



Universidade De Brasília

Instituto De Geociências

YURI TENENBLAT BRAGA

ESTUDO TEMPORAL DO LEITO DO RIO PARAÓPEBA - MG

Monografia de Conclusão do Curso apresentado
ao Instituto de Geociências da Universidade de
Brasília, como parte das exigências para obtenção
do título de Bacharel em Geofísica

Orientação: Prof. Dr. Marco Ianniruberto

Brasília, DF

Maio, 2022

BRAGA, YT. **Estudo temporal do leito do rio Paraopeba-MG**. Monografia (Curso de Graduação em Geofísica), Instituto de Geociências, UnB, Brasília/DF, 2020,

Resumo

Nas últimas três décadas, houve uma expansão acelerada de usinas hidrelétricas (UHE) pelo Brasil. Além dos problemas econômicos gerados, há exemplos de barramentos de rios que indicam impactos ecológicos de larga escala devido a mudanças nas vazões mínimas e máximas dos rios. As investigações aplicadas neste trabalho, batimetria multifeixe e sísmica de reflexão, fornecem a caracterização do assoalho de tal forma que, zonas deposicionais e erosivas são identificadas. Os dados utilizados neste estudo foram somente a porção à montante da hidrelétrica, visto que as principais variações de sedimentação estão localizadas nesta região. A batimetria, devido a sua precisão foi o primeiro método aplicado para analisar a dinâmica deposicional do leito do rio Paraopeba. Os dados sísmicos foram utilizados para apoiar os dados batimétricos e captar a variação observada. As análises volumétricas permitiram observar quais seções ao longo do trecho montante estudado tiveram maior variabilidade. Este mapeamento possibilita inferir mudanças geomorfológicas locais e possivelmente prever eventuais agravantes dos problemas citados por meio da caracterização das tendências do rio Paraopeba. O principal local que o sedimento se alocou ao longo das seções foi no canal. Uma análise comparativa entre as seções, ilustra o processo de deposição e consolidação do sedimento. Estas evidências são essenciais para proteger a comunidade local de possíveis alagamentos e projetar expansões rurais mais estratégicas

Palavras-chave: Rio Paraopeba, Batimetria Multifeixe, Dinâmica Sedimentar. Geofísica de Alta Resolução.

Braga, Y.R. **Temporal study of the Paraopeba riverbed.** Monography
(Undergraduate Course in Geophysics), Institute of Geosciences, UnB, Brasília/DF,
2020,

Abstract

In the last three decades, there has been an accelerated expansion of hydroelectric plants in Brazil. In addition to the economic problems generated, there are examples of river dams that indicate large-scale ecological impacts due to changes in minimum and maximum river flows. The investigations applied in this work, multibeam bathymetry and seismic reflection, provide the characterization of the river floor in such a way that, depositional and erosive zones are identified. The data used in this study were only the upstream of the hydroelectric plant since the main sedimentation variations are located in this region. Bathymetry, due to its precision, was the first method applied to analyze the depositional dynamics of the Paraopeba riverbed. Seismic data were used to support bathymetric data and capture the observed variation. The volumetric analyses allowed to observe which sections along the studied had greater variability. This mapping makes it possible to infer local geomorphological changes and possibly predict aggravation of the problems mentioned by characterizing the trends in the Paraopeba river. The main site that the sediment allocated along the sections was in the canal. A comparative analysis between the sections illustrates the process of sediment deposition and consolidation. This evidence is essential to protect the local community from possible flooding and design more strategic rural expansions

Keywords: Paraopeba River, Multibeam Bathymetry, Sedimentary Dynamic, High Resolution Geophysics.

Agradecimentos

Agradeço ao corpo docente e técnico da Universidade de Brasília, todos os professores que me orientaram ao longo de projetos de pesquisa, matérias e estágios – Professor Welitom, Professor Marcelo e Professor Elder - que contribuíram para que me tornasse o profissional que sou hoje. Em especial, meu orientador, o Professor Marco que mostrou esta área pela qual me apaixonei e pretendo seguir minha carreira. Agradeço por toda a paciência e confiança depositada em mim pelo Professor Marco que permitiu alcançar meus objetivos profissionais e acadêmicos.

À Phygeo, que me proporcionou uma vivência empresarial incrível, abriu inúmeras portas e exigiu um amadurecimento profissional para que ao chegar no mercado de trabalho, eu estivesse preparado. Obrigado meus companheiros Genesson, Duda, Dani e Rebecca que compraram a missão em orientar uma empresa por puro amor à Geofísica numa época pandêmica tão difícil.

Ao meu grande amigo e inspiração profissional Vitto: aprendi muito contigo, certas coisas que só a experiência profissional proporciona. Obrigado pela confiança, por todas as indicações e por todos os trabalhos que fizemos e ainda iremos fazer juntos no futuro.

Aos meus colegas de curso, que levarei para vida: Heitor, Pellicano, Thiago, Celso e Malu. Aprendi muito com cada um de vocês. Em especial, meus grandes amigos Marcos e Ana Livia que me acompanharam em tantos projetos, me apoiaram tanto pessoalmente como profissionalmente. A ajuda de vocês tanto neste trabalho quanto em vários outros fizeram muita diferença.

À minha mãe e minha avó, Nitza e Ketí, que desde o momento em que entrei na universidade abriram meus olhos para todas as oportunidades ao meu alcance. Certamente tive uma experiência incrível e pude desfrutar da universidade ao máximo devido às suas orientações. Mulheres que me inspiram à dedicação e são exemplos do que quero me tornar como pessoa e profissional.

Por fim, à Rural Tech, empresa responsável pelo levantamento presente neste trabalho. Empresa que me mostrou como realizar serviços de qualidade, e onde pude absorver muito mais conhecimento em dois anos do que em muitas instituições.

IV

Kayque, Paulo França (Paulete), Henrique Cavagnoli (Cego) pioneiros na Geofísica, as experiências de vocês me inspiraram a ser quem sou hoje, obrigado.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. ÁREA DE ESTUDO	3
Relevo	4
Drenagens e dados Fluviométricos	5
Solos.....	7
Contexto Geomorfológico	8
Uso e ocupação do solo	Erro! Indicador não definido.
Climatologia.....	10
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
Sísmica de Reflexão.....	12
Batimetria.....	14
4. METODOLOGIA	18
Planejamento de campo	18
Aquisição dos dados geofísicos	20
Processamento dos dados geofísicos	22
Processamento dos dados CHIRP	22
Processamento dos dados multifeixe.....	23
5. RESULTADOS	25
Batimetria.....	25
Sísmica.....	27
6. ANÁLISE.....	29
Batimetria.....	29
Sísmica.....	31
7. CONCLUSÃO	37
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação da curva ambiental de Kuznets (HOANG PHONG 2019).	1
Figura 2 - Localização da região de estudo	3
Figura 3 - Relevo e gradiente de elevação da bacia hidrográfica do rio Paraopeba.	4
Figura 4 - Medições de vazão (1/s.km ²) e drenagens (ciano). Adaptado de CPRM, 2001.	5
Figura 5 - Perfil do rio Paraopeba com base nas estações fluviométricas, onde o ponto vermelho indica a UHE Retiro Baixo (adaptado de CPRM, 2001).	6
Figura 6 - Vazão do rio Paraopeba em milímetros por ano.	6
Figura 7 - Cota média do rio Paraopeba em cm.	6
Figura 8 - Matéria em suspensão do rio Paraopeba em mg/L.	7
Figura 9 - Mapa dos solos na bacia hidrográfica do rio Paraopeba.	8
Figura 10 - Mapa geomorfológico da bacia hidrográfica do rio Paraopeba.	9
Figura 11 - Uso do solo na bacia hidrográfica do rio Paraopeba (Adaptado de Durães, 2010). Sistema de projeção geográfica UTM, zona 23S. Erro! Indicador não definido.	9
Figura 12 - Tipologias climáticas da bacia hidrográfica do rio Paraopeba segundo a classificação de Köppen (Adaptado de Durães, 2010). Sistema de projeção geográfica UTM, zona 23S.	11
Figura 13 - Reflexão da onda P em meios de diferentes densidades, sendo $\rho_1 < \rho_2$. Adaptado de Lemos, 2020.	13
Figura 14 - Exemplo do equipamento rebocado pelo barco e o perfil sísmico representado na porção inferior, onde o percurso da onda é representado pelas setas pretas (uma seta para cada tempo de percurso).	14
Figura 15-Transdutor (cilindro azul) e a área refletida pelo pulso acústico (vermelho). Adaptado de Lurton (2014)	15
Figura 16 - Representação das frentes de ondas acústicas do multifeixe (Adaptado de LEMOS (2020)).	16
Figura 17 - Movimentos do barco durante o levantamento (Adaptado de Lemos, 2020).	17
Figura 18 - Linhas de interesse ao longo do trecho a montante da hidrelétrica estudada. As seções amarelas são as intermediárias e as vermelhas as principais.	20
Figura 19 - Fluxograma do processamento dos dados CHIRP.	23
Figura 20 - Fluxograma da metodologia multifeixe.	24
Figura 21 - Superfície batimétrica da 8 ^a campanha seção 31 simbolizada por arquivo de aquisição, os pontos em ciano representam um arquivo e os pontos em roxo representam o outro.	25
Figura 22 - Seções batimétricas 30 a 34 da 8 ^o campanha.	26
Figura 23 – Mapa do MDE da 5 ^o campanha (inferior) e da 7 ^o campanha (superior). ...	27
Figura 24 - Trecho da seção 11.5 da campanha 8.	27
Figura 25 - Trecho da seção 33 da 8 ^o campanha com refletor identificado pela elipse vermelha com 25m de profundidade e 10m de penetração.	28
Figura 26 - Seção 33 da campanha 8 com ambiente raso e interferência de múltiplas. .	28
Figura 27 – Mapa da variação do leito do rio Paraopeba de maio/2019 a maio/2021 da seção 07.	29

VII

Figura 28 - Variação do volume médio ao longo das seções para cada campanha em relação a primeira.	30
Figura 29 – Variação do leito do rio Paraopeba da 1ª campanha para a 6ª.	31
Figura 30 - Mapa de navegação das linhas de aquisição do CHIRP para a seção 6 das campanhas 6 a 8.	32
Figura 31 - Interpretação da seção 6 para as 3 campanhas estudadas.	33
Figura 32 – Seção 6 das campanhas 6 e 8 em transparente com interpretação em pontilhado sobrepondo a seção interpretada da campanha 7.	33
Figura 33 - Mapa de navegação das linhas de aquisição do CHIRP para a seção 5.5 das campanhas 6 a 8.	34
Figura 34 - Interpretação da seção 5.5 para as 3 campanhas estudadas.	35
Figura 35 – Seção 6 das campanhas 6 e 8 em transparente com interpretação em pontilhado sobrepondo a seção interpretada da campanha 7.	35
Figura 36 - Perfil da seção 3.5 montante, na porção superior observa-se a mudança batimétrica e nas três imagens abaixo observa-se a evolução (da esquerda para direita, campanhas 6, 7 e 8, respectivamente) do sedimento com os perfis sísmicos.	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Data de aquisição das campanhas, seções intermediárias e relação entre dados disponíveis.....	19
Tabela 2 — Sensores utilizados.....	21

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
BRIC	Brasil Russia India e China
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
WWF	<i>World Wide Fund for Nature</i>
SM	Seção Montante
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
MDT	Modelo Digital de Terreno
MDE	Modelo Digital de Elevação
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CIBAPAR	Consórcio Intermunicipal da Bacia do Rio Paraopeba
MBES	<i>Multibeam Echosounder</i>
WGS 84	<i>World Geodetic System</i>
UTM	Universal Transversa de Mercator
EUA	Estados Unidos da América
PIB	Produto Interno Bruto
UHE	Usina Hidrelétrica

1. INTRODUÇÃO

A busca por energia renovável está cada vez mais acelerada e tornou-se uma necessidade para o desenvolvimento sustentável de todas as nações. Países mais desenvolvidos se encontram na vanguarda de novas tecnologias de energia renovável, mas não necessariamente utilizam-na como principal fonte energética (IRENA 2021).

Para entender melhor esta relação entre desenvolvimento e utilização de fontes de energias renováveis, pode-se analisar a curva ambiental de Kuznets (Figura 1). Esta curva defende a hipótese que conforme o país atinge um maior PIB per capita, sua poluição produzida atinge um máximo e posteriormente decai.

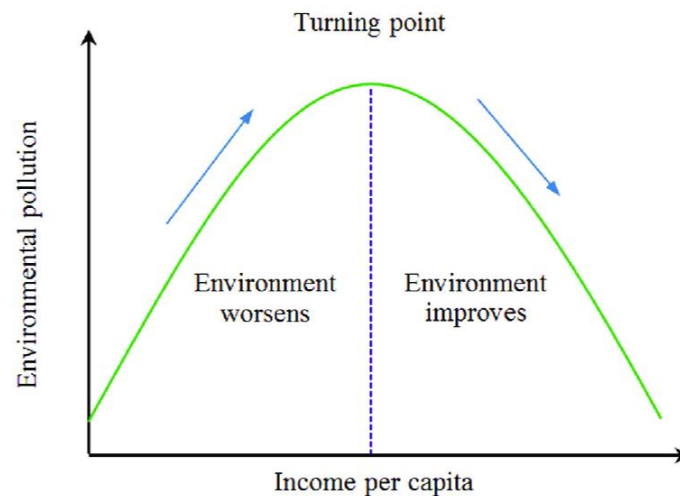


Figura 1 - Representação da curva ambiental de Kuznets (HOANG PHONG 2019).

Segundo o estudo de Munir Ahmad (2021), a teoria da curva ambiental de Kuznets não se aplica para todos os países, em especial, países N-11, os quais possuem uma curva inversa, ou seja, quanto maior o PIB, maior sua emissão de CO₂. Enquanto a maioria dos países BRIC, apresentam uma tendência à curva de Kuznets.

O Brasil por sua vez teve um aumento médio na concentração de poluentes no ar em suas regiões metropolitanas desde o ano de 1995 até 2016 (IBGE). O INPE e a WWF também mostram que com a política do governo de 2018 a 2022, o desmatamento aumentou comparado aos anos 2000-2018 em diversos biomas do país, especialmente o Amazônia.

A alta velocidade do desenvolvimento das fontes energéticas resulta num conhecimento superficial sobre o assunto. A ausência do domínio das consequências destas novas tecnologias, evidencia uma falha na classificação de fontes energéticas como sustentáveis, renováveis e limpas (Rybár et al., 2015). O aprimoramento das fontes energéticas pode ajudar a diminuir o desmatamento.

Apesar das dificuldades em implementar uma fonte energética, uma das principais com pouco impacto ambiental no país é a usina hidrelétrica. O alto investimento em hidrelétricas traz esperanças de que o Brasil atinja o decaimento da curva ambiental de Kuznets, mas para isso a implantação delas necessita de planejamentos cautelosos.

A construção de hidrelétricas começou no século XIX e ao longo deste tempo estudos realizados possibilitaram observar algumas mudanças geradas pelas UHE. Há exemplos de barramentos de rios no EUA que indicam impactos ecológicos de larga escala devido a mudanças nas vazões mínimas e máximas dos rios (Magilligan, 2005).

Segundo os estudos de Wootton (1996), devido a fragilidade de peixes bentônicos e macro invertebrados, estes animais tornam-se bons indicadores de degradação ambiental. Consequentemente, por serem base da cadeia alimentar, outros animais são prejudicados também (Magilligan, 2005).

Já no Brasil, o rio São Francisco apresenta um sistema fluvial que sofreu impactos diversos devido a barramentos. A presença das barragens de Sobradinho, Itaparica e Xingó, resultou no intenso processo de erosão da margem sudoeste da foz. Pois além da corrente fluvial transportar menos sedimento, sua vazão caiu e rompeu o equilíbrio hidrodinâmico do local (Formoso, 2008).

Quando somada as participações dos barramentos até a data de 1993 no rio São Francisco, observou-se uma baixa na carga sedimentar e de nutrientes presentes no rio. Evento que influencia, entre outras coisas, na linha de costa à norte da foz, Formoso (2008).

As investigações aplicadas neste trabalho, batimetria multifeixe e sísmica de reflexão, fornecem a caracterização do assoalho de tal forma que, zonas deposicionais e erosivas são identificadas. Por meio de uma comparação temporal do leito fluvial, estas zonas foram delimitadas durante os dois anos de estudos realizados.

Este mapeamento possibilita inferir mudanças geomorfológicas locais e possivelmente prever eventuais agravantes dos problemas citados por meio da caracterização das tendências do rio Paraopeba. Entender melhor os processos atuantes do rio, possibilitará inferir com mais propriedade as adversidades geradas pela UHE.

2. ÁREA DE ESTUDO

A hidrelétrica de Retiro Baixo se encontra no rio Paraopeba entre os municípios de Felixlândia, Pompéu e Curvelo em Minas Gerais, Brasil (Figura 2). O rio Paraopeba por sua vez possui uma bacia hidrográfica de comprimento longitudinal de aproximadamente 275km, abrangendo grandes cidades como Betim e Ibirité.

