem devido ao atual nível hidrogeológico ser relativamente correspondente ao nível das águas da Baía (item 5.1).

O item 5.2 o artigo *Salt-affected soils as indicative of fluvial-marine landscape evolution, Marajó Island, Brazilian Amazonia* corresponde à ampliação das análises espectrais em âmbito regional para reconhecimento da organização da distribuição espacial do sódio no setor oriental da Ilha. Diversos índices salinos foram aplicados e testados estatisticamente se realmente respondiam a variabilidade da salinidade dos solos, por meio dos dados de condutividade elétrica. Alguns índices foram mais adequados ao contexto da área de estudo, sendo utilizados para confecção do mapa da distribuição do sal. Notadamente houve coerência em relação às áreas que expressam as maiores saturações por sódio acerca de áreas potencialmente mais susceptíveis à intrusão de águas de origem marinha. No capítulo 7, acerca de cenários de aumento do nível do mar por mudanças climáticas, fica evidenciada a vulnerabilidade da Ilha frente a quaisquer aumento ou diminuição do nível eustático global. Mediante as análises da distribuição espacial da distribuição do sal (item 5), foi ainda discorrido de que maneira os atributos das coberturas pedológicas e o quanto o caráter salino-sódico de cada geoambiente possui diferentes especificidades.

Para além das áreas baixas (*lowlands*), que possuem forte concentração salina, há, ainda, geoambientes submetidos à dinâmica fluvial e forte evapotranspiração, sendo desprovido de sódio em excesso, como é o caso do geoambiente 14 (item 4). Nele, as águas tendem a se acumularem na superfície devido a longos períodos de precipitações associado a cotas topográficas de cerca de 4m acima do atual nível do mar (Figura 57).

Figura 57: Planícies interiores não salinas submetidas a inundação anual por precipitação.

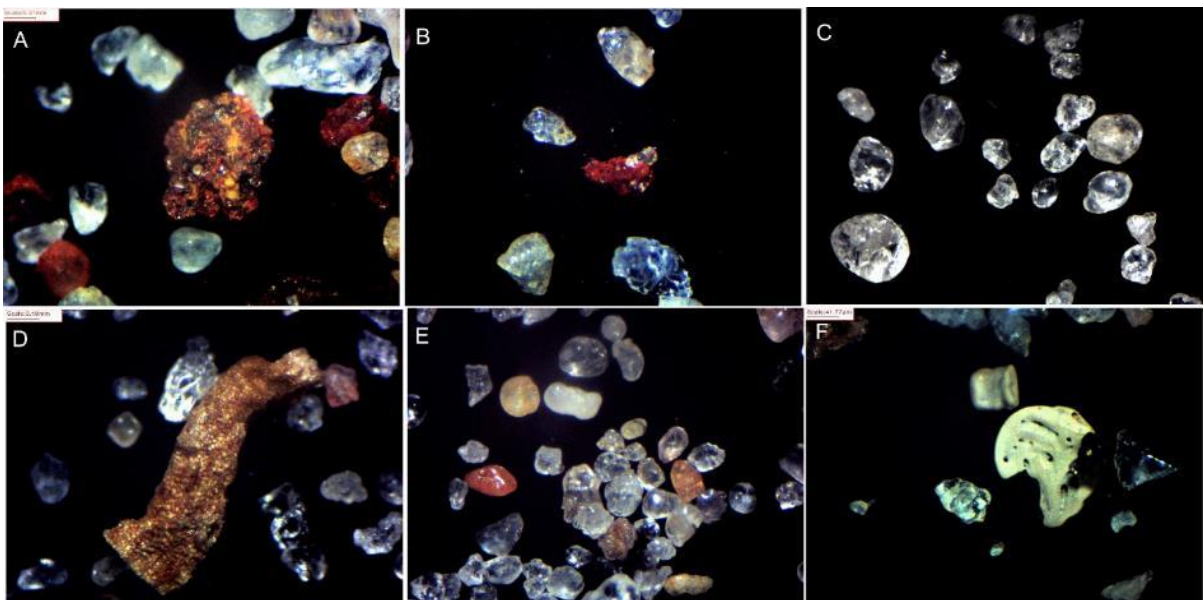


Nessas planícies herbáceas interiores não salinas são encontrados amplos campos de *murundus* formados e ocupados por espécies de cupins e formigas-de-fogo (*Solenopsis invicta*). O arranjo espacial dos ninhos acompanha a dinâmica hidrogeológica, sendo os *murundus* presentes, principalmente, nas áreas menos submetidas aos ciclos anuais de inundação. A Figura 57 mostra a distribuição e organização espacial dos ninhos de cupins e/ou formigueiros, em que há trechos preferenciais de escoamento e acúmulo hídrico por entre os montículos. Porções de terra acima de 1m da oscilação do nível freático são suficientes para que a atividade biológica se estabeleça, contribuindo para a pedogênese de depósitos sedimentares fluviais depositados. À medida em que os campos são drenados, também se favorece a ocupação e sucessão de espécies rasteiras e campestres por espécies vegetais de maior porte favorecidos pela pedogênese e estruturação incipiente dos solos.

8.2 Evolução geoambiental da Ilha de Marajó

Os capítulos de resultados evidenciam a complexidade da paisagem da Ilha de Marajó e apresentam possíveis quadros de gênese e evolução da atual fitofisionomia e seus respectivos geoambientes. O Holoceno após o Último Máximo Glacial mostra que nos últimos 10 mil anos ocorreram diversos processos de transformação da paisagem e mudanças no regime climático. A oscilação progressiva do nível marinho associada à variabilidade climática, além da possibilidade da ocorrência de tsunamis (oscilação abrupta do nível marinho) em meados do século XVIII, são os principais fatores que podem ter influenciado a evolução da atual paisagem do Ilha. Esses componentes representam processos nas mais variadas escalas espaço-temporais, desde alterações geoquímicas que ocorrem a nível microscópico na superfície a partir de uma fração de argila, até grandes alterações ambientais promovidas pela circulação hidrológica superficial e subsuperficial motivadas por diferentes níveis de base. A Figura 58 mostra grãos de areia amostrados durante o campo de 2018 na Ilha do Marajó, em seu setor leste. Alguns cristais de quartzo cimentados por precipitados de óxidos e hidróxidos ferro sugerem a flutuabilidade hidrológica pela qual os grãos na fração areia testemunharam.

Figura 58: Grãos de areia amostrados da Ilha do Marajó.



Na Figura 58C os grãos de quartzo representam o geoambiente de Espodossolo, evidenciando a lavagem dos grãos no decorrer do tempo, correspondendo a

horizontes praticamente de coloração branca. A Figura 58F corresponde a possíveis fragmentos de cerâmica, típicos de ocorrência nos sítios arqueológicos de Terra Preta Arqueológica. As análises estatísticas referentes aos índices de circularidade e arredondamento dos grãos em sua fração grossa (Figura 59) indicam o predomínio de areias relativamente bem selecionadas, sugerindo forte influência das águas no processo de evolução dessas areias, seja pelo retrabalho marinho costeiro, ou pelo transporte de longa distância desses sedimentos provenientes do interior do continente Sul-Americano. Há que se considerar também que o condicionante neotectônico pode ter influenciado na potencialização do retrabalho morfodinâmico desses grãos mediante influência hidrológica (Figuras 59, 60 e 61).

Figura 59: Estatísticas sobre o grau de arredondamento e esfericidade dos grãos de quartzo por geoambiente.

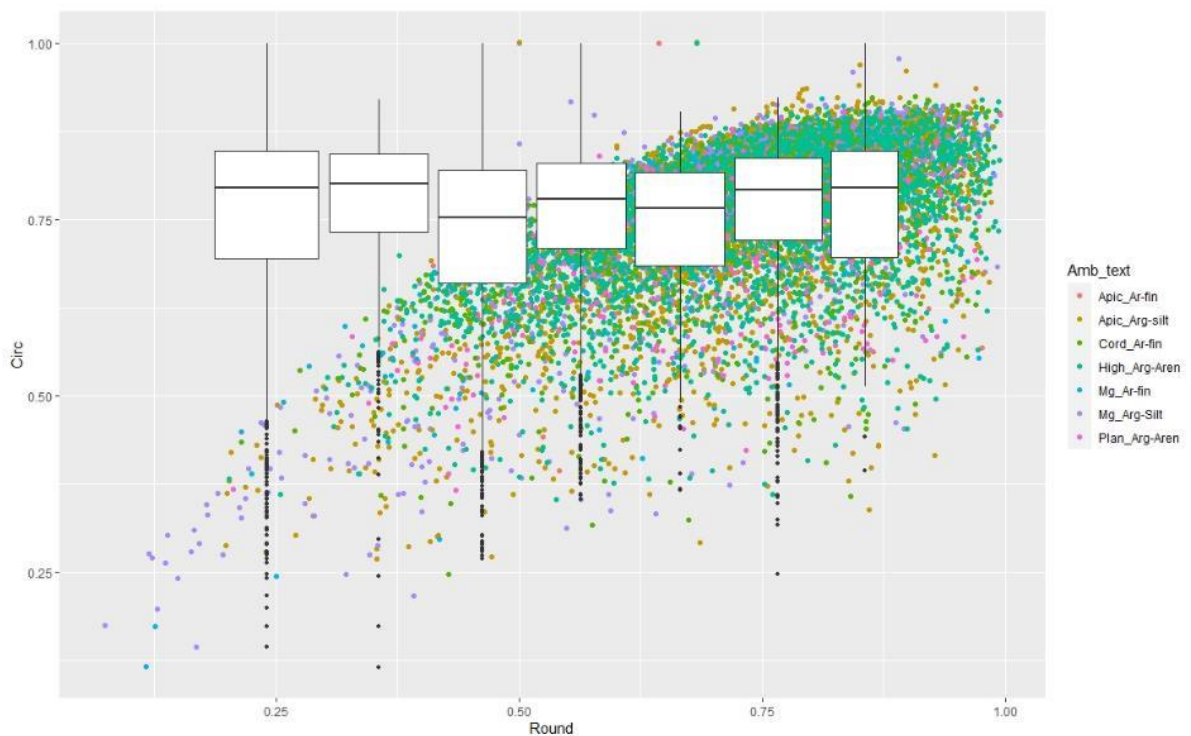


Figura 60: Estatísticas referentes ao grau de arredondamento e esfericidade dos grãos de quartzo por geoambiente.

