



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

IVAN CARLOS DA COSTA BARBOSA

**ASPECTOS GEOAMBIENTAIS E CLIMÁTICOS DA SUB-BACIA DO RIO GUAMÁ
NO NORDESTE PARAENSE**

BELÉM – PARÁ

2020

IVAN CARLOS DA COSTA BARBOSA

**ASPECTOS GEOAMBIENTAIS E CLIMÁTICOS DA SUB-BACIA DO RIO GUAMÁ
NO NORDESTE PARAENSE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais.

Área de concentração: Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia.

Linha de pesquisa: Clima, Sociedade e Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Marlisom Leão de Sousa.

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Maria Isabel Vitorino.

BELÉM – PARÁ

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

-
- B238a Barbosa, Ivan Carlos da Costa.
 Aspectos geoambientais e climáticos da sub-bacia do rio Guamá no
 Nordeste Paraense / Ivan Carlos da Costa Barbosa. — 2020.
 186 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Adriano Marlisom Leão de Sousa
 Coorientação: Profª. Dra. Maria Isabel Vitorino
 Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de
 Geociências, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais,
 Belém, 2020.
1. Rios . 2. Controle de qualidade da água. 3. Precipitação Pará.
 4. Uso e ocupação. 5. Recursos hídricos. I. Título.

CDD 354.33098115

IVAN CARLOS DA COSTA BARBOSA

**ASPECTOS GEOAMBIENTAIS E CLIMÁTICOS DA SUB-BACIA DO RIO GUAMÁ
NO NORDESTE PARAENSE**

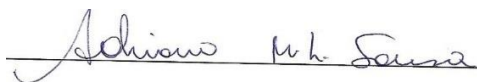
Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais.

Área de concentração: Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia

Linha de pesquisa: Clima, Sociedade e Ambiente.

Data de aprovação: 15/12/2020

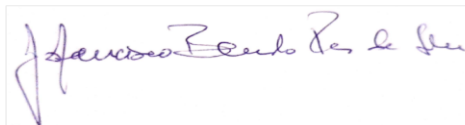
Banca examinadora:



Prof. Adriano Marlisom Leão de Sousa – Orientador
Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
Universidade Federal Rural da Amazônia



Prof. Everaldo Barreiros de Souza – Membro interno
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará



Prof. José Francisco Berredo Reis da Silva – Membro interno
Doutor em Geologia e Geoquímica
Museu Paraense Emílio Goeldi



Prof.ª Silvana do Socorro Veloso Sodré – Membro externo
Doutora em Geologia e Geoquímica
Universidade Federal Rural da Amazônia



Prof. Laurent Polidori – Membro externo
Doutor en Méthodes Physiques en Télédétection
Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère

Dedico este trabalho aos meus pais, Eliana Pedroso e Francisco Barbosa, que sempre lutaram para que todos os seus filhos pudessem ter educação de qualidade e um futuro melhor.

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociência, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e a todos os professores da Instituição que contribuíram técnico-cientificamente para esta pesquisa.

A Universidade Federal Rural da Amazônia, ao Instituto Socioambiental e de Recursos Hídricos e ao Centro de Tecnologia Agropecuária pelo apoio operacional e logístico fundamentais a este trabalho.

A Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia (SUDAM) pelo fundamental apoio financeiro ao projeto intitulado “Desenvolvimento local integrado: a socioeconomia, proteção e reabilitação ambiental da microbacia do rio Guamá, Pará, Brasil” e coordenado pelo Prof. Dr. Luiz Gonzaga da Silva Costa, que possibilitou a logística de coleta no remoto local de estudo e execução das análises químicas necessárias através da aquisição de equipamentos, reagentes e vidrarias.

Aos professores Adriano Marlisom Leão de Sousa e Maria Isabel Vitorino pela importante orientação e coorientação, respectivamente, desta tese.

Aos professores membros da banca examinadora: Prof. Dr. Everaldo Barreiros de Souza, Prof. Dr. José Francisco Berredo Reis da Silva, Prof. Dr. Kelson do Carmo Freitas Faial. Prof.^a Dr.^a Silvana do Socorro Veloso Sodré e ao Prof. Dr. Laurent Polidori, que gentilmente aceitaram avaliar e contribuir tão satisfatoriamente com sugestões.

A Sra. Lúcia Imbiriba e demais membros da bibliotexa do Instituto de Geociências pelo trabalho de orientação de adequação as Normas da ABNT.

Ao professor Luiz Gonzaga da Silva Costa e ao técnico de laboratório Afonso Granhen pelo apoio e incentivo incondicional para a realização e conclusão desta tese de doutorado.

Ao ex-aluno e agora amigo, Emerson Renato Maciel da Silva, pelas contribuições fundamentais para a realização deste trabalho. Além da amizade e paciência.

Aos alunos de graduação e pós-graduação que contribuíram na parte experimental desta pesquisa: Andrey Jr., Eduardo Ribeiro, Lucas Jully, Samya Uchoa, Diego Santa Rosa, Joelen Cruz, Diego Viégas, Valdeci Junior, Larissa Manfredo, Bruna Pantoja e aos demais alunos que contribuíram neste processo.

Ao amigo e pesquisador Helder José Farias da Silva pelas contribuições científicas essenciais ao bom andamento das ideias deste trabalho. Ao pesquisador Rodrigo Richard de

Lima Rodrigues pela contribuição científica relacionada aos estudos de sensoriamento remoto e processamento digital de imagens.

Aos professores Ewerton Carvalho e Rosa Santa Rosa e a técnica Luciana Santos pelo incentivo e apoio motivacional.

Aos meus pais Eliana Pedroso e Francisco Barbosa, e aos meus irmãos Bruno Barbosa e Renata Barbosa, essenciais em minha vida e que foram os principais motivadores do meu sucesso.

Ao meu companheiro Luiz Ricardo por todo amor, paciência, amizade, carinho e respeito. À toda família Nobre, em especial ao meu cunhado João Paulo Nobre e à minha sogra Alzira Vieira dos Santos, a Ziza.

À toda minha família, em especial as minhas tias Sônia Barbosa, Marly Pedroso e Regina Pedroso pelo carinho de sempre. Aos meus afilhados Leonardo e Daniel, duas bênçãos em minha vida e que esta tese sirva de inspiração para dedicação aos estudos e assim possam contribuir para um futuro melhor ao nosso País.

Aos queridos amigos que ajudaram a tornar esta jornada mais leve: Hitalo Abrantes, Daniel Félix, Marcos Leal, Marcos Costa, Agatha Vieira, Daniel Gomes, Jorge Mendes, Vítor Oliveira, Tábita Rodrigues, Natália Lamarão, Filipe Batista, Rodrigo Chaves, James Ferreira, Jairo Jota, Fábio Costa, Danilo Melo, Odir Ribeiro, Tom, Camila Sampaio, Ney Fonseca e Kelly Fonseca.

Em especial, agradeço a todas as mulheres, homens e crianças que em todas as viagens de campo receberam a equipe de trabalho com um sorriso no rosto e muita boa vontade em ajudar. Sempre sem querer nada em troca. Que um dia os resultados científicos deste trabalho possam transformar positivamente suas vidas e as suas relações com o meio ambiente.

“Aos que se veem como parte de um todo, e que buscam desenvolver-se como esse todo. Eu sou o que me cerca”.

(ORTEGA; GASSET, 19?)

RESUMO

A sub-bacia do rio Guamá (SBRG) está localizada na Mesorregião do Nordeste mais especificamente na microrregião do Guamá, abrange 12 municípios e vem apresentando um relevante crescimento econômico e social. O rio Guamá possui importância econômica, social e cultural para os municípios da região, pois para ele convergem toda rede de drenagem composta de pequenos tributários e grandes afluentes inseridos. Desta forma, o objetivo da pesquisa foi avaliar a integração de variáveis climáticas, ambientais e hídricas com as transformações atuais do uso e ocupação do solo na área da sub-bacia do rio Guamá, no nordeste paraense. Inicialmente, foram avaliadas as estimativas de precipitação derivadas de satélites (sensoriamento remoto) para a área da SBRG e comparar as observações fornecidas pela Agência Nacional de Águas. Em seguida, foram mapeados e avaliados os diferentes usos e ocupações do solo na SBRG afim estabelecer a vulnerabilidade ambiental a partir da relação de elementos físicos e bióticos e de suas ecodinâmicas. Por fim, foi avaliada a dinâmica de parâmetros físico-químicos da água superficial do rio Guamá em função da variabilidade sazonal e espacial. Concluiu-se que os dados fornecidos pelas bases de dados remotos superestimaram em 12% e 13% (CHIRPS e GPCC, respectivamente) os dados observados por pluviômetros. Porém, apesar da superestimação da precipitação, foi possível obter dados confiáveis e satisfatórios a partir das bases de dados por sensoriamento remoto. Quanto ao uso e ocupação do solo constatou-se maior quantidade de área (57%) caracterizada como solo exposto e vegetação rasteira, e menor quantidade de área (42%) caracterizada como cobertura vegetal densa ou secundária. Assim, notou-se a ocorrência de áreas com vulnerabilidade ambiental alta (porção norte representada pelos centros urbanos de cidades como Ourém e São Miguel do Guamá) e muito alta (porção sul) como resultado do uso e ocupação do solo associado a atividades antrópicas. As áreas classificadas como vulnerabilidade baixa ou muito baixa (porção central e ao sul), menos vulneráveis à degradação ambiental, foram associadas a presença de cobertura vegetal composta por floresta primária e secundária, e menor presença humana. Quanto as variáveis hidroquímicas da água superficial do rio Guamá observou-se elevada heterogeneidade espacial ao longo dos 12 pontos amostrais, a existência de tendências ascendentes e descendentes na direção montante a jusante e a influência da sazonalidade da região. Por fim, é prioritário que os resultados desta pesquisa promovam benefícios à população das diversas localidades visitadas e sirvam como instrumento norteador a políticas públicas que visem a conservação dos recursos naturais.

Palavras-chave: Rios. Controle de qualidade da água. Precipitação Pará. Uso e ocupação. Recursos hídricos.

ABSTRACT

The sub-basin of the Guamá River (SBGR) is located in the Mesoregion of the Northeast more specifically in the microregion of Guamá, covers 12 municipalities and has presented a relevant economic and social growth. The Guamá River has economic, social and cultural importance for the municipalities of the region, because for it converge all drainage network composed of small tributaries and large tributaries inserted. Thus, the objective of the research was to evaluate the integration of climate, environmental and water variables with the current transformations of land use and occupation in the area of the sub-basin of the Guamá River, in northeastern Pará. Initially, the estimates of precipitation derived from satellites (remote sensing) for the SBGR area were evaluated and the observations provided by the National Water Agency were compared. Then were mapped and evaluated the different uses and land occupations in the SBGR in order to establish environmental vulnerability from the relationship of physical and biotic elements and their ecodynamics. Finally, the dynamics of physical and chemical parameters of the surface water of the Guamá River were evaluated as a function of seasonal and spatial variability. It was concluded that the data provided by remote databases overestimated by 12% and 13% (CHIRPS and GPCC, respectively) the data observed by pluviometers. However, despite the overestimation of rainfall, it was possible to obtain reliable and satisfactory data from the databases by remote sensing. As for land use and occupation, there was a higher amount of area (57%) characterized as exposed soil and ground vegetation, and a lower amount of area (42%) characterized as dense or secondary vegetation cover. Thus, it was noted the occurrence of areas with high environmental vulnerability (northern portion represented by the urban centers of cities like Ourém and São Miguel do Guamá) and very high (southern portion) as a result of land use and occupation associated with anthropic activities. The areas classified as low or very low vulnerability (central and southern portion), less vulnerable to environmental degradation, were associated with the presence of vegetation cover composed of primary and secondary forest, and less human presence. As for the hydrochemical variables of the surface water of the Guamá River, high spatial heterogeneity was observed along the 12 sampling points, the existence of upward and downward trends in the upstream to downstream direction and the influence of the seasonality of the region. Finally, it is a priority that the results of this research promote benefits to the population of the various localities visited and serve as a guiding instrument for public policies aimed at the conservation of natural resources.

Keywords: Rivers. Water quality control. Precipitation Pará. Use and land cover. Water resources.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 1

Figura 1 –	Localização espacial da bacia hidrográfica do rio Guamá e Outros no Estado do Pará.....	32
Figura 2 –	Localização espacial da microrregião do Guamá e da sub-bacia do rio Guamá.	34

CAPÍTULO 2

Figura 1 –	Dimensão espacial da sub-bacia do rio Guamá (SBRG) e a localização dos pluviômetros selecionados.....	45
Figura 2 –	Distribuição dos pontos de grade do CHIRPS sobre a sub-bacia do rio Guamá.	47
Figura 3 –	Distribuição dos pontos de grade do GPCC sobre a sub-bacia do rio Guamá.	48
Figura 4 –	Ciclo anual da precipitação média acumulada observada* e a estimada pela base de dados CHIRPS para o período de 1988 a 2018 (*média observada para: (a) pluviômetro São Domingos do Capim; (b): pluviômetro Colônia Santo Antônio em São Miguel do Guamá; (c) pluviômetro Ourém; as barbelas representam o ± 1 desvio-padrão calculado).	51
Figura 5 –	Ciclo anual da precipitação média acumulada observada* e a estimada pela base de dados GPCC para o período de 1988 a 2018 (*média observada para: (a) pluviômetro São Domingos do Capim; (b) pluviômetro Colônia Santo Antônio em São Miguel do Guamá; (c) pluviômetro Ourém; as barbelas representam o ± 1 desvio-padrão calculado).	52
Figura 6 –	Dados médios mensais de precipitação*, estimados pelo CHIRPS e GPCC, para a área da sub-bacia do rio Guamá (período de 1988 a 2018) (*As barbelas representam o ± 1 desvio-padrão calculado).....	60

Figura 7 – Distribuição espacial dos dados de CHIRPS da (a) precipitação acumulada média anual; (b) precipitação acumulada média para o trimestre mais chuvoso (fevereiro, março, abril) e (c) para o trimestre menos chuvoso (setembro, outubro e novembro) para o período de 1988 a 2018 (*Linha de contorno preta representa a delimitação da área da sub-bacia do rio Guamá).....	61
---	----

CAPÍTULO 3

Figura 1 – (a) Dimensão espacial da bacia hidrográfica do rio Guamá e outros (BHRGO) e da área em estudo: sub-bacia do rio Guamá (SBRG); (b) Distribuição dos pontos amostrais na área em estudo. própria.....	71
Figura 2 – Mapa hipsométrico da sub-bacia do rio Guamá.....	81
Figura 3 – Mapa clinográfico (em porcentagem) da sub-bacia do rio Guamá.....	82
Figura 4 – Hierarquização fluvial da rede de drenagem da sub-bacia do rio Guamá.....	83
Figura 5 – Mapa de uso e ocupação da terra na sub-bacia do rio Guamá.....	88
Figura 6 – Mapas de uso e cobertura do solo da área de estudo nas regiões do: (a) alto rio Guamá; (b) médio rio Guamá; (c) baixo rio Guamá.....	90
Figura 7 – Distribuição espacial dos dados de CHIRPS da: (a) precipitação pluvial média anual; (b) precipitação acumulada média para o período chuvoso (dezembro a maio); e, (c) precipitação acumulada média para o período menos chuvoso (junho a novembro) para o período de 2015 a 2017.....	93
Figura 8 – Mapa de vulnerabilidade natural da sub-bacia do rio Guamá.....	94

CAPÍTULO 4

Figura 1 – Dimensão espacial da área de estudo: sub-bacia do rio Guamá (SBRG) e a distribuição dos pontos amostrais ao longo do rio Guamá.....	107
Figura 2 – Anomalia de chuva para os anos de 2015, 2016 e 2017 com valor médio obtido entre os anos de 1988 e 2017 (dados de precipitação extraídos do banco do CHIRPS).....	114
Figura 3 – Distribuição dos valores médios dos parâmetros físico-químicos por coleta e ponto amostral.....	123 - 125

Figura 4 –	Matriz de correlação entre os parâmetros físico-químicos e a precipitação diária média (mm) para o período chuvoso (à esquerda) e período menos chuvoso (à direita).....	130
Figura 5 –	Gráficos de <i>Scree plot</i> (a), <i>Loadings</i> (b), <i>Score</i> ou <i>Biplot</i> CP1 × CP2 (c) e dendograma (d).....	138
Figura 6 –	Espacialização das variáveis hidroquímicas de acordo com a sazonalidade na sub-bacia do rio Guamá (SBRG).....	141

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1 –	Dados demográficos e socioeconômicos dos municípios que compreendem a sub-bacia do rio Guamá e para o Estado do Pará.....	34
------------	---	----

CAPÍTULO 2

Tabela 1 –	Equações das métricas estatísticas de desempenho dos produtos de precipitação (onde: O = representa os dados observados em superfície pelos pluviômetros; S = representa os dados estimados pelos produtos de satélites CHIRPS ou GPCC; $\bar{O}$ e $\bar{S}$ representam as médias dos referidos dados observados e estimados, respectivamente; n representa o número de observações).	49
Tabela 2 –	Resumo de métricas estatísticas para avaliação de produtos de precipitação (CHIRPS e GPCC) na escala temporal mensal (1988 a 2018) versus os valores observados em pluviômetros localizados na sub-bacia do rio Guamá (*SDC = pluviômetro de São Domingos do Capim; CSA = pluviômetro da colônia Santo Antônio (São Miguel do Guamá); OUR = pluviômetro de Ourém. **Distância, em quilômetros, entre a localização do pluviômetro e o ponto de grade mais próximo do GPCC).....	54
Tabela 3 –	Resumo de métricas estatísticas para avaliação do produto de precipitação CHIRPS para o período chuvoso e menos chuvoso (1988 a 2018) versus os valores observados em pluviômetros localizados na sub-bacia do rio Guamá (*SDC = pluviômetro de São Domingos do Capim; CSA = pluviômetro da colônia Santo Antônio (São Miguel do Guamá); OUR = pluviômetro de Ourém).....	56
Tabela 4 –	Resumo de métricas estatísticas para avaliação do produto de precipitação GPCC para o período chuvoso e menos chuvoso (1988 a 2018) versus os valores observados em pluviômetros localizados na sub-bacia do rio Guamá (*SDC = pluviômetro de São Domingos do Capim; CSA = pluviômetro da colônia Santo Antônio (São Miguel do Guamá); OUR = pluviômetro de Ourém. **Distância, em quilômetros, entre a localização do pluviômetro e o ponto de grade mais próximo do GPCC).....	57

Tabela 5 –	Teste t de <i>Student</i> (nível de significância de 5%) para o conjunto de dados CHIRPS/observado entre os anos de 1988 e 2018 (*valor-p $\leq 0,05$ indicam que há diferença significativa entre os dados dos valores observados (pluviômetro) e os estimados (CHIRPS)).	58
Tabela 6 –	Teste t de <i>Student</i> (nível de significância de 5%) para o conjunto de dados GPCC/observado entre os anos de 1988 e 2018 (*valor-p $\leq 0,05$ indicam que há diferença significativa entre os dados dos valores observados (pluviômetro) e os estimados (GPCC)).	59

CAPÍTULO 3

Tabela 1 –	Fórmulas utilizadas para os cálculos dos parâmetros morfométricos da sub-bacia do rio Guamá.	73
Tabela 2 –	Pontos de coleta por comunidade.	75
Tabela 3 –	Média aritmética para as classes de vulnerabilidade ambiental.	79
Tabela 4 –	Pesos atribuídos a cada fator o estudo da vulnerabilidade ambiental.	79
Tabela 5 –	Características geométricas da sub-bacia do rio Guamá.	80
Tabela 6 –	Porcentagem de ocorrência por faixa de altitude.	81
Tabela 7 –	Características de drenagem da sub-bacia do rio Guamá.	84
Tabela 8 –	Uso e ocupação do solo na sub-bacia do rio Guamá.	85
Tabela 9 –	Vulnerabilidade ambiental, em km ² , na área da sub-bacia do rio Guamá.	94

CAPÍTULO 4

Tabela 1 –	Coordenadas geográficas dos 12 pontos de acesso ao rio pelas comunidades.	108
Tabela 2 –	Valores de precipitação acumulada (mm) por coleta considerando os dias de coleta e os três dias anteriores ao início.	116
Tabela 3 –	Valores de precipitação acumulada média (mm) por período sazonal...	117

Tabela 4 –	Teste de comparação entre as médias gerais ($\pm$ desvio padrão) dos parâmetros físico-químicos e de precipitação média acumulada (mm) nos pontos amostrais nos dois períodos sazonais em estudo.....	132
Tabela 5 –	Autovalores, variância explicada e variância acumulada para cada componente principal.....	135
Tabela 6 –	Cargas fatoriais das variáveis para os CP encontrados.....	136

LISTA DE ABREVIATURA E SÍMBOLOS

%: porcentagem

°C: graus Celsius

$\bar{O}$: média dos dados observados em superfície pelos pluviômetros

$\bar{S}$: média dos dados estimados pelos produtos de satélites CHIRPS ou GPCC

$\mu\text{S.cm}^{-1}$: microSiemens por centímetro

AAH: análise de agrupamento hierárquico

ACP ou PCA: análise das componentes principais

ANA: Agência Nacional de Águas

APP: Área de Preservação Permanente

BHRGO: Bacia Hidrográfica do Rio Guamá e Outros

BIAS ou PBIAS: percentual de viés (ou erro) relativo do inglês relative bias (or error) percentage

Ca^{2+} : íon cálcio

CaCO_3 : carbonato de cálcio

CBERS: China-Brazil Earth Resources Satellite

CDD: Cold Cloud Duration

CE: condutividade elétrica

CHIRPS: The Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations

CLO: cloreto

CO_2 : dióxido de carbono

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

CP: componente principal

CPC: Climate Prediction Center

CPTEC: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

CRU: Climate Research Unit

CSA: Colônia Santo Antônio

CTA: Centro de Tecnologia Agropecuária

d: índice de concordância de Willmott

Dd: Densidade de drenagem

Dh: Densidade de rios ou hidrográfica

DUR ou DT: dureza total

EES: Empreendimentos Econômicos Solidários

ENOS: El Niño Oscilação Sul

Eps: Extensão do percurso superficial

EROS: Earth Resources Observation and Science

F: fator de forma

FTP: File Transfer Protocol

Gc: Gradiente de canais

GPCC: Global Precipitation Climatology Centre

GPCP: Global Precipitation Climatology Project

GPS: Global Positioning System

GTS: Global Telecommunication System

Hm = amplitude altimétrica

HNO₃: ácido nítrico

IAC: índice de anomalia de chuva

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IC: índice de circularidade

IDW: método de interpolação da distância ponderada inversa

INMET: Instituto Nacional de Meteorologia

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Ir: Índice de rugosidade

Kc: coeficiente de compacidade (Kc)

km: quilômetros

km²: quilômetros quadrados

LAGAM: Laboratório de Geoprocessamento, Análise Espacial e Monitoramento por Satélite

LI: Linhas de Instabilidade

Lt = comprimento total dos rios ou canais

m: metros

MDE: Modelo Digital de Elevação

Mg²⁺: íon magnésio

mg.L⁻¹: miligrama por litro

mm: milímetros

MΩ.cm⁻¹: MegaOhm por centímetro

NCD: National Climatic Data Center

NetCDF: Network Common Data Form

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

NTU, UNT ou uT: unidade nefelométrica de turbidez ou unidade de turbidez

OAN: Oscilação Atlântico Norte

OD: oxigênio dissolvido

ODP: Oscilação Decadal do Pacífico

OMM (Organização Meteorológica Mundial

OUR: Ourém

p = nível descritivo ou probabilidade de significância

PC: Período chuvoso

pH: potencial hidrogeniônico

PMC: Período menos chuvoso

PNRH: Política Nacional de Recursos Hídricos

PROBIO: Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira

QGIS: Quantum GIS

r: índice de correlação de Spearman

r: coeficiente de correlação de Pearson

RADAM: Projeto Radar da Amazônia ou Projeto RadamBrasil

RES: resistividade elétrica

RMSE: root mean square error (raiz do erro médio quadrático)

Rr: Relação de relevo

S: South

SBRA: Sub-bacia do Rio Acará

SBRC: Sub-bacia do Rio Capim

SBRG: Sub-bacia do Rio Guamá

SBRM: Sub-bacia do Rio Moju

SCMC: Sistemas Convectivos de Mesoescala Circulares

SDC: São Domingos do Capim

SIG: Sistema de Informações Geográficas

SOD: saturação de oxigênio dissolvido

SRTM: Shuttle Radar Topography Mission

STD: sólidos totais dissolvidos

SYNOP: Surface Synoptic Observations

TauDEM: Terrain Analysis Using Digital Elevation Models

TEMP: temperatura da água superficial

TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission

TURB: turbidez

UCSB: University of California, Santa Barbara

UFRA: Universidade Federal Rural da Amazônia

USGS: United States Geological Survey

W: West

ZCAS: Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT: Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL.....	22
1.1 Bacias e sub-bacias hidrográficas.....	22
1.2 Qualidade da água.....	24
1.3 Clima.....	26
1.4 Uso e ocupação do solo.....	28
1.5 Geotecnologias.....	30
1.6 Área de estudo.....	31
1.7 Justificativa e interdisciplinaridade da pesquisa.....	36
1.8 Objetivos.....	37
1.8.1 Objetivo geral.....	37
1.8.2 Objetivos específicos.....	38
1.9 Estrutura da Tese.....	38
CAPÍTULO 2 AVALIAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO BASEADA EM DADOS DO CHIRPS E GPCC COM MEDIÇÕES NA SUPERFÍCIE PARA A SUB-BACIA DO RIO GUAMÁ NO NORDESTE PARAENSE.....	39
2.1 Introdução.....	40
2.2 Material e métodos.....	42
2.2.1 Área de estudo.....	43
2.2.2 Dados de chuva.....	45
2.2.3 Cálculos das métricas estatísticas e interpolação dos dados de chuva.....	48
2.3 Resultados e discussão.....	50
2.4 Conclusão.....	63
CAPÍTULO 3 VARIÁVEIS FÍSICO-GEOGRÁFICAS E AS IMPLICAÇÕES SOBRE VULNERABILIDADE AMBIENTAL NA SUB-BACIA DO RIO GUAMÁ, PARÁ, BRASIL.....	65
3.1 Introdução.....	67
3.2 Material e métodos.....	70
3.2.1 Área de estudo.....	70
3.2.2 Dados morfométricos.....	72
3.2.3 Dados do uso e ocupação do solo.....	74
3.2.4 Dados de precipitação pluvial.....	76

3.2.5 Dados para vulnerabilidade ambiental.....	77
3.3 Resultados e discussão.....	79
3.3.1 Análise morfométrica.....	79
3.3.2 Análise do uso e ocupação do solo.....	85
3.3.3 Análise regional da precipitação pluvial.....	92
3.3.4 Análise da vulnerabilidade ambiental.....	93
3.4 Conclusão.....	98
CAPÍTULO 4 DINÂMICA ESTACIONAL E ESPACIAL DE VARIÁVEIS HIDROQUÍMICAS NA ÁGUA SUPERFICIAL DO RIO GUAMÁ NO NORDESTE PARAENSE.....	101
4.1 Introdução.....	103
4.2 Material e métodos.....	105
4.2.1 Área de estudo.....	105
4.2.2 Amostragem e metodologias analíticas.....	109
4.2.3 Dados de precipitação.....	110
4.2.4 Análises estatísticas e geoestatísticas.....	112
4.3 Resultados e discussão.....	113
4.4 Conclusão.....	145
CAPÍTULO 5 CONCLUSÃO GERAL.....	149
5.1 Resultados Chaves: Impactos e Implicações.....	149
5.2 Conclusões de forma integrada.....	152
5.3 Prioridades para Pesquisas Futuras.....	153
5.4 Considerações Finais.....	154
REFERÊNCIAS.....	155
APÊNDICE A – MEMORIAL FOTOGRÁFICO.....	178
APÊNDICE B – MAPA GEOLÓGICO, PEDOLÓGICO E DE COBERTURA VEGETAL.....	181
APÊNDICE C – MÉDIAS E DESVIOS PADRÃO DAS VARIÁVEIS HIDROQUÍMICAS.....	183
APÊNDICE D – CARTILHA INFORMATIVA.....	185

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Bacias e sub-bacias hidrográficas

Diversos são os conceitos acerca de bacia hidrográfica e muitas são as ampliações e expansões, porém sabe-se que este sistema ecológico complexo é resultado da integração de fatores antrópicos e naturais que ocorrem dentro de sua área limite (VIANA; MORAES, 2016).

Mendes (2018) cita que a bacia hidrográfica é composta pela drenagem de rios e seus afluentes em regiões mais elevadas (divisores do relevo) que possibilitam o escoamento superficial das águas das chuvas para os rios e riachos e/ou infiltração no solo para a formação de nascentes e manutenção dos lençóis freáticos. Segundo Silveira (1993), a ação do homem sobre a superfície de uma bacia hidrográfica gera mudanças no sistema hidrológico.

“A bacia hidrográfica é a principal unidade fisiográfica do terreno, uma vez que suas características governam, no seu interior, todo o fluxo superficial da água, constituindo-se numa área ideal para o manejo dos recursos naturais” (TUCCI, 2003). Segundo Targa et al. (2012) e Watrin et al. (2009), “o sistema de drenagem da bacia é composto de nascente dos cursos d’água, principais e secundários, denominados de afluentes e subafluentes”.

Santos (2004):

A adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento é de aceitação universal, uma vez que ela é um sistema natural, bem delimitado no espaço e de fácil caracterização, onde interações, no mínimo físicas, estão integradas. De forma complementar, as bacias podem ser subdivididas em unidades menores, o que facilita, por razões técnicas e estratégicas, o seu planejamento.

“Enquanto grandes rios são bons indicadores dos impactos cumulativos, rios menores apresentam maiores variabilidades na qualidade da água, dependendo da estação do ano e do grau de distúrbio da bacia, por exemplo” (CADA; HUNSAKER, 1990).

Mendes e Lima (2007) enfatizam que em bacias de grandes dimensões, como as que ocorrem na região amazônica, o volume de água e energia transportado é elevado e dificultam a percepção dos efeitos hidrológicos das mudanças de usos e ocupação do

solo quanto em bacias de pequeno porte (sub-bacias). Assim, é possível estabelecer que “as sub-bacias são áreas de drenagem dos tributários do curso d’água principal” (TEODORO et al., 2007).

Na esfera federal podem ser listadas algumas leis que apresentam mecanismos de gestão de bacias, como: Decreto nº 24.665 – Código das Águas (BRASIL, 1934); Lei nº 8.171 – Política Agrícola (BRASIL, 1991); Lei nº 12.651 – Código Florestal (BRASIL, 2012); e a Lei nº 9.433 – Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997). Na esfera estadual destaca-se a Lei nº 6.381 – Política de Recursos Hídricos do Estado do Pará (GOVERNO DO ESTADO DO PARÁ, 2001) e uma série de decretos e resoluções que abordam aspectos relacionados ao gerenciamento das bacias hidrográficas e dos recursos naturais no Estado do Pará.

No Brasil, a Lei nº 9.443 (BRASIL, 1997) trata da adoção da bacia hidrográfica como unidade territorial para a aplicação da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) que envolve a aplicação de instrumentos como enquadramento dos corpos d’água, outorga e cobrança pelo uso dos recursos hídricos.

Para o território brasileiro foi ainda realizada a classificação hidrográfica nacional em Regiões Hidrográficas, conforme a Resolução nº 32 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 2003), para gerenciar a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Segundo esta resolução foram criadas as seguintes Regiões Hidrográficas: Amazônica, Atlântico Nordeste Ocidental, Tocantins/Araguaia, Parnaíba, Atlântico Nordeste Oriental, Atlântico Leste, São Francisco, Paraguai, Paraná, Atlântico Sudeste, Uruguai e Atlântico Sul.

Ainda sobre a Divisão Hidrográfica Nacional:

Considera-se como região hidrográfica o espaço territorial brasileiro compreendido por uma bacia, grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas contíguas com características naturais, sociais e econômicas homogêneas ou similares, com vistas a orientar o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos (BRASIL, 2003).

Na Amazônia ocorrem a Região Hidrográfica Amazônia, Tocantins – Araguaia e Atlântico – Nordeste Ocidental com 3.870.000 km², 967.059 km² e 254.000 km² em território nacional, respectivamente (ANA, 2010).

A nível estadual também são encontrados decretos e resoluções que abordam a delimitação e gestão das regiões ou sub-regiões hidrográficas (ou bacias e sub-bacias

hidrográficas, respectivamente) localizadas dentro dos limites de um determinado Estado.

1.2 Qualidade da água

É conhecido que desde os primórdios da humanidade, as comunidades humanas buscam se estabelecer em terras próximas dos corpos de água e que esta preferência tem ocasionado efeitos adversos aos biomas, ecossistemas e comunidades do território (VIANA; MORAES, 2016).

A qualidade da água é resultado das condições naturais (escoamento superficial e infiltração do solo resultantes da precipitação pluvial) e do uso e ocupação do solo (área urbana, área industrial, agricultura, pastagem, etc.) na área de uma bacia hidrográfica (SPERLING, 2014).

Hunsaker et al. (1998) afirma que:

Os cursos d'água servem como integradores das características da paisagem terrestre e como recipientes dos poluentes da terra e da atmosfera. A qualidade de sua água, por sua vez, resulta de fatores geomorfológicos, climáticos, hidrológicos e biológicos, sendo o tipo de uso e manejo do solo determinante para a qualidade da água em bacias hidrográficas.

O monitoramento de variáveis que auxiliam na avaliação da qualidade da água é uma maneira de medir a intensidade das alterações ambientais causadas pelo homem. Além disso, é determinante para a qualidade das águas fatores como o clima e o solo da região, a vegetação circundante, o ecossistema aquático e a influência do homem. Assim, percebe-se que a água pode sofrer variações temporais e espaciais em decorrência de processos internos e externos (AGUILAR PIRATOBA et al., 2017). Para Bertossi et al. (2013) é fundamental a avaliação pontual e o monitoramento da variabilidade espacial e sazonal das características físicas, químicas e microbiológicas da água de um corpo hídrico.

O diagnóstico da qualidade hídrica pode ser realizado pela análise dos resultados obtidos nas amostras de água de um determinado rio com os padrões estabelecidos pela legislação brasileira. No Brasil, tem-se a Resolução nº 357 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) (BRASIL, 2005) que dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e fornece diretrizes para o seu enquadramento, entre outras providências. Nesta resolução é possível consultar os valores máximos de parâmetros físicos,

químicos e biológicos de acordo com a classe à qual pertence determinado corpo hídrico. Entre as principais variáveis que descrevem a qualidade dos rios, destaca-se o pH, temperatura da água, turbidez, condutividade, oxigênio dissolvido, sólidos, entre outras.

O programa de monitoramento denominado Rede Nacional de Monitoramento da Qualidade das Águas (RNQA, lançado em 2013) das águas superficiais realizado pela Agência Nacional de Águas (ANA) não relata os parâmetros de qualidade para grande parte da região norte do País (com exceção do Estado do Tocantins). Mesmo esta região sendo conhecidamente detentora de grande parte dos recursos hídricos no Brasil. Krusche et al. (2005) cita a notória extensão da rede de drenagem presente na região amazônica e que resulta em um dos maiores rios do mundo, o Amazonas. Em 2014 somente dezessete Unidades da Federação realizaram monitoramento de qualidade de água em rios e reservatório do país (ANA, 2016). Contudo Rocha et al. (2010) relatam a ausência de monitoramento da qualidade da água de uma grande quantidade de rios fundamentais para o abastecimento de água da população.

O programa estabelece para a região Norte uma frequência de monitoramento semestral, enquanto que, para as demais regiões este monitoramento é realizado de forma trimestral. Entretanto, no Pará ainda não existe uma entidade responsável por este monitoramento da qualidade das águas, pois as redes estaduais operam de maneira independente. Logo, é fundamental a criação de um banco de dados tendo em vista o monitoramento dos parâmetros físico-químicos e químicos das águas dos rios da região norte. Somente desta forma, será possível programar medidas efetivas para a proteção e recuperação da qualidade ambiental das bacias e sub-bacias hidrográficas.

Este panorama gera uma grande lacuna quanto a interpretações relacionadas a séries temporais; descontinuidade do monitoramento e análise em nível nacional; correlação de dados de trabalhos de diferentes autores; divergência na metodologia; baixa frequência das coletas e dos parâmetros analisados; e poucas correlações com o processo de desenvolvimento do uso e ocupação do solo que a região vem enfrentando.

Pusceddu et al. (2007) e Cunha et al. (2010):

Dentre os diversos impactos gerados aos recursos hídricos, a eutrofização e os tipos de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica são as variáveis que frequentemente têm sido associadas com a perda da qualidade da água e da biodiversidade, como já demonstrado em diversos estudos.

Krusche et al. (2005) afirma que “pode-se assumir que os compartimentos terrestre e aquático do ecossistema amazônico estão intimamente acoplados, e as mudanças no primeiro podem afetar drasticamente a dinâmica do segundo”.

Contudo, é importante ressaltar que a fração dissolvida presente na água dos rios sofre maior influência do clima, precipitação e vazão; enquanto que, se observa que a fração particulada se relaciona melhor com o relevo, atividade tectônica e área da bacia (CANFIELD, 1997).

1.3 Clima

A disponibilidade hídrica de uma região, ou bacia hidrográfica, é influenciada e limitada pelas condições climáticas que interferem na variabilidade pluviométrica (SOUSA et al., 2013).

O estudo da variabilidade espacial da precipitação em um país com a extensão territorial do Brasil é essencial para o planejamento de diversas atividades econômicas industriais, agropecuárias, construção civil, etc. (SODRÉ; RODRIGUES, 2013). Ainda segundo os autores, aliado ao estudo têm-se os principais instrumentos de monitoramento constituídos pelos pluviômetros, pluviógrafos, radares e os sensores que operam a bordo de satélites.

Diversos autores (DUAN et al., 2016; FUNK et al., 2015; KATSANOS et al., 2016; RUIZ et al., 2009; TAPIADOR et al., 2012; TREJO et al., 2016) relatam a importância das estimativas de chuvas baseadas em satélites em fornecer um volume de dados abundante e com alta resolução espaço-temporal para regiões extensas e com dados de precipitação ausentes ou escassos.

Jiménez et al. (2013) comentam acerca da utilização de dados pluviométricos provenientes de sensoriamento remoto:

Os satélites possuem sensores que detectam a radiação eletromagnética refletida e emitida pela superfície da Terra e da atmosfera, a qual é interpretada no espectro eletromagnético em função do comprimento de onda. Após o processamento da radiação (dados brutos) por parte das agências administradoras dos satélites, parte dos dados provenientes do sensoriamento remoto torna-se disponíveis na internet. As variáveis obtidas por satélite são fornecidas em formato espacial tipo *raster* (grade) em diferentes resoluções temporal e espacial.

No ciclo hidrológico em um ecossistema florestal a água da chuva ao chegar ao solo pode escoar superficialmente, ser assimilada pelas raízes da vegetação ou infiltrar no solo. Esta parte do ciclo hidrológico e de outros ciclos importantes podem sofrer alterações caso o ecossistema natural seja destruído ou alterado (ANDRADE et al., 2008).

Nos dias atuais, o estudo da precipitação pluvial vem sendo relacionado a estudos hidrológicos, de modelação numérica, mudanças climáticas, sensoriamento remoto, previsões, etc. (DUAN et al., 2016; PAREDES-TREJO et al., 2017; SHRESTHA et al., 2017; TAPIADOR et al., 2012). De acordo com Ferreira et al. (2013), “como a precipitação não é uma variável contínua no espaço-tempo, seu estudo torna-se bastante complexo”. Segundo Angelis et al. (2004) a variação mensal e diurna da chuva pode influenciar as concentrações das variáveis físico-químicas das águas dos rios.

Segundo Oliveira e Cunha (2014), a região amazônica apresenta um clima do tipo Am, segundo a classificação de Köppen, descrito como tropical chuvoso com temperaturas superiores a 18 °C (megatérmico), super úmido e bosque tropical, ou seja, tropical, quente e úmido com precipitação elevada.

A ocorrência das chuvas na região amazônica é influenciada por sistemas atmosféricos de diferentes escalas espaço-temporais como: Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Linhas de Instabilidades (LI's), Sistemas Convectivos de Mesoescala Circulares (SCMC's) e as circulações de brisa (CAMPONOGARA, 2011; COHEN et al., 1995; MOLION, 1987; SODRÉ et al., 2015). Os autores Barnston e Livezey (1987) e Mantua et al. (1997) adicionam a ocorrência da influência de mecanismos oceano-atmosfera no clima regional, como a Oscilação do Atlântico Norte (OAN), Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e El Niño Oscilação Sul (ENOS).

Diversos autores (FIGUEROA; NOBRE; 1990; FISH et al., 1998; LUCAS et al., 2010; SIQUEIRA et al., 2012; SOUZA et al., 2016) afirmam a existência de apenas dois períodos climáticos na Amazônia Oriental. Um período denominado de chuvoso, iniciando-se normalmente no mês de dezembro e se estendendo até o mês de maio; e um período denominado de menos chuvoso iniciando no mês de junho seguindo até o mês de novembro.

De acordo com Siqueira et al. (2012), “no período de chuvas, regionalmente conhecido como ‘inverno amazônico’, a precipitação pode alcançar 2.800 mm e a umidade relativa do ar chega a ultrapassar 90%”. Liebmann e Marengo (2001) citam a

distribuição média anual da precipitação na Amazônia brasileira com valores acima de 2.000 mm na parte sul a 3.000 mm na porção leste e extremo norte.

Assim, o estudo da precipitação pluviométrica na Amazônia se constitui em uma das principais variáveis do clima, devido sua variabilidade nas escalas temporal (diária, mensal, sazonal, anual e decadal) e espacial (local, regional, continental e global) (SOUZA et al., 2017).

1.4 Uso e ocupação do solo

Uma determinada área pode ter suas características ambientais afetadas pelas ações naturais (como o clima, relevo, solo, geologia e cobertura vegetal). Sendo estas alterações passíveis de potencialização e aceleração, devido ações antrópicas de uso e ocupação do solo (BELATO; SERRÃO, 2019).

As bacias hidrográficas representam sistemas biofísicos complexos com recursos hídricos exauríveis. Nelas congregam os efeitos das atividades humanas e os recursos naturais afetados (ou não) pelas práticas sustentáveis de uso do solo (TRINDADE; RODRIGUES, 2016).

“Os tipos de uso e a ocupação do solo na bacia hidrográfica possuem relações significativas no que diz respeito a introdução de diversas substâncias químicas lançadas nos ecossistemas aquáticos devido o escoamento demográfico, industrial e agrícola” (BASTOS et al., 2017); “expondo diversos organismos a uma grande variedade de compostos mutagênicos e citotóxicos” (AMARAL et al., 2007), e consequente redução da biodiversidade. A redução da quantidade e qualidade da água, um recurso natural finito, é um problema importante devido seus impactos socioeconômicos, ambientais e altos custos de recuperação (ALVEZ et al., 2012).

O conhecimento do modo e do ritmo de mudanças das formas de ocupação do espaço constitui um apoio fundamental ao gerenciamento dos recursos naturais e às pesquisas que acompanham as mudanças climáticas (IBGE, 2016).

“No caso da Amazônia, muitos desses processos ocorreram por ocupações desordenadas acompanhadas de atividades produtivas que desvalorizam os maciços florestais, principalmente as chamadas florestas ripárias ou ciliares” (MARTINS, 2001; SOARES, 2008). Carneiro et al. (2017) afirmam que “o avanço da fronteira agrícola e a consolidação de atividades produtivas em determinadas áreas da Amazônia são

modificações que podem ser percebidas com maior evidência, em especial, no Estado do Pará”.

Abe et al. (2016) ressaltam a contribuição das atividades agropecuárias para elevadas taxas de exportação de nutrientes do solo para os corpos hídricos resultado da diminuição da retenção hídrica na área de drenagem devido a redução das áreas de floresta. De acordo com Silva et al. (2016), as florestas quando substituídas por áreas de cultivos e/ou pasto ocasionam a escassez de nutrientes e matéria orgânica que podem ter suas concentrações aumentadas ou reduzidas nos corpos d’água.

Conforme Santos et al. (2016), a conservação dos rios é importante para a manutenção da vida no planeta e distribuição de nutrientes. Ainda segundo os autores, é necessário realizar a conservação das nascentes dos rios para conservação do fluxo contínuo de água. Para isso é necessário atender aos critérios estabelecidos pelo Código Florestal brasileiro (BRASIL, 2012), que pela Lei nº 12.651 estabelece a preservação de variáveis faixas de vegetação de acordo as características dos cursos d’água. Além de realizar a criação e delimitação de Áreas de Preservação Permanente (APP).

No fortalecimento dos estudos envolvendo bacias tem-se ainda o estudo morfométrico contribuindo para uma avaliação sistêmica das características fisiográficas de uma bacia (ou sub-bacia) hidrográfica e o conhecimento acerca da dinâmica dos recursos naturais em seu território (FREIRE et al., 2013).

Barbosa e Furrier (2012) afirmam que:

A caracterização morfológica e morfométrica de uma área permitem conhecer os potenciais naturais existentes nela, facilitando a identificação de áreas de risco de ocupação, ambientes frágeis, impactos ambientais, interferência antrópica e a dinâmica da evolução natural da paisagem.

Pinto Júnior e Rossete (2005) ainda citam que a: “caracterização morfométrica de bacias é de grande importância para estudos ambientais, principalmente quando o ambiente em questão está sofrendo alteração em parte de seu curso d’água, pois eles desempenham papéis importantes dentro do ecossistema”.

Para o planejamento e tomada de decisões é necessário o levantamento do uso e ocupação do solo que será composto de análise e mapeamento para o monitoramento atual e/ou passado (multitemporal) das formas de uso e ocupação de um determinado espaço (ALVES et al., 2017).

Silva et al. (2016) relatam a importância da compreensão da dinâmica de uso e ocupação do solo no Estado do Pará ser justificada pela garantia da sustentabilidade e desenvolvimento sustentável diante de questões ambientais, sociais e econômicas.

1.5 Geotecnologias

Nos dias atuais são notórios os benefícios da utilização das geotecnologias para processos de avaliação, monitoramento e diagnóstico ambiental (SILVA et al., 2019). As principais vantagens estão associadas a rapidez na obtenção dos dados, facilidade de manipulação, repetitividade e possibilidade de constante atualização, principalmente para áreas de difícil acesso ou mais sensíveis a ação do homem (AZEVEDO; MANGABEIRA, 2001).

Conforme Rosa (2004), as geotecnologias representam um conjunto de tecnologias (como *hardwares* e *softwares*) que possibilitam a aquisição, manipulação, análise e disponibilização de diferentes tipos de informação com referência geográfica. Para estudos ambientais destacam-se as poderosas geotecnologias: Geoprocessamento, Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informação Geográfica (SIGs).

Cechim Júnior e Silva (2018) ressaltam que “a utilização de geotecnologias associadas ao geoprocessamento, SIG e Sensoriamento Remoto destaca-se, pelo fato de considerar também a importância das ações voltadas à conservação dos ecossistemas e a preservação da biodiversidade”.

Segundo Silva et al. (2016), o geoprocessamento é uma tecnologia computacional capaz de integrar dados georreferenciados e transformá-los em informação, “viabilizando a análise e a representação dos fenômenos da natureza” (CARNEIRO et al., 2017). Florenzano (2008) explica que o Sensoriamento Remoto permite a obtenção de imagens orbitais de alta resolução que possibilitam estudos holísticos e multitemporais de todo ou quase todo o globo terrestre. Ainda segundo Silva et al. (2016), a integralização de técnicas de Geoprocessamento e de Sensoriamento Remoto é alcançada com o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) que auxiliam o processo de análise de fenômenos com diferentes graus de complexidade.

De acordo com Belato et al. (2018), os Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) baseiam-se na integralização de diferentes dados de uma área específica para a modelagem e geração de mapeamentos de fenômenos espaciais através de ferramentas

computacionais. Mota (2003) completa que através dos SIGs também são realizadas operações matemáticas e são disponibilizadas ferramentas espaciais que auxiliam em estudos de gerenciamento de recursos hídricos, monitoramento ambiental, planejamentos urbanos, políticas de uso e ocupação do solo, entre outros.

Moreira (2008) afirma que “a alteração da paisagem e do uso da terra da Amazônia deve-se principalmente à aplicação de técnicas agropecuárias e de mineração, nem sempre adequadas para o ambiente amazônico”.

Nascimento e Fernandes (2017) afirmam:

Na microrregião do Nordeste Paraense, onde foi verificado que as informações obtidas através de SIG e ferramentas de sensoriamento remoto podem ser usadas para fazer diagnóstico, por exemplo, sobre a ação humana num dado território contribuindo na gestão e planejamento dos recursos naturais de uma forma geral.

1.6 Área de estudo

A Amazônia é uma região que chama atenção pela importância da preservação do meio ambiente. A destacada representatividade do valor ambiental resguarda contradições que refletem bem a sua formação. Entre as condições está a de ter uma das maiores áreas de biodiversidade do mundo e, ao mesmo tempo, apresentar os mais graves índices de destruição dos recursos naturais. Os interesses econômicos que movimentam o mercado local e ao mesmo tempo a intervenção humana nos recursos naturais são as principais causas deste problema (SOUZA et al., 2012).

O Estado do Pará encontra-se na região Norte do Brasil e apresenta uma área total de 1.247.954 km² (BELATO et al., 2018). Conforme Silva et al. (2016), o estado possui 144 municípios divididos em seis Mesorregiões: Baixo Amazonas, Marajó, Metropolitana de Belém, Nordeste, Sudeste e Sudoeste. É possível destacar a Mesorregião do Nordeste, pois segundo Dias et al. (2018), compõe o maior eixo de circulação econômica do estado (destaca-se a presença da BR010, conhecida como rodovia Belém-Brasília) e concentra as ações de infraestrutura voltadas para o desenvolvimento econômico local (projetos industriais, mineração, hidrovias Guamá-Capim, expansão das atividades extrativistas e agropecuárias).

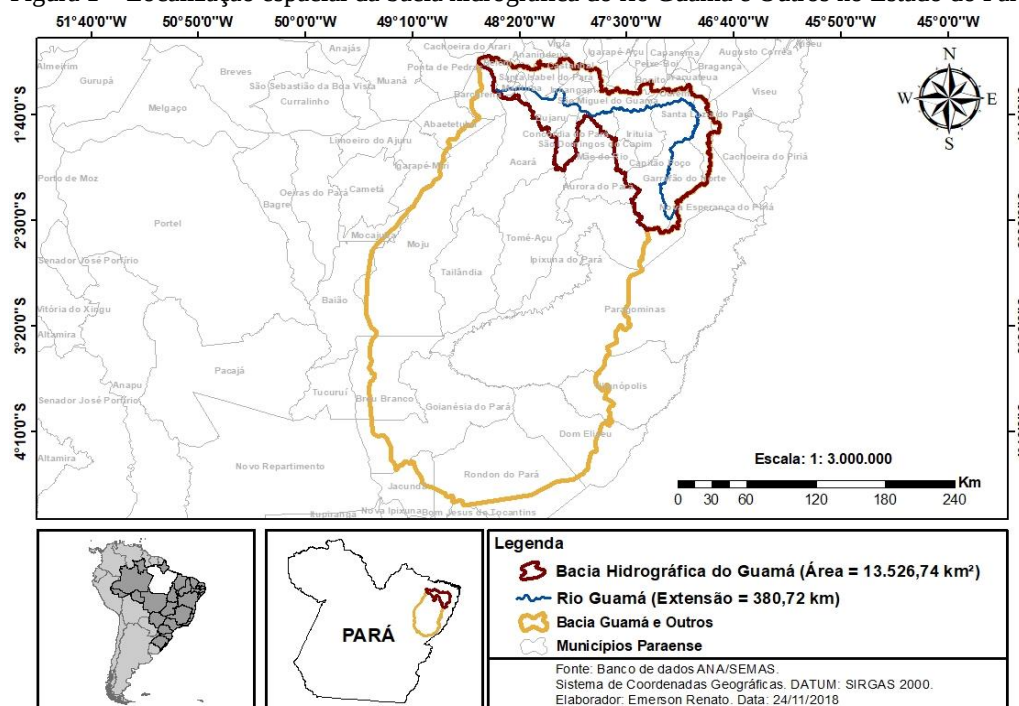
Sobre o contexto histórico desta Mesorregião afirma-se que:

O processo de colonização do Nordeste Paraense, também conhecido como Região Bragantina, foi marcado pela instalação da Estrada de Ferro de Bragança, às margens da qual se desenvolveram diversos núcleos urbanos, como o de Castanhal e também de seu Distrito, a Vila do Apeú. Em 1965, já no âmbito da política nacional de implantação de rodovias no Brasil, a Estrada de Ferro de Bragança foi desinstalada e a partir de então a integração com Belém e demais áreas passou a ocorrer exclusivamente por meio da rodovia BR-316 (RIBEIRO, 2016).

Segundo Rocha e Lima (2019), o bioma dominante é o Amazônico inserido numa área denominada de “Arco do desmatamento da Amazônia” com intenso processo de desmatamento. Para Quaresma et al. (2015), “a região é caracterizada por uma agricultura itinerante que utiliza a prática de corte e queima, portanto, os ecossistemas são áreas alteradas com vegetação predominante de floresta secundária”.

A Lei Estadual nº 6.381 denominada Política de Recursos Hídricos do Estado do Pará (GOVERNO DO ESTADO DO PARÁ, 2001) e a Resolução nº 04 do Conselho Estadual de Recursos Hídricos (GOVERNO DO ESTADO DO PARÁ, 2008) estabelecem a divisão do estado em sete Regiões Hidrográficas: Costa Atlântica – Nordeste, Calha – Norte, Portel – Marajó, Tapajós, Baixo Amazonas, Xingu e Tocantins – Araguaia. Desta forma, tem-se a sub-região hidrográfica do rio Guamá e Outros (ou bacia hidrográfica do rio Guamá e Outros) que está localizada na Região Hidrográfica Costa Atlântica – Nordeste (Figura 1).

Figura 1 – Localização espacial da bacia hidrográfica do rio Guamá e Outros no Estado do Pará.



Fonte: Autoria própria.

A SBRGO abrange dezenove municípios: Capitão Poço, Garrafão do Norte, Irituia, São Miguel do Guamá, Bujarú, Santa Luzia do Pará, Concórdia do Pará, Santa Izabel do Pará, Inhangapi, Castanhal, São Domingos do Capim, Ourém, Mãe do Rio, Belém, Acará, Bonito, Benevides, Marituba e Ananindeua. De acordo com Costa et al. (2015), a bacia hidrográfica do rio Guamá e Outros tem uma capacidade de drenagem correspondente a 7% do estado do Pará (equivalente a uma área de 87.389,54 km²). Ainda Rocha e Lima (2019), os municípios que abrangem a bacia hidrográfica do rio Guamá e Outros apresentam forte desenvolvimento econômico, relacionado principalmente a atividade industrial, mineração, comércio e agropecuária. Por fim, afirma também que nesta bacia são encontrados predominantemente cinco tipos de solos: Latossolo Amarelo, Latossolo Concrecionário, Neossolo Flúvico, Neossolos Quartzarênicos e Argissolo Vermelho Amarelo.

Sobre o rio Guamá:

Com um curso total de aproximadamente 380 km, nasce nas matas dos municípios de Ipixuna e de Nova Esperança do Piriá, acima de Paragominas, seguindo por Capitão Poço e Garrafão do Norte, a sudoeste, e finalmente dirigindo-se para norte-nordeste até o município de Ourém. Deste ponto em diante o rio flete para oeste, divisando São Miguel do Guamá de outros três municípios. Junta-se então ao rio Capim na altura da cidade de São Domingos do Capim (trecho em estudo) e, engrossado a partir deste ponto, vem desaguar na baía do Guajará, em Belém. Seus afluentes mais importantes pela margem esquerda são os rios Capim, Acará e Moju. (TORRES, 2007, grifo nosso).

Neste trabalho será adotada a expressão “sub-bacia” para se referir ao trecho em estudo da bacia hidrográfica citada anteriormente. A área investigada, sub-bacia do rio Guamá (SBRG), estende-se desde a nascente do rio Guamá nas matas dos municípios citados até o ponto em que se junta ao rio Capim. A SBRG está localizada na Mesorregião do Nordeste e abrange doze municípios: Aurora do Pará, Bonito, Capitão Poço, Garrafão do Norte, Ipixuna do Pará, Irituia, Mãe do Rio, Nova Esperança do Piriá, Ourém, Santa Luzia do Pará, São Domingos do Capim e São Miguel do Guamá.

A Tabela 1 apresenta dados socioeconômicos dos municípios que abrangem a área da sub-bacia do rio Guamá.

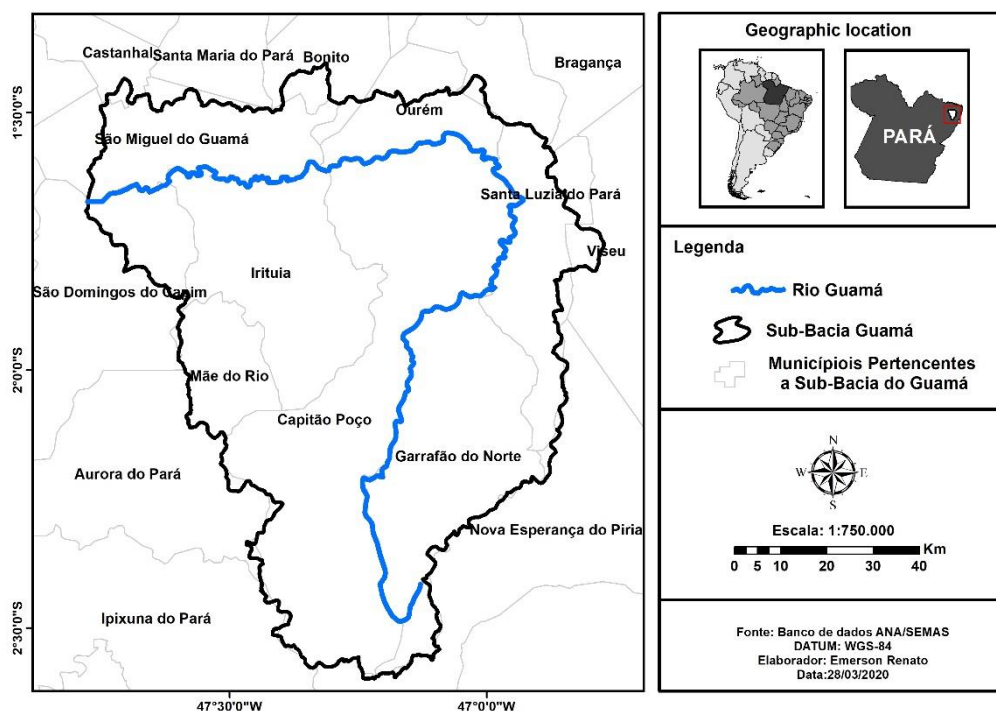
Tabela 1 – Dados demográficos e socioeconômicos dos municípios que compreendem a sub-bacia do rio Guamá e para o Estado do Pará.