Mapa de Localização

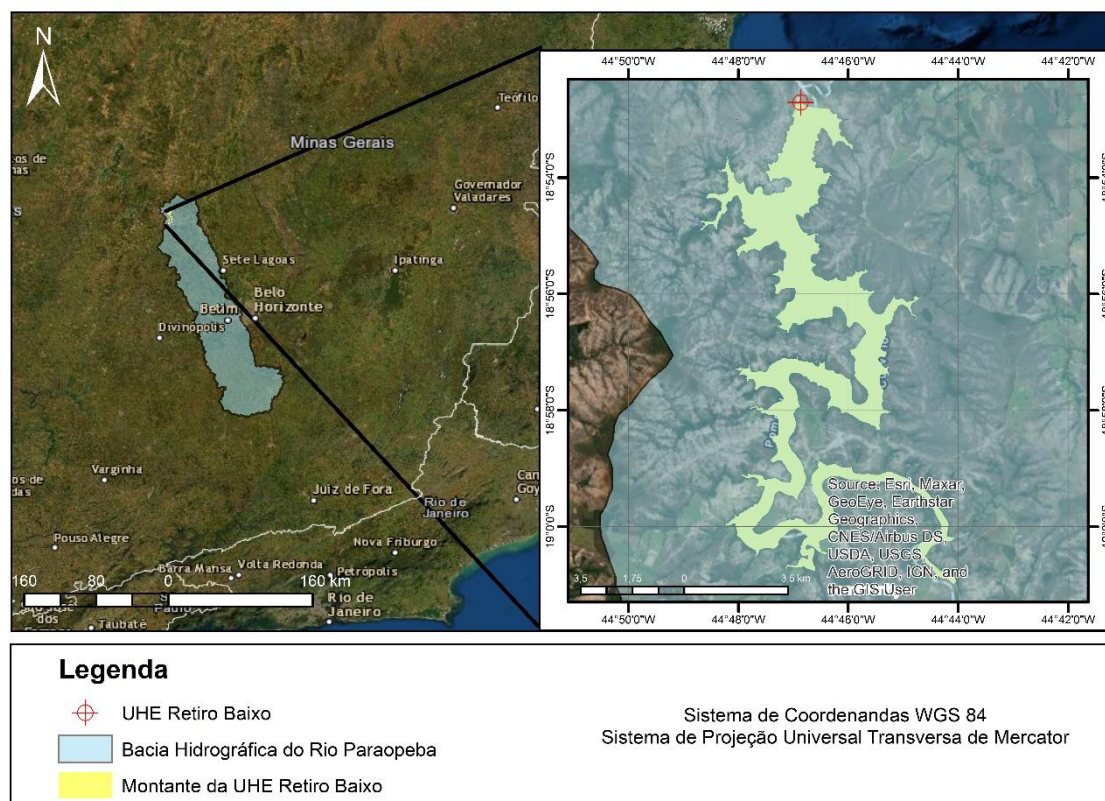


Figura 2 - Localização da região de estudo

Além das grandes cidades, há um polo minerário muito forte contido na bacia, explorado principalmente pela empresa Vale S.A. O principal minério explorado no local é o ferro, mas há extração de ouro, cobre, bauxita, manganês e ferronióbio também (RMMG – Recursos Minerais de Minas Gerais).

Portanto, evidencia-se a complexidade do sistema composto por atividades antrópicas intensas. Tais atividades não serão abordadas neste estudo devido à falta de acesso as informações. Mas é importante ter em mente que, estas atividades terão suas respectivas consequências na bacia hidrográfica estudada.

Relevo

Os dados obtidos para o MDT da área estudada (Figura 3) foram extraídos do portal EOSDIS *Earthdata* com precisão de 30m da SRTM. A partir destes dados, obteve-se o mapa do gradiente de elevação do terreno.

Mapa do Relevo (esquerda) e Declinação(direita)

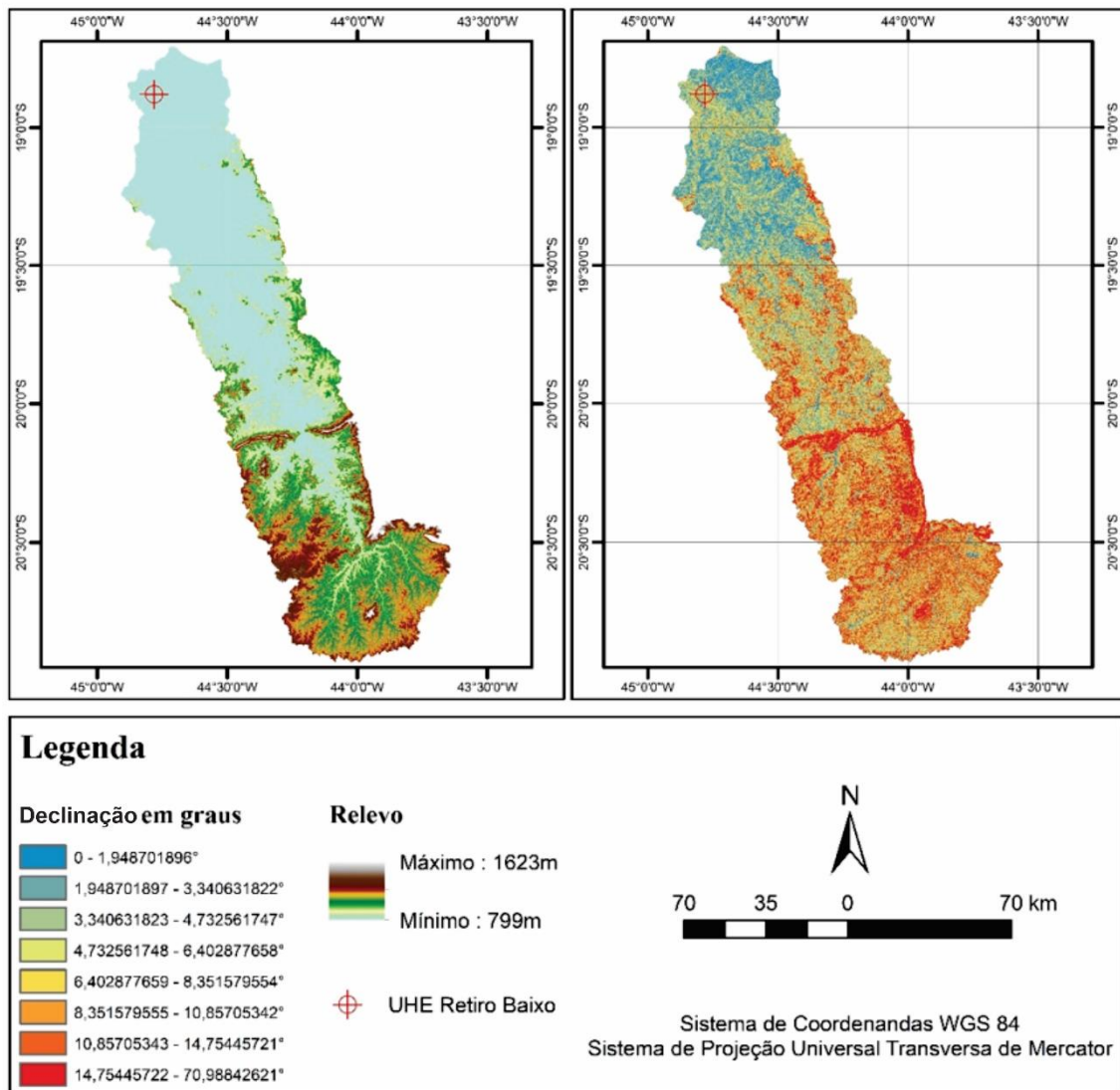


Figura 3 - Relevo e gradiente de elevação da bacia hidrográfica do rio Paraopeba.

Observa-se que a porção norte da bacia é predominantemente plana (com declinações de 0°-3°) e caracterizada pela elevação mais baixa da área. Já na seção central até a estrutura íngreme na direção de leste a oeste, a declinação possui em sua maioria gradientes de 3° a 8°. Ao Sul, temos a porção mais íngreme da área de estudo com gradientes de elevação 8° até 70°.

Drenagens e dados Fluviométricos

As principais drenagens acompanham o relevo e pode-se classificá-las como dendríticas. O rio por sua vez possui canal classificado como meandrante segundo o critério de Christoletti, 1980. Observa-se que a vazão do rio decresce sentido à norte da bacia (Figura 4).

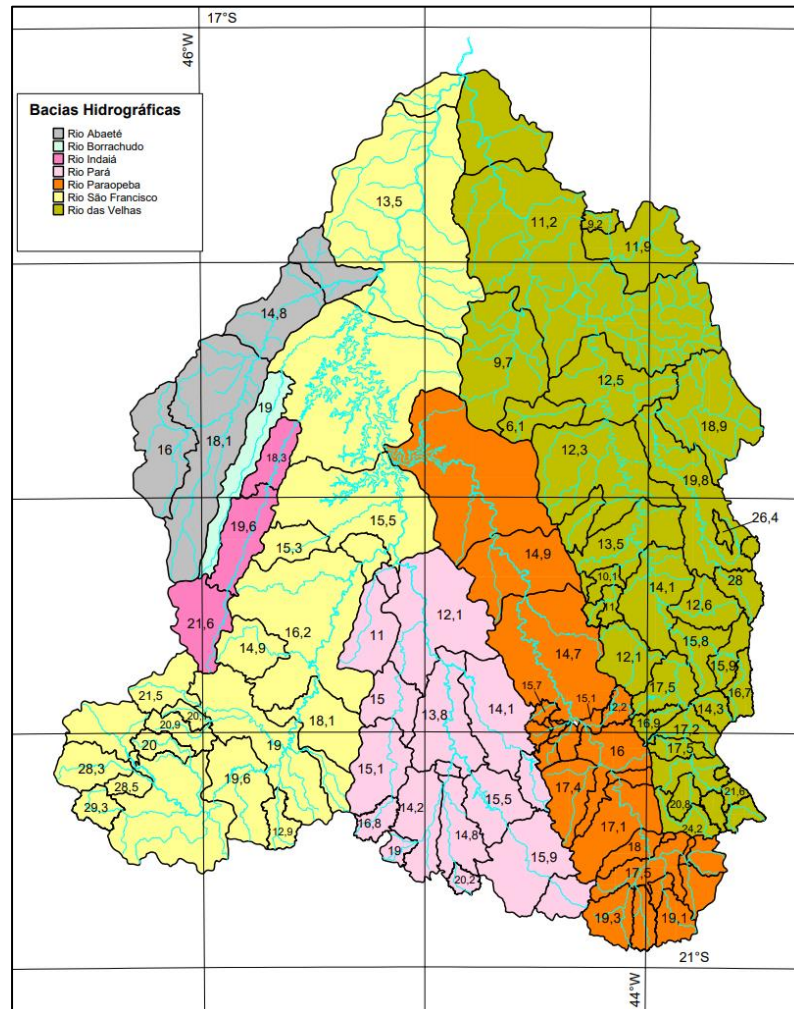


Figura 4 - Medições de vazão (1/s.km²) e drenagens (ciano). Adaptado de CPRM, 2001.

Com base na cota das estações pluviométricas instaladas pela ANEEL, a CPRM plotou um perfil longitudinal do rio Paraopeba (Figura 5). O desnível nos primeiro 100m de rio, citado no item anterior e a vazão são visivelmente evidenciados.

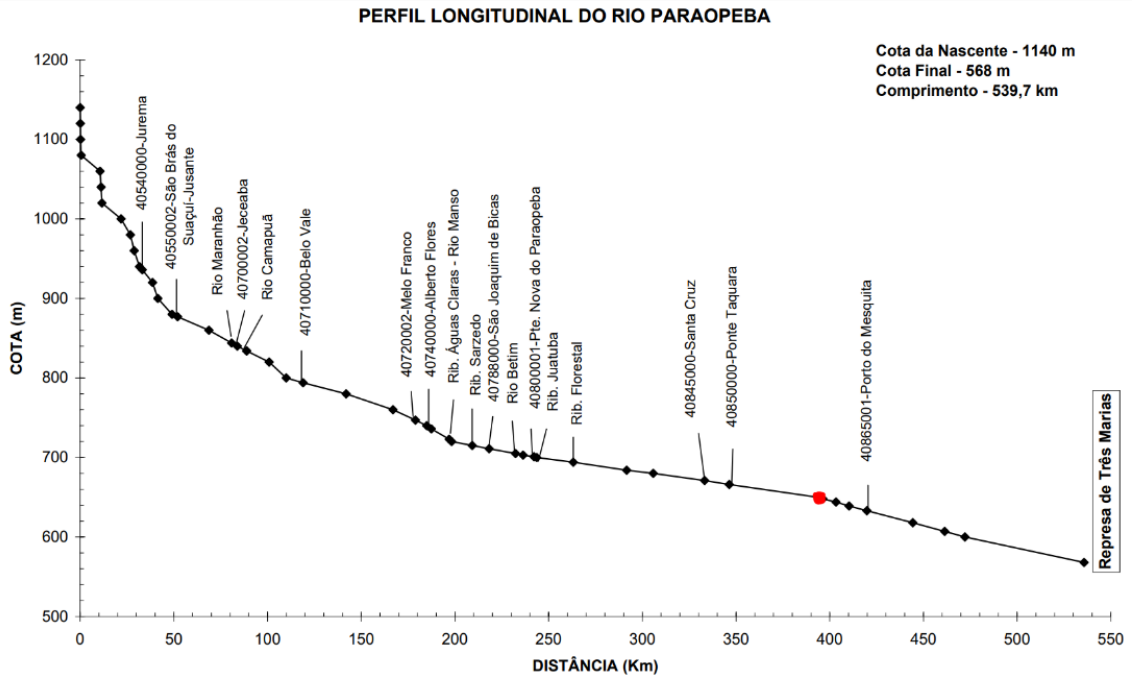


Figura 5 - Perfil do rio Parapeba com base nas estações fluviométricas, onde o ponto vermelho indica a UHE Retiro Baixo (adaptado de CPRM, 2001).

Os dados fluviométricos obtidos pela ANA da estação da Ponte Taquara fornecem uma visão mais ampla da realidade do rio (Figura 6-8).

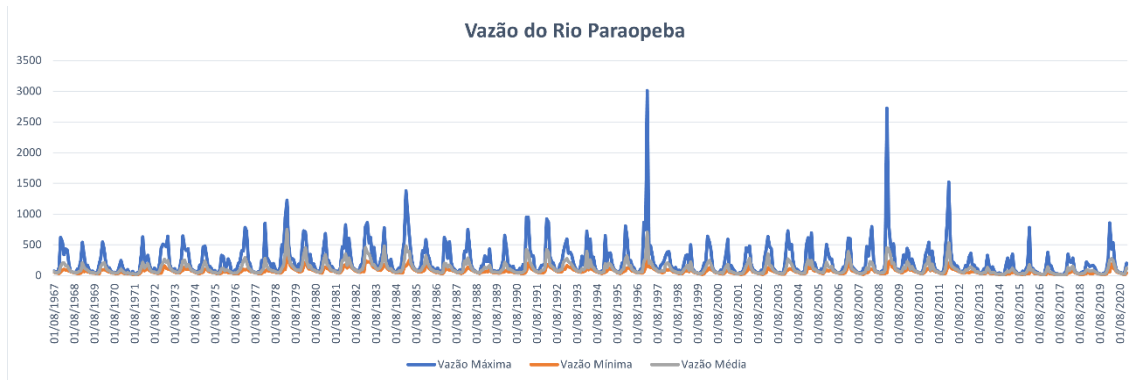


Figura 6 – Vazão do rio Parapeba em m³/s.

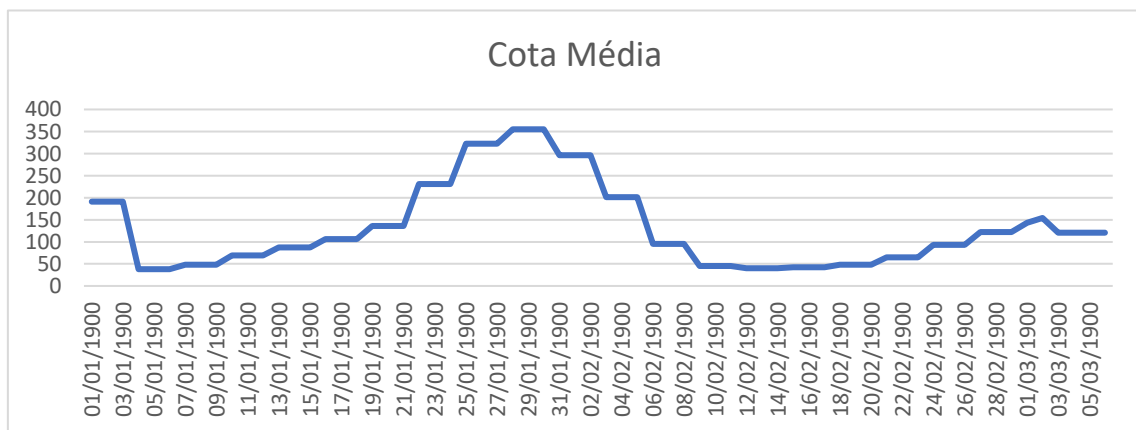


Figura 7 – Cota média do rio Parapeba em cm.



Figura 8 – Matéria em suspensão do rio Paraopeba em mg/L.

Solos

Os dados dos solos foram obtidos do *geoserver* da Embrapa mapeados numa escala de 1:150.000. A partir destes, separou-se somente os tipos de solo caracterizados dentro da bacia hidrográfica estudada (Figura 9).

Os principais solos da região são os Cambissolos e os Latossolos com 37% e 36% de cobertura da região, respectivamente. O Cambissolo por sua vez, segundo a descrição da Embrapa, é definido como “Solos constituídos por material mineral com horizonte B incipiente subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial (exceto hístico com 40 cm ou mais de espessura) ou horizonte A chernozêmico, quando o B incipiente apresentar argila de atividade alta e saturação por bases alta.”.

O Latossolo observado também é constituído por material mineral, mas seu horizonte B latossolítico precede qualquer horizonte A. Sua espessura é maior que 150cm.

