

CAMILA ZENI DO AMARAL

IDENTIFICAÇÃO E MAPEAMENTO DE REGIÕES POTENCIAIS À  
INSTALAÇÃO DE TURBINAS HIDROKINÉTICAS NA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO VERDADEIRO – OESTE  
DO PARANÁ

CASCADEL  
PARANÁ – BRASIL  
MARÇO – 2021

CAMILA ZENI DO AMARAL

IDENTIFICAÇÃO E MAPEAMENTO DE REGIÕES POTENCIAIS À  
INSTALAÇÃO DE TURBINAS HIDROKINÉTICAS NA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO VERDADEIRO – OESTE  
DO PARANÁ

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.

Orientadora: Prof. Dr<sup>a</sup>. Maritane Prior

Coorientadora: Prof. Dr<sup>a</sup>. Fabiana Costa de Araújo Schutz

CASCADEL  
PARANÁ – BRASIL  
MARÇO – 2021

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Amaral, Camila Zeni do  
Identificação e mapeamento de regiões potenciais à instalação de turbinas hidrocinéticas na bacia hidrográfica do Rio São Francisco Verdadeiro - Oeste do Paraná: / Camila Zeni do Amaral; orientador(a), Maritane Prior; coorientador(a), Fabiana Costa de Araújo Schutz, 2021.  
59 f.

Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, 2021.

1. Energia renovável. 2. Geoprocessamento. 3. Mapeamento. 4. Sistema hidrocinético. I. Prior, Maritane . II. Schutz, Fabiana Costa de Araújo. III. Título.

**CAMILA ZENI DO AMARAL**

Identificação e mapeamento de regiões potenciais a instalação de turbinas hidrocinéticas na bacia hidrográfica do Rio São Francisco Verdadeiro - Oeste do PR

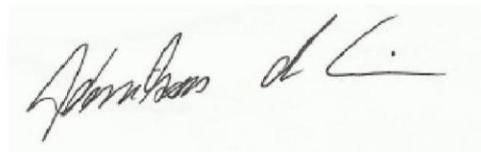
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestra em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Fontes Renováveis e Racionalização de Energia na Agroindústria e Agricultura, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:



Orientadora - Maritane Prior  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Jair Antonio Cruz Siqueira  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Adenilsom dos Santos Lima  
Universidade Estadual do CentroOeste (UNICENTRO)

Cascavel, 01 de março de 2021

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me guiar sempre pelo melhor caminho, dando saúde, serenidade e sabedoria para enfrentar os desafios que surgiram pelo caminho.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste) por toda estrutura necessária para o desenvolvimento deste projeto e à CAPES por toda a ajuda financeira.

Meus sinceros agradecimentos à minha orientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maritane Prior e à minha Coorientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Fabiana Costa de Araújo Schutz. Muito obrigada pelo tempo e disposição, pela paciência e por todos os ensinamentos. Saibam que são exemplos pessoais e profissionais nos quais me espelho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, em especial ao Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira e ao Prof. Dr. Flavio Gurgacz.

Aos meus colegas, Josias Cruz e Newmar Wegner, pelo compartilhamento de dados e informações que foram muito importantes para conclusão desta pesquisa.

Agradeço aos meus pais, Dirceu Custódio do Amaral e Cleusa Zeni do Amaral, por sempre me incentivarem e pelo suporte para que eu chegasse até aqui, pelos conselhos, amor e carinho.

À minha irmã, Isabela Zeni do Amaral, pelos conselhos, amizade, risadas, por dividir a casa e pelos bons momentos.

Agradeço aos meus grandes amigos, Agleson Anacleto Balicki, Dheniffer Bauwelz Pasa, Gabriela Parra, Gabriel Ranzani Veronez, Leonardo Vigo Rocha, Tatiana Cruz e Tiago Sonsin Alfeo, por serem causa constante de alegria em minha vida.

Aos meus amigos e colegas Eduardo Lange Sutil, Eliana Mira de Bona, Gabriela Feistauer Araujo e Ricardo Guicho, por toda a parceria no decorrer desta caminhada.

Em especial à Júlio Cezar Girardi, que corre e sonha junto comigo. Pelo amor e cumplicidade, por ser minha calma, segurança e ser meu maior incentivador.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma de classificação de energia segundo sua fonte.....	3
Figura 2 - Comparativo das fontes primárias de energia no mundo, segundo sua fonte .....	4
Figura 3 - Comparação do uso de energias renováveis entre o Brasil e o contexto global.....	5
Figura 4 - Participação das fontes na matriz elétrica brasileira e mundial.....	5
Figura 5 - Comparativo matriz elétrica brasileira 2017 – 2018.....	6
Figura 6 - Turbinas de eixo horizontal.....	10
Figura 7 - Turbinas de fluxo cruzado.....	10
Figura 8 - Localização da bacia hidrográfica do Rio São Francisco Verdadeiro.....	17
Figura 9 - Municípios inseridos na bacia do Rio São Francisco Verdadeiro.....	18
Figura 10 - Interface do projeto NASA EarthData. Aplicação dos filtros e delimitação da área (acima). Visualização dos dados disponíveis para a área delimitada (abaixo) .....	21
Figura 11 - Interface do resultado de busca no Catálogo de Imagens do INPE.....	22
Figura 12 - Mapa de localização dos pontos com vazão estimada do rio São Francisco Verdadeiro.....	26
Figura 13 - Mapa da composição colorida falsa cor 6R5G4B, das cenas do Landsat 8 .....	29
Figura 14 - Mapa de uso do solo da bacia hidrográfica do rio São Francisco Verdadeiro.....	30
Figura 15 - Mapa de declividade da bacia hidrográfica do rio São Francisco Verdadeiro.....	31
Figura 16 - Mapa hipsométrico da bacia hidrográfica do rio São Francisco Verdadeiro .....	32
Figura 17 - Modelo 3D da bacia hidrográfica do rio São Francisco Verdadeiro.....	33
Figura 18 - Mapa de localização dos pontos com vazão estimadas selecionados.....	34
Figura 19 - Perfis da Seções Transversais.....	35

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limiares do Índice Kappa.....	24
Tabela 2 - Categorias de Declividade.....	24
Tabela 3 - Áreas das classes de uso do solo da bacia hidrográfica do Rio São Francisco Verdadeiro.....	30
Tabela 4 - Parâmetros de seleção dos pontos com vazão estimada na bacia hidrográfica do rio São Francisco Verdadeiro.....	34
Tabela 5 - Dados obtidos através dos perfis de seção transversal .....	38
Tabela 6 - Potencial hidrocínético da bacia hidrográfica do rio São Francisco Verdadeiro.....	38
Tabela 7 - Capacidade de Produção de Energia.....	39

AMARAL, Camila Zeni. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, agosto de 2020. **Identificação e mapeamento de regiões potenciais à instalação de turbinas hidrocínéticas na bacia hidrográfica do Rio São Francisco Verdadeiro – Oeste do Paraná.** Professora Orientadora: Dr<sup>a</sup>. Maritane Prior. Professora Coorientadora: Dr<sup>a</sup>. Fabiana Costa de Araújo Schutz.

## RESUMO

As questões ambientais se tornaram o maior fator para a busca de alternativas mais limpas de produção de energia. A utilização de turbinas hidrocínéticas pode ser uma opção viável para comunidades isoladas próximas a rios que possuam características hidrológicas específicas. Com o uso de técnicas de geoprocessamento foram identificados e mapeados, dentro da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco Verdadeiro (SFV), locais com potencial para instalação de sistemas hidrocínéticos para geração de energia elétrica. Utilizaram-se Modelos Digitais de Elevação Alos Palsar, obtidos pelo projeto NASA EarthData, e imagens do Landsat 8 (L8). Realizou-se o mapeamento temático e, posteriormente, a análise de locais com potencial hidrocínético na unidade de estudo. Foram selecionados 10 pontos com vazão conhecida ao longo do rio SFV no período seco, dos quais foram obtidos os parâmetros necessários para o cálculo da velocidade da água mediante a equação de Chezy. Calculou-se o diâmetro do rotor necessário para cada ponto na máxima profundidade do trecho e o potencial hidrocínético disponível em cada ponto, considerando-se a mínima ( $C_p = 0,25$ ) e a máxima ( $C_p = 0,593$ ) eficiência de uma turbina e, dessa forma, calculou-se a capacidade de produção de energia em cada ponto. Com base na obtenção teórica dos dados, verificou-se que não há potencial hidrocínético disponível nos pontos estudados do rio São Francisco verdadeiro.

**PALAVRAS-CHAVE:** geoprocessamento, mapeamento, sistema hidrocínético.

AMARAL, Camila Zeni. Me. State University of West Paraná, August 2020. **Identification and mapping of regions covered by the installation of hydrokinetic turbines in the São Francisco Verdadeiro River Basin - West of Paraná.** Advisor Professor: Dr<sup>a</sup>. Maritane Prior. Coordination Professor: Dr<sup>a</sup>. Fabiana Costa de Araújo Schutz.

## SUMMARY

Environmental issues are the biggest factor in the search for cleaner energy production alternatives. The use of hydrokinetic turbines can be a viable option for communities close to rivers that have specific hydrological characteristics. Using geoprocessing techniques, it was identified and mapped within the São Francisco Verdadeiro River Basin (SFV), potential sites for installing hydrokinetic systems to generate electricity. Digital Alos Palsar Elevation Models chosen by the NASA EarthData project and images from Landsat 8 (L8) were used. Thematic mapping and subsequent analysis of sites with hydrokinetic potential in the study unit were carried out. 10 points with known flow along the SFV river in the dry period were selected, from which the basic parameters were obtained for calculating the water velocity using the Chezy equation. The required rotor diameter for each point was calculated at the maximum depth of the section as well as the available hydrokinetic potential at each point, considering the minimum ( $C_p = 0.25$ ) and the maximum ( $C_p = 0.593$ ) efficiency of a turbine, thus the energy production capacity was calculated at each point. Based on theoretical data collection, it was found that there is no hydrokinetic potential available in the studied points of the São Francisco Verdadeiro River.

**KEYWORDS:** geoprocessing, mapping, hydrokinetic system.

## ÍNDICE

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>i</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>ii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>iii</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>iv</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>v</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. Objetivos.....	2
1.1.1. Objetivo geral.....	2
1.1.2. Objetivos específicos.....	2
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>3</b>
2.1. Matriz energética brasileira.....	3
2.1.1. Cenário brasileiro de energia hidráulica e hidrocínética.....	6
2.2. Energia hidrocínética.....	8
2.2.1. Turbinas hidrocínéticas.....	9
2.2.2. Aplicações das turbinas hidrocínéticas.....	11
2.2.3. Impactos ambientais das turbinas hidrocínéticas.....	12
2.3. Geotecnologias associadas ao gerenciamento de energia.....	14
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>17</b>
3.1. Área de estudo.....	17
3.2. Elaboração de mapas temáticos da área de estudo.....	19
3.2.1. Coleta de dados.....	20
3.2.2. Processamento dos dados.....	22
3.2.2.1. Extração da drenagem.....	22
3.2.2.2. Mapa de uso do solo.....	23
3.2.2.3. Mapas de declividade e hipsometria.....	24
3.2.2.4. Modelo tridimensional.....	24
3.3. Análise de locais com potencial hidrocínético na bacia hidrográfica do rio São Francisco Verdadeiro.....	25
3.3.1. Vazões do rio São Francisco Verdadeiro.....	25
3.3.2. Velocidades da água no rio São Francisco Verdadeiro.....	26
3.4. Determinação do potencial hidrocínético do rio São Francisco Verdadeiro.....	27
<b>4. RESULTADOS</b> .....	<b>29</b>

4.1. Mapeamento temático da bacia hidrográfica do rio São Francisco Verdadeiro.....	29
4.1.1. Uso do solo.....	29
4.1.2. Declividade e hipsometria.....	31
4.1.3. Modelo tridimensional.....	33
4.2. Potencial hidrocínético da bacia hidrográfica do rio São Francisco Verdadeiros.....	33
4.2.1. Seleção dos pontos com potencial hidrocínético.....	33
4.2.2. Perfis das seções transversais para análise do potencial hidrocínético na bacia hidrográfica do rio São Francisco Verdadeiro.....	35
4.2.3. Potencial disponível e alternativas de aproveitamento da energia hidrocínética de acordo com o uso do solo.....	38
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>41</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>42</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O setor energético global encontra desafios em relação à sustentabilidade, meio ambiente e economia (AIZED *et al.*, 2018). E, ainda assim, nos últimos anos as fontes de energia renovável têm contribuído cada vez mais para a produção global de energia (NIEBUHR *et al.*, 2019).

As fontes individuais de energia renovável se mostram fundamentais, dados os desafios individuais de cada país em determinar a combinação ideal de energia (APERGIS, 2016). A adoção de fontes alternativas, mesmo como suplementação às fontes convencionais não renováveis, reduz a dependência das mesmas e os impactos ambientais, e contribui para a redução do impacto da crise energética (KLIEMANN e DELARIVA, 2015).

Nesse sentido, o Brasil encontra-se em constante busca por fontes de energia renováveis, com o intuito de diminuir impactos ambientais, explorando o seu potencial energético e minimizando, assim, as degradações no ambiente, sendo que sua principal matriz energética atual são as usinas hidrelétricas (UHEs) e as pequenas centrais hidroelétricas (PCHs), responsáveis por cerca de 70,6% de toda a energia produzida no país (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2015).

Para obtenção de energia elétrica de fontes renováveis e ambientalmente correta é necessário um estudo inicial, no qual verifica-se a viabilidade do potencial disponível (ARAÚJO, 2016). Os aspectos considerados para determinar a viabilidade do projeto levam em conta os critérios técnicos, econômicos, sociais e ambientais, o qual deve ser elaborado de acordo com o estabelecido pela Resolução CONAMA 279/2001 (MMA, 2016).

O atendimento a esses requisitos é importante pois, mesmo havendo disponibilidade de uma fonte de energia, se não houver demanda, o projeto não alcançará os objetivos econômicos e sociais (PAULA e MARX, 2011). A questão técnica envolve uma análise do potencial disponível e a verificação da melhor maneira de obtenção dessa energia, de forma que o aproveitamento tenha o rendimento esperado (WU *et al.*, 2016).

Nesse sentido, os sistemas hidrocínéticos são uma opção tecnológica para garantir a universalização do acesso aos serviços de energia elétrica que surgiram como alternativa sustentável, capaz de converter a energia cinética dos rios ou correntes marinhas em energia elétrica. Esses sistemas mostram-se viáveis em

regiões que possuam rios de pequeno a grande porte, onde possam ser instaladas turbinas hidrocínéticas (BARRETO e VAN ELS, 2015). Tal aproveitamento é possibilitado considerando as características ideais proporcionadas pelo território nacional, como condições geológicas e potencial hidráulico, que são premissas para se obter maior potência gerada com menor impacto ambiental (WEGNER, 2018).

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo geral**

Mapear o potencial hidrocínético de geração de energia em dez pontos da bacia hidrográfica do rio São Francisco Verdadeiro – Oeste do Paraná, a fim de determinar as principais regiões com potencial à instalação de turbinas.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Elaborar um Modelo 3D da configuração bacia hidrográfica do rio São Francisco Verdadeiro com o uso de técnicas de geoprocessamento;
- Identificar, localizar e mapear dez pontos que representem o curso do rio São Francisco Verdadeiro, para verificação de disponibilidade de potencial hidrocínético;
- Calcular a capacidade de produção de energia nos pontos selecionados do rio São Francisco Verdadeiro.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Matriz energética brasileira

A energia, entendida como recurso natural, serve para transformação de grandezas físicas e é a base para qualquer cadeia produtiva (KUZEMKO *et al.*, 2017). Pode-se classificar a energia em duas categorias principais, referentes à fonte produtora: a energia não renovável, que provém de fontes não renováveis, ou seja, que é virtualmente finita, como, por exemplo: o carvão mineral, o petróleo e o gás natural (MERCURE e SALAS, 2013); e a energia renovável, que provém de fontes renováveis, que é virtualmente infinita, como, por exemplo: solar, eólica e biomassa (IOANNOU *et al.*, 2017). A Figura 1, exemplifica a classificação e divisão da energia segundo a sua fonte e, ainda, subdividindo-as entre fontes primárias e secundárias.