Município	Área (km ²)	População (hab.)	Densidade demográfica (hab/km ²)	IDH-M
Aurora do Pará	1.811,82	26.546	14,65	0,519
Bonito	586,73	13.630	23,23	0,546
Capitão Poço	2.899,54	51.893	17,90	0,548
Garrafão do Norte	1.599,02	25.034	15,66	0,526
Ipixuna do Pará	5.215,53	51.309	9,84	0,489
Irituia	1.379,36	31.364	22,74	0,559
Mãe do Rio	469,49	27.904	59,43	0,599
Nova Esperança do Piriá	2.809,61	20.158	7,17	0,502
Ourém	562,39	16.311	29,00	0,568
Santa Luzia do Pará	1.356,12	19.424	14,32	0,546
São Domingos do Capim	1.677,25	29.846	17,79	0,532
São Miguel do Guamá	1.110,17	51.567	46,45	0,591
Estado do Pará	1.247.954,32	7.581.051	6,07	0,646

Fonte: Censo demográfico (IBGE, 2010).

A Mesorregião do Nordeste Paraense pode ser subdividida em cinco microrregiões (Bragantina, Cametá, Guamá, Salgado e Tome-Açu) (BELATO et al., 2018), estando o trecho em estudo da sub-bacia do rio Guamá localizado predominantemente na microrregião do Guamá (Figura 2).

Figura 2 – Localização espacial da microrregião do Guamá e da sub-bacia do rio Guamá.



Fonte: Autoria própria.

O rio Guamá possui grande importância econômica, social e cultural para os municípios da região. Neste trecho do rio convergem toda rede de drenagem composta de pequenos (igarapés Água-Azul, Trapiche, Induá, Capitão Poço, Jipuíba, Tucumã, Paixão, Mamorana, Araçarana, Borges, Itabocal, Açu-de-Cima, Açu-de-Baixo, Patauateua, Ajará, Puraquequara e Peripindeua) e grandes (rios Irituia, Pacuí-Miri, Pacuí-Claro, Pacuí-Açu, Arauaí, Jacaiacá e Cuxiuú) afluentes inseridos na Microrregião do Guamá (TORRES, 2007).

Na região amazônica a água é um dos recursos mais abundantes na paisagem ocorrendo na forma de rios de grande porte e/ou pequenos rios e igarapés que ajudam na manutenção do volume de água dos grandes rios (MELO et al., 2013). Sioli (1965) e Sioli e Klinge (1962) realizaram os primeiros estudos rios da Amazônia e “classificaram em três categorias: águas brancas (barrentas), negras e claras”. Conforme Parolin et al. (2005), a composição química e a quantidade de sedimento transportados constituem aspectos classificadores dos rios da Amazônia.

O rio Guamá (Figura 2) pode ser considerado um rio de águas brancas ou barrentas. As características limnológicas dos rios de água branca são resultantes da formação geológica, pedologia, vegetação presente, entre outras. Segundo Melo et al. (2013), estes rios têm suas bacias de drenagem com origem na região andina ou pré-andina que apresentam processos erosivos intensos com consequente elevada carga de sedimento; e, são compostas por sedimento do cretáceo de natureza alcalina, rico em sais minerais e quantidades percentuais elevadas de cálcio e magnésio. De acordo com Ward et al. (2013), o pH dos rios de águas brancas é próximo a neutralidade devido as altas concentrações de metais alcalinos e estes rios podem ser considerados como de alta produtividade natural, com fauna e flora economicamente importantes (várzea).

A região Norte como um todo tem seu regime climático definido pela presença e deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que modula os dois períodos da região, chuvoso e menos chuvoso (TORRES, 2007). Amanajás e Braga (2012) estabelecem para o período chuvoso um acumulado mensal de 380 mm e de 70 mm para o período menos chuvoso para o Estado do Pará. Segundo Lopes et al. (2013), “os maiores índices de precipitação durante o ano concentram-se no Nordeste do estado, com valores superiores a 2.000 mm”. Além da ZCIT, tem-se a contribuição da forte convecção local, aglomerados de *Cumulunimbus* e proximidade com a região costeira como fatores para a concentração de altos índices pluviométricas nesta Mesorregião (ALBUQUERQUE et al., 2010).

1.7 Justificativa e interdisciplinaridade da pesquisa

Nos últimos anos muitos estudos (biológicos, químicos, físico-químicos etc.) foram realizados nas águas do rio Guamá e na região do Nordeste Paraense. Entretanto, essas pesquisas se concentraram em trechos localizados nas proximidades da cidade de Belém ou abordam uma dimensão espacial menos detalhada para a sub-bacia do rio Guamá (SBRG). Sabe-se que este rio é de extrema importância para a cidade de Belém, pois suas águas abastecem a estação de tratamento de água da região metropolitana da cidade (IDESP, 2004); onde rio Guamá é responsável por 75% da água consumida em Belém (COSANPA, 2020). Ainda segundo este último autor, atua como fonte hídrica, direta ou indiretamente através de seus afluentes, para diversos empreendimentos agropecuários, de pesca e mineração, que fortalecem o crescimento econômico do estado.

Todavia, antes de chegar ao ponto de captação de água, o rio percorre milhares de quilômetros através de pequenas e médias comunidades, centros urbanos em desenvolvimento (como por exemplo, as cidades de Ourém, Capitão Poço e São Miguel do Guamá) e áreas sob fortes influências antrópicas devido as atividades agropecuárias. É comum ao longo do seu percurso visualizar a presença de estradas, pontes, áreas de plantio (maracujá, pimenta-do-reino, dendê etc.), áreas de pasto, abatedouros, indústrias (bebidas, cerâmica etc.), residências etc. Logo, espera-se que todas estas atividades humanas gerem impactos diretos e/ou indiretos na dinâmica deste corpo hídrico.

A possível deterioração da qualidade de água, a preocupação cada vez maior com a disponibilidade dos recursos naturais e o desequilíbrio ecológico/químico foram fundamentais para iniciar a investigação de um diagnóstico ambiental da sub-bacia do rio Guamá (SBRG) envolvendo aspectos climáticos, ambientais (como por exemplo, o uso e ocupação, morfologia, geologia, pedologia, etc) e hídricos (qualidade da água). A área de estudo encontra-se dentro da denominada Amazônia Legal onde o rápido desenvolvimento dos municípios, queimadas, intensa atividade agropecuária e de mineração exercem pressão em diferentes níveis sobre a qualidade da água e redução da cobertura vegetal primária, principalmente aquela associada as margens dos corpos d'água. O clima da região também apresenta fundamental importância, pois possui uma distribuição da quantidade de chuvas ao longo do ano que afeta diretamente a entrada e diluição de espécies químicas provenientes das atividades antrópicas nos corpos hídricos. Contudo, o emprego do sensoriamento remoto, técnicas de Sistemas de

Informação Geográfica (SIG), análises estatísticas e análises *in situ* possibilitam a integração dos bancos de dados disponíveis aos dados observados para uma visão holística destes parâmetros na área da sub-bacia do rio Guamá.

Assim, conclui-se que o rio Guamá possui relevante papel para a região, pois para ele convergem toda drenagem de pequenos rios e igarapés que se inserem nos municípios abrangidos pela sua sub-bacia. O rio Guamá se mostra como um ambiente integrador das diversas atividades humanas no entorno de sua área de drenagem e que recebe os resultados das transformações antrópicas (ver Anexo A). Por conseguinte, usa-se o rio para diversas finalidades: a) as comunidades locais usam diretamente a água do rio para consumo, atividades domésticas (preparação de alimentos, higiene pessoal, etc), meio de transporte através de pequenas canoas ou rabetas, fonte de água para dessedentação de animais, pesca (peixes, crustáceos, etc.), fonte de água para a produção da farinha e irrigação na agricultura familiar; b) as áreas mais urbanizadas usam indiretamente o rio como área de despejo de esgoto doméstico não tratado, fonte de água para complementação do abastecimento de água da população após tratamento (como na Região Metropolitana de Belém), fonte de água para dessedentação de animais, meio de transporte para barcos de meio porte (geralmente, movidos a motor à óleo diesel), atividades de mineração como a extração de seixo e areia, atividades industriais de médio porte (indústria alimentícia da produção de bebidas não alcoólicas, polpas de frutas, etc.), atividades pecuárias, irrigação na agricultura em grande escala, além de promoverem o deflorestamento das margens do rio e seus tributários.

Desta forma, expõe-se a necessidade de estudo deste corpo hídrico que possibilite fornecer informações sobre o estado de qualidade de suas águas e os impactos gerados pelas transformações antrópicas e climáticas na região.

1.8 Objetivos

1.8.1 Objetivo Geral

Avaliar a integração de variáveis climáticas, ambientais e hídricas com as transformações atuais do uso e ocupação do solo com impacto na vulnerabilidade ambiental da sub-bacia do rio Guamá, no nordeste paraense.

1.8.2 Objetivos Específicos

- I. Avaliar as estimativas de precipitação derivadas de satélites do produto CHIRPS e GPCC para a área da sub-bacia do rio Guamá e comparar as observações fornecidas pela Agência Nacional de Águas.
- II. Mapear e avaliar os diferentes usos e ocupações do solo na sub-bacia do rio Guamá e estabelecer a vulnerabilidade ambiental da sub-bacia do rio Guamá a partir da relação de elementos físicos e bióticos e de suas ecodinâmicas.
- III. Avaliar a dinâmica de parâmetros físico-químicos da água superficial do rio Guamá em função da variabilidade sazonal e espacial.

1.9 Estrutura da Tese

A tese está dividida em 5 capítulos que tratam de aspectos ambientais, climáticos e hídricos relacionados a sub-bacia do rio Guamá (SBRG). O **Capítulo 1** aborda dos aspectos teóricos fundamentais, justificativa, interdisciplinaridade e objetivos (geral e específicos) necessários para a compreensão dos capítulos seguintes. O **Capítulo 2** aborda a utilização de métricas estatísticas para avaliação de dados de chuva obtidos por sensoriamento remoto diante de dados observados através de pluviômetros. As duas fontes de dados estimados de chuva abrangem toda a área da SBRG, porém apresentam resolução espacial distintas. Desta forma, pode-se avaliar o desempenho alcançado por cada uma destas bases de dados (CHIRPS e GPCC) e ponderar a utilização destes dados estimados em estudos seguintes. O **Capítulo 3** apresenta um estudo sobre as características morfométricas da SBRG, precipitação pluvial no período de realização das coletas *in situ* (2015 a 2017) e os tipos de uso e ocupação para o ano fim deste período. Neste capítulo também é apresentado o resultado do estudo de vulnerabilidade ambiental da SBRG que considerou a integralização dos mapas das seguintes variáveis físico – geográficas: geologia, tipo de solo, relevo (representado pela declividade), tipo de vegetal, clima (representado pela precipitação pluvial) e uso e ocupação do solo. Posteriormente, serão adicionados os dois capítulos finais da tese. O **Capítulo 4** expõe a relação entre os aspectos de qualidade da água diante da espacialidade e sazonalidade da área. Além de tratar da influência da chuva no comportamento destas variáveis hidrológicas. Por fim, o **Capítulo 5** traz a conclusão geral da tese diante de todas as discussões ambientais, climáticas e hidrológicas discutidas nos capítulos anteriores.

CAPÍTULO 2 AVALIAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO BASEADA EM DADOS DO CHIRPS E GPCC COM MEDIÇÕES NA SUPERFÍCIE PARA A SUB-BACIA DO RIO GUAMÁ NO NORDESTE PARAENSE¹

Resumo

A chuva é uma das variáveis mais importantes nos estudos do clima da Amazônia devido a ampla variabilidade nas escalas espaço-temporal. Muitas bacias e sub-bacias hidrográficas na região são deficientes de um monitoramento regular e uniforme de dados observados na superfície. Os produtos de sensoriamento remoto disponíveis atualmente fornecem dados de chuva para uma distribuição espaço-temporal ampla e para quase todo globo terrestre. Este estudo tem como objetivo avaliar a estimativa de dados de pluviosidade obtidos a partir de sensoriamento remoto para região da sub-bacia do rio Guamá, no nordeste paraense, em comparação com dados observados em pluviômetros terrestres. Além de identificar o comportamento espaço-temporal da chuva na área. Os dados de chuva utilizados foram: medida por pluviômetro (Hidroweb) e estimada por sensoriamento remoto e disponibilizada pela base de dados de precipitação de alta resolução dos produtos GPCC (*Global Precipitation Climatology Centre*) e CHIRPS (*The Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations*), para o período entre 1988 e 2018. Os dados foram comparados obtendo-se correlação notadamente alta ($r = 0,99$) e índice de concordância satisfatório ($d = 0,98$). As duas bases de dados estimados demonstraram superestimação aproximada da precipitação observada e distribuição espaço-temporal condizente com o esperado para a região.

Palavras-chave: CHIRPS. GPCC. Sensoriamento remoto.

Abstract

Rain is one of the most important variables in climate studies in Amazon because of it is large variability in spatio-temporal scales. Many basins and sub-basins in the region are deficient in regular and uniform monitoring of data observed on the surface. Today, the remote sensing products available provide rainfall data for a large spatio-temporal

¹Artigo publicado na *Revista Ciência e Natura* (volume 42, p. e32, 2020), Qualis Capes B2 em Ciências Ambientais, DOI: 10.5902/2179460X42094.

distribution and for almost every globe. This study aims to evaluate the estimation of rainfall data obtained from remote sensing for the sub-basin region of the Guamá River, Northeastern Pará, compared to data observed on terrestrial rain gauges. In addition to identifying the spatio-temporal behavior of rain in the area. The rainfall data used were: measured by rain gauge (Hidroweb) and estimated by remote sensing and made available by the high resolution precipitation database of (Global Precipitation Climatology Centre) e CHIRPS (The Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations) products, for the period 1988 and 2018. The data were compared with a remarkably high correlation ($r = 0.99$) and a satisfactory agreement index ($d = 0.98$). The two estimated databases showed an approximate overestimation of the observed precipitation and a spatio-temporal distribution consistent with that expected for the region.

Keywords: CHIRPS. GPCC. Remote sensing.

2.1 Introdução

Ter conhecimento sobre a variabilidade espacial e temporal da distribuição da precipitação é fundamental para diversos setores da sociedade, como agropecuária, a produção de energia e controle de impactos advindos da ocorrência de eventos extremos (SANTOS et al., 2017). A precipitação pluviométrica é uma das variáveis mais importantes nos estudos do clima da Amazônia (SOUZA et al., 2017), devido a sua ampla variabilidade nas escalas temporal (diária, mensal, sazonal e decadal) e espacial (local, regional, continental e global) (SOUZA et al., 2017). Diversos autores (MENEZES et al., 2015) têm demonstrado através de dados observacionais diversificados a ocorrência da mesma alta variabilidade de precipitação nos padrões sazonais e espaciais sobre a Amazônia na sua totalidade. Segundo Ferreira et al. (2013), alguns destes fatores são os diferentes sistemas atmosféricos que atuam sobre a região como: a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Além de um sistema de menor escala no regime de chuvas denominado Linhas de Instabilidade (LI).

De acordo com Souza et al. (2016), observando os valores mensais de precipitação do ciclo anual sobre a Amazônia é possível identificar a ocorrência de uma clara sazonalidade ao longo dos meses do ano. É observado o valor máximo de 9

mm/dia ocorrendo entre os meses de fevereiro e março, e o mínimo entre 2,6 e 2,2 mm/dia em julho e agosto. Ainda segundo o autor é possível caracterizar os meses de dezembro a maio como constituintes da estação chuvosa, e os meses de junho a novembro como constituintes da estação menos chuvosa.

De forma coerente com o clima da região amazônica, também é possível observar uma elevada variabilidade pluviométrica para o Estado do Pará devido aos diferentes sistemas atmosféricos que atuam sobre a região (MENEZES et al., 2015). De acordo com diversos autores (FIGUEROA; NOBRE, 1990; MARENGO et al., 2001; SOUZA; AMBRIZZI, 2003), grande parte da precipitação pluvial sobre o Estado do Pará ocorre entre as estações de verão e outono austral, associada aos padrões de circulação atmosférica quase-estacionários de grande escala ligados à ZCAS e ZCIT. Segundo Camponogara e Silva Dias (2011), a quantidade de precipitação pluvial do Estado ainda sofre influência de mecanismos de interação entre o oceano Atlântico e a atmosfera, como a Oscilação Atlântico Norte (OAN), Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e El Niño Oscilação Sul (ENOS). Neste contexto, é importante destacar que o Pará é o estado da Amazônia que possui a maior rede de drenagem, contemplando assim grandes bacias hidrográficas, de modo que os rios adquirem relevância única na vida da população (LOPES et al., 2013).

Os fatores mais importantes que afetam o comportamento hidrológico das bacias hidrográficas são as chuvas, sua duração, intensidade, distribuição e períodos de retorno (SABER et al., 2015). Muitas bacias e sub-bacias hidrográficas da região amazônica são deficientes de um monitoramento em tempo real da precipitação, possuem uma rede de monitoramento muito esparsa desta variável climática, não apresentam dados de precipitação para uma determinada área de interesse ou ainda apresentam dados de precipitação inconsistentes ou com um grande número de falhas ao longo do período (devido à falta de manutenção da rede de estações pluviométricas). A quantidade insuficiente de estações pluviométricas de superfície em determinadas regiões do Brasil (principalmente na região amazônica) interfere negativamente no desenvolvimento de pesquisas com o intuito de monitorar o clima e prever eventos climáticos extremos.

Segundo Araujo e Guetter (2007), nas últimas décadas foram observados proeminentes avanços no sensoriamento remoto da chuva por meio de satélites especializados a este fim, o que ocasionou o aumento da disponibilidade e qualidade destas estimativas para diversas regiões do globo terrestre. Os produtos disponíveis atualmente fornecem dados de chuva estimada por satélite através de uma distribuição

espacial e temporal em grandes bacias e regiões. A importância das informações e produtos sobre o clima em diferentes escalas, regional e global, tem gerado a criação de diferentes programas internacionais de modo a fornecer informações generalizadas das variáveis meteorológicas de todo o planeta Terra. Segundo Hessels (2015), se torna cada vez mais atrativo o uso de satélites para a realização de estimativas de precipitação de chuvas, devido o fornecimento de medições espaciais contínuas. Muitos destes produtos de satélite possuem código aberto e resoluções variadas (DINKU, 2014; SHRESTHA, 2011), e seu desempenho pode variar de região para região (DUAN et al., 2016). Alguns destes fornecem dados de precipitação obtidos a partir de observação em superfície e sensoriamento remoto (DINKU et al., 2018), como o GPCP (Global Precipitation Climatology Project) (ADLER et al., 2001), o GPCC (Global Precipitation Climatology Centre) (SCHNEIDER et al., 2016), CHIRPS (The Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations) (DINKU et al., 2018; FUNK et al., 2015; SHRESTHA et al., 2017;), o CRU (Climate Research Unit) (BROHAN et al., 2006) e o TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) (HUFFMAN et al., 2007).

Assim, identifica-se que as condições climáticas de uma região representam fatores limitantes para a manutenção da disponibilidade hídrica e possuem grande importância para o desenvolvimento econômico, social e cultural. A percepção da dificuldade de acesso e logística aos diversos corpos d'água da região da sub-bacia do rio Guamá e a inexistência de uma rede de monitoramento representativa da área torna fundamental o emprego de bases de dados de precipitação pluviométrica para analisar a variabilidade temporal ou espacial dos fenômenos atmosféricos. Desse modo, este estudo tem como objetivo principal avaliar a acurácia das estimativas de precipitação obtidas a partir de sensoriamento remoto (GPCC e CHIRPS) para a região da sub-bacia do rio Guamá, no nordeste paraense, em comparação com dados diretamente observados em pluviômetros terrestres (disponibilizados pela Agência Nacional de Águas – ANA). Além de identificar o comportamento espaço-temporal da chuva na área da sub-bacia do rio Guamá e, assim, gerar resultados que irão promover uma melhor compreensão do clima local e dá subsídios para melhor gerenciamento dos recursos hídricos da região.

2.2 Material e métodos

2.2.1 Área de estudo

O Estado do Pará está situado na região Norte do Brasil, na Amazônia Oriental, ocupando uma área de 1.247.954,6 km² (Figura 1). É o segundo maior estado brasileiro em extensão e possui 144 municípios, com uma população de 7.581.051 habitantes (IBGE, 2010). De acordo com Lopes et al. (2013), no Pará podem ser descritas duas estações bem definidas a partir do índice pluviométrico: uma estação chuvosa (representando o inverno amazônico) e uma estação menos chuvosa (representando o verão amazônico). Atualmente a cobertura do solo na Amazônia é dominada por três tipos de paisagem: floresta primária, floresta secundária (capoeiras em diversos estágios de sucessão) e pastagem (SALIMON et al., 2003).

A área de estudo é composta pela sub-bacia do rio Guamá (SBRG), situada na mesorregião do nordeste paraense e microrregião do Guamá, e abrange uma área de 49.637 km² (TORRES, 2007). O rio Guamá é um dos afluentes do rio Pará e tem 700 km de extensão total. Nasce na serra dos Coroados (parte sul do município de Capitão Poço), correndo na direção sul-norte até o município de Ourém, situada em sua margem direita. Seguindo para o oeste encontra-se com o rio Capim, um de seus mais importantes afluentes. É navegável por pequenas embarcações até sua primeira cachoeira, a 225 km de Belém. Na sua foz, na Baía do Guajará, atinge 900 m de largura e é navegável em certos trechos (BRAZ; MELLO, 2005). Segundo Rebello et al. (2009), a mesorregião Nordeste Paraense se apresenta como um importante polo agropecuário da economia paraense, principalmente no tocante a agricultura itinerante de derruba e queima da vegetação secundária ou de pousio (localmente denominada como capoeira) e formação de amplas pastagens.

A SBRG faz parte do contexto histórico da criação da Estrada de Ferro de Bragança que ligava a capital Belém à cidade de Bragança e sua colonização (TORRES, 2007). Os municípios que abrangem a SBRG são: Aurora do Pará, Bonito, Capitão Poço, Garrafão do Norte, Ipixuna do Pará, Irituia, Mãe do Rio, Nova Esperança do Piriá, Ourém, Santa Luzia do Pará, São Domingos do Capim e São Miguel do Guamá. A SBRG faz parte da Região Hidrográfica do Atlântico-NE ocidental, segundo a resolução nº 04/2008 do Conselho de Recursos Hídricos do Estado do Pará (BRAZ; MELLO, 2005), que possui uma área de 918.822 km² (11% do território nacional) e abrange os estados de Goiás (21%), Tocantins (30%), Pará (30%), Maranhão (4%), Mato Grosso (15%) e Distrito Federal (0,1%) (ANA, 2016).

A sub-bacia hidrográfica do rio Guamá está localizada em uma região tropical equatorial quente e úmido, e que possui chuvas tipicamente convectivas (intensidade de chuva mais forte, período de duração mais curto e área de cobertura menor) que podem migrar ao longo do tempo para chuvas estratiformes (espalhamento por uma grande área, duração de tempo maior e intensidade de precipitação média ou baixa) (ROCHA; CORREIA; FONSECA, 2014). O tipo climático predominante na região é o Af, segundo Köppen, apresenta temperatura média anual superior a 18 °C (PRATA et al., 2010). De acordo com Lopes et al. (2013), a estação menos chuvosa ocorre entre os meses de junho e novembro, e a estação mais chuvosa entre os meses de dezembro a maio (com índices de precipitação anual superiores a 2.000 mm).

O solo da área da sub-bacia do rio Guamá é caracterizado pela presença dos tipos: Latossolo Amarelo, Latossolo Concrecionário, Neossolo Flúvico, Neossolos Quartzarênicos e Argissolo Vermelho Amarelo (ROCHA, 2017).

Em sua totalidade de área, a SBRG equivalente a 7% do Estado do Pará (TORRES, 2007). O rio Guamá é responsável pelo fornecimento de um volume de 75% da água distribuída para a população da capital do estado (COSTA et al., 2015). Devido a sua extensão territorial é também responsável pela disponibilização de água para diversos tipos de atividades ao longo do seu trajeto. A importância do rio Guamá para a cidade de Belém deve-se ao fato de que ele, juntamente com os lagos Água Preta e Bolonha, faz parte do Complexo Hídrico do Utinga, manancial que abastece a cidade (BRAZ; MELLO, 2005). É possível também destacar o uso da água do rio Guamá para atividades de relacionadas a agricultura, pecuária, extração mineral, e pesca. Logo, é um rio fundamental para o desenvolvimento local e continuidade do crescimento econômico do Estado do Pará (COSTA et al., 2015). Atualmente, quando se percorre a SBRG, é possível observar diferentes tipos de ocupação, os quais variam entre centros urbanos, pequenas comunidades, atividades agropecuárias e extrativistas (carvoaria, seixeira e madeireira). Segundo Silva et al. (2016), na mesorregião do nordeste paraense destacam-se os fatores mineração, ocupação humana (população) e agricultura no uso e cobertura da terra.

A Figura 1 apresenta a modulação da área da SBRG e indica a localização geográfica dos três pluviômetros que fazem parte da rede de monitoramento da Agência Nacional das Águas (ANA) – com o rio Guamá em destaque compreendendo uma extensão de 380 km no trecho selecionado.

comum compreendido entre os anos de 1988 e 2018. É importante destacar que o GPCC possui um banco de dados baseado em precipitações interpoladas a partir de observações de superfície (RUDOLF; SCHNEIDER, 2005; SANTOS et al., 2017;) e o CHIRPS também utiliza um algoritmo de ponderação da distância inversa no processo de tratamento dos seus dados (DUAN et al., 2016). Assim, os dois produtos de precipitação por satélite foram utilizados para discutir a influência das resoluções espaciais diante dos valores observados, entre outros parâmetros.

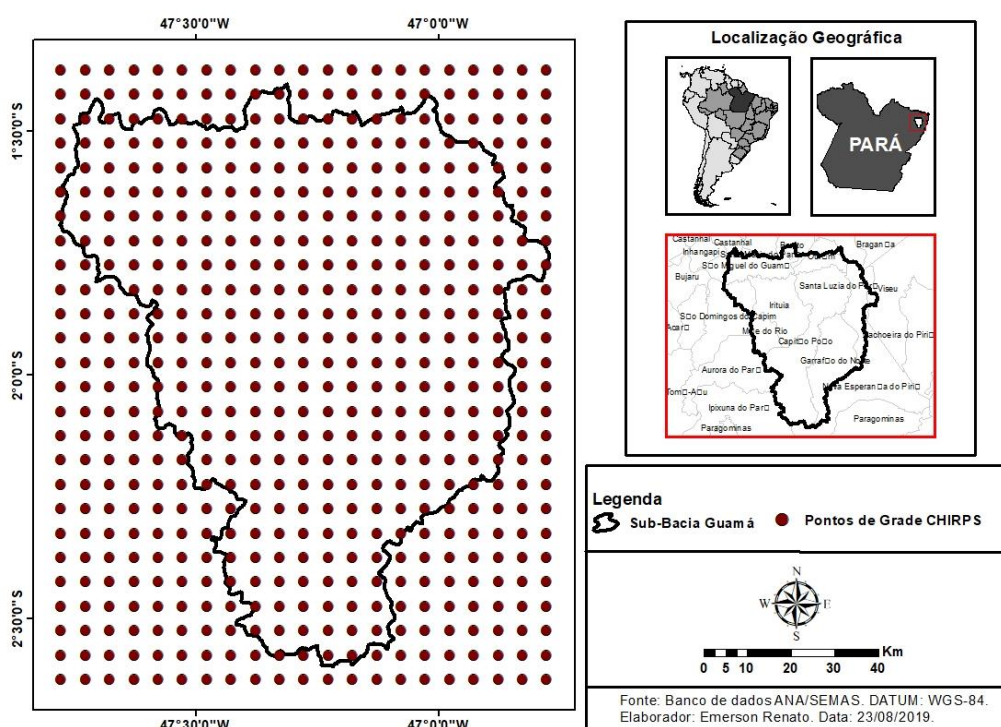
Para os dados de chuva observados foram utilizados os valores de acumulados de precipitação mensais (em milímetros ou mm) medidos pelos três pluviômetros localizados na sub-bacia do rio Guamá. Conforme citado anteriormente, estes pluviômetros encontram-se localizados nos municípios de São Domingos do Capim, São Miguel do Guamá e Ourém, fazendo parte da rede de monitoramento de superfície da Agência Nacional de Águas (ANA). O banco de dados foi acessado através da plataforma online Hidroweb, disponível para acesso em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>. Foi realizado controle manual da qualidade dos dados pluviométricos da estação terrestre, pois entre os três pluviômetros existiam algumas ausências na série de dados contínua. Apesar do alcance limitado e do erro intrínseco das estações pluviométricas, elas continuam sendo a ferramenta de medição mais direta e precisa até o momento (WANG et al., 2017). Desta forma, as medidas baseadas no solo foram consideradas como conjuntos de dados de "precipitação verdadeira" para referência nesta pesquisa (MARCIANO et al., 2018; WANG et al., 2017;).

Os dados estimados foram obtidos através de sensoriamento remoto. De acordo com Jiménez et al. (2013), a radiação eletromagnética refletida e emitida pela superfície e atmosfera do planeta é detectada por sensores presentes em satélites. A radiação eletromagnética é interpretada no espectro eletromagnético de acordo com determinados comprimentos de onda. Ainda segundo os autores, as agências administradoras destes satélites fazem o processamento dos dados brutos de radiação e disponibilizam estes dados de sensoriamento remoto em formato espacial tipo raster (pixel) em diferentes resoluções temporal e espacial.

O conjunto de dados de precipitação CHIRPS é fundamentado na medição da duração global da nuvem fria (CDD – Cold Cloud Duration), baseada em dados térmicos de infravermelho arquivados no CPC (Climate Prediction Center), NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) e NCDC (National Climatic Data

Center), como fonte primária no cálculo da precipitação em escala quase-global (cobertura geográfica de 50 °S a 50 °N e todas as longitudes) desde 1981 até a presente data (DUAN et al., 2016). As primeiras estimativas são calibradas com a precipitação estimada no produto TRMM-3B42, versão 7, e informações da rede global de pluviômetros (coletadas pela Food and Agriculture Organization of the United Nations e Global Historical Climatology Network), fornecendo um conjunto de dados de precipitação de alta resolução espacial a $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ de resolução horizontal (ESPINOZA et al., 2019; FUNK et al. 2015). Os dados utilizados neste trabalho foram adquiridos através do sítio eletrônico <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps/>, em formato NetCDF, GeoTiff e Esri BIL. Para a área da sub-bacia do rio Guamá foram incorporados 546 pontos de grade (Figura 2).

Figura 2 – Distribuição dos pontos de grade do CHIRPS sobre a sub-bacia do rio Guamá.

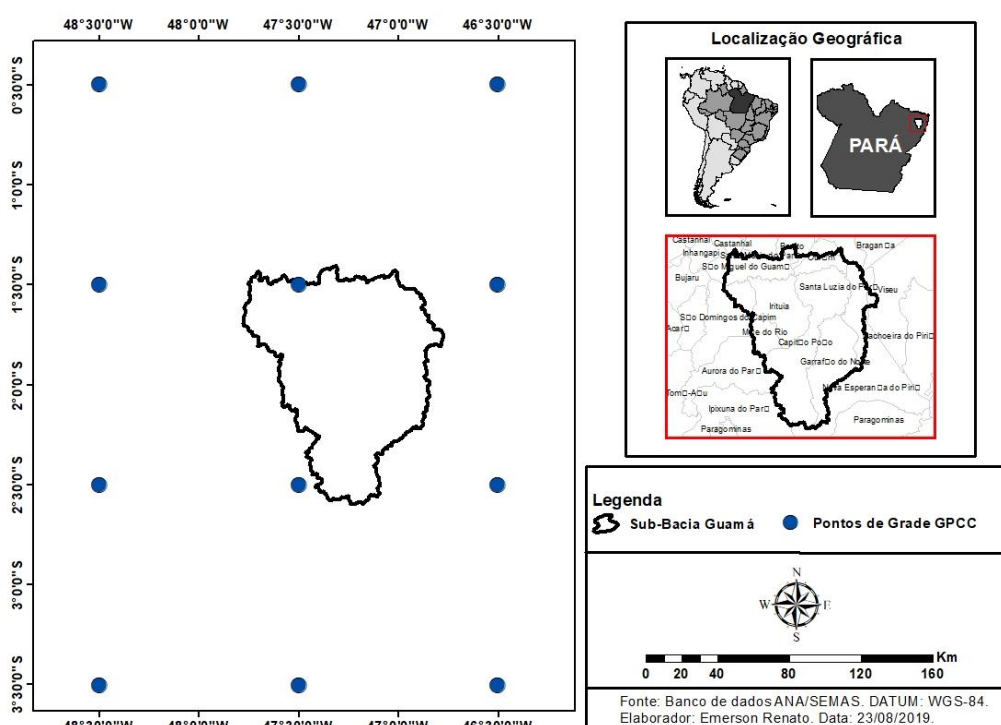


Fonte: Autoria própria.

O produto de precipitação GPCC foi obtido com uma resolução temporal mensal e resolução espacial em uma grade de $1,0^\circ \times 1,0^\circ$ (Figura 3), disponível em <http://gpcc.dwd.de/>. O conjunto de dados GPCC possui 12 pontos de grade distribuídos na área da SBRG. O produto completo GPCC é um conjunto de dados de precipitação mensal em grade para a superfície global da terra (RAZIEI et al. 2015),

controladas pela qualidade, de 85.000 estações pluviométricas quase em tempo real (CHANDRAN et al., 2016). De acordo com Wang et al. (2017), os dados disponibilizados são baseados nos relatórios mensais do SYNOP (Surface Synoptic Observations) e CLIMAT recebidos via GTS (Global Telecommunication System) da OMM (Organização Meteorológica Mundial), após controle de qualidade automático e manual. Estes dados de precipitação são gerados dentro de 2 meses após o final do mês de observação com base em uma combinação de observações radiométricas de satélites e pluviômetros (AJAAJ et al., 2016).

Figura 3 – Distribuição dos pontos de grade do GPCC sobre a sub-bacia do rio Guamã.



Fonte: Autoria própria.

2.2.3 Cálculos das métricas estatísticas e interpolação dos dados de chuva

De acordo com Xu et al. (2015), os eventos pluviométricos mensais estão amplamente sujeitos à variabilidade em pequena escala, e portanto, podem ser melhor validados na menor escala espacial possível.

Neste trabalho foi realizada uma análise ponto-a-pixel para comparar dados de precipitação da série temporal mensal observada através dos pluviômetros selecionados com a respectiva célula da grade ao pixel do CHIRPS e GPCC correspondente. Para isso foram utilizadas quatro métricas estatísticas baseadas em uma comparação de pares

para avaliar o desempenho de cada um dos produtos de satélite (PAREDES-TREJO et al., 2016): coeficiente de correlação de Pearson (r), percentual de viés (ou erro) relativo (BIAS do inglês relative bias (or error) percentage), raiz do erro médio quadrático (RMSE do inglês root mean square error), índice de concordância de Willmott (d). As equações estão resumidas na Tabela 1.

Tabela 1 – Equações das métricas estatísticas de desempenho dos produtos de precipitação (onde: O = representa os dados observados em superfície pelos pluviômetros; S = representa os dados estimados pelos produtos de satélites CHIRPS ou GPCC; $\bar{O}$ e $\bar{S}$ representam as médias dos referidos dados observados e estimados, respectivamente; n representa o número de observações).

Nome da métrica	Equação	Valor ideal
Coeficiente de correlação de Pearson(r)	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2][\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2]}}$	1
Percentual de viés (BIAS)	$PBIAS = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n (O_i)}$	0
Raiz do erro médio quadrático (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}$	0
Índice de concordância de Willmott (d)	$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{O} + O_i - \bar{O})^2}$	1

O coeficiente de correlação de Pearson (r) mede a força de relação linear entre estimativas de satélite e as observações dos pluviômetros, variando de -1 a +1 com uma pontuação desejada igual a +1 (PAREDES-TREJO et al., 2017). De acordo com Rivera et al. (2018), o erro (ou viés) percentual médio mede a tendência da precipitação estimada ser maior ou menor do que a precipitação observada, com um valor ideal de 0. Valores positivos indicam viés de superestimação, enquanto valores negativos indicam viés de subestimação. O valor da raiz do erro médio quadrático (RMSE) indica o desvio médio entre valores estimados e os valores reais. O valor ideal para esta métrica é igual a 0 e sempre tem valores positivos (XU et al., 2015). O índice de concordância (d) utilizado foi desenvolvido por Willmott (1981). Os valores deste índice podem variar de 0, para nenhuma concordância, a 1, para uma concordância perfeita. Os resultados de r e d são adimensionais, enquanto que BIAS é expresso em porcentagem (%) e RMSE em milímetros (mm). Para realização das análises estatísticas no conjunto de dados foi utilizado o software R (R Core Team, 2018), através da implementação das funções disponíveis nos pacotes: base, devEMF, lattice, plyr, Rmisc, reshape e hydroGOF. Também foi utilizado o software R para a realização do teste de comparação entre os conjuntos de dados (observados e estimados) através do teste t de Student (nível de

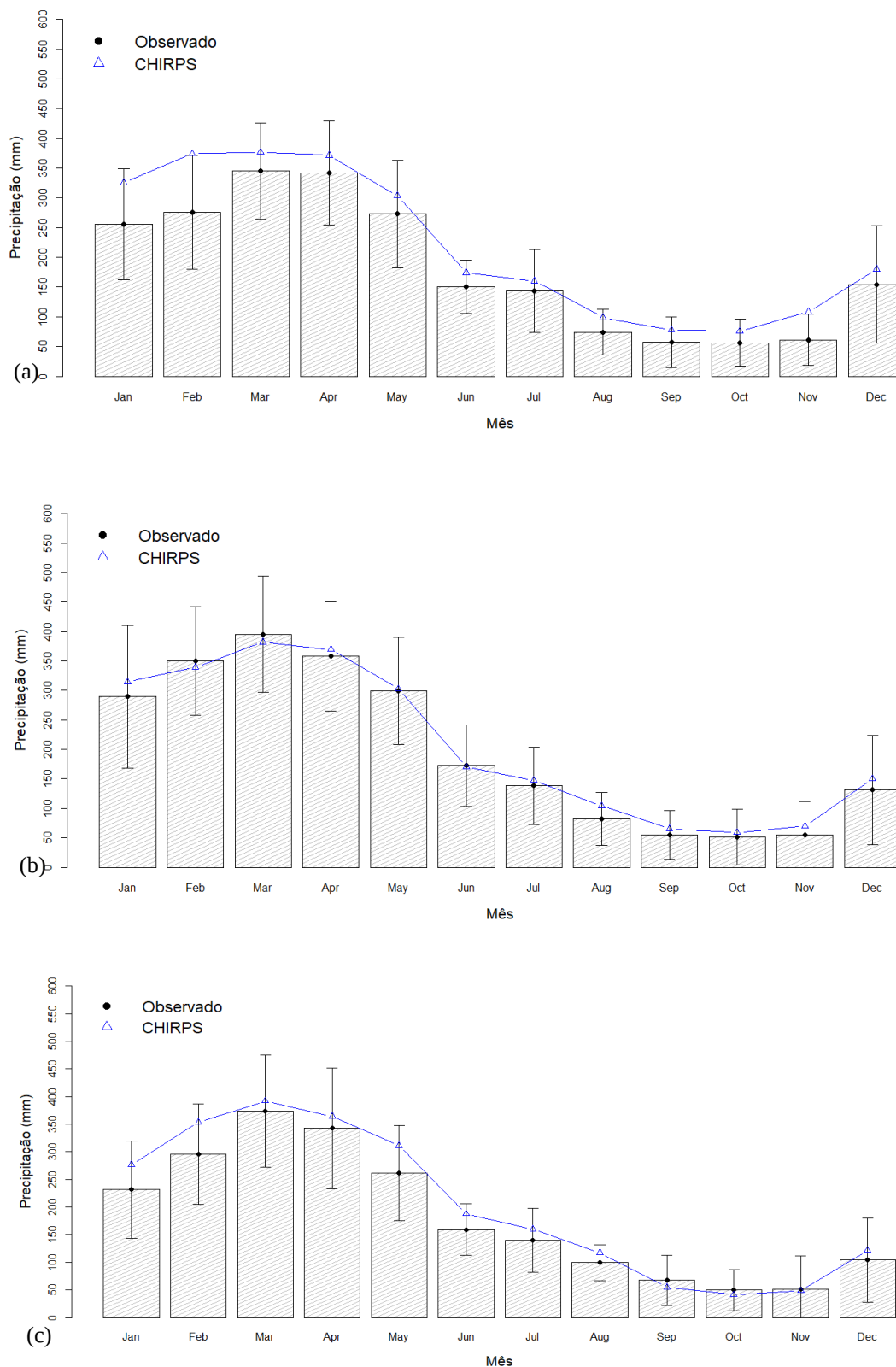
significância de 5%, ou seja, $p \leq 0,05$). O objetivo do teste foi testar a hipótese nula de que as médias entre os dois grupos (ANA/CHIRPS e ANA/GPCC) são iguais ou equivalentes para as médias mensais ao longo do período em estudo.

Para a realização da espacialização dos dados de chuva foi empregado o software QGIS, um sistema de informações geográficas (SIG), versão 2.18. No processamento as precipitações médias estimadas pelo produto de satélite foram utilizadas como dados de entrada nos cálculos de espacialização. Neste caso, foi empregado o método de interpolação da Krigagem universal utilizando o limite da área da sub-bacia do rio Guamá. De acordo com Gallardo (2006), o comportamento de uma variável nas distintas direções de um espaço geográfico é explicado pelo interpolador krigagem que se baseia em uma função contínua. Desta forma, é possível associar a variabilidade da estimação com base na distância que existe entre um par de pontos, pelo uso de um semivariograma, o qual permite verificar o nível de similitude que existe entre estes, à medida que se afastam.

2.3 Resultados e discussão

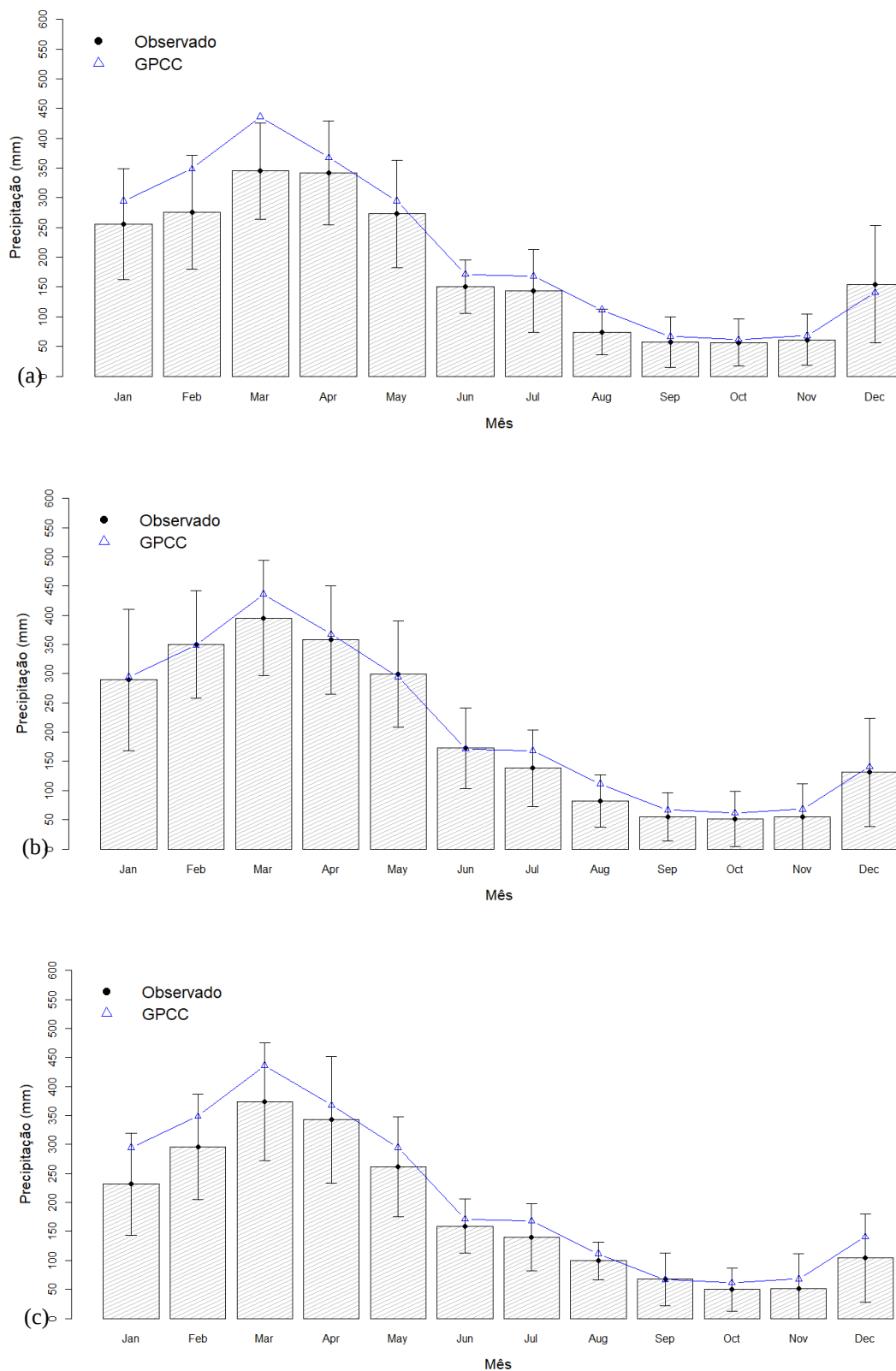
As Figuras 4 e 5 apresentam os valores médios da precipitação acumulada obtidos a partir dos dados de pluviômetros (barras verticais) que estão localizados em São Domingos do Capim (Figura 4a), colônia Santo Antônio (São Miguel do Guamá) (Figura 4b) e Ourém (Figura 4c). Os valores estimados pelos produtos CHIRPS e GPCC para o período de validação que compreende os anos de 1988 a 2018 também estão representados nas Figuras 4 e 5, respectivamente, através da linha contínua em azul. Vale ressaltar que todos os pluviômetros selecionados estão localizados dentro da área da sub-bacia do rio Guamá (SBRG). Também se destaca que os dados médios de precipitação acumulada obtidos do CHIRPS e GPCC foram extraídos do pixel mais próximo de cada pluviômetro.

Figura 4 – Ciclo anual da precipitação média acumulada a partir de imagens de satélite com resolução de 0,05° (CHIRPS) e dados de estações in situ (dados observados ANA) para criar séries temporais de chuvas para o período de 1988 a 2018 (*média observada para: (a) pluviômetro São Domingos do Capim; (b): pluviômetro Colônia Santo Antônio em São Miguel do Guamá; (c) pluviômetro Ourém; as barbelas representam o ± 1 desvio-padrão calculado).



Fonte: Autoria própria.

Figura 5 – Ciclo anual da precipitação média acumulada a partir de imagens de satélite com resolução de 1,0° (GPCC) e dados de estações in situ (dados observados ANA) para criar séries temporais de chuvas para o período de 1988 a 2018 (*média observada para: (a) pluviômetro São Domingos do Capim; (b) pluviômetro Colônia Santo Antônio em São Miguel do Guamá; (c) pluviômetro Ourém; as barbelas representam o ± 1 desvio-padrão calculado).



Fonte: Autoria própria.

É possível observar o mesmo padrão de comportamento da precipitação mensal, em ambas as figuras citadas, ao longo do período em estudo. Observa-se que a chuva média na sub-bacia do rio Guamá estimada pelo CHIRPS e GPCC apresenta picos mais elevados que a observada pelos pluviômetros, porém os dois tipos de dados se encontram em fase em todo o período de estudo. Nota-se um aumento da quantidade de chuvas a partir do mês de dezembro até um ápice geralmente no mês de março e um decréscimo da quantidade de chuva até o menor valor observado geralmente no mês de outubro. De acordo com Costa et al. (2019) foi possível observar através de dados de precipitação a partir da base de dados do CHIRPS e a sua validação com dados do INMET/CPTEC para a região norte do Brasil um período chuvoso entre os meses de novembro a maio, e de menor precipitação (índices de precipitação considerados elevados em comparação as demais regiões do País) entre os meses de junho a setembro (COSTA, 2019).

No presente trabalho, os maiores desvios-padrão foram observados comumente entre os meses de dezembro a junho/julho em ambas as figuras (Figura 4 e 5). Estes meses fazem parte do denominado período chuvoso na região amazônica. As discrepâncias mais evidentes entre o valor médio observado (pluviômetro) e o valor médio estimado (CHIRPS e GPCC) foram identificadas comumente para os meses de janeiro, fevereiro e/ou março. Contudo, nos meses de menor precipitação pluviométrica observa-se que os dados CHIRPS e GPCC são capazes de identificar a sazonalidade local, mesmo com uma resolução de 5 a 100km, respectivamente.

A quantidade média de chuva, em mm, estimada pelo CHIRPS foi comumente superior ao obtido pelo pluviômetro em todos os meses em São Domingos do Capim, colônia Santo Antônio e Ourém, com algumas exceções. Destacam-se os meses de fevereiro e março, na colônia Santo Antônio, e os meses de setembro e outubro, em Ourém, onde a quantidade de chuva estimada foi inferior ao medido em cada um dos pluviômetros. Também se destacam os meses de maio e junho, na colônia Santo Antônio, e o mês de novembro, em Ourém, onde os valores estimados de quantidade de chuva foram iguais aos medidos nos pluviômetros. De acordo com Katsanos et al. (2016), a diferença entre a tendência da precipitação pluvial medida pelos pluviômetros e a tendência nos dados do CHIRPS é resultado à incorporação de estimativas da TRMM a este produto de satélite, que tendem a superestimar a precipitação.

Para o produto de satélite GPCC somente no mês de dezembro para a localidade de São Domingos do Capim o valor estimado médio ficou abaixo do observado através

do pluviômetro. Nos demais meses para todas as três localidades o valor estimado pelo GPCC foi igual ou ligeiramente maior do que os medidos pelos pluviômetros. É importante destacar a notável similaridade alcançada entre o valor de precipitação medido e estimado para a maioria dos meses (com exceção dos meses de março, julho e agosto) na região da colônia Santo Antônio. Este pluviômetro apresenta a menor distância em relação ao ponto de grade do qual foram extraídos os dados de precipitação, aproximadamente 18 km. Enquanto que o pluviômetro localizado em São Domingos do Capim encontra-se, aproximadamente, 35 km e o localizado em Ourém a, aproximadamente, 43 km. De acordo com Limberger e Silva (2018), o conjunto de dados do GPCC é reconstruído a partir de dados observados de precipitação. Logo, a proximidade entre pluviômetro e ponto de grade mostra-se favorável à precisão da precipitação estimada.

A Tabela 2 apresenta os resultados das métricas estatísticas calculadas a partir da comparação entre os dados estimados (CHIRPS e GPCC) e observados (pluviômetros).

Tabela 2 – Resumo de métricas estatísticas para avaliação de produtos de precipitação (CHIRPS e GPCC) na escala temporal mensal (1988 a 2018) *versus* os valores observados em pluviômetros localizados na sub-bacia do rio Guamá (*SDC = pluviômetro de São Domingos do Capim; CSA = pluviômetro da colônia Santo Antônio (São Miguel do Guamá); OUR = pluviômetro de Ourém. ** Distância, em quilômetros, entre a localização do pluviômetro e o ponto de grade mais próximo do GPCC).

CHIRPS x observado				
Observado*	BIAS (%)	r	RSME (mm)	d
SDC	20,0	0,98	43,2	0,96
CSA	4,1	1,00	14,0	1,00
OUR	11,7	0,99	30,0	0,98
Valor médio	11,9	0,99	29,1	0,98
GPCC x observado				
Observado*	BIAS (%)	r	RSME (mm)	d
SDC (34,87 km)**	15,6	0,99	39,9	0,97
CSA (17,73 km)**	6,4	0,99	18,5	0,99
OUR (42,65 km)**	16,3	0,99	36,8	0,98
Valor médio	12,8	0,99	31,7	0,98

Fonte: Autoria própria.

Todos os valores obtidos para o coeficiente de correlação (r) foram acima de 0,97 (97%), indicando uma forte correlação direta entre variáveis de dados CHIRPS versus pluviômetro (SDC, CSA, OUR), e, principalmente, entre GPCC versus pluviômetro (SDC, CSA, OUR). De forma geral, os valores médios dos coeficientes de correlação ($r = 0,99$ para ambos) foram similares para os dois produtos de satélites comparados com os valores observados.

O pluviômetro localizado em São Domingos do Capim (SDC) apresentou os maiores valores de erro percentual médio (BIAS aproximadamente 20 e 16% para CHIRPS e GPCC, respectivamente). O menor erro percentual médio foi obtido para a colônia Santo Antônio no valor aproximado de 4% de superestimativa para o conjunto CHIRPS/observado. Em relação ao conjunto GPCC/observado foi obtido o menor erro percentual médio para a localidade de Ourém no valor de, aproximadamente, 8%. De forma geral, o valor médio de BIAS obtido para o CHIRPS/observado indicou uma superestimação menor, aproximadamente 12%, dos dados de precipitação. Enquanto que, o valor médio maior de aproximadamente 13% de BIAS foi encontrado para o conjunto GPCC/observado. Neste estudo não foi encontrado nenhum erro percentual médio indicando subestimação aos dados observados pelos pluviômetros.

Os menores e melhores valores de RSME (aproximadamente 14 e 19 mm para CHIRPS e GPCC, respectivamente) foram encontrados para a região da colônia Santo Antônio e para a região de São Domingos do Capim foram obtidos os maiores e indesejados valores de RSME (aproximadamente 43 e 40 mm para CHIRPS e GPCC, respectivamente). No geral, o valor médio de aproximadamente 29 mm, obtido para o conjunto de dados CHIRPS/observado, foi menor do que o valor médio de aproximadamente 32 mm, obtido para o conjunto de dados GPCC/observado.

Em relação aos índices de concordância (d) de Willmott obtidos observam-se valores iguais ou superiores a 0,97. Destacando-se os menores índices de concordância para a localidade São Domingo do Capim: 0,96 e 0,97 para os conjuntos de dados CHIRPS/observado e GPCC/observado, respectivamente. Novamente, os melhores valores de métricas foram identificados para a colônia Santo Antônio com valores de índices de concordância iguais a 1,00 e 0,99 para os conjuntos de dados CHIRPS/observado e GPCC/observado, respectivamente. No geral, foi obtido o valor médio de 0,98 para ambos os conjuntos de dados de precipitação.

Assim, nota-se que os resultados mais favoráveis das métricas estatísticas foram obtidos tanto para o conjunto de dados CHIRPS/observado como para o conjunto de dados GPCC/observado na coordenada geográfica da colônia Santo Antônio em São Miguel do Guamá. Os resultados mais insatisfatórios foram obtidos para São Domingos do Capim para ambos os conjuntos de dados. Destaca-se que o pluviômetro desta última localidade se encontra no limite de área da sub-bacia do rio Guamá, o que pode favorecer a perda de precisão dos dados de precipitação devido a fatores como a

determinação da área de influência do pluviômetro e a topografia que influencia o movimento do ar (MARCIANO et al., 2018).

Ao entender que a precipitação não se difere apenas através da localização geográfica foi levada em consideração a variação relacionada à sazonalidade da região amazônica. Desta forma, as Tabela 3 e 4 apresentam a comparação entre os dados de precipitação estimados (CHIRPS e GPCC) e observados (pluviômetros) para o período chuvoso (dezembro a maio) e menos chuvoso (junho a novembro) entre os anos de 1988 e 2018.

Tabela 3 – Resumo de métricas estatísticas para avaliação do produto de precipitação CHIRPS para o período chuvoso e menos chuvoso (1988 a 2018) *versus* os valores observados em pluviômetros localizados na sub-bacia do rio Guamá (*SDC = pluviômetro de São Domingos do Capim; CSA = pluviômetro da colônia Santo Antônio (São Miguel do Guamá); OUR = pluviômetro de Ourém).

Período chuvoso (dezembro a maio)				
Observado*	BIAS (%)	r	RSME (mm)	d
SDC	17,3	0,92	54,7	0,85
CSA	1,9	0,99	15,1	0,99
OUR	13,1	0,98	38,8	0,95
Valor médio	10,8	0,96	36,1	0,93
Período menos chuvoso (junho a novembro)				
Observado*	BIAS (%)	r	RSME (mm)	d
SDC	27,9	0,97	27,2	0,90
CSA	11,3	0,99	12,8	0,98
OUR	7,7	0,99	17,4	0,97
Valor médio	15,6	0,98	19,1	0,95

Fonte: Autoria própria.

Nota-se através da consulta da Tabela 3 que os maiores valores de erro percentual médio foram encontrados, tanto no período chuvoso como no período seco, na região do pluviômetro localizado em São Domingos do Capim. Os menores valores alteram entre CSA e OUR no período chuvoso e menos chuvoso, respectivamente. Quando comparados os valores do erro percentual médio observa-se que estes apresentam uma redução de 1% da superestimação no período chuvoso (valor médio de BIAS de aproximadamente 11%) e aumento de 4% da superestimação no período menos chuvoso (valor médio de BIAS de aproximadamente 16%). Os menores valores de correlação são encontrados na região do pluviômetro em SDC em ambos os períodos sazonais. O coeficiente de correlação médio também sofre redução para o período chuvoso e menos chuvoso, 0,96 e 0,98, respectivamente. Quanto ao valor de RMSE observa-se um aumento de aproximadamente 25% para o período chuvoso e uma redução de aproximadamente 34% para o período menos chuvoso quando comparados

aos resultados da análise sem distinção de sazonalidade. Identifica-se que os maiores valores de RSME estão também na região do pluviômetro em SDC e os menores na região do pluviômetro em CSA, em ambos os períodos sazonais. Por fim, o índice de concordância também sofre redução para os valores de 0,93 e 0,95 no período chuvoso e menos chuvoso, respectivamente.