O Argilossolo, ocupando 25% da bacia, também é constituído por material mineral, mas de horizonte B com atividade argilosa conjugada com saturação por bases baixas ou com caráter alumínico. Ainda seguindo as definições da Embrapa, caso haja horizonte plíntico, o Argilossolo não satisfaz aos critérios para Plintossolos assim como no caso de horizonte glei, caso presente, não satisfará aos critérios para Gleissolos.

Por fim, temos uma pequena porção de Neossolos, ocupando 2% da bacia. Assim como o próprio nome indica, são solos recentes e pouco evoluídos, constituídos por material mineral ou orgânico com menos de 20cm de espessura.

Mapa do Solo

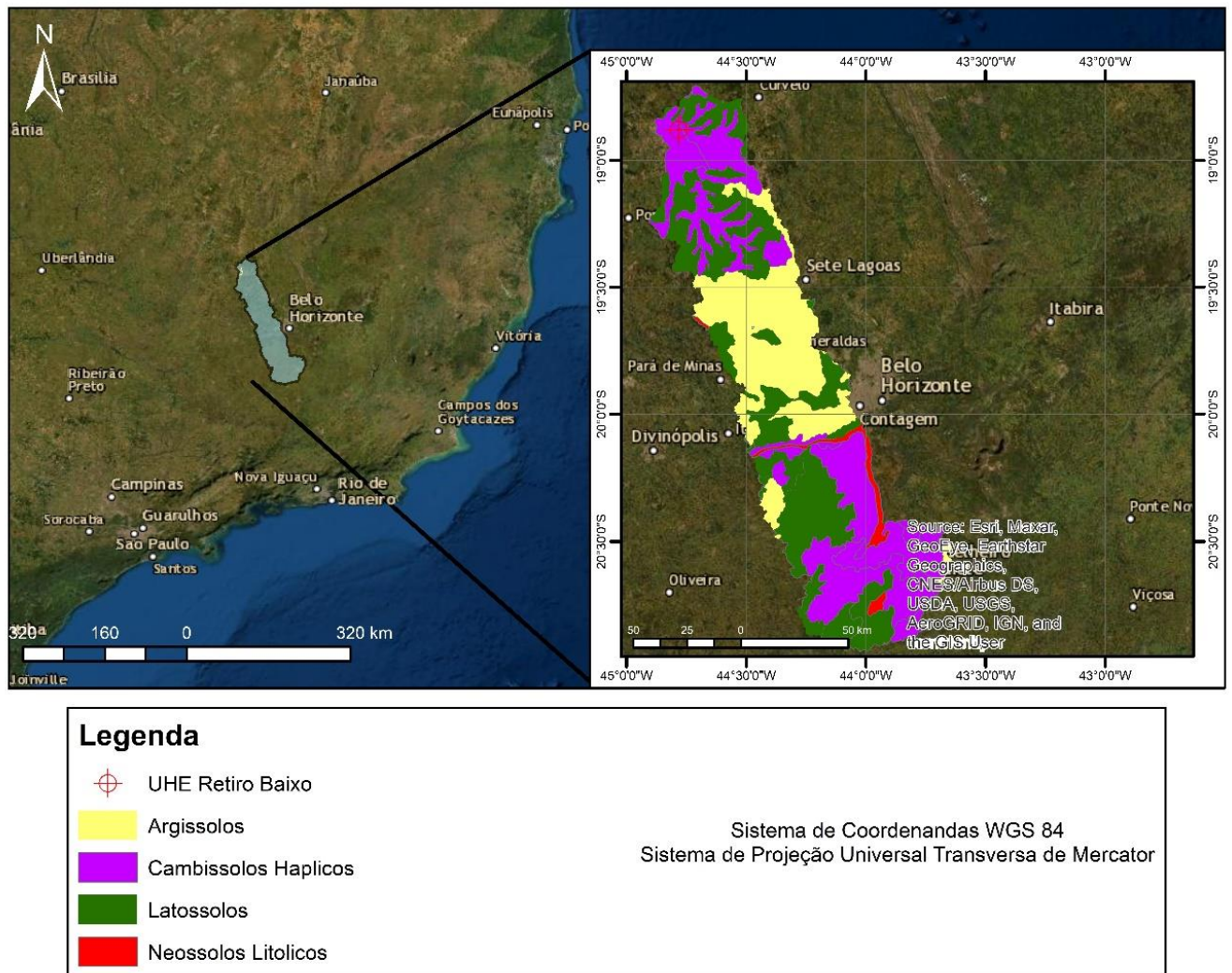


Figura 9 - Mapa dos solos na bacia hidrográfica do rio Paraopeba.

Contexto Geomorfológico

Segundo a tese de mestrado de Durães (2010) que se baseou no trabalho da CPRM (2001) e da CIBAPAR (2010), a bacia hidrográfica do rio Paraopeba se encontra no Grupo geológico Três Marias. Dentre este grupo, encontra-se as Formações Paraopeba e Três Marias presentes na bacia. O mapa a seguir (Figura 10) representa os dados geomorfológicos coletados pela IBGE numa escala de 1:250000.

Mapa da Geomorfologia

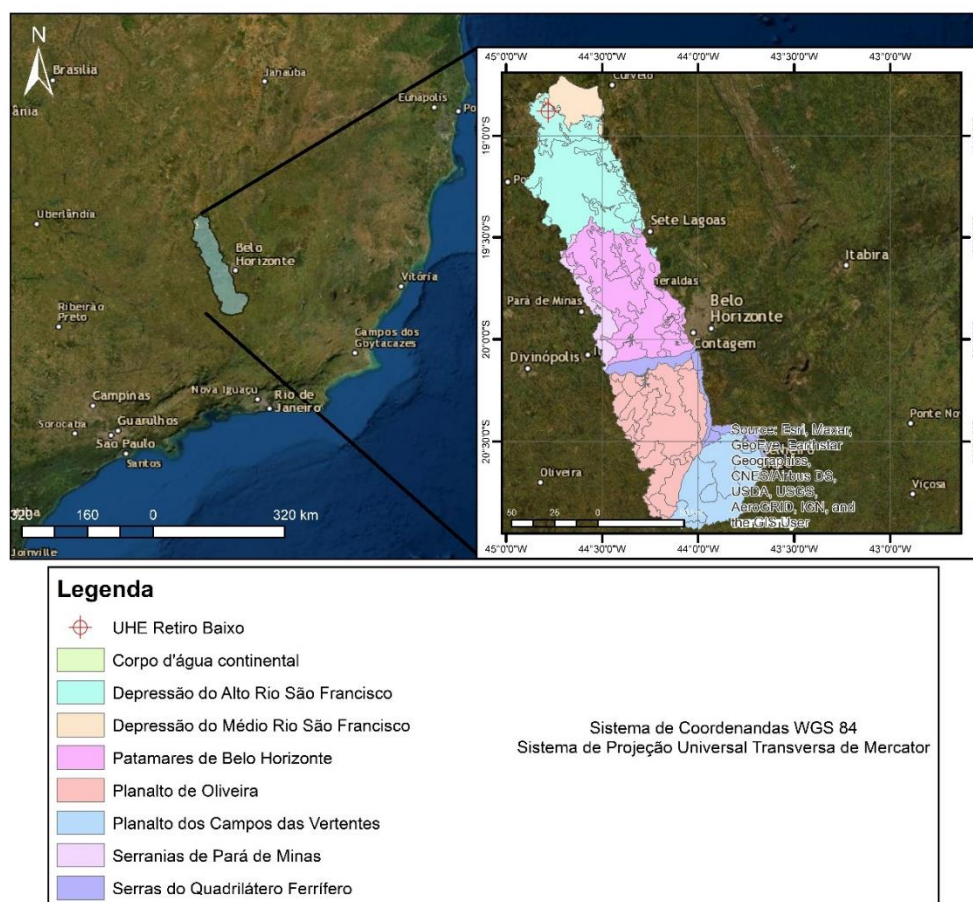


Figura 10 - Mapa geomorfológico da bacia hidrográfica do rio Paraopeba.

A porção norte da bacia é caracterizada pela Depressão São Franciscana e compreende a mais extensa parte da bacia hidrográfica. Sua altitude varia entre 650 e 850m dominada pelo bioma cerrado. Coberta por formações superficiais do Quaternário, sobre as formações Paraopeba e Três Marias (Durães, 2010).

Observa-se a predominância de Latossolos nos trechos de topografia plana ou suavemente ondulada da Depressão São Franciscana. Regiões mais propícias a erosão na formação geomorfológica, encontra-se colinas com Cambissolos (Durães, 2010).

A estrutura cortante no centro da bacia denominada “Serras do Quadrilátero Ferrífero” é caracterizada por cristas estruturais, escarpas e relevo íngreme em rochas do Supergrupo Minas. Dentre estas rochas, encontra-se itabiritos, dolomitos ferruginosos e quartzitos (Durães, 2010). Há também formações estruturais de dobra sinclinal suspensa e anticlinal esvaziada segundo a CPRM (2001).

Os Planaltos do São Francisco (Planalto de Oliveira e Planalto dos Campos de Vertentes) segundo Durães (2010) pode ser descrito como “...patamares dissecados e pequenos topos residuais pertencentes a uma superfície de aplainamento mais antiga [...]. Os patamares são formas escalonadas, em sua maior parte dissecadas, com bordas marcadas por vertentes íngremes. Os residuais da superfície de aplainamento encontrados sobre esses planaltos apresentam coberturas detríticas indiferenciadas do

Terciário/Quaternário e predomínio de Latossolos. Os patamares são elaborados em rochas do Grupo Bambuí: quando ocorrem sobre siltitos e ardósias da Formação Paraopeba, apresentam solos do tipo Cambissolos e ocorrência de solos do tipo Neossolo Litólico; quando encontrados em siltitos e argilitos da Formação Três Marias, os solos são predominantemente do tipo Neossolo Litólico”.

Climatologia

No geral, a região estudada apresenta inverno seco com a média das temperaturas mínimas do mês mais frio variando de 8° a 10°C. O mês mais quente do ano é janeiro, e apresenta a época mais chuvosa com média das temperaturas máximas variando de 28° a 30°C (CPRM, 2001).

Devido a sua característica chuvosa no verão, entre os meses de dezembro a fevereiro a bacia apresenta 55 a 60% da precipitação no ano. Em contrapartida, o trimestre mais seco durante o inverno contribui somente com 5% da precipitação anual. A precipitação anual varia de 1700mm nas cabeceiras da bacia e 1150mm na região da barragem de Três Marias (CPRM, 2001).

Utilizando a classificação de Wladimir Köppen, a bacia hidrográfica contém três tipologias climáticas, clima temperado brando com verão quente (Cwa), clima temperado brando com verão ameno (Cwb) e clima tropical (Aw) (Figura 11). Conforme a definição da CPRM (2001), segue a descrição das tipologias abaixo.

Aw – clima tropical chuvoso, quente e úmido, com inverno seco e verão chuvoso. A temperatura média do mês mais frio é sempre superior a 18° C.

Cwa – clima temperado brando com verão quente (temperatura média do mês mais quente superior a 22°C) e inverno brando (temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C); a estação seca corresponde ao inverno.

Cwb – clima temperado brando com verão ameno (temperatura média do mês mais quente inferior a 22°C) e inverno brando (temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C); a estação seca é coincidente com o inverno.

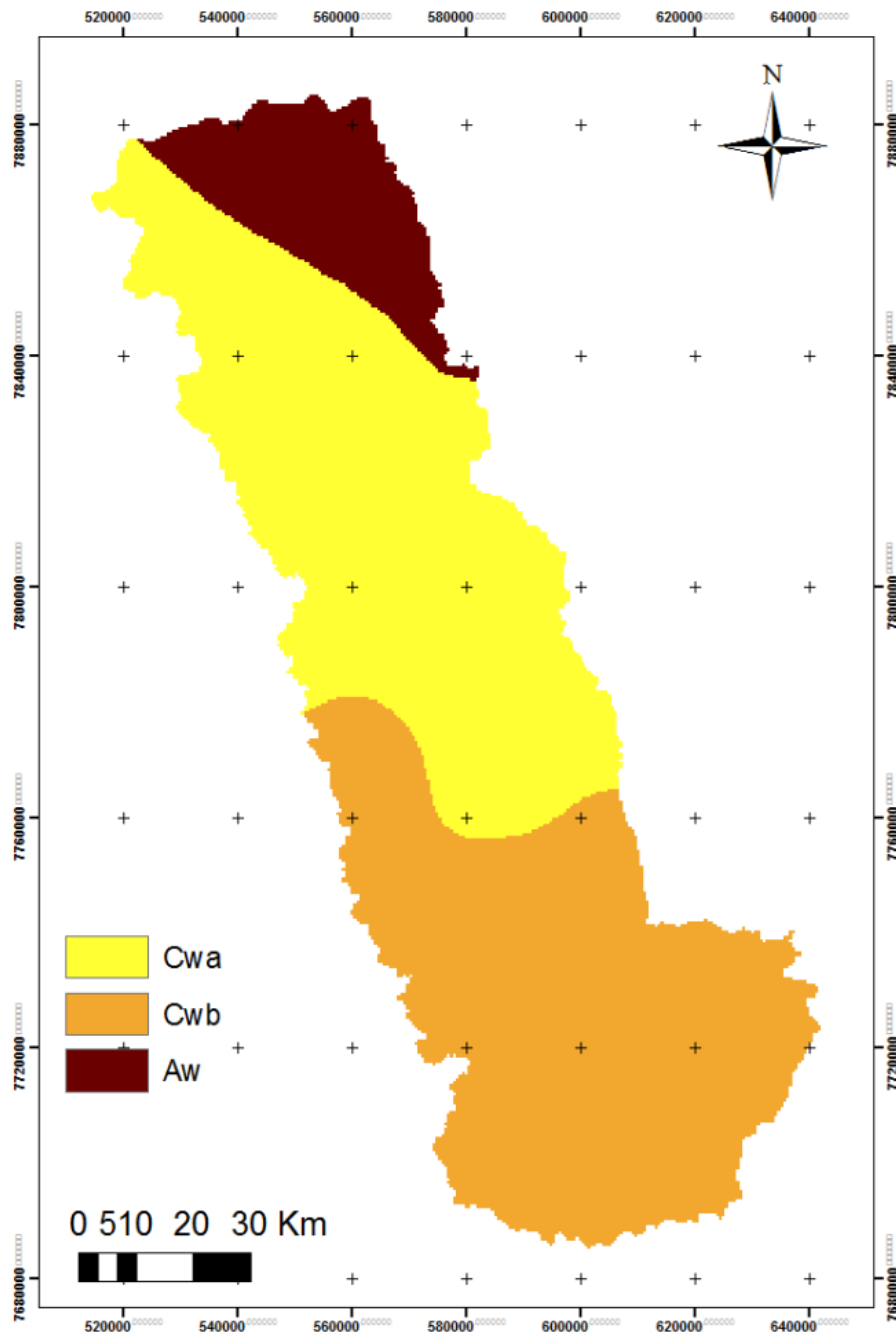


Figura 11 - Tipologias climáticas da bacia hidrográfica do rio Paraopeba segundo a classificação de Köppen (Adaptado de Durães, 2010). Sistema de projeção geográfica UTM, zona 23S.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A elasticidade é uma propriedade intrínseca dos materiais utilizada nos métodos geofísicos acústicos. O conceito da elasticidade se baseia na tendência de um corpo, quando submetido a uma força externa, voltar ao seu tamanho e forma original. As forças internas do corpo observado resistem as mudanças resultantes de uma força externa aplicada.

Esta tendência pode ser vista em corpos rígidos (e.g, rochas), os terremotos exemplificam este fenômeno. A movimentação do chão e posteriormente o retorno para sua posição inicial mostra que a forma do corpo da subsuperfície voltou aproximadamente a sua forma original. É importante ressaltar que somente corpos elásticos perfeitos voltam a sua forma original, mas para muitas estruturas, incluindo rochas sua deformação é ínfima a ponto de ser desprezível (Telford et al., 1990).

Dentre os tipos de forças externas aplicadas, classifica-se em tensão normal ou tensão de cisalhamento. A tensão normal representa a componente da força aplicada normal a superfície. A tensão de cisalhamento, também conhecida como tensão tangencial, representa a componente da força tangente à superfície.

A tensão normal, transmite sua energia por meio de compressão. Os fluidos, possuem resistência a tamanho portando após compressão, tendem a voltar ao seu tamanho original transmitindo a energia pelo meio. A tensão de cisalhamento nos fluidos não se aplica, pois a força tangencial a superfície não possui resistência, sendo assim impossível ser transmitida pelo meio.

Sísmica de Reflexão

O método necessita de uma fonte nas quais as ondas trafegam pelo meio, refletem e retornam a um receptor (Figura 12). Quando se trata de uma fonte ativa, a sísmica aquática trabalha com transdutores que transformam pulsos elétricos em pulsos acústicos.

Os principais atributos da onda são a intensidade da onda, sua frequência e velocidade no meio (V). A densidade do meio (ρ) por sua vez é determinante para forma em que a onda acústica se propaga. E o produto da velocidade e a densidade do meio representa a impedância acústica (Z), parâmetro importante utilizado no método.