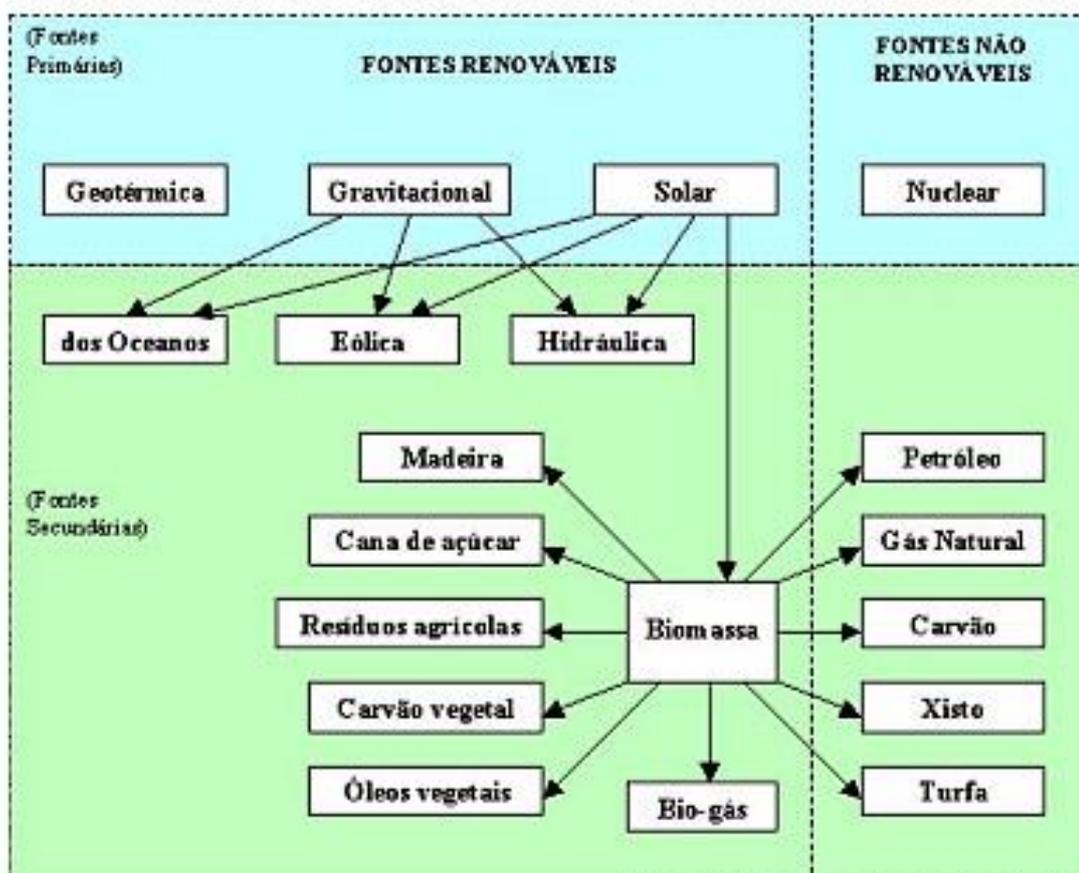


Figura 1 - Fluxograma de classificação de energia segundo sua fonte.  
Fonte: Silva (2004).

Por todo um contexto histórico de formação social, as fontes não renováveis têm sido as mais utilizadas desde a revolução industrial. Porém, segundo o World Energy Council (WEC, 2016), este cenário vem se alterando nos últimos anos. As fontes de energia não renováveis vêm perdendo espaço no mercado de energia para as fontes renováveis. Esse quadro se deve a algumas políticas públicas e investimentos no mercado, que foram adotadas no mundo todo (EMMANUEL e RAYUDU, 2017). A Figura 2 mostra a relação de crescimento das energias primárias de fontes renováveis nos últimos anos em relação às energias de fontes não renováveis:

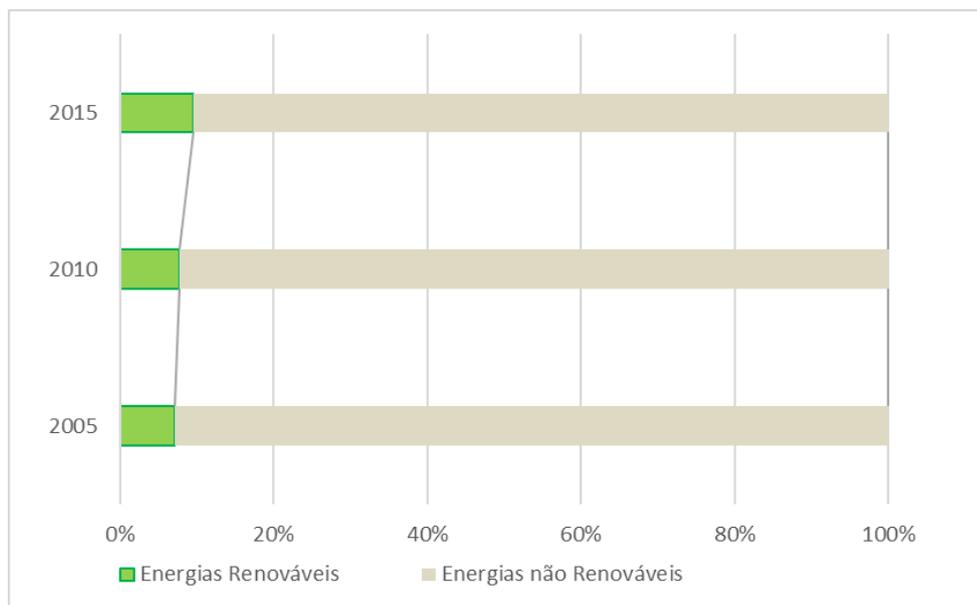


Figura 2 - Comparativo das fontes primárias de energia no mundo, segundo sua fonte. Fonte: Adaptado de WEC (2016).

Observa-se que houve aumento de, aproximadamente, 33% do uso de energias renováveis como fonte primária, passando de 7,2%, em 2005, para 9,57%, em 2015. O Balanço Energético Nacional (BEN) de 2019 confirma o panorama da relação entre as energias renováveis e não renováveis no mundo, apresentado pelo WEC (2016) e demonstra que essa relação não é tão discrepante quando se trata do Brasil.

A participação de renováveis na matriz energética brasileira manteve-se entre as mais elevadas do mundo, em razão do incremento na geração eólica e hidráulica, aumento da oferta de lixo e biodiesel, bem como da redução da oferta das não-renováveis (Figura 3).

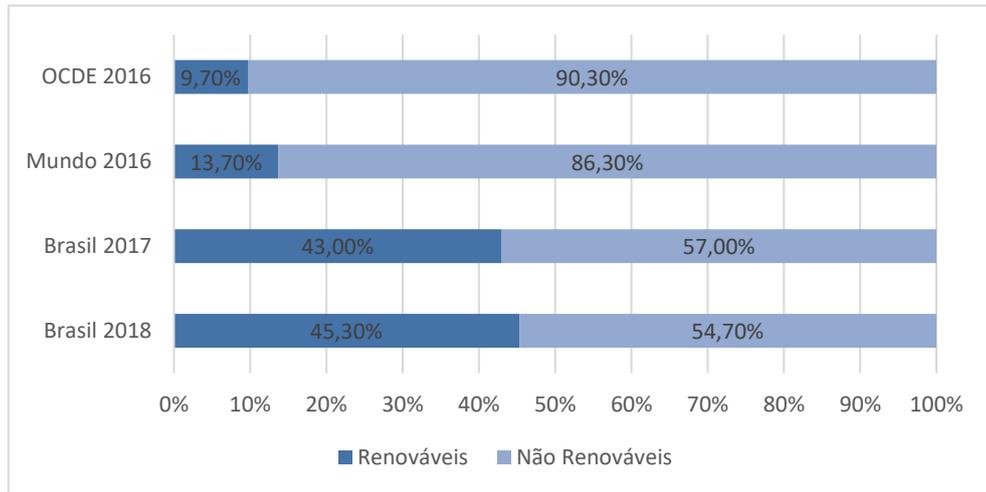


Figura 3 - Comparação do uso de energias renováveis entre o Brasil e o contexto global.

Fonte: Adaptado de Empresa de Pesquisa Energética (2019).

O Brasil possui, atualmente, mais de 210 milhões de habitantes, que estão continuamente utilizando energia, provinda de diversas fontes. A Oferta Interna de Energia (OIE) brasileira é composta por 45,3% de energia renovável e 54,7% de não renovável. Das fontes renováveis 17,4% é biomassa da cana de açúcar, 12,6% da energia hidráulica, 8,4% do carvão vegetal e 6,9% de lixo e demais fontes renováveis. Quanto às fontes não renováveis, 34,4% são representados pelo petróleo e seus derivados, 12,5% gás natural, 5,8% carvão mineral, 1,4% urânio e 0,6% demais não renováveis (EPE, 2019).

A Figura 4 mostra que, para a geração de energia elétrica, o cenário se altera e a maior parte da matriz brasileira de geração é composta por fontes renováveis, diferentemente do que acontece no restante do mundo.

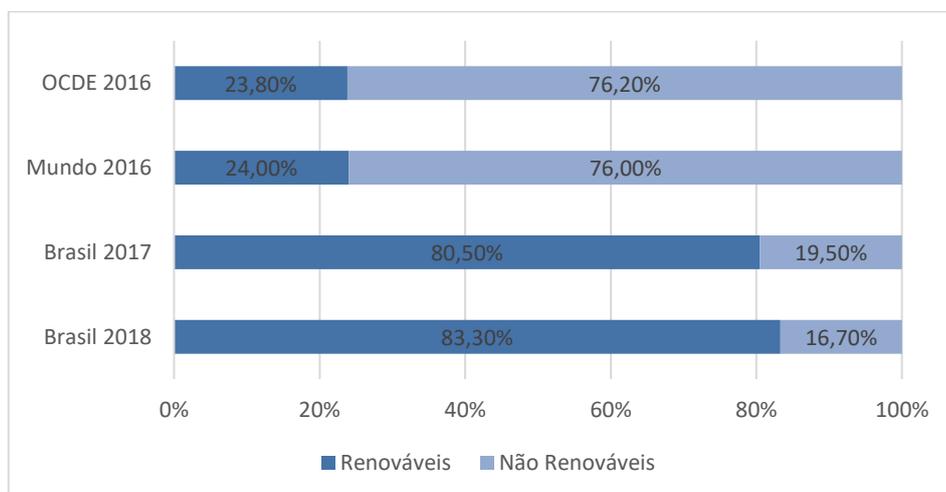


Figura 4 - Participação das fontes na matriz elétrica brasileira e mundial.

Fonte: Adaptado de Empresa de Pesquisa Energética (2019).

A matriz elétrica brasileira é composta predominantemente de fontes renováveis. A Figura 5 demonstra a parcela de contribuição de cada fonte de produção energética para a matriz elétrica brasileira nos anos de 2017 e 2018. Destaque para a energia eólica, a qual teve aumento de sua contribuição de 2017 para 2018, ao passo que há redução da contribuição de derivados de petróleo e carvão.

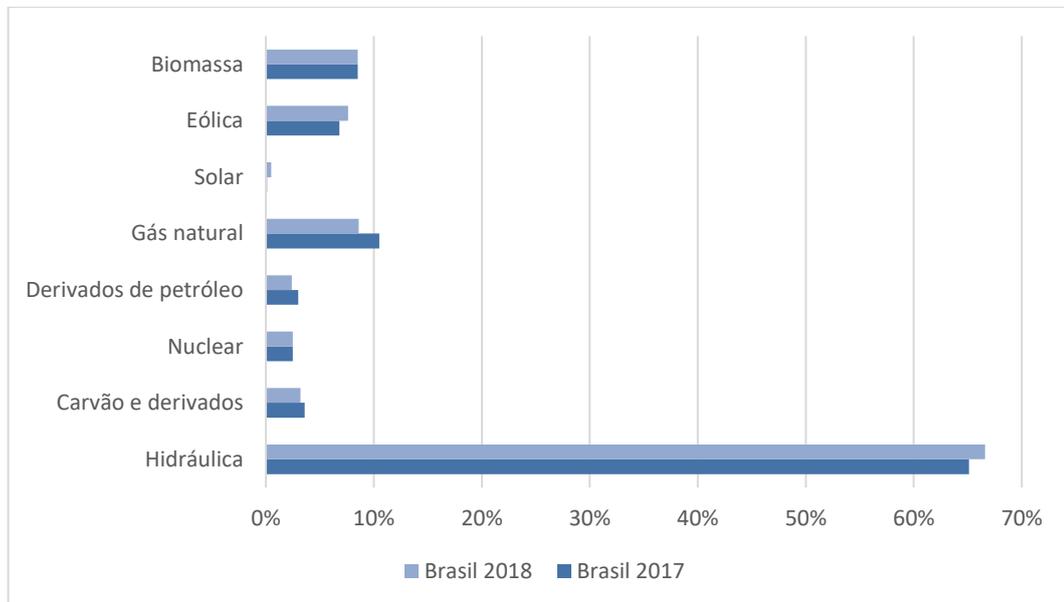


Figura 5 - Comparativo matriz elétrica brasileira 2017 – 2018.  
Fonte: Adaptado de Empresa de Pesquisa Energética (2019).

### 2.1.1 Cenário brasileiro de energia hidráulica e hidrocínética

A energia hidrelétrica é gerada pelo aproveitamento da energia potencial proveniente do fluxo das águas em desnível. É apontada como a mais importante alternativa de energia renovável e limpa, e possui um suporte natural, especialmente nas regiões subtropicais. É uma das energias renováveis mais confiáveis, tecnicamente exploráveis e ambientalmente sustentáveis. A energia hidrelétrica é uma fonte de energia com baixos custos de operação e manutenção e sem custos com combustíveis (WILSON, 2015).

A hidroeletricidade é uma tecnologia madura e plenamente comercial, apesar de existirem possibilidades de redução de custos e aumento de eficiência, especialmente para o caso de projetos de pequena capacidade ou de baixa queda. A hidroeletricidade é, também, uma fonte de energia renovável que apresenta grande flexibilidade, podendo operar como usina de base ou para atender o pico da demanda, permitindo, ainda, o armazenamento de energia (IEA, 2011).

O aumento contínuo do uso de fontes de energia renováveis, incluindo a energia hidrelétrica, é uma estratégia fundamental para limitar as crescentes mudanças climáticas (HARRISON e WHITTINGTON, 2002). Finger *et al.* (2012) indicaram que a energia hidrelétrica representa cerca de 20% da produção mundial de energia elétrica.

No Brasil, atualmente, 65,2% de geração de energia elétrica é provinda da energia hidráulica, possuindo 217 usinas hidroelétricas de grande porte, 710 centrais geradoras hidroelétricas (CGH) e 425 pequenas centrais hidroelétricas. Além disso, ainda estão em construção mais 3 UHE, 4 CGH e 28 PCH, com previsão de aumento de 935.271 kW de potência instalada (ANEEL, 2019).

A geração de eletricidade a partir de energia hidráulica pode ser influenciada por alguns fatores que dificultam sua expansão. Tais fatores podem ser considerados como físicos, representados por problemas devido à falta de conhecimento no detalhe do potencial de recurso hidráulico; impacto climático, que tem influência direta na disponibilidade da matéria-prima para geração; e fatores administrativos, relacionados à questão de autorizações para implantação do empreendimento gerador, todos sendo sanados com estudos específicos prévios para identificar o potencial em determinados trechos de recursos hídricos na área de estudo (MARÍN; MARÍN; APARICIO, 2017).

Apesar de a Energia Hidráulica ser a fonte de produção de energia que mais contribui para a matriz elétrica nacional e a tecnologia para geração de energia elétrica através do potencial hidráulico estar bastante avançada nacionalmente, existe possibilidade de otimização desta geração sem que ocorra impactos negativos à sociedade, com a utilização da hidrocínética (PISH, 2002).

O termo turbinas hidrocínéticas é utilizado para máquinas hidráulicas que convertem a energia cinética de rios ou de correntes de maré em eletricidade. A utilização desta fonte de energia não é atual; por muitos séculos a humanidade explorou a corrente de rios como fonte de energia, utilizando rodas d'água e dispositivos similares. Com o avanço tecnológico e o desenvolvimento de turbinas hidráulicas mais eficientes, tais máquinas foram relativamente esquecidas (BRASIL JUNIOR *et al.*, 2007).

A evolução histórica das turbinas hidráulicas permitiu o desenvolvimento tecnológico de grandes e médios sistemas hidrelétricos, com alta taxa e eficiência de conversão de energia. O uso hidrocínético possibilita a geração de energia elétrica em locais onde a instalação de uma turbina hidráulica não seria eficiente, contribuindo

para maior eficiência da utilização hidroenergética (TIAGO FILHO, 2003; VAN ELS *et al.*, 2003).

O Brasil apresenta grande potencial para a utilização da energia hidrocínética, pela sua hidrografia e pela sua extensa faixa litorânea. Porém, ainda não existem, efetivamente, unidades geradoras de energia elétrica que utilizem a energia hidrocínética, embora existam casos de estudos para viabilizar a implantação de turbinas hidrocínéticas e sua utilização (BRASIL JUNIOR *et al.*, 2007).

## **2.2 Energia hidrocínética**

A geração de energia está diretamente vinculada a questões ambientais, isto porque quando não afeta diretamente o ambiente terrestre por meio de ocupação de grandes áreas, está intimamente relacionada à emissão de poluentes para a atmosfera, contribuindo para as alterações climáticas regionais e até globais (ALVES, 2006).

Diversos países têm investido fortemente na utilização de fontes de energia provenientes de recursos renováveis, principalmente aquelas que causam menor impacto ao meio ambiente (SILVA *et al.*, 2015), uma vez que possuem grande destaque na matriz energética. Martins (2008) apresenta essas fontes como a principal alternativa para suprir a carência da sociedade com relação à qualidade da demanda de eletricidade com a redução de danos ambientais resultantes do consumo de energia.

Em se tratando do fornecimento de água para populações rurais, as fontes de energia renováveis desempenham papel importante ao desenvolvimento destas. O triunfo no fornecimento de água a essas populações está diretamente associado à disponibilidade de recursos energéticos (FEDRIZZI, 1997). A autora ainda cita que algumas das necessidades se apresentam como sendo o fornecimento de água potável para consumo da população, para criação de animais e para a agricultura. O transporte de água por meio de bombas é comumente utilizado na zona rural devido ao seu relativo baixo custo e simplicidade. Em sua maioria, o problema de distribuição de água está relacionado às deficiências energéticas locais para executar o trabalho de extração e transporte de água do reservatório ou manancial até seu destino de utilização.

As turbinas hidrocínéticas utilizam a energia cinética gerada pelo fluxo hídrico dos cursos d'água e transformam essa energia em eletricidade (SILVA, 2011). A energia hidrocínética é um tipo de micro energia hidrelétrica que consiste na extração da energia cinética do fluxo de água em canais abertos e rios através da instalação de turbinas hidrocínéticas, sem a necessidade de construção de barragens, já que este tipo de sistema não demanda de reservatório (OKOT, 2013; YAAKOB et al., 2014; HERMAN et al., 2014; KUMAR et al., 2011; ELBATRAN et al., 2015; CHAMORRO et al., 2013; SHABARA et al., 2015).