Tabela 4 – Resumo de métricas estatísticas para avaliação do produto de precipitação GPCC para o período chuvoso e menos chuvoso (1988 a 2018) *versus* os valores observados em pluviômetros localizados na sub-bacia do rio Guamá (*SDC = pluviômetro de São Domingos do Capim; CSA = pluviômetro da colônia Santo Antônio (São Miguel do Guamá); OUR = pluviômetro de Ourém. ** Distância, em quilômetros, entre a localização do pluviômetro e o ponto de grade mais próximo do GPCC).

Período chuvoso (dezembro a maio)				
Observado*	BIAS (%)	r	RSME (mm)	d
SDC (34,87 km)**	14,4	0,96	52,4	0,89
CSA (17,73 km)**	3,2	0,99	17,9	0,99
OUR (42,65 km)**	17,0	0,99	48,0	0,93
Valor médio	11,5	0,98	39,4	0,94
Período menos chuvoso (junho a novembro)				
Observado*	BIAS (%)	r	RSME (mm)	d
SDC (34,87 km)**	19,2	0,98	20,8	0,95
CSA (17,73 km)**	16,9	0,97	19,1	0,96
OUR (42,65 km)**	14,3	0,99	16,1	0,97
Valor médio	16,8	0,98	18,7	0,96

Fonte: Autoria própria.

Através da interpretação da Tabela 4 infere-se um comportamento semelhante, ao obtido na Tabela 3, das métricas estatísticas para os períodos sazonais segundo a estimativa de precipitação através do produto GPCC. É possível verificar uma redução para, aproximadamente, 12% no valor médio de BIAS para o período chuvoso e um aumento para, aproximadamente, 17%, no período menos chuvoso. Os maiores resultados de BIAS foram encontrados para as localidades OUR e SDC no período chuvoso e menos chuvoso, respectivamente. O coeficiente de correlação médio é igual a 0,98 para ambos os períodos sazonais, porém menor do que o verificado anteriormente sem a distinção da sazonalidade. O valor de RMSE também sofre um aumento de, aproximadamente, 24% em seu valor para o período chuvoso quando comparado à análise sem distinção da sazonalidade. No período menos chuvoso ocorre redução de, aproximadamente, 41% no valor do erro quadrático médio quando comparado à análise sem distinção da sazonalidade. Os maiores valores de RMSE (52,4 e 20,9 mm) estão concentrados na localidade de São Domingos do Capim. Os índices de concordância de obtidos (0,94 e 0,96 para o período chuvoso e menos chuvoso, respectivamente) são

menores do que o encontrado anteriormente sem distinção da sazonalidade da região. Destaca-se que os menores valores (0,89 e 0,95 para o período chuvoso e menos chuvoso, respectivamente) também estão concentrados na localidade de São Domingos do Capim.

Assim, observou-se que, quando acentuados os períodos sazonais, não foram observadas diferenças relevantes nas métricas obtidas entre a precipitação medida por pluviômetros e estimadas pelo CHIRPS ou GPCC. Isto indica que a quantidade de chuva interfere minimamente na qualidade das métricas estatísticas apresentadas. Contudo, as estatísticas quantitativas de chuva (BIAS, coeficiente de correlação, RMSE e índice de concordância) demonstram eficiência e confiabilidade nas estimativas de chuvas na sub-bacia do rio Guamá através dos produtos gerados pelo CHIRPS e GPCC. Diversos autores (COSTA et al., 2015; DUAN et al., 2016; MARCIANO et al., 2018; XU et al., 2015) reportam a necessidade do conhecimento da qualidade dos dados de precipitação que devem possuir satisfatória precisão na resolução espacial ou temporal. Esta importância fundamenta-se na empregabilidade destes dados para o planejamento estratégico da gestão de recursos hídricos, previsão e avaliação de enchentes e secas (FISCH et al., 1998).

O conjunto de dados CHIRPS/observado (Tabela 5) e o conjunto de dados GPCC/observado (Tabela 6) foram testados quanto à significância estatística para valor-p igual a 0,05, segundo o teste t de Student pareado.

Tabela 5 – Teste t de *Student* (nível de significância de 5%) para o conjunto de dados CHIRPS/observado entre os anos de 1988 e 2018 (*valor-p $\leq 0,05$ indicam que há diferença significativa entre os dados dos valores observados (pluviômetro) e os estimados (CHIRPS)).

Mês	p valor (CHIRPS/SDC)	p valor (CHIRPS/CSA)	p valor (CHIRPS/OUR)
Janeiro	0,006969*	0,3697	0,0652
Fevereiro	0,0003007*	0,6389	0,0141*
Março	0,09728	0,523	0,4022
Abril	0,139	0,5756	0,3438
Maio	0,1696	0,9007	0,03143*
Junho	0,06959	0,8745	0,01478*
Julho	0,3206	0,5052	0,09297
Agosto	0,008718*	0,02674*	0,0315*
Setembro	0,04721*	0,2632	0,1935
Outubro	0,07054	0,4623	0,3017
Novembro	0,00211*	0,2716	0,8336
Dezembro	0,287	0,4143	0,3859

Fonte: Autoria própria.

Tabela 6 – Teste t de *Student* (nível de significância de 5%) para o conjunto de dados GPCC/observado entre os anos de 1988 e 2018 (*valor- $p \leq 0,05$ indicam que há diferença significativa entre os dados dos valores observados (pluviômetro) e os estimados (GPCC)).

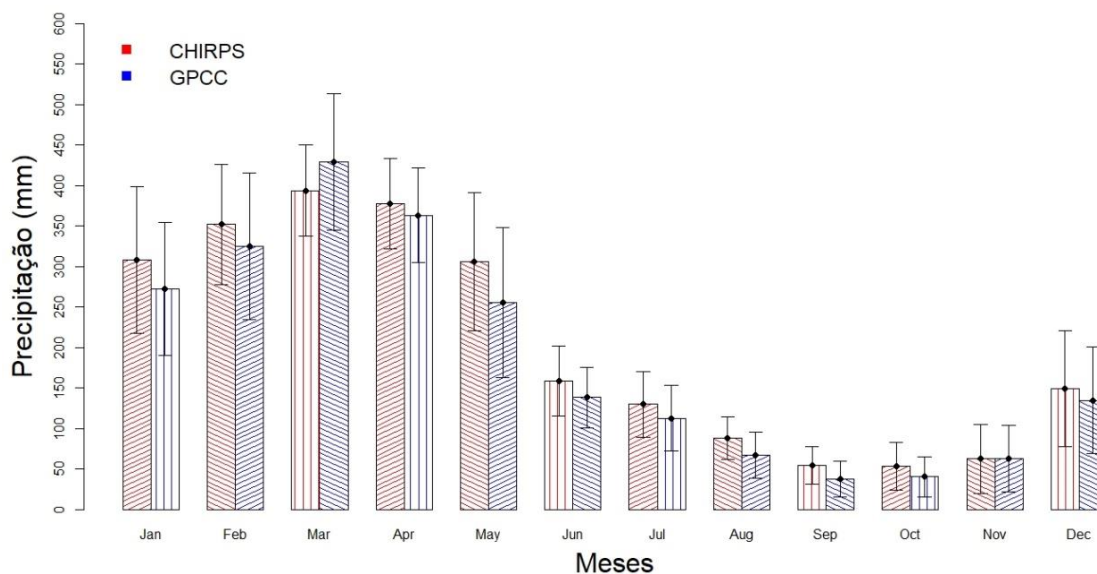
Mês	p valor (GPCC/SDC)	p valor (GPCC/CSA)	p valor (GPCC/OUR)
Janeiro	0,1055	0,8418	0,006924*
Fevereiro	0,009664*	0,9626	0,04692*
Março	0,0002577*	0,1037	0,01731*
Abril	0,1932	0,6341	0,2895
Maio	0,3918	0,84	0,1886
Junho	0,07951	0,9311	0,3056
Julho	0,1258	0,05244*	0,04071*
Agosto	0,0003063*	0,006783*	0,1705
Setembro	0,3218	0,2063	0,9404
Outubro	0,6093	0,3279	0,2041
Novembro	0,5582	0,2997	0,2217
Dezembro	0,5596	0,6522	0,05773

Fonte: Autoria própria.

De acordo com o teste de comparação é possível rejeitar a hipótese de igualdade para o conjunto de dados CHIRPS/observado, principalmente para SDC, nos meses de janeiro, fevereiro, agosto, setembro e novembro; e nos meses de fevereiro, maio, junho e agosto para OUR. Para os valores estimados pelo GPCC, a rejeição da hipótese de igualdade para o conjunto de dados GPCC/observado ocorreu para os meses de fevereiro, março, e agosto para SDC; e, janeiro, fevereiro, março e julho para OUR. Desta forma, identificam-se os meses que influenciaram a perda de qualidade nas métricas estatísticas anteriormente apresentadas. A maior ocorrência de rejeição da hipótese de igualdade entre o valor medido e estimado (CHIRPS ou GPCC) nos pluviômetros de São Domingo do Capim e Ourém influenciam os valores mais elevados de RMSE, principalmente, para o período chuvoso. Destaca-se também a maior ocorrência de rejeição da hipótese de igualdade entre os valores de precipitação pluvial medido e estimado para o mês de agosto na maioria dos conjuntos, com exceção de GPCC/observado em Ourém.

A seguir é apresentada a precipitação média mensal para o período em estudo considerando a área total da sub-bacia do rio Guamá. A precipitação média mensal para o período de 1988 a 2018 foi estimada satisfatoriamente pelo CHIRPS (barras verticais com linhas em vermelho) e GPCC (barras verticais com linhas em azul) para a área de estudo (Figura 6).

Figura 6 – Dados médios mensais de precipitação*, estimados pelo CHIRPS e GPCC, para a área da sub-bacia do rio Guamá (período de 1988 a 2018) (*As barbelas representam o ± 1 desvio-padrão calculado).



Fonte: Autoria própria.

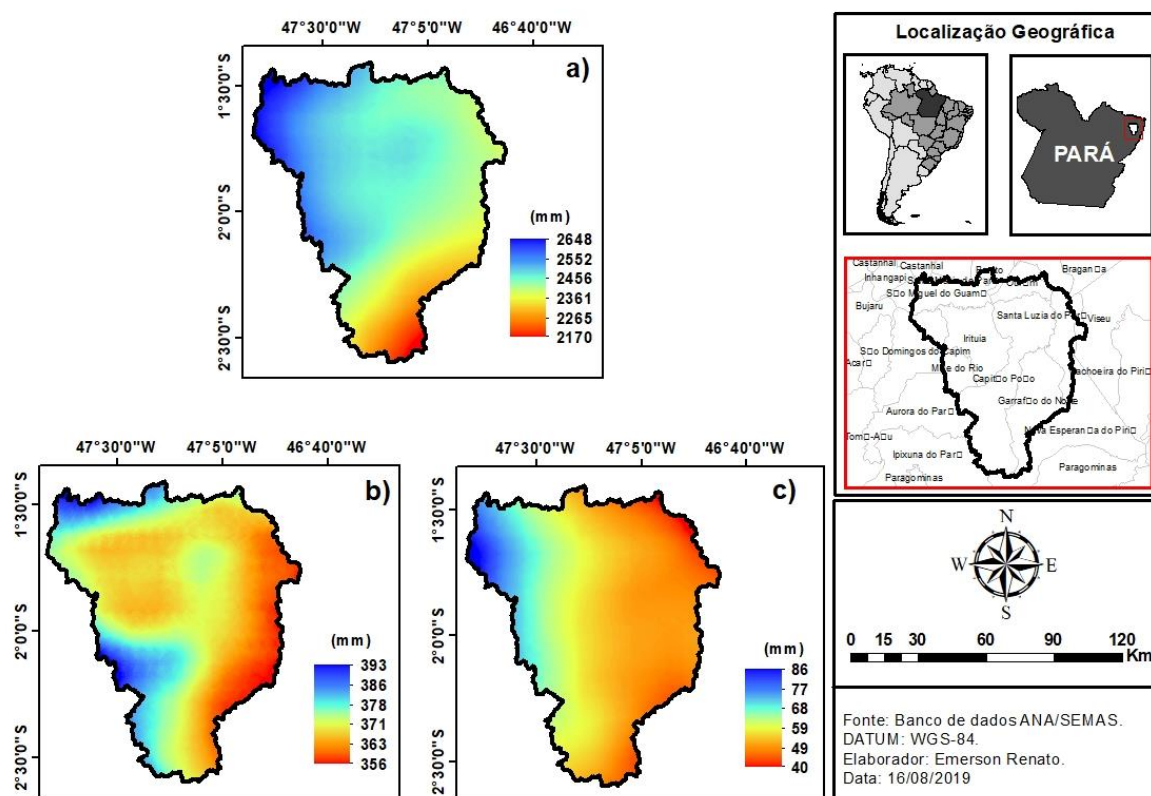
Identifica-se que para todos os meses, com exceção do mês de março, os valores estimados de precipitação pelo CHIRPS para a região são maiores do que os estimados pelo GPCC. Uma concordância nos valores somente ocorre para o mês de novembro. Constata-se também que ambas as bases de dados apresentam dimensões aproximadas nos valores dos desvios padrão. Lopes et al. (2013) cita ser comum a variabilidade natural de ano para ano da precipitação em torno dos valores médios.

De forma geral, ambas as bases de dados por satélite demonstram a existência na área da SBRG da mesma sazonalidade na quantidade de precipitação que é amplamente conhecida para a região amazônica (FIGUEROA; NOBRE, 1990; MARENGO, 1995; PAIVA; CLARK, 1995). Fisch et al. (1998) citam que o período de chuvas na região amazônica compreende os meses de novembro a março, enquanto que, os meses de maio a setembro representam o período de menor atividade convectiva (menos chuvoso). Os meses não citados representariam um período de transição entre os dois regimes citados.

A distribuição espacial dos dados de precipitação pluvial através da base de dados do CHIRPS fornece uma representação bem detalhada da climatologia na área da sub-bacia do rio Guamá. A baixa resolução espacial do produto GPCC gera mapas de interpolação da precipitação com regiões geométricas e acuminadas não condizentes com situações naturais. Logo, estes últimos dados não foram utilizados para a geração da distribuição espacializada da precipitação na área da SBRG.

A Figura 7 apresenta a interpolação, através da Krigagem universal, dos dados de precipitação acumulada média anual, fornecida pelo produto CHIRPS, para o período entre os anos de 1988 e 2018 na área em estudo. A fim de evitar a interferência dos meses de transição entre os períodos (chuvoso e menos chuvoso), a interpolação dos dados de precipitação também foi construída levando em consideração apenas o trimestre com os meses com maiores valores de precipitação (fevereiro, março e abril) e o trimestre com os meses de menores valores de precipitação (setembro, outubro e novembro).

Figura 7 – Distribuição espacial dos dados de CHIRPS da (a) precipitação acumulada média anual; (b) precipitação acumulada média para o trimestre mais chuvoso (fevereiro, março, abril) e (c) para o trimestre menos chuvoso (setembro, outubro e novembro) para o período de 1988 a 2018 (*Linha de contorno preta representa a delimitação da área da sub-bacia do rio Guamá).



Fonte: Autoria própria.

Observando o mapa com a média acumulada anual para o período (Figura 7a) é possível observar os maiores valores ($> 2.500 \text{ mm ano}^{-1}$) de precipitação pluvial posicionados na porção noroeste e os menores ($< 2.500 \text{ mm ano}^{-1}$) na porção sudeste da sub-bacia. Dos dados pluviométricos interpolados, a precipitação média anual variou de 2.170 a 2.648 mm/ano e a precipitação mostrou um padrão geral crescente de sudeste

para noroeste na área da sub-bacia. De acordo com Fisch et al. (1998), o valor de 2.300 mm.ano⁻¹ representa a precipitação média encontrada para a região amazônica. Lopes et al. (2013), em seu estudo sobre a climatologia regional da precipitação no Estado do Pará, afirma que no nordeste paraense foram encontrados os maiores índices de precipitação ao longo do ano (valores superiores a 2.000 mm). Albuquerque et al. (2010), que também apresenta resultado semelhante a estes últimos autores, atribui estes valores elevados concentrados no nordeste paraense a ocorrência de sistemas de grande-escala como a ZCIT, forte convecção local, aglomerados de Cumulonimbus e à proximidade de áreas litorâneas.

Por outro lado, os mapas de médias sazonais consideram apenas os meses do trimestre chuvoso e menos chuvoso (Figura 7b e 7c, respectivamente). No trimestre chuvoso, os valores de precipitação mais altos (≥ 380 mm ano⁻¹) foram encontrados próximos ao litoral (porção noroeste). É importante destacar a porção sudoeste da área da sub-bacia, que no trimestre chuvoso, também apresentou altos valores (≥ 380 mm ano⁻¹). Os menores valores (< 380 mm ano⁻¹) de precipitação foram observados na faixa que vai de sudeste ao noroeste da sub-bacia. No trimestre menos chuvoso foram encontrados os menores valores (< 60 mm ano⁻¹) nas porções nordeste e sudeste da sub-bacia. Os maiores valores (> 70 mm ano⁻¹) de precipitação são observados em uma pequena porção a noroeste. De forma geral, para o trimestre mais chuvoso (Figura 7b) a distribuição espacial da precipitação apresentou comportamento crescente de sudeste para noroeste, com picos nas porções noroeste e sudoeste. Enquanto que, no trimestre menos chuvoso (Figura 7c) a distribuição espacial da precipitação apresentou apenas o padrão crescente de sudeste para noroeste na sub-bacia do rio Guamá.

Assinala-se que a distribuição das chuvas não é afetada pela topografia da região, pois a principal diferença entre os períodos sazonais é representada pela quantidade de chuva e não pela sua distribuição na área da sub-bacia. Segundo Figueroa e Nobre (1990), na Amazônia Oriental os valores de precipitação anual apresentam uma tendência de decréscimo da região costeira para o interior do Estado do Pará. Ainda segundo os autores este comportamento é originário da maneira como os sistemas de circulação penetram na região, fazendo com que os fenômenos de escala global (Zona de Convergência Intertropical) e mesoescala (Linhas de Instabilidade) tenham grande influência nas condições de precipitação da região (a qual inclui a sub-bacia do rio Guamá).

2.4 Conclusão

O presente estudo concentrou-se na avaliação da estimativa de chuva pelo CHIRPS, um novo banco de dados de climatologia de precipitação de alta resolução especificamente na área da sub-bacia do rio Guamá localizada no nordeste paraense.

Os dados observados através de pluviômetros foram correlacionados com os produtos de chuva estimados por satélite GPCC e CHIRPS, para o período de 1988 a 2018, obtendo-se correlação notadamente alta ($r = 0,99$) e índice de concordância satisfatório ($d = 0,98$). As duas bases de dados demonstram superestimação aproximada da precipitação (cerca de 12% e 13% para CHIRPS e GPCC, respectivamente). Em termos da sazonalidade, destaca-se que as métricas estatísticas entre os conjuntos de dados CHIRPS/observado são melhores para o período menos chuvoso, apesar do maior erro percentual médio (aproximadamente 16%). Comportamento similar foi encontrado para as métricas estatísticas obtidas para o conjunto de dados GPCC/observado. Neste caso, destaca-se que as métricas estatísticas demonstram através dos valores de BIAS e RMSE, que a proximidade entre a localização geográfica do pluviômetro e o ponto de extração da precipitação estimada contribui para a obtenção de resultados favoráveis.

Desta forma, na escala da sub-bacia do rio Guamá os dois produtos de satélite, CHIRPS e GPCC, apresentam métricas estatísticas aproximadas com valores satisfatórios e desempenho semelhante. O que indica que as duas bases de dados por sensoriamento remoto podem ser utilizadas sem prejuízo para conclusões posteriores, com resultados mais precisos para o período com menor quantidade de chuva na região da sub-bacia do rio Guamá.

A interpolação dos dados de precipitação a partir do CHIRPS demonstrou o padrão de distribuição espacial ao longo da sub-bacia do rio Guamá condizente com a literatura específica: elevados valores ($> 2.000 \text{ mm.ano}^{-1}$) de precipitação acumulada anual, sazonalidade evidenciada ao longo dos meses e crescimento da precipitação em direção ao litoral (sudeste à noroeste).

Por fim, os produtos de satélites estudados são gerados usando vários conjuntos de dados e vários procedimentos diferentes para a combinação, mistura e correção destes. Com base nas métricas estatísticas apresentadas observou-se a necessidade de corrigir as fontes de erros para melhor adaptar os dados de precipitação de sensoriamento remoto à sub-bacia do rio Guamá. Obtendo desta forma dados mais precisos dos dados em grade.

Devido à importante contribuição desta sub-bacia para o desenvolvimento econômico e social da região, e a escassez de trabalhos específicos na área de estudo apresentada, a presente pesquisa mostrou-se relevante para o acompanhamento pluviométrico da região a partir de outras bases de dados de amplo acesso. Bases estas que apresentam uma maior regularidade de medições em um período também maior na escala temporal.

CAPÍTULO 3 VARIÁVEIS FÍSICO-GEOGRÁFICAS E AS IMPLICAÇÕES SOBRE VULNERABILIDADE AMBIENTAL NA SUB-BACIA DO RIO GUAMÁ, PARÁ, BRASIL²

Resumo

A rede hidrográfica do rio Guamá é um sistema hidrológico bastante complexo em razão da inter-relação entre ambientes rurais e urbanos que sofrem influência antrópica em diferentes graus, principalmente em razão de atividades econômicas. Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho foi diagnosticar o uso e ocupação do solo juntamente com características físico-geográficas na área da sub-bacia do rio Guamá (nordeste paraense). Em seguida, com bases nas informações levantadas compreender como as características naturais e as ações do homem influenciam na vulnerabilidade ambiental da região. Foram usados processos de sensoriamento remoto e dados secundários para o estudo morfométrico (*Shuttle Radar Topography Mission* – SRTM), uso e ocupação da terra (imagens do satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres CBERS-4 – *China-Brazil Earth Resources Satellite*) e precipitação para os anos de 2015 a 2017 (CHIRPS – *Climate Hazards group Infrared Precipitations with Stations*). Para o estudo da distribuição cartográfica da vulnerabilidade ambiental foi aplicado o cruzamento de mapas base de geologia, tipo de solo, relevo, tipo de cobertura vegetal, clima e uso e ocupação da terra através da operação de álgebra de mapas e considerando-se o princípio de análise ecodinâmica. A área de estudo apresentou características físicas desfavoráveis ao abastecimento hídrico por localiza-se em altitude baixa e não ser bem drenada. Contudo, as características do relevo sugerem o favorecimento de baixo escoamento da água e baixa susceptibilidade à erosão e alagamentos. A quantidade elevada de chuva que foi registrada (média anual mínima de 2.295 mm e máxima de 2.729 mm) não é distribuída de forma homogênea e pode ser dividida sazonalmente em dois períodos (período chuvoso entre os meses de dezembro a maio e menos chuvoso de junho a novembro). Apesar dos valores elevados, as atividades relacionadas a agricultura, pecuária, pequenas indústrias, etc., podem ser impactadas pela ocorrência de valores extremos que podem ocasionar no rio Guamá secas ou inundações. Ressalta-se que muitos moradores locais moram à margem do rio

² Artigo publicado na Revista Ibero-americana de Ciências Ambientais (volume 11, número 3, p. 264-291. 2020), Qualis Capes B1 em Ciências Ambientais, DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2020.003.0022.

e o utilizam como meio de transporte, fonte de alimentos (pesca) e para atividades domésticas (consumo, banho, lavagem de roupa e louças). Notou-se maior porcentagem (aproximadamente 57%) de área classificada como solo exposto e vegetação rasteira do que área classificada como vegetação densa ou secundária (aproximadamente 42%). A redução e a ausência de cobertura vegetal primária em alguns trechos da área de estudo foram evidenciadas e demonstra-se a importância do monitoramento deste tipo de cobertura para a região. Na sub-bacia do rio Guamá as áreas de baixa, média e alta vulnerabilidade apresentaram as maiores porcentagens de ocorrência (aproximadamente 28%, 29% e 26%, respectivamente); e, representam áreas com constante ação de processos pedogênicos e morfogênicos. Desta forma, ressalta-se a importância do controle da expansão das atividades antrópicas, retirada da vegetação primária e respeito aos preceitos legais da legislação ambiental brasileira.

Palavras-chave: Sistemas de Informações Geográficas (SIG); Nordeste paraense; Geoprocessamento; Compartimentação morfométrica; Uso e cobertura do solo.

Abstract

The hydrographic network of the Guamá River is a very complex hydrological system due to the inter-relationship between rural and urban environments that suffer anthropic influence to different degrees, mainly due to economic activities. In this context, the objective of the present work was to diagnose the use and occupation of the soil together with physical-geographical characteristics in the area of the sub-basin of the Guamá River (northeast Pará). Then, based on the information gathered, understand how natural characteristics and human actions influence environmental vulnerability in the region. Remote sensing processes and secondary data were used for the morphometric study (Shuttle Radar Topography Mission - SRTM), land use and occupation (Sino-Brazil Land Resources Satellite images CBERS-4 - China-Brazil Earth Resources Satellite) and precipitation for the years 2015 to 2017 (CHIRPS - Climate Hazards group Infrared Precipitations with Stations). For the study of the cartographic distribution of environmental vulnerability it was applied the crossing of base maps of geology, type of soil, relief, type of vegetation cover, climate and land use and occupation through the operation of map algebra and considering the principle of

ecodynamic analysis. The study area presented physical characteristics unfavorable to the water supply because it is located in low altitude and not well drained. However, the relief characteristics suggest low water runoff and low susceptibility to erosion and flooding. The high amount of rainfall that has been recorded (minimum annual average of 2.295 mm and maximum of 2.729 mm) is not evenly distributed and can be seasonally divided into two periods (rainy period between the months of December and May and, less rainy period between the months of June and November). Despite the high values, activities related to agriculture, livestock, small industries, etc., can be impacted by the occurrence of extreme values that can cause in the Guamá River droughts or floods. It is noteworthy that many local residents live on the riverbank and use it as a means of transportation, source of food (fishing) and for domestic activities (consumption, bath, washing clothes and dishes). A higher percentage (approximately 57%) of the area classified as exposed soil and ground vegetation was noted than the area classified as dense or secondary vegetation (approximately 42%). The reduction and absence of primary vegetation cover in some parts of the study area were evidenced and the importance of monitoring this type of cover for the region was demonstrated. In the sub-basin of the Guamá River the areas of low, medium and high vulnerability presented the highest percentages of occurrence (approximately 28%, 29% and 26%, respectively); and, represent areas with constant action of pedogenic and morphogenic processes. Thus, the importance of controlling the expansion of anthropic activities, removal of primary vegetation and respect for the legal precepts of Brazilian environmental legislation is highlighted.

Keywords: Geographic Information Systems (GIS); Northeastern paraense; Geoprocessing; Morphometric compartmentation; Use and land cover.

3.1 Introdução

O entendimento de bacia hidrográfica reconhece-a como um sistema interligado e que a subdivisão de grandes bacias em bacias menores (sub-bacias) facilita o diagnóstico e o monitoramento ambiental, correlações entre qualidade da água e a dinâmica de uso e ocupação da terra, delimitação de áreas críticas, identificação de processos impactantes entre outros estudos (MORAES; LORANDI, 2016). Assim, uma série de informações é necessária para o manejo adequado dos recursos hídricos

inseridos em um contexto dinâmico de funcionamento destes sistemas em uma bacia ou sub-bacia hidrográfica (LOPES et al., 2014).

Uma destas informações corresponde à análise morfométrica que representa um excelente instrumento de análise da dinâmica e da sensibilidade da bacia (ou sub-bacia) à deterioração ambiental, pois parâmetros morfométricos são obtidos a partir de dados físicos do local e possuem uma alta correção com a morfologia, clima e pedoforma (FRANCO et al., 2016). De acordo com Lima (1976) e Santos e Coelho (2020), o comportamento hidrológico de uma bacia (ou sub-bacia) hidrográfica é função de suas características geomorfológicas (forma, relevo, área, geologia, rede de drenagem, solo, etc.) e do tipo de cobertura vegetal existente.

A precipitação dificilmente segue um padrão físico idêntico (MARCIANO et al., 2018) e também representa uma excelente fonte de informações. De acordo com Amanajás e Braga (2012), em regiões tropicais, como a Amazônia, a precipitação apresenta-se como uma informação fortemente ligada ao planejamento das atividades do homem e ao desenvolvimento local. Os autores citam ainda a importância da regularidade e distribuição espacial desta variável climatológica como fatores limitantes ao desenvolvimento das atividades agrícolas na região e ao manejo dos recursos naturais.

Gutierrez et al. (2017) e Silva et al. (2016) relatam as modificações sofridas pelas paisagens decorrentes das alterações de uso e ocupação da terra ocasionadas pelo homem. Nota-se que neste cenário de transformações que os vários tipos de usos da terra, que antes eram ocupadas por vegetação, vão convertendo paisagens naturais em extensas áreas antropizadas (GUTIERREZ et al., 2017; PONTE et al., 2016). Contudo, verifica-se a existência de uma distinção entre os tipos, a magnitude e a periodicidade das atividades antrópicas em diferentes bacias (ou sub-bacias) hidrográficas. O que ocasiona uma dificuldade em estabelecer generalizações (ANA, 2011) na descrição das características e potencialidades de cada localidade (SOUZA et al., 2017).

A rede hidrográfica do rio Guamá é um sistema hidrológico bastante complexo em razão da inter-relação entre ambientes rurais e urbanos que sofrem influência antrópica em diferentes graus, principalmente em razão de atividades econômicas (IDESP, 2014). A Bacia Hidrográfica do Rio Guamá e Outros (BHRGO) é formada por um sistema de drenagem onde quatro rios se juntam. Cada um destes quatro rios compõe uma sub-bacia dentro da BHRGO, ou seja, as sub-bacias do rio Guamá (SBRG), rio Capim (SBRC), rio Acará (SBRA) e rio Moju (SBRM) formam, a partir de

sua confluência, um único sistema de drenagem possuindo como exutório a baía do Guajará, em frente à cidade de Belém (capital do estado do Pará). Entretanto, verifica-se que nos últimos anos muitos estudos (ABREU et al., 2007; ARAÚJO et al., 2011; BRAUN; AWRUCH, 2008; FUJIMOTO et al., 2020; MELO et al., 2012; RODRIGUES et al., 2018) relacionando aspectos hidrológicos, climáticos, biológicos, químicos, físico-químicos, entre outros foram concentrados em trechos da BHRGO localizados nas proximidades de seu exutório, às margens da capital do estado paraense, ou em pequenos trechos ao longo da bacia hidrográfica.

Dentre as quatro sub-bacia citadas, a sub-bacia do rio Guamá (SBRG) apresenta grande representatividade para a região (BARROS et al., 2012), devido ao uso da terra, crescimento econômico, expansão das atividades agropecuárias, propriedades físico-bióticas, características socioeconômicas, uso da água, etc. Assim, entende-se necessária uma ferramenta que promova uma abordagem integrada entre os aspectos antrópicos (uso e ocupação da terra) e os aspectos naturais (clima, relevo, solo, geologia, morfometria, etc.) de uma determinada área. Moreira et al. (2015) destacam os efeitos negativos na produção de água devido aspectos relacionados ao uso da terra, tipo de vegetação e as atividades antrópicas. O mapa de vulnerabilidade ambiental pode ser considerado uma ferramenta, com base no emprego do Sistema de Informação Geográfica (SIG) (MANZANO et al., 2019), voltada para estudos de cunho ambiental (COSTA et al., 2006); e que esta vulnerabilidade ambiental será formada por um grupo de fatores ambientais (naturais e antrópicos presentes ou futuros) que poderão afetar, parcial ou integralmente, a estabilidade ecológica de uma região (ANDERSEN; GOSK, 1989). Segundo Tagliani (2003), a vulnerabilidade ambiental de uma área está relacionada a sua maior ou menor susceptibilidade a um potencial impacto decorrente de qualquer tipo de uso antrópico; ou seja, o mapa de vulnerabilidade ambiental tem como principal finalidade fornecer uma representação de todo conhecimento no tempo presente das respostas dadas aos processos de uso do solo de uma determinada área (COSTA et al., 2006). Um sistema é mais vulnerável à medida que forem maiores as pressões e a sua sensibilidade, e menor sua capacidade de adaptação (MILANEZI; PEREIRA, 2016).

Desta forma, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o uso e ocupação do solo atual na área da sub-bacia do rio Guamá, localizada no nordeste do Estado do Pará, e juntamente com características físico-geográficas compreender as implicações das

transformações provocadas pela presença do homem sobre a vulnerabilidade ambiental da região.

3.2 Material e métodos

3.2.1 Área de estudo

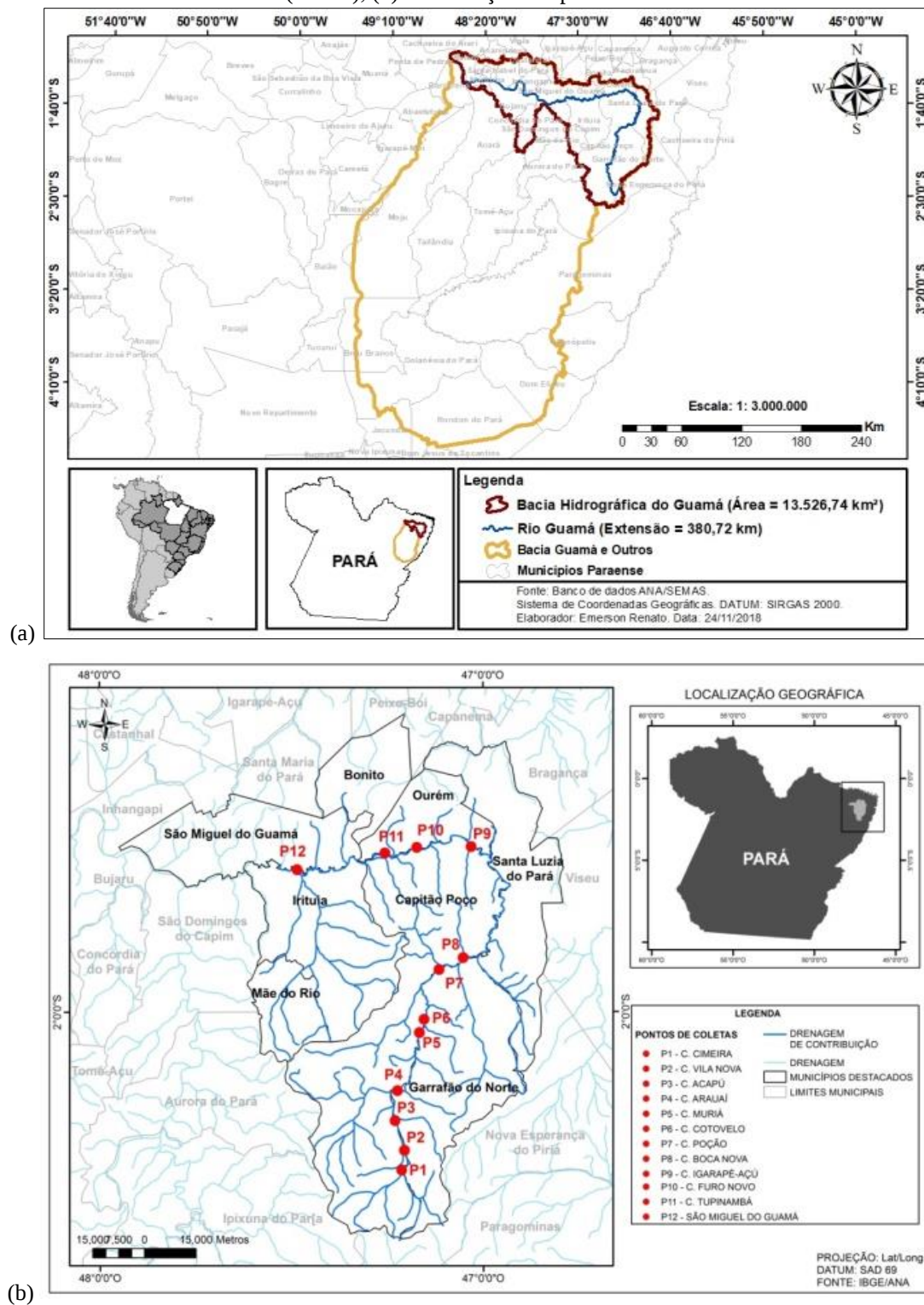
A modulação da bacia hidrográfica do rio Guamá e outros (BHRGO) está representada na Figura 1a. Os afluentes mais importantes estão na margem esquerda e são os rios Capim, Acará e Moju. O rio Guamá pode ser dividido em dois trechos onde a divisão ocorre no trecho em que o rio Capim deságua no rio Guamá na altura da cidade de São Domingos do Capim e juntos desaguam na foz localizada na baía do Guajará em Belém (Pará). Este trecho não será objeto de estudo desta pesquisa. A BHRGO está localizada na região nordeste do Estado do Pará, situada entre as coordenadas 1° 30' 00" e 2° 30' 00" de latitude Sul e 49° 00' 00" e 46° 30' 00" de longitude Oeste. Ainda de acordo com Figura 1a é possível observar toda a extensão do rio Guamá correspondente a 380,72 km.

A área de estudo deste trabalho (Figura 1b) compreende a sub-bacia do rio Guamá (SBRG) que se inicia nas matas dos municípios de Ipixuna e Nova Esperança do Piriá (acima de Paragominas), seguindo por Capitão Poço e Garrafão do Norte, a sudoeste, e finalmente dirigindo-se para norte-nordeste até o município de Ourém. Deste ponto em diante o rio flete para oeste, divisando São Miguel do Guamá de outros três municípios. Os municípios que abrangem a SBRG são: Aurora do Pará, Bonito, Capitão Poço, Garrafão do Norte, Ipixuna do Pará, Irituia, Mãe do Rio, Nova Esperança do Piriá, Ourém, Santa Luzia do Pará, São Domingos do Capim e São Miguel do Guamá, localizados na mesorregião do nordeste paraense e microrregião do Guamá. Esta porção da bacia não sofre a influência do rio Capim que representa um curdo d'água de grande extensão e volume. Logo, o trecho em estudo tem como rio principal apenas o rio Guamá. A área da sub-bacia do rio Guamá (SBRG) corresponde a 65,69% da área total da bacia hidrográfica do rio Guamá.

Na Figura 1b é possível observar a rede de drenagem do rio principal e a localização de algumas comunidades às margens do rio Guamá (pontos circulares em vermelho). A sub-bacia hidrográfica do rio Guamá (SBRG) está localizada na Mesorregião do Nordeste Paraense (formada por 49 municípios) e na microrregião do

Guamá (BELATO et al., 2018), situada entre as coordenadas $1^{\circ} 30' 00''$ e $2^{\circ} 30' 00''$ de latitude Sul e $47^{\circ} 30' 00''$ e $47^{\circ} 00' 00''$ de longitude Oeste.

Figura 1 – (a) Dimensão espacial da bacia hidrográfica do rio Guamá e outros (BHRGO) e da área em estudo: sub-bacia do rio Guamá (SBRG); (b) Distribuição dos pontos amostrais na área em estudo.



Fonte: Autoria própria.

A classificação de Köppen para o clima da região é do tipo megatérmico Af possuindo um clima quente tropical úmido, com chuvas em todas as estações, temperatura média anual entre 24 e 26°C (FISCH et al., 1998; NIMER, 1989;). A precipitação apresenta grande variabilidade espaço-temporal ao longo do ano (AMANAJÁS; BRAGA, 2012) podendo ser identificados dois períodos distintos: um chuvoso com elevada precipitação e diretamente influenciado pela migração sazonal da Zona de Convergência Intertropical (ZTIC) na direção meridional; e outro menos chuvoso, sem período de seca definido (FISCH et al., 1998; SOUZA; AMBRIZZI, 2003).

São encontrados na área da SBRG, a partir da base de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) na escala de 1:250.000, cinco classes de solos, distribuídos da seguinte forma: 82% Latossolo Amarelo, 5% de Neossolo Quartzarcnico, 4% de Argilossolo Vermelho-amarelo, 8% de Gleissolo Háplico e 1% de Massa D'Água.

3.2.2 Dados morfométricos

Para realização desse trabalho foi utilizado o software *QuantumGIS* versão 3.4 (*software* gratuito) e algumas de suas diversas ferramentas. Além do *software Global Mapper* que foi utilizado no georreferenciamento de algumas imagens.

Inicialmente, delimitou-se a sub-bacia do rio Guamá, e seus tributários para preparação da análise morfométrica. Desta forma, elaborou-se o mapa de drenagem partir dos dados georreferenciados do relevo, ou seja, foi produzido um modelo digital de elevação (MDE) com a rede hidrográfica.

A delimitação da SBRG foi realizada a partir dos dados georreferenciados do relevo da área, os quais são derivados de produtos da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM, em português Missão Topográfica Radar Shuttle) com resolução espacial de 30 metros, disponibilizado de forma gratuita na base de dados da *Earth Resources Observation and Science* (EROS) e *United States Geological Survey* (USGS) (MENDES, 2018). Assim, para realizar o processamento utilizou-se de determinadas extensões do software QGIS e da ferramenta TauDEM (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Models*), versão 5.3, que se constitui em uma extensão gratuita que pode ser instalada no programa QGIS. Para a sub-bacia hidrográfica do rio Guamá foram utilizados os arquivos S02W048, S03W048, S02W047 e S03W047.

De posse da delimitação da sub-bacia hidrográfica do rio Guamá e dos demais resultados, como o MDE, foram determinadas as características físicas da sub-bacia. Segundo Tonello (2005), as características morfométricas são divididas em características geométricas, do relevo e da rede de drenagem.

As características geométricas são formadas pela forma da bacia, área total da bacia e perímetro total, coeficiente de compacidade (Kc), fator de forma (F), índice de circularidade (IC) e padrão de drenagem (CHRISTOFOLETTI, 1980; SANTOS et al., 2017; TONELLO, 2005;). As características do relevo são formadas pela altitude mínima, altitude máxima, amplitude altimétrica, gradiente de canais (Gc), relação de relevo (Rr) e declividade (em porcentagem) (HORTON, 1945; MACHADO et al., 2011; SCHUMM, 1956; VILLELA; MATTOS, 1975).

As características da rede de drenagem são formadas pela ordenação dos canais (quantidade de canais por ordem e extensão total dos canais por ordem), comprimento do curso d'água principal; comprimento total dos cursos d'água; densidade de drenagem (Dd), densidade de rios ou hidrográfica (Dh), extensão do percurso superficial (Eps) e índice de rugosidade (Ir) (CHRISTOFOLETTI, 1980; HORTON, 1945; MACHADO, 2004; PINTO JR; ROSSETE, 2005; SANTOS et al., 2017; STIPP et al., 2010; STRAHLER, 1952). Para todos os parâmetros morfométricos calculados é possível consultar as fórmulas expostas na Tabela 1.

Tabela 1 – Fórmulas utilizadas para os cálculos dos parâmetros morfométricos da sub-bacia do rio Guamá.

Parâmetro	Fórmula*
Coeficiente de compacidade (Kc)	$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$
Fator de forma (F)	$F = \frac{A}{L^2}$
Índice de circularidade (IC)	$IC = \frac{12,57 \times A}{P^2}$
Gradiente de canais (Gc)	$Gc = \frac{\left(\frac{A_{máx}}{L}\right)}{10}$
Relação de relevo (Rr)	$Rr = \frac{H_m}{L}$
Densidade de drenagem (Dd)	$Dd = \frac{L_t}{A}$
Densidade de rios ou hidrográfica (Dh)	$Dh = \frac{N}{A}$
Extensão do percurso superficial (Eps)	$Eps = \frac{1}{2Dd}$
Índice de rugosidade (Ir)	$Ir = H_m \times Dd$

* P = perímetro da bacia; A = área de drenagem da sub-bacia; L = comprimento do eixo da sub-bacia. A_{máx} = altitude máxima; H_m = amplitude altimétrica; L_t = comprimento total dos rios ou canais; N = número total de cursos d'água.

3.2.3 Dados do uso e ocupação do solo

Para a análise do estado atual do uso e ocupação da terra na área da sub-bacia do rio Guamá foram utilizadas informações extraídas do processo de segmentação de imagens do satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres CBERS-4 (*China-Brazil Earth Resources Satellite*): sensor MUX (câmera multiespectral regular – imageador de média resolução) nas bandas 8, 7 e 6, respectivamente 0,77-0,89 μm (NIR), 0,52-0,59 μm (G) e 0,63-0,69 μm (R) para realização das composições coloridas falsa-cor para posterior classificação das mesmas; resolução espacial de 20 metros (imagea toda a superfície terrestre em 26 dias – dias de revisita); quantização de 8 bits; órbita /ponto 160/102, 161/102 e 160/103 todos do dia 17 de julho de 2017 (imagens selecionadas devido menor cobertura de nuvens). As informações são disponibilizadas de maneira gratuita no site <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>. Destaca-se que as imagens obtidas para a área de estudo já são georreferenciadas, tratadas pela plataforma do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e disponibilizadas em formato FTP via internet.

De acordo com Freitas (2010), o satélite CBERS surgiu em 1988 a partir de uma parceria entre o Brasil e a China, no setor técnico científico espacial, no sentido de assegurar uma regularidade no abastecimento e disponibilidade de dados orbitais de sensores remotos. O satélite CBERS-4 é o quinto produto deste programa entre os dois países e disponibiliza suas imagens de maneira gratuita para milhares de usuários para fins de uso nas áreas ambiental, agrícola e/ou planejamento urbano (SANTOS, 2014). Ainda de acordo com o autor, este satélite possui quatro câmeras de alta resolução, desloca-se a uma velocidade de 4,2 km/s e os seus quatro sensores (MUX, PAN, IRS e WFI) enviam imagens de 120 km a 860 km de extensão. Posteriormente, com as imagens obtidas foi realizada a fusão das imagens CBERS-4 para a área da sub-bacia do rio Guamá utilizando software livre QuantumGIS, versão 3.4, no Laboratório de Geoprocessamento, Análise Espacial e Monitoramento por Satélite (LAGAM) localizado na Universidade Federal Rural da Amazônia.

A coleta de pontos de amostragem de uso e ocupação de solo foi obtida com auxílio de aparelho de GPS (Garmin, GPSMAP®, série 78) e foi realizada em condição de campo na área da SBRG (Tabela 2). Durante as saídas de campo foram selecionadas doze comunidades localizadas às margens do rio Guamá (Figura 1b) para a conferência dos dados. Estas campanhas foram realizadas durante os anos de 2015 (fevereiro e junho), 2016 (janeiro e junho) e 2017 (fevereiro e junho). É importante citar que o rio

Guamá é utilizado como um marcador geográfico que separa os limites territoriais dos municípios da região, por isso a dualidade da localização municipal dos pontos (Tabela 2).

Tabela 2 – Pontos de coleta por comunidade.

Ponto	Comunidade	Latitude (S)	Longitude (W)	Municípios
1	Cimeira	2° 24' 30"	47° 12' 53"	Capitão Poço/Garrafão do Norte
2	Vila Nova	2° 21' 50"	47° 12' 7"	
3	Acapu	2° 16' 53"	47° 13' 33"	
4	Arauaí	2° 12' 1"	47° 13' 27"	
5	Muriá	2° 3' 4"	47° 9' 38"	
6	Cotovelo	2° 0' 46"	47° 9' 16"	
7	Poção	1° 53' 20"	47° 6' 41"	
8	Boca Nova	1° 51' 20"	47° 2' 52"	Ourém/Capitão Poço
9	Igarapé-Açu	1° 33' 48"	47° 1' 55"	
10	Furo Novo	1° 34' 5"	47° 10' 18,"	
11	Tupinambá	1° 35' 8"	47° 15' 4"	São Miguel do Guamá/Irituia
12	Centro urbano	1° 37' 31"	47° 29' 5"	

Fonte: Autoria própria.

O catalogo de imagens do INPE dar informações para a correção manual da imagem, no entanto o próprio INPE disponibiliza as imagens já tratadas. Consecutivamente, foi realizada a classificação supervisionada de padrões com a utilização do *plugin Dzetsaka Classification Tool* baseado no classificador *Gaussian Mixture Model* (Modelo de Mistura Gaussiano) que apresenta bons resultados para determinar as classes Favuel et al. (2015). Segundo Batista et al. (2009), a classificação supervisionada é fundamentada em estabelecer um determinado grupo de pixels como proveniente de uma classe específica. Ressalta-se que para a classificação foi contemplado um conjunto de polígonos relativos a cada classe escolhida (um total de 280 amostras sendo 50 amostras para a classe de vegetação densa, 50 amostras para vegetação secundária, 50 amostras para vegetação rasteira, 50 amostras para solo exposto e 80 amostras para classe de corpos d'água), referente às principais classes a serem discriminadas no mapa de uso e ocupação da terra.

Depois de finalizada esta etapa, gerou-se o índice Kappa da imagem classificada para validar a precisão dos resultados da classificação supervisionada. Este índice foi calculado conforme citado por Hudson e Ramm (1987) e sua exatidão por Congalton e Green (1999). Os valores deste índice variam na escala de 0 e 1, onde 0 significa que não há concordância entre a imagem classificada e a imagem de referência e 1 significa

que as imagens são totalmente idênticas. Desta forma, quanto maior o índice Kappa melhor a exatidão da classificação. Segundo Landis e Koch (1977), os níveis de relevância para o índice Kappa variam de: $< 0,00$ (relevância nula); 0,02 a 0,2 (relevância ruim); 0,21 a 0,4 (relevância fraca); 0,41 a 0,6 (relevância moderada); 0,61 a 0,8 (relevância substancial); e, 0,81 a 1,00 (relevância quase perfeita).

Por fim, com as classificações geradas, os resultados foram representados na forma de mapa de uso e ocupação da terra da sub-bacia do rio Guamá. Foram determinadas as seguintes classes de uso: vegetação densa; vegetação secundária, vegetação rasteira, solo exposto e água. A elaboração final do layout dos mapas também foi feita no software *QuantumGIS*, versão 3.4.

3.2.4 Dados de precipitação

De acordo com Jiménez et al. (2013), a radiação eletromagnética refletida e emitida pela superfície e atmosfera do planeta é detectada por sensores presentes em satélites. A radiação eletromagnética é interpretada no espectro eletromagnético de acordo com determinados comprimentos de onda. Ainda segundo os autores, as agências administradoras destes satélites fazem o processamento dos dados brutos de radiação e disponibilizam estes dados de sensoriamento remoto em formato espacial tipo raster (pixel) em diferentes resoluções temporal e espacial.

Os dados de chuva utilizados neste trabalho foram obtidos a partir da chuva estimada por sensoriamento remoto e disponibilizada pela base de dados de precipitação de alta resolução do produto CHIRPS (*Climate Hazards group Infrared Precipitations with Stations*), para o período compreendido entre os anos de 2015 a 2017. É importante destacar que o CHIRPS utiliza um algoritmo de ponderação da distância inversa no processo de tratamento dos seus dados (DUAN et al., 2016) em escala que cobre quase todo globo (entre 50°S a 50°N e todas as longitudes) desde 1981 até a presente data (DUAN et al., 2016). Além de fornecer um conjunto de dados de precipitação de alta resolução espacial a 0,05° x 0,05° de resolução horizontal (cerca de 5 km, no equador) (ESPINOZA et al., 2019; FUNK et al. 2015).

De acordo com Silva et al. (2019), a produção de dados elaborada pelo CHIRPS é formada por estações meteorológicas (convencionais e automáticas) distribuídas por mais de 27 mil pontos pelo planeta e por dados provenientes de satélites meteorológicos. Para o produto finalizado é realizada a comparação dos dados

derivados das estimativas de precipitação por satélite (FUNK et al., 2015) com dados provenientes de estações de superfície. Além da combinação dos dados de estações de medição com dados de estimativas de precipitação obtidos via sistemas de satélites com alta resolução do GPCC (*Global Precipitation Climatology Centre*) e CRU (*Climatic Research Unit*).

Os dados utilizados neste trabalho foram adquiridos através do sítio eletrônico <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps/>, em formato NetCDF, GeoTiff e Esri BIL. Sendo que, para a área da sub-bacia do rio Guamá foram incorporados 546 pontos de grade que foram posteriormente tratados. Para realização das análises estatísticas no conjunto de dados foi utilizado o software R, através da implementação das funções disponíveis nos pacotes. Desta forma, foi possível relacionar as classes de uso e ocupação do solo atuais da área de estudo, as características morfométricas e o comportamento da chuva no período compreendido entre 2015 e 2017 (período sob análise). A elaboração final do layout dos mapas também foi feita no software *QuantumGIS*, versão 3.4.

3.2.5 Dados para vulnerabilidade ambiental

Existe uma grande dificuldade na comparação de resultados sobre vulnerabilidade, pois não existe um consenso científico acerca do seu significado. Logo, a escolha dos indicadores para o estabelecimento da vulnerabilidade deve ser realizada com base no conceito adotado e no objetivo da análise (FIGUEIRÊDO et al., 2010). Com base no interesse do presente estudo foram levantadas as características físicas, bióticas e antrópicas consideradas como objeto de estudo para a vulnerabilidade ambiental na sub-bacia do rio Guamá.

Conforme Costa et al. (2006), as variáveis geologia e tipo de solo são importantes, pois estão relacionadas à morfogênese e a pedogênese. Enquanto que, o tipo de vegetação se relaciona com a estrutura das redes e teias alimentares, estágio de fitossucessão e a biodiversidade. Ainda segundo estes autores as pressões antrópicas são identificadas através das informações de uso e ocupação da terra. De acordo com Milanezi e Pereira (2016), a declividade está diretamente relacionada à susceptibilidade a erosão, pois quanto maior a inclinação do relevo maior os agravos. Os autores afirmam que a inclinação transforma a energia potencial em energia cinética, ocasionando elevação na velocidade das massas de água que são escoadas na superfície. O clima, representado pela precipitação mensal entre os anos de 2015 e 2017, foi

adicionado devido às evidências apresentadas anteriormente da variabilidade espacial da precipitação na sub-bacia do rio Guamá.

Quanto à obtenção destas variáveis, anteriormente foram apresentadas as formas de aquisição dos dados para as variáveis: declividade, clima e uso e ocupação da terra. Os dados de geologia e solos foram obtidos a partir dos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) do projeto RADAM. Os dados obtidos para tipo de cobertura vegetal são provenientes do Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira – PROBIO.

Desta forma, o mapa de vulnerabilidade ambiental foi gerado a partir do cruzamento de mapas base de geologia, tipo de solo, relevo (representado pela declividade), tipo de vegetação, clima (representado pela precipitação pluvial) e uso e ocupação da terra, para identificação da intensidade e da distribuição da vulnerabilidade na área de estudo. O conjunto das variáveis físico-geográficas selecionadas foi integrado para geração e armazenamento da base de dados georreferenciada no software *QuantumGIS*, versão 3.4, através da operação de álgebra de mapas. De acordo com Klais et al. (2012), a análise de informações geográficas realizada pela álgebra de mapas é formada por um conjunto de técnicas que incluem a reclassificação, a interseção (*overlay*) e operações matemáticas entre mapas e bancos de dados.

A integração dos dados seguiu as orientações do modelo estabelecido por Crepani et al. (2001), onde o grau de vulnerabilidade estimado para cada classe de uma determinada variável é distribuído em uma escala de 1,0 a 3,0. Segundo Tricart (1977), a escala de vulnerabilidade é realizada com base na caracterização morfodinâmica e é estipulada de acordo com critérios oriundo dos princípios da Ecodinâmica. Assim, os valores próximos a 1,0 representam situações onde predominam os processos de pedogênese (ambientes estáveis); os valores em torno de 2,0 representam situações intermediárias (ambiente de equilíbrio/intermediário); e, valores próximos a 3,0 que representam situações onde predominam os processos erosivos que modificam as formas de relevo (morfogênese) (ambientes instáveis). Sendo assim, adotou-se graus de vulnerabilidade para cada classe dentro das variáveis físico-geográficas selecionadas, conforme Carneiro et al. (2017), Crepani et al. (2001) e Leite e Rosa (2013).

Após o cruzamento dos mapas anteriormente obtidos, foi calculada a média aritmética ponderada dos valores de vulnerabilidade de cada classe. Este resultado aritmético foi organizado em cinco classes de vulnerabilidade ambiental, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Média aritmética para as classes de vulnerabilidade ambiental.

MÉDIA		GRAU DE VULNERABILIDADE	
VULNERABILIDADE ↑	2,7 – 3,0	ESTABILIDADE ↓	Muito Alta
	2,3 – 2,6		Alta
	1,8 – 2,2		Média
	1,4 – 1,7		Baixa
	1,0 – 1,3		Muito Baixa

Fonte: Crepani et al. (2001).

Para o cálculo final da vulnerabilidade ambiental foi aplicado o método de ponderação de fatores que permitisse a flexibilidade na compensação entre os fatores do conjunto de pesos compensatórios que determinam a importância relativa de cada fator (COSTA et al., 2006). Ainda segundo Costa et al. (2006), para obtenção de um mapa de vulnerabilidade ambiental que possa demonstrar melhor as especificidades de uma determinada área em relação ao grau e tipo de antropização, é atribuído um peso maior ao fator uso e ocupação da terra em relação aos demais (Tabela 4).

Tabela 4 – Pesos atribuídos a cada fator o estudo da vulnerabilidade ambiental.

Fator	Peso
Geologia	10% ou 0,1
Tipo de solo	10% ou 0,1
Declividade	10% ou 0,1
Tipo de vegetação	10% ou 0,1
Clima	10% ou 0,1
Uso e ocupação da terra	50% ou 0,5

Fonte: Crepani et al. (2001).

3.3 Resultados e discussão

3.3.1 Análise morfométrica

Em termos de caracterização geométrica, na Tabela 5 são apresentadas as características da sub-bacia hidrográfica do rio Guamá. O valor do coeficiente de compacidade (Kc) encontrado associado ao baixo fator de forma (F) da sub-bacia do rio Guamá indica que, em condições normais de precipitação, a SBRG é pouco suscetível a enchentes. O resultado do índice de circularidade (IC) indica um afastamento da unidade, e que sub-bacia não tende à forma circular, ou seja, possui forma mais alongada. Segundo Villela e Mattos (1975), a área de estudo apresenta menor concentração de deflúvio devido o afastamento da forma circular. Nota-se que a sub-

bacia apresenta uma forma triangular, pois é esta a figura geométrica que a cobre da melhor maneira possível. Para uma bacia ou sub-bacia, o sistema de drenagem é constituído pelo canal principal e seus canais tributários. O padrão de drenagem vai depender da estrutura geológica do local, tipo de solo, topografia e clima e irá influenciar no comportamento hidrológico de toda área da sub-bacia. O padrão encontrado para a sub-bacia do rio Guamá é o dendrítico. Este tipo de drenagem é característico de um controle estrutural realizado por sedimentos horizontais ou rochas cristalinas homogêneas e a falta de controle estrutural em rochas de resistência uniforme (SUMMERFIELD, 1991).