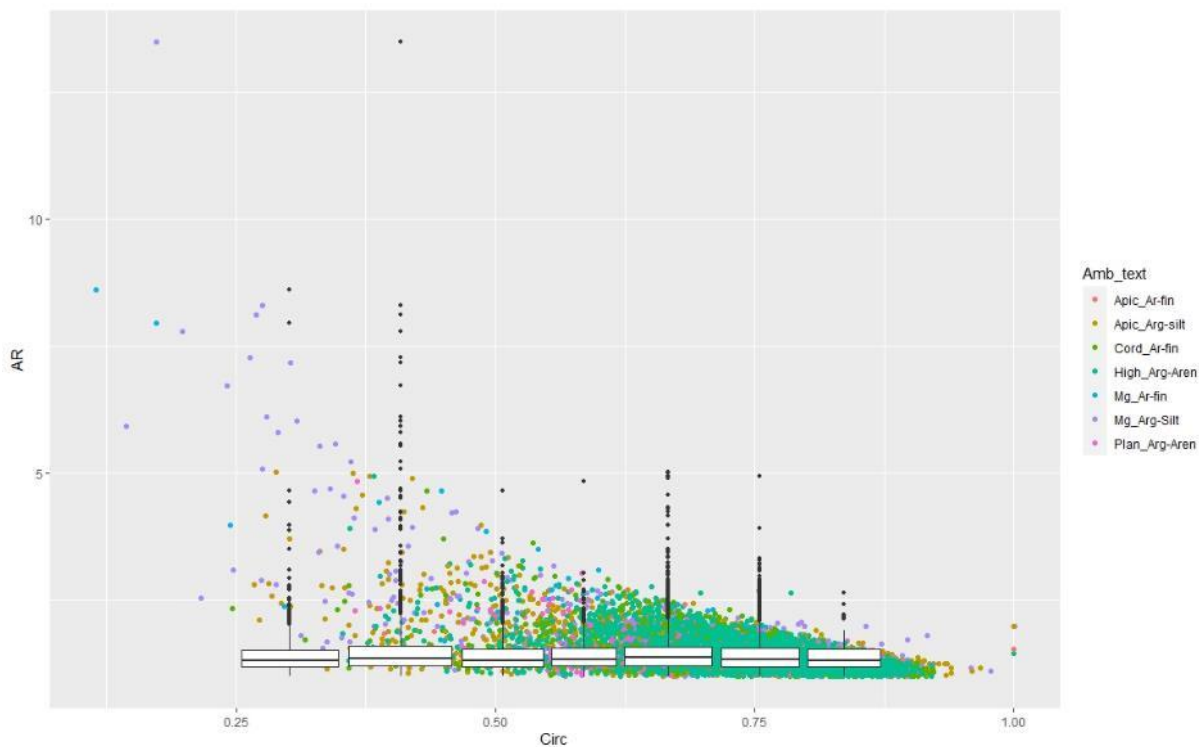
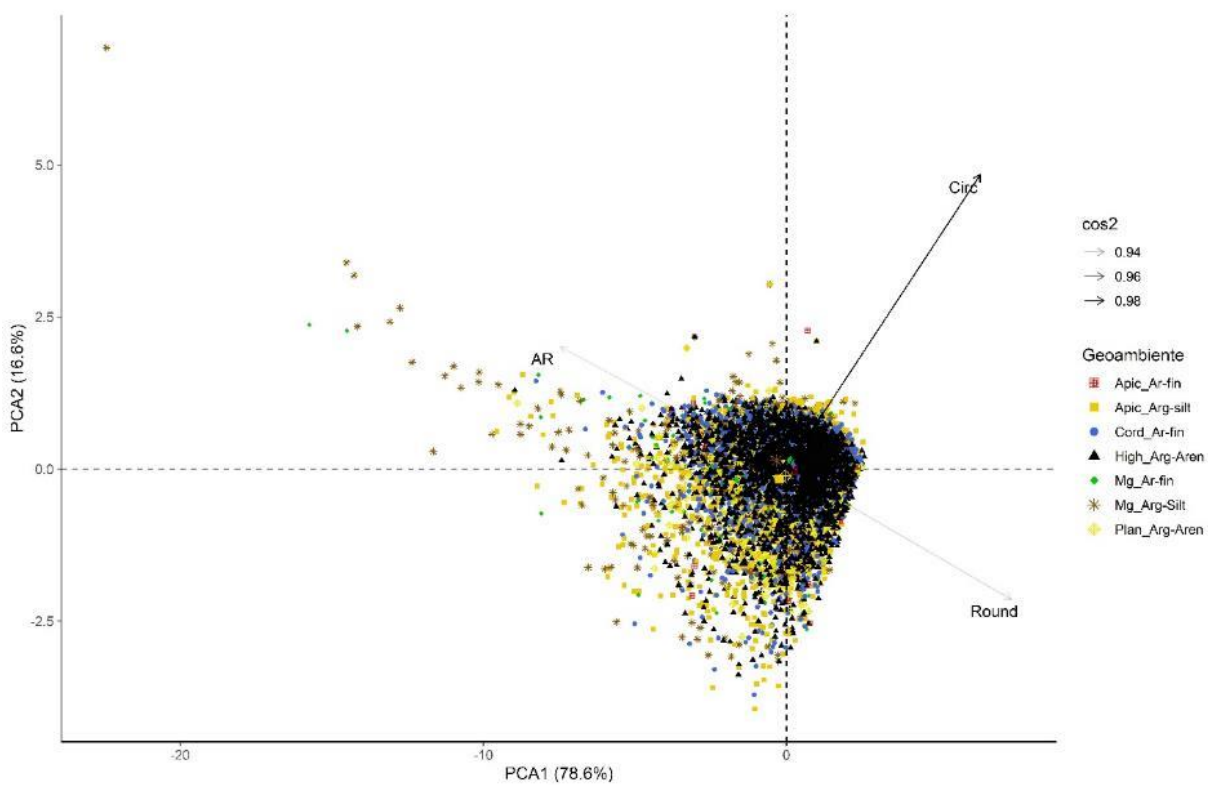


Figura 61: Estatísticas referentes ao grau de arredondamento e esfericidade dos grãos de quartzo por geoambiente.



As datações de ^{14}C (item 4.1) indicaram idades entre 3330 a 4510 BP. Essas idades corroboram para as principais hipóteses de um passado Amazônico quente e úmido durante a passagem do Holoceno Médio para o Holoceno Superior (WALKER et al., 2012). Os altos valores de alumínio também fazem referência a regimes climáticos mais úmidos e quentes, que contribuíram para influenciar os processos pedogenéticos. O perfil 2, referente ao geoambiente 10 (Figura 24), representa as heranças de um passado pedológico capaz de migrar a matéria orgânica e complexar sesquióxidos por influência da percolação da água e atividade da bioturbação. As condições climáticas mais úmidas e quentes ainda teriam favorecido a colonização da superfície por espécies vegetais de maior porte, bem como a ciclagem de materiais orgânicos, sendo possível estruturar um solo a partir de antigos cordões arenosos.

Enquanto foram encontradas evidências de um passado mais quente e úmido da passagem da metade do Holoceno para idades mais recentes, também há evidências de um Holoceno Tardio marcado por regimes climáticos mais secos na região. Isso é evidenciado pelo geoambiente 2 (Figura 24), no qual corresponde principalmente ao apicum, bem como associado às planícies herbáceas salinas do setor nordeste da Ilha. A presença da espécie *L. Carnaúba* (*Copernicia prunifera* (Miller) H. E. Moore (Arecaceae)) é a principal evidência desse passado em que houve maiores expansões de condições tendentes a semiaridez, visto que essa espécie é endêmica e típica do semiárido brasileiro, sendo encontrada na Ilha de Marajó de forma pontual sob condições climáticas e geomorfológicas que permitem resguardar tal herança.

A possível migração dessa espécie pode ter sido motivada por uma plataforma continental mais extensa e distante do atual nível marinho, associada a condições mais secas, capaz de permitir a expansão de um bioma típico do semiárido pela atual costa na região Norte. No decorrer do Holoceno, condições edafoclimáticas favoráveis a sua permanência, como forte evapotranspiração associada a campos de forte salinidade e sodicidade mantiveram as condições geoambientais suficientes para que a carnaúba permaneça estabelecida. Também é considerada a possibilidade dessas espécies terem também sido trazidas por habitantes, sobretudo, colonizadores portugueses, visto o histórico interesse em seu manejo no Nordeste durante o século XIX para extração e exportação de sua cera.

Os campos salinos na Ilha de Marajó fornecem mais elementos de compreensão sobre a dinâmica marinha holocênica em que a região foi submetida. O setor oriental da ilha tem por característica apresentar, de forma geral, altitudes próximas ao atual nível marinho (~ 4m). O setor norte-nordeste foi o que apresentou maiores concentrações de sais em superfície, sendo possível por meio da contribuição das águas oceânicas. O Holoceno sendo marcado por um período pós-glacial relativamente mais seco, também havia um nível médio oceânico que podia chegar até 120m distante da atual costa.

Durante a metade do Holoceno há diversas evidências que apontam para um período de condições mais úmidas e de elevadas temperaturas, o que também pode ter induzido a transgressão do nível marinho correspondente aos campos herbáceos atualmente saturados por sódio. O potencial de inundação regional da Ilha, como visto, leva a crer que tais condições já podem ter ocorrido em meados da metade do Holoceno há 7000 BP. Essa possível entrância marinha também pode ter interagido com a borda interna do manguezal na região de Soure, sendo observado um horizonte constituído essencialmente por areias no Perfil 8 (Figuras 26 item 4.1.4.2, (HENRIQUES et al., 2022) e Figura 62).

Figura 62: Planície herbácea salina/apicum adjacente ao manguezal da região de Soure, destaque para o Perfil 8 e seus horizontes arenosos enterrado.



O nível mais subsuperficial possui assinaturas físicas e químicas semelhantes aos solos hidromórficos presentes no interior do domínio de manguezais descritos em P3

e P4 (Figura 26, item 4.1.4.3, HENRIQUES et al., (2022)). Datações presentes na literatura indicam idades de cerca de 2000 BP, o que também indica a persistência desse bioma na região no decorrer do Holoceno. Enquanto a borda voltada para a Baía de Marajó possui diversas evidências de tendências futuras na morfologia costeira, melhor discutidas no capítulo 8 sobre mudanças climáticas, sua borda voltada para o interior resguarda heranças de um passado submetido a entrância de águas marinhas e salobras capazes de alterar a paisagem na região durante a metade do Holoceno, há cerca de 6000 BP.

8.3 O futuro dinâmico da Ilha de Marajó e mudanças climáticas

Assim como em um passado nem tão distante, em termos de escala geológica e geomorfológica, foram percebidas significativas transformações da paisagem motivadas principalmente pelos ritmos climáticos e eustáticos, o futuro também não poderia ser tão diferente. Buscamos no manuscrito *Impacts of Anthropocene sea-level rise on People, Environments, and Archaeological legacies at Marajó Island, Brazilian Amazonia* (item 7.1) discutir sobre possíveis cenários causados pelos atuais modelos de mudanças climáticas e seus efeitos a médio e longo prazo para o nível médio global dos oceanos, enqunato alerta e gestores e tomadores de decisão do poder público.

O cenário de aumento do nível eustático de até 6m evidencia o quanto o setor oriental da Ilha de Marajó, em suas terras baixas, é consideravelmente susceptível a impactos diretos para os ecossistemas, seus habitantes e suas heranças geoarqueológicas. As margens do manguezal na Praia da Barra Vermelha e na Praia do Pesqueiro são os locais que mais evidenciaram tendências erosivas nas últimas décadas (Figura 63). As análises das alterações regionais da linha costeira corroboram para o quanto esse setor foi significativamente erodido nos últimos 46 anos. A região da Praia da Barra Vermelha, próximo a Soure, é a mais atingida, sendo observável espécies relativamente estabelecidas e de elevada altura de *rizophora mangle* sendo derrubadas pelo avanço das marés (Figura 64 e Figura 46 do item 7.1.4.4). Nesse setor também foi percebido, por meio da análise de imagens de satélite dos últimos 10 anos (item 7.1), que a população também foi afetada, sendo forçada a migrar suas edificações, geralmente quiosques, para porções mais para interior na praia. Essas

análises das margens do manguezal foram os exemplos mais diretos acerca de tendências de aumento do nível marinho, com impactos diretos no estabelecimento das espécies costeiras.

Figura 63: Evidências da dissecação das margens do manguezal solos por meio de “falésias” de mangue.



Figura 64: À esquerda da foto, *rizophora mangle* tombadas pelo efeito de maré, à direita e ao fundo rarefação do adensamento do manguezal.



Se para a região costeira são sentidos impactos diretamente decorrentes de alterações no nível médio oceânico, o interior da Ilha também possui potencialidade para se decorrer transformações significativas da paisagem. As projeções mais otimistas significam por volta de 1m de elevação do nível marinho até 2100, sendo considerável valores bastante superiores (> 6m) em cenários mais pessimistas ou de maiores temporalidades. Entre meados de 3500 a 1000 BP a distribuição espacial de antigas colonizações indígenas nos campos abertos da Ilha de Marajó e seus *mounds* sugerem ter sido afetadas por alterações, sobretudo climáticas, capazes de afetar os ritmos de inundação da região (MEGGERS; DANON, 1988a). Alterações, sobretudo, nos ritmos de inundação, podem afetar diretamente a atual população.

Para até 2m de inundação, os impactos começam a ser sentidos de forma sistêmica na Ilha, sendo afetados cerca de 24% das extensas planícies herbáceas tanto salinas quanto não salinas. Não apenas os campos são afetados pela inundação causada pela entrada e/ou maior represamento das águas pluviais, como também poderia afetar a dinâmica de cheias fluviais no setor oriental, responsável por impactar os habitantes ribeirinhos principalmente dos municípios de Anajás e Breves. Os impactos ambientais, sociais e geoarqueológicos são cada vez maiores conforme aumenta-se o nível marinho. A partir de 3m de elevação há considerável entrada de águas no setor oriental da Ilha de Marajó, sendo quase completamente inundado nos modelos acima de 6m.