### 2.2.1 Turbinas hidrocínéticas (THCs)

As THCs possuem similaridade com as turbinas eólicas em termos de princípios físicos de operação, hardware elétrico e capacidade de velocidade variável para extração ideal de energia (GINTER e PIEPER, 2011). Contudo, a densidade da água é 800 vezes maior que a densidade do ar, de forma que uma corrente marinha de  $19,31 \text{ km.h}^{-1}$  geram quantidade de força equivalente ao contido em vento constante de  $177,03 \text{ km.h}^{-1}$  (KUSCHKE e STRUNZ, 2011). Assim sendo, as THCs são mais eficientes comparadas às turbinas eólicas. Além do mais, turbinas eólicas necessitam de uma grande área de terra de operação, enquanto turbinas hidrocínéticas operam sob água (KUSCHKE e STRUNZ, 2011; YUEN et al., 2009).

Khan et al. (2009) cita que a escolha da configuração das THCs demanda de ampla análise técnica e econômica, e ainda as classifica em três classes distintas, de acordo com o alinhamento do eixo do rotor em relação ao fluxo d'água: eixo horizontal, eixo vertical e fluxo cruzado.

As turbinas de eixo horizontal são muito semelhantes às turbinas eólicas em conceito e design (KHAN et al., 2009). As THCs com estruturas de amarração sólida demandam que a unidade geradora seja colocada próxima ao leito do rio. Já as de amarração flutuante possibilitam que o gerador não submerso seja posicionado próximo à superfície da água (SILVA, 2014). Modelos de turbinas de eixo horizontal podem ser visualizados na Figura 6.



Figura 6 - Turbinas de eixo horizontal.  
 Fonte: Adaptado Maimun *et al.* (2014).

Kirke (2008) explica que as THCs em que o fluxo se dá através do eixo de rotação são comumente chamadas turbinas de eixo vertical. No entanto, devem ser corretamente chamadas de fluxo cruzado, uma vez que sua característica se deve ao fato de que a direção é através do eixo de rotação, e este também pode ser horizontal. Essas turbinas apresentam eixos do rotor ortogonais ao fluxo d'água e paralelos à superfície. As turbinas Darrieus são os modelos mais utilizados. Modelos de turbinas de fluxo cruzado podem ser visualizados na Figura 7.

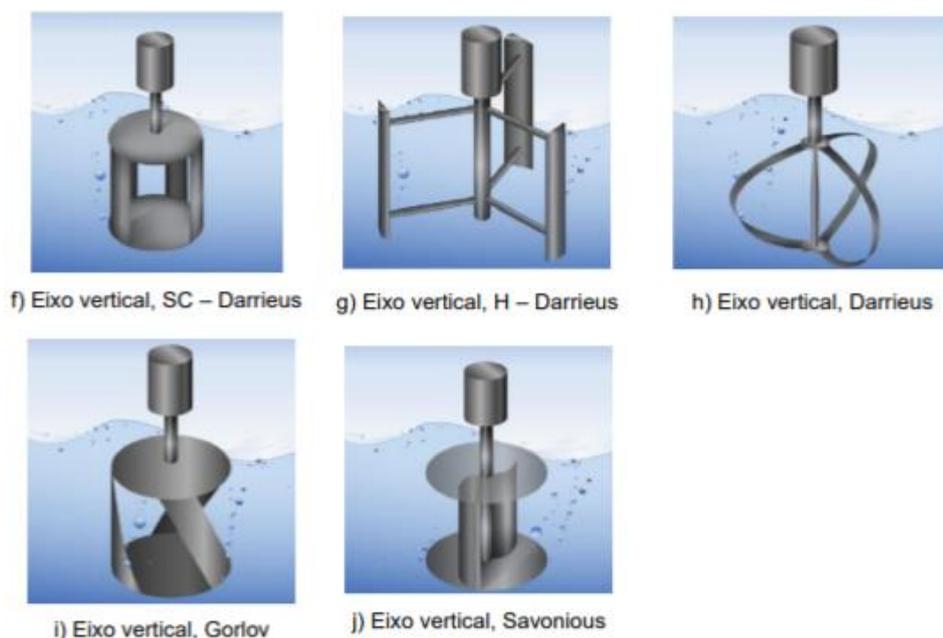


Figura 7 - Turbinas de fluxo cruzado.  
 Fonte: Adaptado Maimun *et al.* (2014).

As THC's também podem ser classificadas com base na elevação, orientação para fluxo up/down e fixo/variável (KHAN *et al.*, 2009). De acordo com a necessidade do projeto, diferentes rotores podem ser hibridizados.

As THC's podem ser colocadas em correntes naturais, marés, correntes oceânicas, vias navegáveis artificiais, em locais que a velocidade da água e parâmetros dos cursos sejam disponíveis (NIEBUHR *et al.*, 2019). Em sua maioria, as turbinas disponíveis no mercado trabalham, em média, acima de  $1,5 \text{ m.s}^{-1}$  e em profundidade mínima de 1 m. Além disso, muitos modelos se assemelham às turbinas utilizadas para a geração de energia eólica, devido à configuração do rotor, das pás, à taxa de extração de energia em relação à velocidade do fluido e ao desempenho em relação ao coeficiente de potência (TIAGO FILHO, 2003).

Dentre as vantagens das THC's, está o fato de apresentarem custo e tempo de instalação menor que as hidrelétricas, provocando menor impacto ambiental, maior previsibilidade e fator de potência que as eólicas. Quanto às desvantagens, as turbinas hidrocínéticas são mais suscetíveis à corrosão, danos por tempestade e crescimento de algas (CUNHA, 2015).

O local ideal para instalação dessas turbinas leva em conta a topografia e as características do rio, como sua largura, profundidade, velocidade e vazão. Os locais com maior potencial são as regiões de curso d'água com declividades mais acentuadas (FELIZOLA *et al.*, 2007).

No Brasil o Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília é a detentora de maior sucesso com geração de energia elétrica a partir de sistemas hidrocínéticos utilizando-se de turbinas axiais (VAN ELS *et al.*, 2003).

### **2.2.2 Aplicações das Turbinas Hidrocínéticas.**

A utilização de energia hidrocínética, em todas as suas aplicações, foi considerada como um processo de conversão de energia com baixo impacto ambiental, que poderia aumentar o potencial energético dos países, principalmente aqueles em desenvolvimento, que necessitam de energia para superar os desafios do crescimento (HOLANDA *et al.*, 2017).

Em todo o mundo já foram instaladas THC's compreendendo sistemas de pequeno porte. Muitos desses sistemas foram propostos como testes de curto prazo, embora suas aplicações forneçam informações sobre o poder atingível da tecnologia. Esses projetos alternativos foram instalados a fim de fornecer soluções energéticas

descentralizadas e são capazes de promover melhorias de otimização de instalações (NIEBUHR *et al.*, 2019).

Como por exemplo, Van Els *et al.* (2003) utilizaram turbinas hidrocínéticas de eixo horizontal com dutos para fins acadêmicos e de demonstrações pela Universidade de Brasília. Khan (2006) e Anyi (2013) também realizaram seus estudos com turbinas de eixo horizontal no Rio Nilo, com a finalidade de bombear água para irrigação de áreas agrícolas no Egito, Sudão e Somália.

O Smart Hydro Power (2017) desenvolveu um projeto inteligente de irrigação na Colômbia, em que alimentava bombas de irrigação fora da rede. Na Alemanha, desenvolveu um sistema hidrocínético que alimentava a rede nacional, o qual era instigado pela política de feed-in-tariff (FIT), uma tarifa de alimentação que se trata de um mecanismo destinado a acelerar o investimento em tecnologias de energias renováveis.

Nos Estados Unidos, Gunawan *et al.* (2015) desenvolveram um projeto utilizando turbinas H-Darrieus à jusante de uma usina hidrelétrica, a fim de aproveitar o potencial local. O Waterotor (2018), desenvolvido pelo Applegate Group juntamente com a Universidade estadual do Colorado, identificou a extensão de cursos com potencial hidráulico em pequena escala, como calhas, quedas d'água verticais e tubulações, e observou grande potencial no estado.

Através desses exemplos de aplicação, observa-se que não somente áreas rurais, ou ainda, áreas remotas têm potencial para instalação de sistemas hidrocínéticos, mas também regiões desenvolvidas apresentam possibilidades de aplicações. Niebuhr *et al.* (2019) ressalta que esses recursos são totalmente palpáveis, e que se faz necessário o incentivo em tecnologias voltadas a sistemas hidrocínéticos, a fim de melhorar o aproveitamento de áreas potenciais, o que auxiliaria na mudança de perfil energético.

### **2.2.3 Impactos Ambientais das Turbinas Hidrocínéticas**

A geração de energia produzida através de sistemas hidrocínéticos é vista como um sistema alternativo ou não convencional, com origem em um recurso renovável. No entanto, as THCs funcionam como moinhos de vento submersos, os quais podem impactar negativamente a biodiversidade aquática (HASLETT, 2016), em razão da movimentação das pás do rotor movendo-se embaixo d'água (INGER *et al.*, 2009).

Em contrapartida, Rosário *et al.* (2014), cita que o impacto ambiental negativo dos sistemas hidrocínéticos é praticamente nulo, uma vez que, não necessita de barragens e não interrompe a navegação ou a passagem da fauna aquática. Além disso, as turbinas hidrocínéticas podem propiciar benefícios à qualidade da água local em função da movimentação dos rotores, em que a rotação das pás é capaz de aumentar a concentração de oxigênio dissolvido (OD) nos corpos d'água. O OD é um fator limitante para a manutenção da vida aquática e de processos de autodepuração, tanto em sistemas aquáticos naturais quanto em estações de tratamento de esgotos (ETE), onde a aeração mecânica é utilizada para compensar as flutuações diárias de OD, mantendo níveis aceitáveis, superiores àqueles cujos processos naturais de produção de oxigênio são incapazes de proporcionar (CETESB, 2021).

O Brasil possui diversos empreendimentos no setor de geração de energia, mas, ao contrário das Centrais Geradoras Hidrelétricas, Pequenas Centrais Hidrelétricas e Usinas Hidrelétricas (ANA, 2019a), ainda não existem legislações específicas para a instalação e utilização de sistemas hidrocínéticos. No entanto, é necessário solicitar ao órgão ambiental a Outorga de Disponibilidade Hídrica para usos não consuntivos (IAT, 2020). O uso não consuntivo refere-se à utilização que não envolve o consumo direto da água, ou seja, aproveita o curso da água sem consumi-la (ANA, 2020b). O conhecimento sobre o uso da água é constantemente aprimorado por meio de levantamentos, estudos setoriais e cadastros de usuários.

Antes de passar por licitação de concessão ou pela autorização do uso do potencial de energia hidráulica, o agente responsável pelo setor elétrico precisa obter a Declaração de Reserva e Disponibilidade Hídrica (DRDH), emitida pela Agência Nacional de Águas (ANA) ou pelo órgão responsável pelos recursos hídricos, de acordo com o domínio do rio. Posteriormente, a DRDH é convertida em autorização/outorga (ANA, 2020c).

Nesse sentido, no estado do Paraná, a Secretaria do Desenvolvimento Sustentável e do Turismo (SEDEST) vem realizando uma série de estudos para estabelecer a eficiência e a celeridade dos serviços públicos disponíveis para o desenvolvimento de um programa voltado a simplificar a abertura e adequação com a legislação de empreendimento no setor de energias renováveis (IAT, 2020).

### 2.3 Geotecnologias associadas ao gerenciamento de energia

As geotecnologias compreendem as técnicas para coleta de informação espacial, bem como seu armazenamento, tratamento, análise e técnicas para seu uso integrado (ROSA, 2011). Assim sendo, atendem e fornecem ferramentas para gestão de recursos, contemplando a sistematização, análise e representação de dados que permitam avaliar um espaço territorial de interesse do pesquisador (WRUBLACK, 2016).

O Sistema de Informação Geográfica (SIG) é caracterizado por unir um conjunto de ferramentas para transformar, armazenar, recuperar e mostrar dados espaciais referenciados, sendo uma das mais completas tecnologias de geoprocessamento existentes, agregando as técnicas de topografia, fotogrametria, cartografia, sensoriamento remoto, geoestatística entre outras (FLORENZANO, 2011). A aplicação de SIG para a geração de produtos cartográficos permite a realização de operações com o uso de grandes volumes de dados, possibilitando analisar diferentes variáveis pertinentes a qualquer projeto que possa ser geolocalizado (VALLE *et al.*, 2016).

Dessa maneira, o uso de geotecnologias permite levantar a partir de técnicas de modelagem e sensoriamento remoto, e, realizando tratamento de dados para estimar o potencial de geração em diversos trechos de uma área específica, as possíveis áreas para realização de estudos mais aprofundados, ou seja, já definindo a partir de alguns filtros as áreas mais assertivas na possibilidade de implantação de unidades geradoras (WEGNER, 2018).

Estudos voltados à gestão do território necessitam do uso de diversas fontes de dados e tratamentos com *softwares* específicos. Dessa forma, ferramentas presentes em diversos SIGs permitem a facilidade na realização de atividades complexas para a integração de dados em diferentes escalas e naturezas (VALLE; *et al.*, 2016).

Weber *et al.* (2003) ressaltam o uso do geoprocessamento aliado à geração de energia através de vantagens relacionadas ao tempo e qualidade dos resultados, visto que possibilita a realização de avaliações complexas em grandes extensões territoriais. Apontam, ainda, uma possível integração de informações de bancos de dados convencionais com dados mapeados, gerando desta forma, resultados de elevado valor para racionalizar e aplicar recursos financeiros e subsidiar a escolha de alternativas mais adequadas do ponto de vista técnico econômico.

Ainda na área energética, Barreto e Van Els (2002) mostram que, através dos níveis espectrais da imagem utilizada no SIG, podem ser medidos os graus de refletância de cada grupo de pixels, o que pode identificar as áreas com maior receptividade de radiação solar diária, nas quais seria interessante a implantação de placas fotovoltaicas (painéis solares). Em regiões onde exista uma considerável quantidade de vegetação de grande porte, não seria aconselhável a implantação de aerogeradores, uma vez que, as árvores se tornam uma barreira natural para o vento, minimizando o potencial energético.

Praciano e Monteiro (2017) citam a relevância da agricultura de precisão aliada ao sensoriamento remoto e geoprocessamento em estudos para avaliar a viabilidade da utilização de energia eólica a fim de atender a demanda energética dos sistemas de irrigação de cultivo característico no estado do Ceará. Outro exemplo de aplicabilidade do geoprocessamento na gestão de energia, Collaço e Bermann (2017), apresentaram estratégias para o planejamento energético municipal a partir da descentralização, buscando eficiência e conservação da energia limpa.

A utilização dos SIGs levou a uma consolidação da avaliação e análise do potencial hidrelétrico existente para pequenos riachos e provou ser útil para o desenvolvimento de várias tecnologias e métodos a serem utilizados para cálculos de potencial de energia elétrica (BAYAZIT *et al.*, 2017).

Wegner *et al.* (2018) estimaram o potencial hídrico em diferentes trechos de drenagem na Bacia do Paraná 3 (BP3), a fim de analisar o potencial de implantação de unidades geradoras de energia, considerando aspectos ambientais limitantes para instalação.

Cruz (2018) desenvolveu um modelo vazão-velocidade para estimar a velocidade média diária em seções de rios a partir de dados de vazão para análise de potencial hidrocínético das maiores bacias hidrográficas do Brasil. Para isso, utilizou a maior e menor vazão da série histórica, constatando que o rio Amazonas apresenta potencial hidrocínético que pode ser explorado durante todo o ano, enquanto que as bacias do São Francisco e do Paraná apresentam potencial para instalação de turbinas hidrocínéticas apenas nos períodos de maiores vazões.

Diante dos exemplos de estudos, visualiza-se a ampla aplicabilidade das metodologias que envolvem geotecnologias na área energética. No caso de estudos de potencial hidrocínético, o levantamento *in situ* pode se tornar oneroso e pouco prático. No entanto, as ferramentas de geoprocessamento, como a geração de bancos

de dados geográficos para grandes áreas, possibilitam estimar potenciais de maneira mais abrangente (LEITE e BRITO, 2012).

Através de metodologias em SIGs é possível delimitar a área de estudo, realizar a extração da drenagem, bem como obter parâmetros físicos dessa área. É possível ainda, geolocalizar pontos e estabelecer rotinas de automatização que favoreçam agilidade no levantamento desses dados.

Dessa maneira, para o levantamento de potencial hidrocínético, as geotecnologias permitem a integração de estimativas de vazões (dentre as quais existem vários métodos que relacionam as variáveis existentes, funções para estimativa, parâmetros para resultado com características físicas da área de drenagem) com outros planos de informação que atuam como limitações para possível implantação de empreendimentos (GASQUES *et al.*, 2018).

O uso das geotecnologias permite o desenvolvimento de ferramentas para modelagem e sensoriamento remoto, a fim de realizar o tratamento dos dados para estimar o potencial de geração de energia com maior agilidade e praticidade, além de reduzir custos no apoio à tomada de decisões por técnicos específicos (WRUBLACK, 2016).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Área de estudo

O presente estudo foi desenvolvido na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco Verdadeiro (SFV), inserida na Bacia Hidrográfica do Paraná 3, que drena suas águas ao reservatório da Usina Hidrelétrica de Itaipu. O rio SFV contém a área de drenagem mais extensa e representativa na bacia incremental da usina e, por esse motivo, possui grande relevância na qualidade da água do Lago de Itaipu (DIAS *et al.*, 2014). A unidade de estudo localiza-se ao sul do Brasil e a oeste do estado do Paraná, como mostrado na Figura 8. Possui área de 2.219,19 km<sup>2</sup>, onde tem influência total ou parcial em 11 municípios do Oeste do Paraná, como mostrado na Figura 9.