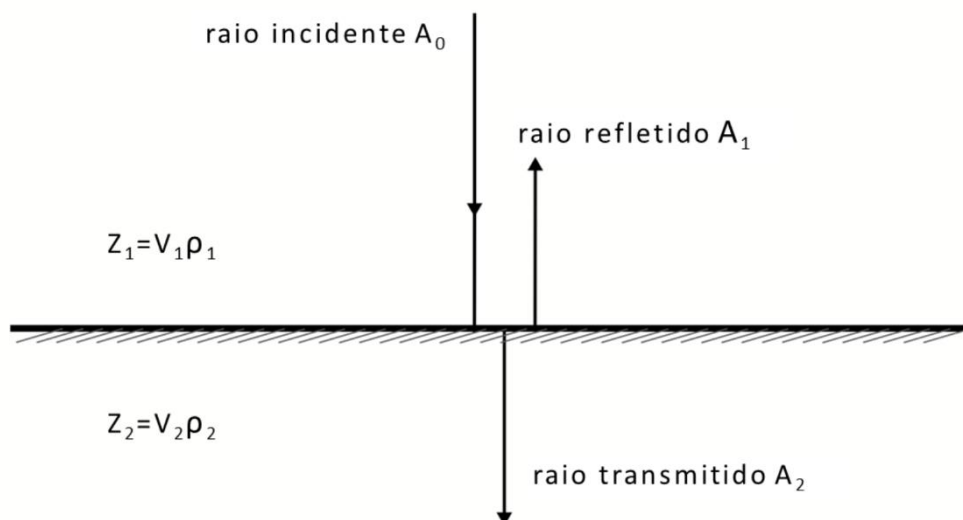


Figura 12 - Reflexão da onda P em meios de diferentes densidades, sendo $\rho_1 < \rho_2$. Adaptado de Lemos, 2020.

Segundo a Lei de Snell, o ângulo de incidência está diretamente relacionado com a porção refletida e refratada da energia da onda incidente. A partir do coeficiente de reflexão (RC) observa-se que, quanto maior o contraste entre as impedâncias acústicas, maior será a reflectância.

$$RC = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)}$$

Onde Z_1 é o coeficiente de impedância da camada menos densa e Z_2 é o coeficiente da camada mais densa.

A distância entre o equipamento e os refletores é obtida por meio do tempo levado para o sinal trafegar da fonte até a camada refletora e chegar ao receptor. A velocidade dos meios pelos quais a onda passa é medida de forma empírica para que o tempo do percurso duplo (ida e volta do sinal) seja obtido (Figura 13). Ou seja, pega-se uma distância conhecida e mede-se o tempo que a onda leva para se propagar para definir a velocidade do meio da aquisição. Essa forma de deduzir a distância entre a subsuperfície e a superfície é chamada de “two way travel time” (TWTT), (Reynolds, 1997).

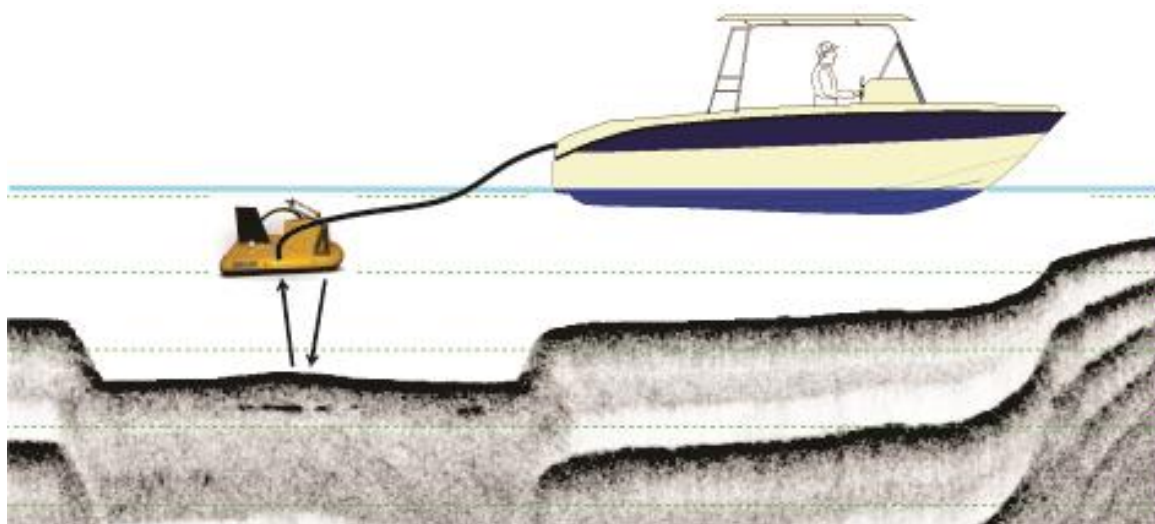


Figura 13 - Exemplo do equipamento rebocado pelo barco e o perfil sísmico representado na porção inferior, onde o percurso da onda é representado pelas setas pretas (uma seta para cada tempo de percurso).

A partir da amplitude do sinal captada pelo receptor, cria-se um perfil sísmico (Figura 13). Ao processar e interpretar os dados, obtêm-se informações como discontinuidades geológicas (i.e. falhas e camadas), características litológicas e geomorfológicas (Courivaud et al., 2005).

Dentre os tipos de equipamentos de sismica de reflexão rasa no mercado (i.e. Boomer, Sparker, CHIRP), o utilizado para este trabalho foi o CHIRP. Este equipamento monocanal utiliza frequências de 2 kHz a 15kHz e apresenta dados com maior resolução que os equipamentos citados, mas infelizmente possui menor penetrabilidade.

Estudos feitos no rio Tocantins com sismica rasa mostram que é possível seccionar os principais ambientes de um rio (Ianniruberto et al., 2012). Além disso, há pesquisas que avaliam a metodologia utilizada para estimar a espessura da camada de sedimento. Estas pesquisas concluem que o método fornece dados de qualidade suficiente para caracterizar espessuras de camadas sedimentares numa resolução de dezenas de centímetros. Mas, por ser um método indireto seus resultados são ambíguos e deve acompanhar uma investigação direta para determinar a velocidade das camadas penetradas (Courivaud et al., 2007).

Batimetria

A batimetria, do grego “bathus” e “metron” que significa profundo e medida respectivamente, tem como objetivo mapear a profundidade de corpos hídricos. O método possui uma forma direta e indireta, sendo a direta mais antiga (GAGG, 2016).

A batimetria direta consiste na utilização de varas métricas para medir a profundidade do local. Ao lançar a vara perpendicular ao nível da água na embarcação mede-se a profundidade no ponto. Infelizmente, a batimetria direta possui baixa produtividade, complicações na navegação e obtenção descontínua de dados (GAGG, 2016).

A batimetria indireta por sua vez utiliza os conceitos apresentados no item 3.1, porém como não há necessidade de penetração na subsuperfície as frequências utilizadas para batimetria são mais altas que as da sísmica de reflexão. Esta realidade traz maior resolução para os dados obtidos e, devido ao contraste entre a impedância acústica da água e a do material depositado no leito do corpo hídrico, o coeficiente de reflexão será alto.

Há duas tipologias de batimetria indireta, a monofeixe e multifeixe. A monofeixe apresenta somente um pulso acústico vertical à lâmina d'água (Figura 14). Sua resolução (a área refletida pelo pulso no leito) dependerá do comprimento do pulso (τ), da velocidade do som na água c e da distância entre transdutor de fundo hídrico (D) (Lurton, X.; Lamarche, G., 2015).

$$A = \pi D c \tau^2$$

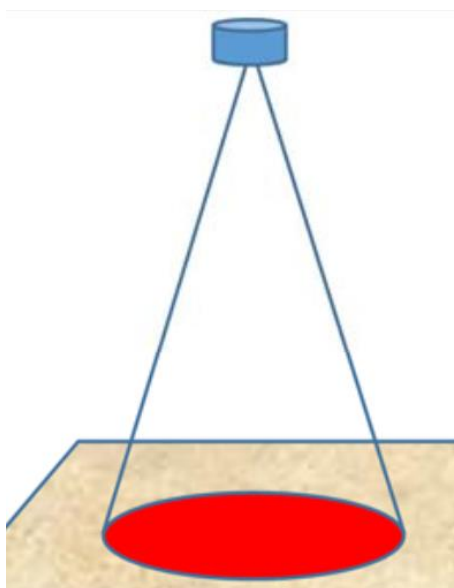


Figura 14- Transdutor (cilindro azul) e a área refletida pelo pulso acústico (vermelho). Adaptado de Lurton (2014)

A metodologia multifeixe consiste numa série de feixes orientados entre si para uma cobertura do assoalho (*swath*) perpendicular ao sentido da embarcação (Figura 16). Assim como o CHIRP, possui um transdutor emissor e um transdutor receptor de pulsos acústicos. Devido a capacidade alta de 512 feixes por transdutor, compensar os movimentos da embarcação, posicionamento dos equipamentos na embarcação e georreferenciamento exigem qualidade e precisão.

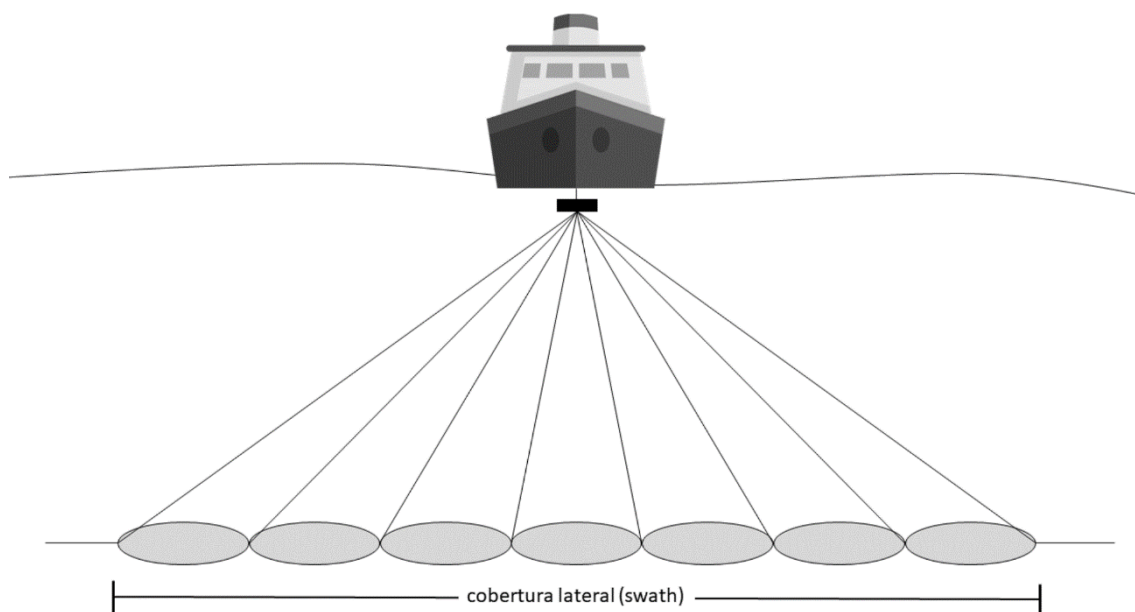


Figura 15 - Representação das frentes de ondas acústicas do multifeixe (Adaptado de LEMOS (2020)).

O sistema multifeixe exigirá um sistema global de navegação por satélite (GNSS) com sinal diferencial. Este sistema, além de oferecer um erro instrumental de 50cm, precisa fornecer o sentido da embarcação para o sistema pois é a partir desta informação chamada de “*Course made good*” (CMG) que ajudará a cobertura de feixes a ser orientada.

O posicionamento dos equipamentos na embarcação é fundamental para entender a relação entre eles. Para compensar os movimentos da embarcação, é necessária uma unidade de medição inercial (IMU), porém se a IMU está deslocada do transdutor os movimentos que ela compensará não serão exatamente iguais aos que os feixes computarão. Portanto todas as distâncias entre antenas do GNSS, transdutor e IMU devem ser medidas e inseridas no *software* de aquisição. A medida entre o ponto de referência na embarcação e o equipamento é denominada de *offset*.

Devido as características do método TWTT e a sua necessidade do conhecimento da velocidade do meio pelo qual a onda acústica trafegará, há um equipamento de medição da velocidade do som na água coletando constantemente esta informação. Além disto, devido a variação da temperatura na água conforme sua profundidade e sua influência sobre a velocidade do som na água, utiliza-se o perfilador de velocidade do som na água. Tal equipamento mede a velocidade do som na água em diferentes profundidades para equalizar as medições feitas pelo multifeixe.

Existem três principais movimentos da embarcação *roll*, *pitch* e *heave* (Figura 16). O *roll* indica o movimento em graus que a embarcação faz ao girar em seu próprio eixo de sentido popa-proa. O *pitch* indica o movimento em graus que a embarcação faz ao girar no eixo perpendicular ao eixo do *roll*. Por fim, o *heave* compensa os movimentos verticais da embarcação em metros, muito presente no mar devido as ondas.

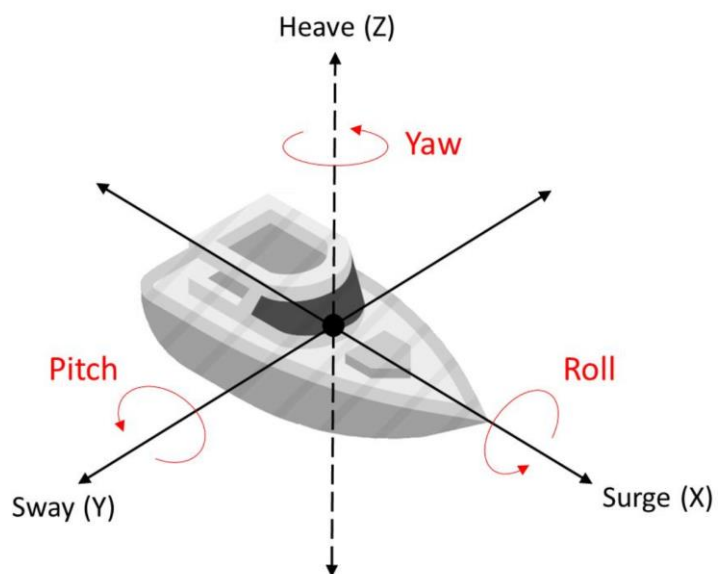


Figura 16 - Movimentos do barco durante o levantamento (Adaptado de Lemos, 2020).

4. METODOLOGIA

Um projeto Geofísico possui duas principais etapas, aquisição dos dados e processamento deles. A aquisição precisa de um planejamento das linhas de sondagem com base em estudos prévios na região, muitas vezes obtido por meio da caracterização da área de estudo. A partir de informações regionais e locais, foca-se nas áreas onde espera-se resultados com boas respostas para ondas acústicas e o máximo de conhecimento possível para interpretação dos produtos gerados pelo processamento.

Planejamento de campo

O planejamento de campo baseou-se na forma mais eficaz de imagear a região, conforme as metodologias pregadas dentro dos limites financeiros da operação. Portanto, tendo em vista a extensão do trecho estudado, obteve-se duas varreduras multifeixe e dois perfis sísmicos, a cada 1km ao longo do rio, 34km antes da hidrelétrica e 34km depois da hidrelétrica, todas perpendiculares ao sentido do rio.

O motivo pelo qual o foco da operação esteve, principalmente, nessas seções transversais se justifica pela natureza do dado sísmico ser gerado em perfil. Com o objetivo de melhor entender o canal do rio Paraopeba e seus processos sedimentares, a seção sísmica foi adquirida perpendicular ao canal. O multifeixe por sua vez acompanhou o planejamento do método sísmico, tendo em vista que seu resultado é uma nuvem de pontos da superfície molhada estudada. Para economizar tempo e combustível essa nuvem de pontos foi gerada a partir da mesma navegação do método CHIRP tendo em vista que foi uma aquisição conjunta.

Além das seções transversais, planejou-se 2 linhas longitudinais somente de sísmica para integração das seções transversais entre si. Uma linha visando perfilar o canal e outra a margem do canal, desejando assim, entender a quantidade qualitativa sedimentar ao longo do rio.

Para cada campanha, coletou-se o NA (Nível D'água) de 3 em 3 seções para que a redução da nuvem de pontos obtida dos dados de MBES seja precisa. Esta coleta foi obtida por meio do método “nivelamento geométrico simples” entre o marco topográfico instalado e o nível d'água do rio.

O planejamento de campo sofreu duas mudanças ao longo das 8 campanhas. A primeira e mais impactante foi o período próximo de 1 ano em que as operações foram suspensas devida a pandemia do vírus Covid-19 (Tabela 1). A outra, foi o adensamento das linhas transversais a partir da 6ª campanha, nos primeiros 24km da área de aquisição sentindo montante – jusante. Sendo assim, adquirindo seções intermediárias, entre as seções 0 e 24 (Figura 18).

Campanha	Data de Aquisição	Seções Intermediárias	Dados Disponíveis
1ª	Maio 2019	não	MBES
2ª	Julho 2019	não	MBES
3ª	Agosto 2019	não	MBES
4ª	Outubro 2019	não	MBES

5 ^a	Dezembro 2019	não	MBES
6 ^a	Dezembro 2020	sim	MBES e CHIRP
7 ^a	Fevereiro 2021	sim	MBES e CHIRP
8 ^a	Maio 2021	sim	MBES e CHIRP

Tabela 1 - Data de aquisição das campanhas, seções intermediárias e relação entre dados disponíveis.