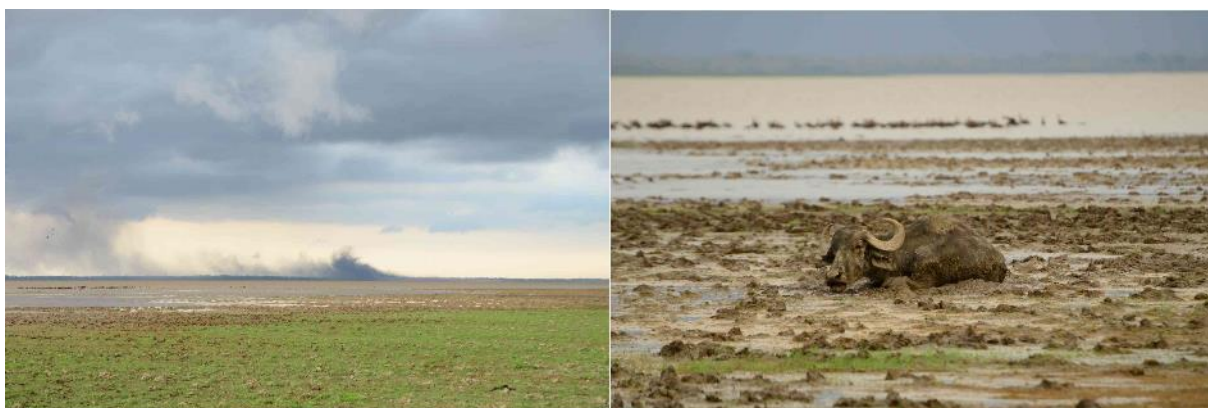
Em termos sociais significa o êxodo de populações em direção às terras altas do setor leste, bem como em direção ao continente, o que traz maiores pressões ambientais sobre os sítios arqueológicos, bem como a perda de seus registros pela inacessibilidade. Os Índices de Desenvolvimento Humano (IDH) para os municípios são um dos menores no país, o que revela a extrema fragilidade dos habitantes frente às mudanças climáticas em uma das regiões potencialmente mais afetada no território brasileiro (Figura 65). Para ser elaboradas propostas foi necessário compilar diversos dados nos âmbitos ambientais, sociais e arqueológicos, cujas diversas análises permitiram o suporte para possíveis futuras ações. Dentre as escalas de abrangência que as mudanças climáticas trazem, o setor que menos temos controle é a dinâmica natural regional, bem como nos desdobramentos causados por dinâmicas globais nos ciclos do clima.

Figura 65: Habitações típicas de palafitas presentes por quase toda a Ilha de Marajó.



Neste capítulo 8, bem como no capítulo 7, portanto, foram identificados os principais cenários ambientais frente as projeções mundiais sobre mudanças climáticas, nos quais fornecem subsídio a ações voltadas para a população, de modo a mitigar perdas materiais, psicológicas, sociais e arqueológicas. Para isso, é necessário reunir informação sobre os mais variados componentes da paisagem da Ilha de Marajó, realizar o planejamento mais adequado que compreenda as principais vulnerabilidades, seguido da implementação e avaliação dos resultados. Uma ação deve ser voltada para o reestabelecimento de populações que são diretamente afetadas em um primeiro momento.

Figura 65: Planícies herbáceas interiores passíveis de serem primeiramente afetadas por meio de cheias severas decorrentes do aumento do nível global dos oceanos.



Os modos de produção, tais como pecuária e agricultura, também se fazem como um importante componente a ser observado, em razão de ser fatores que podem comprometer o acesso a água potável se conduzidos de forma inadequada (Figura 65). Com a possível migração de populações para as áreas mais altas da Ilha,

sobretudo a Leste na região de Soure, a intensificação de áreas que já são agricultadas pode culminar em impactos severos para a qualidade das águas disponíveis, a oferta de alimentos e remanescentes de Terras Pretas de Índio. O manguezal também se encontra próximo dessas áreas, o que pode causar perturbações antrópicas em seu ecossistema para além dos impactos causados pelo avanço mais agressivo das marés, o que também pode reverberar em efeitos negativos para os habitantes e para o ecossistema marinho que depende do mangue para se estabelecer.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados e discussões foram debatidos de forma transversal às várias temáticas tratadas, muitas vezes, de forma compartimentada na literatura. Isto é, a proposta dessa tese foi a de trazer a perspectiva geográfica para a análise da paisagem em seus múltiplos componentes, desde processos e dinâmicas ambientais de longo-termo, até os fatores antrópicos históricos enquanto importante elemento nas transformações da paisagem marajoara. As intenções desse trabalho se alinharam à proposta geral do CNPq, mediante os demais estudos sobre as Baías do território brasileiro, que é o de utilizar as Baías enquanto modelo para melhor preservação desses ecossistemas mundiais no contexto da Década dos Oceanos (2020-2030), organizado pela ONU. Para isso, esse trabalho evidencia análises acerca das especificidades geoambientais presentes na Ilha de Marajó enquanto contribuição à preservação das heranças geoambientais e arqueológicas da foz do rio Amazonas. Mudanças climáticas são ainda a principalmente fronteira do conhecimento presente nas geociências, neste trabalho no item 3.4 *Mudanças climáticas e a ilha do Marajó* foram apresentados alguns caminhos ainda a serem estudados, especialmente em termos de oscilações marinhas e suas correntes oceânicas em séries históricas que ultrapassem um (1) século, isto é, na Figura 21 (pag. 48) é um exemplo de como dados de cartografia histórica (mais de 500 anos) é possível observar indicadores da variação do nível do mar ao longo do tempo do desenvolvimento da Cartografia no Brasil e no mundo até os instrumentos e métodos atuais..

REFERÊNCIAS

- ABOUKARIMA, Abdulwahed M.; AL-SULAIMAN, Mohammed A.; EL MARAZKY, Mohamed S. A. Effect of sodium adsorption ratio and electric conductivity of the applied water on infiltration in a sandy-loam soil. **Water SA**, [S. l.], v. 44, n. 1, p. 105–110, 2018. DOI: 10.4314/wsa.v44i1.12.
- ABREU JR., Cássio Hamilton; MURAOKA, Takashi; LAVORANTE, André Fernando. Relationship between acidity and chemical properties of brazilian soils. **Scientia Agricola**, [S. l.], v. 60, n. 2, p. 337–343, 2003. DOI: 10.1590/s0103-90162003000200019.
- ABSY, Maria Lucia et al. Mise en évidence de quatre phases d'ouverture de la forêt dense dans le sud-est de l'Amazonie au cours des 60000 dernières années: Première comparaison avec d'autres régions tropicales. **C. R. Acad. Sci. Paris**, [S. l.], p. 673–678, 1991.
- ALBERT, James S.; VAL, Pedro; HOORN, Carina. The changing course of the Amazon River in the Neogene: center stage for Neotropical diversification. **Neotropical Ichthyology**, [S. l.], v. 16, n. 3, 2018. DOI: 10.1590/1982-0224-20180033.
- ALBUQUERQUE, Antonia Gislaine Brito Marques; FERREIRA, Tiago Osório; CABRAL, Raiana Lira; NÓBREGA, Gabriel Nuto; ROMERO, Ricardo Espíndola; MEIRELES, Antônio Jeovah De Andrade; OTERO, Xosé Lois. Hypersaline tidal flats (apicum ecosystems): The weak link in the tropical wetlands chain. **Environmental Reviews**, [S. l.], v. 22, n. 2, p. 99–109, 2014. DOI: 10.1139/er-2013-0026.
- ALVAREZ, V. H. V.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. **Determinação e uso do fósforo remanescente** Boletim Informativo SBCS, 2000.
- ANA. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**. 2009. Disponível em: http://conjuntura.ana.gov.br/conjuntura/rh_amazonica.htm. Acesso em: 10 nov. 2019.
- ANDERSON, Veronica J.; HORTON, Brian K.; SAYLOR, Joel E.; MORA, Andrés; TESÓN, Eliseo; BREECKER, Daniel O.; KETCHAM, Richard A. Andean topographic growth and basement uplift in southern Colombia: Implications for the evolution of the Magdalena, Orinoco, and Amazon river systems. **Geosphere**, [S. l.], v. 12, n. 4, p. 1235–1256, 2016. DOI: 10.1130/GES01294.1.
- ARAI, Mitsuru. A grande elevação eustática do Mioceno e sua influência na origem do Grupo Barreiras. **Geologia USP. Série Científica**, [S. l.], v. 6, n. 2, p. 1–6, 2006. DOI: 10.5327/s1519-874x2006000300002.
- ARCO, Lee J.; ADELSBERGER, Katherine A.; HUNG, Ling Yu; KIDDER, Tristram R. Alluvial geoarchaeology of a Middle Archaic mound complex in the lower Mississippi valley, U.S.A. **Geoarchaeology**, [S. l.], v. 21, n. 6, p. 591–614, 2006. DOI: 10.1002/gea.20125.
- BARRETO, Artênio Cabral. **Modelagem da salinidade do solo com a utilização de técnicas de sensoriamento remoto**. 2019. Universidade Federal Rural do Semi-Árido, [S. l.], 2019.
- BARROS, D. F.; ALBERNAZ, A. L. M. Possíveis impactos das mudanças climáticas em áreas úmidas e sua biota na Amazônia Brasileira. **Brazilian Journal of Biology**, [S. l.], v. 74, n. 4, p. 810–820, 2014. DOI: 10.1590/1519-6984.04013.

BEHLING, Hermann; COHEN, Marcelo C. L.; LARA, Rubén J. Late Holocene mangrove dynamics of Marajó Island in Amazonia, northern Brazil. **Vegetation History and Archaeobotany**, [S. l.], v. 13, n. 2, p. 73–80, 2004. DOI: 10.1007/s00334-004-0031-1.

BEHLING, Hermann; HOOGHIEMSTRA, Henry. Late quaternary palaeoecology and palaeoclimatology from pollen records of the savannas of the Llanos Orientales in Colombia. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, [S. l.], v. 139, n. 3–4, p. 251–267, 1998. DOI: 10.1016/S0031-0182(97)00139-9.

BERMÚDEZ, M. A.; HOORN, C.; BERNET, M.; CARRILLO, E.; VAN DER BEEK, P. A.; GARVER, J. I.; MORA, J. L.; MEHRKIAN, K. The detrital record of late-Miocene to Pliocene surface uplift and exhumation of the Venezuelan Andes in the Maracaibo and Barinas foreland basins. **Basin Research**, [S. l.], v. 29, p. 370–395, 2017. DOI: 10.1111/bre.12154.

BERRÍO, Juan Carlos; BEHLING, Hermann; HOOGHIEMSTRA, Henry. Tropical rain-forest history from the Colombian Pacific area: A 4200-year pollen record from Laguna Jotaordo. **Holocene**, [S. l.], v. 10, n. 6, p. 749–756, 2000. DOI: 10.1191/09596830094999.

BEZERRA, Marcia. Signifying heritage in Amazon: a public archaeology project at Vila de Joanes, Marajó Island, Brazil. **Revista de Antropología Chilena**, [S. l.], v. 44, n. 3, p. 533–542, 2012.

BICUDO, Tacio Cordeiro. **Estudo da formação da bacia hidrográfica do rio Amazonas através da modelagem numérica de processos tectônicos e sedimentares**. 2017. Universidade de São Paulo, [S. l.], 2017.

BORETTI, Alberto. Relative sea-level rise and land subsidence in Oceania from tide gauge and satellite GPS. **Nonlinear Engineering**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 175–193, 2020. DOI: 10.1515/nleng-2020-0007.

BRAGA, Pedro Ivo Soares. Subdivisão fitogeográfica, tipos de vegetação, conservação e inventário florístico da floresta amazônica. **Acta Amazonica**, [S. l.], v. 9, n. 4, p. 53–80, 1979. DOI: 10.1590/1809-43921979094s053.