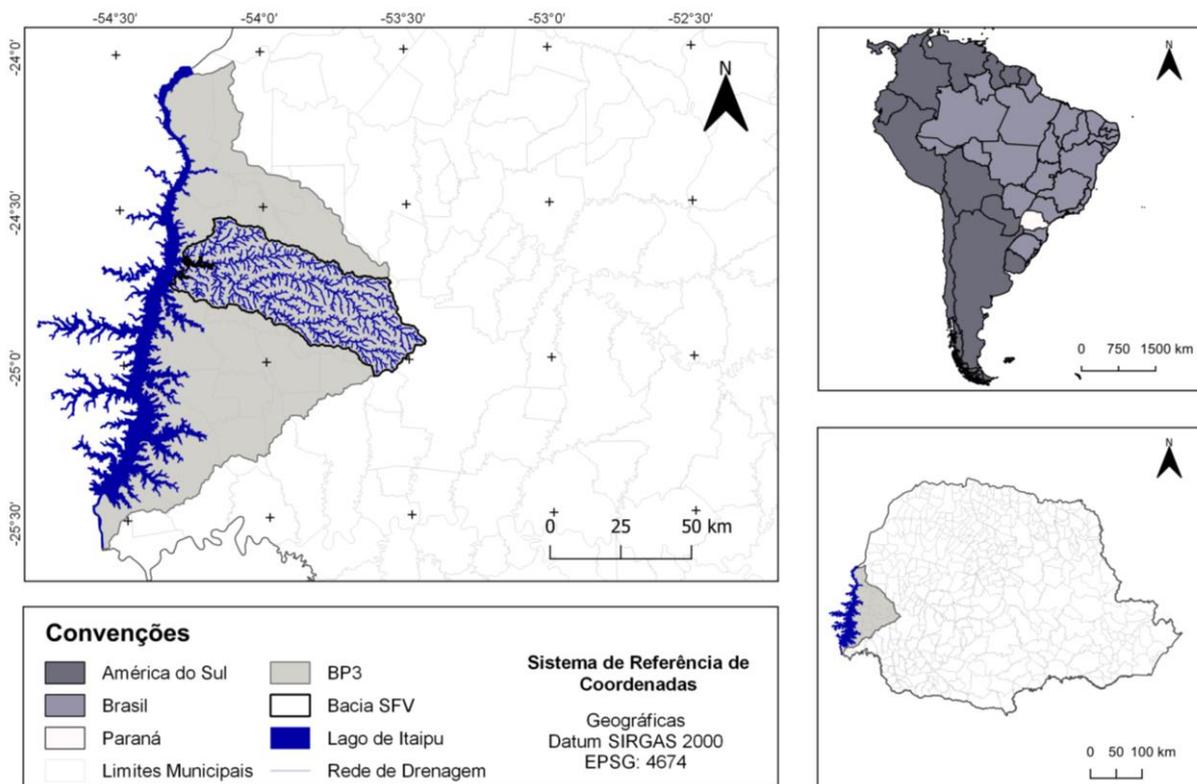


Figura 8 - Localização da bacia hidrográfica do Rio São Francisco Verdadeiro.

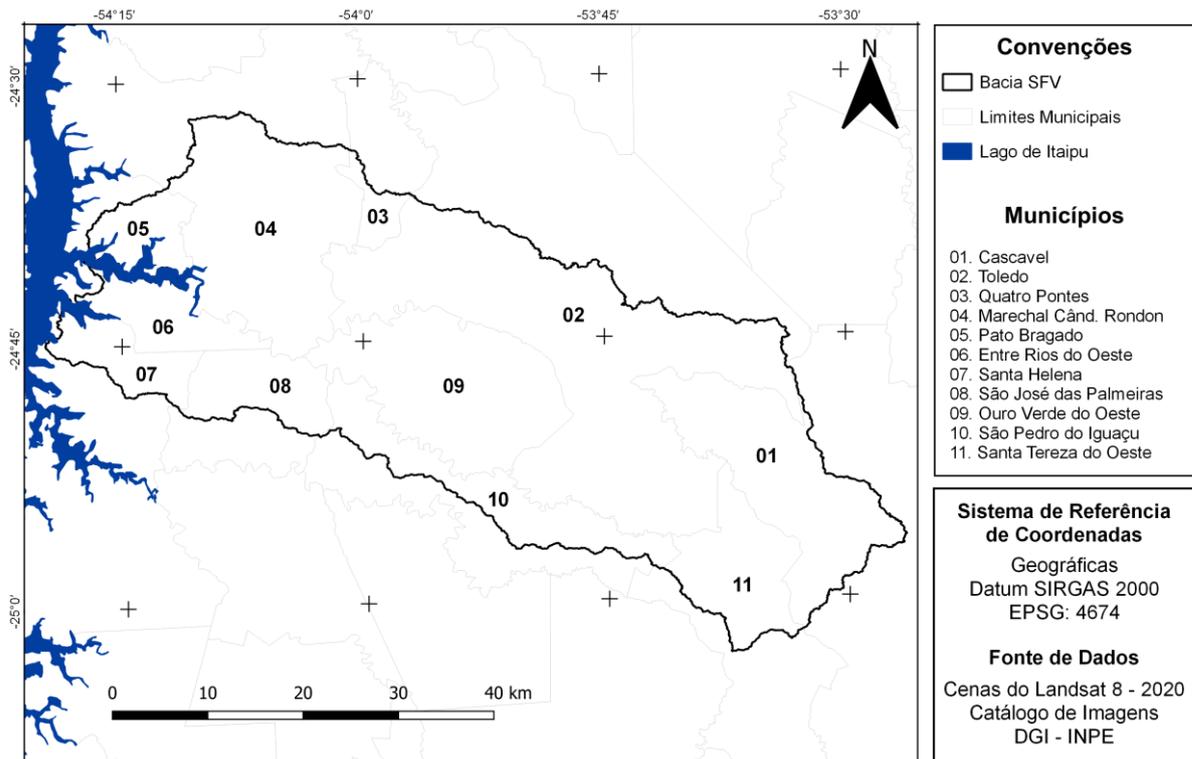


Figura 9 - Municípios inseridos na bacia do Rio São Francisco Verdadeiro.

Com exceção de Cascavel, Marechal Cândido Rondon, Santa Helena e Toledo, todos os outros municípios apresentam populações próximas ou inferiores a 10.000 habitantes, com densidade demográfica abaixo da média paranaense, que em 2010 foi estimada em 52,40 hab.km<sup>-2</sup> (IBGE, 2018).

O rio SFV percorre 240,00 km no seu canal principal e sua rede hidrográfica percorre aproximadamente 3.280,00 km até encontrar o reservatório (DIAS *et al.*, 2014). Seus afluentes são: Arroio Grande, Arroio Ligeiro, Arroio Tamoio, Sanga Canoinha, Sanga Canela, Sanga Canelinha, Sanga Barra Escura, Sanga Arapaçu, Arroio Lopeí, Sanga Dorano, Sanga Pernilongo, Sanga Curta, Sanga Gerivá, Sanga Mandarina, Sanga Tapuí, Sanga Hervalzinho, Sanga das Pacas, Arroio Toledo, Sanga Ipiranga, Sanga Perdida, Sanga Golondrina, Sanga Guarani, Sanga Laranjal, Sanga Laje, Sanga Manaus, Sanga Pinhalzinho, Sanga Pardo, Sanga Cedro, Sanga São João, Sanga Garaipó, Sanga Sete Cachorros, Sanga Cachorro Perdido, Sanga Xaxim, Sanga Perdida, Sanga Coati, Sanga Enganador, Sanga Angico, Sanga Ipê, Sanga Lola, Sanga Macuco, Sanga do Pato, Sanga Perdido e Sanga Eldorada (OLIVEIRA, 2016).

A sub-bacia foi a primeira bacia brasileira a ser inserida no programa Hydrology for the Environment, Life and Policy (HELP) da UNESCO, o qual fomenta o

gerenciamento de bacias hidrográficas em todo o mundo de acordo com os critérios sustentáveis.

A região como um todo apresenta economia fortemente voltada às atividades agroindustriais (IPARDES, 2019), especializada na cadeia produtiva do plantio de soja e milho, na industrialização de carne avícola e suína, além da intensa produção de gado leiteiro. É intensamente explorada pela agricultura intensiva mecanizada, mas com diferentes níveis de ocupação em função das condições de relevo e características locais. Possui uma agroindústria dinâmica e em expansão, mas centralizada em alguns municípios polos. Desta forma, seu crescimento tem sido heterogêneo, com municípios em fase de expansão populacional e municípios com crescimento populacional mínimo ou mesmo negativo (ITAIPU, 2012).

De acordo com a Itaipu Binacional (2004), a área de contribuição da bacia do rio SFV é de extrema importância para a BP3 e, conseqüentemente, para o reservatório da Itaipu Binacional. A empresa desenvolveu uma série de medidas que visam o monitoramento dos impactos ambientais e a adoção de ações que os minimizem. Atualmente, os estudos realizados na bacia São Francisco Verdadeiro podem ser visualizados em um site, com uma espécie de portal da bacia, divulgando as ações e pesquisas existentes, sendo gerenciada pela Itaipu Binacional e pelo Centro Internacional de Hidroinformática (CIH, 2016).

A área de estudo abrange áreas essenciais para a conservação da biodiversidade e manutenção de recursos, como unidades de conservação, corredores da biodiversidade, reservas de patrimônio privado e áreas de interesse ecológico relevante (SILVA e GOMES, 2018).

### **3.2. Elaboração de mapas temáticos da área de estudo**

Todos os procedimentos envolvendo técnicas de geoprocessamento foram realizados em ambiente SIG, no software de livre acesso QGis 3.10 (versão estável do SIG no período de desenvolvimento da pesquisa). Para que se pudesse fazer uso de todo seu pacote de ferramentas, incluindo as que contém ferramentas de desenvolvimento externo, como as do GRASS GIS 7.8.2 e SAGA GIS 2.3.2, realizou-se a instalação avançada do QGis por meio da rede OSGeo4W, selecionando-se todos os arquivos necessários para o correto funcionamento das ferramentas.

Mediante a utilização do QGis, elaborou-se o mapeamento temático (declividade, hipsometria, uso do solo, hidrografia e modelo tridimensional) e identificação do potencial hidrocínético da bacia hidrográfica do rio São Francisco Verdadeiro. Definiu-se, para todos os procedimentos, o Sistema de Referência de Coordenadas (SRC) Universal Transversa de Mercator (UTM), Datum Sirgas 2000, EPSG: 4674.

### **3.2.1. Coleta de Dados**

Foram coletados os Modelos Digitais de Elevação (MDE) obtidos pelo projeto NASA EarthData, obtidos pelo satélite ALOS, sensor PALSAR, no ano de 2011, referente à área de estudo, bem como, imagens em formato GeoTIFF do Landsat 8 (L8) correspondentes ao ano de 2020.

Para a realização do download do MDE, aplicaram-se os filtros necessários para a seleção, sendo o tipo de busca definido como geográfico, o conjunto de dados como Alos Palsar e o filtro adicional de terreno de alta resolução corrigido, que corresponde ao Modelo Digital de Elevação. A área de interesse foi selecionada manualmente, conforme indicado na Figura 10a.

Após a aplicação dos filtros, foi possível observar todos os dados disponíveis para região de interesse, dos quais foram selecionados os que melhor se enquadraram às necessidades do estudo (Figura 10b).

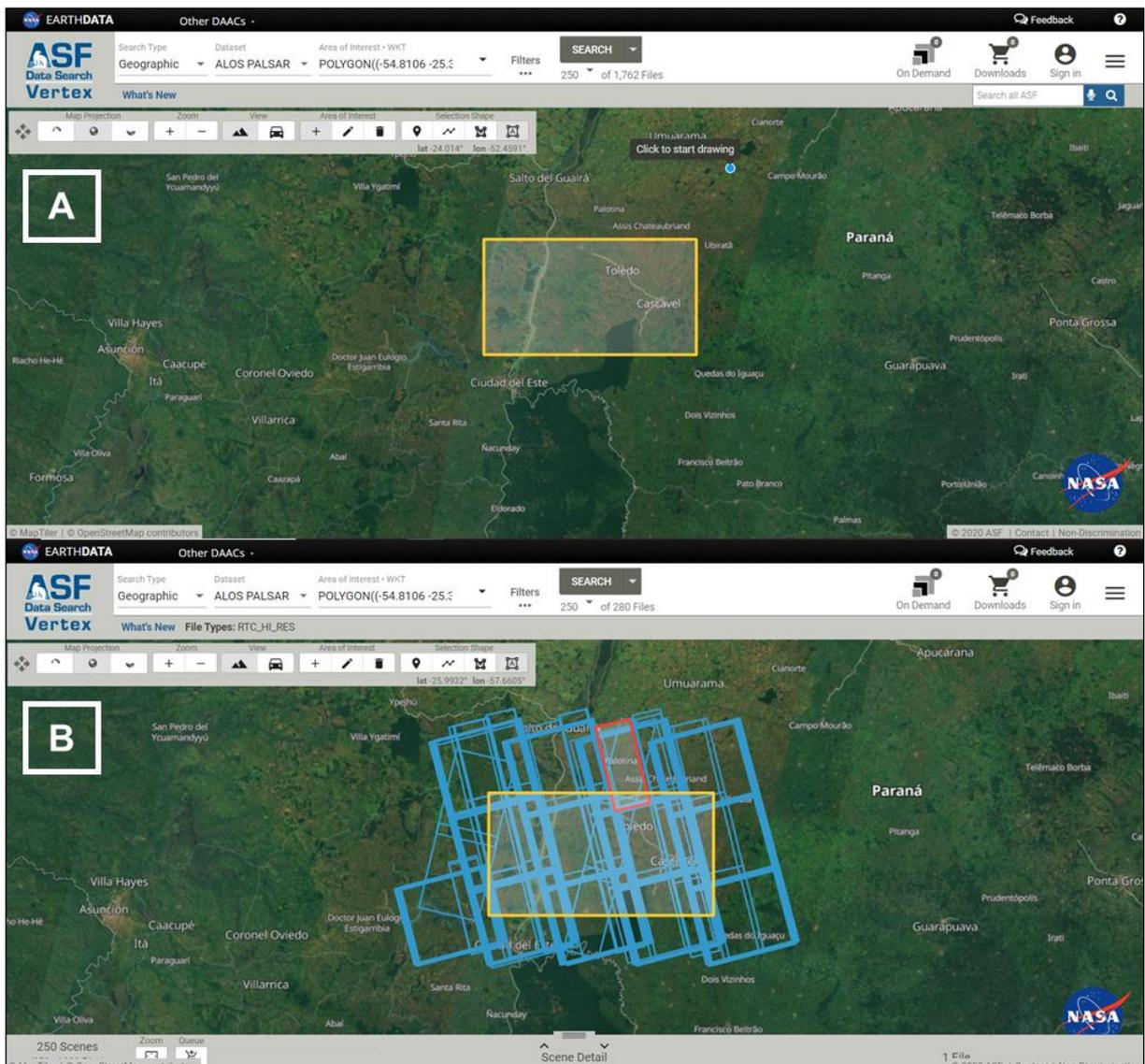


Figura 10 - Interface do projeto NASA EarthData. Aplicação dos filtros e delimitação da área (acima). Visualização dos dados disponíveis para a área delimitada (abaixo).

As imagens de satélite foram obtidas pelo Catálogo de Imagens do INPE, no qual foi necessário o cadastramento, seguido da aplicação dos filtros (escolha do satélite, período de interesse, órbita e ponto), como mostrado na Figura 11. Em seguida, solicitou-se a aquisição das imagens do Landsat 8 (L8), que possuem 16 bits de resolução radiométrica (65.536 níveis de cinza).

Mediante a deliberação, fez-se o download das bandas espectrais 4, 5 e 6, obtidas do sensor OLI, de órbita/ponto 224/77 e 223/77, que correspondem ao retângulo envolvente da área de estudo, com datas de captura de maio e julho de 2020, respectivamente.

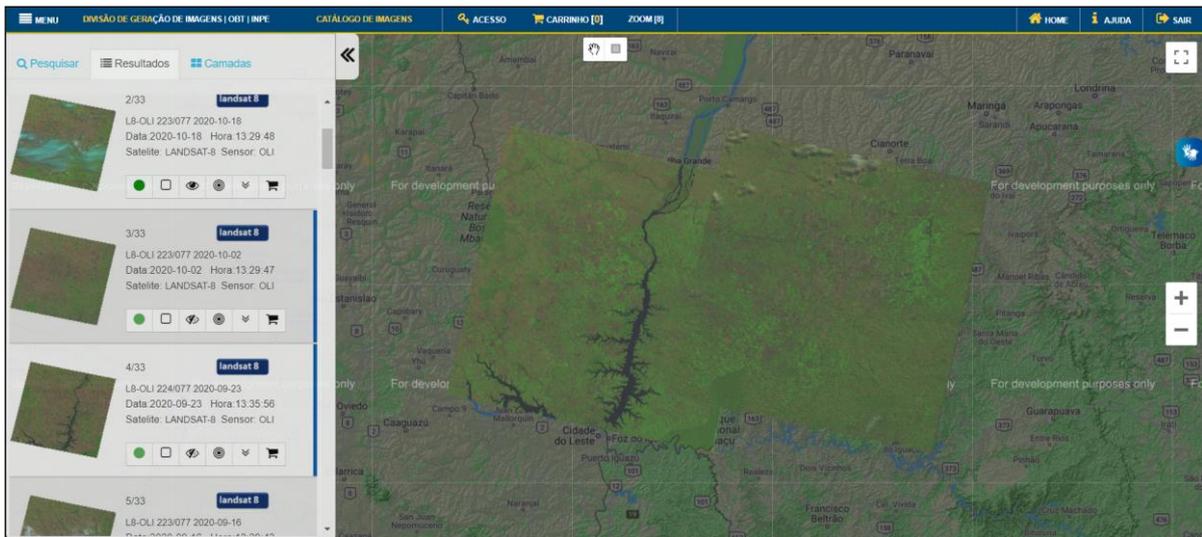


Figura 11 - Interface do resultado de busca no Catálogo de Imagens do INPE.