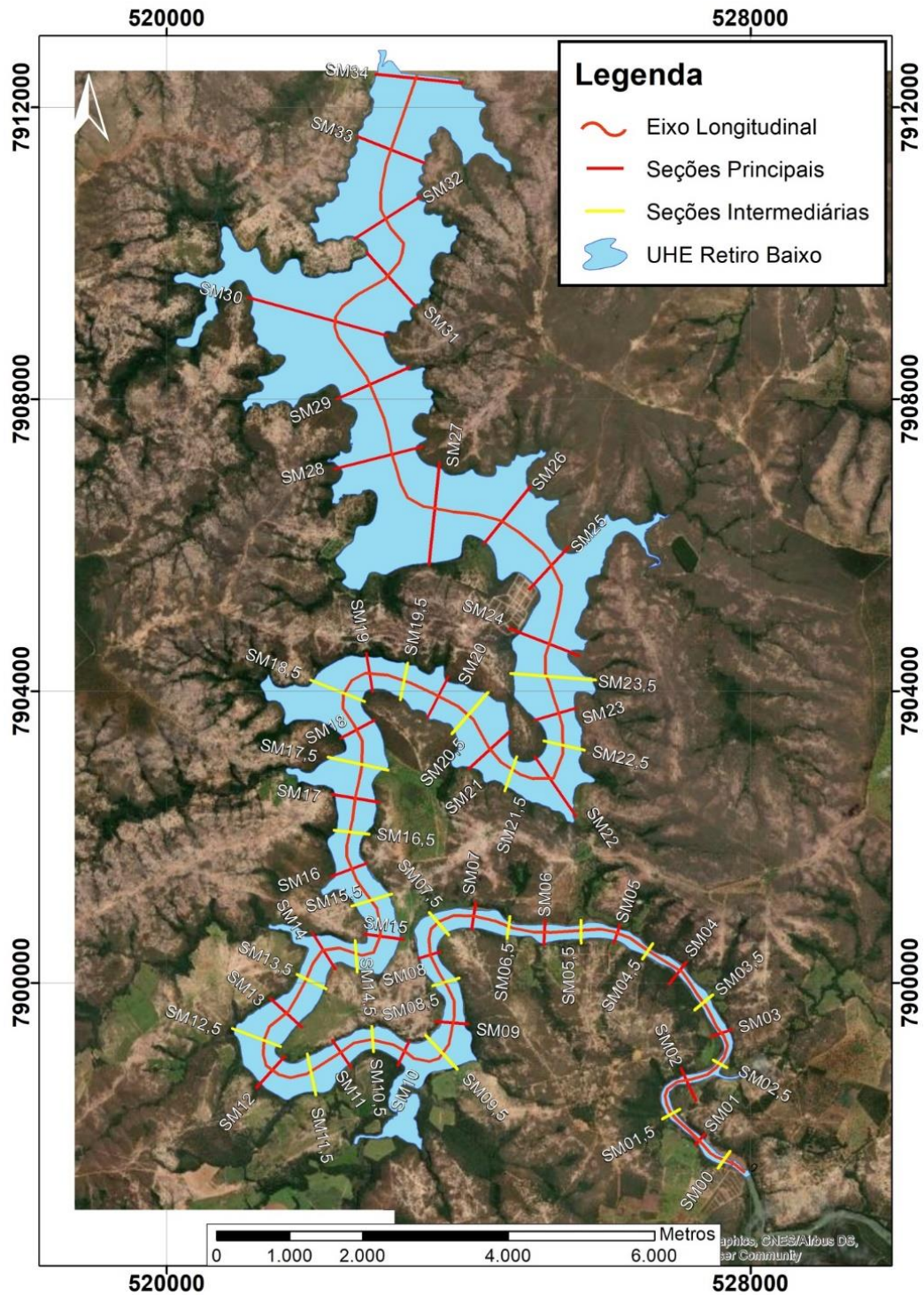


Figura 17 - Linhas de interesse ao longo do trecho a montante da hidrelétrica estudada. As seções amarelas são as intermediárias e as vermelhas as principais.

Aquisição dos dados geofísicos

A aquisição consiste na coleta de dados geofísicos em campo. Quando se trata de levantamentos aquáticos, muitas vezes será utilizado um computador com softwares

específicos para controlar os equipamentos utilizados. No caso deste estudo (Tabela 2), utilizou-se o software “Discover9.0” para aquisição dos dados CHIRP e o “Teledyne PDS” para aquisição dos dados multifeixe.

O software Discover9.0 precisa de uma conexão com a caixa de controle do CHIRP (*topside*) e uma conexão com o GPS. Para otimizar este trabalho utilizou o mesmo DGPS para os dois equipamentos. O sistema do CHIRP possui o transdutor conectado ao *topside* que por sua vez conecta ao computador de aquisição. No computador de aquisição é possível ver o perfil sísmico em tempo real.

O sistema do multifeixe possui uma conexão ethernet com o PSP (*Portable Sonar Processor*) que por sua vez receberá todas as informações do IMU, DGPS e sensor de velocidade do som na água. Após todas as comunicações entre os equipamentos serem configuradas, utiliza-se o software “*Sonar UP*” para controlar a frequência, comprimento do pulso, abertura e direção dos feixes. O PDS receberá as informações do software *Sonar UI* e formará a malha de pontos desejada.

Tabela 2 — Sensores utilizados

Qtde.	Equipamento	Fabricante	Características Gerais
1	Rastreador GNSS Modelo Applanix Pos MV Wavemaster II	Trimble	<ul style="list-style-type: none"> • RTK e DGPS; • Correção Terrastar C (precisão até 0,10 m) • Dupla frequência L1/L2 das constelações GPS NAVSTAR e GLONASS; • Heading de 0,1°; • Acurácia horizontal: 0,08m.
1	Ecobatímetro Multifeixe modelo Reson T50P	Teledyne Reson	<ul style="list-style-type: none"> • Dupla frequência 200 e 400khz; • Varredura de até 165° com 512 feixes; • Comprimento do pulso 33-300µs (CW); • Resolução 6 mm.
1	Sensor de movimento e compensador de ondas modelo Applanix POS MV	Trimble	<ul style="list-style-type: none"> • Correções angulares Pitch, Roll e Yaw com 0,03° de precisão; • Correção vertical Heave com precisão de 5 cm.
1	Sensor de velocidade do som modelo SV•Xchange™	AML	<ul style="list-style-type: none"> • Taxa de amostragem de até 16 Hz; • Resolução: 0,001 m/s; • Precisão: 0.006 m/s; • Acurácia: ± 0,025 m/s; • Intervalo de medição: 1375-1625 m/s;
1	Perfilador de velocidade do som Minos•X	AML	<ul style="list-style-type: none"> • Taxa de amostragem de até 20 Hz; • Resolução: 0,001 m/s; • Precisão: 0,006 m/s; • Acurácia: ± 0,025 m/s; • Intervalo de medição: 1375-1625 m/s; • Profundidade de até 500 m de medição.

1	Sísmica monocanal SBP-216S	Edgetech	<ul style="list-style-type: none"> • Três intervalos de frequência: 2-10 kHz; 2-12 kHz; 2-15kHz • Resolução vertical 6-10 cm. • Penetração nominal: até 6m areia e 15m em argila.
---	-------------------------------	----------	--

Processamento dos dados geofísicos

O processamento dos dados consiste na exclusão de dados espúrios, filtração e melhor imageamento dos dados para que a interpretação seja coerente com a realidade geológica/geomorfológica. É importante ressaltar que o processamento muitas vezes varia para cada indivíduo pois a forma que cada pessoa enxerga o dado é única. Portanto estes foram os passos executados para o processamento, mas não será a única forma de processar os dados.

Processamento dos dados CHIRP

Os dados de sísmica de reflexão serão obtidos tanto em formato “.sgy” e “.jsf”. Utilizou-se o software “SonarWiz7” para processar os dados (). Após importar os dados e aplicar qualquer *offset* que não esteja incluso nos dados, verificou-se a qualidade dos mesmos e caso tenha algum perfil indesejado, retirou-se do banco de dados. Posteriormente, corrige-se qualquer incongruência com a navegação, possivelmente há presença de registros com localizações deslocadas ou picos indesejados.

Após os passos supracitados, passou-se um filtro passa-banda para retirar ruído do sinal. O software SonarWiz7 apresenta uma série de formas para melhor apresentar as amplitudes dos sinais registrados, entre eles há o AGC (*Automatic Gain Control*), UGC (*User Defined Gain Control*) e Auto-TVG (*Time Varying Gain*). É importante utilizar a melhor forma de representar as amplitudes do seu sinal, pois há a possibilidade de intensificar a amplitude do ruído e falsificar sua interpretação. Neste trabalho utilizou-se o AGC.

Ao obter um perfil sísmico com a qualidade desejada, pode-se interpretar o fundo do corpo hídrico (*Bottom-track*). Esta etapa é fundamental pois será a partir dela que o software interpretará a profundidade dos refletores subseqüentes e calibrará possíveis perfis que estejam intersectando.

Por fim, com base nas informações acumuladas da região e informações *in situ* marcou-se os refletores com base nas suas características acústicas. Estas informações obtidas podem posteriormente sugerir um modelo das camadas indicadas pelos refletores.

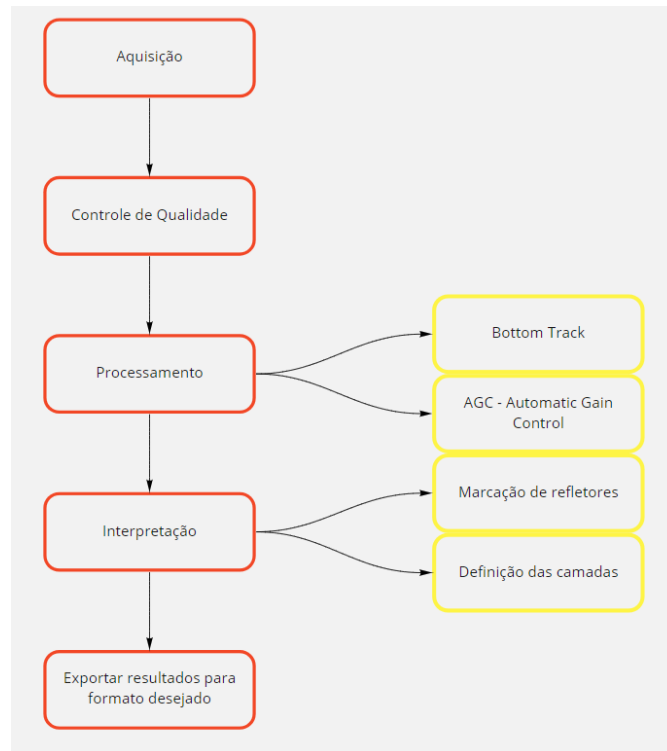


Figura 18 - Fluxograma do processamento dos dados CHIRP.

Processamento dos dados multifeixe

O processamento dos dados multifeixe possui algumas etapas e muitas delas indispensáveis (Figura 19). O primeiro passo é o *Patch Test*, este corrige qualquer deslocamento angular do transdutor nos três eixos do barco (*row*, *pitch* e *yaw*). O *yaw* representa o deslocamento angular do barco no eixo vertical. Posteriormente, caso já não tenha sido feito, incluir as perfilagens do som na água coletada em campo e incluir os dados de maré ou nível d'água.

Após aplicar todas essas correções, utilizou-se filtros para retirar pontos espúrios presentes na superfície obtida. O filtro mais utilizado foi o *spline filter* que simula uma superfície e retira qualquer ponto que não está contido nela. Utilizou-se também o *Id-filter* que utiliza o desvio padrão da localização dos pontos em uma dimensão (geralmente a vertical) como parâmetro para retirar pontos espúrios.

Pontos que não foram retirados com os filtros citados, foram excluídos manualmente. Ao obter a superfície desejada, exportou-se elas em GeoTiff para que a visualização com imagens de satélites ou até mesmo a localização das linhas de sísmica possam ser integradas e interpretadas de maneira conjunta.

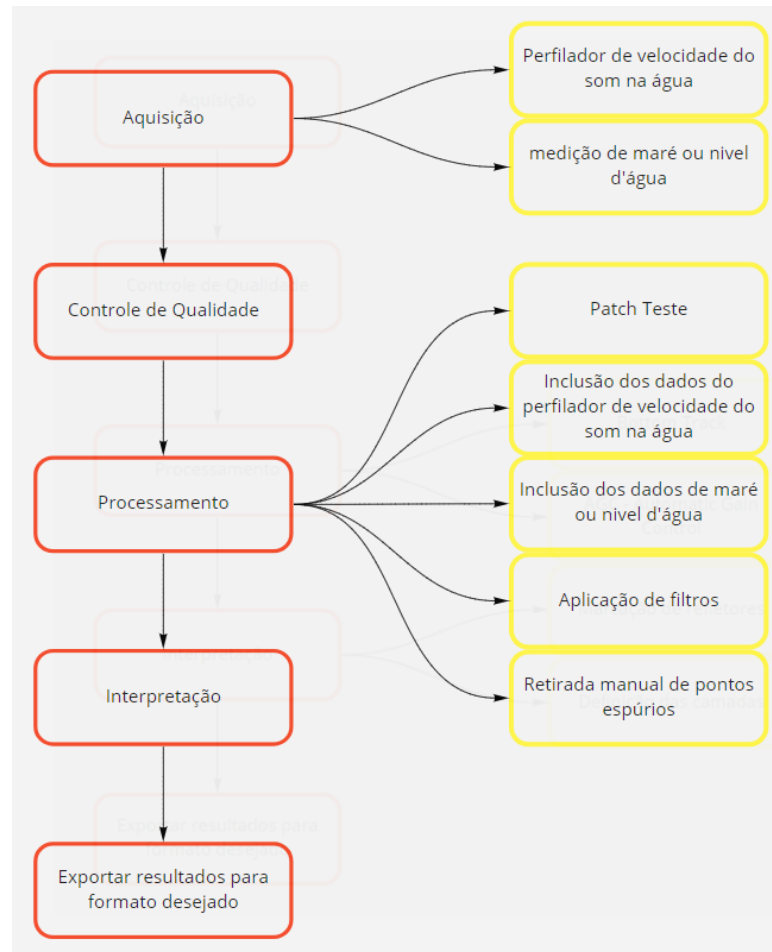


Figura 19 - Fluxograma da metodologia multifeixe.

5. RESULTADOS

Os dados utilizados neste estudo foram somente a porção à montante da hidrelétrica, visto que as principais variações de sedimentação estão localizadas nesta região. Assim como especificado na metodologia, os dados possuem redundância. Dos dois perfis transversais por seção obtidos pelo CHIRP, utilizou-se somente um. Os dados batimétricos por sua vez foram integrados entre si nas 2 varreduras de cada seção, gerando assim, somente uma superfície por seção (Figura 20). Os mapas apresentados neste capítulo e no próximo serão representados no sistema de coordenada geográfica WGS 84 com projeção UTM.

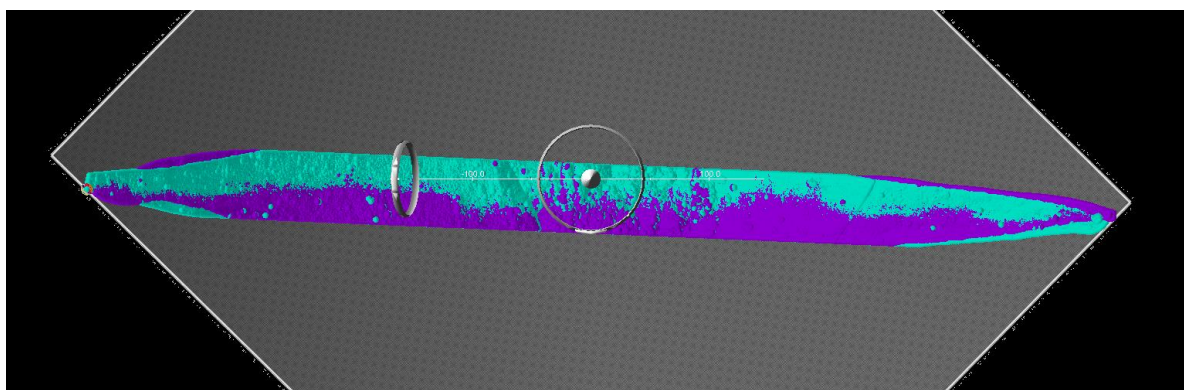


Figura 20 - Superfície batimétrica da 8ª campanha seção 31 simbolizada por arquivo de aquisição, os pontos em ciano representam um arquivo e os pontos em roxo representam o outro.

Batimetria

Os mapas gerados a partir de cada campanha permitem visualizar o principal canal do rio, bem como as regiões mais planas geralmente inundadas na época de cheia. Devido a vasta quantidade de dados, escolheu-se regiões representativas para apresentar os resultados topobatimétricos obtidos.

A porção mais próxima a barragem de retiro baixo possui a área mais profunda e mais estável do estudo. Contendo pouca variação ao longo das campanhas. O mapa abaixo representa as seções 34-30 (Figura 21). Observa-se na seção 34 a estrutura da barragem.