BRASIL. **Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral. 1974. Projeto Radambrasil. Levantamento de recursos naturais. Folha Belém AS. 22**. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv24022.pdf>.

BUSH, Mark B.; COLINVAUX, Paul A. **A 7000-year pollen record from the Amazon lowlands, Ecuador**. [s.l.: s.n.].

CAMPOS, D. V. B.; TEIXEIRA, P. C.; PÉREZ, D. V.; SALDANHA, M. F. C. Percentagem de saturação por sódio. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (org.). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Brasília - DF: EMBRAPA, 2017. p. 573.

CAPUTO, Mario Vicente; SOARES, Emilio Alberto Amaral. Eustatic and tectonic change effects in the reversion of the transcontinental Amazon River drainage system. **Brazilian Journal of Geology**, [S. l.], v. 46, n. 2, p. 301–328, 2016. DOI: 10.1590/2317-4889201620160066.

CARMO, Roberto Luiz Do; NUNES, Luci Hidalgo. Climate change and human activities in

Brazil with emphasis on the coastal zone. **Terræ**, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 40–45, 2008.

CARVALHO, Gil César Rocha; GOMES, Caroline Janette Souza; MARTINS NETO, Marcelo Augusto. O Cone do Amazonas, bacia da Foz do Amazonas - uma nova discussão. **Geociências**, Ouro Preto, v. 64, n. 4, p. 429–437, 2011.

CASTRO, Darciléa Ferreira; ROSSETTI, Dilce de Fátima; RUIZ PESSEDA, Luiz Carlos. Facies, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ and C/N analyses in a late Quaternary compound estuarine fill, northern Brazil and relation to sea level. **Marine Geology**, [S. l.], v. 274, n. 1–4, p. 135–150, 2010. DOI: 10.1016/j.margeo.2010.03.011.

CHANEY, R. F. Sludge utilization, land application and food chain impact. *In*: **The biocycle to the art and science of composting**. Pennsylvania: J. G. Press, 1991. p. 240–253.

CHANG, Stephanie E.; YIP, Jackie Z. K.; CONGER, Tugce; OULAHEN, Greg; MARTELEIRA, Michelle. Community vulnerability to coastal hazards: Developing a typology for disaster risk reduction. **Applied Geography**, [S. l.], v. 91, n. 2018, p. 81–88, 2018. DOI: 10.1016/j.apgeog.2017.12.017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.12.017>.

CHEN, Songchao; ARROUAYS, Dominique; ANGERS, Denis A.; MARTIN, Manuel P.; WALTER, Christian. Soil carbon stocks under different land uses and the applicability of the soil carbon saturation concept. **Soil & Tillage Research**, [S. l.], v. 188, p. 53–58, 2018. DOI: 10.1016/j.still.2018.11.001. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.001>.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Edgard Blucher, 1999.

CHURCH, John A.; WHITE, Neil J. Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century. **Surveys in Geophysics**, [S. l.], v. 32, n. 4–5, p. 585–602, 2011. DOI: 10.1007/s10712-011-9119-1.

COHEN, M. C. L.; BEHLING, H.; LARA, R. J. Amazonian mangrove dynamics during the last millennium: The relative sea-level and the Little Ice Age. **Review of Palaeobotany and Palynology**, [S. l.], v. 136, n. 1–2, p. 93–108, 2005. DOI: 10.1016/j.revpalbo.2005.05.002.

COHEN, Marcelo Cancela Lisboa; ALVES, Igor Charles Castor; FRANÇA, Marlon Carlos; PESSEDA, Luiz Carlos Ruiz; DE FÁTIMA ROSSETTI, Dilce. Relative sea-level and climatic changes in the Amazon littoral during the last 500 years. **Catena**, [S. l.], v. 133, p. 441–451, 2015. DOI: 10.1016/j.catena.2015.06.012.

COSTA, Marcondes Lima Da. Aspectos Geológicos Dos Lateritos Da Amazônia. **Revista Brasileira de Geociências**, [S. l.], v. 21, n. 2, p. 146–160, 1991. DOI: 10.25249/0375-7536.1991146160.

COSTA, João Batista Sena; HASUI, Yociteru; BEMERGUY, Ruth L.; SOARES-JÚNIOR, Adilson V; VILLEGAS, Javier M. C. Tectonics and paleogeography of the Marajó Basin, northern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [S. l.], v. 74, n. 3, p. 519–531, 2002. DOI: 10.1590/S0001-37652002000300013. Disponível em: www.scielo.br/aabc.

COSTA NETO, Antônio Nery Da. **Prospecção arqueológica em Joanes, Ilha de Marajó (PA)**. Belém.

CROWLEY, James K. Mapping Playa Evaporite Minerals with AVIRIS Data : A First Report from Death Valley, California. **Remote Sensing of Environment**, [S. l.], v. 44, n. 2–3, p. 337–356, 1993.

DAVIDSON, Eric A. et al. The Amazon basin in transition. **Nature**, [S. l.], v. 481, n. 7381, p. 321–328, 2012. DOI: 10.1038/nature10717.

DEFILIPO, B. V; RIBEIRO, A. C. **Análise química do solo - metodologia**. 2. ed. [s.l: s.n.].

DEFRANCE, Dimitri; CATRY, Thibault; RAJAUD, Amélie; DESSAY, Nadine; SULTAN, Benjamin. Impacts of Greenland and Antarctic Ice Sheet melt on future Köppen climate zone changes simulated by an atmospheric and oceanic general circulation model. **Applied Geography**, [S. l.], v. 119, n. April, p. 102216, 2020. DOI: 10.1016/j.apgeog.2020.102216.

DERBY, Orville A. The Artificial Mounds of the Island of Marajo, Brazil. **The American Naturalist**, [S. l.], v. 13, n. 4, p. 224–229, 1879. DOI: 10.1086/272316. Disponível em: <https://about.jstor.org/terms>.

DESJARDINS, T.; CARNEIRO FILHO, A.; MARIOTTI, A.; CHAUVEL, A.; GIRADIN, C. Changes of the forest-savanna boundary in Brazilian Amazonia during. **Oecologia**, [S. l.], v. 108, p. 749–756, 1996.

DUTTON, A.; CARLSON, A. E.; LONG, A. J.; MILNE, G. A.; CLARK, P. U.; DECONTO, R.; HORTON, B. P.; RAHMSTORF, S.; RAYMO, M. E. Sea-level rise due to polar ice-sheet mass loss during past warm periods. **Science**, [S. l.], v. 349, n. 6244, p. 153–162, 2015. DOI: 10.1126/science.aaa4019.

EOSDIS. **Acces to NASAA earth science data**. 2020. Disponível em: <https://earthdata.nasa.gov/>.

ESA. **ESA Introducing Sentinel-2**, 2015.

EUROPEAN SPACE AGENCY. **European Space Agency - CryoSat / Observing the Earth / Our Activities / ESA / Sentinel-2**. 2019. Disponível em: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/SMOS/Introducing_SMOS.

FANNING, Delvin S. Salinity problems in acid sulfate coastal soils. *In*: [s.l: s.n.]. v. 1p. 491–500. DOI: 10.1007/978-94-011-1858-3_52.

FAO. **Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems - Guidelines for assessment (Draft for public review)**. **Livestock Environmental Assessment and Performance (LEAP) Partnership**. Rome, Italy: FAO, 2018.

FEARNSIDE, Philip Martin. Global warming in Amazonia: impacts and Mitigation. **Acta Amazonica**, [S. l.], v. 39, n. 4, p. 1003–1012, 2009. DOI: 10.1590/s0044-59672009000400030.

FERNÁNDEZ-BUCES, N.; SIEBE, C.; CRAM, S.; PALACIO, J. L. Mapping soil salinity using a combined spectral response index for bare soil and vegetation: A case study in the former lake Texcoco, Mexico. **Journal of Arid Environments**, [S. l.], v. 65, n. 4, p. 644–667, 2006. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2005.08.005.

FERREIRA, Alexandre Rodrigues. Notícia da Nação Juioana a que chama hoje Sacaca. *In: Viagem filosófica pelas capitanias do Grão Pará*. Belém: Conselho Estadual de Cultura, 1974.

FERREIRA, Gabriela Padilha. **Caracterização hidrodinâmica e do transporte de sedimentos na região fluvio-estuarina do rio Paracauari - Ilha de Marajó - Pará**. 2013. Universidade Federal de Pernambuco, [S. l.], 2013.

FERRIER, Ken L.; AUSTERMANN, Jacqueline; MITROVICA, Jerry X.; PICO, Tamara. Incorporating sediment compaction into a gravitationally self-consistent model for ice age sea-level change. **Geophysical Journal International**, [S. l.], v. 211, n. 1, p. 663–672, 2017. DOI: 10.1093/GJI/GGX293.

FIORELLA, Richard P.; POULSEN, Christopher J.; PILLCO ZOLÁ, Ramiro S.; JEFFERY, M. Louise; EHLERS, Todd A. Modern and long-term evaporation of central Andes surface waters suggests paleo archives underestimate Neogene elevations. **Earth and Planetary Science Letters**, [S. l.], v. 432, p. 59–72, 2015. DOI: 10.1016/j.epsl.2015.09.045. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2015.09.045>.

FRANÇA, Carmena Ferreira; SOUZA FILHO, Pedro Walfir Martins; EL-ROBRINI, Maâmar. Análise faciológica e estratigráfica da planície costeira de Soure (margem leste da ilha de Marajó-PA), no trecho compreendido entre o canal do Cajuúna e o estuário Marajó island-Pará), between Cajuúna channel and Paracauari estuary. **Acta Amazonica**, [S. l.], v. 37, n. 2, p. 261–268, 2007.

FRANÇA, Marlon C.; COHEN, Marcelo C. L.; PESSEDA, Luiz C. R.; FRANCISQUINI, Mariah I.; RIBEIRO, Claudia M. de Jesus; OLIVEIRA, Thaiciane R. De. Tannin as a New Indicator of Paleomangrove Occurrence within an Amazonian Coastal Region. **Journal of Coastal Research**, [S. l.], v. 35, n. 1, p. 82, 2019. DOI: 10.2112/jcoastres-d-17-00023.1.

FRANÇA, Marlon C.; FRANCISQUINI, Mariah I.; COHEN, Marcelo C. L.; PESSEDA, Luiz C. R.; ROSSETTI, Dilce F.; GUIMARÃES, José T. F.; SMITH, Clarisse B. The last mangroves of Marajó Island - Eastern Amazon: Impact of climate and/or relative sea-level changes. **Review of Palaeobotany and Palynology**, [S. l.], v. 187, p. 50–65, 2012. DOI: 10.1016/j.revpalbo.2012.08.007.

FRANCISQUINI, M. I.; LIMA, C. M.; PESSEDA, L. C. R.; ROSSETTI, D. F.; FRANÇA, M. C.; COHEN, M. C. L. Relation between carbon isotopes of plants and soils on Marajó Island, a large tropical island: Implications for interpretation of modern and past vegetation dynamics in the Amazon region. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, [S. l.], v. 415, p. 91–104, 2014. DOI: 10.1016/j.palaeo.2014.03.032.

FREITAS, Hermes Augusto De; PESSEDA, Luiz Carlos Ruiz; ARAVENA, Ramon; GOUVEIA, Susy Ely Marques; RIBEIRO, Adauto de Souza; BOULET, René. Late Quaternary vegetation dynamics in the southern Amazon Basin inferred from carbon isotopes in soil organic matter. **Quaternary Research**, [S. l.], v. 55, n. 1, p. 39–46, 2001. DOI: 10.1006/qres.2000.2192.

FURQUIM, Sheila Aparecida Correia; SANTOS, Marjory Araujo; VIDOCA, Thiago Tavares; BALBINO, Marcelo de Almeida; CARDOSO, Evaldo Luis. Salt-affected soils evolution and fluvial dynamics in the Pantanal wetland, Brazil. **Geoderma**, [S. l.], v. 286, p. 139–152, 2017. DOI: 10.1016/j.geoderma.2016.10.030.

GLIŃSKI, J.; HORABIK, J.; LIPIEC, J. **Encyclopedia of agrophysics**. [s.l.] : Springer, 2011. DOI: 10.1007/978-90-481-3585-1. Disponível em: https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-90-481-3585-1_137.