Tabela 5 – Características geométricas da sub-bacia do rio Guamá.

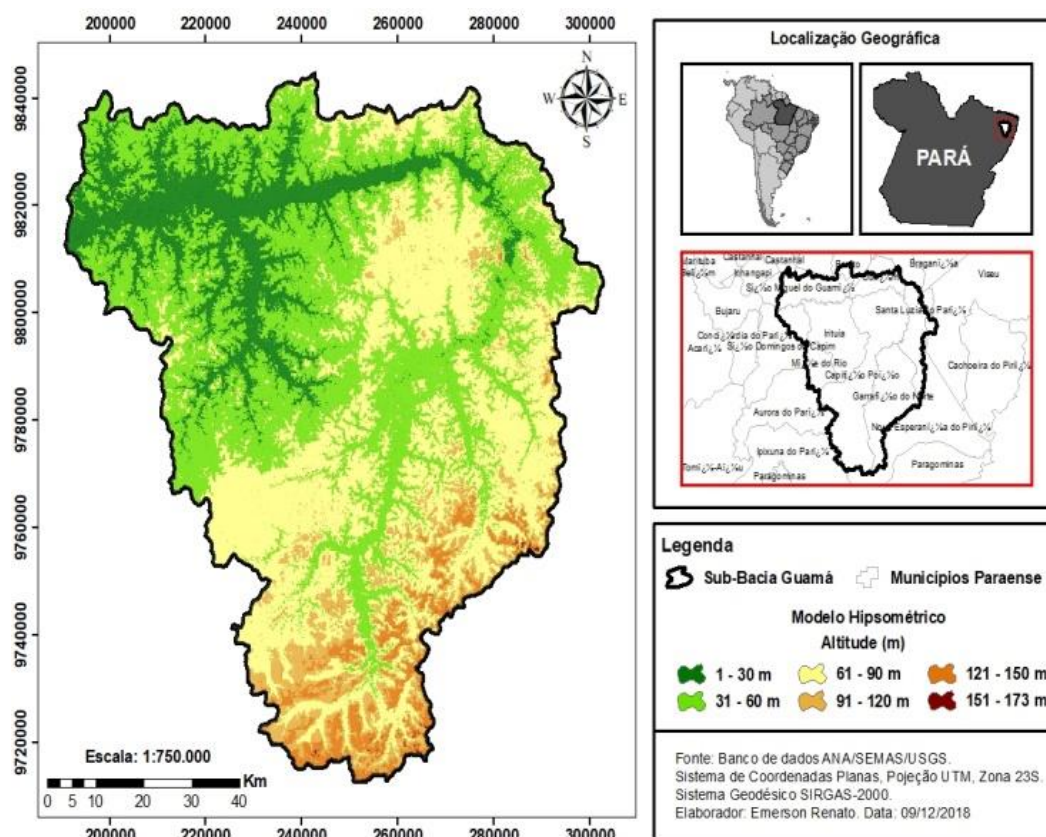
Característica	Valor
Área total (km ²)	8.886,16
Perímetro total (km)	554
Coefficiente de compacidade, Kc	1,65
Fator de forma, F	0,11
Índice de circularidade, IC	0,36
Padrão de drenagem	Dendrítico

Fonte: Autoria própria.

A Figura 2 apresenta a altimetria para a área da sub-bacia do rio Guamá e a Tabela 6 apresenta a porcentagem de ocorrência para cada faixa de altitude na área em estudo. É possível notar que cerca de 78% do relevo do local atinge até 90 m de altitude. Em termos de características de relevo a sub-bacia do rio Guamá apresenta altitude mínima ($A_{\min}$) de 1 m e altitude máxima ($A_{\max}$) de 173 m. A amplitude altimétrica (H_m) calculada é de 172 m, o que indica que esta sub-bacia não apresenta relevo montanhoso e apresenta relação direta com o índice de rugosidade (ALMEIDA et al., 2016). A variação de altitude e altitude média são fatores importantes, pois a temperatura e precipitação estão relacionadas com a elevação (GERBER et al., 2018; SANTOS et al., 2012). Variações de temperatura influenciam as perdas de águas que ocorrem na forma de evaporação e transpiração, já variações na precipitação atuarão diretamente no escoamento superficial e infiltração (VILLELA; MATTOS, 1975). O gradiente de canais (G_c) tem por finalidade indicar a declividade dos cursos d'água da bacia (FREITAS, 1952; HORTON, 1945;). O valor obtido para a sub-bacia do rio Guamá é igual a 0,61 m/Km ou 0,06%, que sugere baixa declividade no local e que não há o favorecimento de um escoamento rápido. A relação de relevo (R_r), segundo Schumm (1956), releva que quanto maior o valor de R_r maior será o desnível entre a cabeceira e

o exutório, consequentemente maior será a declividade média da bacia. A Rr obtida para este estudo é igual a 0,61 m/Km. O que corrobora a baixa declividade da área da sub-bacia e corrobora o indicado pelo Gc. Logo, a sub-bacia apresenta baixo desnível entre a cabeceira e o exutório. O relevo de uma bacia hidrográfica apresenta importância fundamental sobre os fatores meteorológicos e hidrológicos, pois a velocidade do escoamento superficial é determinada pela declividade do terreno, enquanto que a temperatura, a precipitação e a evaporação são funções da altitude da bacia.

Figura 2 – Mapa hipsométrico da sub-bacia do rio Guamá.



Fonte: Autoria própria.

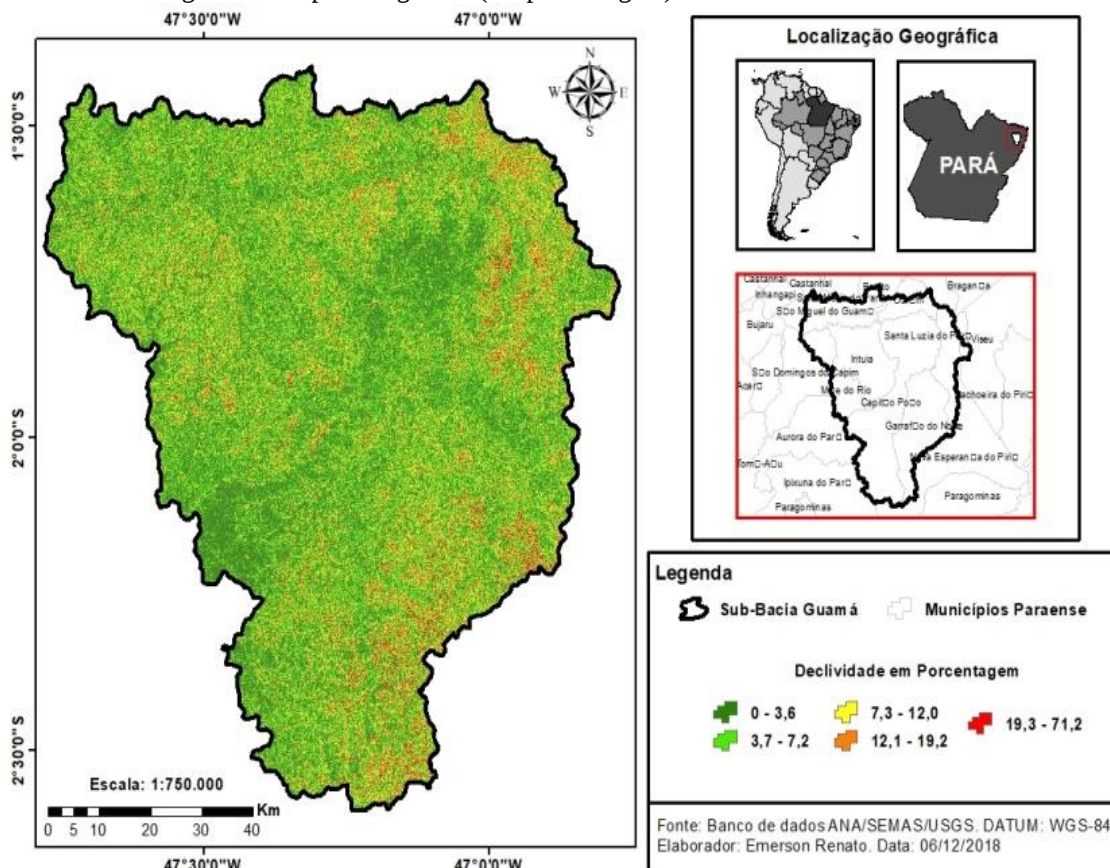
Tabela 6 – Porcentagem de ocorrência por faixa de altitude.

Faixa de altitude	Ponto médio (m)	Nº de ocorrência	Porcentagem de ocorrência (%)
1 - 30 m	15,5	3281	16,26
31 - 60 m	45,5	6571	32,56
61 - 90 m	75,5	5955	29,51
91 - 120 m	105,5	2998	14,86
121 - 150 m	135,5	1100	5,45
151 - 173 m	162,0	274	1,36
Total	-	20.179	100%

Fonte: Autoria própria.

A Figura 3 apresenta as declividades para a área da sub-bacia do rio Guamá. Por meio deste mapa é possível constatar que a área em estudo apresenta relevo com estrato, principalmente, de baixa declividade.

Figura 3 – Mapa clinográfico (em porcentagem) da sub-bacia do rio Guamá.



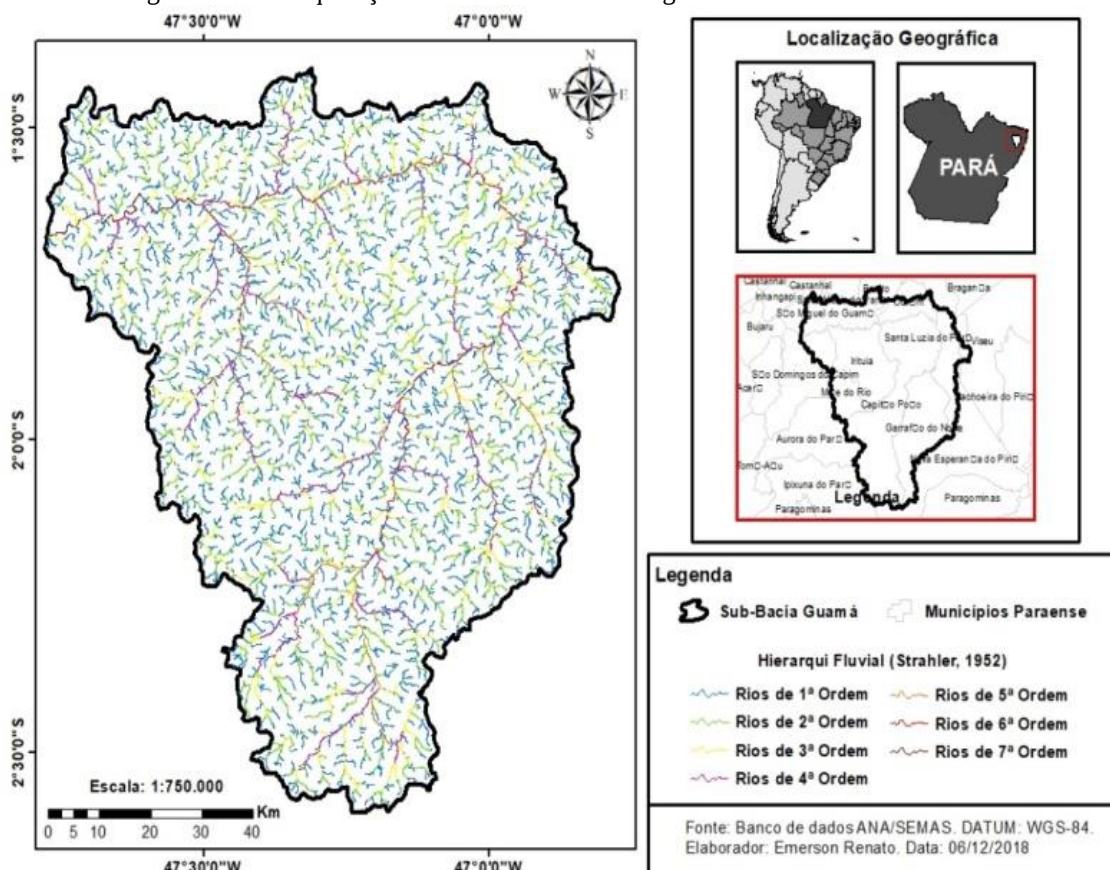
Fonte: Autoria própria.

Na área da SBRG identificam-se estratos de relevo plano (declividade de 0 a 3%) e suavemente ondulado (declividade de 3 a 8%), identificados pela predominância da coloração verde forte e clara por toda área da sub-bacia. Somente na porção sul (à esquerda do rio Guamá) e porções nordeste/leste da bacia são encontrados estratos de relevo com forte ondulação (declividade de 20 a 45%) e montanhosos (declividade de 45% a 75%), onde é atingido um máximo de 71,2% de declividade (MENDES, 2018). Com isso espera-se uma menor velocidade de escoamento e tempo de concentração maior, que representa o tempo necessário para que toda a bacia esteja contribuindo na seção de saída (SILVEIRA, 2005). Desta forma, não se espera picos de enchentes na área da sub-bacia em estudo, conforme já indicaram os parâmetros geométricos citados anteriormente. De acordo com Barreto et al. (2017) e Miotto et al. (2017), atividades

relacionadas à agricultura e a pecuária que empregam práticas simples de manejo do solo são favorecidas em áreas com inclinação reduzida, pois possuem baixa propensão à erosão do solo e favorecimento da infiltração da água no solo.

A Figura 4 apresenta a hierarquização fluvial da rede de drenagem da sub-bacia hidrográfica do rio Guamá.

Figura 4 – Hierarquização fluvial da rede de drenagem da sub-bacia do rio Guamá.



Fonte: Autoria própria.

Com base na hierarquização fluvial é possível destacar que um total de 51,55% dos canais fluviais é de primeira ordem com um total de 3.667,80 km de extensão; 24,67% são de segunda ordem com um total de 1.910,6 km de extensão; 13,98% são de terceira ordem com um total de 967,80 km de extensão; 6,81% são de quarta ordem com um total de 432,62 km de extensão; 2,05% são de quinta ordem com 126,82 km de extensão; 3,61% são de sexta ordem com um total de 216,46km de extensão; e, 0,59% são de sétima ordem com um total de 45,60 km de extensão. Quanto maior a participação percentual de canais de primeira ordem maior é a fragilidade da paisagem, pois os mesmos indicam maior dissecação do relevo, que pode ser provocada por

controle estrutural, como falhas, fraturas ou dobramentos (VILELA FILHO; VITTE, 2005). Sabe-se também que quanto maior o comprimento do rio principal, maior será o número de canais de 1ª ordem que o alimenta (SANTOS; CARNEIRO; LOBÃO, 2017).

A Tabela 7 apresenta os valores associados à drenagem da sub-bacia do rio Guamá.

Tabela 7 – Características de drenagem da sub-bacia do rio Guamá.

Característica	Valor
Comprimento total dos cursos d'água (Km)	7.367,96
Comprimento do curso d'água principal (Km)	281,50
Ordenação do curso d'água principal	7ª
Densidade de drenagem, Dd (Km/Km²)	0,83
Densidade de rios, Dh (canais/Km²)	0,66
Extensão do percurso superficial, Eps (m)	0,60
Índice de rugosidade, Ir (m)	142,76

Fonte: Autoria própria.

A SBRG é classificada como de 7ª ordem, conforme classificação de Strahler (1952). De acordo com Beltrame (1994), valores de Dd entre 0,50 e 2,00 Km/Km² são classificados como medianos. Segundo Christofletti (1980), valores elevados de Dd indicam áreas com pouca infiltração e melhor estruturação dos canais. Logo, o valor de Dd de 0,83 Km/Km² para este estudo sugere que há um escoamento superficial mediano (drenagem mediana pelos canais disponíveis para escoamento), associado a um grau médio de dissecação topográfica em paisagens elaboradas pela atuação fluvial. Segundo Lollo (1995), valores de densidade hidrográfica (Dh) menores que 3 N/Km² são classificados como baixos, o que caracteriza a SBRG com baixa capacidade de gerar novos cursos d'água. Segundo os autores Silva et al. (2002), o sistema de drenagem de uma bacia pode ser facilmente alterado, bastando uma pequena mudança de gradiente de descarga do rio motivada, por exemplo, por pequenos ajustes neotectônicos e/ou elevação súbita da descarga da bacia, em razão de enxurradas associadas ao desmatamento em grande escala, à montante da bacia, os quais podem levar à erosão basal das margens côncavas, até a formação de barras de sedimentos, nas margens convexas, a jusante.

O valor Eps obtido para a área de estudo representa que 0,60 metros e representa a distância média percorrida pelas enxurradas antes de encontrar um canal permanente, ou seja, o comprimento do caminho percorrido pelas águas pluviais antes de se estabilizarem ao longo de um canal. Para Pinto Jr. e Rossete (2005), a maior parte das observações comprovam a influência no escoamento superficial está relacionada à

cobertura vegetal. Isso então coloca peso muito grande na cobertura vegetal, como fator controlador do escoamento superficial.

O índice de rugosidade evidencia maior diversidade de ambientes e maior movimento do relevo, o que implica na variação das declividades e comprimento das vertentes, além da dimensão das drenagens. A declividade influencia na infiltração e nos processos erosivos, em função do escoamento superficial indica a dissecação do relevo. Quanto maior esse coeficiente, mais restritiva serão as possibilidades de uso (irrigação, por exemplo) (MACHADO et al., 2011). Entretanto, para a sub-bacia em estudo, o valor de 142,76 metros pode ser considerado baixo, principalmente devido às baixas porcentagens de declividade da área e grau médio de dissecação do relevo. O valor encontrado neste estudo é favorável a utilização da sub-bacia em atividades agropecuárias.

3.3.2 Análise do uso e ocupação do solo

A Tabela 8 apresenta os valores de área (em hectare e km²) e de porcentagem (%) quanto ao uso e ocupação do solo na sub-bacia do rio Guamá com variações diversificadas.

Tabela 8 – Uso e ocupação do solo na sub-bacia do rio Guamá.

Classes	Área (hectare)	Área (km²)	Porcentagem (%)*
Vegetação densa	162.084,7	1.620,8	18,4
Vegetação secundária	210.249,9	2.101,5	23,8
Vegetação rasteira	177.701,3	1.777,0	20,1
Solo exposto	328.941,0	3.289,4	37,3
Água	3.857,3	38,6	0,4

*Porcentagem em relação à área total ocupada pela classe na sub-bacia. Fonte: Autoria própria.

A SBRG, como tantas outras bacias e sub-bacias hidrográficas no Brasil, é afetada por impactos ambientais oriundos do processo de ocupação desordenado e acelerado do solo. Atualmente, a sub-bacia está ocupada por 18,4% de área de vegetação densa e 23,8% de vegetação secundária. Totalizando 42,2% a ocorrência de áreas com a presença de algum tipo de vegetação (Tabela 6). A classe de vegetação rasteira encontrada pode estar associada com área de pastagem ou gramíneas, por isso não foram consideradas como área com vegetação. A área classificada como solo

exposto representa a maior porcentagem (37,3%) para uma classe individual dentro da sub-bacia. Esta última classificação representa áreas sem nenhum tipo de vegetação e que representa falta de proteção ao solo com consequências negativas como a perda de água.

A vegetação densa, também chamada de vegetação primária, possui elevada expressão local, com grande diversidade biológica e interferências antrópicas mínimas sem que haja alteração de suas características estruturais primárias e de espécies (BRASIL, 2009). Moraes e Lorandi (2016) destacam a associação entre a preservação da vegetação ciliar (vegetação característica de margens ou áreas adjacentes a corpos d'água, e pode ser considerada um ecossistema ripário) (LIMA, 1976) e à manutenção das diversas funções e serviços ecológicos, pois funciona como um sistema tampão que filtra os poluentes e como fonte de troca de matéria, energia e organismos. Desta forma, destaca-se a necessidade de restauração da vegetação primária, principalmente a vegetação ciliar no entorno de rios e nascentes no interior da sub-bacia. Afinal, este tipo de vegetação ainda atua como fonte de matéria e energia, refúgio de vida silvestre, filtro de nutrientes, controlador de temperatura e produtividade da água, além de servir de conexão entre paisagens e proteção contra a erosão, entre outros (ROMERO et al., 2014).

Ainda segundo Brasil (2009), a vegetação secundária, ou de regeneração, é o resultado de um processo natural avançado de regeneração da vegetação arbustiva e/ou arbórea (sucessão) devido ações humanas ou naturais que levaram a supressão total ou parcial da vegetação primária com possibilidade de ocorrência de espécies remanescentes originais. A classe de vegetação secundária também se destacou com, aproximadamente, 24% do total e pode ser encontrada em diferentes estágios de desenvolvimento. De forma geral, representa um prognóstico favorável da existência de áreas com vegetação em processo de recuperação ou restauração, seja natural ou artificial. Segundo Belato e Serrão (2019), a origem da vegetação secundária está relacionada ao abandono da terra após a utilização pelo homem para finalidades como a mineração, agricultura ou pecuária

A vegetação rasteira é constituída pela presença de gramíneas e que podem estar associadas às áreas de pastagem (PORTO et al., 2017). A quantidade encontrada para esta classe, aproximadamente 20%, supera a classe de vegetação densa, que apresentou aproximadamente 18%. A classe de solo exposto (cerca de 37%) está associada a presença do homem e as alterações realizadas na superfície do solo. As transformações

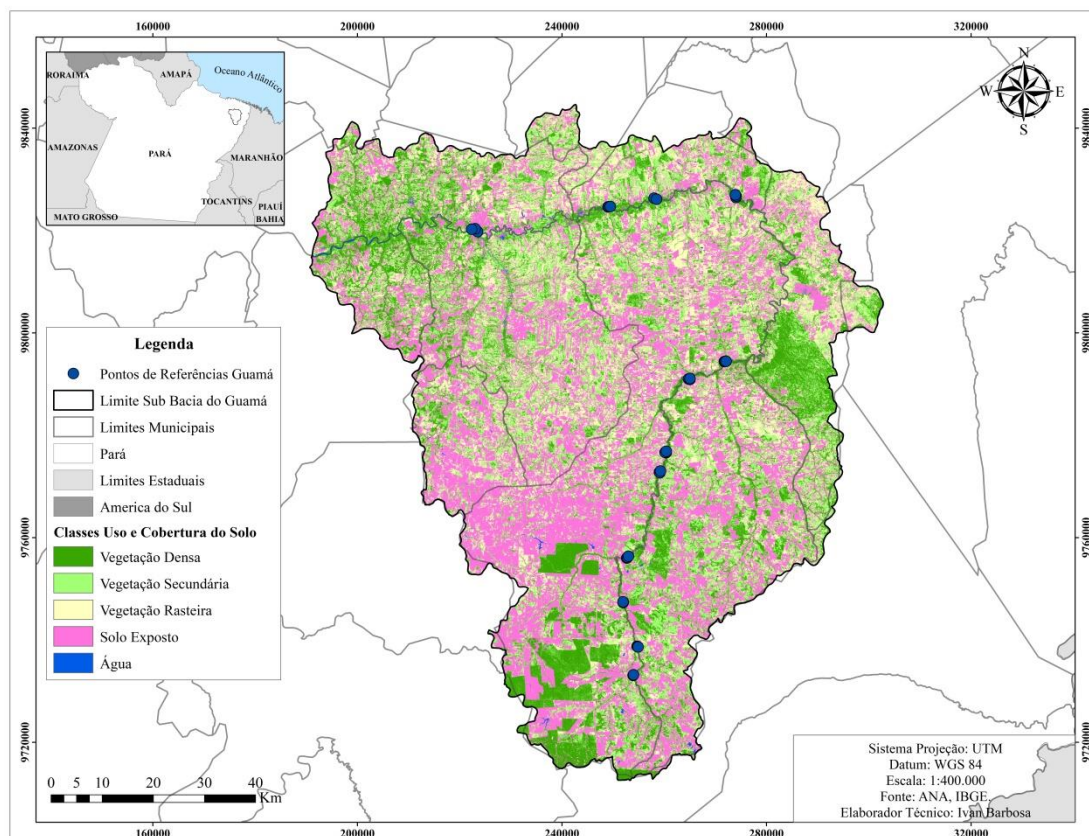
antrópicas da área da sub-bacia do rio Guamá podem estar relacionadas ao crescimento demográfico que os municípios da região vêm sofrendo ao longo dos anos, surgimento de indústrias e outros empreendimentos dependentes de uso de água, crescimento das atividades de agricultura e pecuária licenciadas e não licenciadas, mineração, entre outros. Segundo Neves et al. (2019), as principais contribuições para o processo de expansão dos centros urbanos são provenientes das áreas de vegetação rasteira seguida da classe solo exposto. Notou-se durante as visitas de campo na região da SBRG a existência de muitas áreas destinadas à pastagem localizadas nas margens do rio Guamá e seus afluentes. Este uso acarreta problemas como o assoreamento dos rios, pisoteio de suas margens, aumento das taxas de exportação de nutrientes para os corpos d'água, entre outros (MORAES; LORANDI, 2016). Silva et al. (2019) estudando a Reserva do Alto Rio Guamá, situada no município de Paragominas (nordeste paraense) entre os rios Guamá e Gurupi, constataram reduções na cobertura vegetal devido à expansão de atividades de agricultura e exploração madeireira.

Através da observação da Figura 5 nota-se a distribuição espacial das classes de uso e ocupação da terra na área de estudo. Verifica-se que, principalmente, a porção central/sudoeste da SBRG (entre a BR-010 e o rio Guamá) é composta por diversas áreas classificadas como solo exposto. A vegetação densa (ou primária) está representada por áreas dispersas na sub-bacia com as maiores manchas ocorrendo a norte, leste (referente a um trecho da Terra Indígena do Alto Rio Guamá nas proximidades da comunidade Boca Nova) e sudoeste (em Ipixuna do Pará) da sub-bacia. As áreas classificadas como vegetação secundária e vegetação rasteira encontram-se dispostas nas bordas das manchas que representam áreas de vegetação densa.

A baixa declividade do terreno é favorável ao cultivo de espécies agrícolas (CORSEUIL; CAMPOS, 2007), representadas nessa região pelo cultivo do dendê, cítricos, pimenta-do-reino, entre outras. A marcante presença de solo exposto foi observada em toda a área da SBRG. Atualmente, quando se percorre a SBRG é possível observar diferentes tipos de ocupação que suprimem a vegetação e mudam as feições dos rios para construção de habitações, desenvolvimento dos centros urbanos, pequenas comunidades, atividades agropecuárias e extrativistas (carvoaria, seixeira e madeireira), acarretando transtornos à sociedade. Segundo Silva et al. (2016), na mesorregião do nordeste paraense destacam-se os fatores mineração, ocupação humana (população) e agricultura no uso e cobertura do solo. No entanto, pouco se conhece sobre os efeitos

das mudanças no uso da terra no funcionamento, estrutura e qualidade desse rio. Em função de sua localização, área de abrangência, propriedades físico-bióticas, características socioeconômicas e uso da água para abastecimento público, a sub-bacia do rio Guamá possui diversos conflitos ambientais que são acentuados pelo crescimento das atividades agropecuárias.

Figura 5 – Mapa de uso e ocupação da terra na sub-bacia do rio Guamá.



Fonte: Autoria própria.

O IBGE (2016) no Relatório de Mudanças na Cobertura e Uso da Terra relata que na porção nordeste do Pará, próximo à divisa com Maranhão, antigas pastagens têm dado lugar ao cultivo de soja e as extensas plantações de dendzeiros, do qual é extraído o óleo utilizado na produção de biodiesel, alimentos e cosméticos.

De acordo com Silva et al. (2018), as características favoráveis do solo de uma determinada região, como: fertilidade, umidade, estabilidade, etc.; podem favorecer o estabelecimento de atividades agropecuárias nas margens ciliares. Ainda segundo os autores, o manejo inadequado nesse sistema de uso do solo pode provocar a compactação dos solos devido ao pisoteio do gado e a utilização de máquinas agrícolas;

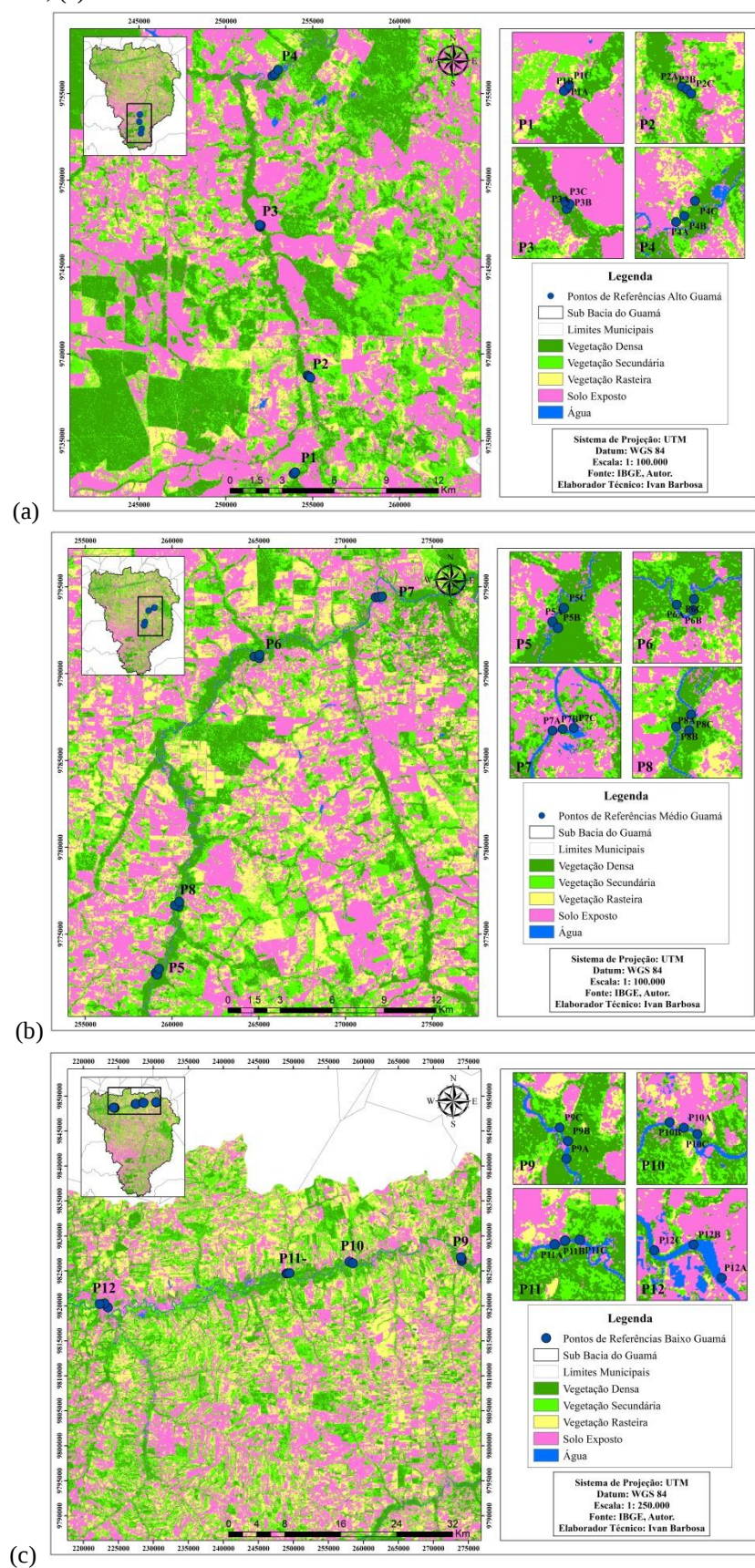
eutrofização ou contaminação dos cursos d'água devido ao uso de corretivos agrícolas e/ou agrotóxicos para desenvolvimento de culturas; produção de sedimentos (erosão) e deposição nos cursos d'água (assoreamentos) caso não seja realizado o adequado sistema de plantio (plantio direto ou convencional), adotando quando necessário práticas conservacionistas como, por exemplo, o terraceamento.

As áreas que apresentam maior quantidade de vegetação densa estão localizadas, principalmente, às margens do rio Guamá. Estas são caracterizadas como Áreas de Preservação Permanente (APP's), conforme o Código Florestal brasileiro (BRASIL, 2012), no que diz respeito à manutenção da floresta natural ao longo dos rios e nascentes. No que tange esta legislação, são estabelecidas faixas de preservação da vegetação (variando de 30 a 500 m) de acordo com a largura do leito de cursos d'água (inferiores a 10 m até casos superiores a 600 m).

As Figuras 6a, 6b e 6c apresentam três recortes da sub-bacia de acordo com os pontos amostrais coletados durante as visitas de campo. A Figura 6a apresenta a visualização aproximada do uso e ocupação da terra na área da SBRG, em relação aos pontos 1 a 4, denominada de alto rio Guamá. A Figura 6b apresenta a visualização aproximada da área da SBRG, em relação aos pontos 5 a 8, denominada de médio rio Guamá. A Figura 6c apresenta a visualização aproximada do uso e ocupação da terra na área da SBRG, em relação aos pontos 9 a 12, denominada de baixo rio Guamá. Vale destacar que para cada ponto (1 a 12) foram georreferenciadas três localizações diferentes (A, B e C) para maior precisão.

A área apresentada na Figura 6a pode ser considerada como a região da SBRG mais próxima da nascente do rio e se localiza em uma área de maior altitude: acima de 61 metros nas áreas distantes dos pontos coletados aonde a altitude chega entre 31 a 60 metros, com diversos picos de 121 a 150 metros na parte sul e leste; declividade entre 0 e 7,2% com diversos picos acima de 19,3% à direita dos pontos amostrais. Nesta área identifica-se que as elevadas altitudes estão associadas às áreas de maior quantidade e volume de vegetação densa (ao sul e leste da SBRG). Assim como, a forte presença de solo exposto na forma de grandes manchas distribuídas por toda a área recortada, principalmente nas regiões de menor altitude e menor declividade. Também são identificadas pequenas manchas classificadas como vegetação secundária e rasteira na porção norte da área (menor altitude e declividade), manchas medianas de vegetação secundária na porção leste (maior altitude e declividade) e manchas medianas de vegetação rasteira na porção sul (maior altitude e declividade).

Figura 6 – Mapas de uso e cobertura do solo da área de estudo nas regiões do: (a) alto rio Guamá; (b) médio rio Guamá; (c) baixo rio Guamá.



Fonte: Autoria própria.

O recorte de área apresentado para a porção média do rio Guamá (Figura 6b) também apresenta grande quantidade de áreas classificadas como solo exposto na forma de diversas pequenas manchas distribuídas por toda região em destaque. Enquanto que, a quantidade de vegetação densa identificada é menor, concentrando-se, principalmente, em maior volume às margens do rio Guamá e seus tributários e em pequenas manchas distribuídas pela área recortada. Nesta porção da SBRG é possível identificar uma maior quantidade de manchas de vegetação rasteira e poucas de vegetação secundária. Vale destacar que a área recortada apresenta declividade variando 0 a 7,2% com poucas ocorrências de áreas com declividade entre 7,3 a 19,2%, ou seja, um relevo mais plano do que a área do alto rio Guamá. Associado a declividade, verificam altitudes menores (61 a 90 metros), com poucas ocorrências de altitudes acima de 91 metros na porção sudeste da área recortada.

A Figura 6c, que apresenta a área correspondente ao baixo rio Guamá, possui as menores altitudes, predominantemente variando de 0 a 30 metros. Podendo atingir em determinadas áreas altitudes de 31 a 60 metros. Para a área também é possível atribuir as menores porcentagens de declividade (0 a 3,6%) ao relevo. Quanto ao uso e ocupação da terra é possível identificar áreas distribuídas em pequenas manchas de solo exposto por toda região, principalmente na porção sul. As manchas relacionadas à vegetação secundária e rasteira também se apresentam com distribuição por toda área recortada, principalmente nas proximidades do rio Guamá. Vale destacar a ausência de vegetação nas margens do rio Guamá localizada no ponto 12, pois se trata da área urbana do município de São Miguel do Guamá, ou seja, áreas de APP sendo parcialmente ocupadas ou desmatadas. Neste trecho encontram-se localizadas as áreas urbanas de dois importantes municípios para a região: São Miguel do Guamá e Ourém.

Desta forma, identificou-se que na área de estudo existem em torno do rio Guamá, e seus afluentes, muitas áreas destinadas a atividades humanas (representando principalmente pela porcentagem de área de solo exposto). Uma associação negativa que provoca sérias consequências para o rio principal e seus afluentes, margens, entre outros problemas. O monitoramento da cobertura vegetal é muito importante, pois a presença de tal contribui para o ajustamento das variáveis internas dos ecossistemas aquáticos e a manutenção do equilíbrio do regime hidrológico de uma região hidrográfica (MORAES; LORANDI, 2016). Celentano et al. (2018) em estudos acerca do desmatamento, degradação e violência abrangendo o leste do Pará (nordeste paraense) ressaltaram a importância da conservação e restauração das florestas, assim

como a implementação de políticas públicas complementares para regulação das atividades de silvicultura, agrícola e pecuária no bioma Amazônia.

No geral, os resultados indicaram que a metodologia utilizada na classificação é considerada satisfatória, pois o índice Kappa geral obtido neste estudo foi igual a 0,8950. Assim, foi obtido um índice de relevância quase perfeita (LANDIS; KOCH, 1977). Os índices Kappa individuais para vegetação densa (0,8522), vegetação secundária (0,8267), vegetação rasteira (0,8276), solo exposto (0,8741) e água (1) também foram todos classificados semelhantemente ao índice geral.

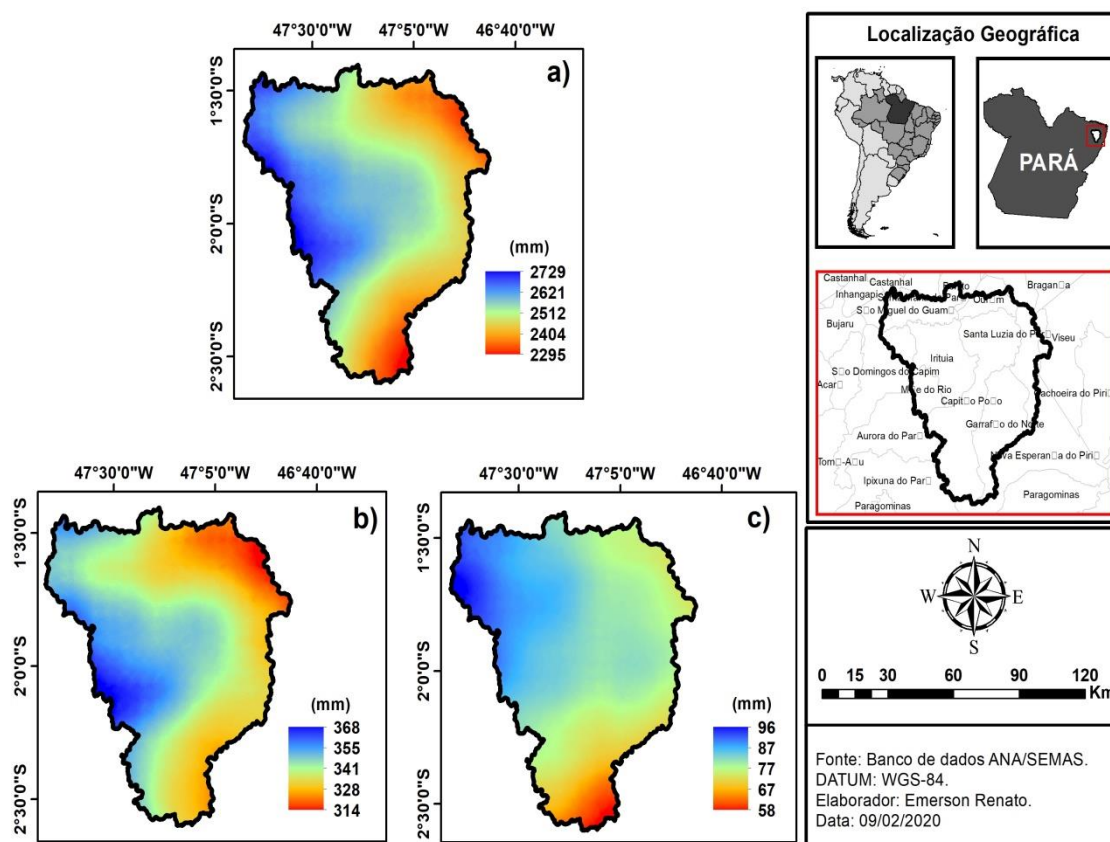
3.3.3 Análise regional da precipitação

A distribuição espacial da chuva média anual entre os anos de 2015 e 2017 (Figura 7a) demonstrou que os menores valores (mínimo de 2.295 mm) são encontrados nas porções nordeste e sudeste da SBRG, enquanto que os maiores valores (máximo de 2.729 mm) na porção noroeste (mais próxima do litoral). Logo, identifica-se uma diferença de 434 mm de amplitude na quantidade de chuvas na área de estudo. Estudos relacionados às precipitações anuais na Amazônia Oriental evidenciaram que estas tendem a decrescer do setor costeiro para o interior, decorrente da maneira como se originam os sistemas de circulação ao penetrarem a região (FIGUEROA; NOBRE, 1990; FISCH et al., 1998; GRIMM, 2011; NIMER, 1989).

A Figura 7b apresenta a distribuição espacial da precipitação pluvial para o período chuvoso (dezembro a maio), enquanto que a Figura 7c apresenta esta distribuição para o período menos chuvoso (junho a novembro). Em ambos os períodos sazonais é possível observar o mesmo comportamento crescente da quantidade de chuva do interior da sub-bacia (sudeste e nordeste) para a parte mais próxima à costa litorânea (noroeste).

Ainda é possível destacar que no período mais chuvoso (Figura 7b) a porção à nordeste da SBRG apresenta os menores valores de chuva (mínimo de 314 mm) e as porções sudoeste e noroeste os maiores valores (máximo de 368 mm). No período menos chuvoso (Figura 7c), a área com os menores valores de chuva encontra-se a sudeste da SBRG (mínimo de 58 mm). Como esperado, a porção noroeste apresenta as maiores quantidades de chuva (máximo de 96 mm), devido sua proximidade com a costa litorânea paraense.

Figura 7 – Distribuição espacial dos dados de CHIRPS da: (a) precipitação pluvial média anual; (b) precipitação acumulada média para o período chuvoso (dezembro a maio); e, (c) precipitação acumulada média para o período menos chuvoso (junho a novembro) para o período de 2015 a 2017.



Fonte: Autoria própria.

Destaca-se que as chuvas tendem a se concentrar na porção sudoeste e noroeste da sub-bacia, as quais são áreas com as menores altitudes, com exceção da porção sudoeste, e com as menores porcentagens de declividade (relevo plano). Nas porções sudoeste e noroeste foram encontradas grandes manchas de vegetação densa que são favoráveis à manutenção das chuvas e do volume de água no rio Guamá. Entretanto, na porção sudoeste foram identificadas apenas pequenas manchas de vegetação densa e uma predominância de áreas de classe solo exposto e vegetação rasteira. Estes dois usos não são favoráveis à manutenção do volume de chuvas e dos corpos d'água da região.

3.3.4 Análise da vulnerabilidade ambiental

As superfícies e porcentagens das áreas de vulnerabilidade ambiental para a área de estudo são apresentadas na Tabela 9, onde se observa que a classe de maior ocorrência corresponde à vulnerabilidade média (29%). Enquanto que, 41,80% da área

da SBRG apresenta vulnerabilidade baixa ou muito baixa em oposição aos 29,19% de área da SBRG classificada como vulnerabilidade alta ou muito alta.

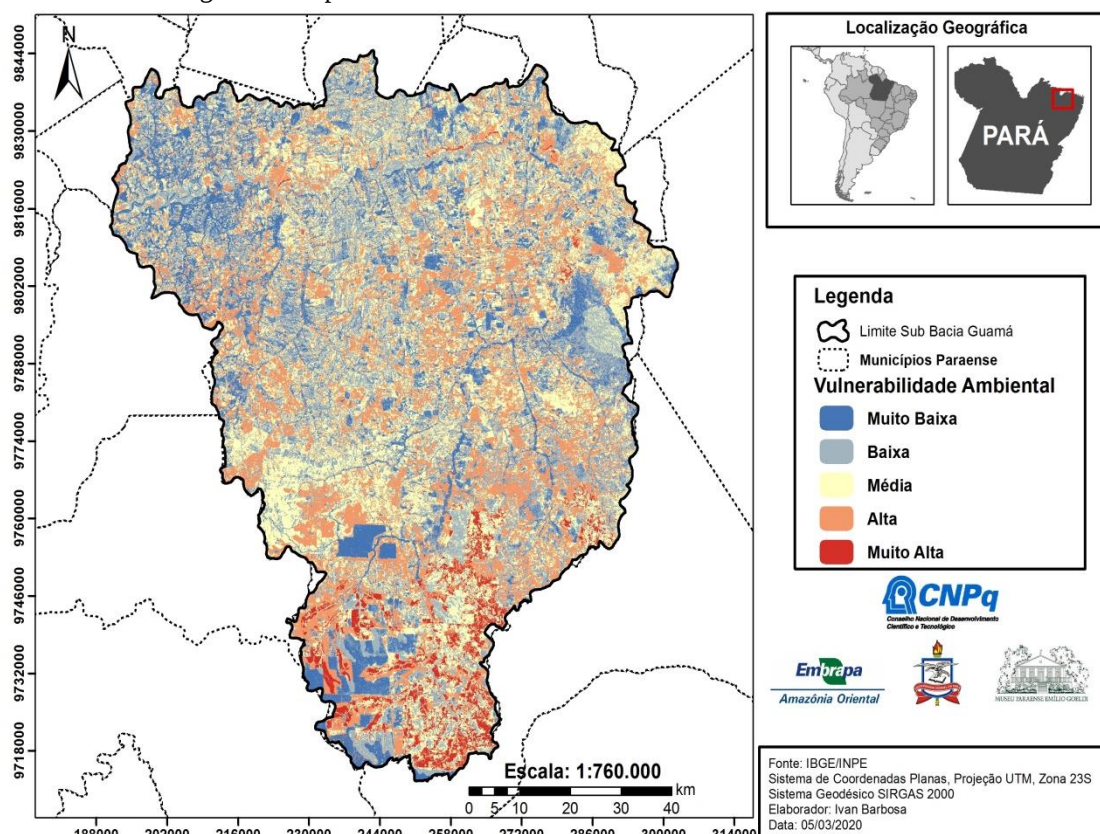
Tabela 9 – Vulnerabilidade ambiental, em km², na área da sub-bacia do rio Guamá.

Classes	Área (km ²)	Porcentagem (%)*
Muito baixa	1.245,37	14,06
Baixa	2.457,17	27,74
Média	2.568,60	29,00
Alta	2.312,66	26,11
Muito alta	272,81	3,08

*Porcentagem em relação à área total ocupada pela classe na sub-bacia. Fonte: Autoria própria.

A representação cartográfica da vulnerabilidade ambiental resultante da combinação das variáveis físico-geográficas selecionadas é mostrada na Figura 8, onde é possível observar a distribuição espacial das classes (em quilômetros quadrados e porcentagem de área).

Figura 8 - Mapa de vulnerabilidade natural da sub-bacia do rio Guamá.



Fonte: Autoria própria.

De forma geral, é possível observar o comportamento das variáveis físicas naturais (geologia, tipo de solo, declividade, tipo de vegetação, e precipitação pluvial) diante da interferência do homem sobre a terra. Esta pressão se torna evidente, principalmente, na porção sul da SBRG onde nota-se um grande aglomerado de áreas, representadas pelas manchas vermelhas medianas, que indicam vulnerabilidade ambiental muito alta. Estas interferências antrópicas são ainda mais importantes, devido às proximidades com as maiores áreas classificadas como sendo de vulnerabilidade muito baixa. O que levanta profunda preocupação com a integridade da cobertura vegetal primária e dos ecossistemas aquáticos, pois a montante desta área encontra-se a nascente do rio Guamá. Outras pequenas áreas de vulnerabilidade muito alta são observadas em determinadas partes da área da SBRG, principalmente ao norte, pois estão associadas aos centros urbanos dos municípios de Ourém, Capitão Poço, São Miguel do Guamá e comunidades em processo de expansão e crescimento demográfico, como as comunidades de Muriá, Poção, Boca Nova, Igarapé-Açú etc. Percebe-se também uma grande concentração de áreas correspondentes à vulnerabilidade muito baixa e baixa na porção central, norte e, principalmente, a noroeste da SBRG. As categorias de vulnerabilidade alta e média estão distribuídas aleatoriamente por toda área de estudo.

Quanto ao tipo de cobertura vegetal, na área da SBRG foi atribuído o grau de vulnerabilidade 1 ao tipo composto por floresta densa aluvial. Este tipo de vegetação encontra-se presente, principalmente, ao longo das margens do rio Guamá (em destaque o trecho entre a comunidade de Muriá e o centro urbano de São Miguel do Guamá) e na porção sudoeste da sub-bacia. Também foi encontrado na área o tipo de vegetação classificada como secundária, a qual foi atribuída o grau de vulnerabilidade igual a 1,5. A vegetação secundária é encontrada em grande parte na porção central (municípios de Garrafão do Norte e Mãe do Rio) e sudeste (Garrafão do Norte), com destaque à forte presença deste tipo de vegetação em quase todo território do município de Irituia. A floresta densa aluvial e a vegetação secundária atuam diminuindo os impactos de fatores externos aos locais em que recobrem e os tornam morfodinamicamente estáveis (BELATO et al., 2018)

Quanto aos tipos de solo predominantes na região, destaca-se a forte presença do tipo latossolo em toda a área da SBRG, principalmente na porção central e parte superior. Este tipo de solo recebeu o grau de vulnerabilidade igual a 1. Também foi encontrado solo do tipo argissolo, grau de vulnerabilidade igual a 2, na região das

comunidades de Boca Nova e Furo Novo no município de Capitão Poço. Em ordem decrescente, os solos do tipo plintossolo, gleissolo e neossolo foram encontrados em menores quantidades na área da sub-bacia. Para estes três últimos tipos de solo foi atribuído o grau de vulnerabilidade igual a 3. O solo do tipo plintossolo ocorrendo de forma concentrada na porção sul; o solo do tipo gleissolo ocorrendo nas margens do rio Guamá no trecho entre a comunidade de Muriá e o centro urbano de São Miguel do Guamá; e, o solo do tipo neossolo ocorrendo minimamente em uma pequena área no município de Irituia. Feitosa et al. (2010) e Leite e Rosa (2013) destacam que o elemento pedologia relaciona a maturidade dos solos à um menor grau de vulnerabilidade. Ainda segundo os autores, os latossolos são solos mais profundos, porosos, textura elevada, moderada taxa de infiltração, bem formados (mais estáveis) e apresentam maior resistência e tolerância à erosão.

Quanto à geologia da área de estudo foi encontrado o tipo Granito, grau de vulnerabilidade igual a 1,1, abrangendo grande parte da SBRG presente nos municípios de São Miguel do Guamá, Bonito, Ourém, Capitão Poço, Irituia, Mãe do Rio e em uma pequena área na porção leste do município de Santa Luzia do Pará. O grau de vulnerabilidade igual a 1,7 foi atribuído a Formação Vila Cristal (em uma pequena área a leste da sub-bacia) e Grupo Gurupi (no extremo norte do município de Garrafão do Norte e em grande parte do município de Santa Luzia do Pará). Também foi encontrado o tipo Arenito Guamá, grau de vulnerabilidade igual a 2,4, localizado em uma área na porção leste de São Miguel do Guamá e norte de Irituia. Por fim, em proporção decrescente de ocorrência, os tipos geológicos Formação Ipixuna, Cobertura Detrito-Laterítica Paleogênica, Aluviões Holocênicos e Cobertura Detrito-Laterítica Pleistocênica foram classificados com grau de vulnerabilidade igual a 3. De acordo com Belato et al. (2018), apresenta menor vulnerabilidade as formações geológicas mais antigas, devido sua maior resistência a erosão (maior grau de coesão das rochas). O tipo Formação Ipixuna do Período Terciário foi encontrado em grande parte do município de Garrafão do Norte, e na porção sul dos municípios de Santa Luzia do Pará e Mãe do Rio. O tipo Cobertura Detrito-Laterítica Paleogênica foi observado na parte sul da SBRG distribuído entre o tipo Formação Ipixuna nos municípios de Garrafão do Norte e Capitão Poço. A geologia do tipo Aluviões Hologênicos foi observada ocorrendo às margens do rio Guamá (no trecho entre a comunidade de Muriá e o centro urbano de São Miguel do Guamá) semelhantemente ao solo do tipo gleissolo. A geologia do tipo

Cobertura Detrito-Laterítica Pleistocênica foi encontrada somente em uma área localizada entre o limite dos municípios de Irituia e Mãe do Rio.

As variáveis físico-geográficas declividade, uso e ocupação da terra e precipitação pluvial já foram anteriormente discutidas em termos de suas distribuições espaciais. Porém, ressaltam-se os graus de vulnerabilidade atribuídos para as classes encontradas para a área da SBRG. Para a declividade foram atribuídos graus de vulnerabilidade conforme aumento da porcentagem de inclinação: 0 – 2, 2 – 6, 6 – 20, 20 – 50 e maior que 50, respectivamente, 1, 1,5, 2, 2,5 e 3. A precipitação pluvial para a área em estudo apresentou grau de vulnerabilidade igual a 1,6, ou seja, precipitação mensal em torno de 183 a 200 mm nas porções nordeste e sudeste. Em maior proporção, o grau de vulnerabilidade igual a 1,8 (225 a 250 mm/mês) foi aplicado para toda parte central, norte e sul da SBRG. Entretanto, a declividade e o clima (representado pela precipitação pluvial) não demonstraram apresentar influência como fatores modeladores da vulnerabilidade ambiental. Duarte e Carneiro (2017), encontraram resultados semelhantes de que o clima não é o principal fator degradante para o município de Paragominas localizado no nordeste paraense. Quanto as classes de uso e ocupação da terra, foi atribuído grau de vulnerabilidade igual a 1 para corpo hídrico e vegetação densa; grau de vulnerabilidade igual a 1,5 para a classe vegetação secundária; e graus de vulnerabilidade iguais a 2 e 3 para vegetação rasteira e solo exposto, respectivamente.

As áreas classificadas como vulnerabilidade ambiental muito baixa e baixa estão localizadas predominantemente em solos do tipo latossolo; os tipos de geologia comumente encontrados foram Granito, Arenito Guamá e Cobertura Detrito-Laterítica Paleogênica; a cobertura vegetal encontrada, semelhantemente a variável uso e ocupação da terra, é composta geralmente por floresta densa aluvial, e em alguns casos, por vegetação secundária; por fim, a declividade e a precipitação pluvial não se mostraram fatores importantes para o estabelecimento da vulnerabilidade ambiental. Para as áreas de vulnerabilidade ambiental média notou-se a importância da presença de vegetação secundária e a ocorrência de solo exposto/vegetação rasteira como fatores comuns para todas as ocorrências identificadas no mapa. Nas áreas classificadas como de vulnerabilidade ambiental alta e muito alta foi observada a similaridade quanto à ocorrência do plintossolo como tipo de solo, a presença da Formação Ipixuna quanto à geologia, a ocorrência das áreas com maiores porcentagens de declividade e a forte presença de áreas antropizadas/solo exposto.

No trabalho de Rocha e Lima (2020) foi avaliado o índice de sustentabilidade hídrica para a bacia do rio Guamá considerando sua extensão até a foz na baía do Guajará em Belém. As autoras identificaram que as principais áreas alteradas, segundo o indicador ambiental constituído pelo uso e ocupação do solo, são representadas pelas regiões do Igarapé Mãe do Rio e Alto Rio Guamá, corroborando os resultados encontrados neste trabalho. O indicador hidrológico também corrobora os resultados deste trabalho ao indicar menor escoamento superficial da precipitação incidente, principalmente na área do Alto Rio Guamá.

3.4 Conclusão

Os valores das características morfométricas que a sub-bacia do rio Guamá apresenta mostram que a área tem formato mais alongado (F baixo), distanciando-se da área de um círculo (K_c maior que 1) e apresenta baixo potencial para ocorrência de inundações em condições normais de precipitação. Os valores de D_h e D_d indicam que a SBRG possui capacidade mediana de gerar novos cursos d'água, um escoamento superficial razoavelmente baixo e uma pequena dissecação associada. Apesar de ser constituída por 51,55% de canais de 1ª ordem, o que pode explicar sua baixa densidade de drenagem. A característica plana da sub-bacia exerce forte influência nestes resultados. Seu relevo é predominantemente plano com suaves ondulações, e sua declividade varia de 0 a 71,2%. Assim, a área de estudo apresenta características físicas desfavoráveis ao abastecimento hídrico por localiza-se em altitude baixa e não ser bem drenada. Contudo, os resultados apresentados pelas características do relevo sugerem o favorecimento de baixo escoamento da água e baixa susceptibilidade à erosão e alagamentos.

Em relação a quantidade de chuva foram registados, entre os anos de 2015 e 2017, elevados valores de precipitação e que apresentam uma distribuição característica. Apesar de regulares, não se distribuem igualmente ao longo do ano e demonstram concordância com o comportamento esperado para a região ao apresentar um período considerado chuvoso (dezembro a maio) e um período menos chuvoso (junho a novembro). A distribuição da quantidade de chuva aumenta com a proximidade da costa oceânica do estado do Pará (de leste à oeste). Os valores de mínimo e máximo de chuva no período chuvoso (314 mm e 368 mm, respectivamente), período menos chuvoso (58 mm e 96 mm, respectivamente) e anual (2.295 mm e 2.729 mm, respectivamente)

representam altos valores de precipitação e, conseqüentemente, de escoamento superficial para os rios.

A sub-bacia do rio Guamá, como tantas outras bacias e sub-bacias hidrográficas no Brasil, enfrenta problemas ambientais provenientes da expansão do uso e ocupação desornada do solo. Além de situa-se em uma área de elevado desenvolvimento econômico e expansão das atividades agropecuárias. Notou-se na área de estudo maior porcentagem (aproximadamente 57%) de área classificada como solo exposto e vegetação rasteira do que área classificada como vegetação densa ou secundária (aproximadamente 42%). A redução e a ausência de cobertura vegetal primária em alguns trechos da SBRG foram evidenciadas e demonstra-se a importância do monitoramento deste tipo de cobertura para o equilíbrio das variáveis dos ecossistemas aquáticos (estabilidade dos ciclos biogeoquímicos), qualidade da água e a manutenção do regime de chuva na área da sub-bacia hidrográfica (ciclo hidrológico), dependem da presença de cobertura vegetal e dão condições de sustentabilidade ao múltiplos uso na SBRG. Logo, sugere-se a adoção de medidas de restauração nas áreas de vulnerabilidade ambiental alta e muito alta; de proteção das áreas classificadas como vulnerabilidade média, baixa e muito baixa; e de recuperação e preservação da mata ciliar nas áreas de nascentes no interior da sub-bacia.