### 3.2.2. Processamento dos Dados

Tanto os MDEs quanto os arquivos TIFF foram importados para o QGIS e reprojutados para o Sistema de Referência de Coordenadas UTM, Datum Sirgas 2000, EPSG: 4674. Inicialmente, a fim de melhorar a apresentação visual das imagens e aumentar o poder de discriminação dos alvos, realizou-se o processo de composição colorida, resultando em imagem falsa-cor 6R5G4B.

Realizou-se, então, o mosaico dos MDEs e das imagens do L8, com a utilização da sequência de ferramentas: Raster → Miscelânea → Mesclar, em que, selecionou-se o conjunto de dados (MDEs ou imagens) que pretendia-se mosaicar, bem como, o recorte dos respectivos mosaicos através da máscara vetorial na extensão shapefile correspondente ao limite da bacia hidrográfica. Para isso, foram utilizadas as ferramentas: Raster → Extrair → Recortar raster pela camada de máscara, onde selecionou-se o mosaico e o arquivo contendo o limite da bacia.

A partir dos dados reprojutados, mosaicados e recortados, extraiu-se a drenagem e realizou-se o mapeamento de uso do solo, declividade e hipsometria, seguido da elaboração do modelo 3D.

#### 3.2.2.1. Extração da Drenagem

Para a extração dos cursos hídricos que dão origem à bacia hidrográfica do rio SFV, utilizou-se o MDE. Na Caixa de Ferramentas de Processamento selecionou-se

a ferramenta `r.stream.extract`, em que configurou-se a partir do MDE, quanto ao valor para acumulação de fluxo mínimo para cursos d'água. Experimentou-se os valores de 250, 500, 1.000 e 2.000, sendo que o valor 1000 apresentou a representação da drenagem mais satisfatória. O tipo de saída selecionado foi o de linha.

### 3.2.2.2. Mapa de Uso do Solo

Definiu-se o uso e ocupação do solo mediante a utilização de um classificador supervisionado, plugin Dzetsaka. Para a continuidade do processo de classificação, foi criada uma camada shapefile contendo polígonos representativos de cada classe de uso do solo. Para isso, foram coletadas, no mínimo, 30 assinaturas espectrais para cada uma das classes. Ao acionar o plugin Dzetsaka, selecionou-se o raster referente à composição colorida (cena do L8 realçada) e a camada shapefile criada no processo anterior, contendo as classes de uso do solo. Executou-se, então, o processo de classificação.

Com a geração da imagem classificada, foram associadas cores às classes de água, área urbana, pastagem, solo exposto e vegetação. A avaliação da classificação pautou-se na comprovação matemática dos resultados, a partir da geração automática da matriz de confusão das classificações, seguido do cálculo do Desempenho Geral (DG) definido pela Equação 1 e pela utilização do Índice *Kappa* (K), mostrado na Equação 2.

$$DG = \frac{D}{T} \quad (1)$$

Em que  $D$  são os elementos da diagonal principal e  $T$  é o número total de amostras.

$$K = \frac{D-Q}{T-Q} \quad \text{onde} \quad Q = \sum_{r=1}^r X_{i+} * X_{+i} \quad (2)$$

Em que  $X_{i+}$  é o total da linha para uma dada categoria informacional e  $X_{+i}$  é o total da coluna para uma dada categoria informacional.

Para auxiliar na análise das classificações, os valores do Índice *Kappa* foram interpretados conforme os limiares estabelecidos por Landis e Koch (1977), conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Limiares do Índice *Kappa*

<b>Índice <i>Kappa</i></b>	<b>Concordância</b>
0,00	Péssima
0,01 - 0,20	Ruim
0,21 - 0,40	Razoável
0,41 - 0,60	Boa
0,61 - 0,80	Muito Boa
0,81 - 1,00	Excelente

### 3.2.2.3. Mapas de Declividade e Hipsometria

As cartas de declividade e hipsometria foram geradas a partir do mosaico do MDE e os resultados foram expressos em porcentagem. A partir da imagem obtida, selecionou-se a ferramenta *r.reclass* do GRASS GIS e as categorias de declividade de acordo com o proposto por Spörl e Ross (2004, Tabela 2). O mapa hipsométrico foi elaborado com uma amplitude de classes de 139,00 m, obtendo-se 5 classes.

Tabela 2 - Categorias de Declividade

<b>Classe</b>	<b>Categoria</b>	<b>Intervalo do grau de declividade do terreno (%)</b>
1	Muito fraco	< 6
2	Fraco	6 a 12
3	Médio	12 a 20
4	Forte	20 a 30
5	Muito forte	> 30

### 3.2.2.4. Modelo Tridimensional

A elaboração do modelo 3D foi realizada com a utilização do *plugin* Qgis2threejs Exporter. Ao acionar o *plugin*, selecionou-se o MDE configurado com o mesmo gradiente de cores das classes hipsométricas e configurou-se a cena com o exagero vertical de 10,00 m, valor que possibilitou a visualização de detalhes do modelo.

### **3.3. Análise de locais com potencial hidrocínético na bacia hidrográfica do rio São Francisco Verdadeiro**

O estudo para determinar se um local comporta um sistema hidrocínético demanda de medições de profundidade do rio e da velocidade do curso d'água. Porém, durante a prospecção, uma avaliação preliminar é suficiente para selecionar ou descartar prováveis locais (ARAUJO, 2016).

#### **3.3.1. Vazões do rio São Francisco Verdadeiro**

Tradicionalmente, a avaliação dos recursos hídricos é realizada utilizando-se dados históricos de vazão observados através de estações fluviométricas (WEGNER *et al.*, 2019). A regionalização de vazões tem sido realizada com o objetivo de disponibilizar informações hidrológicas em locais sem dados ou com poucas informações disponíveis. Porém, a determinação das características físicas das bacias de drenagem para cada local de interesse limita consideravelmente a aplicação dos resultados de um estudo convencional de regionalização de vazões (BAENA *et al.*, 2004).

Para análise das regiões que apresentam potenciais para instalação de turbinas hidrocínéticas, foi necessário estimar a vazão em cada ponto do rio São Francisco Verdadeiro. A regionalização das vazões utilizadas nesse trabalho foi obtida em Wegner *et al.* (2019), processo que consistiu no uso de parâmetros obtidos através da caracterização morfométrica como variáveis explicativas em um modelo de regressão múltipla. Os 1.548 pontos do rio São Francisco Verdadeiro com vazões estimadas podem ser visualizados na Figura 12.

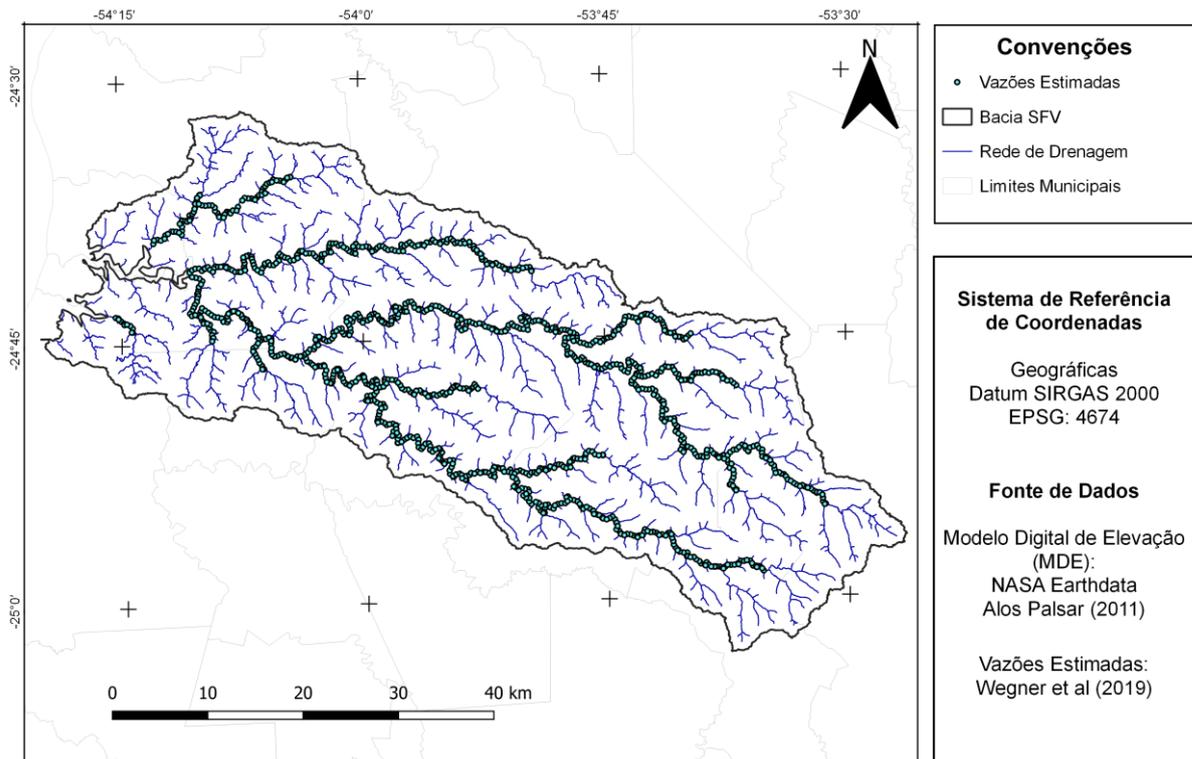


Figura 12 - Mapa de localização dos pontos com vazão estimada do rio São Francisco Verdadeiro.

Os dados de regionalização de vazão consideraram o período de março a agosto, correspondente ao período seco da bacia e, dessa maneira, fornecendo resultados confiáveis para a segurança energética.

### 3.3.2. Velocidades da água no rio São Francisco Verdadeiro

A partir da análise das vazões, foram escolhidos 10 pontos ao longo do curso do rio SFV que apresentaram diferentes valores de vazão e declividade, dos quais foram calculados seus respectivos valores de velocidade da água. Buscou-se selecionar os pontos que fossem representativos ao curso do rio em estudo.

Para o cálculo da velocidade da correnteza do rio em cada ponto é necessário conhecer a vazão e área da seção transversal. Como as vazões dos 4 pontos selecionados já são conhecidas, a área da seção transversal foi obtida mediante a utilização de geotecnologias. O processo de obtenção dos perfis das seções transversais se deu com a criação de *shapefile* com a geometria do tipo linha, a qual compreende a largura do rio (de margem a margem).

Para a continuação do processo foi necessária a instalação do *plugin* Profile Tool. Ao ativá-lo, selecionou-se o MDE como *layer* base, e o shapefile que corresponde à largura do rio em cada um dos pontos e, dessa forma, o complemento fez a leitura do perfil da seção transversal.

As informações constantes nos perfis foram distância e altitude, as quais possibilitaram calcular a profundidade. O perfil foi exportado em arquivo DXF e, ao ser importado para o Autodesk AutoCAD 2019 (versão para estudante), foram calculados os valores de Área Molhada e Perímetro Molhado. Com a obtenção desses valores, foi possível utilizar a equação de Chezy (Equação 3), com o coeficiente de Manning ( $n$ ) para determinar a velocidade média.

$$V = \frac{1,486 R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}}{n} \quad (3)$$

Em que,  $V$  é a velocidade média (m/s),  $R$  é o raio hidráulico (relação entre perímetro molhado e área molhada da seção),  $S$  é a declividade e  $n$  é o coeficiente de rugosidade de Manning (Arroios e Rios/Categoria 2/Condições Regulares = 0,035).

### 3.4. Determinação do potencial hidrocínético do rio São Francisco Verdadeiro

Para o cálculo do potencial hidrocínético dos pontos localizados no rio São Francisco Verdadeiro, calculou-se o diâmetro do rotor necessário para identificar a área varrida, o qual foi determinado em função da profundidade obtida através do perfil das seções transversais.

Punys *et al.* (2015) citam que a velocidade e profundidade dos rios são parâmetros que possibilitam o dimensionamento do rotor em um projeto de turbinas hidrocínéticas. Nesse sentido, assim como em Cruz *et al.* (2020), a relação utilizada para determinar o diâmetro do rotor necessário pode ser visualizada na Equação (4).

$$D = Y - \frac{1}{7}Y - \frac{2}{7}Y \quad (4)$$

Em que,  $D$  é o diâmetro do rotor necessário (m) e  $Y$  é a profundidade (m).

O potencial hidrocínético foi calculado com base na Equação (5) para duas situações: a primeira, em que  $C_p = 0,593$  (BETZ, 1926), uma vez que este valor é a

máxima eficiência que uma turbina pode atingir (KUMAR e SARKAR, 2016); e a segunda, em que  $C_p = 0,25$ , valor de eficiência que as pequenas turbinas em rios podem atingir (VERMAAK *et al.*, 2014).

$$P = 0,5 C_p A \rho V^3 \quad (5)$$

Em que  $P$  é a potência disponível (W),  $C_p$  é o coeficiente de potência e  $A$  é a área da seção transversal do rotor da turbina ( $m^2$ , Equação 6).

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (6)$$

Onde  $\rho$  é a densidade da água ( $997 \text{ kg/m}^3$ ) e  $V$  é a velocidade da água (m/s).

O cálculo do potencial hidrocínético de cada um dos pontos levou em consideração apenas uma turbina posicionada no ponto de maior profundidade do trecho. Mediante a obtenção dos valores potencial hidrocínético em cada um dos pontos selecionados, calculou-se a Capacidade de Produção de Energia.

$$CPE = P N 24h \quad (7)$$

Em que  $CPE$  (mês) é a capacidade de produção de energia ( $W \text{ h}^{-1}$ ) e  $N$  é o número de dias no mês (considerou-se 30 dias).

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Mapeamento temático da bacia hidrográfica do rio São Francisco Verdadeiro

#### 4.1.1 Uso do solo

A composição colorida 6R5G4B (Figura 13), resultou em imagem falsa-cor, elaborada para a classificação de uso do solo da bacia do rio SFV. Ao aplicar o contraste, evidencia-se a vegetação em tons de verde, solo exposto e área urbana em tons de roxo, a fim de facilitar a interpretação das imagens.

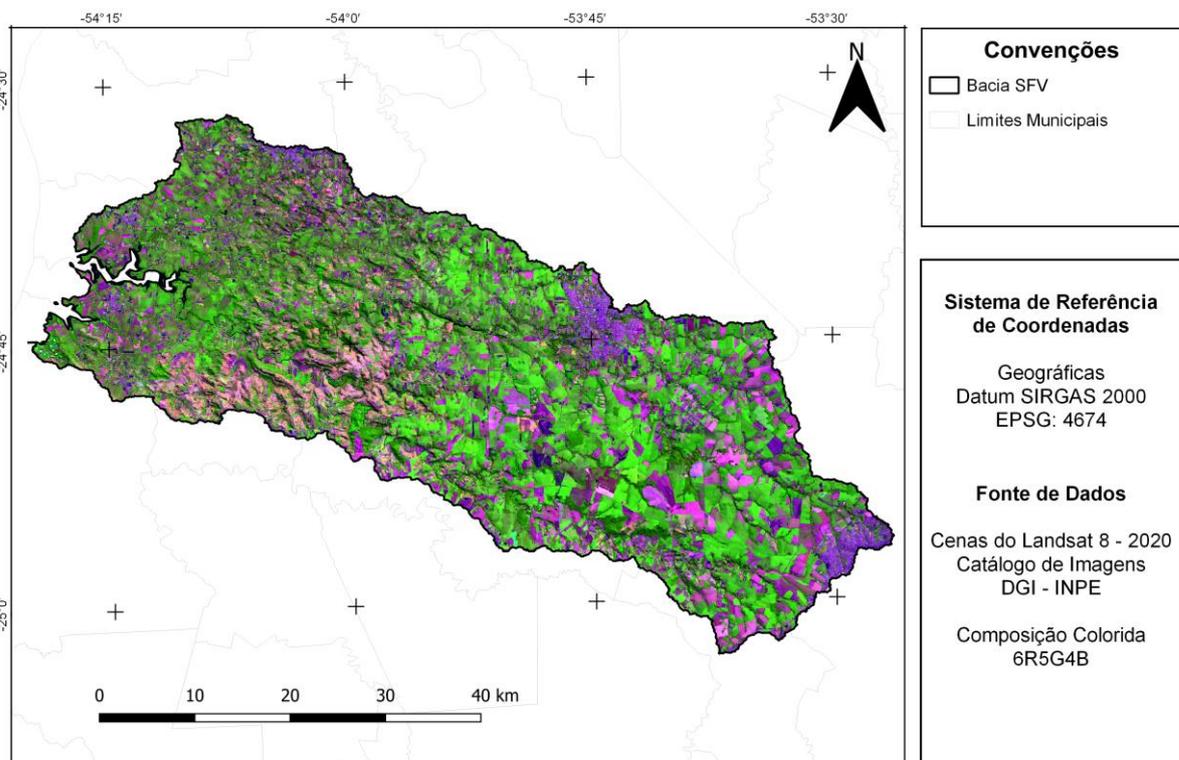


Figura 13 - Mapa da composição colorida falsa cor 6R5G4B, das cenas do Landsat 8.