GODOY, Mario D. P.; LACERDA, Luiz D. Mangroves response to climate change: A review of recent findings on mangrove extension and distribution. **Anais da Academia Brasileira de Ciencias**, [S. l.], v. 87, n. 2, p. 651–667, 2015. DOI: 10.1590/0001-3765201520150055.

GORJI, Taha; SERTEL, Elif; TANIK, Aysegul. Monitoring soil salinity via remote sensing technology under data scarce conditions: A case study from Turkey. **Ecological Indicators**, [S. l.], v. 74, p. 384–391, 2017. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.11.043. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.043>.

GOUDIE, Andrew S. **The Human Impact on the Natural Environment: Past, Present and Future**. [s.l.: s.n.]. v. 7

GREGORY-WODZICKI, K. M. Uplift history of the Central and Northern Andes: A review. **Bulletin of the Geological Society of America**, [S. l.], 2000. DOI: 10.1130/0016-7606(2000)112<1091:UHOTCA>2.0.CO;2.

GRISSE, Robert Bobby; ALLEY, Mark; HOLSHOUSER, David; THOMASON, Wade. **Precision Farming Tools : Soil Electrical Conductivity** Virginia Cooperative Extension Publication, , 2009.

GUIMARÃES, José T. F.; COHEN, Marcelo C. L.; FRANÇA, Marlon C. Model of wetland development of the Amapá coast during the late Holocene. **Anais da Academia Brasileira de Ciencias**, [S. l.], v. 82, n. 2, p. 451–465, 2010.

HARDY, R. Dean; HAUER, Mathew E. Social vulnerability projections improve sea-level rise risk assessments. **Applied Geography**, [S. l.], v. 91, n. 2018, p. 10–20, 2018. DOI: 10.1016/j.apgeog.2017.12.019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.12.019>.

HECKENBERGER, Michael; NEVES, Eduardo Góes. Amazonian Archaeology. **Annual Review of Anthropology**, [S. l.], v. 38, n. 1, p. 251–266, 2009. DOI: 10.1146/annurev-anthro-091908-164310.

HENRIQUES, Renata Jordan; DE OLIVEIRA, Fábio Soares; SCHAEFER, Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud; FRANCELINO, Márcio Rocha; LOPES, Paulo Roberto Canto; SENRA, Eduardo Osório; LOURENÇO, Valéria Ramos. Soils and landscapes of Marajó island, Brazilian Amazonia: Holocene evolution, geoarchaeology and climatic vulnerability. **Environmental Earth Sciences**, [S. l.], v. 81, n. 9, p. 25, 2022. DOI: 10.1007/s12665-022-10310-2. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10310-2>.

HERMANOWSKI, Barbara; DA COSTA, Marcondes Lima; CARVALHO, Aliane Trindade; BEHLING, Hermann. Palaeoenvironmental dynamics and underlying climatic changes in southeast Amazonia (Serra Sul dos Carajás, Brazil) during the late Pleistocene and Holocene. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, [S. l.], v. 365–366, p. 227–246, 2012. DOI: 10.1016/j.palaeo.2012.09.030.

HOGG, Alan G. et al. SHCal13 Southern Hemisphere Calibration, 0–50,000 Years cal BP. **Radiocarbon**, [S. l.], v. 55, n. 4, p. 1889–1903, 2013. DOI: 10.2458/azu_js_rc.55.16783.

HONG, Yongsheng; LIU, Yaolin; CHEN, Yiyun; LIU, Yanfang; YU, Lei; LIU, Yi; CHENG, Hang. Application of fractional-order derivative in the quantitative estimation of soil organic matter content through visible and near-infrared spectroscopy. **Geoderma**, [S. l.], v. 337, n. October 2018, p. 758–769, 2019. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.10.025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.025>.

HOORN, C. et al. Amazonia through time: Andean uplift, climate change, landscape evolution, and biodiversity. **Science**, [S. l.], v. 330, n. 6006, p. 927–931, 2010. DOI: 10.1126/science.1194585.

HORBE, Adriana Maria Coimbra; COSTA, Marcondes Lima Da. Solos gerados a partir do intemperismo de crostas lateríticas sílico-ferruginosas. **Acta Amazonica**, [S. l.], v. 27, n. 4, p. 241–256, 1997. DOI: 10.1590/1809-43921997274256.

HORBE, Adriana Maria Coimbra; COSTA, Marcondes Lima Da. Relações genéticas entre Latossolos e crostas lateríticas aluminosas e alumino-ferruginosas na região de Paragominas, Pará. **Revista Brasileira de Geociências**, [S. l.], v. 29, n. 4, p. 497–504, 1999. DOI: 10.25249/0375-7536.1999294497504.

HORTON, Brian K. Tectonic Regimes of the Central and Southern Andes: Responses to Variations in Plate Coupling During Subduction. **Tectonics**, [S. l.], v. 37, n. 2, p. 402–429, 2018. DOI: 10.1002/2017TC004624.

IBÁÑEZ-BONILLO, Pablo. Aruás en los primeros tiempos del Directorio. **Revista de História**, [S. l.], n. 178, p. 1–33, 2019. DOI: 10.11606/issn.2316-9141.rh.2019.151893.

IBGE. **Mapas da Amazônia Legal escala 1:250.000 - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, 2003.

IBGE. **IBGE Cidades**. 2015a. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>.

IBGE. **Manual Técnico de Pedologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. b.

ICMBIO. **Atlas dos Manguezais do Brasil**. Brasília - DF: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2018.

IKIRIKO, M. E.; OMUETI, J. A. I.; THOMAS, E. Y. Examination of Percentage Aluminium Saturation As a Criterion for Liming Tropical Acid Soils of Nigeria. **Agricultural Research & Technology: Open Access Journal**, [S. l.], v. 1, n. 5, p. 1–7, 2016. DOI: 10.19080/artoaj.2016.01.555574.

INPE. **Catálogo de imagens espaciais**. 2020. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>.

IRION, G.; BUSH, M. B.; NUNES DE MELLO, J. A.; STÜBEN, D.; NEUMANN, T.; MÜLLER, G.; MORAIS DE, J. O.; JUNK, J. W. A multiproxy palaeoecological record of Holocene lake sediments from the Rio Tapajós, eastern Amazonia. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, [S. l.], v. 240, n. 3–4, p. 523–535, 2006. DOI: 10.1016/j.palaeo.2006.03.005.

IVAJSKIČ, Danijel; KALIGARIČ, Mitja; FANTINATO, Edy; DEL VECCHIO, Silvia; BUFFA, Gabriella. The fate of coastal habitats in the Venice Lagoon from the sea level rise

perspective. **Applied Geography**, [S. l.], v. 98, n. June, p. 34–42, 2018. DOI: 10.1016/j.apgeog.2018.07.005.

JORDAN, Andrew J.; HUITEMA, Dave; HILDÉN, Mikael; VAN ASSELT, Harro; RAYNER, Tim J.; SCHOENEFELD, Jonas J.; TOSUN, Jale; FORSTER, Johanna; BOASSON, Elin L. **Emergence of polycentric climate governance and its future prospects** *Nature Climate Change* Nature Publishing Group, , 2015. DOI: 10.1038/nclimate2725.

KENT, Dennis V.; MUTTONI, Giovanni. Mobility of Pangea: Implications for Late Paleozoic and Early Mesozoic Paleoclimate. In: LETOURNEAU, P. ...; OLSEN, P. .. (org.). **The Great Rift Valleys of Pangea in Eastern North America**. 1. ed. New York, NY: Columbia University Press, 2003. v. 1p. 11–20. DOI: 10.7312/leto11162-002.

KERTÉSZ, M.; TÓTH, T. Soil survey based on sampling scheme adjusted to local heterogeneity. **Agrokémia és Talajtan**, [S. l.], v. 43, n. 1–2, 1994.

KONTGIS, Caitlin; SCHNEIDER, Annemarie; OZDOGAN, Mutlu; KUCHARIK, Christopher; TRI, Van Pham Dang; DUC, Nguyen Hong; SCHATZ, Jason. Climate change impacts on rice productivity in the Mekong River Delta. **Applied Geography**, [S. l.], v. 102, n. 2019, p. 71–83, 2019. DOI: 10.1016/j.apgeog.2018.12.004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.12.004>.

KOPP, Robert E.; DECONTO, Robert M.; BADER, Daniel A.; HAY, Carling C.; RADLEY, M.; KULP, Scott; OPPENHEIMER, Michael; POLLARD, David; STRAUSS, Benjamin H. Evolving Understanding of Antarctic Ice-Sheet Physics and Ambiguity in Probabilistic Sea-Level Projections. **Earth's Future**, [S. l.], v. 5, p. 1217–1233, 2017.

KOPP, Robert E.; HORTON, Radley M.; LITTLE, Christopher M.; MITROVICA, Jerry X.; OPPENHEIMER, Michael; RASMUSSEN, D. J.; STRAUSS, Benjamin H.; TEBALDI, Claudia. Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites. **Earth's Future**, [S. l.], p. 383–407, 2014. DOI: 10.1002/2014EF000239.Abstract.

KOTSCHOUBEY, Basile; TRUCKENBRODT, Werner. Evolução poligenética das bauxitas do Distrito De Paragominas-Açailândia (Estados do Pará e Maranhão). **Revista Brasileira de Geociências**, [S. l.], v. 11, n. 3, p. 193–202, 1981. DOI: 10.25249/0375-7536.1981193202.

LEIER, Andrew; MCQUARRIE, Nadine; GARZIONE, Carmala; EILER, John. Stable isotope evidence for multiple pulses of rapid surface uplift in the central andes, bolivia. **Earth and Planetary Science Letters**, [S. l.], v. 371–372, p. 49–58, 2013. DOI: 10.1016/j.epsl.2013.04.025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2013.04.025>.

LENTON, Timothy M.; HELD, Hermann; KRIEGLER, Elmar; HALL, Jim W.; LUCHT, Wolfgang; RAHMSTORF, Stefan; SCHELLNHUBER, Hans Joachim. **Tipping elements in the Earth's climate system** *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008. DOI: 10.1073/pnas.0705414105. Disponível em: www.pnas.org/cgi/content/full/.

LEVERMANN, Anders; CLARK, Peter U.; MARZEION, Ben; MILNE, Glenn A.; POLLARD, David; RADIC, Valentina. The multimillennial sea-level commitment of global warming. **PNAS**, [S. l.], v. 110, n. 34, p. 13745–13750, 2013. DOI: 10.1073/pnas.1219414110.

LEVITUS, S. et al. World ocean heat content and thermosteric sea level change (0 – 2000 m

), 1955 – 2010. **Geophysical Research Letters**, [S. l.], v. 39, p. 1–5, 2012. DOI: 10.1029/2012GL051106.

LI, Xiaopeng; CHANG, Scott X.; SALIFU, K. Francis. Soil texture and layering effects on water and salt dynamics in the presence of a water table : a review. **Environmental Research Letters**, [S. l.], v. 22, p. 41–50, 2014. DOI: dx.doi.org/10.1139/er-2013-0035.

LIMA, A. M. M.; OLIVEIRA, L. L.; FONTINHAS, R. L.; LIMA, R. J. S. Ilha do Marajó: revisão histórica, hidroclimatologia, bacias hidrográficas e propostas de gestão. **HOLOS Environment**, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 65–80, 2005.

LIMA, Adriana Ribeiro De. **Trabalhadores da carnaúba: paisagem cultural e modos de vida dos camponeses em Russas-Ce na primeira metade do século XX**. 2007. Universidade Federal do Ceará, [S. l.], 2007.

LIMA, Hedinaldo N.; SCHAEFER, Carlos E. R.; MELLO, Jaime W. V.; GILKES, Robert J.; KER, João C. Pedogenesis and pre-Colombian land use of “Terra Preta Anthrosols” (“Indian black earth”) of Western Amazonia. **Geoderma**, [S. l.], v. 110, n. 1–2, p. 1–17, 2002. DOI: 10.1016/S0016-7061(02)00141-6. Disponível em: www.elsevier.com/locate/geoderma.

LIMBERGER, L. Abordagem sistêmica e complexidade na geografia. **Geografia**, [S. l.], v. 15, n. 2, p. 95–109, 2006.