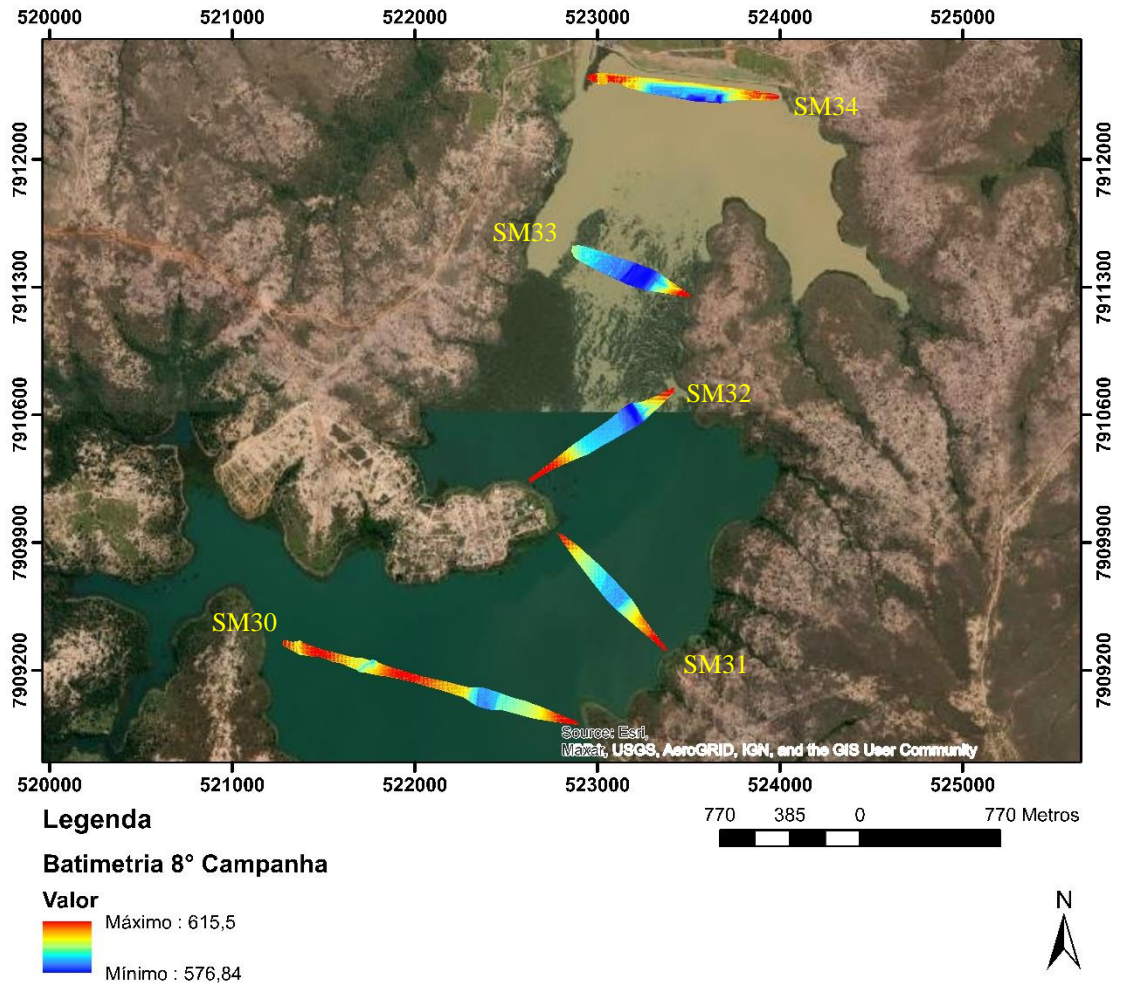


Figura 21 - Seções batimétricas 30 a 34 da 8ª campanha.

As seções 5-14 apresentam maior variabilidade, em sua maioria aumentando a cota do leito fluvial. A Figura 22 representa o mapa das seções 14 a 15 com maior detalhamento da mudança, é possível observar que o modelo digital de elevação da 7ª campanha apresenta coloração mais avermelhada que a 5ª. Ou seja, a cota do assoalho aumentou em certas regiões entre dezembro de 2019 e fevereiro de 2021.

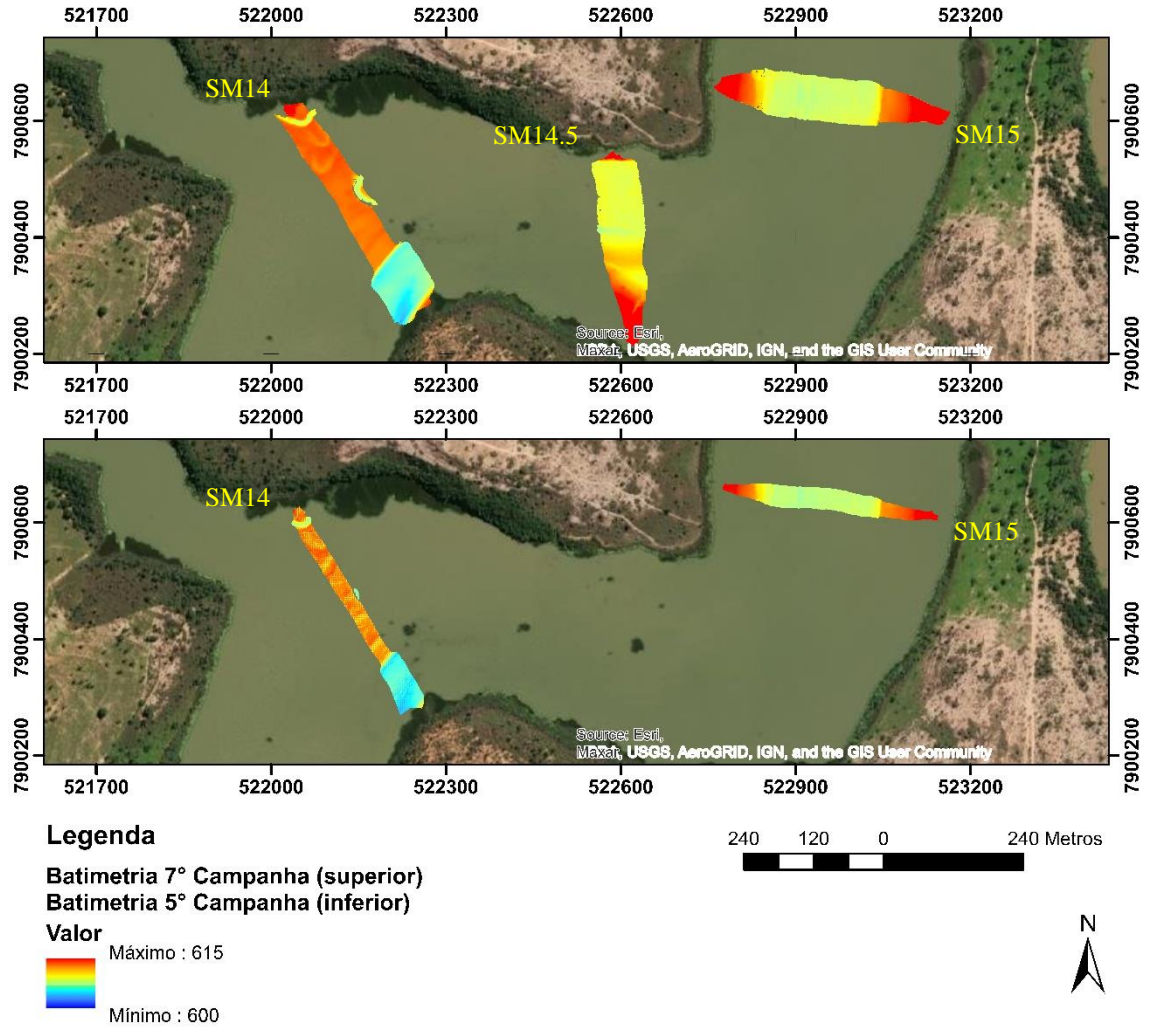


Figura 22 – Mapa do MDE da 5° campanha (inferior) e da 7° campanha (superior).

Sísmica

As seções sísmicas tiveram pouca variabilidade ao longo do estudo. A penetração do sinal sísmico no leito teve em média 2-3m para as seções 0 a 18 (Figura 24). As seções mais próximas a barragem obtiveram maior penetração, chegando a imagear refletores até a 10m abaixo do leito fluvial (Figura 25).



Figura 23 - Trecho da seção 11.5 da campanha 8.

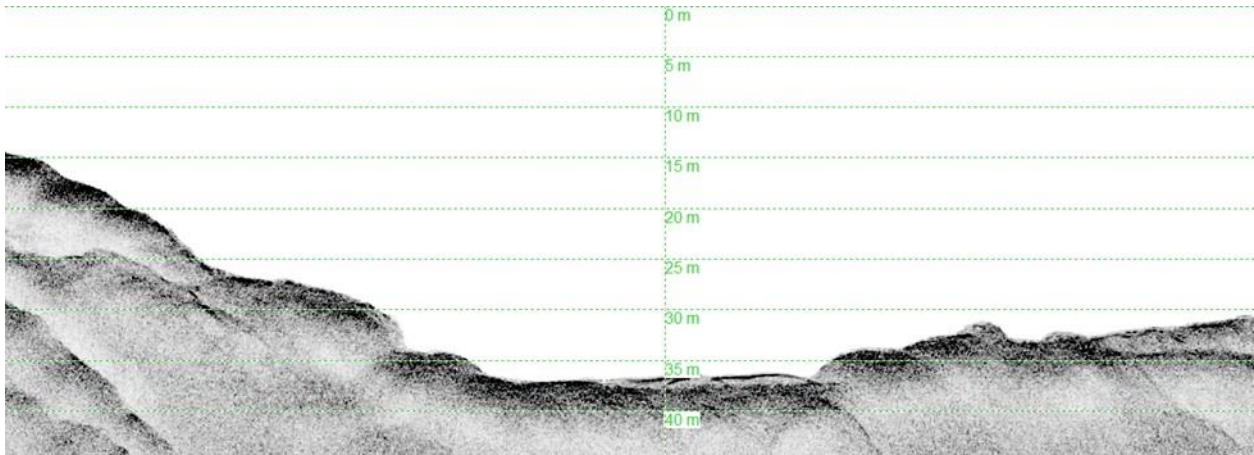


Figura 25 - Trecho da seção 33 da 8ª campanha com refletor identificado pela elipse vermelha com 25m de profundidade e 10m de penetração.

A pequena coluna d'água e a conseqüente aparência de múltiplas limitou o imageamento nas seções 0 a 10 (Figura). Qualquer estrutura que estivesse abaixo do leito no mesmo comprimento que a coluna d'água, foi ofuscada pelo sinal reverberante entre o nível d'água e o leito.

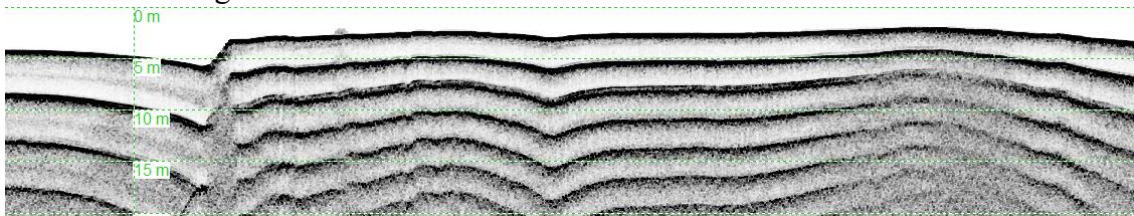


Figura 26 - Seção 33 da campanha 8 com ambiente raso e interferência de múltiplas.

6. ANÁLISE

A batimetria, devido a sua precisão foi o primeiro método aplicado para analisar a dinâmica deposicional do leito do rio Paraopeba. Os dados sísmicos foram utilizados para apoiar os dados batimétricos e captar a variação observada. A sísmica também permitiu inferir a forma que o sedimento se instalou no canal do rio.

Batimetria

O programa PDS 2000 foi utilizado para as análises batimétricas feitas neste trabalho, por meio dele, gerou-se superfícies resultantes da diferença entre o MDE das campanhas 2 a 8 em relação a primeira (Figura 27). Calculou-se também o volume do corpo que sobrepôs e submergiu a superfície referencial.

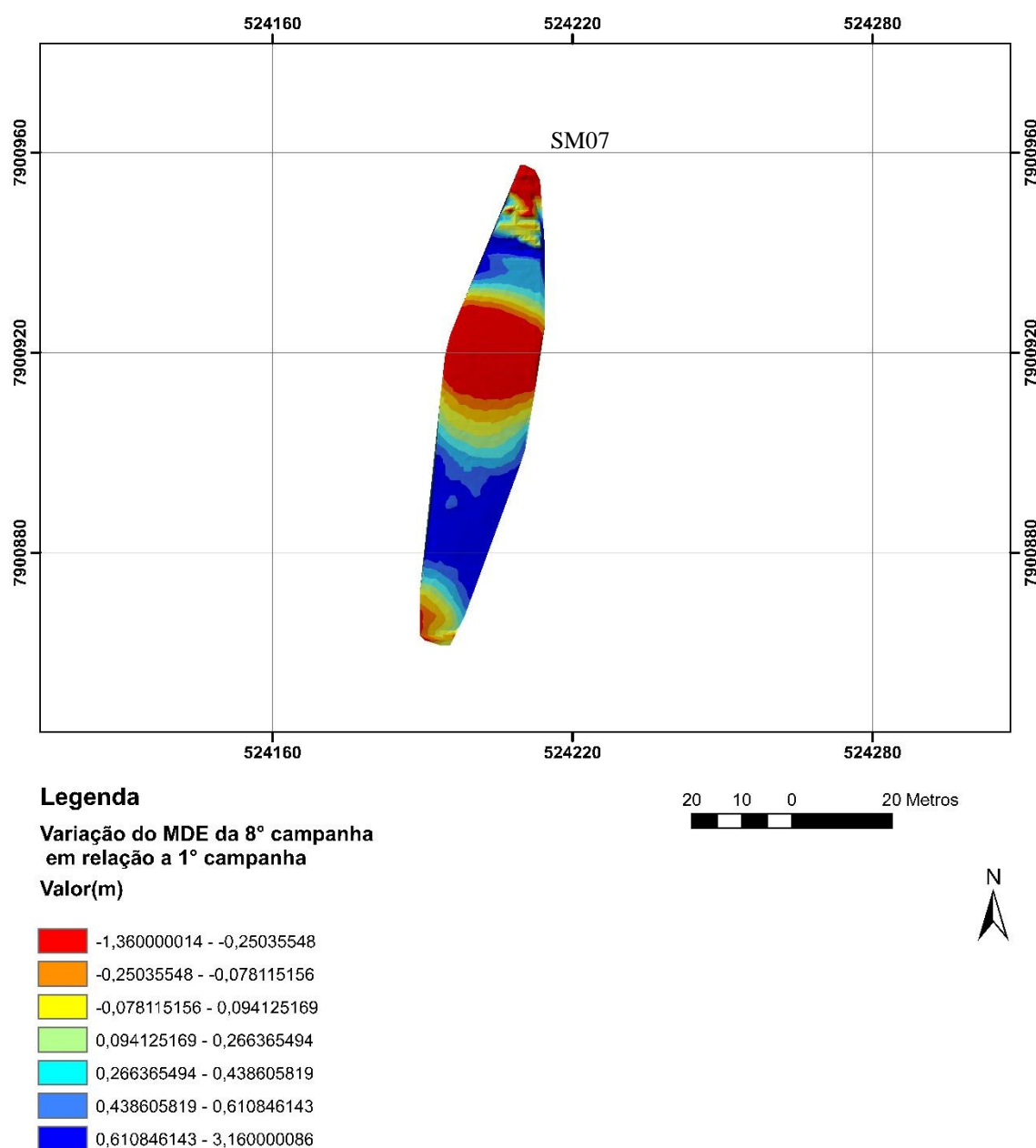


Figura 24 – Mapa da variação do leito do rio Paraopeba de maio/2019 a maio/2021 da seção 07.

O mapa acima ilustra os locais em que houve provável acúmulo de sedimento ou erosão. A seção 07 apresenta o rebaixamento da superfície na porção do canal do rio, e aumento na superfície do leito nas bordas do canal até próximo ao nível d'água.

As análises volumétricas permitiram observar quais seções ao longo do trecho montante estudado tiveram maior variabilidade. O gráfico a seguir representa a variação do volume médio ao longo das seções. A cada curva temos a análise de uma campanha diferente em relação a 1ª (Figura 28).