A partir da cena do Landsat 8, no ano de 2020, observa-se que as porções referentes à área urbana e alguns fragmentos de solo exposto apresentam comportamento espectral semelhantes, sendo esses em tons de roxo. A agricultura, assim como a vegetação, apresenta tons de verde e a pastagem, tons de rosa/bege.

Para fins de classificação, as áreas referentes à agricultura e solo exposto foram agrupadas em uma única classe, visto que, dependendo da época de captura

da imagem de satélite, ambas as classes representam o mesmo tipo de uso, por exemplo, no período de entressafra, as áreas agricultáveis poderão estar sem cobertura vegetal, caracterizando-se como solo exposto.

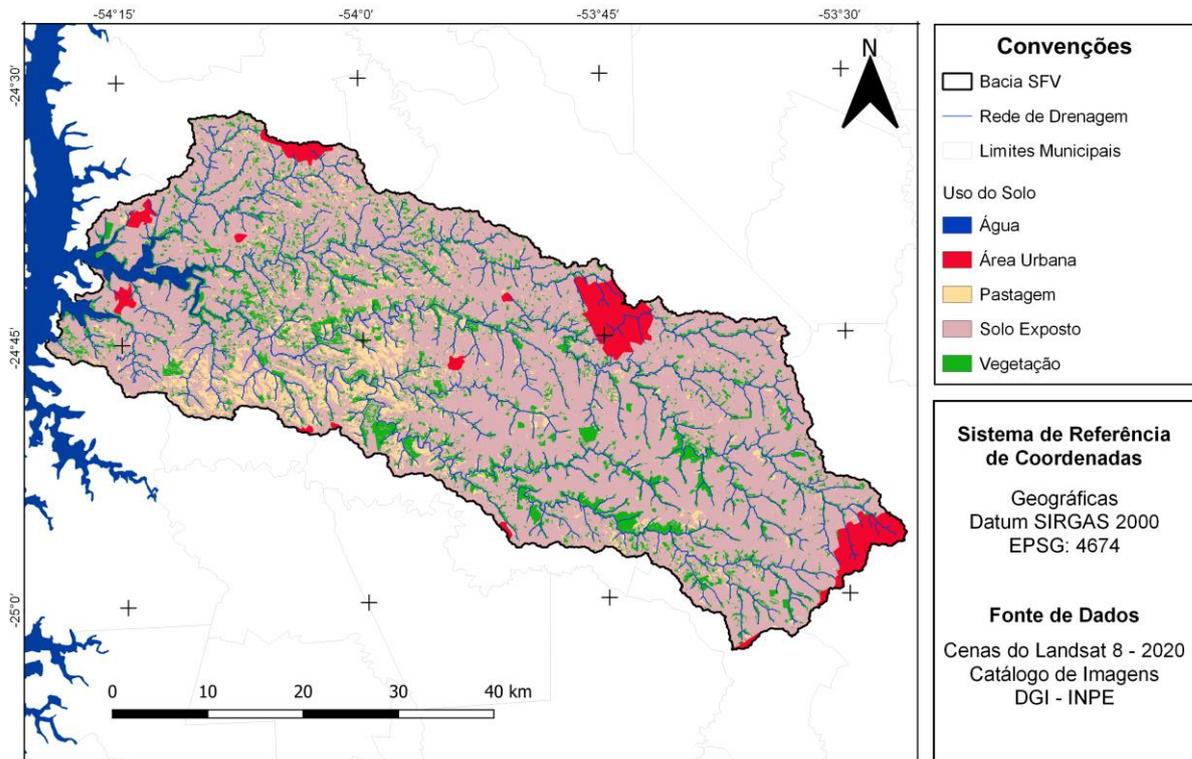


Figura 14 - Mapa de uso do solo da bacia hidrográfica do rio São Francisco Verdadeiro.

Tabela 3 - Áreas das classes de uso do solo da bacia hidrográfica do Rio São Francisco Verdadeiro.

<b>Classe</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentagem</b>
Água	2,75	0,12%
Área Urbana	92,59	4,05%
Pastagem	158,34	6,92%
Solo Exposto	1.724,74	75,35%
Vegetação	310,53	13,56%
<b>Total</b>	<b>2.288,95</b>	<b>100,00%</b>

Na Figura 14 apresentou-se o uso e ocupação do solo da bacia em estudo, dos quais destacam-se as três maiores manchas de área urbana, sendo os municípios mais populosos da bacia: Cascavel, Toledo e Marechal Cândido Rondon. As pequenas frações de área urbana representam os municípios de Santa Tereza do

Oeste, São Pedro do Iguaçu, Ouro Verde do Oeste, São José das Palmeiras, Entre Rios do Oeste, Marechal Cândido Rondon, e Pato Bragado.

Na bacia do SFV, verifica-se a predominância das atividades agrícolas, abrangendo cerca de 75% da área total (Tabela 3). Observa-se, ainda, que as áreas com maior incidência de pastagem, reserva legal e reflorestamento localizam-se próximas ao setor de médio curso da bacia, regiões que apresentam-se incompatíveis com práticas de mecanização agrícola. Nos setores de baixo e alto curso da bacia do rio SFV verifica-se que a vegetação concentra-se principalmente às margens dos canais de drenagem e, embora em fragmentos pequenos, correspondem a 13,56% do total da área de estudo.

#### 4.1.2 Declividade e Hipsometria

Para melhor entendimento acerca do relevo da área de estudo, além da utilização da imagem de satélite, elaborou-se o mapa de declividade (Figura 15) de acordo com as categorias propostas por Spörl e Ross (2004), em que definem como Muito Fraco o intervalo com declividade do terreno inferior a 6%, Fraco como sendo de 6 a 12%, Médio para declividades de 12 a 20%, Forte para o intervalo de 20 a 30% e Muito Forte para os intervalos que apresentam declividades superiores a 30%.

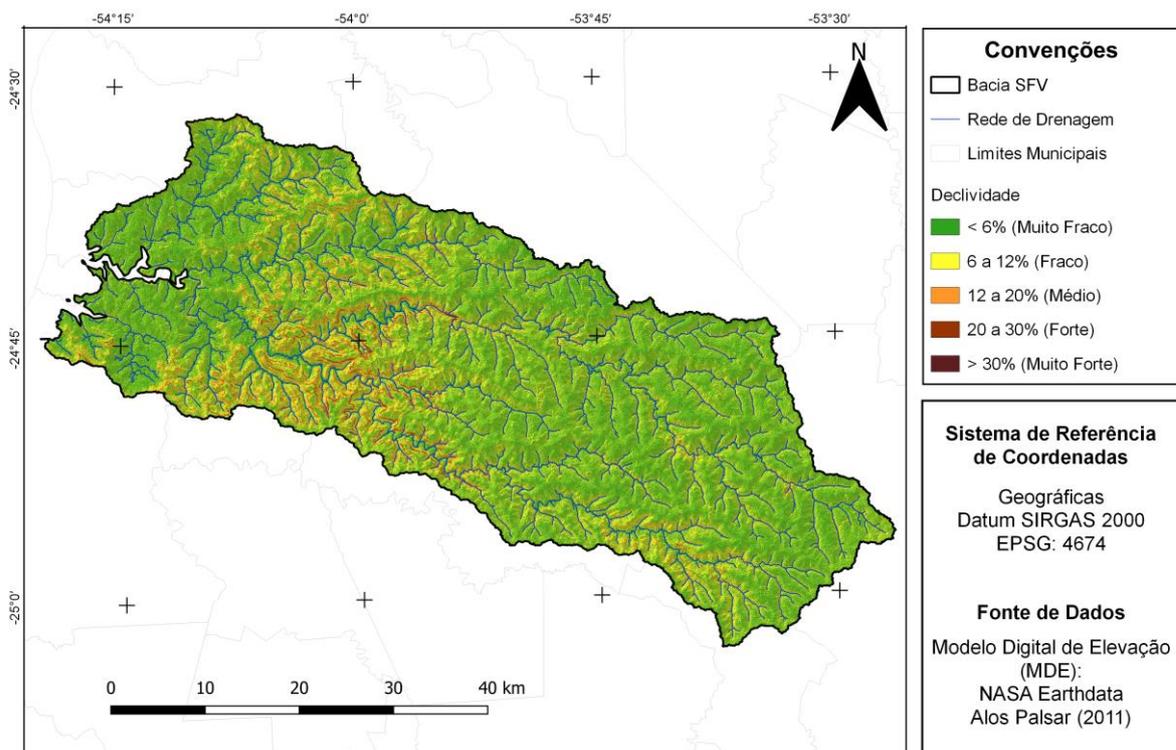


Figura 15- Mapa de declividade da bacia hidrográfica do rio São Francisco Verdadeiro.

Verificou-se (Figura 15) que, no setor de alto curso, ocorrem terrenos mais elevados e que nos relevos mais planos predominam declividades definidas como Muito Fraca a Fraca (0 a 12%).

No setor de médio curso ocorrem relevos mais dissecados, em que é mais intensa a presença de declividade nas faixas de Fraca a Forte (6-30%), com ocorrência de faixas de declividade Muito Forte (>30%). No setor de baixo curso, de terrenos com menor elevação, próximos ao lago de Itaipu, observa-se novamente áreas com relevos de baixa dissecção, com declividade predominantemente Muito Fraca (<6%).

Rocha e Bade (2018) citam que nessa região a declividade é mais acentuada, e associa-se à ocupação por pastagem e vegetação nativa ou reflorestada. Já nas regiões de média e baixa vertentes, de forma retilínea, mas levemente inclinada, destacam-se usos de agricultura temporária, entremeados às pastagens e à vegetação florestal.

A fim de identificar as diferenças de altitude na bacia em estudo, elaborou-se o mapa hipsométrico (Figura 16). A bacia do rio São Francisco Verdadeiro apresenta altitudes entre 200,00 m a aproximadamente 790,00 m. Por esse motivo, foram classificadas em 5 classes com intervalos de 139,00 m. Observa-se que as regiões mais altas concentram-se próximas ao município de Cascavel e que regiões mais baixas localizam-se às margens do reservatório da Usina de Itaipu.

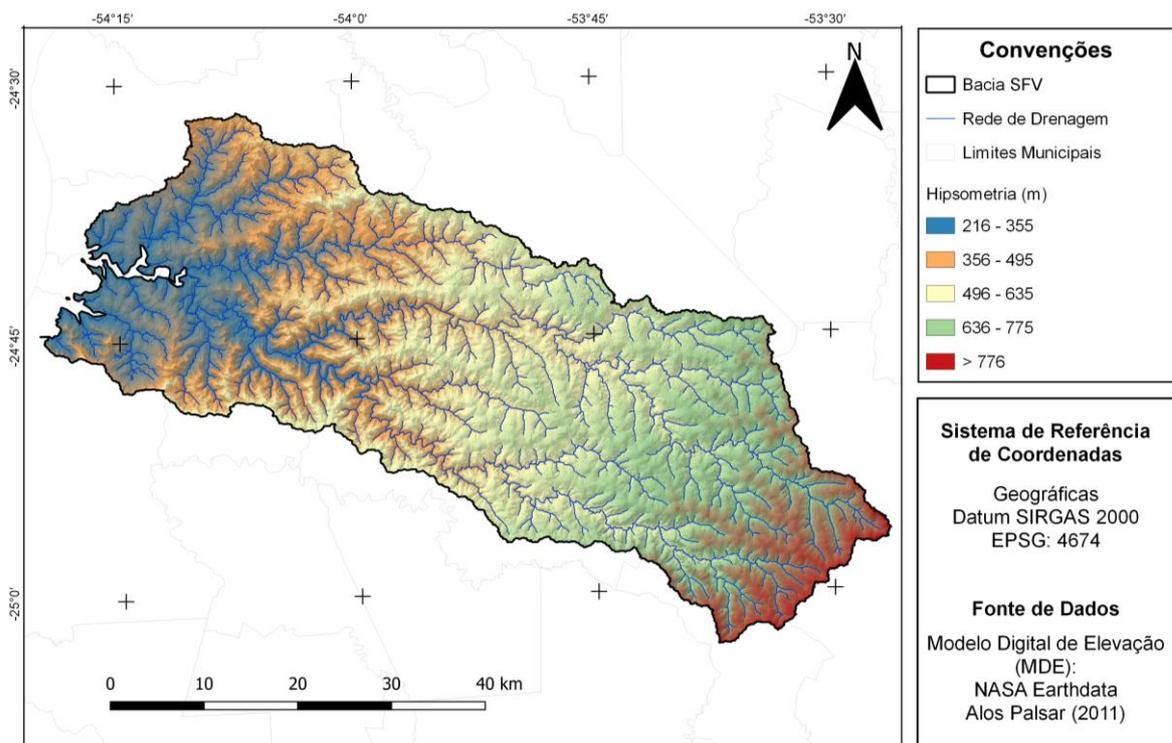


Figura 16 - Mapa hipsométrico da bacia hidrográfica do rio São Francisco Verdadeiro.

### 4.1.3 Modelo Tridimensional

Para facilitar a visualização e identificar as diferenças de altitude no relevo e a declividade da bacia, pode-se observar, na Figura 17, diferentes ângulos da bacia do rio SFV em modelo 3D, sendo que foram utilizadas tanto as cores referentes às classes hipsométricas (Figuras 17A, B e C), quanto a máscara da imagem de satélite do ano de 2020 (Figuras 17D, E e F).

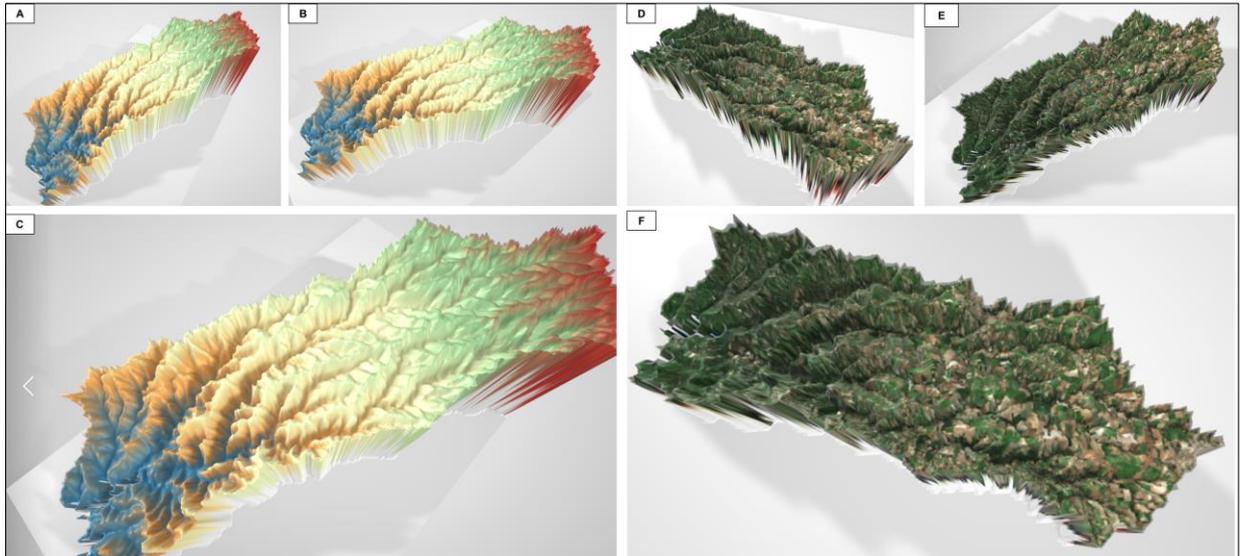


Figura 17 - Modelo 3D da bacia hidrográfica do rio São Francisco Verdadeiro.

A partir da análise dos modelos tridimensionais, visualizam-se detalhadamente e com precisão, as características referentes aos índices de declividade e altitude, confirmando o fato de que as áreas que apresentam maiores declividades são as regiões próximas ao rio SFV e que as áreas de maior altitude localizam-se próximas às frações urbanas da bacia hidrográfica. Ao presente estudo, a ocorrência de altas declividades próximas às margens do rio SFV mostra-se como um fator de destaque.

## 4.2 Potencial hidrocínético da bacia hidrográfica do rio São Francisco Verdadeiro

### 4.2.1 Seleção dos pontos com potencial hidrocínético

Selecionaram-se 10 pontos com vazões estimadas no período seco da região, ilustrados na Figura 18. Assim como a vazão, a declividade foi um dos parâmetros observados para a seleção das regiões com maior potencial à instalação das THCs.

Felizola et al. (2007) e Botan et al. (2016) citam que em locais com altas declividades, a velocidade da água é maior e, por essa razão, regiões situadas em locais com declividade mais acentuada são consideradas de maior potencial hidrocínético.