LISBOA, Pedro. **A terra dos Aruãs**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2012.

LOPES, Paulo Roberto do Canto. **A colonização portuguesa da Ilha de Marajó: espaço e contexto arqueológico-histórico na Missão Religiosa de Joanes**. 1999. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, [S. l.], 1999.

LOUIS, Jérôme; DEBAECKER, Vincent; PFLUG, Bringfried; MAIN-KNORN, Magdalena; BIENIARZ, Jakub; MUELLER-WILM, Uwe; CADAU, Enrico; GASCON, Ferran. Sentinel-2 Sen2Cor: L2A processor for users. **European Space Agency, (Special Publication) ESA SP**, [S. l.], v. SP-740, n. May, p. 9–13, 2016.

MACHADO, Juliana Salles. Arqueologia e história nas construções de continuidade na Amazônia. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas**, [S. l.], v. 4, n. 1, p. 57–70, 2009. DOI: 10.1590/s1981-81222009000100006.

MANSUR, Andressa Vianna; BRONDIZIO, Eduardo Sonnewend; ROY, Samapriya; DE MIRANDA ARAÚJO SOARES, Pedro Paulo; NEWTON, Alice. Adapting to urban challenges in the Amazon: flood risk and infrastructure deficiencies in Belém, Brazil. **Regional Environmental Change**, [S. l.], v. 18, n. 5, p. 1411–1426, 2018. DOI: 10.1007/s10113-017-1269-3.

MARAZUELA, M. A.; VÁZQUEZ-SUÑÉ, E.; AYORA, C.; GARCÍA-GIL, A.; PALMA, T. Hydrodynamics of salt flat basins: The Salar de Atacama example. **Science of the Total Environment**, [S. l.], v. 651, p. 668–683, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.190. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.190.

MARENCO, Jose A.; AMBRIZZI, Tercio; DA ROCHA, Rosmeri P.; ALVES, Lincoln M.; CUADRA, Santiago V.; VALVERDE, Maria C.; TORRES, Roger R.; SANTOS, Daniel C.; FERRAZ, Simone E. T. Future change of climate in South America in the late twenty-first

century: Intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Climate Dynamics**, [S. l.], v. 35, n. 6, p. 1089–1113, 2010. DOI: 10.1007/s00382-009-0721-6.

MARENGO, Jose Antonio; SOARES, Wagner Rodrigues. Impacto das Mudanças Climáticas no Brasil e Possíveis Futuros Cenários Climáticos: Síntese do Terceiro Relatório do IPCC 2001. **Clima e Recursos Hídricos**, [S. l.], p. 209–233, 2003. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/about/about.htm>.

MARENGO, Jose Antonio; SOUZA JR., Carlos. **Climate Change: impacts and scenarios for the Amazon**. 1. ed. São Paulo.

MARTHA JÚNIOR, Geraldo Bueno; CONTINI, Elisio; NAVARRO, Zander. **Caracterização da Amazônia Legal e macrotendências do ambiente externo** Embrapa, 2011.

MAŠKOVÁ, Zuzana; ZEMEK, František; KVĚT, Jan. Normalized difference vegetation index (NDVI) in the management of mountain meadows. **Boreal Environment Research**, [S. l.], v. 13, n. 5, p. 417–432, 2008.

MATINFAR, Hamid Reza; ZANDIEH, Vahid. Efficiency of spectral indices derived from Landsat-8 images of Maharloo Lake and its surrounding rangelands. **Journal of Rangeland Science**, [S. l.], v. 6, n. 4, p. 334–343, 2016.

MAYLE, Francis E.; POWER, Mitchell J. Impact of a drier Early-Mid-Holocene climate upon Amazonian forests. In: PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY B: BIOLOGICAL SCIENCES 2008, **Anais [...]**. : Royal Society, 2008. p. 1829–1838. DOI: 10.1098/rstb.2007.0019.

MEGGERS, Betty J. Moundbuilders of the Amazon: geophysical archaeology on Marajo Island, Brazil. **Journal of Field Archaeology**, [S. l.], v. 19, n. 3, p. 399–404, 1992. DOI: 10.2307/529927.

MEGGERS, Betty J. The mystery of the Marajoara: An ecological solution. **Amazoniana**, [S. l.], v. 16, n. 3–4, p. 421–440, 2001.

MEGGERS, Betty J.; DANON, Jacques. Identification and implications of a hiatus in the archeological sequence on Marajó Island, Brazil. **Journal of the Washington Academy of Sciences**, [S. l.], v. 78, n. 3, p. 245–253, 1988. a.

MEGGERS, Betty J.; EVANS, C. The islands of Mexiana and Caviana. In: **Archaeology at the Mouth of Amazon**. Washington: Smithsonian Institution, 1957. p. 425–555.

MEGGERS, BJ; DANON, J. Identification and Implications of A Hiatus in the Archeological Sequence on Marajó Island, Brazil. **Journal of the Washington Academy of Sciences**, [S. l.], v. 78, n. 3, p. 245–253, 1988. b. Disponível em: www.jstor.org/stable/24536917.

MENDONÇA, Bruno Araújo Furtado De; FERNANDES FILHO, Elpídio Inácio; SCHAEFER, Carlos Ernesto G. R.; SIMAS, Felipe Nogueira Bello; PAULA, Mayara Daher De. Os solos das campinaranas na Amazônia brasileira: ecossistemas arenícolas oligotróficos. **Ciência Floresta**, [S. l.], v. 25, n. 4, p. 827–839, 2015.

METTERNICHT, G. I.; ZINCK, J. A. Remote sensing of soil salinity: Potentials and constraints. **Remote Sensing of Environment**, [S. l.], v. 85, n. 1, p. 1–20, 2003. DOI:

10.1016/S0034-4257(02)00188-8.

MILLER, W. P.; MC FEE, W. W. Distribution of Cadmium, Zinc, Copper, and Lead in Soils of Industrial Northwestern Indiana. **Journal of Environmental Quality**, [S. l.], v. 12, n. 1, p. 29–33, 1983. DOI: 10.2134/jeq1983.00472425001200010004x.

MIRANDA, Maria Carolina da Cruz; ROSSETTI, Dilce de Fátima; PESSENDA, Luiz Carlos Ruiz. Quaternary paleoenvironments and relative sea-level changes in Marajó Island (Northern Brazil): Facies, $\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$ and C/N. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, [S. l.], v. 282, n. 1–4, p. 19–31, 2009. DOI: 10.1016/j.palaeo.2009.08.004.

MOHRIAK, Webster Ueipass. Bacias Sedimentares da Margem Continental Brasileira. In: BIZZI, L. ...; SHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. (org.). **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil**. Brasília. p. 151–165.

MOREIRA, L. S.; MOREIRA-TURCQ, P.; TURCQ, B.; CAQUINEAU, S.; CORDEIRO, R. C. Paleohydrological changes in an Amazonian floodplain lake: Santa Ninha Lake. **Journal of Paleolimnology**, [S. l.], v. 48, n. 2, p. 339–350, 2012. DOI: 10.1007/s10933-012-9601-x.

MÜLLER-WILM, U. Sen2Cor Configuration and User Manual. **Telespazio VEGA Deutschland GmbH**, [S. l.], n. 1, p. 53, 2017. Disponível em: https://step.esa.int/thirdparties/sen2cor/2.4.0/Sen2Cor_240_Documentation_PDF/S2-PDGS-MPC-L2A-SUM-V2.4.0.pdf.

MUNSELL SOIL COLOUR CHARTS. **Munsell Soil Color Charts**. 2009. Disponível em: <https://www.southsuburbanairport.com/Environmental/pdf2/Part 4 - References/Reference 16 Munsell Color Charts/MunsellColorChart.pdf>.

MURRIETA, Rui Sérgio S.; DUFOUR, Darna L.; SIQUEIRA, Andrea D. Food consumption and subsistence in three Caboclo populations on Marajo Island, Amazonia, Brazil. **Human Ecology**, [S. l.], v. 27, n. 3, p. 455–475, 1999. DOI: 10.1023/A:1018779624490.

NASA JPL. **NASADEM Merged DEM Global 1 arc second V001**, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.5067/MEaSURES/NASADEM/NASADEM_HGT.001.

NEREM, R. S.; CHAMBERS, D. P.; CHOE, C.; MITCHUM, G. T. Estimating Mean Sea Level Change from the TOPEX and Jason Altimeter Missions Estimating Mean Sea Level Change from the TOPEX and Jason Altimeter Missions. **Marine Geodesy**, [S. l.], v. 33, n. 1, p. 435–446, 2017. DOI: 10.1080/01490419.2010.491031.

NICHOLLS, Robert J.; HANSON, Susan E.; LOWE, Jason A.; WARRICK, Richard A.; LU, Xianfu; LONG, Antony J. Sea-level scenarios for evaluating coastal impacts. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 129–150, 2014. DOI: 10.1002/wcc.253.

NICHOLLS, Robert J.; KLEIN, Richard J. T. Climate change and coastal management on Europe's coast. In: **Managing European Coasts**. [s.l.: s.n.]. p. 199–226. DOI: 10.1007/3-540-27150-3_11.

NOAA. **National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Center for Operational Oceanographic Products and Services, Tides and Currents**. 2015. Disponível em: <https://tidesandcurrents.noaa.gov/>.

NOMADE, S.; KNIGHT, K. B.; BEUTEL, E.; RENNE, P. R.; VERATI, C.; FÉRAUD, G.; MARZOLI, A.; YUBI, N.; BERTRAND, H. Chronology of the Central Atlantic Magmatic Province: Implications for the Central Atlantic rifting processes and the Triassic-Jurassic biotic crisis. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, [S. l.], v. 244, n. 1–4, p. 326–344, 2007. DOI: 10.1016/j.palaeo.2006.06.034.

NOVOTNY, Etelvino H.; HAYES, Michael H. B.; BONAGAMBA, Tito J.; EDUARDO, R.; SONG, Guixue; NOGUEIRA, Christiane M.; MANGRICH, Antonio S. Lessons from the Terra Preta de Índios of the Amazon Region for the Utilisation of Charcoal for Soil Amendment. **J.Braz.Chem.Soc.**, [S. l.], v. 20, n. 6, p. 1003–1010, 2009.

OLIVEIRA, Edmar Almeida De et al. Legacy of Amazonian Dark Earth soils on forest structure and species composition. **Global Ecology and Biogeography**, [S. l.], p. 1–16, 2020. DOI: 10.1111/geb.13116.

OLIVEIRA JR, Jairo Calderari; CHIAPINI, Mariane; NASCIMENTO, Alexandre Ferreira; COUTO, Eduardo Guimarães; BEIRIGO, Raphael Moreira; VIDAL-TORRADO, Pablo. Genesis and classification of sodic soils in the northern Pantanal. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, [S. l.], v. 41, p. 1–19, 2017. DOI: 10.1590/18069657rbcsc20170015.

OLIVEIRA, C. V.; KER, J. C.; CURI, N.; DUARTE, M. N.; FONTES, L. E. F. Caracterização de concreções ferro-manganosas de solos de calcário no norte do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 25, n. 3, p. 565–574, 2001. DOI: 10.1590/s0100-06832001000300005.

ONTL, T. A.; SCHULTE, L. A. Soil Carbon Storage. **Nature Education Knowlegde**, [S. l.], v. 3, n. 10, p. 35, 2012.

ONU. **Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável**. 2020. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/tema/agenda2030/>.

OPENSTREETMAP. **The OpenStreetMap Wiki Homepage**. 2019. Disponível em: https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Main_Page.

OPPENHEIMER, M. et al. Sea level Rise and implications for low-lying islands, coasts and communities. *In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. [s.l: s.n.]. p. In press.

PARKER, G. R.; FEE, W. W. M. C.; KELLY, J. M. Metal Distribution in Forested Ecosystems in Urban and Rural Northwestern Indiana In this study , sites still under native vegetation within the heavily industrialized region surrounding the south end of Lake Michigan and in a rural setting were selected. **J. Environ. Qual**, [S. l.], v. 7, n. 3, p. 337–342, 1978.