As áreas de vulnerabilidade alta e muito alta foram impactadas negativamente pelos indicadores geológico (rochas sedimentares da Formação Ipixuna), tipo de solo (plintossolo) e uso e ocupação (solo exposto); onde foram identificados solos frágeis, rochas recentes e forte presença de atividades antrópicas (representadas pelas atividades agropecuárias e urbanização dos centros urbanos dos municípios) que resultam na retirada da cobertura vegetal natural. Nas áreas de vulnerabilidade baixa e muito baixa as variáveis tipo de solo (latossolo), geologia (Granito), tipo de cobertura vegetal (floresta densa aluvial) e uso e cobertura (vegetação densa e secundária) apresentaram-se menos vulneráveis à degradação ambiental. Ressalta-se que as áreas de vulnerabilidade média sofrem influência, principalmente, devido a presença da vegetação secundária e de atividades antrópicas de média degradação ambiental. Na SBRG as áreas de baixa, média e alta vulnerabilidade apresentaram as maiores porcentagens de ocorrência (aproximadamente 28%, 29 e 26%, respectivamente); e, representam áreas com a constante ação de processos pedogênicos e morfogênicos. Desta forma, ressalta-se a importância do controle da expansão das atividades

antrópicas, retirada da vegetação primária e o respeito aos preceitos legais da legislação ambiental brasileira.

Contudo, é fundamental que mais estudos científicos sejam realizados para compreender as limitações e problemas ambientais da região, como: avanço das pastagens e cultivos agrícolas, falta de manejo adequado do solo, assoreamento de rios, desmatamento, ocupação de áreas de preservação permanentes (APP), lançamento de esgotos diretamente nos rios, etc. Além de estimular as potencialidades presentes na região compreendida pela sub-bacia hidrográfica do rio Guamá como: ecoturismo, turismo planejado e rural, atividades agropecuárias, pesca artesanal, abastecimento de água, ações de educação ambiental, etc. Por fim, a SBRG representa um lugar de beleza cênica e um patrimônio paisagístico riquíssimo de elevada biodiversidade.

CAPÍTULO 4 DINÂMICA ESTACIONAL E ESPACIAL DE VARIÁVEIS HIDROQUÍMICAS NA ÁGUA SUPERFICIAL DO RIO GUAMA NO NORDESTE PARAENSE³

Resumo

A sub-bacia hidrográfica do rio Guamá (SBRG) está inserida em uma região que vem apresentando ao longo dos últimos anos crescimento no processo de desflorestamento e diversas transformações do ambiente natural. Assim, levando em consideração o aumento das atividades socioeconômicas na SBRG e o notório processo de sazonalidade, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar a sazonalidade e espacialidade de variáveis hidroquímicas na água superficial do rio Guamá, entre os anos de 2015 e 2017, no sentido de evidenciar as conexões existentes entre os parâmetros de qualidade da água e as pressões antrópicas sobre os corpos d'água. O trabalho de campo foi realizado em doze comunidades localizadas às margens do rio Guamá e em seis campanhas nos meses/anos de fevereiro de 2015, junho de 2015, janeiro de 2016, junho de 2016, fevereiro de 2017 e julho de 2017. As análises *in situ* e laboratoriais de amostras de água foram realizadas na camada superficial do rio Guamá. Os dados de precipitação foram obtidos a partir da base de dados do CHIRPS. Foi possível observar flutuações negativas e positivas na precipitação local quando em comparação a normal climatológica para os anos de 2015 a 2017. As coletas realizadas nos anos de 2015 e 2016 apresentam correspondência com o forte efeito do El Niño e as de 2017 com moderado efeito da La Niña. Sabe-se que estes fenômenos causam efeitos na quantidade de precipitação, regime dos rios, quantidade de escoamento superficial, diluição ou concentração de poluentes e outros compostos químicos. Os parâmetros físico-químicos de qualidade da água apresentaram alta heterogeneidade espacial e tendências ascendentes ou descendentes no sentido montante a jusante do rio. Esta heterogeneidade é influenciada pelas condições do entorno e das áreas drenadas pelo corpo d'água analisado. A avaliação sazonal se demonstrou importante no acompanhamento das variáveis pH, CE, resistividade elétrica, STD, temperatura da água superficial, SOD e cloreto. Porém, ressalta-se que o acompanhamento pontual pode ser necessário nos casos indicativos da existência de fontes pontuais de poluição

³ Artigo em fase de finalização da escrita para submissão em período internacional.

ou usos específicos da água que podem afetar o seu estado de qualidade. Através das análises multivariadas foi possível reduzir a multidimensionalidade e a observação das variáveis hidroquímicas segundo a sazonalidade. Por fim, o trabalho possibilitou estabelecer a importante relação entre as variáveis hidroquímicas da água superficial do rio Guamá, a diferenciação espacial de uso do solo e a sazonalidade regional.

Palavras-chave: recursos hídricos, qualidade da água, análise multivariada, interpolação GIS, precipitação.

Abstract

The sub-basin of the Guamá River (SBGR) is inserted in a region that has been presenting over the last years growth in the deforestation process and several transformations of the natural environment. Thus, taking into account the increase of socioeconomic activities in SBGR and the notorious process of seasonality, the present work aims to characterize the seasonality and spatiality of hydrochemical variables in the surface water of the Guamá River, between the years 2015 and 2017, in order to highlight the existing connections between water quality parameters and anthropic pressures on water bodies. The field work was carried out in twelve communities located on the banks of the Guamá River and in six campaigns in the months/years of February 2015, June 2015, January 2016, June 2016, February 2017 and July 2017. In situ and laboratory analyses of water samples were carried out on the surface layer of the Guamá River. The precipitation data were obtained from the CHIRPS database. It was possible to observe negative and positive fluctuations in local precipitation when compared to normal climatological for the years 2015 to 2017. The collections made in 2015 and 2016 show correspondence with the strong effect of El Niño and those of 2017 with moderate effect of La Niña. It is known that these phenomena cause effects on the amount of precipitation, river regime, amount of runoff, dilution or concentration of pollutants and other chemical compounds. The physical-chemical parameters of water quality showed high spatial heterogeneity and upward or downward trends in the upstream to downstream direction of the river. This heterogeneity is influenced by the conditions of the surroundings and the areas drained by the analyzed water body.

The seasonal evaluation has proved important in monitoring the variables pH, EC, electrical resistivity, TDS, surface water temperature, DOS and chloride. However, it should be noted that occasional monitoring may be necessary in cases indicating the existence of point sources of pollution or specific uses of water that may affect its quality status. Through multivariate analyses it was possible to reduce multidimensionality and the observation of hydrochemical variables according to seasonality. Finally, the work made it possible to establish the important relationship between the hydrochemical variables of the surface water of the Guamá River, the spatial differentiation of land use and the regional seasonality.

Keywords: water resources, water quality, multivariate analysis, GIS interpolation, rainfall.

4.1 Introdução

Uma bacia hidrográfica constitui uma excelente unidade da paisagem para delimitação no espaço de sistemas naturais facilitando estudos ambientais e atividades de planejamento (PINTO et al., 2015), assim como, a gestão eficaz dos corpos d'água. De acordo com Whu et al. (2018), quantidades adequadas de recursos hídricos de qualidade fornecem uma pré-condição para o desenvolvimento econômico e integridade ecológica. Ainda segundo os autores, o crescimento da demanda por recursos hídricos, notadamente os recursos de água doce, pode torná-los escassos no futuro e afetar o uso destes para potabilidade e crescimento econômico.

Medeiros, Silva e Lins (2018) afirmam que a heterogeneidade da qualidade da água em ambientes aquáticos é influenciada naturalmente pelas condições de *background*, como características geológicas e pedológicas, da bacia hidrográfica. Além da influência da extensão dos impactos antrópicos circundantes. De tal modo, Singh et al. (2004) comentam que tanto processos naturais (por exemplo, precipitação, intemperismo e erosão do solo) como antropogênicos (por exemplo, atividades agrícolas, urbanas e industriais) colaboram para a contaminação hídrica em bacias, e assim, são basilares para a deterioração da qualidade das águas.

De acordo com Filizola e Guyot (2011 apud BAY, 2015) “os rios são particularmente sensíveis a todos os tipos de mudanças no ambiente, inclusive

climáticas”. O regime climático afeta a quantidade e qualidade dos corpos d’água, pois possui a responsabilidade de promover no sistema fluvial a diluição e assimilação dos contaminantes naturais (fezes de animais silvestres, matéria orgânica vegetal e vegetais em decomposição) e/ou aqueles inseridos pelos processos antrópicos, assim como, a dissecação e transporte de sedimentos decorrentes da ação da água corrente (PINTO et al., 2015). No Brasil, o regime de chuvas apresenta sazonalidade, com estações secas e chuvosas em diferentes épocas do ano de acordo com a localização geográfica (FIGUEROA; NOBRE, 1989). Conforme Bay (2015), o regime de chuvas para a região Amazônica pode ser dividido em inverno Amazônico com registros elevados de chuva entre os meses de novembro e abril, e um período denominado verão Amazônico com meses mais secos e com menor quantidade de chuva entre maio e outubro. A Amazônia possui uma precipitação média anual de aproximadamente 2.300 mm (FISH; MARENGO; NOBRE, 1998).

Nesse contexto, as bacias hidrográficas da Amazônia configuram-se por apresentar rios extensos, elevados volumes hídricos e por estarem situadas na Zona Climática Intertropical (ZCIT), com índices de pluviosidade média anual em torno de 1800 mm (BORDALO et al., 2012). De forma complementar, as bacias hidrográficas podem ser subdivididas em unidades menores, o que facilita, por razões técnicas e estratégicas, o seu planejamento (SANTOS, 2004). Assim, a área de estudo da pesquisa é denominada sub-bacia do rio Guamá (SBRG) e encontra-se localizada na Mesorregião do Nordeste do Estado do Pará. Brabo, Ferreira e Veras (2016) citam que esta mesorregião tem como principais bacias hidrográficas a do Araguaia-Tocantins e a do Atlântico Nordeste Ocidental e abrange um total de 49 municípios, englobando cinco microrregiões: Bragantina, Cametá, Guamá, Salgado e Tomé-açu. A SBRG encontra-se localizada na microrregião do Guamá.

Na Mesorregião do Nordeste paraense destacam-se suas principais atividades econômicas que são relacionadas aos extrativismos mineral e vegetal, a atividade pesqueira, as indústrias alimentícias e madeireiras e a agropecuária (PARÁ, 2014). De acordo com Gomez e Barizon (2014), o Nordeste paraense é uma das regiões do Norte do Brasil que mais se encontra suscetível à contaminação por agrotóxicos e nutrientes devido aos avanços de diversas monoculturas, com destaque para os plantios de soja e cítricos. Pereira et al. (2018) ainda destacam que esta mesorregião está em posição de destaque na produção de hortaliças. Segundo Medeiros, Silva e Lins (2018), as atividades de agricultura e pecuária destacam-se por possuir elevador potencial

degradador, pois acarretam em alterações não benéficas na qualidade da água ao elevar a concentração de nutrientes devido ao manejo do solo. Outra atividade bastante importante na sub-bacia do rio Guamá é a pesca (FUJIMOTO et al., 2020), pois apresenta facilidade de acesso ao polo exportador no município de Belém (capital do Estado do Pará) e serve como área auxiliar de pesca para áreas mais produtivas, como a bacia do rio Xingu (Pará). Por fim, Silva e Alves (2018) analisaram e discutiram as transformações constantes que o espaço agrário da Mesorregião do Nordeste vem sofrendo devido os impactos do monocultivo do dendê. Nahum e Santos (2013) citam que “a expansão do dendê ocasionou problemas, tais como: concentração fundiária, conflitos no campo, risco ambiental sobre os corpos d’água por conta da abertura de estradas e da intensidade de herbicidas, fungicidas, bem como de adubo”.

No mais, Whu et al. (2018) comentam acerca da importância da avaliação da qualidade da água para o controle da poluição e gestão dos recursos, pois o estudo minucioso do seu status e tendências são críticos na identificação dos principais contribuintes para as variações espaciais e temporais na qualidade. Nesse sentido, levando em consideração o processo de desenvolvimento de atividades econômicas na sub-bacia do rio Guamá e o notório processo de sazonalidade presente na região, o presente trabalho tem o objetivo de caracterizar a sazonalidade e espacialidade de variáveis hidroquímicas na água superficial do rio Guamá entre os anos de 2015 e 2017, através de ferramentas estatísticas (uni e multivariada) e geoestatísticas, no sentido de evidenciar as conexões existentes entre os parâmetros de qualidade da água, clima e as pressões antrópicas sobre os corpos d’água.

4.2 Material e métodos

4.2.1 Área de estudo

A área de estudo é composta pela sub-bacia do rio Guamá (SBRG) que representa um trecho selecionado da bacia hidrográfica do rio Guamá compreendido entre as matas dos municípios de Ipixuna e Nova Esperança do Piriá (acima de Paragominas); seguindo por Capitão Poço e Garrafão do Norte, a sudoeste; onde dirige-se para norte-nordeste até o município de Ourém; deste ponto em diante o rio flete para oeste, divisando São Miguel do Guamá de outros municípios; e finaliza logo após o centro urbano de São Miguel do Guamá antes da entrada do volumoso rio Capim. A

SBRG se situa na Mesorregião do Nordeste paraense, Microrregião do Guamá, pertence a Região Hidrográfica Costa Atlântica - Nordeste e abrange uma área de 49.637 km². Conforme Ribeiro (2016), esta área faz parte do contexto histórico da criação da Estrada de Ferro de Bragança, que ligava Belém à cidade de Bragança e sua colonização.

A SBRG abrange um total de 12 municípios: Aurora do Pará, Bonito, Capitão Poço, Garrafão do Norte, Ipixuna do Pará, Irituia, Mãe do Rio, Nova Esperança do Piriá, Ourém, Santa Luzia do Pará, São Domingos do Capim e São Miguel do Guamá. No Nordeste paraense, os municípios são geralmente menores e, em particular, no norte do território tem-se uma maior densidade demográfica e maior existência de centros urbanos, apesar de uma população urbana menor (52%) (POLGE; CHAPUIS; PIRAUX, 2015).

De acordo com Amanajás e Braga (2012), o Estado do Pará apresenta uma caracterização de sua sazonalidade da chuva regional com uma precipitação acumulada mensal de, aproximadamente, 380 mm no período chuvoso (dezembro a maio) e, aproximadamente, 70 mm no período menos chuvoso (junho a novembro). A parte leste de Amazônia, onde se localiza a SBRG, sofre influência de diferentes sistemas meteorológicos que modulam a precipitação regional, como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e outros sistemas de escala menor (Lista de Instabilidade) (CARVALHO; JONES; LIEBMANN, 2004; COHEN; DIAS; NOBRE, 1995; FRIERSON et al., 2013; NOBRE; SHUKLA, 1996; QUADRO et al., 2012; SOUZA et al., 2017;; SOUZA; KAYANO; AMBRIZZI, 2004;).

A classificação de Köppen para o clima da região é do tipo megatérmico Am, clima quente tropical de moção, com chuvas em todas as estações e temperatura média anual entre 24 e 26 °C (FISCH; MARENGO; NOBRE, 1998; NIMER, 1989;).

Segundo Torres (2007), a vegetação predominante nas áreas aluviais de influência do rio Guamá é a Floresta Equatorial Latifoliada (com os subtipos Floresta Densa dos Platôs, Floresta Densa dos Terraços Aluviais ou Floresta de Várzea) e nas áreas marginais do rio Guamá e seus afluentes destaca-se a mata de várzea com suas espécies ombrófilas, dicotiledôneas e plamáceas, e as matas de galeria.

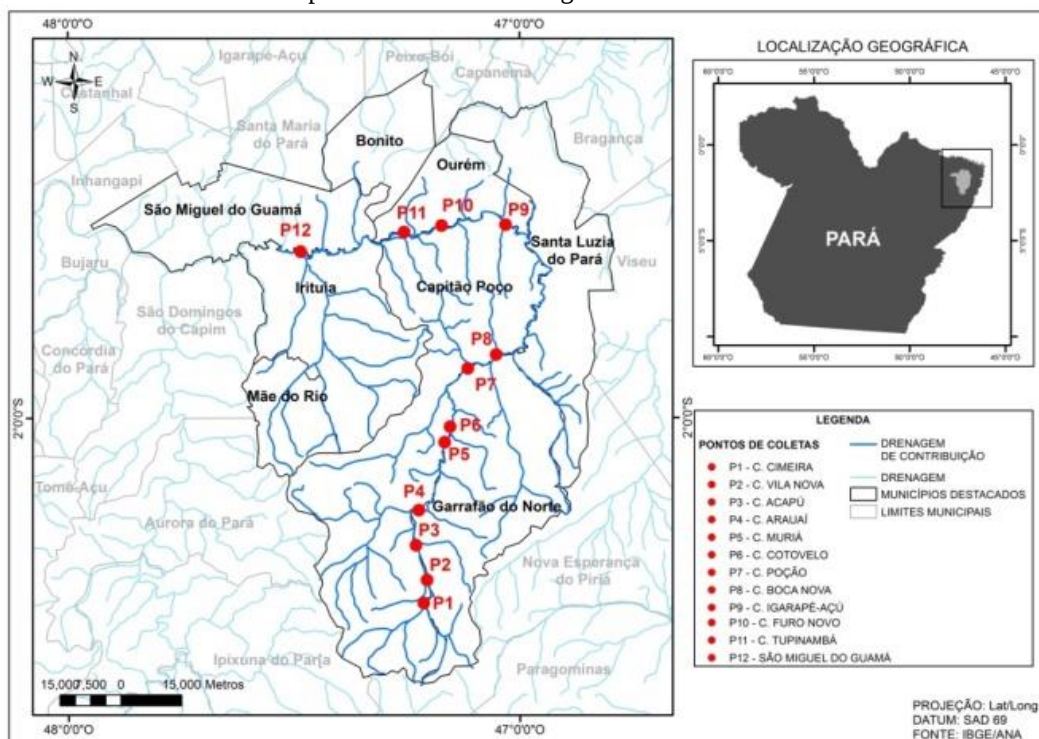
Ainda de acordo com Torres (2007) podem ser encontrados diferentes tipos de solo como o Podzólico Vermelho de textura vermelha, Podzol Hidromórfico, Aluviais, Hidromórficos Indiscriminados, Plintossolo, Gley Pouco Húmico, solos arenosos-quartzosos (Areia Quartzosa e Concrecionários Lateríticos Distróficos de textura Indiscriminada) e outros nas áreas inundáveis próximas ao rio, como Gley Pouco

Húmico Distrófico de textura argilosa, solos Aluviais Eutróficos e Distróficos, e Hidromórficos Indiscriminados.

Rocha e Lima (2020) comentam que a bacia hidrográfica do rio Guamá está inserida em uma área que vem apresentando ao longo dos últimos anos crescimento no processo de desflorestamento. Esta área de influência é denominada de “Arco do Desmatamento na Amazônia”. Segundo dados do IBGE (2016) é observado que na porção nordeste do Pará antigas pastagens têm dado lugar ao cultivo de soja e as extensas plantações de dendzeiros, do qual é extraído o óleo utilizado na produção de biodiesel, alimentos e cosméticos.

O rio Guamá é de fundamental importância para os municípios por onde passa (Figura 1), pois serve como limite geográfico natural em toda a sua porção norte e leste; para ele converge diversos afluentes de pequeno e grande porte que estão inseridos nos municípios da microrregião do Guamá; o rio ainda é utilizado como meio de transporte, subsistência para a comunidade ribeirinha através da pesca e uso da água para irrigação, dessedentação de animais e consumo humano.

Figura 1 – Dimensão espacial da área de estudo: sub-bacia do rio Guamá (SBRG) e a distribuição dos pontos amostrais ao longo do rio Guamá.



Fonte: Autoria própria.

Foram selecionadas doze comunidades localizadas às margens do rio Guamá e que estivessem distribuídas ao longo do trecho selecionado para estudo. Assim, a Figura 1 apresenta a delimitação da área da sub-bacia do rio Guamá e a indicação dos 12 (doze) pontos de acesso ao rio que representam cada localidade/comunidade em que foram realizadas coletas de amostras de água.

Os critérios para a definição das comunidades apresentadas foram baseados nas condições de acesso às margens do rio; disponibilidade de embarcações de pequeno ou médio porte para auxiliar no processo de coleta de dados *in situ* e coletas físicas de amostras de água superficial do rio; e nas características de ocupação das áreas de contribuição.

Em cada comunidade foram estabelecidos 3 (três) pontos amostrais (distância mínima de 200 a 250 metros entre si) para coleta de amostra de água superficial do rio distribuídos a montante, centro e jusante; tendo como referência a parte central da comunidade às margens do rio Guamá. Perfazendo assim o total de 36 (trinta e seis) pontos amostrais ao longo do trecho do rio Guamá. Foram registradas as coordenadas geográficas de cada um dos trinta e seis pontos amostrais através de um aparelho de GPS (Garmin, GPSMAP®, série 78). Na Tabela 1 estão expostas as coordenadas geográficas de cada comunidade de acesso ao rio.

Tabela 1 – Coordenadas geográficas dos 12 pontos de acesso ao rio pelas comunidades.

Ponto	Comunidade	Coordenadas	
		Latitude (S)	Longitude (W)
1	Cimeira	2° 24' 30"	47° 12' 53"
2	Vila Nova	2° 21' 50"	47° 12' 7"
3	Acapu	2° 16' 53"	47° 13' 33"
4	Arauaí	2° 12' 1"	47° 13' 27"
5	Muriá	2° 3' 4"	47° 9' 38"
6	Cotovelo	2° 0' 46"	47° 9' 16"
7	Poção	1° 53' 20"	47° 6' 41"
8	Boca Nova	1° 51' 20"	47° 2' 52"
9	Igarapé-Açu	1° 33' 48"	47° 1' 55"
10	Furo Novo	1° 34' 5"	47° 10' 18"
11	Tupinambá	1° 35' 8"	47° 15' 4"
12	Centro urbano de São Miguel do Guamá	1° 37' 31"	47° 29' 5"

Fonte: Autoria própria.

É importante ressaltar que o rio é utilizado como um marcador geográfico que separa os limites territoriais dos municípios da região, por isso a dualidade da localização municipal dos pontos. Assim, os pontos de coletas acessados pelas comunidades Cimeira (P1), Vila Nova (P2), Acapu (P3), Arauaí (P4), Muriá (P5), Cotovelo (P6), Poção (P7), Boa Nova (P8) estão localizados em trechos do rio que fazem a divisão geográfica entre os municípios de Capitão Poço (à margem esquerda de acordo com o fluxo do rio) e Garrafão do Norte (à margem direita de acordo com o fluxo do rio). Os pontos de coletas acessados via comunidades Igarapé-Açu (P9), Furo Novo (P10) e Tupinanbá (P11) estão localizados em trechos do rio que fazem a divisão geográfica entre os municípios de Capitão Poço (à margem esquerda de acordo com o fluxo do rio) e Ourém (à margem direita de acordo com o fluxo do rio). O ponto de coleta acessado via cento urbano (P12) do município de São Miguel do Guamá (à margem direita de acordo com o fluxo do rio) faz a divisão geográfica com o município de Irituia (à margem esquerda de acordo com o fluxo do rio). Ressalta-se que os pontos amostrados não sofrem influência de maré.

4.2.2 Amostragem e metodologias analíticas

O trabalho de campo foi realizado em seis campanhas nos meses/anos de fevereiro de 2015, junho de 2015, janeiro de 2016, junho de 2016, fevereiro de 2017 e julho de 2017. Sendo que as coletas realizadas nos meses de janeiro e fevereiro foram consideradas como pertencentes ao período chuvoso (PC) e as coletas realizadas nos meses de junho e julho como pertencentes ao período menos chuvoso (PMC).

Em cada campanha as coletas e análise *in situ* de amostras de água foram realizadas na camada superficial (até 30 cm de profundidade abaixo da lâmina d'água).

No local de coleta foram medidos na água superficial através de uma sonda multiparâmetro (Hanna®, modelo HI 9829), antecipadamente calibrada conforme orientações do fabricante, os valores de potencial hidrogeniônico (pH é adimensional), oxigênio dissolvido (OD em miligramas por litro – mg L⁻¹), saturação de oxigênio na água (SO em porcentagem - %), condutividade elétrica (CE em microSiemens por centímetro – $\mu\text{S cm}^{-1}$), resistividade elétrica (RES em megaOhms por centímetro – M Ω cm⁻¹), sólidos totais dissolvidos (STD em miligramas por litro – mg L⁻¹) e temperatura da água (TEMP em graus Celsius - °C). Através do uso de um turbidímetro de campo

(Instrutherm®, modelo TD-300) foi medida a turbidez (TURB em unidade de turbidez – uT ou NTU), previamente calibrado com soluções de 0 e 100 NTU.

Em cada um dos 36 pontos foram coletadas amostras de água superficial com o auxílio de uma garrafa de Van Dorn horizontal e armazenadas em garrafas de polipropileno, previamente descontaminadas através de imersão por 24 horas em solução de ácido nítrico 10% (HNO₃ 10%) e posterior lavagem com água destilada (ANA, 2011). O armazenamento, acondicionamento e transporte seguiram as normas estipuladas pela literatura especializada (APHA, 2017).

As amostras coletadas foram transportadas em caixas de isopor e mantidas sob refrigeração (± 2 °C) até o momento da análise no Laboratório de Análises Físico-Químicas e Químicas do Centro de Tecnologia Agropecuária (CTA) da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA).

No laboratório foram realizadas as determinações dos parâmetros químicos nas amostras obedecendo aos métodos de análise do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017). Para a determinação do teor de cloreto (CLO em miligrama por litro – mg L⁻¹) foi utilizado o método 4500B e o método a ser utilizado para a determinação da dureza total (DUR em miligrama por litro – mg L⁻¹ de CaCO₃) foi o método 2340C.

Foram obedecidos os prazos de validades para as análises químicas, uma vez que para determinação de cloreto o prazo é de 28 dias e para determinação de dureza total de seis meses (devido adição de 1 mL de solução de ácido nítrico 1:1).

Todas as análises (*in situ* e laboratoriais) foram realizadas em triplicata (n = 3).

4.2.3 Dados de precipitação

Para a análise da precipitação na área da sub-bacia do rio Guamá foram obtidos dados de precipitação a partir da base de dados do CHIRPS (*The Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations*) que fornece estimativas de precipitação a partir de pluviômetro e observações de satélite através de um algoritmo de ponderação da distância inversa modificado que possui diversas características únicas desenvolvido pelo *United States Geological Survey* (USGS) e pelo *Climate Hazards Group at the University of California, Santa Barbara* (UCSB) (FUNK et al., 2015). Ainda segundo os autores, os dados CHIRPS estão disponíveis em diferentes escalas temporais (diários, pântadas e mensais), domínios espaciais (quase-global 50 °S – 5 °N e todas as

longitudes) e alta resolução ($0,05^\circ \times 0,05^\circ$ ou 5 km) desde 1981 até os dias atuais. Os dados de precipitação fornecidos pelo CHIRPS estão disponíveis no endereço eletrônico <ftp://ftp.chg.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0/> da UCSB, nos formatos NetCDF, GeoTiff e Esri BIL e na unidade de precipitação milímetro (mm) por período de tempo.

Para calcular a normal climatológica mensal da área de estudo foram utilizadas as recomendações da Organização Meteorológica Mundial (OMM) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Conforme a INMET (2009) e OMM (2011), para a obtenção do Padrão Normal é necessário o cálculo das médias de dados climatológicos para um período de 30 anos consecutivo. Assim, foram calculadas as médias da precipitação para os meses de janeiro a dezembro entre os anos de 1988 e 2017, correspondendo a um total de 30 anos contínuos. Em seguida, foi empregado o cálculo do índice de anomalia de chuvas (IAC) desenvolvido por Rooy (1965) através da comparação das normais com anos específicos. Este cálculo facilita a compreensão da dinâmica das chuvas através do fornecimento dos índices de anomalia positivos ou negativos condicionados a maior ou menor disponibilidade de água no sistema hidrológico da bacia hidrográfica. Neste estudo foram calculados os IAC para os meses de janeiro a dezembro para o período compreendido pelos anos de 2015 a 2017. Para o cálculo da normal climatológica mensal e índice de anomalia de chuva foram extraídos 546 pontos de grande que abrangem a área da sub-bacia do rio Guamá.

Posteriormente, foram calculados os valores de precipitação acumulada (em mm) por coleta considerando os três dias anteriores ao início da coleta e os dias de execução de cada campanha amostral (3 dias). Também foram calculados os valores de precipitação acumulada (em mm) por período sazonal (período chuvoso compreendido as coletas de fevereiro/2015, janeiro/2016 e fevereiro/2017; e período menos chuvoso compreendido pelas coletas de junho/2015, junho/2016 e julho/2017) considerando os dias de coleta e os três dias anteriores ao início. Para o cálculo da precipitação acumulada por coleta e precipitação acumulada sazonal foram extraídos os pontos de grande localizados nas coordenadas obtidas pelo aparelho de GPS em cada um dos pontos de coleta.

4.2.4 Análises estatísticas e geoestatísticas

Pino (2014) cita que “a não normalidade não leva a erros sérios de interpretação de médias simples, que na maioria dos casos são aproximadamente normais”. Inicialmente, com os dados obtidos das variáveis hidroquímicas da água superficial do rio Guamá foi utilizada a estatística descritiva para obtenção dos valores de média e desvio-padrão.

Edgell e Noon (1984) afirmam que em estudos de simulações foram obtidos resultados que demonstram que o teste t é robusto a desvios da normalidade no caso de variáveis independentes. No caso das variáveis hidroquímicas medidas nesta pesquisa foi observada a proximidade a normalidade nas distribuições das frequências (segundo testes de aderência de Anderson-Darling e Ryan-Joyner, similar ao teste de Shapiro-Wilk), com pequenas assimetrias à esquerda para alguns dos dados (PC_OD, PC_RES, PMC_TEMP, PC_TURB, PMC_TURB, PC_SOD, PMC_SOD) e à direita para os demais, além de curtoses leptocúrticas (PMC_CE, PMC_RES, PMC_STD e PC_CLO) e platicúrticas (nas demais variáveis). Assim, para testar a hipótese nula entre os períodos sazonais (chuvoso e menos chuvoso) foi utilizado o teste paramétrico t de *Student* bilateral para 2 amostras independentes, com nível de significância de 5% (BARBETTA, 2012).

No sentido de avaliar o grau de correlação entre as variáveis hidroquímicas e a precipitação acumulada por período sazonal os dados foram submetidos a uma matriz de correlação de Spearman, e a hipótese nula adotada foi a de que o coeficiente de correlação é 0. Foi utilizada este tipo de correlação, pois a mesma analisa a intensidade a direção da relação monotônica entre duas variáveis contínuas ou ordinais. Em uma relação monotônica, as variáveis possuem a tendência de caminhar na mesma direção relativa (ascendente ou descendente), mas não necessariamente a uma taxa constante. Além de que, a correlação de Spearman representa uma alternativa mais comum para estimar correlações lineares quando não há garantia da suposição de normalidade do conjunto de dados (BAUER, 2007).

Com a medição dos múltiplos parâmetros hidroquímicos nos diferentes pontos amostrais ao longo dos anos (2015, 2016 e 2017) foi obtida uma matriz complexa composta por diferentes parâmetros e grandezas de laboriosa leitura e interpretação. Conforme Finkler et al. (2015), as técnicas de análise multivariada, como a Análise dos Componentes Principais (ACP ou PCA, do inglês *Principal Components Analysis*) e

Análise de Agrupamento Hierárquico (AAH ou HCA, do inglês *Hierarchical Clustering Analysis*), podem ser utilizadas para facilitar a leitura e interpretação de dados ambientais complexos como os relacionados a qualidade da água entre outros. Ainda segundo os autores, através da ACP é possível reduzir o número de variáveis a um pequeno número de índices (componentes principais ou fatores) sem perda das conexões entre os dados originais. Para a geração da ACP e HCA foi utilizado o critério de truncamento de Kaiser (KAISER, 1958) que inclui somente as Componentes Principais (CP's) mais significativas cujos autovalores são superiores a 1 para estimar o número de CP a serem escolhidas.

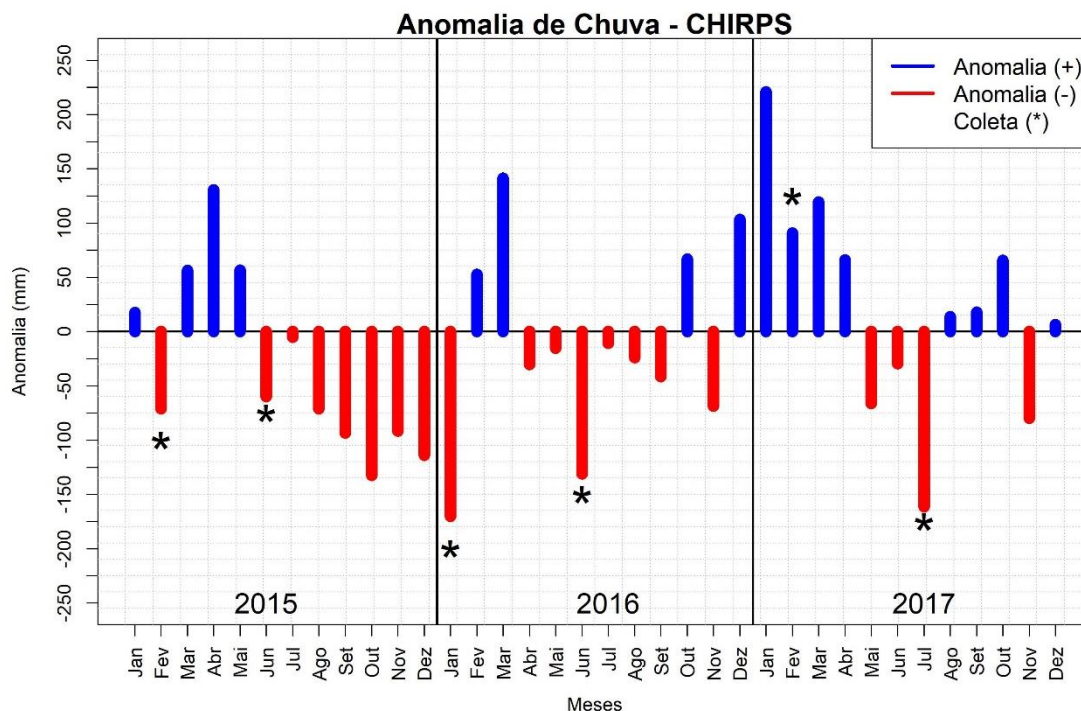
A técnica de interpolação por sistema de informação geográfica (GIS) foi utilizada para produção de mapas de variação espacial das variáveis hidroquímicas avaliadas na área de estudo. Assim foi selecionado o método de interpolação da distância ponderada inversa (IDW, do inglês *Inverse Distance Weighted*), pois segue uma abordagem de modelo determinístico em que os valores desconhecidos são calculados com base nos pontos próximos, em vez de nos distantes (KAWO; KARUPPANNAN, 2018). Ainda segundo os autores, este método de interpolação se ajusta bem aos parâmetros do mundo real.

Todos os tratamentos estatísticos foram realizados através do *software* livre R e para simplificar a realização do processamento foi utilizado o ambiente RStudio.

4.3 Resultados e discussão

A Figura 2 apresenta os valores de IAC (Índice de Anomalia de Chuva) para os anos de 2015, 2016 e 2017 de janeiro a dezembro de cada ano. Nela é possível observar que todas as coletas foram realizadas em meses com anomalia negativa (meses com menor volume de chuva do que o esperado), com exceção da quinta coleta realizada em fevereiro de 2017 (anomalia positiva – mês com maior volume de chuva do que o esperado).

Figura 2 – Anomalia de chuva para os anos de 2015, 2016 e 2017 com valor médio obtido entre os anos de 1988 e 2017 (dados de precipitação extraídos do banco do CHIRPS).



Fonte: Autoria própria.

Ainda na figura é possível destacar a ocorrência de três períodos de meses consecutivos de anomalia negativa: um mais longo com oito meses de menor ocorrência de chuvas entre junho/2015 e janeiro de 2016; um segundo mais longo com seis meses de redução das chuvas entre abril/2016 e setembro/2016; e, um período mais curto com três meses de anomalia negativa entre maio e julho de 2017. Pode-se também identificar três períodos com meses consecutivos com bom regime de chuvas: dois mais curto com três meses entre março a maio de 2015 e agosto a outubro de 2017; e, um mais longo com cinco meses entre dezembro/2016 a abril/2017. Os valores calculados de IAC variaram de +250 (janeiro/2017) a -175 (janeiro/2016). No período estudado não foi observada nenhuma tendência no valor de IAC, porém pode-se notar que o ano de 2017 apresentou maior ocorrência de anomalias positivas do que negativas. Enquanto que, os anos de 2015 e 2016 apresentaram comportamento inverso. Destaca-se também que as principais ocorrências de IAC positivas, aproximadamente 69%, ocorreram nos meses pertencentes ao período chuvoso da região (dezembro a maio), com exceção do trimestre agosto a outubro de 2017 pertencente ao período menos chuvoso e que apresentou maior ocorrência de chuvas do que o esperado. Em relação a ocorrência de

IAC negativas, aproximadamente 70% dos valores negativos ocorreu no período menos chuvoso (junho a novembro), com exceção de alguns meses do período chuvoso que apresentaram IAC negativa.

De acordo com o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) entre os anos de 2015 a 2016 teve-se a ocorrência de El Niño classificado como forte e La Niña classificada como moderada entre os anos de 2017 e 2018 (INPE, 2020). Desta forma, corroboram-se os dados obtidos neste trabalho, pois nos anos de 2015 e 2016 foram observados os dois períodos mais longo de meses consecutivos com IAC negativos e, consecutivamente, a maior concentração de registros negativos de IAC (cerca de 80% das ocorrências). Enquanto que, no ano de 2017 foi observado o período mais longo de meses consecutivos com IAC positivo, o ano com maior registro de IAC positivo e identificação da única coleta realizada com IAC positivo. Marengo (2006 apud PENEREIRO et al., 2018) afirma que impactos relacionados aos fenômenos El Niño e La Niña têm sido observados em diferentes regiões do Brasil, com destaque para a região Norte devido a ocorrência de secas mais intensas durante o El Niño no bioma Amazônia. Coutinho et al. (2018) relatam a preocupação com a variabilidade da precipitação e fluxo na bacia Amazônica e sua relação com o desmatamento, queimadas, eventos extremos e fenômenos meteorológicos, como El Niño, que causa seca e incêndios florestais, e La Niña, que causa aumento das chuvas e inundações.

A Tabela 2 apresenta os valores de precipitação acumulada por coleta levando em consideração três dias anteriores ao primeiro dia de coleta e os dias seguintes de realização da amostragem em campo. Os valores são apresentados se destacando a precipitação acumulada para cada ponto amostral em cada uma das seis coletas realizadas na área de estudo.

Tabela 2 – Valores de precipitação acumulada (mm) por coleta considerando os dias de coleta e os três dias anteriores ao início.

Pontos amostrais	Fev/2015	Jun/2015	Jan/2016	Jun/2016	Fev/2017	Jul/2017
P01	94,57	46,24	0,00	40,99	83,28	18,59
P02	114,96	48,24	0,00	43,88	83,39	20,57
P03	115,96	47,35	0,00	43,61	69,55	20,65
P04	112,19	49,76	0,00	43,88	71,16	34,90
P05	101,00	43,69	0,00	49,81	72,63	62,14
P06	106,82	0,00	0,00	42,36	78,83	36,82
P07	104,38	47,45	0,00	49,11	87,90	32,90
P08	98,12	46,46	0,00	47,09	66,84	44,92
P09	98,42	0,00	0,00	29,89	85,48	25,73
P10	110,14	0,00	0,00	25,98	88,20	23,87
P11	105,38	0,00	0,00	33,60	71,94	22,62
P12	117,50	0,00	0,00	31,45	83,46	26,33

Fonte: Autoria própria.

Através da Tabela 2 pode-se observar que a primeira coleta (fevereiro/2015) apesar de ter apresentado IAC negativo (o menor entre os negativos) apresentou valores de precipitação (entre 98 mm e 118 mm) maiores do que os valores de precipitação (entre 66 mm e 89 mm) registrados para fevereiro/2017 (única coleta com IAC positivo). Nota-se também que no período considerado para a terceira coleta (janeiro/2016) não foram registrados valores de precipitação (0 mm). Vale destacar que neste mês, pertencente ao período chuvoso e sob influência da ocorrência de El Niño forte, foi observado o maior valor negativo de IAC após sete meses de consecutivos valores negativos de IAC. Santos, Lucio e Silva (2015) citam que “as tendências negativas no sul da Amazônia sugerem que o ‘Arco do Desmatamento’, tem influenciado no ciclo hidrológico da região de forma significativa”. Ademais, todas as outras coletas (junho/2015, junho/2016 e julho/2017) apresentaram valores de precipitação (entre 0 e 63 mm) menores e que estão associados aos registros negativos de IAC. O acompanhamento da precipitação acumulada dos dias antecessores a coleta mais os dias de coleta é importante para avaliar possíveis distúrbios no campo hidrológico local, que podem gerar aumento dos níveis dos tributários e rio principal, com consequente ocorrência de inundações e enchentes devido ao grande volume de chuvas intensas (COSTA et al., 2018).

Na Tabela 3 estão expostos os valores médios de precipitação acumulada levando em consideração três dias anteriores ao primeiro dia de coleta e os dias seguintes de realização da amostragem em campo, agrupados por período sazonal: considerou-se pertencente ao período chuvoso as coletas realizadas em fevereiro/2015, janeiro/2016 e fevereiro/2017; e, ao período menos chuvoso as coletas realizadas em junho/2015, junho/2016 e julho/2017. Assim é possível observar que para o período chuvoso foram obtidos valores de precipitação acumulada média variando entre 54 e 67 mm. Enquanto que, para o período menos chuvoso foram obtidos valores de precipitação acumulada média em uma faixa menor, entre 16 a 52 mm, do que para o período chuvoso.

Tabela 3 – Valores de precipitação acumulada média (mm) por período sazonal.

Pontos amostrais	Período chuvoso	Período menos chuvoso
	(fev/2015; jan/2016; fev/2017)	(jun/2015; jun/2016; jul/2017)
P01	59,28	35,27
P02	66,12	37,56
P03	61,84	37,20
P04	61,12	42,85
P05	57,88	51,88
P06	61,88	26,39
P07	64,09	43,15
P08	54,99	46,15
P09	61,30	18,54
P10	66,11	16,62
P11	59,11	18,74
P12	66,98	19,26

Fonte: Autoria própria.

Ressalta-se a importância do estudo da qualidade da água diante da sazonalidade da precipitação de uma determinada região. Diversos estudos como Boareto et al. (2019), Medeiros, Silva e Lins (2018), Muniz et al. (2020) e Oliveira et al. (2019), entre outros, realizaram pesquisas relacionando a avaliação da qualidade da água em bacias hidrográficas com variabilidade sazonal e identificaram que certos parâmetros físicos e químicos de águas superficiais de rios sofrem influência de acordo com a quantidade de chuva na região. Assim, percebe-se a importância de identificar a variabilidade sazonal,

que juntamente com a variação espacial na área da sub-bacia do rio Guamá, poderão influenciar e justificar o comportamento de parâmetros físico-químicos.

É importante destacar que a análise da variabilidade climática possui forte relevância em estudos que relacionam fatores econômicos, sociais e ambientais com os impactos do clima, principalmente aqueles associados as práticas inadequadas de utilização do solo em bacias rurais nas quais apresenta-se a substituição da cobertura vegetal nativa por pastagens ou outras culturas (NORONHA; HORA; DILVA, 2016), como na sub-bacia do rio Guamá.

Na Figura 3 estão expostos os gráficos com a distribuição do comportamento dos valores médios de cada parâmetro físico-químico avaliado na água do rio Guamá de acordo com o mês/ano da coleta e o ponto amostral. Não foi observada nenhuma tendência dos valores de uma determinada variável hidroquímica através da observação de um único ponto em comparação as demais coletas. Os comportamentos (descendentes ou ascendentes) observados para as variáveis hidroquímicas estão relacionados a variação espacial entre os doze pontos amostrais ao longo do trecho estudado do rio. Os valores das variáveis hidroquímicas obtidos nas águas superficiais do rio Guamá foram confrontados com os valores de referência dados pela Resolução CONAMA nº 357 (BRASIL, 2005). Por falta de um enquadramento regulamentado pelo órgão responsável adotaram-se os padrões de classe 2 às águas doces.

Na Figura 3A é possível observar o comportamento ascendente do pH partindo do ponto 1 em direção ao ponto 12 ocorrendo em todas as coletas, com exceção da 6ª coleta (período menos chuvoso). Nota-se que nos pontos localizados, principalmente, no alto e médio rio Guamá (pontos 1 a 7) foram obtidos valores de pH mais ácidos (geralmente $\text{pH} < 5,0$) do que aqueles mais a jusante. Os valores de pH variaram, de forma geral, entre 4,0 e 7,5. Sendo que, estes valores de pH podem ser alterados ao longo do rio devido fontes naturais ou antrópicas. Em 79% das amostras analisadas para pH houve valores abaixo da faixa recomendada (6,0 a 9,0) pela resolução e nenhum valor acima do limite máximo. Resultados em conformidade com a resolução foram encontrados majoritariamente, 90%, nas amostras da 6ª coleta. Ressalta que Sioli (1984 apud AGUILAR PIRATOBA et al., 2017) classifica os rios amazônicos como naturalmente ácidos e com distintos valores de pH, em destaque os rios de água branca (como o rio Guamá) com valores entre 6,2 e 7,2.

A Figura 3B apresenta a distribuição do comportamento dos valores de oxigênio dissolvido (OD) ao longo dos pontos amostrais. De acordo com a figura ora citada não é

possível observar um comportamento característico entre os pontos amostrais. Entretanto, Sassoma et al. (2015) relacionam um maior aporte de matéria orgânica dissolvida no período chuvoso com consequentes baixos valores de oxigênio dissolvido na água no período de estiagem. Os valores de OD nos pontos 1 a 9, durante a coleta 2 (período menos chuvoso), apresentaram os piores valores para este parâmetro. De forma geral, os valores de OD variam entre 2 e 10 mg.L⁻¹. Sendo que, um total de 36% das amostras analisadas apresentaram OD abaixo do recomendado (5 mg.L⁻¹) pela resolução ambiental citada. Os valores reduzidos de oxigênio dissolvido podem ser justificados pela entrada de matéria orgânica, decomposta por bactérias aeróbicas, proveniente de lançamento de esgoto doméstico não tratado diretamente à drenagem fluvial. Conforme foi observado ao longo do trecho em estudo do rio Guamá, muitas comunidades ribeirinhas utilizam a água do rio para diversas finalidades como higiene pessoal já que o saneamento básico é inexistente.

O comportamento da condutividade elétrica (CE) é apresentado na Figura 3C, onde é possível visualizar uma suave tendência ascendente do ponto 1 em direção ao ponto 12. Observa-se que os valores de CE variam entre 15 e 47 $\mu\text{S.cm}^{-1}$. De forma geral, nota-se que todas as coletas realizadas no período chuvoso apresentaram valores de CE ($> 28 \mu\text{S.cm}^{-1}$) maiores do que os valores obtidos nas coletas do período menos chuvoso. Rodrigues, Bittencourt e Fernandez (2018) associam este comportamento a ausência ou diminuição na quantidade de chuvas, apesar dos menores valores de vazão no rio e, consecutivamente, não ocorrência do efeito de diluição dos íons. A condutividade elétrica não é abordada pela resolução nº 357 do CONAMA. Entretanto, Rodrigues, Bittencourt e Fernandez (2018) citam que em bacias hidrográficas livres de perturbações antrópicas ocorrem baixas concentrações iônicas ($\text{CE} < 10 \mu\text{S.cm}^{-1}$), enquanto que a existência da influência de áreas agrícolas e do escoamento superficial elevam a CE para valores em torno de $57 \mu\text{S.cm}^{-1}$. Medeiros, Silva e Lins (2018) afirmam que a CE possui diferentes contribuições que podem elevar seu valor, em áreas urbanas esta elevação ocorre devido o lançamento de efluentes domésticos sem tratamento. Sabe-se que a área de estudo fica localizada em uma área rural e que não apresenta saneamento básico. Logo, os moradores utilizam as águas do rio para diferentes atividades, como a pesca, higiene pessoal, recreação, irrigação, transporte etc. Tal situação foi observada no ponto 12, como anteriormente citado, onde foram observados os maiores valores de CE para cada coleta, possivelmente influenciados pela localização na área urbana do município de São Miguel do Guamá. Onde foi verificado

em campo o lançamento de esgoto doméstico diretamente no rio. Em áreas rurais, os valores de CE estão relacionados ao “transporte de compostos iônicos utilizados na agricultura, tais como potássio, fósforo e nitrogênio” e ao intemperismo das rochas (MEDEIROS; SILVA; LINS, 2018).

Para a resistividade elétrica (RES), nota-se um comportamento inverso ao da CE. Assim, verifica-se a existência de suave tendência descendente de montante a jusante, ou seja, do ponto 1 em direção ao ponto 12 (Figura 3D). Visualiza-se também que a ampla maioria das coletas realizadas no período menos chuvoso apresentaram valores de resistividade maiores ($> 0,035 \text{ M}\Omega.\text{cm}^{-1}$) do que os valores obtidos nas coletas do período chuvoso. Conforme França et al. (2019), a resistividade representa o oposto da condutividade e informa a resistência da água em conduzir corrente elétrica, onde valores baixos impedem a troca iônica no corpo dos seres vivos do meio e valores altos conferem a água características corrosivas. Os valores de resistividade obtidos variaram entre 0,01 e $0,07 \text{ M}\Omega.\text{cm}^{-1}$. França et al. (2019), em estudo realizado nas águas superficiais do Rio São Francisco nos municípios de Juazeiro/BA e Petrolina/PE encontrou valores de resistividade elétrica em torno de $0,01 \text{ M}\Omega.\text{cm}^{-1}$. Este parâmetro não é abordado pela resolução nº 357 do CONAMA.

A Figura 3E apresenta a distribuição dos valores dos sólidos totais dissolvidos (STD). Nela é possível observar uma suave tendência ascendente dos valores obtidos do ponto 1 em direção ao ponto 12. Nota-se também que os resultados de STD obtidos para as coletas pertencentes ao período chuvoso são maiores ($> 14 \text{ mg.L}^{-1}$) do que os valores das coletas representativas do período menos chuvoso. É sabido que conforme temos um aumento do volume de chuvas aumenta o aporte de sedimentos nos rios (BAY, 2015). Também se entende que as práticas agrícolas de plantio, criação de animais e retirada da vegetação ripária aumentam o risco de erosão e perda do solo que são intensificados com o aumento das chuvas. Assim, justifica-se o fato do ponto 12, localizado em área urbana, e, aproximadamente, 69% das amostras coletadas em meses pertencentes ao período chuvoso apresentarem os maiores valores (todos acima de 16 mg.L^{-1}) de STD. De forma geral, nota-se que os valores de STD variaram entre 8 e 24 mg.L^{-1} . Sendo que, em 100% das amostras analisadas foram obtidos valores abaixo do valor máximo (500 mg.L^{-1}) recomendado conforme descrito na legislação ambiental para rios de Classe 2.

O comportamento ascendente, do ponto 1 em direção ao ponto 12, dos valores de temperatura da água (TEMP) são observados na Figura 3F. Nota-se que do ponto 1

ao ponto 4 os valores de temperatura da água são geralmente maiores que 25,5 °C e menores que 26 °C. Enquanto que, do ponto 5 ao ponto 12, estes valores de temperatura da água do rio variam entre 26 e 30 °C. Este comportamento pode ser associado ao fato de que os pontos a montante estão localizados em áreas mais fechadas e com cobertura vegetal densa; enquanto que os pontos a jusante estão localizados em áreas abertas e livres da influência vegetal, que poderiam impedir a entrada dos raios solares (AGUILAR PIRATOBA et al., 2017). Este parâmetro não é abordado pela resolução nº 357 do CONAMA. Segundo Garcia et al. (2018) os “despejos industriais ou altas cargas orgânicas elevam a temperatura da água e também diminuem a quantidade de oxigênio, modificando toda a vida aquática”. Ainda segundo os autores, a temperatura da água “influencia diretamente a cinética dos processos metabólicos oxidativos vitais, como a respiração e solubilidade dos gases dissolvidos”. Para Malheiros et al. (2012), “o material particulado, que chega ao corpo d’água por meio do escoamento superficial, também pode influenciar na temperatura da água, pois quando em elevada concentração absorve grande quantidade de calor.”.

Através da Figura 3G é possível constatar um comportamento ascendente dos valores de turbidez (TURB) da água do rio do ponto 1 em direção ao ponto 12. Destaca-se a acentuada queda que ocorre com os valores de turbidez obtidos na 3ª coleta (período chuvoso) a partir de ponto 6 até o ponto 12. Uma redução menos pronunciada também é observada neste trecho para as demais coletas. Foi possível observar em campo que à medida que a presença do homem aumenta (de P1 a P12) ocorrem cada vez mais áreas desprovidas de vegetação nativa, o que pode explicar o comportamento da turbidez neste estudo. Conforme Medeiros, Silva e Lins (2018), a elevação dos valores de turbidez possui relação com o processo erosivo ocasionado pelo manejo inadequado do solo em atividades agropecuárias em associação à retirada da vegetação das margens dos rios. Rodrigues, Bittencourt e Fernandez (2018) observaram o aumento dos valores de turbidez e sólidos suspensos relacionados a valas agrícolas que provocam distúrbios em encostas. No geral os valores de turbidez variam entre 5 e 19 NTU. Assim, 100% das amostras analisadas para essa variável apresentaram-se abaixo do limite de 100 NTU estipulado pela legislação.

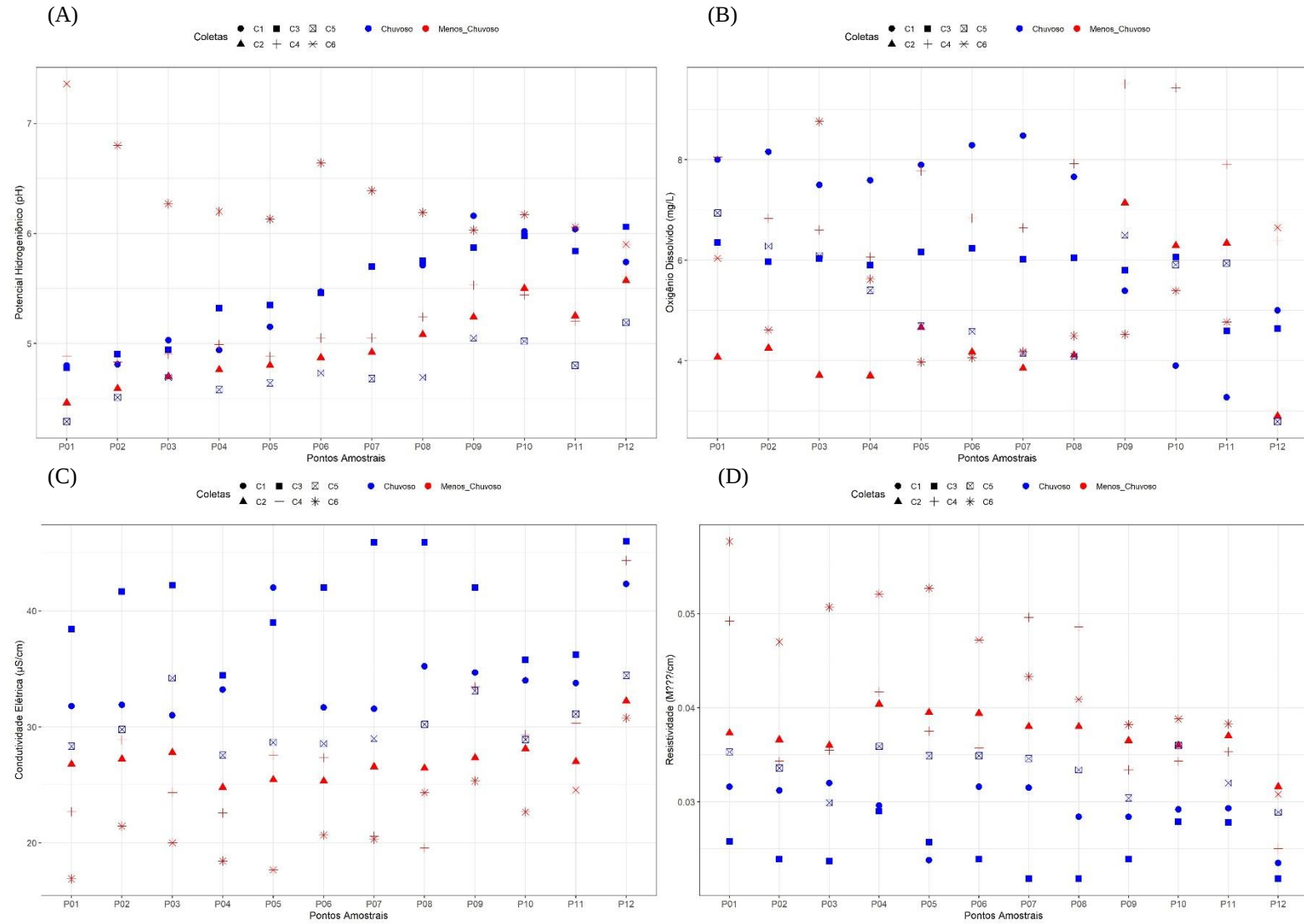
A saturação de oxigênio dissolvido (SOD) apresentou um comportamento estável ao longo dos pontos amostrais em todas as coletas realizadas (Figura 3H). Vale ressaltar que a SOD depende da altitude e da temperatura (SASSOMA et al., 2015). De acordo com a Embrapa (2011), as águas podem ser classificadas quanto ao teor de SOD

em: pobre em oxigênio ($SOD < 60\%$) que pode estar muito quente ou com bactérias consumindo o OD; aceitável para a maioria das espécies (SOD entre 60 e 79%), e; excelente para a maioria das espécies (SOD entre 80 e 125%). Em aproximadamente 19% das amostras analisadas nos meses pertencentes ao período chuvoso foram obtidos valores de saturação de oxigênio menores que 60%. Entretanto, em 53% das amostras analisadas nos meses pertencentes ao período menos chuvoso foram obtidos valores de SOD considerados pobres. Podem-se destacar os valores baixos ($< 25\%$) que ocorreram em todos os pontos amostrais na 6ª coleta pertencente ao período menos chuvoso. Este parâmetro não é abordado pela resolução nº 357 do CONAMA.