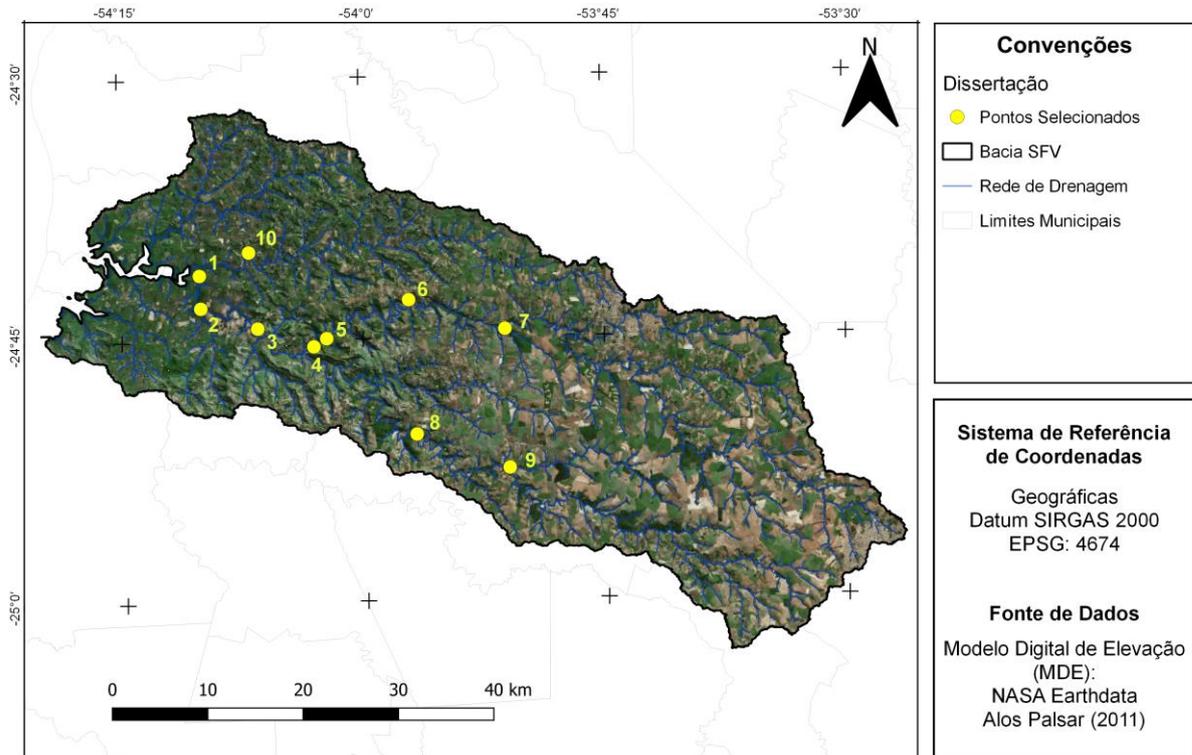


Figura 18: Mapa de localização dos pontos com vazão estimadas selecionados.

Na Tabela 4 são apresentados os dados de vazão e declividade nos 10 pontos selecionados. Ao analisar os valores das vazões estimadas em período seco, verifica-se que as maiores vazões não se encontram necessariamente em áreas mais declivosas. Ou seja, esses fatores não são diretamente proporcionais.

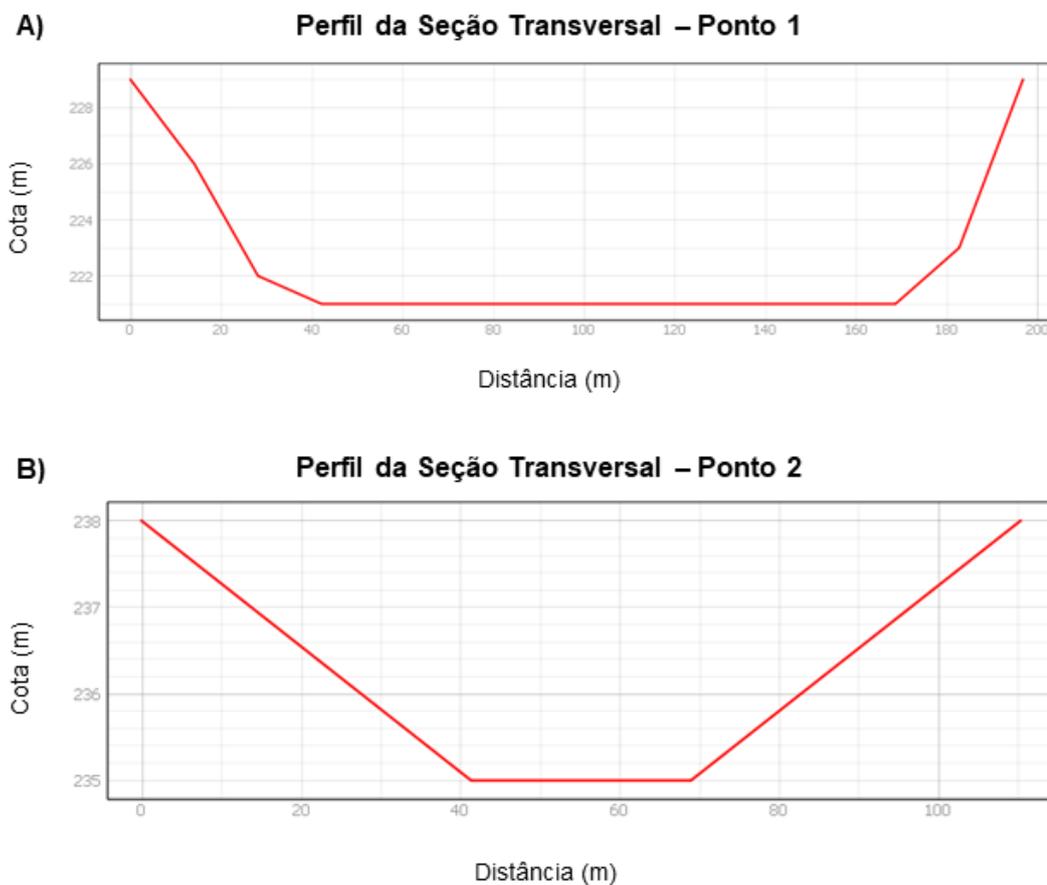
Tabela 4 - Parâmetros de seleção dos pontos com vazão estimada na bacia hidrográfica do rio São Francisco Verdadeiro.

Ponto	Vazão Período Seco ( $m^3 s^{-1}$ )	Declividade
1	74,66	Forte
2	70,86	Muito Fraco
3	67,15	Fraco
4	57,71	Fraco
5	56,43	Fraco
6	50,39	Fraco
7	45,25	Forte
8	41,54	Forte
9	34,63	Forte
10	33,87	Forte

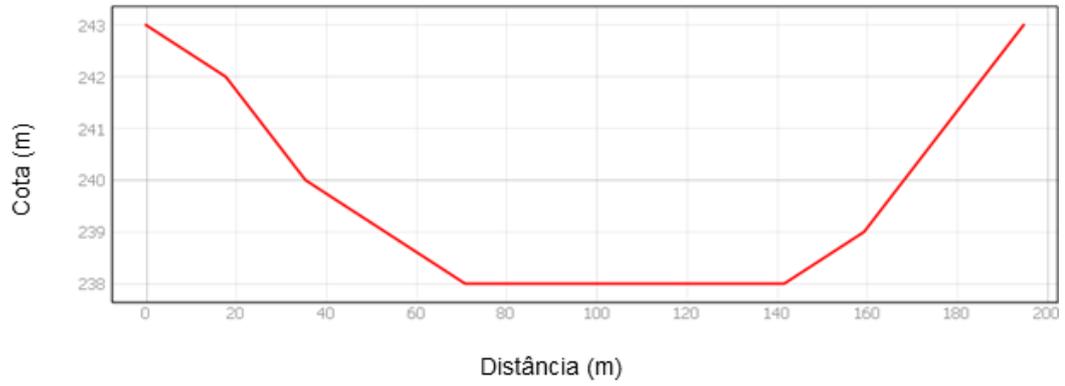
Essa situação é confirmada em Botan et al. (2016), que realizaram um estudo para aproveitar o potencial hidrocínético em condições de rios que apresentam baixa declividade e baixas velocidades na região norte do Brasil. Nessa mesma pesquisa, os autores ressaltaram que é possível aproveitar o potencial hidrocínético em regiões com essa característica, desde que o projeto técnico busque adequação ao seu campo de operação, de modo a operarem de acordo com as condições do cenário.

#### 4.2.2 Perfis das seções transversais para análise do potencial hidrocínético na bacia hidrográfica do rio São Francisco Verdadeiro

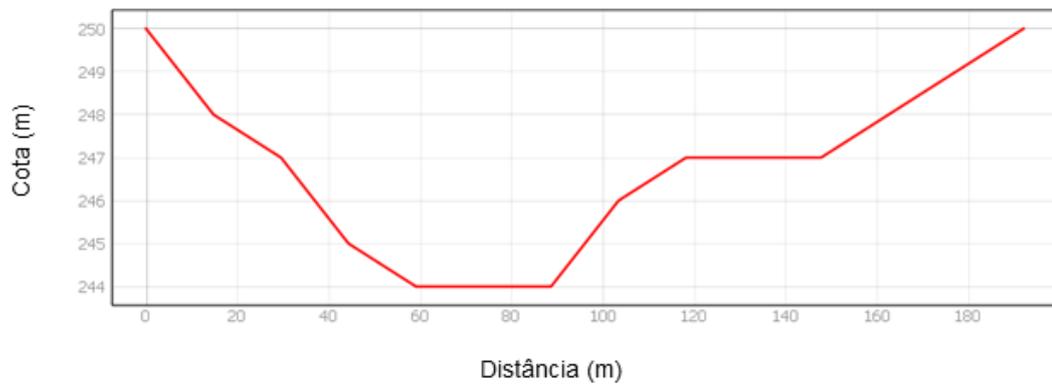
Para obter a velocidade da correnteza de um rio, são necessários os valores de vazão e área da seção transversal desse rio. Dessa maneira, na Figura 19, observa-se o perfil das seções transversais do rio São Francisco Verdadeiro em cada um dos 10 pontos.



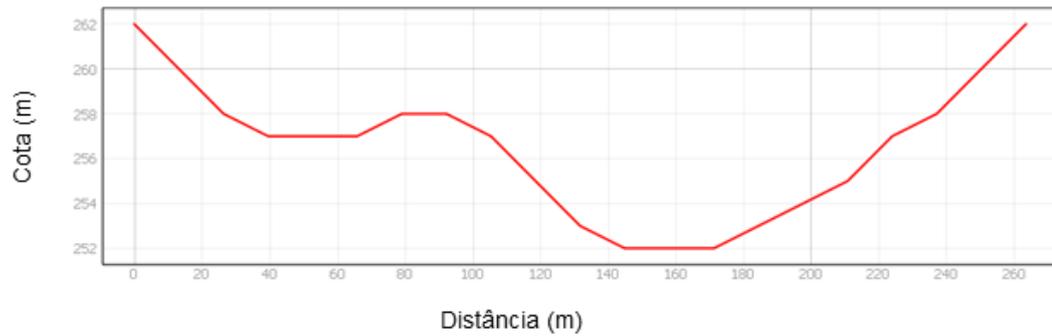
**C) Perfil da Seção Transversal – Ponto 3**



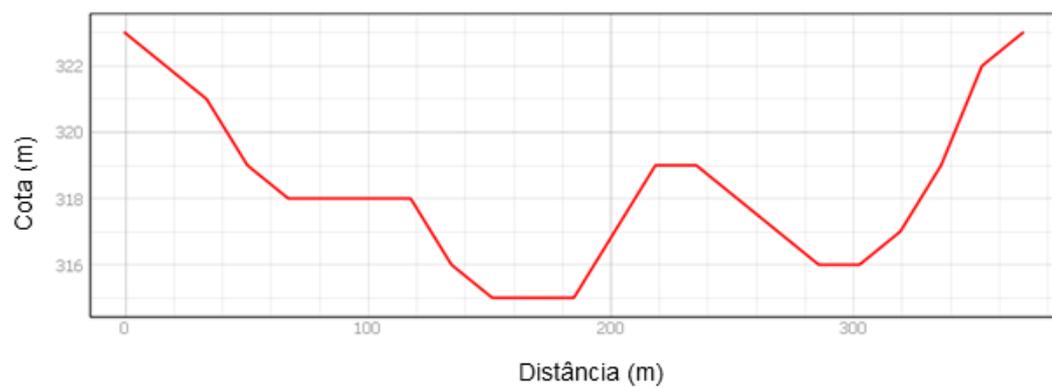
**D) Perfil da Seção Transversal – Ponto 3**



**E) Perfil da Seção Transversal – Ponto 4**



**F) Perfil da Seção Transversal – Ponto 6**



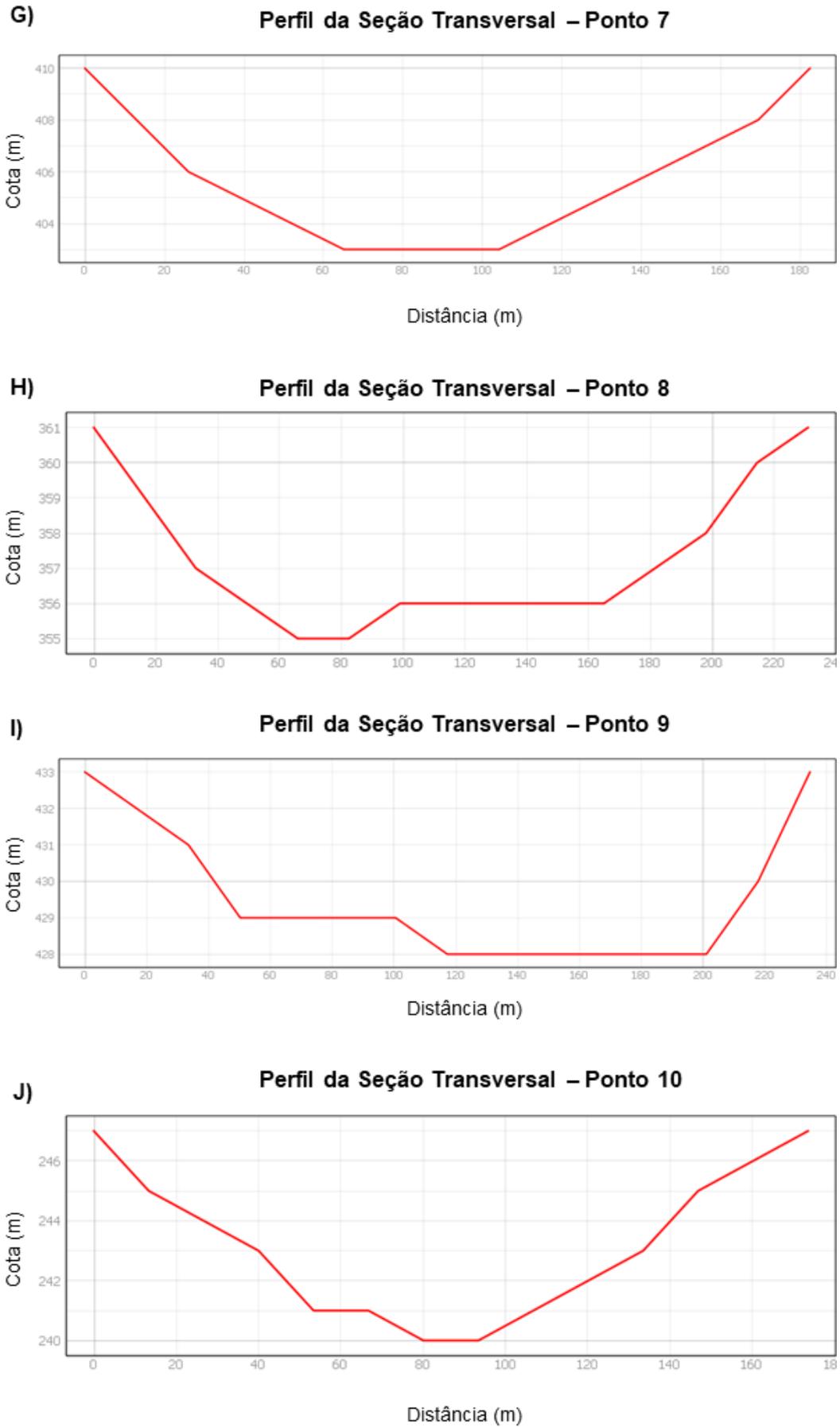


Figura 19: Perfis da Seções Transversais.

As informações obtidas pelos perfis das seções transversais de largura do trecho, profundidade máxima e área molhada, foram elencados na Tabela 5. E observa-se que as maiores profundidades observadas são de 8 e 10 metros.

Tabela 5 - Dados obtidos através dos perfis de seção transversal.

Ponto	Largura (m)	Profundidade máxima (m)	Área molhada (m <sup>2</sup> )
1	196,85	8	1.349,48
2	110,34	3	206,89
3	194,82	4	690,74
4	192,16	5	650,39
5	263,58	10	1.315,60
6	369,90	8	1.815,85
7	182,57	7	847,66
8	231,15	6	924,62
9	234,73	5	871,87
10	173,76	7	708,36

#### 4.2.3 Potencial hidrocínético disponível no rio São Francisco Verdadeiro

Mediante a obtenção dos dados de perfil, calculou-se a velocidade de deslocamento da água do rio, o diâmetro do rotor necessário (com base no valor de máxima profundidade em cada um dos casos), a área varrida pelo rotor e o potencial hidrocínético disponível nos pontos de maior profundidade de cada trecho, como ilustrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Potencial hidrocínético da bacia hidrográfica do rio São Francisco Verdadeiro.

Ponto	Profundidade (m)	Velocidade (m s <sup>-1</sup> )	Diâmetro do Rotor (m)	Área Varrida (m <sup>2</sup> )	Potencial Hidrocínético (W/un. turbina)	Potencial Hidrocínético (W/un. turbina)
					Cp = 0,593	Cp = 0,25
1	8	0,06	4,57	16,4	0,82	0,35
2	3	0,34	1,71	2,31	27,40	11,55
3	4	0,1	2,29	4,10	1,11	0,47
4	5	0,09	2,86	6,41	1,32	0,56
5	10	0,04	5,71	25,63	0,60	0,25
6	8	0,03	4,57	16,40	0,10	0,04
7	7	0,05	4,00	12,56	0,56	0,24
8	6	0,04	3,43	9,23	0,25	0,10
9	5	0,04	2,86	6,41	0,12	0,05
10	7	0,05	4,00	12,56	0,41	0,17

Ao observar os dados dos pontos expostos na Tabela 6, verifica-se que, ao considerar apenas a utilização de uma turbina em cada trecho, mediante a aplicação da fórmula do Potencial Hidrocinético Disponível, não obtiveram-se valores significativos para nenhum dos cenários de eficiência propostos.