PAZ, Ana Marta; CASTANHEIRA, Nádia; FARZAMIAN, Mohammad; PAZ, Maria Catarina; GONÇALVEZ, Maria Conceição; SANTOS, Fernando A. Monteiro; TRIANTAFILIS, John. Prediction of soil salinity and sodicity using electromagnetic conductivity imaging. **Geoderma**, [S. l.], v. 361, p. 114086, 2020. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.114086.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S. l.], v. 11, n. 5, p. 1633–1644, 2007. DOI: 10.5194/hess-11-1633-2007. Disponível em: www.hydrol-earth-syst-

sci.net/11/1633/2007/.

PELTIER, W. R. Global sea level rise and glacial isostatic adjustment. **Global and Planetary Change**, [S. l.], v. 20, n. 2–3, p. 93–123, 1999. DOI: 10.1016/S0921-8181(98)00066-6.

PENNA, Domingos Soares Ferreira. **Obras completas de Domingos Soares Ferreira Penna**. Vol. II ed. Belém: Conselho Estadual de Cultura, 1971.

PIFFNER, O. Adrian; GONZALEZ, Laura. Mesozoic-cenozoic evolution of the western margin of South America: Case study of the peruvian andes. **Geosciences (Switzerland)**, [S. l.], v. 3, n. 2, p. 262–310, 2013. DOI: 10.3390/geosciences3020262.

PNUD. **Ranking IDH Global**. 2014. Disponível em: <https://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/idh0/rankings/idh-global.html>.

PNUD. **Atlas Brasil**. 2017. Disponível em: <http://www.atlasbrasil.org.br/2013/pt/ranking>.

POKHREL, Yadu N.; FAN, Ying; MIGUEZ-MACHO, Gonzalo. Potential hydrologic changes in the Amazon by the end of the 21st century and the groundwater buffer. **Environmental Research Letters**, [S. l.], v. 9, p. 084004 (12pp), 2014. DOI: 10.1088/1748-9326/9/8/084004.

PRADA-GAMERO, R. M.; VIDAL-TORRADO, P.; FERREIRA, T. O. Mineralogia e físico-química dos solos de mangue do rio Iriri no canal de Bertioga (Santos, SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 28, n. 2, p. 233–243, 2004. DOI: 10.1590/s0100-06832004000200002.

PRASAD, Majeti Narasimha Vara; PIETRZYKOWSKI, Marcin. **Climate change and soil interactions**. 1. ed. [s.l.] : Elsevier, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128180327/climate-change-and-soil-interactions#book-info>.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing** Vienna, Austria R Foundation For Statistical Computing, , 2018. Disponível em: <https://www.r-project.org/>.

RICHARDS, L. A. **Diagnosis and Improvement of Saline and Alkaline Soils**. [s.l.] : Agriculture Handbook, 1954.

RODDAZ, Martin; HERMOZA, Wilber; MORA, Andres; BABY, Patrice; PARRA, Mauricio; CHRISTOPHOUL, Frédéric; BRUSSET, Stéphane; ESPURT, Nicolas. Cenozoic Sedimentary Evolution of the Amazonian Foreland Basin System. *In*: HOORN, Carina; WESSELINGH, F. .. (org.). **Amazonia, Landscape and Species Evolution: A Look into the Past**. [s.l.] : Blackwell Publishing Ltd., 2010. p. 61–88. DOI: 10.1002/9781444306408.ch5.

RODRÍGUEZ, J. J.; WINDEVOXHEL, N. J. **Análisis Regional de la Situación de la Zona Marina Costera Centroamericana** Washington Banco Inter-Americano de Desenvolvimento - BID, , 1998.

ROOSEVELT, A. C. Chiefdoms in the Amazon and Orinoco. *In*: DRENNAN, R. D.; URIBE, C. A. (org.). **Chiefdoms in the Americas**. Boston: University Press of America, 1987.

ROOSEVELT, Anna Curtenius. The Rise and Fall of the Amazon Chiefdoms. *In: L'Homme*. La remonté ed. [s.l.: s.n.]. p. 255–283. DOI: 10.3406/hom.1993.369640.

ROSSETTI, Dilce de Fátima. Evolução sedimentar miocênica nos estados do Pará e Maranhão. **Geologia USP - Serie Científica**, [S. l.], v. 6, n. 2, p. 7–18, 2006. DOI: 10.5327/s1519-874x2006000300003.

ROSSETTI, Dilce de Fátima; GÓES, Ana Maria; TOLEDO, Peter Mann De. Archaeological mounds in Marajó Island in northern Brazil: A geological perspective integrating remote sensing and sedimentology. **Geoarchaeology**, [S. l.], v. 24, n. 1, p. 22–41, 2009. DOI: 10.1002/gea.20250.

ROSSETTI, Dilce de Fátima; ROCCA, Renê Rojas; TATUMI, Sonia Hatsue. Evolução dos Sedimentos Pós-Barreiras na zona costeira da Bacia São Luís, Maranhão, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais**, Belém, v. 8, n. 1, p. 11–25, 2013.

ROSSETTI, Dilce F.; BEZERRA, Francisco H. R.; DOMINGUEZ, José M. L. **Late oligocene-miocene transgressions along the equatorial and eastern margins of brazil***Earth-Science Reviews*, 2013. DOI: 10.1016/j.earscirev.2013.04.005.

ROSSETTI, Dilce F.; VALERIANO, Márcio M.; THALES, Marcelo. An abandoned estuary within Marajó Island: Implications for late quaternary paleogeography of northern Brazil. **Estuaries and Coasts**, [S. l.], v. 30, n. 5, p. 813–826, 2007. DOI: 10.1007/BF02841336.

RUBIRA, Felipe Gomes; BARREIROS, André Mateus; VILLELA, Fernando Nadal Junqueira; PEREZ FILHO, Archimedes. Sistemas pedogeomorfológicos na interpretação da evolução de paisagens quaternárias em climas tropicais úmidos. **Mercator**, [S. l.], v. 18, n. e18020, p. 1–17, 2019. DOI: <https://doi.org/10.4215/rm2019.e18020>.

RUETENIK, Gregory A.; FERRIER, Ken L.; CREVELING, Jessica R.; FOX, Matthew. Sea-level responses to rapid sediment erosion and deposition in Taiwan. **Earth and Planetary Science Letters**, [S. l.], v. 538, p. 116198, 2020. DOI: 10.1016/j.epsl.2020.116198. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116198>.

RUIZ, Hugo Alberto. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 29, n. 2, p. 297–300, 2005. DOI: 10.1590/s0100-06832005000200015.

RUIZ, Hugo Alberto; SAMPAIO, Reginaldo Arruda; DE OLIVEIRA, Maurício; VENEGAS, Victor Hugo Alvarez. Características químicas de solos salino-sódicos submetidos a parcelamento da lâmina de lixiviação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S. l.], v. 39, n. 11, p. 1119–1126, 2004. DOI: 10.1590/s0100-204x2004001100010.

RUMSEY, David. **David Rumsey Map Collection**. 2020. Disponível em: <https://www.davidrumsey.com/>. Acesso em: 4 jun. 2020.

SAADI, Allaoua. Neotectônica Da Plataforma Brasileira: Esboço E Interpretação Preliminares. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, p. 1–15, 1993. DOI: 10.18285/geonomos.v1i1e2.233.

SALGHUNA, N. N.; BHARATHVAJ, S. Aravind. Shoreline Change Analysis For Northern Part Of The Coromandel Coast. **Aquatic Procedia**, [S. l.], v. 4, p. 317–324, 2015. DOI:

10.1016/j.aqpro.2015.02.043. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.043>.

SANTOS, Humberto Gonçalves Dos et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: www.embrapa.br/fale-conosco/sac/.

SCHAAN, D. P. A arte da cerâmica marajoara: encontros entre o passado e o presente. **HABITUS**, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 99–117, 2007.

SCHAAN, Denise. Long-term human induced impacts on Marajó Island landscapes, Amazon estuary. **Diversity**, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 182–206, 2010. DOI: 10.3390/d2020182.

SCHAAN, Denise Pahl. A ceramista, seu pote e sua tanga: identidade e papéis sociais em um Cacicado Marajoara. **Revista de Arqueologia**, [S. l.], v. 16, n. 1, p. 31–45, 2003. DOI: 10.24885/sab.v16i1.177.

SCHAAN, Denise Pahl. The Nonagricultural Chiefdoms of Marajó Island. In: **The Handbook of South American Archaeology**. New York, NY: Springer New York, 2008. p. 339–357. DOI: 10.1007/978-0-387-74907-5_19. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-0-387-74907-5_19.

SCHAEFER, C. E. G. R.; LIMA, H. N.; GILKES, R. J.; MELLO, J. W. V. Micromorphology and electron microprobe analysis of phosphorus and potassium forms of an Indian Black Earth (IBE) Anthrosol from Western Amazonia. **Australian Journal of Soil Research**, [S. l.], v. 42, n. 4, p. 401–409, 2004. DOI: 10.1071/SR03106.

SCHAEFER, C. E. G. R.; MENDONÇA, B. A. F.; FERREIRA JR, V. E. L.; CORREA, G. R. **Relações Solo-Vegetação em alguns ambientes brasileiros: fatores edáficos e florística** *Ecologia de florestas tropicais do Brasil* Viçosa - MG Universidade Federal de Viçosa, , 2009.

SCHAEFER, Carlos E. G. R.; CANDIDO, Hugo Galvão; CORRÊA, Guilherme Resende; PEREIRA, Aianã; NUNES, Jaquelina Alves; SOUZA, Og Francisco; MARINS, Alessandra; FERNANDES-FILHO, E.; KER, João Carlos. Solos desenvolvidos sobre canga ferruginosa no Brasil: uma revisão crítica e papel ecológico de termiteiros. In: CARMO, F. F.; KAMINO, LHY (org.). **Geossistemas Ferruginosos do Brasil: áreas prioritárias para conservação da diversidade geológica e biológica, patrimônio cultural e serviços ambientais**. Belo Horizonte: 3i Editora, 2015. p. 77–102.

SCHAETZL, Randall; ANDERSON, Sharon. **Soils genesis and geomorphology**. New York, NY: Cambridge University Press, 2005.

SCHANN, DC; MARTINS, CP. **Muito além dos Campos** *Arqueologia e história na Amazônia Marajoara*. 1. ed. Belém: GKNORONHA, 2010.

SCHMIDT, Anders Jensen; BEMVENUTI, Carlos Emílio; DIELE, Karen. Sobre a definição da zona de apicum e sua importância ecológica para populações de caranguejo-uçá *Ucides cordatus* (LINNAEUS, 1763). **Boletim Técnico Científico**, Tamandaré - PE, v. 19, n. 1, p. 9–25, 2013.

SCHMIDT, Morgan J. et al. Dark earths and the human built landscape in Amazonia: A widespread pattern of anthrosol formation. **Journal of Archaeological Science**, [S. l.], v. 42, n. 1, p. 152–165, 2014. DOI: 10.1016/j.jas.2013.11.002. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2013.11.002>.

SCHOBENHAUS, C.; NEVES, B. B. B. A geologia do Brasil no contexto da plataforma Sul-americana. *In: Geologia, tectonica e recursos minerais do Brasil*. [s.l: s.n.]. p. 5–54.

SCHOENEBERGER, P. .; WYSOCKI, E. C.; BENHAM, E. C.; STAFF, Soil Survey. **Field Book for Describing and Sampling Soils**. Lincoln, NE: National Soil Survey Center, 2012. v. 3 DOI: 10.1038/258254a0.

SHUKLA, J.; NOBRE, C.; SELLERS, P. Amazon deforestation and climate change. **Science**, [S. l.], v. 247, n. 4948, p. 1322–1325, 1990. DOI: 10.1126/science.247.4948.1322.

SILVA, Rachel Macedo Da; MEHLIG, Ulf; SANTOS, João Ubiratan Moreira Dos; MENEZES, Moirah Paula Machado De. The coastal restinga vegetation of Pará, Brazilian Amazon: a synthesis. **Brazilian Journal of Botany**, [S. l.], v. 33, n. 4, p. 563–573, 2010. DOI: 10.1590/s0100-84042010000400005.