Na Figura 3I identifica-se um comportamento estável para os valores de cloreto (CLO) ao longo dos pontos amostrais, ou seja, sem uma definição característica de tendência ascendente ou descendentes dos valores. Entretanto, podem ser destacados os valores mais altos ($> 15 \text{ mg.L}^{-1}$) observadas para 92% das amostras obtidas na 2ª coleta (período menos chuvoso). De forma geral, nota-se que os valores de cloreto variaram entre 6 e 26 mg.L^{-1} , condizentes com os valores abaixo de 50 mg.L^{-1} relatados por Rodier (1980). Fato que representa um total de 100% das amostras analisadas abaixo do limite de 250 mg.L^{-1} estipulado pela resolução ora citada. A produtividade global dos ecossistemas aquáticos é influenciada pela concentração do íon cloreto, além de sua participação em processos fisiológicos relacionados a troca e/ou transporte de íons diferentes para os meios intra e extracelular (AGUILAR PIRATOBA et al., 2017).

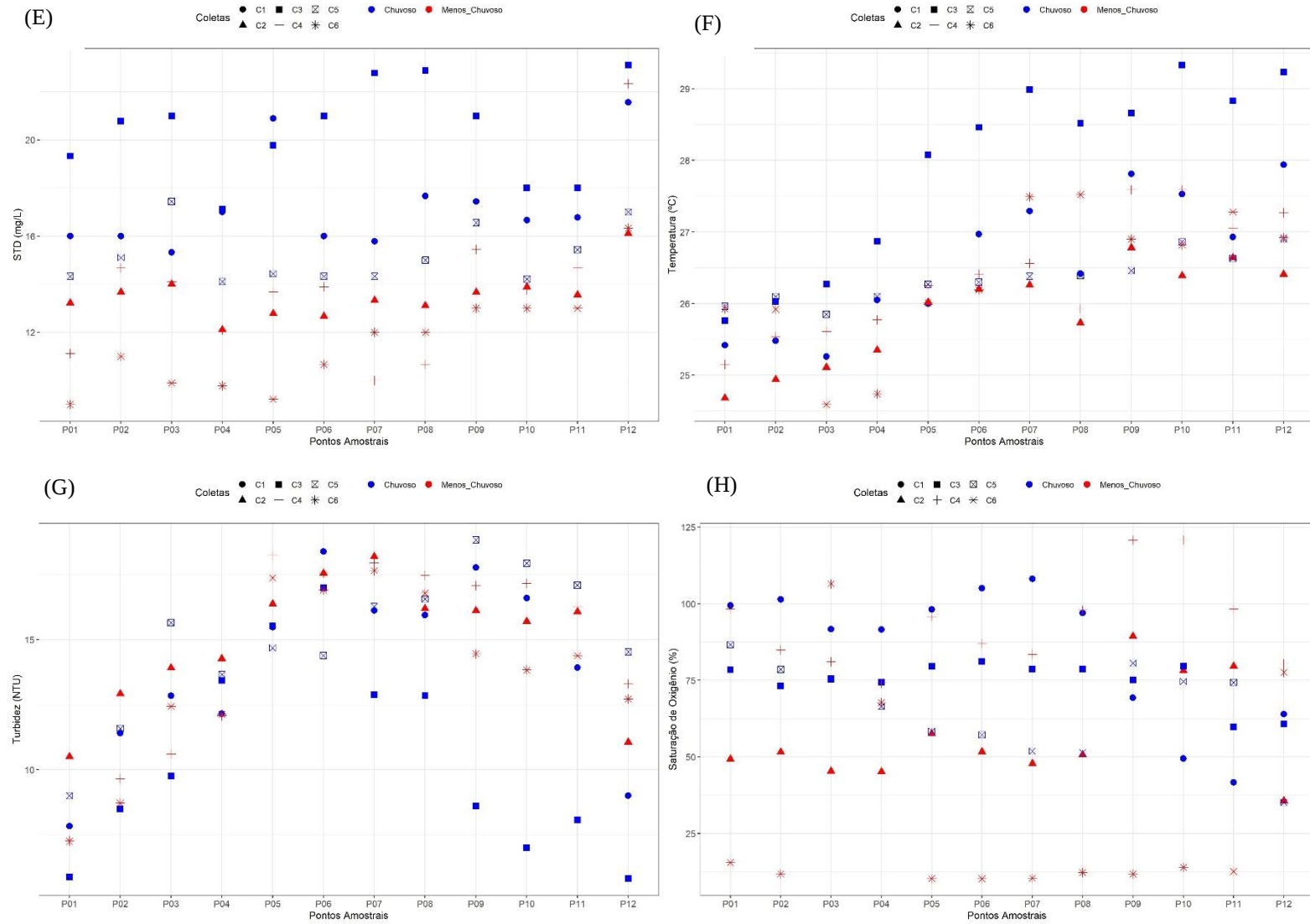
A dureza total (DT) apresentou comportamento ascendente dos valores obtidos ao longo dos pontos amostrais, do ponto 1 até ponto 12, em todas as coletas realizadas (Figura 3J). Conforme Aguilar Piratoba et al. (2017), “a dureza é influenciada pela geologia da bacia de drenagem e por atividades antrópicas”. De forma geral, verifica-se que os valores da dureza total variaram entre 2 e 11 mg.L^{-1} . Em menor escala, despejos industriais podem exercer influência. Este parâmetro não é abordado pela conforme descrito na legislação ambiental para rios. Contudo, as águas do rio Guamá podem ser classificadas como águas moles já que não ultrapassam o valor de 75 mg.L^{-1} (ESTEVES, 2011). Ainda segundo o autor, “geralmente ambientes com pH próximos à neutralidade apresentam uma dureza mole dado pelas baixas concentrações de carbonatos, sendo a reação com o CO_2 para a produção de bicarbonato desprezível”.

Figura 3 – Distribuição dos valores médios dos parâmetros físico-químicos por coleta e ponto amostral (continua).



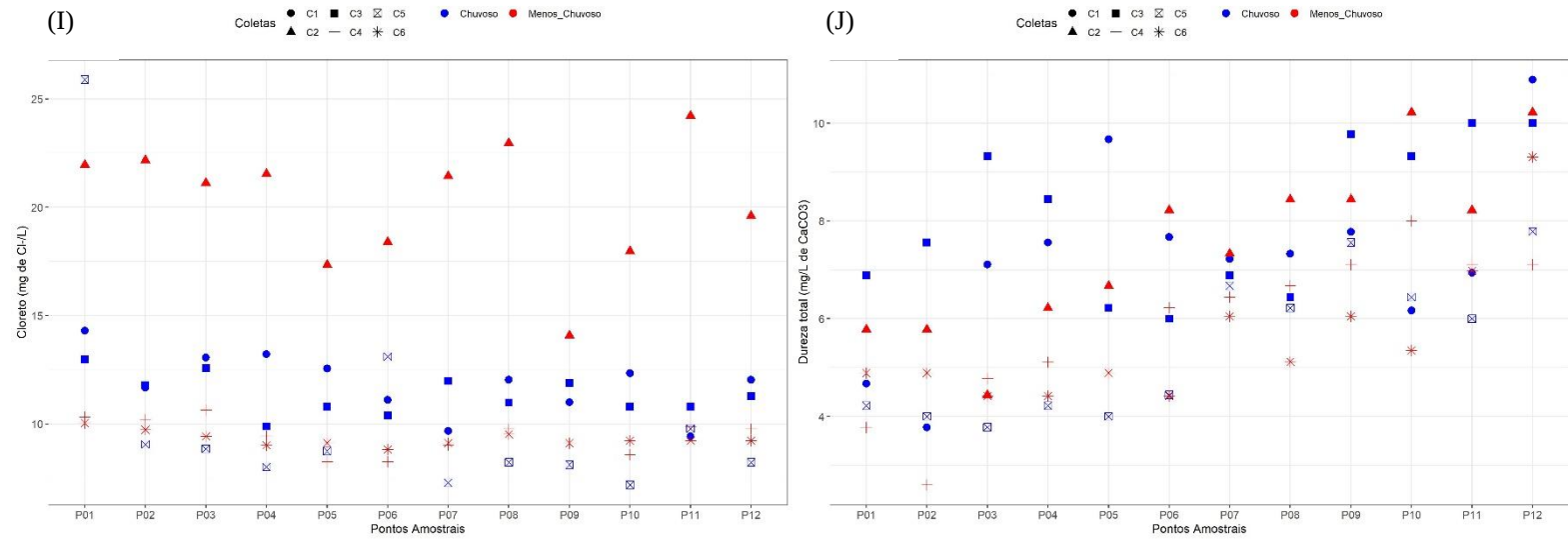
Fonte: Autoria própria.

Figura 3 – Distribuição dos valores médios dos parâmetros físico-químicos por coleta e ponto amostral (continuação).



Fonte: Autoria própria.

Figura 3 – Distribuição dos valores médios dos parâmetros físico-químicos por coleta e ponto amostral (conclusão).



Fonte: Autoria própria.

As matrizes de correlação de Spearman obtidas entre os parâmetros de qualidade da água do rio Guamá e a precipitação acumulada média para cada período sazonal (chuvoso e menos chuvoso) é mostrada na Figura 4. Neste trabalho foram considerados desprezíveis ou fracos os valores dos coeficientes de correlação de Spearman (r) menores que 0,5 (positivo ou negativo). Logo, na análise apresentada a seguir são discutidas apenas as correlações (positivas ou negativas) consideradas moderadas ($0,5 \leq r < 0,7$), fortes ($0,7 \leq r < 0,9$) e muito fortes ($r \geq 0,9$).

A variável pH apresentou correlações positivas com as variáveis CE ($r = 0,54$), STD ($r = 0,53$), temperatura da água ($r = 0,79$) e dureza total ($r = 0,64$) no período chuvoso. O pH ainda apresentou correlações negativas moderadas com as variáveis SOD ($r = -0,5$) e cloreto ($r = -0,52$) no período menos chuvoso, e com a variável resistividade elétrica ($r = -0,59$) no período chuvoso. As correlações positivas apresentadas ratificam a tendência de aumento em conjunto durante o período chuvoso entre variáveis pH/CE, pH/STD, pH/temperatura da água e pH/dureza total à medida que se avança do ponto 1 em direção ao ponto 12. Enquanto que, as correlações negativas demonstraram o comportamento inverso entre as variáveis pH/SOD e pH/cloreto, pois tem-se o aumento do pH de montante à jusante e decréscimo dos valores de SOD e cloreto no período menos chuvoso. O mesmo comportamento oposto é observado entre a variável pH e resistividade elétrica no período chuvoso.

A condutividade elétrica apresentou correlações moderadas positivas com a temperatura da água ($r = 0,59$) e a dureza total ($r = 0,59$), no período chuvoso, e correlação forte com o teor de STD ($r = 0,97$) no período menos chuvoso. A correlação negativa apresentou um caráter moderado entre as variáveis CE e a precipitação acumulada média ($r = -0,62$) no período chuvoso, e caráter muito forte entre as variáveis CE e resistividade elétrica no período chuvoso e menos chuvoso com valor de r iguais a $-0,99$ e $-0,9$, respectivamente. Os resultados confirmam a tendência de aumento da CE/temperatura da água e CE/dureza total à medida que o rio Guamá flui do ponto 1 em direção ao ponto 12 durante o período chuvoso. Esta tendência é ainda mais forte quando se observa a correlação entre a CE e o teor de STD no mesmo período. Destaca-se a tendência oposta entre a CE e a precipitação acumulada média no período chuvoso, ocasionada pelo leve aumento da quantidade de chuvas no trecho do ponto 7 ao 12 seguido de diminuição da concentração de íons que caracterizam a CE. O esperado comportamento contrário perfeitamente monotônico entre a CE e a resistividade elétrica foi identificado em ambos os períodos, onde é possível observar o aumento da CE e a diminuição da resistividade elétrica do ponto 1 em direção ao ponto 12.

A resistividade elétrica apresentou coeficientes de correlação negativos e moderados com as variáveis temperatura da água ($r = -0,57$) e dureza total ($r = -0,63$) no período chuvoso, e coeficientes de correlação considerados muito forte com o STD tanto no período chuvoso ($r = -0,98$) quanto no período menos chuvoso ($r = -0,92$). Somente foi obtido coeficiente de correlação positiva para a resistividade elétrica quando relacionada a precipitação acumulada média ($r = 0,58$, moderado) durante o período chuvoso. Assim, confirma-se a tendência de diminuição da resistividade elétrica do ponto 1 ao ponto 12, enquanto que, no período chuvoso aumentam os valores da temperatura da água e dureza total, e, em ambos os períodos, aumentam os valores de STD. A única correlação positiva apresentada é resultado da leve tendência de aumento da precipitação do ponto 7 ao 12 associada a leve tendência de aumento da resistividade elétrica considerando-se apenas o período chuvoso e o trecho citado. Este comportamento é observado devido a diluição dos íons presentes no rio pela introdução da água das chuvas que resultou em diminuição da CE e aumento da resistividade.

Foram obtidos valores de coeficientes de correlação positivos moderados entre as variáveis STD e temperatura da água ($r = 0,58$) e dureza total ($r = 0,58$) no período chuvoso. Enquanto que, no mesmo período sazonal, foi observado um valor de coeficiente de correlação negativo e moderado entre o STD e a precipitação acumulada média ($r = -0,61$). Os resultados indicam o aumento em conjunto das variáveis STD e temperatura da água partindo do ponto 1 até o ponto 12 durante o período chuvoso. A concentração de STD, assim como a CE, apresentou diminuição dos seus valores do ponto 7 ao 12 enquanto a quantidade de chuvas aumentava levemente neste mesmo trecho.

A variável temperatura da água apresentou coeficiente de correlação positivo moderado com a dureza total ($r = 0,53$) e coeficiente de correlação negativo moderado com a precipitação acumulada ($r = -0,54$), ambos no período chuvoso. A tendência positiva entre a temperatura da água e a dureza total é representada pelo aumento dos valores destas variáveis do ponto 1 ao ponto 12. Enquanto que, se observa uma tendência contrária quando se relaciona a quantidade de chuvas, principalmente devido ao comportamento decrescente da temperatura no trecho compreendido entre os pontos 7 e 12. Onde no mesmo trecho se observa o aumento mais representativo da precipitação acumulada média.

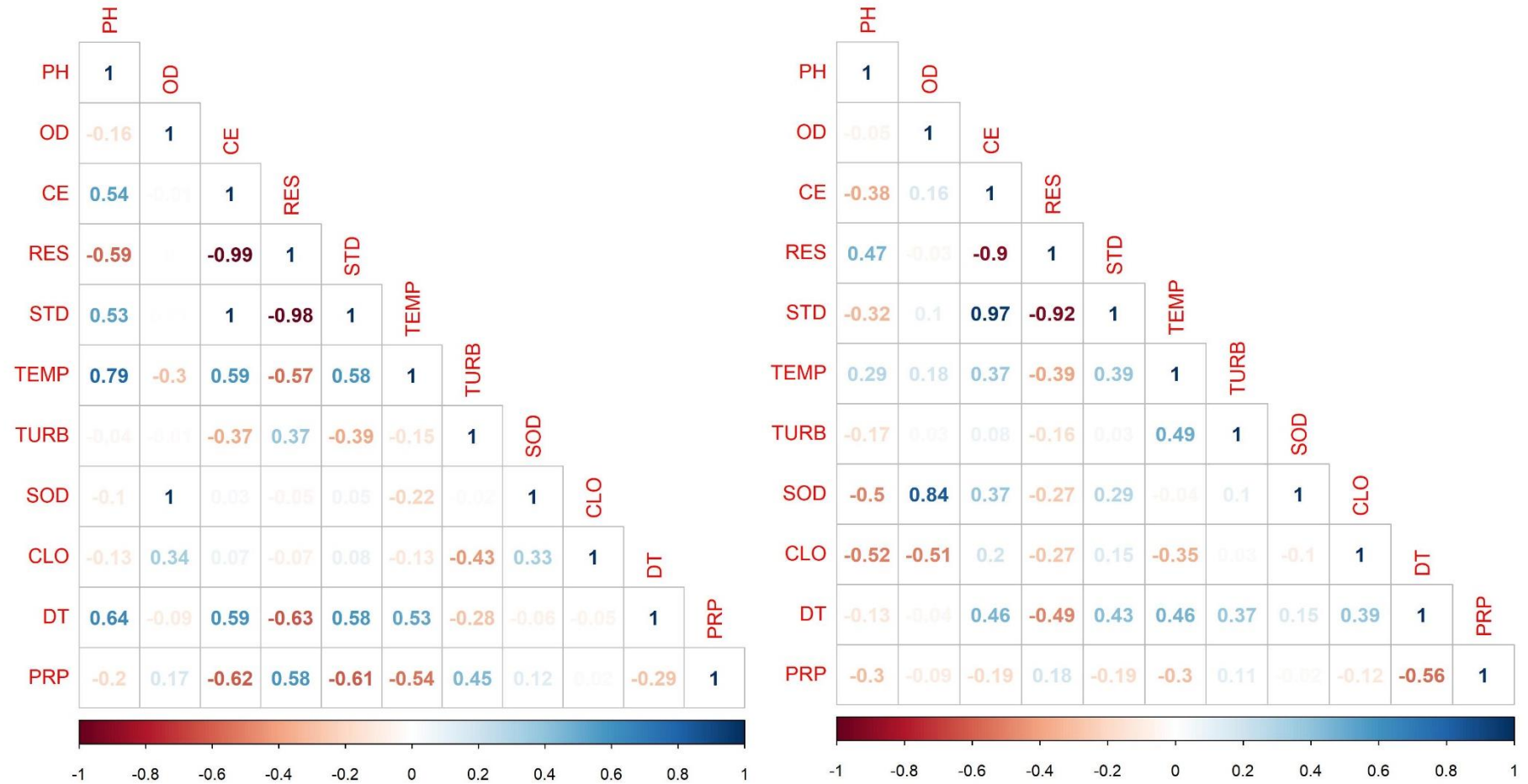
A concentração de oxigênio dissolvido na água apresentou correlação positiva e forte com a saturação de oxigênio dissolvido ($r = 0,84$) no período menos chuvoso, e correlação negativa e moderada com a concentração de cloreto ($r = -0,51$) no mesmo período. A

correlação positiva entre o oxigênio dissolvido e a SOD é representada pela tendência de aumento destes valores no período menos chuvoso, principalmente no trecho compreendido pelos pontos 1 a 7. Enquanto que, o cloreto apresenta comportamento decrescente no trecho anteriormente citado e resulta em comportamento contrário ao do oxigênio dissolvido.

Com base nos valores dos coeficientes de correlação pode-se observar correlações negativas da variável precipitação acumulada média com a CE ($r = -0,62$), STD ($r = -0,61$) e temperatura da água ($r = -0,54$) no período chuvoso e com a dureza total ($r = -0,56$) no período menos chuvoso. De acordo com Andrietti et al. (2016), espera-se que uma maior ação do escoamento superficial em áreas agrícolas e de pastagens durante o período de chuvas ocasiona aumento nos valores de variáveis físico-químicas, como a CE e STD. Entretanto, neste trabalho não foi observada esta correlação, pois no período de maior precipitação notou-se redução destas variáveis. Esteves (2011) explica que “a condutividade elétrica muda com a sazonalidade sendo menor no período chuvoso por causa do aumento do fator de diluição dos íons”. O mesmo efeito pode ser considerado para a concentração de sólidos totais dissolvidos, que é diretamente relacionada com a CE (AGUILAR PIRATOBA et al., 2017), na água de um rio. O comportamento de redução da temperatura da água no período chuvoso, pode ser explicada, pois de acordo com Sá Filho (2010) “na época de maior precipitação, a nebulosidade aumenta e dificulta a entrada dos raios solares às superfícies dos corpos d’água, o que não sucede no período menos chuvoso, pois o tempo de incidência dos raios solares é maior”. A tendência de aumento da dureza total diante da diminuição da quantidade de chuva no período menos chuvoso pode ser explicada segundo Sharma e Tiwari (2018). Segundo os autores, dois fatores podem ser responsáveis pela elevação da dureza no verão: baixo nível de água e alta taxa de evaporação no corpo hídrico. Assim, como há maior incidência dos raios solares diretamente na água superficial durante os meses menos chuvosos, a água da superfície evapora, resultando em um aumento na concentração dos cátions, principalmente Ca^{2+} e Mg^{2+} , e ânions, principalmente bicarbonatos e carbonatos, no corpo d’água. A única correlação positiva observada com a precipitação ocorreu com a variável resistividade elétrica ($r = 0,58$) durante o período chuvoso, devido à já citada diluição da carga iônica do corpo hídrico e consequente diminuição da capacidade de condução de corrente elétrica. Por fim, nota-se também que entre as variáveis CE/resistividade elétrica e resistividade elétrica/STD foram mantidos coeficientes negativos muito fortes tanto para o período chuvoso ($r = -0,99$ e $r = -0,98$, respectivamente) quanto para o período menos chuvoso ($r = -0,9$ e $r = -0,92$, respectivamente). De acordo com Libânio (2016), a condutividade elétrica relaciona-se

diretamente com a concentração de sólidos totais dissolvidos e, conforme França et al. (2019), a resistividade é a tendência oposta à condutividade. Desta forma, explica-se o comportamento observado entre a resistividade elétrica e os parâmetros CE e STD.

Figura 4 – Matriz de correlação entre os parâmetros físico-químicos e a precipitação diária média (mm) para o período chuvoso (à esquerda) e período menos chuvoso (à direita).



Todavia, Liu et al. (2017) e Putro et al. (2016) comentam a fundamental importância que os diferentes usos da terra representam para alterações na qualidade da água, cujo aumento do escoamento e diminuição da qualidade da água são observados quando o uso do solo muda de natural para urbano. Cordeiro, Arbage e Schwartz (2017), em um estudo amplo sobre a mesorregião do nordeste paraense, cita que as áreas destinadas aos sistemas e subsistemas produtivos familiares (cobertos por florestas com ampla diversidade animal e vegetal) vêm sendo substituídas ao longo das últimas décadas por áreas de pastagens degradadas e de vegetação em vários estágios sucessionais. Ainda segundo os autores, a exploração madeireira, a expansão do agronegócio, a extensão das pastagens de gado, a agricultura mecanizada, a extração de minério, baixo incentivo à agricultura local, uso do fogo como técnica de preparo da terra e a caça predatória influenciaram nas transformações dos ecossistemas naturais da região. Conforme Silva e Alves (2018), em estudo sobre a diversidade de sistemas de produção familiares integrados à agroindústria do dendê realizado no nordeste paraense, foram identificadas 29 atividades (entre cultivos de culturas anuais e perenes, criações de pequenos e grandes animais, coleta de produtos de floresta, caça de animais silvestres e pesca artesanal) praticadas nos estabelecimentos agrícolas familiares (grande variabilidade nos tamanhos de áreas dos lotes) integrados às agroindústrias de dendê. Segundo Nahum e Santos (2013 apud FERREIRA et al., 2017), “a expansão do dendê no nordeste paraense ocasionou problemas, tais como: concentração fundiária, conflitos no campo, risco ambiental sobre os corpos d’água por conta da abertura de estradas e da intensidade de herbicidas, fungicidas, bem como de adubo”. Silva, Silva e Reis (2019) ratificam o desenvolvimento socioeconômico no nordeste paraense ao apresentar resultados que demonstram a liderança nacional desta mesorregião em número de empreendimentos econômicos solidários (EES), em áreas urbanas e/ou rurais, relacionados a agricultura familiar e extrativismo. Também é importante destacar que Souza et al. (2018) relatam a intensificação do cultivo da soja no Estado do Pará, principalmente em municípios do nordeste paraense.

Para avaliar a variação da qualidade da água nos períodos chuvoso e menos chuvoso buscou-se analisar os resultados segundo o aspecto do regime de sazonalidade. Com base nos valores de curtose e assimetria os dados foram considerados com distribuição aproximadamente normal. Desta forma, as seis coletas foram agrupadas em dois grupos (período chuvoso e menos chuvoso). A Tabela 4 apresenta o resultado do teste de comparação dos parâmetros físico-químicos e de precipitação média acumulada (mm) e os desvios padrão.

Tabela 4 – Teste de comparação entre as médias gerais ($\pm$ desvio padrão) dos parâmetros físico-químicos e de precipitação média acumulada (mm) nos pontos amostrais nos dois períodos sazonais em estudo.

Período	pH	OD mg.L⁻¹	CE μS.cm⁻¹	RES MΩ.cm⁻¹	STD mg.L⁻¹	TEMP °C	TURB NTU	SOD %	CLO mg.L⁻¹	DT mg.L⁻¹	PRP mm
Chuvoso	5,23 ^A	5,95 ^A	35,18 ^A	0,03 ^A	17,62 ^A	26,95 ^A	13,14 ^A	75,08 ^A	11,13 ^A	6,92 ^A	61,72 ^A
	$\pm 0,38$	$\pm 0,38$	$\pm 2,48$	$\pm 0,00$	$\pm 1,24$	$\pm 0,84$	$\pm 2,66$	$\pm 10,30$	$\pm 2,15$	$\pm 1,23$	$\pm 3,64$
Menos chuvoso	5,49 ^B	5,78 ^A	25,53 ^B	0,04 ^B	12,98 ^B	26,21 ^B	14,39 ^A	60,15 ^B	12,99 ^B	6,29 ^A	32,80 ^B
	$\pm 0,14$	$\pm 0,76$	$\pm 3,88$	$\pm 0,01$	$\pm 1,91$	$\pm 0,75$	$\pm 3,07$	$\pm 10,23$	$\pm 1,20$	$\pm 1,42$	$\pm 12,38$

Valores que não dividem a mesma letra, em uma mesma coluna, apresentam diferença estatística entre si ($p < 0,05$), segundo teste *t*.

Fonte: Autoria própria.

É possível identificar que durante o período de coleta houve variações nos valores ($p < 0,05$) obtidos por meio das análises *in situ* e laboratoriais para algumas variáveis em função da sazonalidade. Contudo, o teste t de *Student* bilateral para 2 amostras independentes inferiu que não houve diferença estatística significativa entre os dois períodos para os parâmetros oxigênio dissolvido, turbidez e dureza total ($p = 0,618$, $0,297$ e $0,264$, respectivamente).

Nota-se que para o período chuvoso foi obtido um maior valor de precipitação acumulada média em comparação ao período menos chuvoso. Este resultado ratifica a caracterização dos meses de fevereiro/2015, janeiro/2016 e fevereiro/2017 como pertencentes ao período chuvoso. Para este período foram obtidos os valores mais elevados de pH ($p = 0,043$), condutividade elétrica ($p = 0,000$), resistividade elétrica ($p = 0,000$), sólidos totais dissolvidos ($p = 0,000$), temperatura da água ($p = 0,032$), saturação de oxigênio dissolvido ($p = 0,002$), cloreto ($p = 0,016$) e precipitação acumulada média ($p = 0,000$). Logo, o teste inferiu que houve diferença estatística significativa entre os dois períodos já que os valores- p são menores que o nível de significância ($\alpha = 0,05$), conclui-se que o correto é rejeitar a hipótese de nulidade (valores entre os períodos sazonais são iguais).

Pode-se destacar o valor ácido ($\text{pH} < 7,0$) da água, devido a água da chuva também apresentar teores de ácidos orgânicos que reagem com a água do rio quando em contato (ALENCAR et al., 2019). Estes ácidos orgânicos também são produzidos no próprio solo. Conforme Damasceno et al. (2015) em estudo realizado no rio Amazonas (Amapá) acerca da avaliação sazonal da qualidade da água, foram identificados valores mais ácidos em comparação ao período seco provavelmente devido ao crescimento do teor de ácidos orgânicos lixiviados dos solos. Entretanto, Rodrigues, Bittencourt e Fernandez (2018) comentam que são esperados menores valores de pH em períodos com menor ocorrência de chuvas. Os autores ainda afirmam que efluentes agrícolas e a capacidade de amortecimento das matas ciliares remanescentes resultarem em diluição podem ser associados aos valores baixos de pH no período chuvoso.

A condutividade elétrica demonstrou variação na composição no corpo d'água entre os dois períodos sazonais. O valor mais elevado no período chuvoso infere a existência de maior concentração de elementos e íons no período chuvoso. Aguilár Piratoba et al. (2017) identificou CE maior no período menos chuvoso do que no período chuvoso em estudo realizado no entorno do polo industrial de Barcarena e que apresenta influência dos efluentes lançados pelas indústrias e pela comunidade da Vila do Conde. No caso do presente trabalho, não são identificados polos industriais, porém nota-se o fenômeno do escoamento superficial

da água das chuvas mais recorrentes no período chuvoso que transporta até o corpo d'água resíduos provenientes dos diferentes usos do solo, como os originários das atividades agropecuárias. Neste caso, o efeito da diluição é menos pronunciado na CE e mais eficiente na resistividade elétrica. Para este último parâmetro físico-químico nota-se um valor menor no período chuvoso, conforme esperado, pois a maior concentração de íons indica menor resistência da água em conduzir corrente elétrica.

De acordo com Esteves (2011), “os sólidos totais dissolvidos (STD) estão relacionados diretamente com a condutividade elétrica”. O que pode ser constatado neste trabalho já que ambos os parâmetros apresentam maior valor no período chuvoso. Como já mencionado, esta variável pode ser afetada por atividades antrópicas que afetam o corpo d'água através da inserção de sais, provenientes de processos de intemperismo, e componentes não iônicos. Alencar et al. (2019) também citam a contribuição da erosão de solos ou a movimentação do corpo d'água para o acúmulo de solo e partículas minerais no leito do rio que influenciam na elevação da concentração dos sólidos totais dissolvidos. Ainda segundo os autores, seria esperado menor concentração de STD no período chuvoso devido maior diluição pelas águas da chuva

A temperatura da água foi maior no período chuvoso do que no período menos chuvoso. Apesar desta diferença ter sido menor que 1 °C, este comportamento é diferente do comumente relatado na literatura. Conforme já citado anteriormente, Sá Filho (2010) considera o efeito bloqueador dos raios solares pela nebulosidade no período de chuva preponderante para redução da temperatura das superfícies dos corpos d'água. Porém, ainda segundo o mesmo autor é importante destacar que a temperatura sofre alterações sazonais e diurnas. Além da existência de outros fatores que são importantes para a temperatura da água como: horário da coleta, posição do sol (influência direta ou não da radiação solar na lâmina superficial d'água), sombreamento do curso d'água pela cobertura vegetal de proteção das margens, temperatura do ar, poluição térmica pela descarga de efluentes, entre outros.

Foram obtidas maiores porcentagens de SOD no período chuvoso do que no período menos chuvoso. Em contrário, Damasceno et al. (2015) concluíram em estudo que a maior incidência de ventos no período menos chuvoso favorece a maior dissolução de oxigênio da atmosfera na água do rio, enquanto que, no período chuvoso uma maior concentração das diferentes frações de matéria orgânica resulta em consumo de oxigênio dissolvido. Para Esteves e Menezes (2011 apud DAMASCENO et al., 2015), “os fatores que controlam a concentração de oxigênio são a temperatura, corrente, luz, pressão e a matéria orgânica”.

Entretanto, vale destacar que a SOD, dada em porcentagem, depende da temperatura da água e da altitude local. Como foi obtida uma maior temperatura da água no período chuvoso, sugere-se que os demais fatores relacionados a dissolução do oxigênio sejam os responsáveis pelo aumento da SOD neste período. Valores de vazão poderiam confirmar uma maior turbulência das águas no período chuvoso com consequente maior dissolução de oxigênio na água do rio Guamá.

O teor de cloreto obtido para o período menos chuvoso foi maior do que no período chuvoso. Conforme Von Sperling (2007), a fonte natural de cloreto é a dissolução dos sais e as fontes antropogênicas são representadas pelos despejos industriais/domésticos e pelo escoamento da água de irrigação. Logo, considerando o valor máximo (250 mg.L^{-1}) estabelecido em legislação e os valores obtidos nos dois períodos sazonais, pode-se considerar que não foram observados níveis elevados desse componente segundo a variação sazonal e a possibilidade de inserção via fontes antrópicas.

Com o intuito de avaliar a tendência espacial ou sazonal, foi realizada a análise multivariada de agrupamento com variáveis hidroquímicas da água superficial do rio Guamá e a precipitação acumulada local. Na Tabela 5 apresentam-se as pontuações dos autovalores de cada componente principal (CP) e as proporções da variância explicada (%) e variância acumulada (%) para cada CP.

Tabela 5 – Autovalores, variância explicada e variância acumulada para cada componente principal.

Componentes Principais (CP)	Autovalores	Variância explicada (%)	Variância acumulada (%)
CP1	4,446	55,58	55,58
CP2	1,976	24,70	80,28
CP3	0,716	8,95	89,23
CP4	0,480	6,00	95,23
CP5	0,241	3,02	98,24
CP6	0,124	1,55	99,79
CP7	0,015	0,19	99,98
CP8	0,002	0,02	100,00

Fonte: Autoria própria.

A aplicação da ACP demonstrou a existência de oito componentes principais (CP) dentro da área de estudo quando observadas em conjunto as variáveis: pH, condutividade elétrica, resistividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, temperatura da água, saturação de

oxigênio dissolvido, cloreto e precipitação acumulada média. Nota-se que somente os dois primeiros CP apresentam autovalores maiores que 1. Kaiser (1960 apud MARDIA; KENT; BIBBY, 1979) sugere como critério para decisão do número total de componentes que melhor explicam o conjunto de variáveis originais incluir somente aquelas componentes cujos valores próprios sejam superiores a 1. Ainda segundo Kaiser (1960 apud HONGYU; SANDANIELO; OLIVEIRA JUNIOR, 2016), utiliza-se aquelas componentes que conseguem sintetizar uma variância acumulada em torno de 70%. Desta forma, foram evidenciados os resultados das componentes principais 1 e 2 que foram retidos com o auxílio do *scree plot* (Figura 5a). De acordo com a Tabela 5, o CP1 explicou uma variação de 55,58% e o CP2 uma variação de 24,70%, que juntas representam uma variância acumulada de 80,28%. Rencher (2002 apud Hongyu, Sandanielo e Oliveira Junior (2016) ratifica que “pelo menos 70% da variância total devem ser explicadas pelo primeiro e o segundo componentes principais”. Assim, com base neste valor os “dois primeiros componentes principais resumem efetivamente a variância amostral total e podem ser utilizados para o estudo do conjunto de dados”. A Tabela 6 apresenta as cargas fatoriais que indica a contribuição que cada variável possui em cada componente principal. As cargas fatoriais mais expressivas foram destacadas em negrito.

Tabela 6 – Cargas fatoriais das variáveis para os CP encontrados.

Parâmetro	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8
pH	-0,098	0,665	0,158	0,022	0,100	0,707	0,115	-0,010
CE	-0,460	0,015	0,169	0,202	-0,249	-0,096	-0,390	0,704
RES	0,460	0,001	-0,226	-0,115	0,148	0,105	-0,831	0,034
STD	-0,457	0,004	0,179	0,227	-0,277	0,117	-0,339	-0,708
TEMP	-0,300	0,486	0,057	0,069	0,632	-0,495	-0,141	0,028
SOD	-0,284	-0,414	0,351	-0,569	0,449	0,312	0,052	0,010
CLO	0,296	-0,323	0,453	0,689	0,346	-0,087	-0,018	-0,014
PRP	-0,317	-0,213	-0,729	0,302	0,331	0,340	-0,084	-0,003

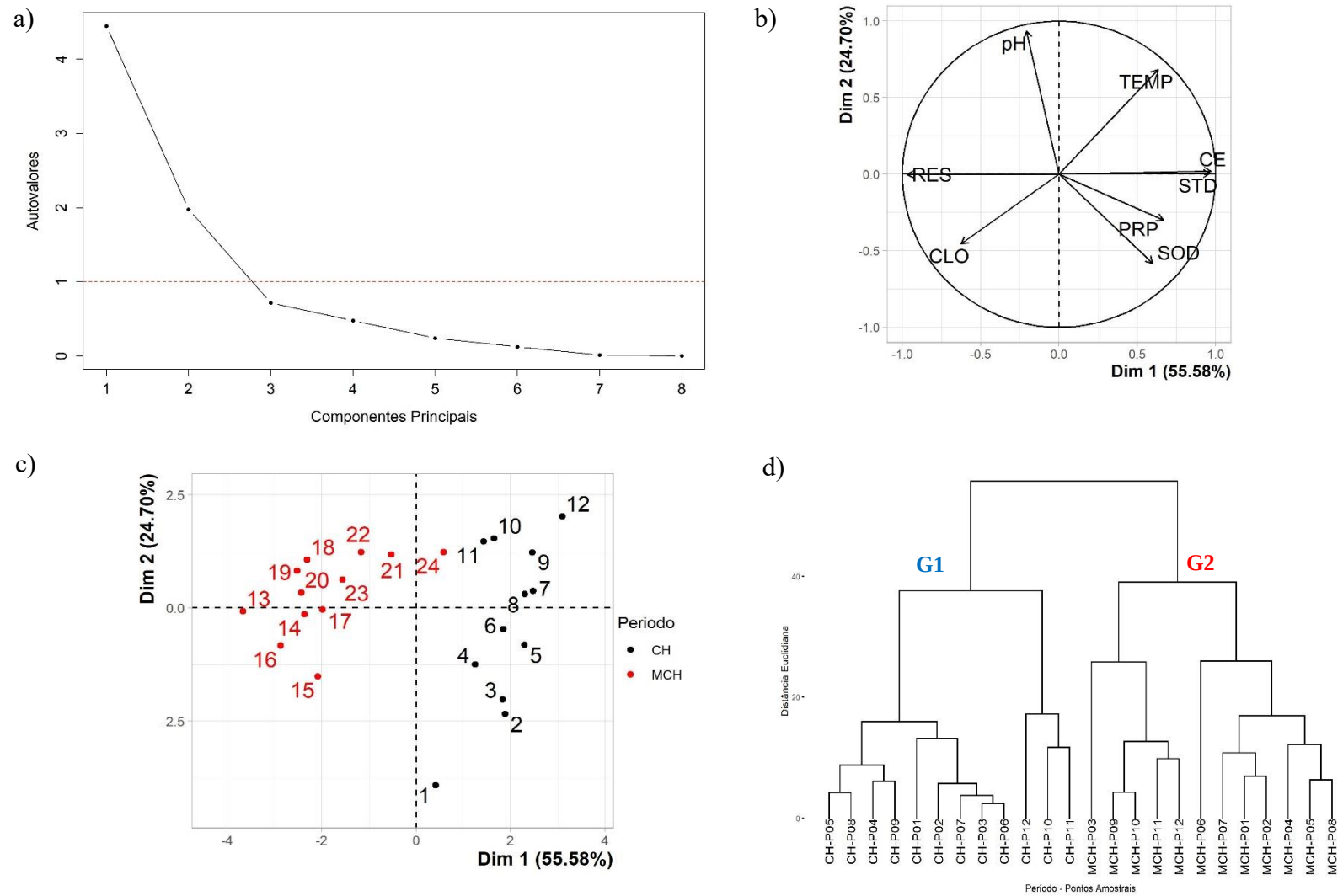
Em negrito estão as variáveis selecionadas pela metodologia B4

Fonte: Adaptado de (JOLLIFFE, 1972 apud RODRIGUES FILHO et al., 2015).

O CP1 é formado por variáveis com coeficiente negativo (condutividade elétrica, STD e precipitação) e positivo (resistividade elétrica). A associação entre estes parâmetros reafirma a relação entre essas variáveis, também obtidas na correlação de Spearman. Assim, identifica-se o comportamento oposto entre CE e STD com a resistividade elétrica sendo modulado pela precipitação local. O CP2 é composto pelos parâmetros pH e temperatura da água (ambos com coeficientes positivos) e, SOD e cloreto (ambos com coeficientes negativos). Não foi

constatado nenhum parâmetro em comum entre os dois CP que possuísem carga fatorial significativa. Estes resultados demonstraram influência da quantidade de precipitação local sobre as variáveis hidroquímicas. Na Figura 5 são apresentados os gráficos de: *Scree plot* (Figura 5a), *Loadings* (Figura 5b), *Score* (Figura 5c) e o dendograma (Figura 5d).

Figura 5 – Gráficos de Scree plot (a), Loadings (b), Score ou Biplot CP1 × CP2 (c) e dendrograma (d).



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 5b, que apresenta a ordenação da ACP para a área de estudo, é possível constatar que os parâmetros temperatura da água, CE, STD, SOD e precipitação acumulada contribuíram para a ordenação do lado positivo do eixo horizontal (CP1). Enquanto que, cloreto, resistividade elétrica e pH contribuíram para a ordenação do lado negativo do mesmo eixo. O eixo vertical (CP2) foi ordenado com os parâmetros pH, temperatura da água, STD e CE no lado positivo (parte superior), e com os parâmetros resistividade elétrica, SOD, cloreto e precipitação acumulada no lado negativo (parte inferior).

Os pontos de amostragem sofreram maior pressão da sazonalidade local e foram ordenados com base no período de coleta. Na Figura 5c, os pontos 1 a 12 do período menos chuvoso correspondem as numerações 13 a 24, respectivamente. Desta forma, os pontos 1 a 12 do período chuvoso estão localizados no lado positivo da CP1, na qual encontram-se os maiores valores de temperatura da água, CE, STD, SOD e precipitação acumulada. Este comportamento pode estar associado provavelmente ao escoamento superficial de insumos como fertilizantes utilizados nos projetos de irrigação, o lançamento de efluentes domésticos e a proximidade de áreas urbanizadas a partir do ponto 10. Enquanto que, do lado oposto, com exceção do ponto 12 (identificado pelo número 24), estão os pontos do período menos chuvoso (identificados no gráfico pelos números 13 a 23) do mesmo lado que os maiores valores de cloreto, resistividade elétrica e pH. Identifica-se que a diminuição na quantidade de chuvas inibe, principalmente, a introdução de cátions/ânions e a acidificação da água superficial do rio Guamá. O caso específico do ponto 12 do período menos chuvoso representa o ponto mais a jusante do rio e o mais próximo de distância da área urbana do município de São Miguel do Guamá, onde o lançamento de efluentes domésticos foi claramente observado.

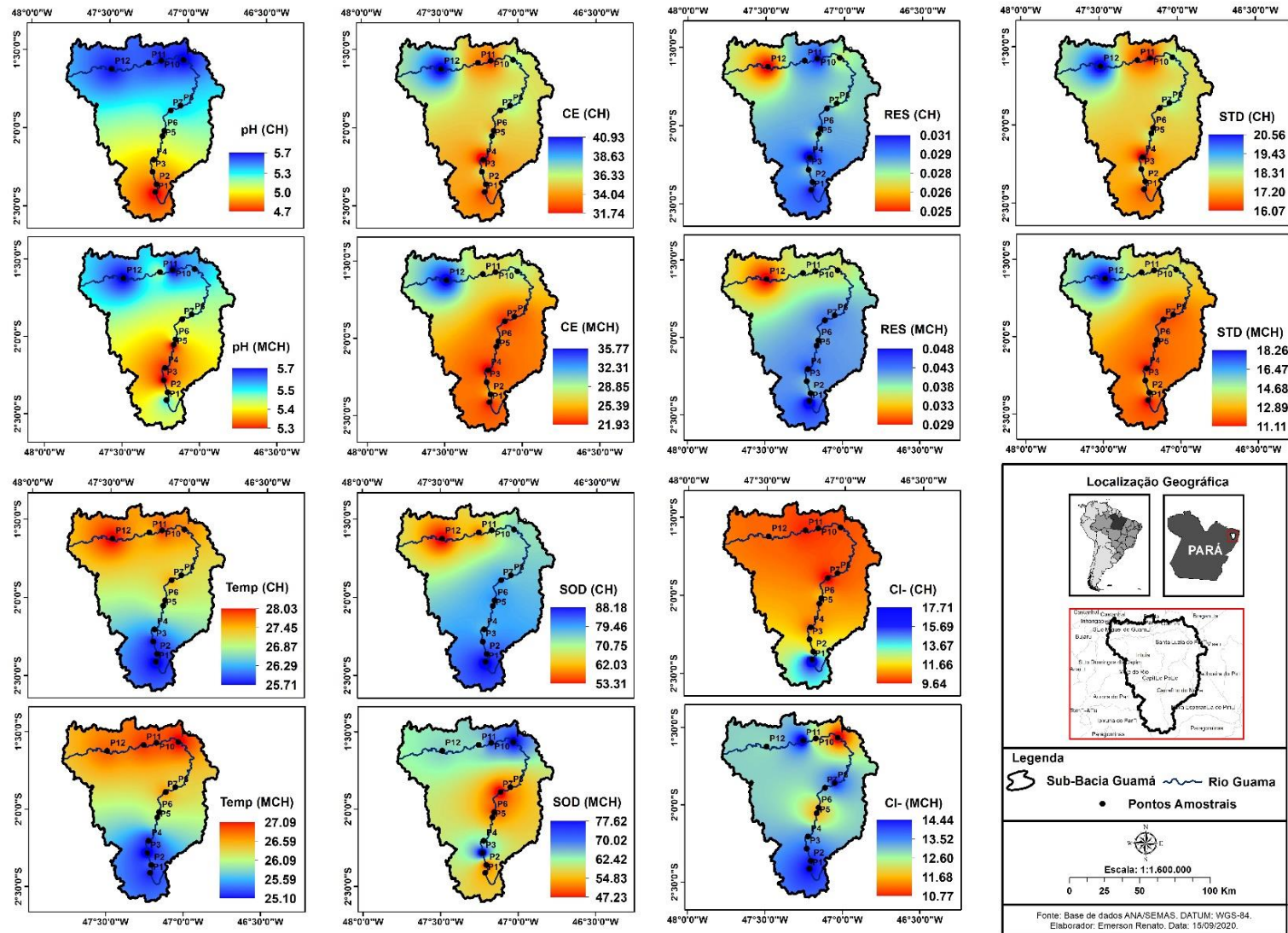
Destacam-se também que os pontos localizados a montante do rio tanto no período chuvoso (pontos 1 a 6) quanto no período menos chuvoso (pontos 1 a 5 identificados pelos números 13 a 17, respectivamente) estão ordenados no lado negativo da CP2. Neste lado podem ser encontradas os maiores valores de resistividade elétrica, SOD, cloreto e precipitação acumulada. No lado positivo da CP2 estão os demais pontos que gradativamente demonstram maior presença do homem e suas atividades socioeconômicas que impactam o rio. Neste mesmo lado foram ordenados os parâmetros pH, temperatura da água, STD e CE. Os resultados demonstram que os pontos a montante apresentam ausência impacto antrópico devido a menor presença do homem, maior quantidade de vegetação ciliar e maior quantidade

de chuvas que não impactam negativamente nos parâmetros físico-químicos ligados à poluição.

Com base nas variáveis que representaram 80,28% dos dados obtidos na ACP, explicados pelas componentes 1 e 2, foi gerado um dendrograma (ou AAH) (Figura 5d). Assim, nota-se a separação de dois grupos (*clusters*) distintos (G1 e G2), representando amostras nos diferentes pontos de coleta, que se ligaram a um nível de distância superior a 50. A separação desses grupos foi diretamente influenciada pela precipitação. O primeiro grupo (G1) é composto pelas amostras referentes ao período chuvoso destacando a ocorrência de um subgrupo formado pelas amostras dos pontos 10, 11 e 12. Estes pontos apresentam maior proximidade com as zonas urbanas dos municípios de Ourém e São Miguel do Guamá. Enquanto que, os demais pontos amostrais do período chuvoso encontram-se em área de mais difícil acesso devido ocorrem em zonas rurais. O segundo grupo (G2) é formado pelas amostras do período menos chuvoso, onde não foi identificada a formação de nenhum subgrupo devido à proximidade com áreas urbanas. Malheiros et al. (2012) em estudo realizado em uma represa localizada em área agrícola de Campo Verde/MT, obtiveram resultados que também demonstraram padrões de sazonalidade e uso e ocupação do solo diretamente relacionados às variáveis limnológicas.

A espacialização das variáveis hidroquímicas, de acordo com a sazonalidade (período chuvoso e menos chuvoso) na sub-bacia do rio Guamá pode ser observada na Figura 6. Ressalta-se que não foi realizada a espacialização das variáveis oxigênio dissolvido, turbidez e dureza total, pois as mesmas não apresentam diferença significativa dos valores entre os dois períodos sazonais em análise.

Figura 6 – Espacialização das variáveis hidroquímicas de acordo com a sazonalidade na sub-bacia do rio Guamá (SBRG).



Fonte: Autoria própria.

A espacialização do pH no período chuvoso demonstrou que os maiores valores ($\text{pH} > 5,3$) correspondentes a valores menos ácidos e mais próximo da neutralidade ocorrem na porção norte da área de estudo. Nota-se o aumento do pH da porção sul até atingir os maiores na porção citada. Para a espacialização do pH no período menos chuvoso identificam-se os maiores valores (pH em torno de 5,5) em torno do ponto 1 (um comportamento oposto ao observado nesta região da SBRG) e em torno dos pontos 10, 11 e 12 (pH em torno de 5,7). De forma geral, o pH apresentou uma tendência mais bem definida para o período chuvoso do que para o período menos chuvoso. Em resumo, os dois períodos sazonais apresentam comportamentos ascendentes de pH de sul ao norte da área de estudo.

No período chuvoso, a variável CE apresentou uma espacialização com os maiores valores em torno do ponto 12 ($\text{CE} > 38 \mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$) e com valores menores ($\text{CE} < 35 \mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$) e mais homogêneos nas demais áreas. Para o período menos chuvoso a espacialização resultou em um comportamento relativamente semelhante ao período chuvoso, porém a homogeneidade dos valores baixos ($\text{CE} < 25 \mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$) se tornou mais consistente. Assim, para ambos os períodos sazonais foi possível identificar o comportamento ascendente da CE a partir da porção sul até a porção norte.

No período chuvoso, a resistividade elétrica demonstrou através da espacialização dos resultados a ocorrência dos valores mais altos ($\text{RES} > 0,027 \text{ M}\Omega.\text{cm}^{-1}$) por toda área de forma homogênea, com exceção dos baixos valores ($\text{RES} < 0,025 \text{ M}\Omega.\text{cm}^{-1}$) em torno do ponto 12. No período menos chuvoso pode-se observar uma espacialização semelhante dos resultados, excetuando-se a redução dos valores ($\text{RES} < 0,037 \text{ M}\Omega.\text{cm}^{-1}$) da resistividade elétrica para a maioria dos pontos pertencentes a porção sul da SBRG (pontos 10 a 12). É possível destacar o comportamento semelhante nos dois períodos sazonais de redução da resistividade elétrica da porção sul sentido norte da área de estudo.

A espacialização de STD no período chuvoso resultou na concentração de valores altos ($\text{STD} > 19 \text{ mg}.\text{L}^{-1}$) em torno do ponto 12 e com as demais áreas apresentando valores menores ($\text{STD} < 13 \text{ mg}.\text{L}^{-1}$) distribuídos de forma homogênea. Destacam-se os picos negativos ($\text{STD} < 16 \text{ mg}.\text{L}^{-1}$) em torno dos pontos 3 a 4 e 10 a 11. No período menos chuvoso o comportamento da espacialização da variável foi semelhante ao período anteriormente descrito, porém não foram observados os picos negativos em torno dos pontos 3 a 4 e 10 a 11. Assim, verifica-se a tendência de crescimento da concentração de STD a partir da porção sul em direção a porção norte da SBRG para ambos os períodos sazonais.

No período chuvoso, com a espacialização da temperatura da água superficial foram observados os menores valores ($\text{TEMP} < 25,5 ^\circ\text{C}$) na porção sul e os maiores valores (TEMP

> 27 °C) na porção norte da sub-bacia. Picos positivos (> 27,5 °C) de temperatura da água foram identificados na área em torno dos pontos 10 e 11 e ainda mais acentuado (> 28 °C) no ponto 12. A espacialização dos valores de temperatura da água para o período menos chuvoso resultaram em um comportamento relativamente semelhante ao do período chuvoso, porém os picos de temperatura ocorrem de forma mais intensa nos pontos 10 e 11 (> 28 °C) do que no ponto 12. De forma geral, os períodos sazonais apresentam comportamentos aproximados na área de estudo, pois o período chuvoso apresentou tendência decrescente de SOD de sul a norte, enquanto o período menos chuvoso e menos chuvoso apresentaram tendência crescente de temperatura de sul a norte.

No período chuvoso, a espacialização da saturação de oxigênio dissolvido apresentou valores mais elevados (SOD > 79%) na porção sul, central e nordeste da SBRG. Enquanto que, os menores valores (SOD < 57%) concentram-se na porção noroeste, principalmente em torno dos pontos 11 e 12 (SOD aproximadamente de 53%). Na espacialização considerando o período menos chuvoso foi identificada uma distribuição menos homogênea da SOD com: picos positivos (SOD > 70%) em torno dos pontos 2 a 3 e 10 a 11, pico negativos (SOD < 45%) entre os pontos 5 e 8 e as demais áreas com valores medianos (SOD em torno de 62%). Assim, enquanto no período chuvoso identifica-se uma tendência decrescente da SOD da porção sul em direção ao norte. No período menos chuvoso tem-se uma tendência menos definida de um aumento da SOD de sul a norte na SBRG.

Os valores de cloreto demonstraram uma espacialização para o período chuvoso caracterizada com picos positivos ($\text{Cl}^- > 16 \text{ mg.L}^{-1}$) em torno do ponto 1 (porção do extremo sul da sub-bacia) e com valores homogêneos e menores ($\text{Cl}^- < 12 \text{ mg.L}^{-1}$) entre os pontos 2 a 12. A espacialização do cloreto para o período menos chuvoso apresentou picos negativos ($\text{Cl}^- < 11 \text{ mg.L}^{-1}$) em tornos dos pontos 5 a 6 e 10 a 11, e com as demais áreas apresentando valores moderados ($\text{Cl}^- > 12,5 \text{ mg.L}^{-1}$). De forma geral, nota-se predomínio de menores valores de cloreto ($\text{Cl}^- < 12 \text{ mg.L}^{-1}$) no período chuvoso e comportamento inverso no período menos chuvoso com maior ocorrência de valores elevados ($\text{Cl}^- > 12 \text{ mg.L}^{-1}$).

De acordo com Pereira (2017), as maiores taxas de urbanização da microrregião do Guamá ocorrem nos municípios de Mãe do Rio (82,61%) e São Miguel do Guamá (61,83%), e foram observadas taxas menores oscilando de 20,80% (Irituia) a 45,60% (Ourém). Assim, nota-se que o processo de urbanização é mais intenso na área de entorno dos pontos 10 a 12, com influência sobre as variáveis hidroquímicas estudadas. Finkler et al. (2015), em estudo sobre os fatores naturais e antrópicos que contribuem para a variação espacial e temporal da qualidade da água superficial nas bacias hidrográficas do município de Caxias do Sul/RS,

concluíram que a redução da qualidade da água foi proveniente fundamentalmente relacionada às atividades de caráter antrópico, como a ausência de tratamento de efluentes domésticos e industriais, assim como o efeito de cargas difusas sobre os corpos da água. Rodrigues, Bittencourt e Fernandez (2018) recomenda que sob o ponto de vista da gestão de uma bacia hidrográfica representativa modificada por sistemas agrícolas intensivos e comerciais e áreas urbanas, “a vegetação ripária deve ser promovida nos canais dos riachos e os usos agrícolas intensivos nas áreas adjacentes devem ser evitados de forma a não alterar a qualidade da água”.

De acordo com Cordeiro, Arbage e Schwartz (2017), os municípios de Capitão Poço e Garrafão do Norte apresentaram, respectivamente, 318,34 km² (4,08% da área total do município) e 144,05 km² (1,84% da área total do município) de área compreendida por floresta primária. Nestes municípios estão presentes os pontos intermediários de 5 a 8 sob influência de quantidade moderada de vegetação nativa quando se compara a porcentagem ainda menor obtida para o município de Ourém (0,83%), presente na porção norte da área de estudo e a jusante do rio Guamá.

Ainda segundo autores supracitados, em 2014 na microrregião do Guamá, os municípios de Ipixuna do Pará e Nova Esperança do Piriá apresentaram, respectivamente, 2.468,54 km² (31,61% da área total do município) e 1.219,86 km² (15,62% da área total do município) de área compreendida por floresta primária. Estes municípios apresentaram os maiores valores de áreas preservadas, considerando os municípios da porção sul da área de estudo, e estão localizados a montante dos pontos 1 a 4. A presença da floresta primária exerce uma contribuição benéfica para o rio Guamá e seus tributários, pois promove a regularização do regime ao longo do ano e melhora na qualidade da água. De acordo com Muniz et al. (2020), a mudança entre as estações seca e chuvosa pode levar a uma variabilidade temporal no volume de descarga de água dos fluxos de nutrientes associados que são controlados principalmente pelo fluxo de materiais residuais e apresentam uma alta variabilidade ao longo do tempo. O estudo de Cordeiro, Arbage e Schwartz (2017) demonstrou a ocorrência na região a montante do rio Guamá as maiores porcentagens de áreas destinadas a pastagem (17,53% em Capitão Poço e 15,34% em Ipixuna do Pará) e as maiores áreas destinadas a agricultura (64,93% em Nova Esperança do Piriá e 33,21% em Ipixuna do Pará). Enquanto que, os demais municípios localizados na parte intermediária e baixa da SBRG apresentaram porcentagens variando de 2,31% (Ourém) a 8,49% (Garrafão do Norte) em áreas destinadas a pastagem e 0,02% (em municípios como Santa Luzia do Pará e Mãe do Rio) a 0,64% (Capitão Poço) em áreas destinadas a agricultura. De acordo com Borges e Elias

(2020), o município de Nova Esperança do Piriá apresenta oficialmente como principais atividades econômicas a agricultura e o comércio/serviços (correspondem a 69% da economia municipal), porém dados não oficiais demonstram que a extração ilegal de madeira (proveniente majoritariamente da reserva indígena do Alto Rio Guamá) possui forte contribuição na geração de emprego e renda do município. Rodrigues, Bittencourt e Fernandez (2018), em estudo abordando a dinâmica de uso e ocupação do solo realizado em uma bacia hidrográfica da área rural do município de Capitão Poço, relataram que entre os anos de 1984 e 2010 ocorreu aumento das áreas de pastagem (17,30%), redução nas áreas de terras de cultivo (-13,70%), redução em áreas de floretas (-3,60%) e a existência de uma área significativamente grande destinada ao cultivo de *citrus* (laranja) com fins industriais.