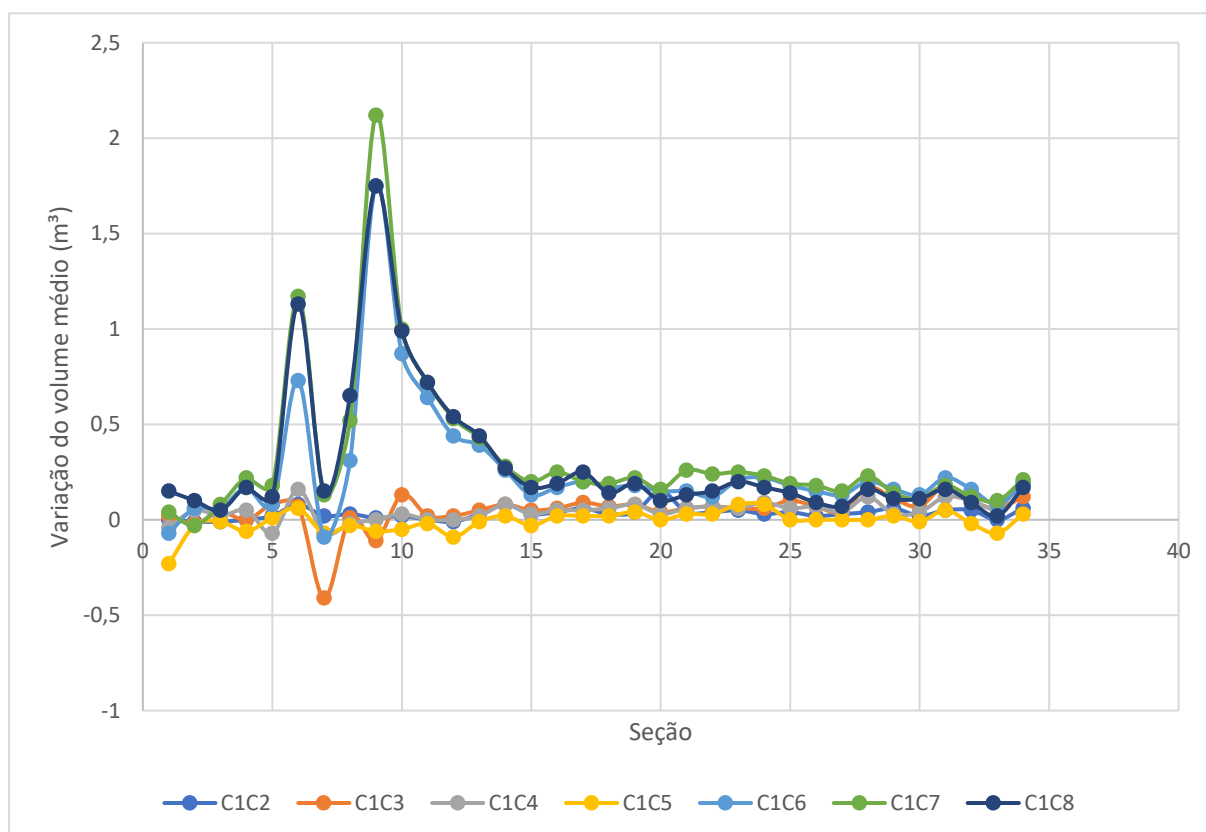
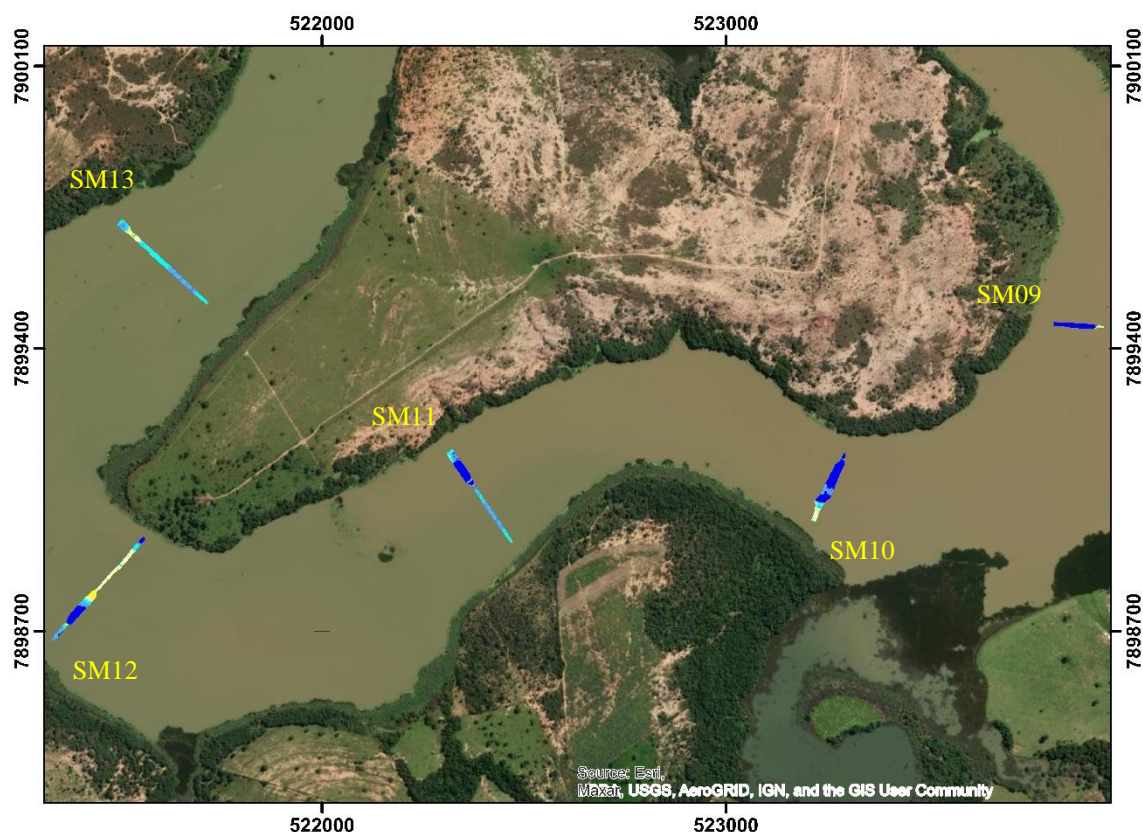


Figura 28 - Variação do volume médio ao longo das seções para cada campanha em relação a primeira.

O gráfico supracitado mostra que a região do rio Paraopeba entre as seções 5 a 15 possuem maior variabilidade no volume analisado e tendem a aumentar o leito do rio. Observa-se na Figura 29, a área na qual a 6ª campanha sobrepõe a 1ª, conforme indicado pelo volume calculado e representado na Figura 26.



Legenda

Varição do MDE da 6ª campanha
em relação a 1ª campanha
Valor (m)

	-1,360000014 - -0,25035548
	-0,25035548 - -0,078115156
	-0,078115156 - 0,094125169
	0,094125169 - 0,266365494
	0,266365494 - 0,438605819
	0,438605819 - 0,610846143
	0,610846143 - 3,160000086

350 175 0 350 Metros



Figura 25 – Variação do leito do rio Paraopeba da 1ª campanha para a 6ª.

Em sua maioria, a principal região de deposição observada foi nos canais das seções, porém o aumento do leito é visto distribuído em toda a seção para a maioria delas. Conforme o gráfico apresentado na Figura , a partir da 6ª campanha o leito fluvial aumentou sua cota não somente em todas as seções, mas apresentou um pico de crescimento desproporcional na 6ª e 9ª seção.

Sísmica

O CHIRP, assim como foi dito no início deste capítulo, apoiou os dados observados na batimetria. Devido as condições dos processos de consolidação sedimentar e ao ambiente de aquisição, não foi possível observar os sedimentos inconsolidados de todos os trechos em que houve a variação observada na batimetria.

A 7ª campanha melhor captou as variações supracitadas (Figura 31 e Figura 32). É importante ressaltar que devido a correnteza do rio, épocas de seca e cheia e até mesmo a precisão do GPS utilizado, é impossível que a aquisição seja sempre exatamente no mesmo trecho. Sendo assim, é fundamental interpretar os perfis sísmicos conforme sua localização, o mapa a seguir (Figura 30) permite ajustá-los da melhor forma possível.

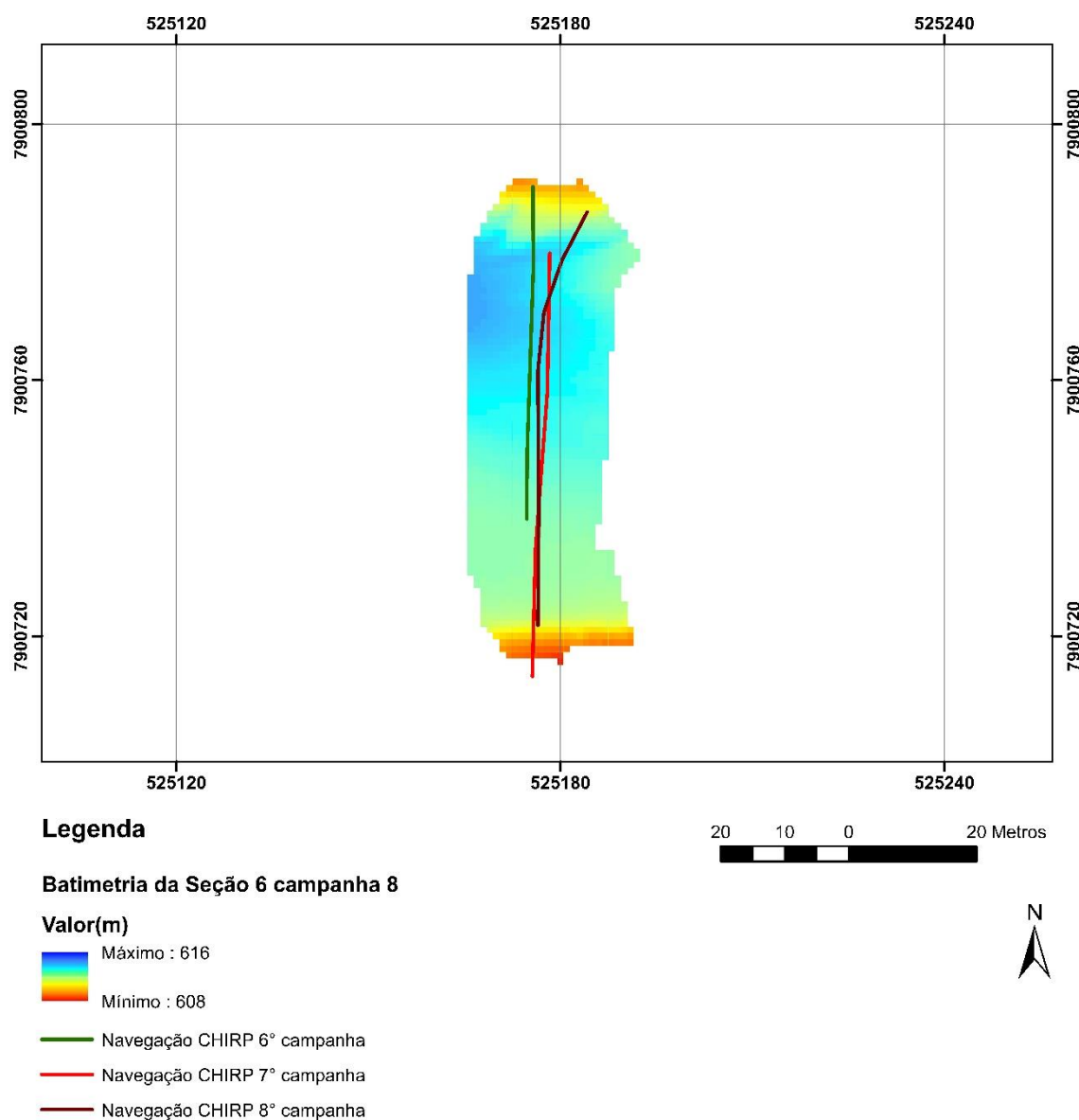


Figura 26 - Mapa de navegação das linhas de aquisição do CHIRP para a seção 6 das campanhas 6 a 8.

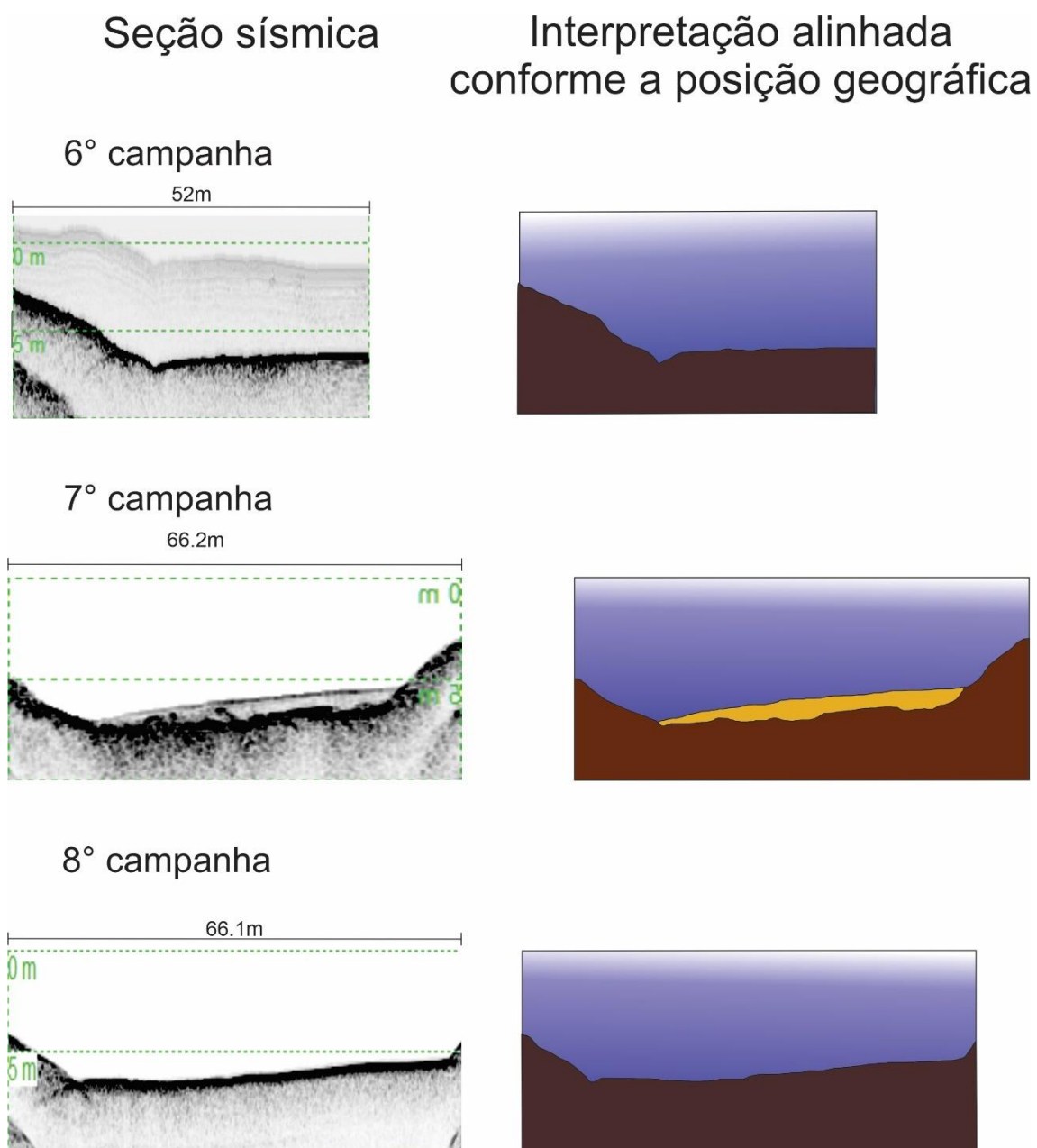


Figura 31 - Interpretação da seção 6 para as 3 campanhas estudadas.

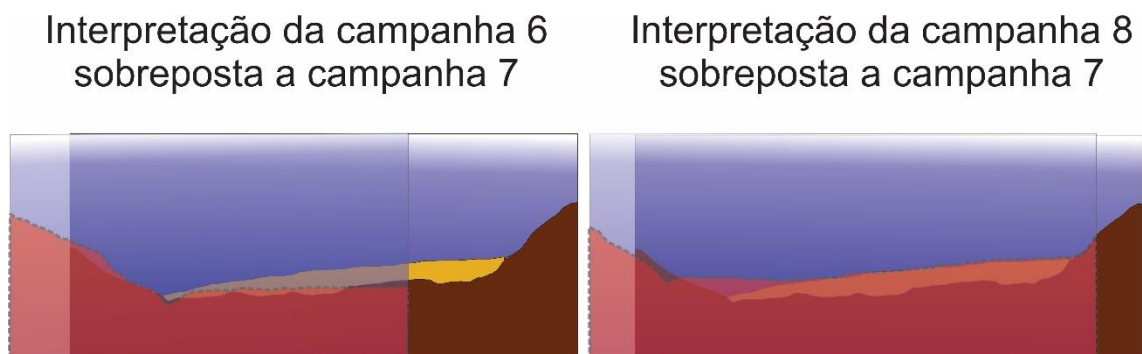


Figura 32 – Seção 6 das campanhas 6 e 8 em transparente com interpretação em pontilhado sobrepondo a seção interpretada da campanha 7.

O principal local que o sedimento se alocou ao longo das seções foi no canal. Uma análise comparativa entre as seções, ilustra o processo de deposição e consolidação do sedimento (Figura 34 e 35)

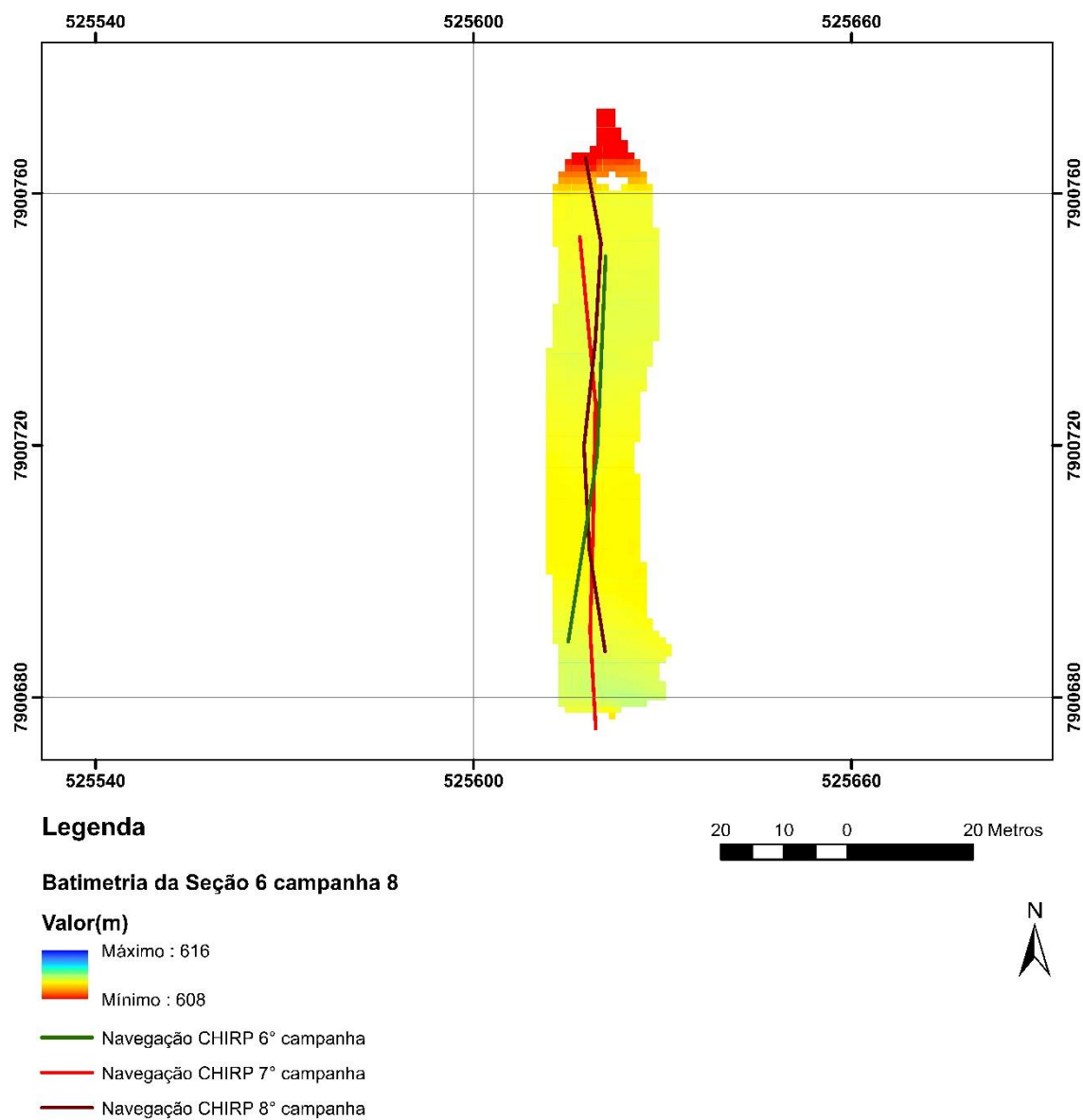


Figura 33 - Mapa de navegação das linhas de aquisição do CHIRP para a seção 5.5 das campanhas 6 a 8.