SILVA, Mayra Nina Araujo; COHEN, Marcelo C. L.; ROSSETTI, Dilce F.; PESSEDA, Luiz C. R. **Did sea-level changes affect the brazilian amazon forest during the holocene? Radiocarbon** Cambridge University Press, , 2018. DOI: 10.1017/RDC.2017.62.

SOARES JR., Adilson Viana; COSTA, João Batista Sena; HASUI, Yociteru. Evolução da margem atlântica equatorial do Brasil: Três fases distensivas. **Geociências**, [S. l.], v. 27, n. 4, p. 427–437, 2008.

SOARES JR, Adilson Viana; HASUI, Yociteru; BEMERGUY, Ruth Léa. O Rio Amazonas. *In: HASUI, Yociteru; CARNEIRO, Celso Dal Ré; ALMEIDA, Fernando Flávio Marques De; BARTORELLI, Andrea (org.)*. **Geologia do Brasil**. 1. ed. São Paulo: Beca, 2012. p. 611–622.

SOARES JR, Adilson Viana; HASUI, Yociteru; COSTA, João Batista Sena; MACHADO, Fábio Braz. Evolução do rifteamento e paleogeografia da margem Atlântica Equatorial do Brasil: Triássico ao Holoceno. **Geociências**, [S. l.], v. 30, n. 4, p. 669–692, 2011.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy, 12th ed.** [s.l: s.n.]. v. 12

SOMBROEK, Wim. Amazon landforms and soils in relation to biological diversity. **Acta Amazonica**, [S. l.], v. 30, n. 1, p. 81–100, 2000. DOI: 10.1590/1809-43922000301100.

SOUSA, Rodrigo Ferreira De; SILVA, Richeliel Albert Rodrigues; ROCHA, Talita Geovanna Fernandes; SANTANA, José Augusto da Silva; VIEIRA, Fábio de Almeida. Etnoecologia e etnobotânica da palmeira carnaúba no semiárido Brasileiro. **Cerne**, [S. l.], v. 21, n. 4, p. 587–594, 2015. DOI: 10.1590/01047760201521041764.

SOUZA, Danielle Cristina Costa De. **Caracterização morfológica sedimentar do talude continental (Foz do Amazonas)**. 2010. Universidade Deferal do Rio Grande do Norte, [S. l.], 2010.

SOUZA, Kleberson Worslley De; LIMA, Hedinaldo Narciso; SCHAEFER, Carlos Ernesto G. R.; TEIXEIRA, Wenceslau Gerales; PULROLNIK, Karina; CORRÊA, Guilherme Resende. Phosphorous forms in cultivated indian black earth (anthrosols) of varying texture in the brazilian Amazon. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 33, n. 5, p. 1347–1355,

2009. DOI: 10.1590/s0100-06832009000500027.

STRAUSS, Benjamin H.; ZIEMLINSKI, Remik; WEISS, Jeremy L.; OVERPECK, Jonathan T. Tidally adjusted estimates of topographic vulnerability to sea level rise and flooding for the contiguous United States. **Environmental Research Letters**, [S. l.], v. 7, p. 1–13, 2012. DOI: 10.1088/1748-9326/7/1/014033.

STRAWN, Daniel G.; BOHN, Hinrich L.; O'CONNOR, George A. **Soil chemistry**. 5. ed. [s.l.] : Wiley-Blackwell, 2019.

STRECKER, M. R.; ALONSO, R. N.; BOOKHAGEN, B.; CARRAPA, B.; HILLEY, G. E.; SOBEL, E. R.; TRAUTH, M. H. Tectonics and Climate of the Southern Central Andes. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, [S. l.], v. 35, n. 1, p. 747–787, 2007. DOI: 10.1146/annurev.earth.35.031306.140158.

SUGUIO, Kenitiro. **Geologia do Quaternário e mudanças ambientais**. 1. ed. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2010.

TAGHADOSI, Mohammad Mahdi; HASANLOU, Mahdi; EFTEKHARI, Kamran. Retrieval of soil salinity from Sentinel-2 multispectral imagery. **European Journal of Remote Sensing**, [S. l.], v. 52, n. 1, p. 138–154, 2019. DOI: 10.1080/22797254.2019.1571870. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1571870>.

TATUMI, Sonia H.; SILVA, Luis P. Da; PIRES, Elcio L.; ROSSETTI, Dilce F.; GÓES, Ana M.; MUNITA, Casimiro S. Datação de Sedimentos Pós-Barreiras no Norte do Brasil: implicações paleogeográficas. **Revista Brasileira de Geociências**, [S. l.], v. 38, n. 3, p. 514–524, 2008. DOI: 10.25249/0375-7536.2008383514524. Disponível em: www.sbgeo.org.br.

TEIXEIRA, Paulo César; DONAGEMMA, Guilherme Kangussu; FONTANA, Ademir; TEIXEIRA, Wenceslau Geraldes. **Manual de métodos de análise de solo**. [s.l.: s.n.]. v. 3 Disponível em: <https://www.embrapa.br>.

THOMAZ-FILHO, Antônio; RODRIGUES, Ana Lúcia. O alinhamento de rochas alcalinas Poços de Caldas - Cabo Frio (RJ) e sua continuidade na cadeia Vitória-Trindade. **Revista Brasileira de Geociências**, [S. l.], v. 29, n. 2, p. 189–194, 1999.

TOCANTINS, L. O rio comanda a vida. *In*: **Uma interpretação da Amazônia**. 8. ed. Rio de Janeiro. p. 284.

USDA. **Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual**. [s.l.: s.n.]. DOI: 10.13140/RG.2.1.3803.8889. Disponível em: https://www.nrcs.usda.gov/wps/PA_NRCSCconsumption/download?cid=stelprdb1244466&ext=pdf.

USGS. **USGS EarthExplorerUSGS Science for a changing world**, 2019. Disponível em: <http://earthexplorer.usgs.gov/>.

VASCONCELOS, Ricardo R. A. De; BARROS, Maria de F. C.; SILVA, Ênio F. de F. e; GRACIANO, Erika S. A.; FONTENELE, Angela J. P. B.; SILVA, Núbia M. L. Da. Características físicas de solos salino-sódicos do semiárido pernambucano em função de diferentes níveis de gesso. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S. l.], v. 17, n. 12, p. 1318–1325, 2013. DOI: 10.1590/s1415-43662013001200010.

VELOSO, H. P.; RANGEL-FILHO, A. L. R.; J.C., Lima. **Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1991.

VIEILLEFON, J. **La pédogénèse dans les mangroves tropicales: Un exemple de chronoséquence**. [s.l.: s.n.].

VIOLA, Eduardo; FRANCHINI, Matías. **Brazil and climate change: beyond the Amazon**. New York, NY: Routledge, 2018.

VITAL, Adriana de F. M.; SANTOS, Rivaldo V. Dos; CAVALCANTE, Lourival F.; SOUTO, Jacob S. Comportamento de atributos químicos de um solo salino-sódico tratado com gesso e fósforo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 30–36, 2005. DOI: 10.1590/s1415-43662005000100005.

VOUSDOUKAS, Michalis I.; RANASINGHE, Roshanka; MENTASCHI, Lorenzo; PLOMARITIS, Theocharis A.; ATHANASIOU, Panagiotis; LUIJENDIJK, Arjen; FEYEN, Luc. **Sandy coastlines under threat of erosion** *Nature Climate Change* *Nature Research*, , 2020. DOI: 10.1038/s41558-020-0697-0.

WALKER, M. J. C. et al. Discussion Paper Formal subdivision of the Holocene Series / Epoch : a Discussion Paper by a Working Group of INTIMATE (Integration of ice-core , marine and terrestrial records) and the Subcommission on Quaternary Stratigraphy (International Commission. **Journal of Quaternary Science**, [S. l.], v. 27, n. 7, p. 649–659, 2012. DOI: 10.1002/jqs.2565.

WANG, Bin; LUO, Xiao; YANG, Young Min; SUN, Weiyi; CANE, Mark A.; CAI, Wenju; YEH, Sang Wook; LIU, Jian. Historical change of El Niño properties sheds light on future changes of extreme El Niño. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, [S. l.], v. 116, n. 45, p. 22512–22517, 2019. a. DOI: 10.1073/pnas.1911130116.

WANG, Jingzhe et al. Capability of Sentinel-2 MSI data for monitoring and mapping of soil salinity in dry and wet seasons in the Ebinur Lake region, Xinjiang, China. **Geoderma**, [S. l.], v. 353, n. May, p. 172–187, 2019. b. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.06.040. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.06.040>.

WARD, Raymond D.; FRIESS, Daniel A.; DAY, Richard H.; MACKENZIE, Richard A. Impacts of climate change on mangrove ecosystems : a region by region overview. **Ecosystem Health and Sustainability**, [S. l.], v. 2, n. 4, p. 1–25, 2010. DOI: 10.1002/ehs2.1211.

WILLADINO, L.; CAMARA, T. R. Tolerância das plantas à salinidade: aspectos fisiológicos e bioquímicos. **Centro Científico Conhecer**, Goiânia, v. 6, n. 11, p. 1–12, 2010.

WIT, Fronika Claziena Agatha De; FREITAS, Paula Martins De. Global climate adaptation governance in the amazon through a polycentricity lens. **Revista Brasileira de Política Internacional**, [S. l.], v. 62, n. 2, 2019. DOI: 10.1590/0034-7329201900207.

WU, M.; SCHURGERS, G.; AHLSTRÖM, A.; RUMMUKAINEN, M.; MILLER, P. A.; SMITH, B.; MAY, W. Impacts of land use on climate and ecosystem productivity over the Amazon and the South American continent. **Environmental Research Letters**, [S. l.], v. 12, p. 054016, 2017. DOI: 10.1088/1748-9326/aa6fd6.

WU, Shiwen; WANG, Changkun; LIU, Ya; LI, Yanli; LIU, Jie; XU, Aiai; PAN, Kai; LI, Yichun; PAN, Xianzhang. Mapping the Salt Content in Soil Profiles using Vis-NIR Hyperspectral Imaging. **Soil Science Society of America Journal**, [S. l.], v. 82, n. 5, p. 1259–1269, 2018. DOI: 10.2136/sssaj2018.02.0074.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil1. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [S. l.], v. 19, n. 13, p. 1467–1476, 1988. DOI: 10.1080/00103628809368027.

YU, Junbao; LI, Yunzhao; HAN, Guangxuan; ZHOU, Di; FU, Yuqin; GUAN, Bo; WANG, Guangmei. The spatial distribution characteristics of soil salinity in coastal zone of the Yellow River Delta. **Environ Earth Sci**, [S. l.], v. 72, p. 589–599, 2014. DOI: 10.1007/s12665-013-2980-0.

ZACHOS, J.; PAGANI, H.; SLOAN, L.; THOMAS, E.; BILLUPS, K. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. **Science**, [S. l.], v. 292, n. 5517, p. 686–693, 2001. DOI: 10.1126/science.1059412.

ZALÁN, Pedro Victor. Bacias sedimentares da margem equatorial. *In*: HASUI, Yociteru; CARNEIRO, Celso Dal Ré; ALMEIDA, Fernando Flávio Marques De; BARTORELLI, Andrea (org.). **Geologia do Brasil**. São Paulo: Beca, 2012. p. 497–501.

ZALAN, Pedro V. Evolução Fanerozóica das Bacias Sedimentares Brasileiras. *In*: **Geologia da Plataforma Sul-Americana**. [s.l: s.n.]. p. 595–613. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/283464325>.

ZANI, H.; ROSSETTI, D. F.; COHEN, M. L. C.; PESSENDA, L. C. R.; CREMON, E. H. Influence of landscape evolution on the distribution of floristic patterns in northern Amazonia revealed by $\delta^{13}\text{C}$ data. **Journal of Quaternary Science**, [S. l.], v. 27, n. 8, p. 854–864, 2012. DOI: 10.1002/jqs.2602.

ZHANG, Ting Ting; QI, Jia Guo; GAO, Yu; OUYANG, Zu Tao; ZENG, Sheng Lan; ZHAO, Bin. Detecting soil salinity with MODIS time series VI data. **Ecological Indicators**, [S. l.], v. 52, p. 480–489, 2015. DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.01.004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.01.004>.