4.4 Conclusão

Foi evidenciado que nos anos de 2015 a 2017, na SBRG, ocorreram variações mensais das precipitações, em relação à normal climatológica. Onde foi observado que as coletas realizadas nos anos de 2015 (fevereiro e junho) e 2016 (janeiro e junho) apresentaram correspondência com o forte efeito do El Niño. Vale ressaltar que o ano de 2017 estava sob efeito moderado de participação dos eventos La Niña. Os fenômenos atmosféricos-oceânicos El Niño e La Niña causam efeitos na quantidade de precipitação que afetará o regime dos rios, a quantidade de escoamento superficial, a diluição ou concentração de poluentes e outros compostos químicos.

No sentido de minimizar a influência destes fenômenos climáticos, os valores de precipitação acumulado demonstraram que as coletas realizadas em fev/15 e fev/17 possuíam valores maiores de precipitação (em média 106,62 e 78,56 mm, respectivamente). As coletas dos meses de jun/15, jun/16 e jul/17 apresentaram valores menores de precipitação acumulada: em média 27,43, 40,14 e 30,24 mm, respectivamente. Somente a coleta do mês de janeiro de 2016 não apresentou precipitação no período da coleta (0,00 mm). Ao observar as coletas agrupadas por período sazonal foi possível constatar maior valor médio de precipitação para o período chuvoso (61,73 mm) e menor valor médio para o período menos chuvoso (32,80 mm). Este comportamento é fundamental para estabelecer a relação das variáveis hidroquímicas da região com a influência direta da distribuição irregular da precipitação.

Os parâmetros físico-químicos de qualidade das águas superficiais na sub-bacia do rio Guamá apresentaram alta heterogeneidade espacial e tendências ascendentes ou descendentes

na direção montante a jusante no rio Guamá. Esta heterogeneidade pode estar sendo influenciada pelas condições do entorno e das áreas drenadas pelo corpo d'água analisado. Os pontos à montante (alto rio Guamá) estão localizados em áreas acidentadas, principalmente cobertas por vegetação nativa e com um relativamente baixo nível de perturbação das atividades humanas. Assim, alguns parâmetros físico-químicos (oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, temperatura da água superficial, turbidez, dureza total) apresentaram tendência desfavorável ao meio ambiente aquático no sentido montante a jusante. Os distúrbios antropogênicos são potencializados no ponto 12 devido estar localizado na área urbana de São Miguel do Guamá, onde a densidade populacional é alta.

A quantidade de precipitação local pode ser relacionada com algumas variáveis hidroquímicas do rio Guamá, o que demonstra a existência a influência das chuvas e a localização dos pontos quanto a ocorrência de possíveis impactos. O período chuvoso demonstrou afetar os valores de resistividade elétrica, devido ao efeito da diluição dos íons presentes na água, e os valores de condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos e temperatura da água. A única correlação observada no período menos chuvoso ocorreu entre a precipitação e a dureza total. As correlações mais fortes ocorreram entre as variáveis pH/temperatura da água (período chuvoso), e as já esperadas entre: OD/SOD, CE/STD, CE/RES e RES/STD (em ambos os períodos sazonais).

A avaliação da sazonalidade apontou diferenças significativas entre os valores de todos os parâmetros, com exceção do oxigênio dissolvido, turbidez e dureza total. Notou-se que estes últimos parâmetros não demandam de um monitoramento constante, pois não sofreram influência direta das chuvas. A avaliação sazonal se demonstrou importante no acompanhamento das variáveis pH, CE, resistividade elétrica, STD, temperatura da água superficial, SOD e cloreto. Porém, ressalta-se que o acompanhamento pontual pode ser necessário nos casos indicativos da existência de fontes pontuais de poluição ou usos específicos da água que podem afetar o seu estado de qualidade (como, represamento, captação, etc).

A abordagem multivariada indicou que a análise de componentes principais explicou cerca de 80,28 % da variabilidade total dos dados segundo a sazonalidade, sendo a CP1 responsável majoritariamente com 55,58% de explicação. Desta forma, foi possível identificar o agrupamento das variáveis de acordo com a sazonalidade da região e as variáveis mais significativas nesta variação. As variáveis mais significativas que demonstraram poder discriminatório no CP1, lado positivo, para a caracterização do período chuvoso foram a

temperatura da água superficial, CE, STD e SOD. Enquanto que, para o período menos chuvoso foram identificadas as variáveis resistividade elétrica, pH e cloreto como as mais significativas e com correlação oposta, lado negativo da CP1. Todas as variáveis citadas apresentam relação com atividades de caráter antrópico. Foi possível observar uma leve controbuição da espacialidade para um agrupamento dos pontos amostrais. Porém foi possível notar que os pontos a jusante (1 a 6) localizaram-se na parte negativa da CP2. Com os parâmetros cloreto e SOD sendo os mais significativos para a separação dos pontos a montante dos a jusante (7 a 12). A separação das amostras coletas no período chuvoso das amostras do período menos chuvosos foi corroborada pela visualização do dendrograma.

Para as variáveis hidroquímicas que apresentaram variabilidade sazonal foram obtidas as suas espacializações na área da sub-bacia do rio Guamá usando a técnica de interpolação IDW em SIG. Em ambos os períodos foi observada uma tendência crescente dos valores de pH, CE, STD e temperatura da água a partir do ponto 1 (porção sul da SBRG) em direção ao ponto 12 (porção norte da SBRG). Enquanto que, para as variáveis resistividade elétrica, SOD e cloreto foram observadas tendências descendentes nesta mesma direção, com exceção de alguns pontos anômalos identificados.

Este trabalho possibilitou estabelecer a importante relação entre as variáveis hidroquímicas da água superficial do rio Guamá, a diferenciação espacial de uso do solo e a sazonalidade regional. Através da observação através das escalas sazonal e espacial foi possível compreender a dependência das variáveis hidroquímicas avaliadas com atividades antrópicas, conservação das características naturais das margens do rio e a presença da floresta primária. Desta forma, pode-se afirmar que o rio Guamá representa um ambiente lótico da região Amazônica que apresenta características conservadas que podem vir a sofrer impactos advindos das atividades humanas, principalmente, devido a intensificação da urbanização, atividades agropecuárias, extração mineral, turismo, entre outras.

Por fim, indica-se a expansão deste trabalho no sentido de avaliar e monitorar outras variáveis hidroquímicas importantes como demanda bioquímica de oxigênio (DBO), teor de fósforo, teor de nitrogênio, concentração de elementos-traços, etc. Esta avaliação e monitoramento temporal deve ser constante e espacialmente relacionada a estudos sobre a ocupação territorial, dimensão social, dimensão ambiental e gestão dos recursos hídricos. O estudo integrado auxiliará na elaboração de prognósticos de possíveis impactos antrópicos, preservação dos recursos hídricos, uso racional da água, desenvolvimento sustentável da região e a melhoria das condições de vida das populações locais.

Em se tratando da região Amazônica, que demanda de recurso financeiro alto para logística das coletas e realização das análises *in situ* e laboratoriais, estes resultados auxiliam no estabelecimento de um planejamento racional e econômico que viabilize um monitoramento contínuo e a criação de banco de dados para regiões de difícil acesso e demasiadamente grandes com rios volumosos.

CAPÍTULO 5 CONCLUSÃO GERAL

5.1 Resultados Chaves: Impactos e Implicações

Esta pesquisa propôs um estudo integralizador das características ambientais, climáticas e hidroquímicas da sub-bacia do rio Guamá (SBRG). A área de estudo pode ser subdivida em Alto rio Guamá (região a montante e próximo a sua nascente), Médio Rio Guamá (região central da sub-bacia) e Baixo rio Guamá (região a jusante e que termina com confluência com o rio Capim). A SBRG foi escolhida pois não possui estudos desta natureza publicados na literatura e apresenta fundamental importância socioambiental e econômica para as populações locais, ribeirinhas e para a capital Belém.

O capítulo 2 apresentou resultados relacionados a elevada precisão da correlação dos dados de precipitação obtidos através de pluviômetros (dados observados) com dados oriundos de sensoriamento remoto. Pode-se observar que, no período de 1988 a 2018, os dados fornecidos pelas bases de dados CHIRPS e GPCC superestimaram os dados observados. Sugere-se que a falta de manutenção dos pluviômetros e a presença de nuvens podem ter ocasionado esta superestimação dos dados. Haja vista que os resultados mais precisos foram obtidos para o período menos chuvoso (menor nebulosidade) tanto na comparação CHIRPS/observado como GPCC/observado. Assim, identifica-se a necessidade de aprimoramento na obtenção e tratamento dos dados brutos para a região de estudo que são fornecidos pelas agências responsáveis pelos satélites. Apesar da superestimação da precipitação, foi possível obter dados confiáveis e satisfatórios a partir das bases de dados CHIRPS e GPCC. Entretanto, o CHIRPS se apresentou como melhor alternativa devido incorporar imagens de satélite alta resolução espacial ($0,05^\circ \times 0,05^\circ$) combinados com dados de estação *in situ*, dados de precipitação desde 1981 até a presente data, dados em escala quase-global (cobertura geográfica de $50^\circ\text{S}/50^\circ\text{N}$ e todas as longitudes) e dados em diferentes escalas temporais (diário, mensal, anual, decadal e pentadal). Por isso, foram utilizados os dados de precipitação fornecidos pelo CHIRPS para interpolação através do método de Krigagem universal. Constatou-se que, a área da SBRG apresenta uma distribuição da chuva condizente para a região com elevados valores de precipitação acumulada, sazonalidade caracterizada pela existência de dois períodos (chuvoso e menos chuvoso) e aumento da quantidade de chuvas em direção ao litoral (porção norte).

No capítulo 3 foram inicialmente apresentadas as características morfométricas da área de estudo que se destacou como majoritariamente plana, de baixas altitudes com suaves

ondulações, baixo potencial de inundação em condições normais de precipitação, escoamento superficial razoavelmente baixo (drenagem moderada) e pequena dissecação dos corpos hídricos. Estas características resultam em um desfavorecimento ao uso do corpo hídrico para o abastecimento público e baixa susceptibilidade à erosão. Considerando os anos de 2015 a 2017, notou-se um comportamento da precipitação semelhante ao período anteriormente citado de 30 anos: aumento da quantidade de chuvas em direção a porção norte e mais próxima ao litoral paraense, distinção entre período chuvoso (com precipitação acumulada mínima de 314 mm e máxima de 368 mm) e período menos chuvoso (precipitação acumulada mínima de 58 mm e máxima de 96 mm). Quanto ao uso e ocupação do solo constatou-se maior quantidade de área (57%) caracterizada como solo exposto e vegetação rasteira, e menor quantidade de área (42%) caracterizada como cobertura vegetal densa ou secundária. Assim, nota-se a presença preponderante de áreas que sofreram influencia antrópica para distintas finalidades: agricultura, pecuária, extração mineral, desmatamento, urbanização, etc. Em associação com dados geológicos e pedológicos foi estimada a vulnerabilidade ambiental da sub-bacia do rio Guamá a possíveis impactos decorrentes da interferência do homem. Assim, destaca-se a ocorrência de áreas com vulnerabilidade ambiental alta (porção norte representada pelos centros urbanos de cidades como Ourém e São Miguel do Guamá) e muito alta (porção sul) como resultado do uso e ocupação do solo associado a atividades antrópicas (solo exposto e vegetação rasteira) e a ocorrência em solos frágeis de geologia caracterizada por rochas recentes. As áreas classificadas como vulnerabilidade baixa ou muito baixa (porção central e ao sul), menos vulneráveis à degradação ambiental, foram associadas a presença de cobertura vegetal composta por floresta primária e secundária, e menor presença humana (áreas urbanizadas menores).

Por fim, o capítulo 4 apresentou resultados de índice de anomalia de chuva para os anos de 2015 a 2017 que comparados a normal climatológica se justificam devido ocorrência dos fenômenos atmosférico-oceânicos: El Niño forte nos anos de 2015 e 2016; e, La Niña moderada no ano de 2017. A análise da precipitação durante as seis campanhas amostrais realizadas nestes anos (fev/15, jun/15, jan/16, jun/16, jul/17 e fev/17) confirmou a sazonalidade, com valor de precipitação acumulada maior no período chuvoso (61,73 mm) e menor no período menos chuvoso (32,80 mm). Quanto aos resultados das variáveis hidroquímicas da água superficial do rio Guamá observou-se elevada heterogeneidade espacial ao longo 12 pontos distribuídos ao longo do trecho selecionado do rio e a existência de tendências ascendentes e descendentes na direção montante a jusante. Esta condição não homogênea é resultado das condições naturais do ambiente, das condições de entorno do rio

Guamá e das áreas drenadas que incidem sobre o rio principal. Esta caracterização distinta entre as regiões a montante (Alto rio Guamá) e a jusante (Baixo rio Guamá) mostraram uma tendência desfavorável nos valores de alguns parâmetros como temperatura da água, pH, turbidez, oxigênio dissolvido, etc. Porém, de forma geral todos parâmetros contemplados pela Resolução CONAMA nº 357 (BRASIL, 2005) não ultrapassaram aos valores máximos permitidos aos rios de água doce, Classe II. A precipitação apresentou correlações positivas e negativas com variáveis hidroquímicas no período chuvoso e no período menos chuvoso, demonstrando assim a influência da chuva sobre as variáveis estudadas. Também foi possível constatar a ausência da introdução de poluentes inorgânicos e matéria orgânica que poderiam ser identificados através da elevação da condutividade elétrica e diminuição da concentração de oxigênio dissolvido, respectivamente. A comparação entre as médias das variáveis hidroquímicas identificou que alguns parâmetros, como oxigênio dissolvido e turbidez, não apresentaram diferença significativa entre os períodos sazonais. Os demais parâmetros que apresentaram diferença estatística devem ser monitorados com periodicidade constante devido maior sensibilidade ao clima. A análise multivariada ratificou a percepção de que as amostras podem ser caracterizadas pelos períodos sazonais em que foram coletadas. A ACP explicou eficientemente o agrupamento dos dados com variância acumulada de 80,28% e foi corroborada pela análise de *clusters* que separou as amostras pelo período sazonal com uma distância euclidiana superior a 50%. Por fim, a espacialização dos resultados das variáveis hidroquímicas pelo método interpolador da distância ponderada inversa (IDW) confirmou as tendências ascendentes e descendentes na área de estudo. Além de identificar as áreas adjacentes ao rio Guamá com maior potencial de influência, devido aos diferentes usos do solo, sobre as características físico-químicas da água superficial do rio Guamá.

No Brasil tem-se a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) (BRASIL, 1997) que visa, entre outros objetivos, “assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos” e “a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais”. Desta forma, este trabalho impacta favoravelmente a comunidade acadêmica e científica ao fornecer informações ainda inexistentes sobre a área de estudo.

Dentre os instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) (BRASIL, 1997), tem-se os Planos de Recursos Hídricos; o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água; a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos; a cobrança pelo uso de recursos hídricos; a compensação a municípios; o Sistema de

Informações sobre Recursos Hídricos; os quais são beneficiados com informações regulares e atualizados sobre as bacias hidrográficas. Com isso, fazendo com que as bacias e sub-bacias hidrográficas da região Amazônica possam efetivamente fazer parte Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH).

5.2 Conclusões de forma integrada

Os diversos resultados obtidos nos capítulos 2, 3 e 4 podem ser integrados a partir dos seguintes pontos:

- A obtenção de dados de precipitação mais precisos e regulares a partir do CHIRPS contribui para o acompanhamento de possíveis eventos extremos, como inundações ou seca, que afetariam os diferentes usos do solo da região.
- Os dados de precipitação com maior precisão espacial fornecidos pelo CHIRPS auxiliaram na compreensão dos comportamentos das variáveis hidroquímicas dos corpos d'água da SBRG. Desta forma, foi possível identificar a correlação (positiva e negativa) existente entre a precipitação nos anos de 2015 a 2017 com as variáveis hidroquímicas do rio Guamá.
- O escoamento superficial da água da chuva pode transportar poluentes orgânicos e inorgânicos para a rede de drenagem da sub-bacia. A identificação e acompanhamento da precipitação sob áreas destinadas à agricultura, pecuária, extração mineral, indústria, área urbana etc., contribui para compreensão de possíveis impactos antrópicos.
- A obtenção dos mapas de vulnerabilidade ambiental permitiu identificar as áreas mais vulneráveis a impactos antrópicos. Através dessa informação tem-se a observação dos pontos críticos da SBRG relacionados ao uso e ocupação do solo, geologia, pedologia, precipitação, cobertura vegetal, entre outros. Além de permitir o direcionamento de políticas públicas que visem a preservação ambiental e a minimização/controle da expansão das interferências do homem.
- O levantamento das informações sobre as características morfométricas permitiram a compreensão das dinâmicas dos processos hidrológicos. Esta caracterização é importante para o manejo racional do uso do solo e manutenção dos corpos d'água. Assim como, permite uma gestão eficiente da bacia diante de fenômenos

climatológicos, como os ENOS, e mudanças na cobertura vegetal que pode afetar a disponibilidade de água nos rios, tributários e nascentes.

- A identificação da sazonalidade em dois períodos, chuvoso e menos chuvoso, auxiliou na compreensão das tendências das variáveis hidroquímicas. Nesse sentido, corrobora-se a adoção de uma fonte confiável e regular de dados de precipitação, como os fornecidos pelo CHIRPS.
- O comportamento desfavorável de algumas variáveis hidroquímicas nos pontos a jusante no rio Guamá demonstram a existência da influência das atividades antrópicas. A interpolação dos dados destas variáveis auxiliou na espacialização dos resultados e a comparação com os mapas de vulnerabilidade ambiental. Desta forma, pode-se corroborar a importância do estudo de uso e ocupação do solo e a influência dos diferentes tipos sobre a qualidade dos corpos d'água.

5.3 Prioridades para Pesquisas Futuras

É recomendado que pesquisas futuras sejam realizadas no intuito de ampliar o rol de variáveis hidroquímicas quantificadas nas águas superficiais (e até mesmo nas águas subsuperficiais) do rio Guamá, como por exemplo, a quantificação da demanda bioquímica de oxigênio (DBO), coliformes totais e termotolerantes, matéria orgânica, nitrogênio, fósforo, poluentes orgânicos, elementos-traço, etc., ou seja, o emprego de outras variáveis que também apresentam correlação com as alterações de origem antrópica ou natural. Porém, sabe-se que muitos destes parâmetros dependem de uma maior quantidade de recursos financeiros devido a necessidade de uma logística de amostragem mais eficiente, pois o tempo de validade da análise a partir da coleta pode variar sendo reduzido para algumas poucas horas. Estas variáveis devem também ser associadas a medições de vazão fluvial haja vista a contribuição do volume de água dos rios para a diluição e escoamento de poluentes e outras espécies químicas despejados nos recursos hídricos de toda a área de drenagem.

Aliada a logística de amostragem é importante aumentar a espacialização dos pontos amostrais para que se possa abranger mais áreas ao longo do curso do rio Guamá e seus principais tributários. Desta forma, será possível estabelecer uma relação mais precisa entre as variáveis hidroquímicas e os diferentes usos antrópicos existentes, como atividades agropecuárias, extração mineral, urbanização, comércio, etc.

É possível ainda estabelecer estudos que relacionem a qualidade da água do corpo hídrico em questão ao clima futuro da região. Desta forma, sendo possível realizar construir

cenários através de modelagem matemática com previsões futuras e acerca da vulnerabilidade ambiental destes corpos d'água diante das mudanças climáticas. Com os resultados da série histórica de chuvas busca-se relacionar e avaliar a relação das tendências climáticas encontradas com as transformações na utilização e ocupação do solo na região. Compreendendo como a influência antrópica, através das suas mais diferentes atividades humanas, interfere favoravelmente ou não no comportamento natural da bacia hidrográfica. Distinguindo-os de possíveis ciclos naturais na região.

Contudo, é fundamental a criação e manutenção de um banco de dados com informações regionais sobre os parâmetros físico-químicos relacionados a qualidade da água da sub-bacia do rio Guamá. Estas informações devem ser regularmente inseridas no banco de dados (com dados diários, semanais, mensais, sazonais, etc.) e disponibilizadas gratuitamente à população para que assim auxilie a gestão dos recursos hídricos.

Quando se fala de região Amazônica é importante destacar a insuficiência/inexistência de dados históricos regulares sobre a qualidade da água dos rios, nascentes, igarapés, etc. Assim, o monitoramento contínuo dos corpos d'água torna-se fundamental no acompanhamento e desenvolvimento de projetos visando a preservação e recuperação dos recursos hídricos expostos ao uso e ocupação por atividades antrópicas.

5.4 Considerações Finais

É prioritário que os resultados desta pesquisa promovam benefícios à população das diversas localidades visitadas durante as campanhas amostrais. Logo, somente através da educação e do estímulo a conscientização ambiental se poderá promover um desenvolvimento sustentável e, por conseguinte, a conservação dos recursos naturais. Assim, entende-se que através da educação ambiental estimulem-se valores sociais, habilidades, competências, métodos e conhecimentos basilares à compreensão dos conceitos relacionados com o meio ambiente, sustentabilidade, preservação e conservação.

Desta forma, esta pesquisa propôs uma cartilha (Apêndice D) com os principais resultados obtidos nesta pesquisa sendo apresentados em uma linguagem simples e objetiva à população local. A cartilha apresenta um breve histórico sobre o contexto local da sub-bacia do rio Guamá e segue expondo os resultados em uma apresentação dinâmica.

Por fim, acredita-se que através da formação de cidadãos conscientes e críticos se fortaleça a adoção de práticas ambientalmente sustentáveis.

REFERÊNCIAS

- ABE, D. S.; RODRIGUES FILHO, J. L.; CAMPANELLI, L. C.; SIDAGIS-GALLI, C.; MARRARA, D. M.; DEGANI, R. M.; SOARES, F. S.; MATTIAZZI, B.; TUNDISI, J. G. Importância das florestas ripárias na melhoria da qualidade da água em bacias hidrográficas: estudos de caso na região central do estado de São Paulo. *In: MORAES, M. E. B.; LORANDI, R. Métodos e técnicas de pesquisa em bacias hidrográficas*. Ilhéus, BA: Editus, 2016.
- ABREU, E. M. A.; FERNANDES, A. R.; RUIVO, M. L. P. Variação temporal e vertical de atributos químicos de um gleissolo do Rio Guamá cultivado com Canaranas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 277-285, 2007.
- ADLER, R. F.; KIDD, C.; PETTY, G.; MORISSEY, M.; GOODMAN, M. Intercomparison of Global precipitation products: the third precipitation intercomparison project (PIP-3). **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 82, n. 7, p. 1377-1396, 2001.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Cuidando das águas**: soluções para melhorar a qualidade dos recursos hídricos. Brasília: ANA, 2011.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Guia nacional de coleta e preservação de amostras**: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidas. São Paulo: CETESB; Brasília,DF: ANA, 2011. 326 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS- ANA. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil. **Informe 2017**. Brasília,DF: ANA, 2016.
- AGUILAR PIRATOBA, A. R. ; RIBEIRO, H. M. C.; PIRATOBA MORALES, G. ; GONÇALVES, W. G. Caracterização de parâmetros de qualidade da água na área portuária de Barcarena, PA, Brasil. **Ambiente & Água**, Taubaté, v. 12, n. 3, p. 435-456, 2017.
- AJAAJ, A. A.; MISHRA, A. K.; KHAN, A. Comparison of BIAS correction techniques for GPCC rainfall data in semi-arid climate. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 30, p. 1659-1675. 2016.
- ALBUQUERQUE, M. F.; DE DOUZA, E. B.; OLIVEIRA, M. C. F.; SOUZA JÚNIOR, J. A. Precipitação nas mesorregiões do Estado do Pará: climatologia, variabilidade e tendências nas últimas décadas (1978-2008). **Revista Brasileira de Climatologia**, São José dos Campos/SP, v. 6, p. 151-168, 2010.
- ALENCAR, V. E. S. A.; ROCHA, E. J. P.; SOUZA JUNIOR, J. A.; CARNEIRO, B. S. Análise de parâmetros de qualidade da água em decorrência de efeitos da precipitação na baía de Guajará – Belém– PA. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 12, n. 2, p. 661-680, 2019.
- ALMEIDA, R. F. B.; BAYER, M.; FERREIRA JÚNIOR, L. G. Compartimentação morfométrica da Bacia do Rio Coco como subsídio a análise de fragilidade ambiental. **Mercator**, Fortaleza, v. 15, n. 4, p. 83-94, 2016.

ALVES, W. S.; MORAIS, W. A.; SALEH, B. B.; SANTOS, L. N. S. Análise de aspectos físicos da bacia do córrego Bonsucesso, localizada em Jataí (GO), Brasil, apoiado em geotecnologias. **Revista Geografia Acadêmica**, Boa Vista/RR, v. 11, n. 1, p. 13-34, 2017.

ALVEZ, I. C. C.; EL-ROBRINI, M.; SANTOS, M. L. S.; MONTEIRO, S. M.; BARBOSA, L. P. F.; GUIMARÃES, J. T. F. Qualidade das águas superficiais e avaliação do estado trófico do rio Arari (Ilha de Marajó, norte do Brasil). **Acta Amazonica**, Manaus, v. 42, n. 1, p. 115-124, 2012.

AMANAJÁS, J. C.; BRAGA, C. C. Padrões espaço-temporal pluviométricos na Amazônia Oriental utilizando análise multivariada. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 27, n. 4, p. 423-434, 2012.

AMARAL, A. M.; BARBÉRIO, A.; VOLTOLINI, J. C.; BARROS, L. Avaliação preliminar da citotoxicidade e genotoxicidade da água da bacia do rio Tapanhon (SP-Brasil) através do teste Allium (Allium cepa). **Revista Brasileira de Toxicologia**, São Paulo, v. 20, n. 1/2, p. 65-72, 2007.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23 ed. Whashington: Pharmabooks Editora, 2017. 1496 p.

ANDERSEN, L. J.; GOSK, J. Applicability of vulnerability maps. **Environmental Geology and Water Sciences**, v. 13, p. 39-43, 1989.

ANDRADE, N. L. R.; SANCHES, L.; PINTO JÚNIOR, O. B.; DIAS, C. A. A.; NOGUEIRA, J. S. Macro-nutrientes no lençol freático em Floresta Intacta, Floresta de Manejo e Pastagem no norte de Mato Grosso. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 38, n. 4, p. 667-672, 2008.

ANDRIETTI, G.; FREIRE, R.; AMARAL, A. G.; ALMEIDA, F. T.; BONGIOVANI, M. C.; SCHNEIDER, R. M. Índices de qualidade da água e de estado trófico do rio Caiabi, MT. **Ambiente & Água**, Taubaté, v. 11, n. 1, p. 162-175, 2016.

ANGELIS, C. F.; MCGREGOR, G. R.; KIDD, C. A 3 year climatology of rainfall characteristics over tropical and subtropical South America based on tropical rainfall measuring mission precipitation radar data. **International Journal of Climatology**, v. 24, p. 385 – 399, 2014.

ARAUJO, A. N.; GUETTER, A. K. Validação da chuva estimada por satélite “CMORPH” na modelação hidrológica do Alto Iguaçu. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Blumenau/SC, v. 12, n. 3, p. 189-198, 2007.

ARAÚJO, P. P.; OLIVEIRA, F. A.; CAVALCANTE, I. N.; QUEIROZ, J. C. B.; CARNEIRO, B. S.; TANCREDI, A. C. F. N. S. Classificação hidroquímica e contaminação por nitrato no aquífero livre Barreiras na bacia do rio Capitão Pocinho região do médio rio Guamá na Amazônia oriental. **Ambiente & Água**, Taubaté, v. 6, n. 2, p. 266-281, 2011.

AZEVEDO, E. C.; MANGABEIRA, J. A. C. **Mapeamento de uso das terras utilizando processamento digital de imagem de sensoriamento remoto**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2001.

BARBETTA, P. A. **Estatística aplicada às ciências sociais**. 8. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2012, 315 p.

BARBOSA, T.; FURRIER, M. Avaliação morfológica e morfométrica da bacia hidrográfica do rio Marés – PB, para verificação de influência neotectônica. **Cadernos de Geociências**, Salvador, v. 9, n. 2, p. 112-120, 2012.

BARNSTON, A. G.; LIVEZEY, R. E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. **Climate Analysis Center**, v. 115, p. 1083-1126, 1987.

BARRETO, K. T.; PINTO, M. L. C. Caracterização dos indicadores geomorfológicos na bacia hidrográfica do rio Verde, Ponta Grossa – PR. **Geografia, Ensino & Pesquisa**, Santa Maria, v. 21, n. 2, p. 164-173, 2017.

BARROS, M. N. R.; ALMEIDA, A. S.; VIEIRA, I. C. G. Análise especial da dinâmica do uso da terra e cobertura vegetal do município de Mãe do Rio, Estado do Pará. In: ENCONTRO NACIONAL DA ANPPAS, 6., 2012, Belém. **Anais[...]** Belém: ANPPAS, 2012. p. 35-42.

BASTOS, L. R. S.; BASTOS, L. P.; CARNEIRO, P. C. F.; GUILOSKI, I. C.; ASSIS, H. C. S.; PADIAL, A. A.; FREIRE, C. A. Evaluation of the water quality of the upper reaches of the main Southern Brazil river (Iguaçu river) through in situ exposure of the native siluriform *Rhamdia quelen* in cages. **Environmental Pollution**, v. 231, p. 1245-1255. 2017.

BATISTA, A. N. C.; ALMEIDA, N. V.; MELO, J. A. B. Utilização de imagens CBERS no diagnóstico do uso e ocupação do solo na microbacia do Riacho Maracajá, Olivedos, PB. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 10, n. 32, p. 235-244, 2009.

BAUER, Lidiane. **Estimação do coeficiente de correlação de Spearman ponderado**. 2007. 95 f. Dissertação (Mestrado em Epidemiologia) – Programa de Pós-Graduação em Epidemiologia, Porto Alegre, 2007.

BAY, M. Variação Pluviométrica e parâmetros físico-químicos da água tratada para distribuição em Porto Velho, Rondônia. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal/PB, v. 10, n. 3, p. 08-12, 2015.

BELATO, L. S.; SERRÃO, S. L. C. Aplicação da vulnerabilidade ambiental do município de Tomé-Açu, Estado do Pará. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, Aracaju, v. 10, n. 1, p. 131-145, 2019.

BELATO, L. S.; SERRÃO, S. L. C.; GANDRA, A. L. F.; AMORIM, I. L. S. Aplicação da vulnerabilidade ambiental do município de Moju, estado do Pará. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, Aracaju, v. 9, n. 5, p. 218-230, 2018.

BELTRAME, A. V. **Diagnóstico do meio ambiente físico de bacias hidrográficas: modelo de aplicação**. 1 ed. Florianópolis: UFSC, 1994.

BERTOSSI, A. P. A.; MENEZES, J. P. C.; CECÍLIO, R. A.; GARCIA, G. O.; NEVES, M. A. Seleção e agrupamento de indicadores da qualidade de águas utilizando Estatística Multivariada. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 5, p. 2025-2036, 2013.

BOARETO, L.; SILVA, P. T.; SANTOS, E.; ALBUQUERQUE, E. Avaliação da sazonalidade da qualidade da água do perímetro irrigado Senador Nilo Coelho em Petrolina para agricultura. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá/PR, v. 12, n.3, p. 1103-1122, 2019.

BORDALO, C. A. L.; FERREIRA, C. A. C.; SILVA, F. A. O.; MORAES, R. C. Os desafios da gestão das águas nas metrópoles da Amazônia: uma análise do modelo de gestão pública dos sistemas de abastecimento de água na região metropolitana de Belém – PA. **Revista Geonorte**, Taubaté, Edição Especial, v.3, n.4, p. 1181-1193, 2012.

BORGES, A. C. F.; ELIAS, L. M. S. L. A matriz de acompanhamento e avaliação – A&A para o sistema de gestão ambiental municipal: um estudo de caso no Município de Nova Esperança do Piriá (Pará) Brasil. **GIGAPP Estudios Working Papers**, v. 7, n. 148, p. 158-173, 2020.

BRABO, M. F.; FERREIRA, L. A.; VERAS, G. C. Aspectos históricos do desenvolvimento da piscicultura no Nordeste Paraense: trajetória do protagonismo à estagnação. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá/PR, v. 9, n.3, p. 595-615, 2016.

BRASIL. **Resolução n. 417 de 23 de novembro de 2009**. Dispõe sobre parâmetros básicos para definição de vegetação primária e dos estágios sucessionais secundários da vegetação de Restinga na Mata Atlântica e dá outras providências. Brasília,DF: DOU, 2009.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução n. 32 de 15 de outubro de 2003**. Institui a Divisão Hidrográfica Nacional. Brasília,DF: DOU, 2003.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução n. 357 de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília,DF: DOU, 2005.

BRASIL. **Decreto n. 24.643 de 10 de julho de 1934**. Decreta o Código de Águas. Brasília,DF: DOU, 1934.

BRASIL. **Lei n. 12.651 de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis n°s 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis n°s 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória n° 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Brasília,DF: DOU, 2012.

BRASIL. **Lei n. 8.171 de 17 de janeiro de 1991**. Dispõe sobre a política agrícola. Brasília,DF: DOU, 1991.

BRASIL. **Lei n. 9.433 de 9 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei n° 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei n° 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília,DF: DOU, 1997.

BRAUN, A. L.; AWRUCH, A. M. Finite element simulation of the wind action over bridge sectional models: application to the Guamá river Bridge (Pará State, Brazil). **Finite Elements in Analysis and Design**, v. 44, n. 3, p. 105-122, 2018.

BRAZ, V. N.; MELLO, V. S. A. Estudo temporal da qualidade da água do rio Guamá, Belém-PA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2005, Campo Grande. **Anais[...]** Mato Grosso do Sul: ABES, 2005. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/1bb3/d85c17a2ceb9a9971120ef1cb2da946b94ea.pdf>. Acesso em: 15 jan 2019.

BROHAN, P.; KENNEDY, J. J.; HARRIS, I.; TETT, S. F. B.; JONES, P. D. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, p. D12106, 2006.

CADA, G. F.; HUNSAKER, C. T. Cumulative impacts of hydropower development: reaching a watershed impact assessment. **The Environmental Professional**, v. 12, n. 5, p. 2-8, 1990.

CAMPONOGARA, G.; SILVA DIAS, M. A. F. Precipitação diária e estrutura vertical da atmosfera em Belém-PA. **Ciência e Natura**, v. espec., p. 263-266, 2011.

CANDIELD, E. D. The geochemistry of river particulates from the continental USA: major elements. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 61, n. 16, p. 3349-3365, 1997.

CARNEIRO, R. S. G. S.; DUARTE, J. F. S.; RAMOS, A. J. R. Análise de vulnerabilidade erosiva no município de Paragominas – PA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 27, 2017, Rio de Janeiro (RJ). **Anais[...]**. Rio de Janeiro (RJ), Brasil, 2017. p. 01-20.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, v.17, n. 1, p.88-108, 2004.

CECHIN JR, C.; SILVA, M. R. Análise multitemporal do uso do solo da microbacia do rio Sarandi no Sudoeste do estado do Pará, Brasil utilizando imagens LANDSAT/TM. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 40, p. e43, 2018.

CELENTANO, D.; MIRANDA, M. V. C.; MENDONÇA, E. N.; ROUSSEAU, G. X.; MUNIZ, F. H.; LOCH, V. C.; VARGA, I. V. D.; FREITAS, L.; ARAÚJO, P.; NARVAES, I. S.; ADAMI, M.; GOMES, A. R.; RODRIGUES, J. C.; KAHWAGE, C.; PINHEIRO, M.; MARTINS, M. B. Desmatamento, degradação e violência no “Mosaico Gurupi” – a região mais ameaçada da Amazônia. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 32, n. 92, p. 315-339, 2018.

CHANDRAN, A.; BASHA, G.; OUARDA, T. B. M. J. Influence of climate oscillations on temperature and precipitation over the United Arab Emirates. **International Journal of Climatology**, v. 36, p. 225-235, 2016.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.

COHEN, J. C. P.; DIAS, M. A. F. S.; NOBRE C. A. Environmental conditions associated with Amazonian squall lines: a case study. **Monthly Weather Review**, v. 123, p. 3163-3174, 1995.

COHEN, J. C. P.; SILVA DIAS, M. A. F.; NOBRE C. A. Environmental conditions associated with Amazonian squall lines: a case study. **Monthly Weather Review**, v. 123, p. 3163-3174, 1995.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARÁ (COSANPA). **Rede de distribuição de água da região metropolitana de Belém**. Disponível em: <http://www.cosanpa.pa.gov.br>. Acesso em 30 Jan 2020.

CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. 1 ed. Flórida (EUA): CRC Press, 1999.

CORDEIRO, I. M. C. C.; ARBAGE, M. J. C.; SCHWARTZ, G. Nordeste do Pará: configuração atual e aspectos identitário. In: CORDEIRO, I. M. C. C. *et al.* (org.). **Nordeste Paraense: panorama geral e uso sustentável das florestas secundárias**. Belém: EDUFRA, 2017. p. 19-58.

CORSEUIL, C. W.; CAMPOS, S. Geoprocessamento aplicado na determinação das classes de declividade e uso de terras da microbacia do Arroio Ajuricaba - Marechal Cândido Rondon - PR. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 22, n. 1, p.33-41, 2007.

COSTA, A. C. L.; RODRIGUES, H. J. B.; SILVA JUNIOR, J. A.; NUNES, L. R. C.; MORAES, B. C.; COSTA, A. C.; CUNHA, A. C.; MEIR, P.; MALHI, Y. Variabilidade horária, diária e sazonal da frequência e intensidade de precipitação em uma floresta tropical chuvosa na Amazônia Brasileira. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v.11, n. 4, p. 1290-1302, 2018.

COSTA, C. E. A. S.; ARAÚJO JÚNIOR, A. J. S.; VIEIRA, A. S. A.; MATOS, T. R.; SANJAD, H. C.; CARVALHO, B. G. P.; SILVA, I. Q. Estudo de tendência pluviométrica na bacia do rio Guamá no período de 30 anos. In: SILUSBA, 12., 2015, Brasília,DF. **Anais eletrônicos[...]** Brasília,DF: SILUSBA, 2015.

COSTA, F. H. S.; PETTA, R. A.; LIMA, R. F. S.; MEDEIROS, C. N. Determinação da vulnerabilidade ambiental na Bacia Potiguar, região de Macau (RN), utilizando sistemas de informações geográficas. **Revista Brasileira de Cartografia**, Uberlândia, v. 58, n. 2, p. 119-127, 2006.

COSTA, J.; PEREIRA, G.; SIQUEIRA, M. E.; CARDOZO, F.; SILVA, V. V. Validação dos dados de precipitação estimados pelo CHIRPS para o Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba/PR, v. 24, p. 228-243, 2019.

COUTINHO, E. C.; ROCHA, E. J. P.; LIMA, A. M. M.; RIBEIRO, H. M. C.; GUTIERREZ, L. A. C. L.; BARBOSA, A. J. S.; PAES, G. K. A. A.; CAPELA, C. J. B.; TAVARES, P. A. Water Balance in the Brazilian Amazon Basin. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v.11, n. 6, p. 1926-1940, 2018.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. 1 ed. São José dos Campos: INPE, 2001.

CUNHA, D. G. F.; BOTTINO, F.; CALLIJURI, M. C. Land use influence on eutrophication-related water variables: case study of tropical rivers with different degree of anthropogenic interference. **Acta Limnologica Brasiliensia**, São Paulo, v. 22, n. 1, p. 35-45, 2010.

DAMASCENO, M. C. S.; RIBEIRO, H. M. C.; TAKIYAMA, L. R.; PAULA, M. T. Avaliação sazonal da qualidade das águas superficiais do rio Amazonas na orla da cidade de Macapá, Amapá, Brasil. **Ambiente & Água**, Taubaté, v. 10, n. 3, p. 598-613, 2015.

DIAS, G. F. M.; LIMA, A. M. M.; SANTOS, M. N. S. As mudanças no uso e cobertura da terra e o comportamento hidrológico da bacia do rio Capim. **Papers do NAEA**, Belém/PA, v. 390, p. 01-31, 2018.

DINKU, T. Validation of the CHIRPS satellite rainfall estimate. *In*: INTERNATIONAL PRECIPITATION WORKING GROUp (IPWG) Workshop, 7th., 2014. Tsukuba (Japan). **Proceedings [...]** Tsukuba (Japan), 2014. p. 01-01.

DINKU, T.; FUNK, C.; PETERSON, P.; MAIDMENT, R.; TADESSE, T.; GADAIN, H.; CECCATO, P. Validation of the CHIRPS satellite rainfall estimates over eastern Africa. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 144, p. 292-312, 2018.

DUAN, Z.; LIU, J.; TUO, Y.; CHIOGNA, G.; DISSE, M. Evaluation of eight high spatial resolution gridded precipitation products in Adige Basin (Italy) at multiple temporal and spatial scales. **Science of the Total Environment**, v. 573, p. 1536-1553, 2016.

EDGELL, S. E.; NOON, S. M. Effect of violation of normality on the t test of the correlation coefficient. **Psychological Bulletin**, v. 95, n. 3, p. 576-583, 1984.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Manual para formação e capacitação de grupos comunitários em metodologias participativas de monitoramento de qualidade da água – módulo III: avaliação físico-química**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2011.

ESPINOZA, J. C.; RONCHAIL, J.; MARENGO, J. A.; SEGURA, H. Contrasting North–South changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981–2017). **Climate Dynamics**, v. 52, p. 5413–5430, 2019.

ESTEVES, F. A.; MENEZES, C. F. S. Papel da água e da limnologia na sociedade moderna. *In*: ESTEVES, F. A. **Fundamentos de limnologia**. 3 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. p. 62-73.

ESTEVES, F. **Fundamentos de limnologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. 826 p.

FAUVEL, M.; DECHESNE, C.; ZULLO, A.; FERRATY, F. Fast forward feature selection of hyperspectral images for classification with gaussian mixture models. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 8, n. 6, p. 2824-2831, 2015.

FEITOSA, A.; FECHINE, J. A. L.; FERREIRA, C. W. S.; ARAÚJO, M. S. B. Modelagem dinâmica de escoamento superficial influenciando a susceptibilidade à erosão dos solos num município do semi-árido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Brasília, DF, v. 11, n. 2, p. 75-82, 2010.

FERREIRA, D. B. S.; SOUZA, E. B.; MORAES, B. C. Ciclo horário da precipitação no leste da Amazônia durante o período chuvoso. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba/PR, v. 13, p. 74-86, 2013.

FIGUEIRÊDO, M. C. B.; VIEIRA, V. P. P. B.; MOTA, S.; ROSA, M. F.; MIRANDA, S. **Análise da vulnerabilidade ambiental**. 1 ed. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2010.

FIGUEROA, S. N.; NOBRE, C. A. Precipitation distribution over Central and Western tropical South America. **Climanálise**, São José dos Campos/SP, v. 5, p. 36-45, 1989.

FINKLER, N. R.; PERESIN, D.; COCCONI, J.; BORTOLIN, T. A.; RECH, A.; SCHNEIDER, V. E. Qualidade da água superficial por meio de análise do componente principal. **Ambiente & Água**, Taubaté, v. 10, n. 4, p. 782-792.

FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 28, n. 2, p. 101-126, 1998.

FLORENZANO, T. G. Cartografia. In: FLORENZANO, T. G (org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

FRANÇA, C. L. E.; ANJOS, F. S. C.; ANJOS, D. S. C.; SOUZA, L. S. S.; SOUZA, R. S.; FINAZZI, G. A.; SILVA, A. M. C. Caracterização físico-química das águas superficiais do Rio São Francisco nos municípios de Juazeiro/BA e Petrolina/PE. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, Aracaju, v. 10, n. 6, p. 218-230, 2019.

FRANCO, V. V.; SOUZA, J. O. P. Análise morfométrica da bacia hidrográfica do riacho Jucurutu. **Revista de Geociências do Nordeste**, Caicó, v. 2, n. esp., p. 252-261, 2016.

FREIRE, A. J.; LAGE, G. B.; CHRISTÓFARO, L. C. Comparação entre parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas gerados por dados SRTM e ASTER GDEM: estudo de caso para bacias do Vale do Jequitinhonha-MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR, 16., 2013, Foz do Iguaçu(PR). **Anais[...]** Foz do Iguaçu (PR), Brasil, 2013. p. 5443

FREITAS, L. O. **Avaliação da utilização de imagens CBERS em estudos de uso e cobertura do solo**. 2010. 35f. Monografia (Especialização em Geoprocessamento) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.

FREITAS, R. O. Textura de drenagem e sua aplicação geomorfológica. **Boletim Paulista de Geografia**, São Paulo, v. 11, p. 53-57, 1952.

FRIERSON, D. M. W.; HWANG, Y. T.; FUCKAR, N. S.; SEAGER, R.; KANG, S. M.; DONOHUE, A.; MAROON, E. A.; LIU, X.; BATTISTI, D. S. Contribution of ocean overturning circulation to tropical rainfall peak in the Northern Hemisphere. **Nature Geoscience**, v. 6, n. 11, p. 940-944. 2013.

FUJIMOTO, R. Y.; DIAS, H. M.; SOUSA, N. C.; COUTO, M. V. S.; SANTOS, R. F. B.; PAIXÃO, P. E. G.; CUNHA, F. S.; RAMOS, F. M.; SOUSA, K. N. S.; HOLANDA, F. C. Is there sustainability for “satellite” ornamental fishing regions? A case study of Guamá River basin- Pará –Brasil. **Fisheries Research**, Vancouver (Canadá), v. 221, p. 105354, 2020.

FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations: a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, p. 150066, 2015.

GALLARDO, A. Geostatística. **Ecosistemas**, v. 15, n. 3, p. 48-58, 2006.

GARCIA, J. M.; MANTOVANI, P.; GOMES, R. C.; LONGO, R. M.; DEMANBORO, A. C.; BETTINE, S. C. Degradação ambiental e qualidade da água em nascentes de rios urbanos. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia/MG, v. 30, n. 1, p. 228-254, 2018.

GERBER, D.; PERTILLE, C. T.; VIEIRA, F. S.; CORRÊA, B. J. S.; SOUZA, C. F. Caracterização morfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí – Santa Catarina. **Acta Biológica Catarinense**, Santa Catarina, v. 5, n. 1, p. 72-83, 2018.

GOMES, M. A. F.; BARIZON, R. R. M. **Panorama da contaminação ambiental por agrotóxicos e nitrato de origem agrícola no Brasil: cenário 1992/2011**. Jaguariúna, SP: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, 2014.

GOVERNO DO ESTADO DO PARÁ. **Lei n. 6.381 de 25 de julho de 2001**. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, institui o Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências. Belém: DOE, 2001.

GOVERNO DO ESTADO DO PARÁ. **Resolução n. 04 de setembro de 2008**. Dispõe sobre a divisão do Estado em regiões hidrográficas e dá outras providências. Belém: DOE, 2008.

GRIMM, A. M. Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 25, n. 4, p. 537-554, 2011.

GUTIERREZ, C. B. B.; RIBEIRO, H. M. C.; MORALES, G. P.; GUTIERREZ, D. M. G.; SANTOS, L. S.; PAULA, M. T. Análise espaço-temporal do uso e cobertura do solo no interior da APA Belém e correlação com os parâmetros de água dos seus mananciais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 10, n. 1, p. 521-534, 2017.

HESSELS, T. M. **Comparison and validation of several open access remotely sensed rainfall products for the Nile basin**. 2015. 233 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Delft University of Technology, Netherlands, 2015.

HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; OLIVEIRA JUNIRO, G. J. Análise de componentes principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **Engineering and Science**, v. 1, n. 5, p. 01-08, 2016.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society of America Bulletin**, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945.

HUDSON, W. D.; RAMM, C. W. Correct formulation of the Kappa coefficient of agreement. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 53, n. 54, p. 421-422, 1987.

HUFFMAN, G. F.; BOLVIN, D. T.; NELKIN, E. J.; WOLFF, D. B. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): quasi-global, multi-year, combined-sensor precipitation estimates at fine scale. **Journal of Hydrometeorology**, v. 8, n. 1, p. 38-55, 2007.

HUNSAKER, C. T.; JACKSON, B. L.; SIMCOCK, A. Regional assessment for watershed management in the Mid-Atlantic states. *In*: REIMOLD, R. D. (org.). **Watershed management: practice, policy and coordination**. Nova York: McGraw-Hill, 1998. p. 11-34.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo demográfico 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mudanças na cobertura e uso da terra**. Rio de Janeiro: IBGE, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA (INMET). **Normais climatológicas do Brasil 1961-1990**. Edição revista e ampliada. Brasília-DF, 2009. p. 253.

INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO, SOCIAL E AMBIENTAL DO PARÁ (IDESP). **Estatística municipal: Capitão Poço**. Governo do Estado do Pará, Belém, 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Monitoramento do El Niño durante NDJ-2019/2020**. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/>. Acessado em: 21 out 2020.

JIMÉNEZ, K. Q.; MELO, T. M.; LOUZADA, J. A. Uso de dados de precipitação obtidos por sensoriamento remoto em um modelo agro-hidrológico. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 3, p. 496-508, 2013.

JIMÉNEZ, K. Q.; MELO, T. M.; LOUZADA, J. A. Uso de dados de precipitação obtidos por sensoriamento remoto em um modelo agro-hidrológico. **Irriga**, Botucatu/SP, v. 18, n. 3, p. 496-508, 2013.

JOLLIFFE, I. T. Discarding variables in a principal component analysis I: artificial data. **Journal of Applied Statistics**, v. 21, n. 2, p. 160-173, 1972.

KAISER, H. F. The varimax criterion for analytic rotation in fator analysis. **Psychometrika**, v. 23, p. 187-200, 1958.

KATSANOS, D.; RETALIS, A.; MICHAELIDES, S. Validation of a high-resolution precipitation database (CHIRPS) over Cyprus for a 30-year period. **Atmospheric Research**, v. 169, p. 459-464, 2016.

KAWO, N. S.; KARUPPANNANS. Groundwater quality assessment using water quality index and GIS technique in Modjo River Basin, central Ethiopia. **Journal of African Earth Sciences**, v. 147, p. 300–311, 2018.

KLAIS, T. B. A.; DALMAS, F. B.; MORAIS, R. P.; ATIQUÉ, G.; LASTORIA, G.; PARANHOS FILHO, A. C. Vulnerabilidade natural e ambiental do município de Ponta Porã, Mato Grosso do Sul, Brasil. **Ambiente & Água**, Taubaté, v. 7, n. 12, p. 277-290, 2012.

KRUSCHE, A. V.; BALLESTER, M. V. R.; VICTORIA, R. L.; BERNARDES, M. C.; LEITE, N. K.; HANADA, L.; VICTORIA, D. C.; TOLEDO, A. M.; OMETTO, J. P.; MOREIRA, M. Z.; GOMES, B. M.; BOLSON, M. A.; NETO, S. G.; BONELLI, N.; DEEGAN, L.; NEILL, C.; THOMAS, S.; AUFDENKAMPE, A. K.; RICHEY, J. E. Efeitos das mudanças do uso da terra na biogeoquímica dos corpos d'água da bacia do rio Ji-Paraná, Rondônia. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 35, n. 2, p. 197-205, 2005.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical. **Biometrics**, v. 33, p. 159-174, 1977.

LEITE, E. F.; ROSA, R. Determinação e caracterização de unidades de paisagem natural na Bacia Hidrográfica do Rio Formiga-TO a partir de técnicas de geoprocessamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais[...]** Foz do Iguaçu: INPE, 2013. p. 4217-4225.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 4 ed. Campinas, SP: Editora Átomo, 2016.

LIEBMANN, B.; MARENGO, J. A. Interannual variability of the rainy season and rainfall in the Brazilian Amazon Basin. **Journal of Climate**, v. 4, p. 4308-4318, 2001.

LIMA, W. P. **Princípios de manejo de bacias hidrográficas**. 1 ed. Piracicaba: ESALQ/USP, 1976.

LIMBERGER, L.; SILVA, M. E. S. Precipitação observada na Amazônia brasileira: comparação entre os dados das redes convencionais e dados da reanálise I do NCEP/NCAR, CRU e GPCC. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba/PR, v. 22, p. 20-37, 2018.

LIU, Y.; ENGEL, B. A.; COLLINGSWORTH, P. D.; PIJANOWSKI, B. C. Optimal implementation of green infrastructure practices to minimize influences of land use change and climate change on hydrology and water quality: case study in spy Run Creek watershed, Indiana. **Science of the Total Environment**, v. 601-602, p. 1400-1411, 2017.

LOLLO, J. A. **O uso da técnica de avaliação do terreno no processo de elaboração do mapeamento geotécnico**: sistematização e aplicação na quadrícula de Campinas. 1995. 267f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, 1995.

LOPES, F. B.; BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M.; ANDRADE, E. M.; CHAVES, L. C. G. Modelagem da qualidade das águas a partir de sensoriamento remoto hiperespectral. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, p. S13-S19, 2014.

LOPES, M. N. G.; SOUZA, E. B. de; FERREIRA, D. B. S. Climatologia regional da precipitação no Estado do Pará. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba/PR, v. 12, p. 84-102, 2013.

LUCAS, E. W. M.; BARRETO, N. J. C.; CUNHA, A. C. Variabilidade hidrológica da Bacia do Rio Jari (AP): estudo de caso do ano 2000. In: CUNHA, A. C.; SOUZA, E. B.; ALBURQUERQUE CUNHA, H. F. **Tempo, clima e recursos hídricos**: resultados do Projeto REMETAP no Estado do Amapá. Macapá: IEPA, 2010. p. 119-134

MACHADO, C. J. S. **Gestão de águas doces**. 1 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

MACHADO, R. A. S.; LOBÃO, J. S. B.; VALE, R. M. C.; SOUZA, A. P. M. J. Análise morfométrica de bacias hidrográficas como suporte à definição e elaboração de indicadores para a gestão ambiental a partir do uso de geotecnologias. In: ANAIS DO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais[...]** Curitiba: SBSR, 2011. p. 1441-1448.

MALHEIROS, C. H.; HARDOIM, E. L.; LIMA, Z. M.; AMORIM, R. S. S. Qualidade da água de uma represa localizada em área agrícola (Campo Verde, MT, Brasil). **Ambiente & Água**, Taubaté, v. 7, n. 2, p. 245-262, 2012.

MANTUA, N. J.; HARE, S. R.; ZHANG, Y.; WALLACE, J. M.; FRANCIS, R. C. Pacific inter-decadal climate oscillation with impacts on salmon production. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, p. 1069 – 1079, 1997.

MANZANO, M. N.; FERREIRA, A. T. S.; SAAD, A. R.; PIZZATO, E.; QUEIROZ, W.; DALMAS, F. B. Fragilidade a inundações da bacia hidrográfica do rio Baquirivu-Guaçu (Guarulhos, SP). **Pesquisas em Geociências**, Porto Alegre, v. 46, n. 3, p. e0785, 2019.

MARCIANO, A. G.; BARBOSA, A. A.; SILVA, A. P. M. Cálculo de precipitação média utilizando método de Thiessen e as linhas de cumeada. **Ambiente & Água**, Taubaté, v. 13, n. 1, p. e1906, 2018.

MARDIA, K. V.; KENT, J. T.; BIBBY, J. M. **Multivariate analysis**. London: Academic, 1979.

MARENGO, J. A. Interannual variability of deep convection in the tropical South American sector as deduced from ISCCP C2 data. **International Journal of Climatology**, v. 15, n. 9, p. 995-1010, 1995.

MARENGO, J.A.; LIEBMANN, B.; KOUSKY, V.; FILIZOLA, N.; WAINER, I. C. Onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon Basin. **Journal of Climate**, v.14, p. 833-852, 2001.

MARTINS, S. V. **Recuperação de matas ciliares**. Minas Gerais: Editorial Emerson de Assis, 2001.

MEDEIROS, W. M. V.; SILVA, C. E.; LINS, R. P. M. Avaliação sazonal e espacial da qualidade das águas superficiais da bacia hidrográfica do rio Longá, Piauí, Brasil. **Ambiente & Água**, Taubaté, v. 13, n. 2, p. e2054, 2018.

MELO, M. F. C.; SANTOS, J. N.; SANTOS, C. P. *Sciadicleithrum juruparii* n. sp. (Monogenea: Ancyrocephalidae) from the gills of *Satanoperca jurupari* (Heckel) (Osteichthyes: Cichlidae) in the Guamá River, Amazon Delta, Brazil. **Systematic Parasitology**, v. 82, p. 125-129, 2012.

MELO, N. F. A. C. **Estrutura de populações de cladocera em dois lagos da Amazônia Central**. 1998. 95 f. Dissertação (Mestrado em Biologia de Água Doce e Pesca Interior) – Universidade Federal do Amazonas, INPA, Manaus, 1998.

MENDES, A. T. Delimitação da bacia hidrográfica do Rio Santo Antônio pela ferramenta de delimitação automática TauDEM. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 11, n. 03, p. 973-986, 2018.

MENDES, C. A. B.; LIMA, W. P. Análise de impactos ambientais de florestas plantadas no contexto de bacias hidrográficas: princípios norteadores. *In: SEMINÁRIO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARAÍBA DO SUL: O EUCALIPTO E O CICLO HIDROLÓGICO*, I., 2007, Taubaté. **Anais[...]**. Taubaté: IPABHI, 2007. p. 263-270.

MENEZES, F. P.; FERNANDES, L. L.; ROCHA, E. J. P. O uso da estatística para regionalização da precipitação do Estado do Pará, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba/PR, v. 16, p. 64-71, 2015.

MILANEZI, C. H. S.; PEREIRA, J. G. Caracterização da vulnerabilidade ambiental na microbacia do córrego Azul, Ivinhema – MS. **Geografia**, Londrina, v. 25, n. 1, p. 43-63, 2016.

MIOTO, C. L.; OLIVEIRA, R. V.; QUEIROZ, S. D. M.; PEREIRA, T. V.; ANACHE, J. A. A.; PARANHOS, F. A. C. Morfometria de bacias hidrográficas através de SIGs livres e gratuitos. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 37, n. 2, p. 16-22, 2017.

MOLION, L. C. B. On the dynamic climatology of the Amazon basin and associated rain-producing mechanisms. *In: DICKINSON, R. E. The geophysiology of amazonia vegetation and climate interactions*. New York: John Wiley and Sons, 1987.

MORAES, M. E. B.; LORANDI, R. **Métodos e técnicas de pesquisas em bacias hidrográficas**. 1 ed. Ilhéus, BA: Editus, 2016.