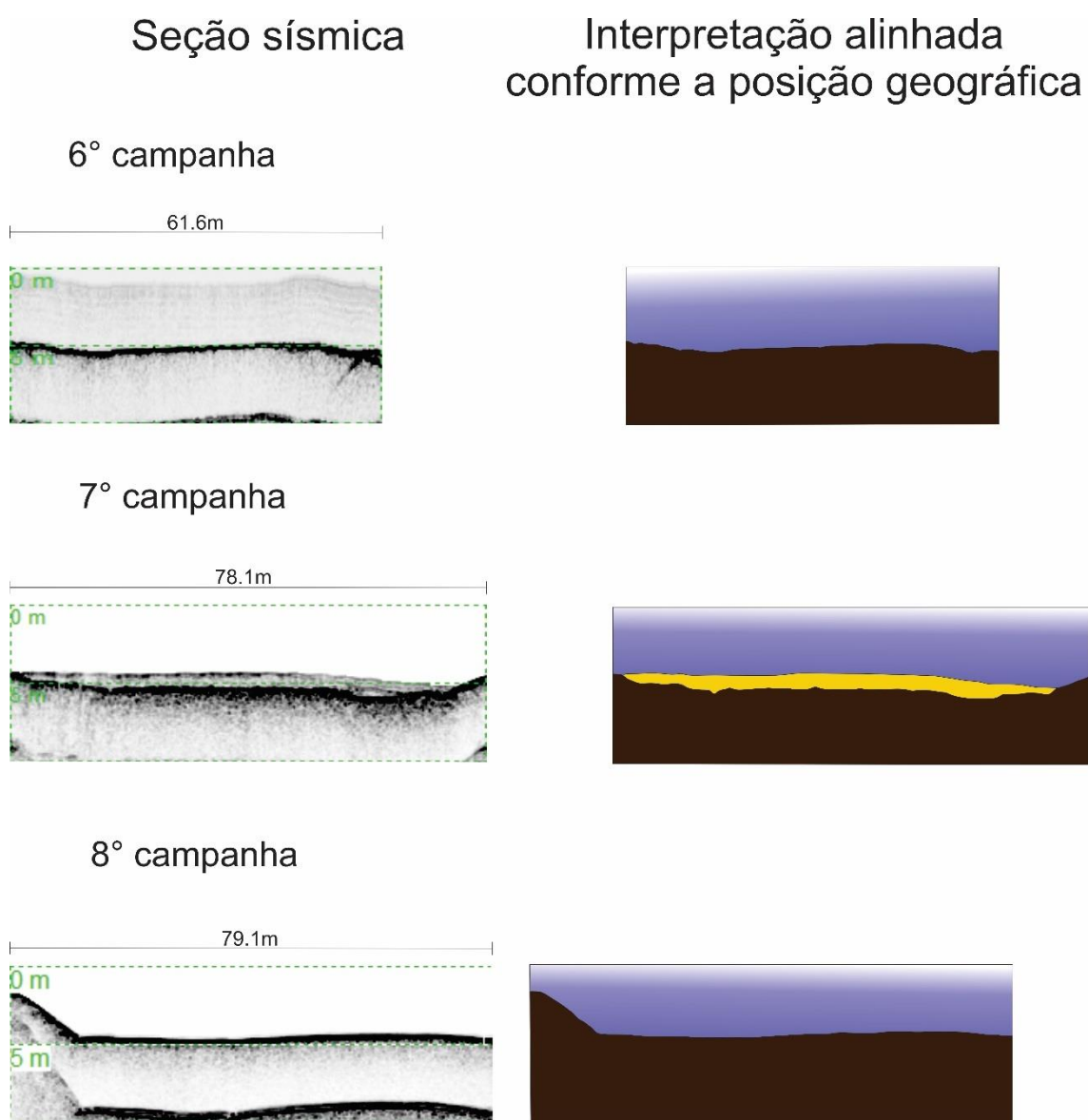
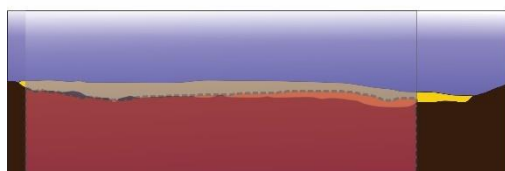


Figura 34 - Interpretação da seção 5.5 para as 3 campanhas estudadas.

Interpretação da campanha 6
sobreposta a campanha 7



Interpretação da campanha 8
sobreposta a campanha 7

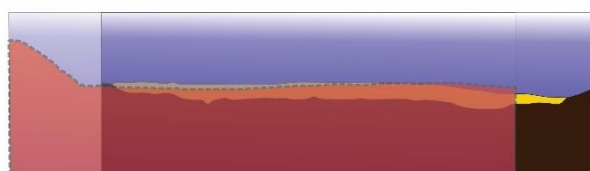


Figura 35 – Seção 6 das campanhas 6 e 8 em transparente com interpretação em pontilhado sobrepondo a seção interpretada da campanha 7.

Traçou-se também um perfil posicionado em cima das seções sísmicas nos MDEs gerados pela batimetria para averiguar as mudanças vistas na sísmica em perfil na batimetria (Figura 36)

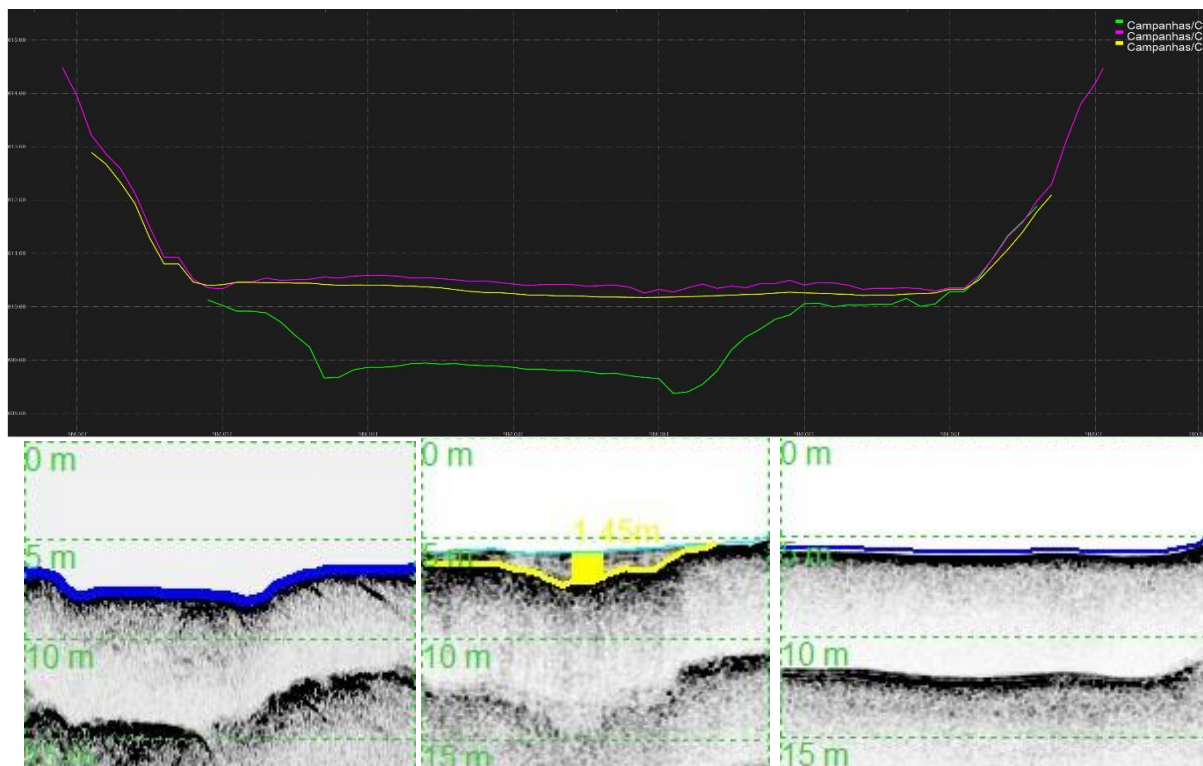


Figura 36 - Perfil da seção 3.5 montante, na porção superior observa-se a mudança batimétrica e nas três imagens abaixo observa-se a evolução (da esquerda para direita, campanhas 6, 7 e 8, respectivamente) do sedimento com os perfis sísmicos.

7. CONCLUSÃO

As implicações da construção de uma hidrelétrica do ponto de vista energético são muito positivas. Mas as consequências da construção de um barramento ainda não são totalmente previsíveis.

A batimetria por sua vez mostrou-se coerente com a realidade do rio Paraopeba e permitiu que uma tendência fosse observada. Seus resultados enaltece mudanças abruptas e evidencia detalhes morfotemporais fluviais.

A sísmica por sua vez permitiu não somente confirmar as características observadas na batimetria, mas também entender como os processos sedimentares do rio ocorrem. As seções ilustradas neste trabalho permitem visualizar a forma de acomodação do sedimento nos canais.

Estas evidencias são essenciais para proteger a comunidade local de possíveis alagamentos e projetar expansões rurais mais estratégicas. Assim como inferir a futura morfologia do rio Paraopeba.

A diversidade das datas de aquisição permite visualizar também que o evento visto a partir de dezembro de 2020 indica não ser natural. Visto que levantamentos em épocas de chuva e seca na região em tempos anteriores ao evento não obtiveram resultados semelhantes.

É importante ressaltar que o monitoramento deve continuar para melhor definir as mudanças morfológicas do rio e o impacto na comunidade local ao longo prazo. Além disso, amostras devem ser coletadas para entender melhor qual a origem dos sedimentos e possivelmente reverter o avanço do nível d'água para as áreas rurais.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, M., Muslija, A. & Satrovic, E. **Does economic prosperity lead to environmental sustainability in developing economies? Environmental Kuznets curve theory.** *Environ Sci Pollut Res* **28**, 22588–22601 (2021).

ANSAR, A., BENT F.lyvbjerg, ALEXANDER B.udzier, DANIEL L.unn, **Should we build more large dams? The actual costs of hydropower megaproject development,** *Energy Policy*, Volume 69, 2014, Pages 43-56, ISSN 0301-4215, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.069>.

[Catálogo de Metadados da ANA \(snirh.gov.br\)](#) acessado em 17/09/2021

CHRISTOLETTI, A. **Geomorfologia.** São Paulo, Edgard Blucher, 2º edição, 1980.

CIBAPAR – Consórcio Intermunicipal da Bacia Hidrográfica do rio Paraopeba. **Estudos preliminares para implementação do Plano Diretor das águas da bacia do rio Paraopeba.** Betim, 2010. 346p.

COURIVAUD, J R, PUJO, H, ALEXIS, A; LORIN, J. **Evaluation of a chirp sonar to estimate sediment thickness in reservoirs;** Evaluation de l'apport d'un sondeur de sediment pour l'estimation des epaisseurs de sediments dans les retenues de barrage. France. <https://doi.org/10.1051/lhb:200501012>

CPRM, 2001, **Regionalização de Vazões Sub-Bacias 40 E 41.** Volume 1, p. 27

DURÃES, M., 2010, **Caracterização E Avaliação Do Estresse Hidrológico Da Bacia Do Rio Paraopeba, Por Meio De Simulação Chuva-Vazão De Cenários Atuais E Prospectivos De Ocupação E Uso Do Solo Utilizando Um Modelo Hidrológico Distribuído.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais.

FORMOSO, Lucas L. Cupertino. **Erosão e sedimentação no Delta do São Francisco: considerações sobre a interferência dos barramentos no sistema costeiro /** Lucas Cupertino Formoso. - Rio Claro: [s.n.], 2008

GAGG, G. **Levantamentos Hidrográficos - Noções Gerais.** 1ª. ed. Porto Alegre - RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, v. I, 2016.

http://geoinfo.cnps.embrapa.br/geoserver/wfs?format_options=charset%3AUTF-8&typename=geonode%3Alev_mg_estado_solos_lat_long_wgs84_vt&outputFormat=SHAPE-ZIP&version=1.0.0&service=WFS&request=GetFeature acessado em 13/09/2021

<http://recursomineralmg.codemge.com.br/recursos-minerais-no-cenario-geologico/> acessado em 12/10/2021

http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=5836 acessado em 05/10/2021

<https://seriesestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?vcodigo=IU5> acessado em 05/10/2021

<https://www.wwf.org.br/?68662/maior-aumento-desmatamento-amazonia-dez-anos>
acessado em 05/10/2021

IANNIRUBERTO, M.; CAMPOS, J. E. G.; ARAÚJO, V. C. M. Application of Shallow Seismic Profiling to Study Riverbed Architectural Facies: A Case Study of the Tocantins River (Pará - Brazil). **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro - RJ, v. 84, n. 3, p.245-261, Setembro 2012. ISSN 1678-2690.

IRENA K. ERNST W. CHARALAMBIDES G. ALEXANDROS, **The cost-effectiveness of CO2 mitigation measures for the decarbonisation of shipping. The case study of a globally operating ship-management company**, Journal of Cleaner Production, Volume 316,2021,

KOUASSI, K. L. et al. **Caracterização das areias e morfologia do fundo do lago da hidrelétrica taabo (Costa do Marfim)**. Sciences & Nature, v. 4, n. 1, p. 93-103, 2007.

LATRUBESSE et al., Eugenio Y. Edgardo M. Arima, Thomas Dunne, Edward Park, Victor R. Baker, Fernando M. d’Horta, Charles Wight, Florian Wittmann, Jansen Zuanon, Paul A. Baker, Camila C. Rivas, Richard B. Norgaard, Naziano Filizola, Atif Ansar, Bent Flyvbjerg, and Jose C. Stevaux, 2017, “**Damming the Rivers of the Amazon Basin**,” Nature 546, 15 June, pp. 363–369, doi:10.1038/nature22333

LE, Hoang Phong. (2019). **Globalization, Financial Development, and Environmental Degradation in the Presence of Environmental Kuznets Curve: Evidence from ASEAN-5 Countries**. International Journal of Energy Economics and Policy. 9. 40-50. 10.32479/ijeep.7290.

LEMOS, CG. **Sísmica de Alta Resolução e Batimetria Multifeixe Aplicados em Reservatório: Estudo de Caso no Baixo Curso do Rio Paraopeba - MG**. Monografia (Curso de Graduação em Geofísica), Instituto de Geociências, UnB, Brasília/ DF, 2020, 70p.

LURTON, X.; LAMARCHE, G. (Eds) (2015) **Backscatter measurements by seafloor-mapping sonars. Guidelines and Recommendations**. 200p. <http://geohab.org/wp-content/uploads/2014/05/BSWG-REPORT-MAY2015.pd>

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. 2002. 154 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MAGILLIGAN, FRANCIS J. KEITH H. NISLOW. **Changes in hydrologic regime by dams**. Geomorphology. Volume 71, issues 1–2. (2005), p. 61-78. (<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.08.017>.)

REYNOLDS, J. M. **An introduction to applied and environmental geophysics**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1997.

RYBÁR, RadimR., DUŠAN KudelasK., and MARTIN Beer. "Selected problems of classification of energy sources-What are renewable energy sources?" *Acta Montanistica Slovaca* 20.3 (2015).

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics**. 2^a. ed. Cambridge: Cambridge University Press, v. I, 1990

WALLING, DE & FANG, D. 2003 **Tendências recentes nas cargas de sedimentos suspensos do mundo rios**. Glob. Planeta. Mudar. 39, 111–126. (doi: 10.1016 / S0921-8181 (03) 00020-1)

WOOTTON et al., 1996 J.T. Wootton, M.S. Parker, M.E. Power. **Effects of disturbance on river food webs**. Science, 273 (5281) (1996), p. 1558-1561