MOREIRA, A. M. **Estudo comparativo do uso da terra em unidades de produção familiar no Nordeste**. 2008. 87 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

MOREIRA, T. R.; SANTOS, A. R.; DALFI, R. L.; CAMPOS, R. F.; SANTOS, G. M. A. D. A.; EUGENIO, F. C. Confronto do uso e ocupação da terra em APPs no município de Muqui, ES. **Floresta e ambiente**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 2, p. 141-152, 2015.

MOTA, S. **Urbanização e meio ambiente**. 3 ed. Rio de Janeiro: ABES, 2003.

MUNIZ, J. N.; DUARTE, K. G.; BRAGA, F. H. R.; LIMA, N. S.; SILVA, D. F.; FIRMO, W. C. A.; BATISTA, M. R. V.; SILVA, F. M. A. M.; MIRANDA, R. C. M.; SILVA, M. R. C. Limnological Quality: Seasonality Assessment and Potential for Contamination of the Pindaré River Watershed, Pre-Amazon Region, Brazil. **Water**, v. 12, n. 851, p. 1-13, 2020.

NAHUM, J. S.; SANTOS, C. B. Impactos socioambientais da dendeicultura em comunidades tradicionais na Amazônia paraense. **Acta Geográfica**, Boa Vista/RR, v. espec., p. 63-80, 2013.

NASCIMENTO, T. V.; FERNANDES, L. L. Mapeamento de uso e ocupação do solo em uma pequena bacia hidrográfica da Amazônia. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 39, n. 1, p. 169-177, 2017.

NEVES, L. V.; DEUS, L. A. B.; OSCAR JUNIOR, A. C. S.; FERNANDES, M. C. Mudanças de uso e cobertura da terra e áreas suscetíveis à inundação – estudo de caso do município de Duque de Caxias/RJ. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 37, 2019.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2 ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1989. 422p.

NOBRE P.; SHUKLA, J. Variations of SST, wind stress and rainfall over the tropical Atlantic and South America. **Journal of Climate**, v. 9, n. 10, p. 2464-2479, 1996.

NORONHA, G. C.; HORA, M. A. G. M.; SILVA, L. P. Análise do índice de anomalia de chuva para a microbacia de Santa Maria/Cambiocó, RJ. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José do Campos/SP, v. 31, n. 1, p. 74-81, 2016.

OLIVEIRA, B. S. S.; CUNHA, A. C. Correlação entre a quantidade da água e variabilidade da precipitação no sul do Estado do Amapá. **Ambiente & Água**, Taubaté, v. 9, n. 2, p. 261-275, 2014.

OLIVEIRA, J. C.; MAIA, K. P.; CASTRO, N. L. B.; OLIVEIRA, S. M. A. C. Spatial-temporal analysis of the surface water quality of the Pará river basin through statistical techniques. **Ambiente & Água**, Taubaté, v. 14, n. 1, p. e2322, 2019.

ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL (OMM). **Guide to climatological practices, WMO - Nº 100, WMO-TD/Nº. 341**. Geneva: WMO, 2011. Disponível em: http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/guide/guide_climat_practices.php. Acesso em: 02 set 2020.

PAIVA, E. M. C. D.; CLARK, R. T. Time trends in rainfall records in Amazonia. **Bulletin of the American Meteorology Society**, v. 76, n. 11, p. 2203-2209, 1995.

PARÁ. Governo do Estado do Pará. **O Estado do Pará**. 2014. Disponível em: <http://www.pa.gov.br/>. Acesso em: 18 out 2020.

PAREDES-TREJO, F. J.; BARBOSA, H. A.; KUMAR, T. V. L. Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 139, p. 26-40, 2017.

PAREDES-TREJO, F. J.; BARBOSA, H. A.; PEÑALOZA-MURILLO, M. A.; MORENO, M. A.; FARÍAS, A. Intercomparison of improved satellite rainfall estimation with CHIRPS gridded product and rain gauge data over Venezuela. **Atmósfera**, v. 29, n. 4, p. 323-342, 2016.

PAROLIN, P.; PIEDADE, M. T. F.; JUNK, W. J. Os rios da Amazônia e suas interações com a floresta. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 16, n. 31, p. 49-64, 2005.

PENEREIRO, J. C.; BADINGER, A.; MACCHERI, N. A.; MESCHIATTI, M. C. Distribuições de tendências sazonais de temperatura média e precipitação nos biomas brasileiros. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José do Campos/SP, v. 33, n. 1, p. 97-113, 2018.

PEREIRA, C. L. O. Abordagem socioeconômica da mesorregião Nordeste do Pará. In: CORDEIRO, I. M. C. C. *et al.* (org.). **Nordeste Paraense: panorama geral e uso sustentável das florestas secundárias**. Belém: EDUFRA, 2017. p. 97-130.

PEREIRA; M. E. M.; LIMA JUNIOR, J. A.; LIMA, V. M.; GUSMÃO, S. A. L.; OLIVEIRA, P. D.; SILVA, A. L. P. Viabilidade econômica da produção de couve-flor irrigada por gotejamento no Nordeste Paraense. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém/PA, v. 61, p. 01-08, 2018.

PINO, F. A. A questão da não normalidade: uma revisão. **Revista de Economia Agrícola**, São Paulo, v. 61, n. 2, p. 17-33, 2014.

PINTO JR., O. B.; ROSSETE, A. N. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Ribeirão Cachoeira, MT-Brasil. **Revista Eletrônica Geoambiente On-line**, Jataí/GO, n. 4, p. 1-16, 2005.

PINTO, A. L.; MEDEIROS, R. B.; MIGUEL, A. E. S.; GOMES, W. M. Comportamento climático da bacia hidrográfica do Córrego Moeda, Três Lagoas/MS, no ano de 2012. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 16, n. 53, p. 176-188, 2015.

POLGE, E.; CHAPUIS, R. P.; PIRAUX, M. Territoires émergents d'Amazonie: analyse comparée des dynamiques territoriales dans le Baixo Amazonas et le Nordeste Paraense. **Revista Franco-Brasileira de Geografia**, v. 24, n. 24, 2015. DOI: <https://doi.org/10.4000/confins.10290>.

PONTE, F. C.; FURTADO, A. M. M.; SILVA, C. N.; SILVA, J. M. P.; LIMA, R. S. Parâmetros fisiográficos e impactos ambientais da rodovia Santarém-Cuiabá (BR-163), Estado do Pará, Brasil. **REDE-Revista Eletrônica do PRODEMA**, Fortaleza, v. 9, n. 2, p. 53-64, 2016.

PORTO, M. L.; JESUS, E. S.; PEREIRA JUNIOR, A. Análise das tendências nas relações entre fluxo de veículos, arborização e os níveis de intensidade de ruído. **Ecologia e Nutrição Florestal**, Santa Maria, v. 5, n. 3, p. 87-97, 2017.

PRATA, S. S.; MIRANDA, I. S.; ALVES, S. A. O.; FARIAS, F.C.; JARDIM, F. C. S. Floristic gradient of the northeast paraense secondary forests. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 40, n. 3, p. 523-534, 2010.

PUSCEDDU, A.; GAMBI, C.; MANINI, E.; DANOVARO, R. Tropic sate, ecosystem efficiency and biodiversity of transitional aquatic ecosystems: analysis of environmental quality based on different benthic indicators. **Chemistry and Ecology**, v. 23, n. 6, p. 505-515, 2007.

PUTRO, B.; KJELDSSEN, T. R.; HUTCHINS, M. G.; MILLER, J. An empirical investigation of climate and land-use effects on water quantity and quality in two urbanising catchments in the southern United Kingdom. **Science of the Total Environment**, v. 548-549, p. 164-172, 2016.

QUADRO, M. F. L.; SILVA DIAS, M. A. F.; HERDIES, D. L.; GONÇALVES, L. G. G. Análise climatológica da precipitação e do transporte de umidade na região da ZCAS através da nova geração de reanálises. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos/SP, v. 27, n. 2, 152-162, 2012.

QUARESMA, A. P.; ALMEIDA, R. H. C.; OLIVEIRA, C. M.; KATO, O. R. Composição florística e faunística de quintais agroflorestais da agricultura familiar no nordeste paraense. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 10, n. 5, p. 7 - 84, 2015

R DEVELOPMENT CORE TEAM 2018. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <http://www.R-project.org/>. Acessado em: 10 abr 2019.

RAZIEI, T.; MARTINS, D. S.; BORDI, I.; SANTOS, J. F.; PORTELA, M. M.; PEREIRA, L. S.; SUTERA, A. SPI Modes of Drought Spatial and Temporal Variability in Portugal: Comparing Observations, PT02 and GPCC Gridded Datasets. **Water Resour Manage**, v. 29, p. 487-504, 2015.

REBELLO, F. K.; SANTOS, M. A. S.; HOMMA, A. K. O. Modernização da agricultura nos municípios do Nordeste Paraense: determinantes e hierarquização no ano de 2006. **Revista de Economia e Agronegócios**, Viçosa/MG, v. 15, n.2, p. 209-232, 2009.

RENCHE, A. C. **Methods of multivariate analysis**. 2 ed. Canadá: A John Wiley & Sons, INC. Publication, 2002. p.727

RIBEIRO, W. O. Entre a metrópole e a cidade média: a complexidade das interações espaciais e das dinâmicas de centralidade da cidade de Castanhal, no Nordeste Paraense. **GEOUSP** (Online), São Paulo, v. 20, n. 1, p. 115 – 129, 2016.

RIVERA, J. A.; MARIANETTI, G.; HINRICHS, S. Validation of CHIRPS precipitation dataset along the Central Andes of Argentina. **Pesquisa Atmosférica**, v. 213, p. 437-449, 2018.

ROCHA, F. A.; OLIVEIRA, M. S. C.; MELO, A. R. B.; BARROS, F. M.; BARRETO, L. V. Variáveis de qualidade de água influenciadas pelo tipo e época de amostragem, no rio Catolé-BA. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 6, n. 11, p. 01-07, 2010.

ROCHA, N. C. V.; LIMA, A. M. M. A sustentabilidade hídrica na bacia do rio Guamá, Amazônia Oriental/Brasil. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 32, p. 141-160, 2020.

ROCHA, Nívia Cristina Vieira. **Avaliação da sustentabilidade hídrica segundo os modelos de uso e ocupação do território na bacia do rio Guamá** – Pará, Amazônia Oriental. 2017. 118 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

ROCHA, V. M.; CORREIA, F. W. S.; FONSECA, P. A. M. Precipitation recycling in the Amazon: a review study. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos/SP, v. 30, n. 1, p. 59-70, 2015.

RODIER, J. **Analisis de las aguas**. Barcelona: OMEGA, 1981. 1059 p.

RODRIGUES FILHO; J. L., ABE, D S.; GATTI JUNIOR, P.; MEDEIROS, G. R.; DEGANI, R. M.; BLANCO, F. P.; FARIA, C. R. L.; CAMPANELLI, L.; SOARES, F. S.; GALLI, C. V. S.; SILVA, V. T.; TUNDISI, J. E. M.; TUNDISI, T. M.; TUNDISI, J. G. Spatial patterns of water quality in Xingu River Basin (Amazonia) prior to the Belo Monte dam impoundment. **Brazilian Journal Biology**, v. 75, n. 3 (suppl.), p. S34-S46, 2015.

RODRIGUES, C. C. S.; SANTOS, E.; RAMOS, B. S.; DAMASCENO, F. C.; CORREA, J. A. M. PAH baselines for Amazonian surficial sediments: a case of study in Guajará Bay and Guamá River (Northern Brazil). **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 100, p. 786–791, 2018.

RODRIGUES, R. S. S.; BITTENCOURT, G. M.; FERNANDES, L. L. Escoamento superficial em uma pequena bacia hidrográfica rural da Amazônia. **Revista Brasileira de Cartografia**, Monte Carmelo/MG, v. 70, n. 2, p. 605-628, 2018.

- RODRIGUES, V.; ESTRANY, J.; RANZINI, M.; CICCIO, V.; BENITO, J. M. T. M.; HEDO, J.; BORJA, M. E. L. Effects of land use and seasonality on stream water quality in a small tropical catchment: The headwater of Córrego Água Limpa, São Paulo (Brazil). **Science of the Total Environment**, v. 622–623, p. 1553–1561, 2018.
- ROMERO, F. I.; COZANO, M. A.; GANGAS, R. A.; NAULIM, P. I. Zonas ribereñas: protección, restauración y contexto legal en Chile. **Bosque**, v. 35, n. 1, p. 3-12. 2014.
- ROOY, M. P. V. A rainfall anomaly index independent of time and space. **Notos**, v. 14, p. 43-48, 1965.
- ROSA, C. N.; LUCAR, H. D.; FOSA, M. I. T. Ditos populares meteorológicos na quarta colônia sob o olhar da comunicação social. In: SEMINÁRIO DE PESQUISA EM COMUNICAÇÃO, 4., 2004. Santa Maria. **Anais[...]** Rio Grande do Sul: UFSM, 2004. p. 01-07.
- RUDOLF, B., SCHNEIDER, U. Calculation of gridded precipitation data for the global land-surface using in-situ gauge observations. In: WORKSHOP OF THE INT. PRECIPITATION WORKING GROUP, 2., 2005, Monterey, California. **Anais[...]**. Monterey, California: [s.n], 2005. p.231-247.
- RUIZ, J. J. Evaluación de diferentes metodologías para la calibración de las estimaciones de precipitación CMORPH sobre Sudamérica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos/SP, v. 24, n. 4. p. 473-488, 2009.
- SÁ FILHO, José Adriano Rocha. **Avaliação qualitativa das águas no sistema da macrodrenagem da acia do Tabuleiro do Martins** – Maceió/ AL. 2010. 162 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) - Universidade Federal de Alagoas, 2010.
- SABER, M.; HAMAGUCHI, T.; KOJIRI, T.; TANAKA, K.; SUMI, T. A physically based distributed hydrological model of wadi system to simulate flash floods in arid regions. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 8, p. 143-160, 2015.
- SALIMON, C. I.; VICTORIA, R. L.; BROWN, I. F.; STONE, T.; DAVIDSON, E. A. Mudança de cobertura da terra e fluxo de CO₂ do solo para a atmosfera na Amazônia Sul Oriental. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais[...]** Belo Horizonte: ABSR, 2003. p. 699-705.
- SANTOS, A. F. Lançamento do CBERS-4: sucesso total. **Revista Brasileira de Direito Aeronáutico e Espacial**, Rio de Janeiro, n. 96, p. 5-8, 2014.
- SANTOS, A. M.; TARGA, M. S.; BATISTA, G. T.; DIAS, N. W. Análise morfométrica das sub-bacias hidrográficas Perdizes e Fojo no município de Campos do Jordão, SP, Brasil. **Ambiente & Água**, Taubaté, v. 7, n. 3, p. 195-211, 2012.
- SANTOS, E. B.; LUCIO, P. S.; SILVA, C. M. S. Análise de tendência da precipitação diária na Amazônia Brasileira. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 8, n. 4, p. 1041-1052, 2015.

SANTOS, E. R. M.; ARAUJO, Q. R.; FARIA FILHO, A. F.; VIEIRA, R. B.; ASSUNÇÃO NETO, J. F.; CABRAL, L. C. C.; BISPO, E. R. Aspectos geoambientais dos recursos hídricos das propriedades rurais do Projeto Barro Preto (Bahia). In: MORAES, M. E. B.; LORANDI, R. **Métodos e técnicas de pesquisa em bacias hidrográficas**. Ilhéus, BA: Editus, 2016. cap. 6, p. 121-138.

SANTOS, G. R.; COELHO, A. S. Bacia hidrográfica e a confecção de recursos didáticos por alunos do ensino fundamental em Sergipe. **Geografia, Ensino & Pesquisa**, Santa Maria, v. 24, p. e12, 2020.

SANTOS, R. F. **Planejamento ambiental: teoria e prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

SANTOS, S. O.; CARNEIRO, A. S.; LOBÃO, J. S. Z. Análise de parâmetros morfométricos aplicados para a caracterização de uma bacia hidrográfica. In: ANAIS DO SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO, 8., 2017, Bahia. **Anais[...]** Bahia: GEONORDESTE, 2017. p. 15-23.

SANTOS, S. R. Q.; SANSIGOLO, C. A.; NEVES, T. T. A. T.; SANTOS, A. P. P. Variabilidade sazonal da precipitação na Amazônia: validação da série de precipitação mensal do GPCC. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 10, n. 6, p. 1721-1729, 2017.

SASSOMA, I. T. L.; SOUSA, I. F.; AGUIAR NETTO, A. O.; CARVALHO, C. M. Avaliação temporal e espacial de características físico-químicas em águas superficiais do rio Catumbela, Angola. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 9, n. 3, p. 113-126, 2015.

SCHNEIDER, U.; BECKER, A.; FINGER, P.; MEYER-CHRISTOFFER, A.; RUDOLF, B.; ZIESE, M. **GPCC full data reanalysis version 7.0: monthly land-surface precipitation from rain gauges built on GTS based and historic data**. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5065/D6000072>. Acessado em: 15 fev. 2018.

SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. **Geological Society of America Bulletin**, v. 67, n. 5, p. 597-646, 1956.

SHARMA, R. C.; TIWARI, V. Seasonal physico chemical characterization of water of sacred lake Nachiketa Tal, Garhwal Himalaya. **Applied Water Science**, v. 8, p. 164, 2018.

SHRESTHA, M., TAKARA, K., KUBOTA, T., & BAJRACHARYA, S. Verification of GSMaP rainfall estimates over the central Himalayas. **Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)**, v. 67, n. 4, p. I_37-I_42, 2011.

SHRESTHA, N. K.; QAMER, F. M.; PEDREROS, D.; MURTHY, M. S. R.; WAHID, S. M.; SHRESTHA, M. Evaluating the accuracy of Climate Hazard Group (CHG) satellite rainfall estimates for precipitation based drought monitoring in Koshi basin, Nepal. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 13, p. 138-151, 2017.

SILVA, C. B.; SILVA, M. E. S.; AMBRIZZI, T.; TOMMASELLI, J. T. G.; PATUCCI, N. N.; MATAVELI, G. A. V.; LIMA, B. S.; CORREA, W. C. Precipitação na América do Sul – dados obtidos em estações meteorológicas automáticas e sistemas orbitais. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba/PR v. 25, p. 54-79, 2019.

SILVA, D. M. L.; PEREIRA, M. A.; COSTA, E. N. D.; SOUZA, J. C. Caracterização hidrológica e biogeoquímica de nitrogênio em microbacias: estudo de caso em áreas com diferentes usos do solo. *In: MORAES, M. E. B.; LORANDI, R. Métodos e técnicas de pesquisa em bacias hidrográficas*. Ilhéus, BA: Editus, 2016.

SILVA, E. M.; ALVES, L. F. N. Organização e diversidade dos sistemas de produção de agricultores familiares integrados à agroindústria de dendê no Nordeste Paraense. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, Taubaté, v. 14, n. 1, p. 166-192, 2018.

SILVA, F. J. L. T.; ROCHA, D. F.; AQUINO, C. M. S. Geografia, geotecnologias e as novas tendências da geoinformação: indicação de estudos realizados na região Nordeste. **Revista de Geografia e Interdisciplinaridade**, Grajaú, v. 2, n. 6, p. 176-197, 2016.

SILVA, F. L.; OLIVEIRA, F. A.; AMIN, M. M.; BELTRÃO, N. E. S.; ANDRADE, V. M. S. Dimensões do uso e cobertura da terra nas Mesorregiões do Estado do Pará. **Revista Espacios**, v. 37, n. 5, p. 1-20, 2016.

SILVA, G. C.; ALMEIDA, F. P.; ALMEIDA, R. T. S.; MESQUITA, M.; ALVES JUNIOR, J. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do riacho Rangel-Piauí, Brasil. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 15, n. 28, p. 244-258, 2018.

SILVA, J. S.; SILVA, R. M.; SILVA, A. M. Mudanças do uso e ocupação do solo e degradação eco-ambiental usando imagens orbitais: o estudo de caso da bacia do rio Bacanga, São Luís (MA). **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 9, n. 1, p. 265-27, 2016.

SILVA, L. G. T.; SILVA, B. N. R.; RODRIGUES, T. E. **Análise fisiográfica das várzeas do baixo Tocantins**: uma contribuição ao manejo e desenvolvimento dos sistemas de uso da terra. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2002.

SILVA, L. S. R.; SILVA, J. S.; REIS, A. A. A importância dos estudos científicos sobre Economia Solidária em territórios e comunidades quilombolas na Amazônia paraense. **Emancipação**, Ponta Grossa, v. 19, n. 2, p. 1-21, p. e10252, 2019.

SILVA, R. S.; BARBOSA, C. O.; MONTEIRO, F. G.; CORREA, D. L.; GOMES, A. S. Análise multitemporal de parte da reserva do Alto Rio Guamá, Paragominas, PA. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 39, p. 1-10, 2019.

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Bento Gonçalves, v. 10, n. 01, p. 05-23, 2005.

SILVEIRA, A. L. L. O ciclo hidrológico e a bacia hidrográfica. *In: TUCCI, C. E. M. (org.). Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: Ed. da UFRGS/ABRH, 1993.

SINGH, K. P.; MALIK, A.; MOHAN, D.; SINHA, S. Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River (India) – a case study. **Water Research**, v. 38, n. 18, p. 3980-3992, 2004.

SIOLI, H. **Amazônia**: fundamentos de ecologia da maior região de florestas tropicais. Petrópolis: Vozes, 1984. 72 p.

SIOLI, H. Bemerkungen zur typologie amazonischer Flüsse. **Amazoniana**, Manaus, v. 1, p. 74-83, 1965.

SIOLI, H.; KLINGE, H. Solos, típicos de vegetação e águas na Amazônia. **Amazoniana**, Manaus, v. 1, p. 27-41, 1962.

SIQUEIRA, G. W.; APRILE, F.; MIGUÉIS, A. M. Diagnóstico da qualidade da água do rio Parauapebas (Pará – Brasil). **Acta Amazonica**, Manaus, v. 42, n. 3, p. 413-422, 2012.

SOARES, F. V. P. O uso racional das matas ciliares como forma de conservação dos recursos hídricos e desenvolvimento econômico e social das comunidades tradicionais: município de Autazes – AM. In: SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA DO ESTADO DE SÃO PAULO, 8., 2008, Rio Claro. **Anais[...]** São Paulo: SIMPGEO, 2008. p. 161-178.

SODRÉ, G. R. C.; RODRIGUES, L. L. M. Comparação entre estimativa da precipitação observada pela técnica CMORPH e estações meteorológicas do INMET em diferentes regiões do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 6, n. 2, p. 301-307, 2013.

SODRÉ, G. R. C.; VITORINO, M. I.; COHEN, J. C. P.; MORAES, B. C. Estudo observacional da convecção de mesoescala em diferentes superfícies no estado do Pará. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 8, p. 45-55, 2015.

SOUZA, A. B.; MELO, R. A.; SILVA, D. F. Avaliação climática e dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe (CE). **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 6, n. 6, p. 1115-1140, 2013.

SOUZA, B. F.; KOTSUBO, K.; FRACACIO, G.; TREVISAN, D. T.; CASSIANO, A. M.; MOSCHINI, L. E.; CATOJO, A. M. Z. Avaliação da qualidade dos corpos hídricos frente às ações antrópicas no município de Santa Lúcia – SP. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 10, n. 1, p. 317-331, 2017.

SOUZA, E. B. de; CARMO, A. M. C.; MORAES, B. C.; NACIF, A. FERREIRA, D. B. S.; ROCHA, E. J. P.; SOUZA, P. J. O. P. Sazonalidade da precipitação sobre a Amazônia Legal brasileira: clima atual e projeções futuras usando o modelo REGCM4. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba/PR, v. 18, p. 293-306, 2016.

SOUZA, E. B. de; AMBRIZZI, T. Pentad precipitation climatology over Brazil and the associated atmospheric mechanisms. **Climanálise**, São José dos Campos, v. 5, n. 6, p. 36-44, 2003.

SOUZA, E. B. de; FERREIRA, D. B. S.; GUIMARÃES, J. T. F.; FRANCO, V. S.; AZEVEDO, F. T. M.; SOUZA, P. J. O. P. Padrões climatológicos e tendências da precipitação nos regimes chuvoso e seco da Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba/PR, v. 21, p. 81-93, 2017.

SOUZA, E. B. de; KAYANO, M. T.; AMBRIZZI, T. The regional precipitation over the eastern Amazon/northeast Brazil modulated by tropical Pacific and Atlantic SST anomalies on weekly timescale. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos/SP, v.19, n. 2, p. 113–122, 2004.

SOUZA, E. B. de; AMBRIZZI, T. Pentad precipitation climatology over Brazil and the associated atmospheric mechanisms. **Climanálise**, São José dos Campos, v. 1, p. 1-20, Jan.2003.

SOUZA, E. B. de; FERREIRA, D. B. S.; GUIMARÃES, J. T. F.; FRANCO, V. S.; AZEVEDO, F. T. M.; SOUZA, P. J. O. P. Padrões climatológicos e tendências da precipitação nos regimes chuvoso e seco da Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba/PR, v. 21, p. 81-93, 2017.

SOUZA, P. J. O. P.; SANTOS, C. D. M.; SOUZA, E. B.de; OLIVEIRA, E. C.; SANTOS, J. T. S. Impactos das mudanças climáticas na cultura da soja no Nordeste do Estado do Pará. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 12, n. 2, p. 2454-2467, 2018.

SOUZA, S. R.; MACIEL, M. N. M.; OLIVEIRA, F. A.; JESUÍNO, S. A. Caracterização do conflito de uso e ocupação do solo nas áreas de preservação permanente do rio Apeú, Nordeste do Pará. **Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 4, p. 701-710, 2012.

SPERLING, M. V. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. 2 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

STIPP, N. A. F.; CAMPOS, R. A; CAVIGLIONE, J. H. Análise morfométrica da bacia hidrográfica do rio Taquara: uma contribuição para o estudo das Ciências Ambientais. **Portal da Cartografia**, Paraná, v. 3, n. 1, p. 105-124, 2010.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**, v. 63, n. 11, p. 1117-1142, 1952.

SUMMERFIELD, M. A. **Global geomorphology**: an introduction of the study of landforms. Harlow (Inglaterra): Essex, Longman Scientific & Technical, 1991.

TAGLIANI, C. R. Técnica para avaliação da vulnerabilidade ambiental de ambientes costeiros utilizando um sistema geográfico de informações. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais[...]** Belo Horizonte: INPE, 2003.

TAPIADOR, F. J.; TURK, F. J.; PETERSEN, W.; HOU, A. Y.; GARCÍA-ORTEGA, E.; MACHADO, L. A. T.; ANGELIS, C. F.; SALIO, P.; KIDD, C.; HUFFMAN, G. J.; CASTRO, M. Global precipitation measurement: methods, datasets and applications. **Atmospheric Research**, v. 104-105, p. 70-97, 2012.

TARGA, M. S.; BATISTA, G. T.; DINIZ, H. N.; DIAS, N. W.; MATOS, F. C. Urbanização e escoamento superficial na bacia hidrográfica do Igarapé Tucunduba, Belém, PA, Brasil. **Ambiente & Água**, Taubaté, v. 7, n. 2, p. 120-142, 2012.

TEODORO, V. L. I.; TEIXEIRA, D.; COSTA, D. J. L.; FULLER, B. B. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista UNIARA**, Araraquara/SP, n. 20, p. 137-156, 2007.

TONELLO, K. C. **Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da cachoeira das Pombas, Guanhões, MG**. 2005. 69f. Tese (Doutorado em Ciências Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

TORRES, M. F. **A pesca ornamental na bacia do rio Guamá: sustentabilidade e perspectivas ao manejo.** 2007. 287 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido) - Núcleo de Altos Estudos Amazônicos, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

TORRES, M. F. **A pesca ornamental na bacia do rio Guamá: sustentabilidade e perspectivas ao manejo.** 2007. 287 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido) - Núcleo de Altos Estudos Amazônicos, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

TREJO, F. J. P.; BARBOSA, H. A.; PEÑALOZA-MURILLO, M. A.; MORENO, M. A.; FARÍAS, A. Intercomparison of improved satellite rainfall estimation with CHIRPS gridded product and rain gauge data over Venezuela. **Atmósfera**, v. 29, n. 4, p. 323-342, 2016.

TRICART, J. **Ecodinâmica.** 1 ed. Rio de Janeiro: IBGE-SUPREN, 1977.

TRINDADE, S. P.; RODRIGUES, R. A. Uso do solo na microbacia do ribeirão samambaia e sua relação com a suscetibilidade à erosão laminar. **Revista Geografia Acadêmica**, Boa Vista/RR, v. 10, n. 1, p. 163-181, 2016.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação.** 3ª ed. Porto Alegre: Ed. da UFRGS/ABRH, 2003.

VIANA; W. R. C.; MORAES, M. E. B. Bacia do rio Almada (Bahia): criação de cenários ambientais a partir do diagnóstico da fragmentação florestal. *In*: MORAES, M. E. B.; LORANDI, R. **Métodos e técnicas de pesquisa em bacias hidrográficas.** Ilhéus, BA: Editus, 2016. cap. 2, p. 35-56.

VILELA FILHO, L. R.; VITTE, A. C. A utilização de técnicas morfométricas do relevo aplicadas na determinação da fragilidade ambiental: o caso da bacia do córrego Proença, município de Campinas (SP). *In*: ENCONTRO DE GEÓGRAFOS DA AMÉRICA LATINA, 10., 2005, São Paulo. **Anais[...]** São Paulo: USP, 2005. p. 1254-1267.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada.** 1 ed. São Paulo: Mc Graw-Hill do Brasil, 1975.

VON SPERLING, M. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios.** Belo Horizonte: UFMG, 2007. 588 p.

WANG, G.; ZHANG, P.; LIANG, L.; ZHANG, S. Evaluation of precipitation from CMORPH, GPCP-2, TRMM 3B43, GPCC, and ITPCAS with ground-based measurements in the Qinling-Daba Mountains, China. **PLoS ONE**, v. 12, n. 10, p. e0185147, 2017.

WARD, N. D.; KEIL, R. G.; MEDEIROS, P. M.; BRITO, D. C.; CUNHA, A. C.; DITTMAR, T.; YAGER, P. L.; KRUSCHE, A. V.; RICHEY, J. E. A. Degradation of terrestrially derived macromolecules in the Amazon River. **Nature Geoscience**, v. 6, p. 530-533, 2013.

WATRIN, O. S.; GERHARD, P.; MACIEL, M. N. M. Dinâmica do uso da terra e a configuração da paisagem em antigas áreas de colonização de base econômica familiar no Nordeste do estado do Pará. **Revista Geografia**, Rio Claro, v. 34, n. 3, p. 455-472, 2009.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Journal Physical Geography**, v. 2, p. 184-194, 1981.

WU, Z.; WANG, X.; CHEN, Y.; CAI, Y.; DENG, J. Assessing river water quality using water quality index in Lake Taihu Basin, China. **Science of the Total Environment**, v. 612, p. 914-922, 2018.

XU, W.; ZOU, Y.; ZHANG, G.; LINDERMAN, M. A comparison among spatial interpolation techniques for daily rainfall data in Sichuan Province, China. **International Journal Climatolology**, v. 35, n. 10, p. 2898-2907, 2015.

APÊNDICE A – MEMORIAL FOTOGRÁFICO

Figura A1 – Georreferenciamento dos pontos amostrais (à esquerda) e coleta de amostras de água no ponto 10 na comunidade de Igarapé-Açu em Ourem/PA (à direita).



Fonte: Autoria própria.

Figura A2 – Coleta de amostras de água no ponto 5 na comunidade Cotovelo em Garrafão do Norte/PA (à esquerda) e para coleta de amostras de água no ponto 3 na comunidade de Acapú em Capitão Poço/PA (à direita).



Fonte: Autoria própria.

Figura A3 – Medição *in situ* de parâmetros físico-químicos na água através da sonda multiparâmetro (à esquerda) e registro dos dados obtidos em planilha (à direita).



Fonte: Autoria própria.

Figura A4 – Área de extração mineral no município de Ourém/PA (à esquerda) e alteração antrópica nas margens do rio Guamá no trecho localizado na área urbana do município de São Miguel do Guamá/PA (à direita).



Fonte: Autoria própria.

Figura A5 – Utilização do rio para lavagem de roupa, louças e banho por comunidade localizada às margens do rio Guamá (à esquerda) e alteração antrópica das margens do rio Guamá devido instalação de estabelecimento de hotelaria e recreação (à direita).



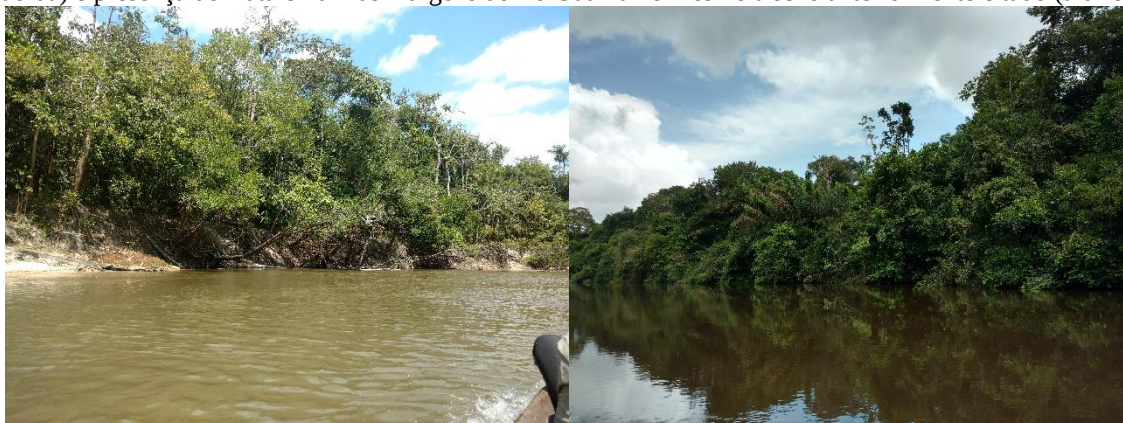
Fonte: Autoria própria.

Figura A6 – Ponte sobre o rio Guamá nas proximidades da comunidade Cimeira (à esquerda) e presença de mata ciliar nas margens do rio Guamá nas proximidades da comunidade Cimeira (à direita).



Fonte: Autoria própria.

Figura A7 – Estado das margens do rio Guamá entre trecho localizado entre as comunidades Cotovelo e Muriá (à esquerda) e presença de mata ciliar nas margens do rio Guamá no mesmo trecho anteriormente citado (à direita).



Fonte: Autoria própria.

Figura A8 – Estado das margens do rio Guamá na comunidade Boca Nova (à esquerda) e trecho de estrada com trecho de floresta derrubada no município de Capitão Poço/PA (à direita).



Fonte: Autoria própria.

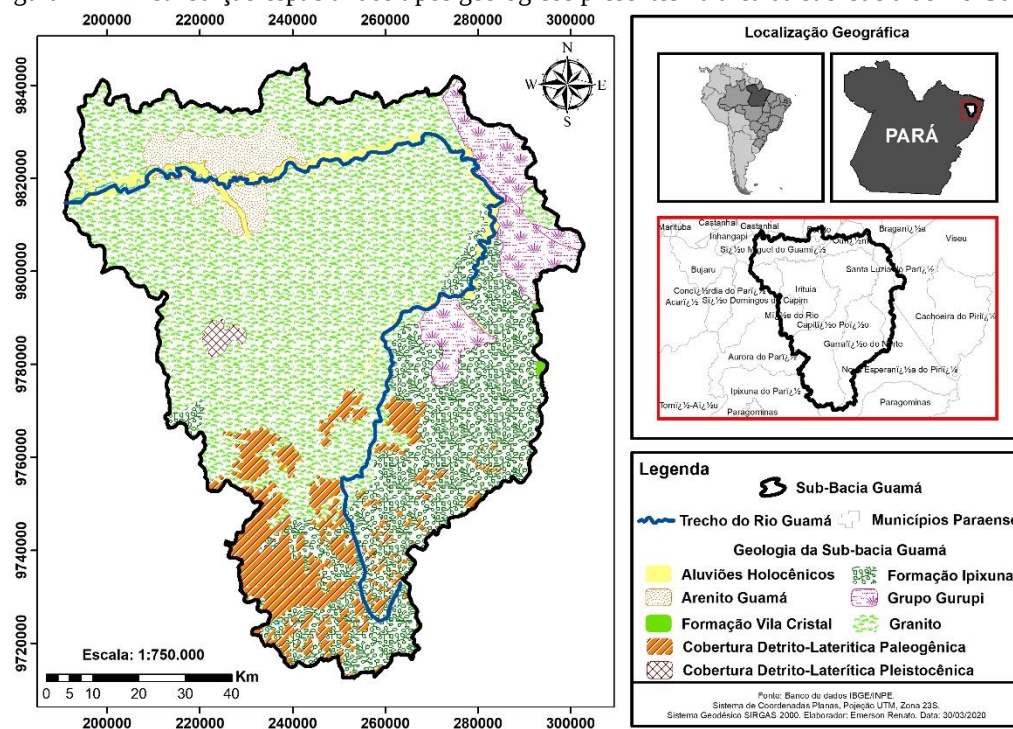
Figura A9 – Ponte sobre o rio Guamá nas proximidades da comunidade Arauaí (à esquerda) e trecho desconhecido da sub-bacia do rio Guamá utilizado para pecuária (à direita).



Fonte: Autoria própria.

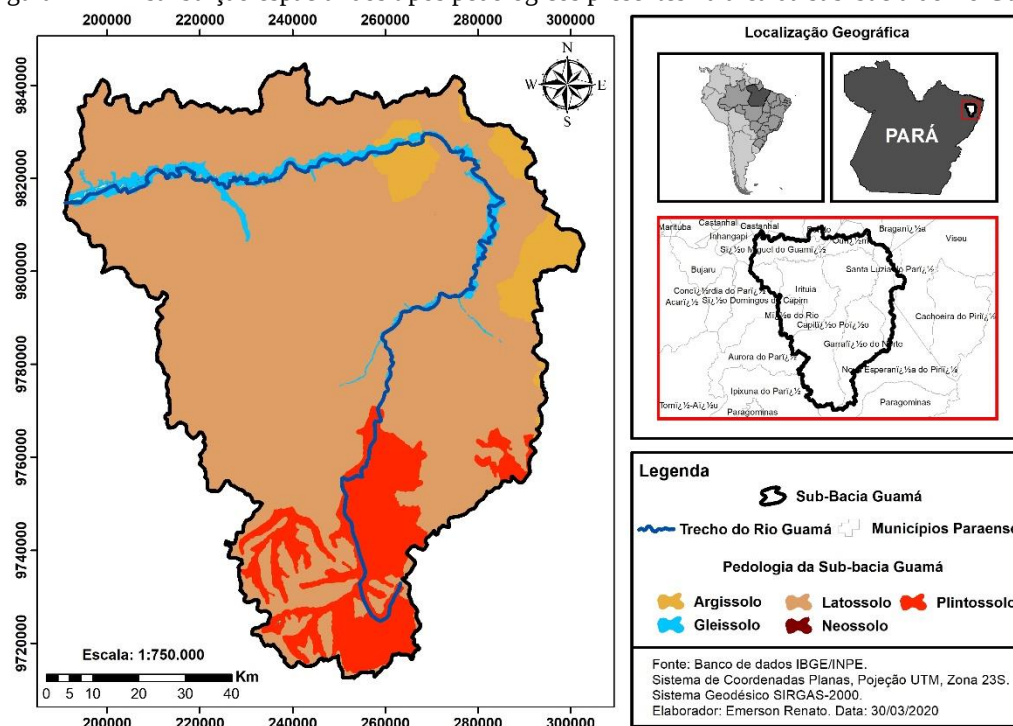
APÊNDICE B – MAPA GEOLÓGICO, PEDOLÓGICO E DE COBERTURA VEGETAL

Figura B1 – Distribuição espacial dos tipos geológicos presentes na área da sub-bacia do rio Guamá.



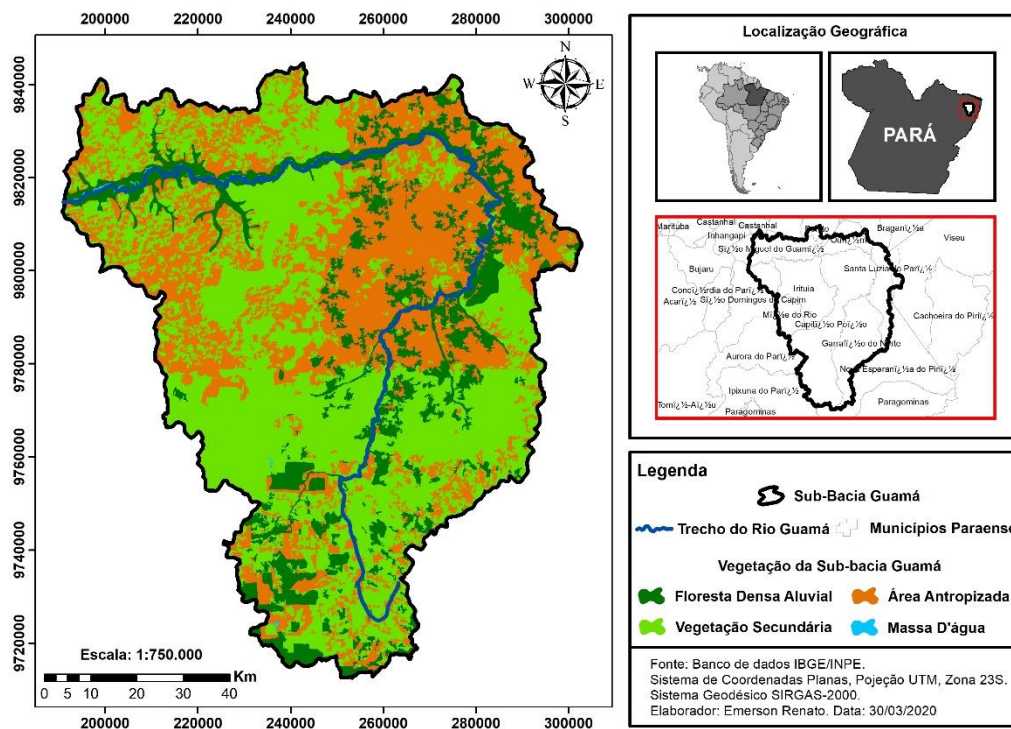
Fonte: Autoria própria.

Figura B2 – Distribuição espacial dos tipos pedológicos presentes na área da sub-bacia do rio Guamá.



Fonte: Autoria própria.

Figura B3 – Distribuição espacial dos tipos de cobertura de vegetação presentes na área da sub-bacia do rio Guamá.



Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE C – MÉDIAS E DESVIOS PADRÃO DAS VARIÁVEIS HIDROQUÍMICAS

Tabela C1 – Médias gerais ($\pm$ desvio padrão) das variáveis hidroquímicas nos 12 pontos amostrais no período chuvoso.

Ponto Amostral	pH	OD mg.L ⁻¹	CE µS.cm ⁻¹	RES MΩ.cm ⁻¹	STD mg.L ⁻¹	TEMP °C	TURB NTU	SOD %	CLO mg.L ⁻¹	DT mg.L ⁻¹
P1	4,62 $\pm$ 0,29	7,10 $\pm$ 0,84	32,85 $\pm$ 5,14	0,0309 $\pm$ 0,0048	16,56 $\pm$ 2,55	25,71 $\pm$ 0,27	7,57 $\pm$ 1,58	88,19 $\pm$ 10,56	17,72 $\pm$ 7,11	5,26 $\pm$ 1,43
P2	4,74 $\pm$ 0,20	6,81 $\pm$ 1,18	34,44 $\pm$ 6,34	0,0296 $\pm$ 0,0050	17,30 $\pm$ 3,05	25,87 $\pm$ 0,34	10,49 $\pm$ 1,74	84,39 $\pm$ 15,02	10,83 $\pm$ 1,55	5,11 $\pm$ 2,12
P3	4,88 $\pm$ 0,18	6,54 $\pm$ 0,83	35,81 $\pm$ 5,78	0,0286 $\pm$ 0,0043	17,93 $\pm$ 2,86	25,79 $\pm$ 0,51	12,75 $\pm$ 2,95	80,91 $\pm$ 9,38	11,49 $\pm$ 2,31	6,74 $\pm$ 2,80
P4	4,95 $\pm$ 0,37	6,30 $\pm$ 1,15	31,74 $\pm$ 3,68	0,0315 $\pm$ 0,0038	16,07 $\pm$ 1,70	26,34 $\pm$ 0,46	13,08 $\pm$ 0,82	77,51 $\pm$ 12,83	10,37 $\pm$ 2,64	6,74 $\pm$ 2,23
P5	5,05 $\pm$ 0,37	6,25 $\pm$ 1,61	36,56 $\pm$ 6,99	0,0281 $\pm$ 0,0059	18,37 $\pm$ 3,45	26,78 $\pm$ 1,13	15,23 $\pm$ 0,48	78,69 $\pm$ 19,93	10,69 $\pm$ 1,91	6,63 $\pm$ 2,86
P6	5,22 $\pm$ 0,43	6,37 $\pm$ 1,86	34,07 $\pm$ 7,04	0,0302 $\pm$ 0,0056	17,11 $\pm$ 3,47	27,24 $\pm$ 1,11	16,59 $\pm$ 2,03	81,14 $\pm$ 23,95	11,53 $\pm$ 1,41	6,04 $\pm$ 1,61
P7	5,36 $\pm$ 0,59	6,22 $\pm$ 2,17	35,48 $\pm$ 9,10	0,0293 $\pm$ 0,0067	17,63 $\pm$ 4,52	27,56 $\pm$ 1,32	15,09 $\pm$ 1,91	79,59 $\pm$ 28,12	9,64 $\pm$ 2,35	6,93 $\pm$ 0,28
P8	5,39 $\pm$ 0,60	5,93 $\pm$ 1,79	37,11 $\pm$ 8,00	0,0279 $\pm$ 0,0058	18,52 $\pm$ 4,01	27,11 $\pm$ 1,22	15,11 $\pm$ 1,99	75,73 $\pm$ 22,92	10,41 $\pm$ 1,97	6,67 $\pm$ 0,59
P9	5,69 $\pm$ 0,57	5,89 $\pm$ 0,56	36,59 $\pm$ 4,75	0,0275 $\pm$ 0,0033	18,33 $\pm$ 2,35	27,65 $\pm$ 1,11	15,07 $\pm$ 5,62	75,02 $\pm$ 5,66	10,33 $\pm$ 1,97	8,37 $\pm$ 1,22
P10	5,67 $\pm$ 0,57	5,29 $\pm$ 1,21	32,89 $\pm$ 3,58	0,0310 $\pm$ 0,0044	16,30 $\pm$ 1,92	27,91 $\pm$ 1,27	13,85 $\pm$ 5,96	67,90 $\pm$ 16,13	10,10 $\pm$ 2,65	7,31 $\pm$ 1,75
P11	5,56 $\pm$ 0,67	4,60 $\pm$ 1,33	33,70 $\pm$ 2,56	0,0297 $\pm$ 0,0021	16,74 $\pm$ 1,28	27,47 $\pm$ 1,19	13,03 $\pm$ 4,58	58,59 $\pm$ 16,33	9,99 $\pm$ 0,71	7,65 $\pm$ 2,09
P12	5,66 $\pm$ 0,44	4,14 $\pm$ 1,19	40,93 $\pm$ 5,90	0,0247 $\pm$ 0,0037	20,56 $\pm$ 3,18	28,03 $\pm$ 1,17	9,78 $\pm$ 4,41	53,31 $\pm$ 15,81	10,51 $\pm$ 2,02	9,56 $\pm$ 1,60

Fonte: Autoria própria.

Tabela C2 - Médias gerais ($\pm$ desvio padrão) das variáveis hidroquímicas nos 12 pontos amostrais no período menos chuvoso.

Ponto Amostral	pH	OD mg.L ⁻¹	CE µS.cm ⁻¹	RES MΩ.cm ⁻¹	STD mg.L ⁻¹	TEMP °C	TURB NTU	SOD %	CLO mg.L ⁻¹	DT mg.L ⁻¹
P1	5,57 $\pm$ 1,57	6,05 $\pm$ 1,99	22,11 $\pm$ 4,97	0,0481 $\pm$ 0,0102	11,11 $\pm$ 2,11	25,26 $\pm$ 0,63	8,34 $\pm$ 1,87	54,36 $\pm$ 41,56	14,10 $\pm$ 6,81	4,81 $\pm$ 1,00
P2	5,41 $\pm$ 1,21	5,23 $\pm$ 1,40	25,85 $\pm$ 3,91	0,0393 $\pm$ 0,0068	13,11 $\pm$ 1,90	25,47 $\pm$ 0,50	10,43 $\pm$ 2,20	49,41 $\pm$ 36,59	14,03 $\pm$ 7,05	4,42 $\pm$ 1,64
P3	5,29 $\pm$ 0,85	6,36 $\pm$ 2,53	24,04 $\pm$ 3,90	0,0407 $\pm$ 0,0086	12,67 $\pm$ 2,41	25,10 $\pm$ 0,51	12,31 $\pm$ 1,66	77,64 $\pm$ 30,74	13,72 $\pm$ 6,44	4,55 $\pm$ 0,20
P4	5,32 $\pm$ 0,78	5,13 $\pm$ 1,26	21,93 $\pm$ 3,21	0,0447 $\pm$ 0,0064	11,33 $\pm$ 1,35	25,29 $\pm$ 0,51	12,82 $\pm$ 1,26	62,29 $\pm$ 15,18	13,33 $\pm$ 7,12	5,25 $\pm$ 0,91
P5	5,27 $\pm$ 0,74	5,47 $\pm$ 2,03	23,56 $\pm$ 5,21	0,0432 $\pm$ 0,0083	11,89 $\pm$ 2,35	26,09 $\pm$ 0,13	17,33 $\pm$ 0,93	54,54 $\pm$ 42,82	11,57 $\pm$ 5,02	5,48 $\pm$ 1,03
P6	5,52 $\pm$ 0,98	5,02 $\pm$ 1,57	24,44 $\pm$ 3,42	0,0408 $\pm$ 0,0059	12,41 $\pm$ 1,63	26,27 $\pm$ 0,13	17,34 $\pm$ 0,38	49,62 $\pm$ 38,39	11,81 $\pm$ 5,70	6,29 $\pm$ 1,90
P7	5,45 $\pm$ 0,81	4,89 $\pm$ 1,53	22,48 $\pm$ 3,53	0,0437 $\pm$ 0,0058	11,78 $\pm$ 1,68	26,77 $\pm$ 0,64	17,93 $\pm$ 0,27	47,23 $\pm$ 36,52	13,19 $\pm$ 7,15	6,61 $\pm$ 0,66
P8	5,51 $\pm$ 0,60	5,51 $\pm$ 2,10	23,44 $\pm$ 3,53	0,0425 $\pm$ 0,0054	11,93 $\pm$ 1,22	26,39 $\pm$ 0,98	16,81 $\pm$ 0,63	53,64 $\pm$ 42,93	14,08 $\pm$ 7,69	6,74 $\pm$ 1,66
P9	5,60 $\pm$ 0,40	7,06 $\pm$ 2,49	28,70 $\pm$ 4,23	0,0360 $\pm$ 0,0024	14,04 $\pm$ 1,26	27,09 $\pm$ 0,44	15,88 $\pm$ 1,32	74,00 $\pm$ 56,09	10,77 $\pm$ 2,87	7,20 $\pm$ 1,20
P10	5,70 $\pm$ 0,40	7,04 $\pm$ 2,12	26,70 $\pm$ 3,55	0,0364 $\pm$ 0,0023	13,56 $\pm$ 0,48	26,93 $\pm$ 0,61	15,56 $\pm$ 1,67	70,97 $\pm$ 53,80	11,92 $\pm$ 5,25	7,86 $\pm$ 2,44
P11	5,50 $\pm$ 0,48	6,34 $\pm$ 1,57	27,30 $\pm$ 2,90	0,0369 $\pm$ 0,0015	13,74 $\pm$ 0,85	26,99 $\pm$ 0,32	15,57 $\pm$ 1,04	63,51 $\pm$ 45,08	14,44 $\pm$ 8,48	7,44 $\pm$ 0,68
P12	5,69 $\pm$ 0,18	5,31 $\pm$ 2,10	35,78 $\pm$ 7,44	0,0291 $\pm$ 0,0036	18,26 $\pm$ 3,53	26,87 $\pm$ 0,43	12,36 $\pm$ 1,17	64,58 $\pm$ 25,08	12,86 $\pm$ 5,84	8,88 $\pm$ 1,60

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE D – CARTILHA INFORMATIVA

APRESENTAÇÃO

Nos últimos anos muitos estudos (biológicos, químicos, físico-químicos etc.) foram realizados nas águas do rio Guamá e na região do Nordeste Paraense. Entretanto, essas pesquisas se concentraram em trechos localizados nas proximidades da cidade de Belém ou abordam uma dimensão espacial menos detalhada para a sub-bacia do rio Guamá (SBRG). O rio Guamá possui grande importância econômica, social e cultural para os municípios da região, pois para ele convergem toda drenagem de pequenos rios e igarapés que se inserem nos municípios abrangidos pela sua sub-bacia. O rio percorre milhares de quilômetros através de pequenas e médias comunidades, centros urbanos em desenvolvimento (como por exemplo, as cidades de Ourém, Capitão Poço e São Miguel do Guamá) e áreas sob fortes influências antrópicas devido as atividades agropecuárias. É comum ao longo do seu percurso visualizar a presença de estradas, pontes, áreas de plantio, áreas de pasto, abatedouros, indústrias (bebidas, cerâmica etc.), residências etc. Logo, espera-se que todas estas atividades humanas gerem impactos diretos e/ou indiretos na dinâmica deste corpo hídrico. Esta cartilha tem como objetivo apresentar os principais resultados da pesquisa de doutorado realizada pelo discente Ivan Carlos da Costa Barbosa no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal do Pará área da sub-bacia do rio Guamá, no Nordeste paraense.



Ivan Carlos da Costa Barbosa

Doutorando

E-mail: ivan.barbosa@ufpa.edu.br

Prof. Dr. Adriano Marlisom Leão de Souza

Orientador (PPGCA)

E-mail: marlisoms@yahoo.com.br

Profª. Drª. Maria Isabel Vitorino

Coorientadora (PPGCA)

E-mail: vitorino@ufpa.br

Prof. Dr. Luiz Gonzaga da Silva Costa

Coordenador Geral do Projeto UFPA/SUDAM

E-mail: luizgonzagacosta53@gmail.com

**Aponte a câmera do seu celular
para o QR CODE e acesse os
resultados da pesquisa na integra:**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIAS AMBIENTAIS (PPGCA)**

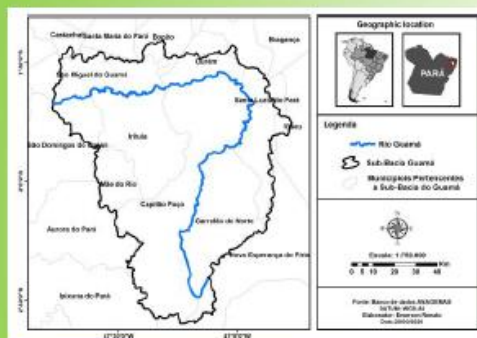
SUB-BACIA DO RIO GUAMÁ: PRINCIPAIS RESULTADOS

Ivan Carlos da
Costa Barbosa

**BELÉM/PA
2020**

SUB-BACIA DO RIO GUAMÁ (SBRG)

Ela está situada na mesorregião do Nordeste Paraense e microrregião do Guamá. Abrange uma área de 49.637 km² e compreende parcial ou integralmente os municípios de: Aurora do Pará, Bonito, Capitão Poço, Garrafão do Norte, Ipixuna do Pará, Irituia, Mãe do Rio, Nova Esperança do Piriá, Ourém, Santa Luzia do Pará, São Domingos do Capim e São Miguel do Guamá.



Área de estudo

A SBRG faz parte do contexto histórico da criação da Estrada de Ferro de Bragança que ligava a capital Belém à cidade de Bragança e sua colonização. Apresenta grande representatividade para a região, devido ao uso da terra, crescimento econômico, expansão das atividades agropecuárias, propriedades físico-bióticas, características socioeconômicas, uso da água, etc. Na Mesorregião do Nordeste paraense destacam-se suas principais atividades relacionadas aos extrativismos mineral e vegetal, a atividade pesqueira, as indústrias alimentícias e madeireiras e a agropecuária.



Extração mineral e atividade de pesca no rio Guamá.

PRINCIPAIS RESULTADOS

1. No período de 1988 a 2019, os dados fornecidos pelas bases de dados de sensoriamento remoto superestimaram os dados observados pela rede de pluviômetros.

2. Os resultados mais precisos foram obtidos para o período menos chuvoso (menor nebulosidade).

3. Apesar da superestimação da precipitação, foi possível obter dados confiáveis e satisfatórios a partir das bases de dados remotos.

4. Destaca-se que a SBRG como majoritariamente plana, com baixas altitudes e suaves ondulações, baixo potencial de inundação em condições normais de precipitação, escoamento superficial razoavelmente baixo (drenagem moderada) e pequena dissecação dos corpos hídricos: desfavorecimento ao uso do corpo hídrico para o abastecimento público e baixa susceptibilidade à erosão.

6. Quanto ao uso e ocupação do solo constatou-se maior quantidade de área (57%) caracterizada como solo exposto e vegetação rasteira, e menor quantidade de área (42%) caracterizada como cobertura vegetal densa ou secundária.

7. Destaca-se a ocorrência de áreas com vulnerabilidade ambiental alta (porção norte representada pelos centros urbanos de cidades como Ourém e São Miguel do Guamá) e muito alta (porção sul) como resultado do uso e ocupação do solo associado a atividades antrópicas (solo exposto e vegetação rasteira) e a ocorrência em solos frágeis de geologia caracterizada por rochas recentes.

8. As variáveis hidroquímicas apresentaram elevada heterogeneidade espacial ao longo 12 pontos distribuídos ao longo do trecho selecionado do rio e a existência de tendências ascendentes e descendentes na direção montante a jusante: a condição não homogênea é resultado das condições naturais do ambiente, das condições de entorno do rio Guamá e das áreas drenadas que incidem sobre o rio principal.

9. Todos parâmetros contemplados pela Resolução CONAMA nº 357/2005 não ultrapassaram aos valores máximos permitidos aos rios de água doce, Classe II.

AGRADECIMENTOS



Os autores agradecem o apoio financeiro da Sudam para o projeto intitulado "Desenvolvimento Local Integrado: a Socioeconomia, Proteção e Reabilitação ambiental da Microbacia do Rio Guamá, Pará, Brasil".