A velocidade mínima da corrente necessária para operar um sistema hidrocinético é, usualmente, de 1 a 2 m s<sup>-1</sup>, podendo ser reduzida até 0,5 m/s, dependendo do tipo da tecnologia utilizada (ABAQUE, 2016). Com base nisso, justifica-se o fato que não há potencial hidrocinético nos pontos calculados, já que a maior velocidade é de 0,34 m.s<sup>-1</sup>.

Assim como Bittencourt et al. (2016) concluíram que os pontos à jusante das Usinas Hidrelétricas Bariri e Ibitinga, os quais possuem maiores velocidades, são os melhores para geração de energia, neste trabalho também verificou-se que o Ponto 2, que apresenta maior velocidade da correnteza, possui maior potencial hidrocinético disponível.

A profundidade é também um fator importante para a determinação da energia que pode ser extraída do local, desde que o nível d'água na seção do dispositivo hidrocinético seja compatível com o sistema a ser instalado (SORNES, 2010). Dessa forma, observou-se ainda que, juntamente com a velocidade da água, a profundidade tem grande influência no aumento do potencial hidrocinético, uma vez que, quanto maior a profundidade, maior pode ser o diâmetro e área varrida pelo rotor da turbina.

Com base nos valores de Potencial Hidrocinético calculados, obteve-se ainda, os valores de Capacidade de Produção de Energia (W.h<sup>-1</sup>) em cada um dos pontos, considerando-se os dois diferentes cenários de eficiência das turbinas (Tabela 7).

Tabela 7 - Capacidade de Produção de Energia.

Ponto	Capacidade de Produção de Energia (W h <sup>-1</sup> )	Capacidade de Produção de Energia (W h <sup>-1</sup> )
	Cp = 0,593	Cp = 0,25
1	590,40	252,00
2	19.728,00	8.316,00
3	799,20	338,40
4	950,40	403,20
5	432,00	180,00
6	72,00	28,80
7	403,20	172,80
8	180,00	72,00
9	86,40	36,00
10	295,20	122,40

Em função dos baixos valores de potência hidrocínética disponível calculados, a capacidade de produção de energia é pouco significativa, ainda mais ao se tratar de atividades voltadas às práticas rurais. Por exemplo, levando-se em consideração a atividade de avicultura, (atividade comumente desenvolvida na região de estudo) em que um aviário de 1.200,00 m<sup>2</sup>, capaz de alojar em média 14.000 aves, apresenta consumo de 369,35 kWh (TRICHES; GOMES, 2016), teoricamente, nenhum dos pontos analisados seria capaz de suprir as necessidades energéticas do empreendimento de avicultura.

Outra alternativa seriam as Centrais Geradoras Hidrelétricas e Pequenas Centrais Hidrelétricas. Wegner et al. (2019) identificaram 294 pontos com potencial para CGHs (até 3 MW) e 30 pontos com potencial para PCHs (de 3 a 30 MW) na bacia hidrográfica do rio São Francisco Verdadeiro, considerando os aspectos restritivos de instalação na região.

Mediante a constatação de potencial para instalação de CGHs e PCHs, que demandam critérios mais complexos, mais parâmetros técnicos e, ainda, pelo fato de o rio São Francisco Verdadeiro conter a área de drenagem mais extensa e representativa na bacia incremental da usina da Itaipu Binacional, entende-se que, em um estudo prático de levantamento, o potencial hidrocínético seria significativo, mesmo que em pequena escala ou como suplementação a outra fonte convencional de energia.

## 5. CONCLUSÕES

Nesta pesquisa contemplou-se o estudo da dinâmica de uso e cobertura do solo e verificou-se que a unidade hidrográfica do rio São Francisco Verdadeiro abrange, principalmente, os usos agrícolas e pecuários. Os remanescentes de vegetação distribuem-se às margens da rede de drenagem. As regiões que apresentam maiores declividades e, por consequência, solos de baixa fertilidade e/ou de difícil desenvolvimento de atividades agrícolas são, em sua maioria, ocupadas pelas pastagens.

Por meio dos dados obtidos teoricamente de vazão, profundidade e declividade, identificou-se que nenhum dos pontos avaliados possuem potencial hidrocínético disponível. Sugere-se para pesquisas futuras, estudos de caso da efetiva implantação de sistemas hidrocínéticos, assim como a realização de levantamento batimétrico para conferência do perfil da seção transversal e dos valores de velocidade da correnteza do rio, além da projeção mais detalhada da energia elétrica desejada, bem como o estudo da viabilidade econômica.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIZED, T. et al. Energy security and renewable energy policy analysis of Pakistan. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 84 (2018) 155-169. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.254
- ABAUQUE, Associação Brasileira de Armazenamento e Qualidade de Energia. **A Energia Hidrocinética já é uma Realidade**. Belo Horizonte, 2016.
- ALVES, J. J. A. Estimativa da Potência, Perspectiva e Sustentabilidade da Energia Eólica no Estado do Ceará. 2006. **Tese** (Doutorado em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.
- ANA, Agência Nacional de Águas. **Hidroeletricidade**. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/ usos-da-agua/hidroeletricidade/hidroeletricidade-1>. Acesso em: 15 abr. 2020a.
- ANA, Agência Nacional de Águas. **Outros Usos**. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/ usos-da-agua/outros-usos/outros-usos-1>. Acesso em: 15 abr. 2020b.
- ANA, Agência Nacional de Águas. **Usos da Água**. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/ usos-da-agua/ usos-da-agua>. Acesso em: 15 abr. 2020c.
- ANNEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, **banco de informações de geração**, Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: 31 ago. 2019.
- ANYI, M. Water current energy for remote community: design and testing of a clog-free horizontal Axis hydrokinetic turbine system. **Tese**. University of South Australia; 2013.
- ARAÚJO, M. A. Prospecção de parques hidrocinéticos – comparação entre projetos preliminares nos rios Iguaçu e Paraná. 2016. 63 f. **TCC** (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e requisito, Foz do Iguaçu, 2016.
- BARRETO, R. VAN ELS, R. H. O uso de SIG para identificar áreas potenciais para sistemas descentralizada de geração de energia elétrica. **Congresso Brasileiro de Planejamento Energético**, 2002.
- BAYAZIT et al. An investigation of small scale hydropower plants using the geographic information system. **Renew. Sustain. Energy Rev**. 67. 2017. pp. 289 - 294
- BITTENCOURT, M. P. NUNES, M. A. Avaliação de potencial hidrocinético remanescente a jusante de uhes na bacia hidrográfica do rio tietê. **Proceedings of the XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering**, p. 16, 2016.
- BRASIL. Divisão de Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Topodata: **Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil**. 2008.

Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>>. Acesso em: 07 out. 2019.

BRASIL JUNIOR, A. C. P. et al. Turbina Hidrocinética Geração 3. **Aneel**, Brasil, p.1-10, 2007. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/biblioteca/citenel2007/pdf/it46.pdf>>. Acesso em: 31 ago. 2019.

CIH, Centro Internacional de Informática. Programa Hidrológico Internacional. **UNESCO Help Program**. Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco Verdadeiro. Disponível em <<http://saofrancisco.hidroinformatica.org/br/basin.html>>. Acesso em 20 ago. 2019.

CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Mortandade de Peixes - Oxigênio Dissolvido**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/mortandade-peixes/alteracoes-fisicas-e-quimicas/oxigenio-dissolvido/>. Acesso em: 06 jan. 2021.

CHAMORRO, L. P. et al. On the interaction between a turbulent open channel flow and an axial flow turbine. **J. Fluid Mech.** 716, 658–670. 2013.

COLLAÇO, F. M. A. BERMANN, C. Perspectivas da gestão de energia em âmbito municipal no Brasil. **Revista de Estudos Avançados**. v. 31, n. 89. São Paulo, 2017.

CRUZ, J. S. BLANCO, C. J. C. BRASIL JUNIOR, A. C. P. Flow-velocity model for hydrokinetic energy availability assessment in the Amazon. **Acta Scientiarum**. 2020.

CRUZ, J.S. Modelo vazão-velocidade para avaliação de potencial hidrocinético. 2018. **Dissertação**. Universidade Federal do Pará (UFPA).

CUNHA, J. T. L. Análise de Estabilidade da Turbina Hidrocinética HTUC-01 em Condições de Operação. 2015. 68 f. **TCC** (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

ELBATRAN, A. H. et al. Hydro power and turbine systems reviews. **Jurnal Teknologi Sci.Eng.** 74 (5), 83–90. 2015.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Análise Energética e Dados Agregados**. Rio de Janeiro: EPE, 2015.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional (BEN), Ano Base 2018**, 2019.

FEDRIZZI, M. C. Fornecimento de água com sistema de bombeamento fotovoltaicos. 1997. **Dissertação** (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

FELIZOLA, E. R. MAROCCOLO, J. F. FONSECA, M. R. S. Identificação de áreas potenciais para implantação de turbina hidrocinética através da utilização de técnicas de geoprocessamento. In: XIII **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 2007, Florianópolis. Anais. Florianópolis: INPE, 2007. p. 2549 - 2556.

FIGUEIREDO, Sávio Wesley Oliveira et al. Protótipo hidrocínético para geração de energia elétrica aplicado à educação em engenharia. **Revista de Ensino de Engenharia**, Pará, v. 32, n. 1, p.19-30, 2013.

FINGER, D. HEINRICH, G. GOBIET, A. BAUDER, A. Projections of future water resources and their uncertainty in a glacierized catchment in the Swiss Alps and the subsequent effects on hydropower production during the 21st century. **Water Resour Res** 2012; vol. 48. doi:10.1029/2011WR010733.

FLORENZANO, T. G. *Imagens de satélite para estudos ambientais*. 2011. São Paulo: **Oficina de texto**. 97 p.

TIAGO FILHO, G. L. "The state of art of Hydrokinetic power in Brazil", **Waterpower XIII Conference**, Buffalo - New York, USA, 2003.

GASQUES, A. C. F. NEVES, G. L. SANTOS, J. D. MAUAD, F. F. OLKAWA, C. M. P. Regionalização de vazões mínimas: breve revisão teórica. **REEC: Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 14, n. 2, p. 60-70, 2018.

GINTER, V. J. PIEPER, J. K. Robust gain scheduled control of a hydrokinetic turbine. **Control Syst Technol** IEEE Trans 2011;19: 805–17.

GUNAWAN, B. ROBERTS, J. NEARY, V. Hydrodynamic effects of hydrokinetic turbine deployment in an irrigation canal. **3rd marine energy technology symposium**. 2015. Washington D.C, USA.

HARRISON, G. P. WHITTINGTON, H. W. Susceptibility of the Batoka Gorge hydroelectric scheme to climate change. **J Hydrol** 2002; vol. 264, p. 230–41. doi:10.1016/S0022-1694 (02)00096-3.

HERMAN, J. et al., 2014. **Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: a review of literature**. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 29, 625–633.

HASLETT, J. R. et al. Offshore renewable energy and nature conservation: the case of marine tidal turbines in Northern Ireland. **Biodivers Conserv.** 2016.

INGER, R. et al. Marine renewable energy: potential benefits to biodiversity? An urgent call for research. **J Appl Ecol.** 2009. 46:1145–1153

IAT, Instituto Água e Terra. **Ambiental**. Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/2020/03/1653/Parana-quer-agilizar-licenciamento-do-setor-de-energias-renovaveis.html>. Acesso em: 15 abr. 2020

IEA, International Energy Agency. **World Energy Outlook 2011**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2011>. Acesso em: 18 jul. 2020

IPARDES, Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. **Cadernos Municipais**. 2018. Disponível em: [http://www.ipardes.gov.br/index.php?pg\\_conteudo=1&cod\\_conteudo=30](http://www.ipardes.gov.br/index.php?pg_conteudo=1&cod_conteudo=30). Acesso em: 07 out. 2019.

ITAIPU, Itaipu Binacional. Programa “Cultivando Água Boa”. Projeto Piloto SUB-BACIA do Rio São Francisco Verdadeiro. **Itaipu-Binacional**, 2004.

ITAIPU. Bacia do Paraná 3, BACIA DO RIO PARANÁ, **Itaipu-Binacional**, 2012.

IOANNOU, A. Angus, A. Brennan, F. Risk-based methods for sustainable energy system planning: A review, **Renewable and Sustainable Energy Reviews** Vol. 74, P. 602-615, 2017.

KHAN, M. J. **State of river energy technology**. 2006. Disponível em: <http://www.hydrovolts.com/technology/in-stream-turbines>, Acesso em: 08 jun. 2020.

KHAN, M. J. et al., 2009. Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review. **Applied Energy**. 86. 1823 – 1835.

KLIEMANN, B. C. K. DELARIVA, R. L. Pequenas Centrais Hidrelétricas: cenários e perspectivas no estado do Paraná. **Ciência e Natura**, v. 37, n. 3, p. 274-283, 2015.

KUMAR, A. et al., 2011. Hydropower. In: **IPCC Special Report in Renewable Energy Sources and Climate Change**. Cambridge University press, UK and USA.

KUSCHKE, M. STRUNZ, K. Modeling of tidal energy conversion systems for smart grid operation. **Control Syst Technol** IEEE Power Energy Soc Gen Meeting 2011:1–3.

KUZEMKO, C. MITCHELL, C. LOCKWOOD, M.; HOGGETT, R. Policies, politics and demand side innovations: The untold story of Germany’s energy transition. **Energy Research & Social Science**. Vol. 28, p. 58-67, 2017.

LAGO L. I., PONTA F.L., CHEN L. Advances and trends in hydrokinetic turbine systems. **Energy Sustain Dev** 2010;14: 287–96.

LANDIS, J. R; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v.33, n.1, p. 159-174, 1977.

LEITE, R. BRITO, J. L. S. Sensoriamento remoto aplicado à análise temporal da relação uso da terra / temperatura e albedo de superfície na bacia do Rio Vieira no Norte de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 10, n. 2012, p. 69-84, 2012.

MAIMUN, A. et al. Review of Various Designs and Development in Hydropower Turbines. **Mechatronic And Manufacturing Engineering**, Malásia, v. 8, n. 2, 2014

EMMANUEL, M. RAYUDU, R. The impact of single-phase grid-connected distributed photovoltaic systems on the distribution network using P-Q and P-V models, **International Journal of Energy and Power Engineering**, Vol. 91, P. 20-33, 2017.

MARTINS, F. R. GUARNIERI, R. A. PEREIRA, E. B. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.30, n. 1, 1304 (2008).

MERCURE, J. SALAS, P. On the global economic potentials and marginal costs of non-renewable resources and the price of energy commodities. **Energy Policy** Vol. 63, p. 469-483, 2013.

MMA, Ministério do Meio Ambiente. **Procedimentos de Licenciamento Ambiental do Brasil**. 2016. Disponível em: [ttp://pnla.mma.gov.br/images/2018/08/VERS%C3%83O-FINAL-E-BOOK-Procedimentos-do-Licenciamento-Ambiental-WEB.pdf](http://pnla.mma.gov.br/images/2018/08/VERS%C3%83O-FINAL-E-BOOK-Procedimentos-do-Licenciamento-Ambiental-WEB.pdf). Acesso em: 26 nov. 2020.

NIEBUHR, C. M. VAN DIJK, M. NEARY, V. S. BHAGWAN, J. N. A review of hydrokinetic turbines and enhancement techniques for canal installations: Technology, applicability and potential. **Renewable and Sustainable Reviews**. 2019.

OKOT, D. Review of small hydropower technology. **Renew. Sustain. Energy Ver.** 26, 515-520. 2013.

PAULA, I. C. MARX, A. M. Proposition of a requirements management framework for sustainable product development. **Production**. v. 21. São Paulo. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-65132011005000041>

PISH, O. Micro-Hydropower: Status and prospect's, Prof. IMechE. A: **J. of Power and Energy**, Vol. 216, pp. 31–40, 2002.

PRACIANO, A. C. MONTEIRO, L. A. Estudo de viabilidade do uso de energia eólica para irrigação da bananicultura do Ceará por geoprocessamento. **Encontros Universitários da UFC**, Fortaleza, v. 2, 2017

ROCHA, A. S.; BADE, M. R. **Geografia da Bacia Hidrográfica do Paraná 3: fragilidade e potencialidades socioambientais**. Jundiaí. Editora In House, 314 p., 2018.

ROSA, R. Geotecnologias na Geografia. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 16, p. 81-90, 2011.

SHABARA, H. et al. CFD simulation of water gravitation vortex pool flow for mini hydropower plants. **J. Teknol.** 74 (5), 77–81. 2015.

SHP, Smart hydro power. Munich: Smart Hydro Power; 2016. Disponível em: <http://www.smart-hydro.de/decentralized-rural-electrification-projects-worldwide/nigeria-rural-electrification/#project>. Acesso em: 08 jun. 2020.

SILVA, E. P. Fontes renováveis de energia para o desenvolvimento sustentável, **comciencia**, 2004.

SILVA, L. C. N. GOMES, M. K. O Paradigma da propriedade pública e privada e a necessidade de sua releitura a partir da Lei 9.985/2000. **Direito e Desenvolvimento**. 2018. Disponível em: <https://periodicos.unipe.br/index.php/direitoedesenvolvimento/article/view/655/509>. Acesso em: 08 nov. 2020.

SILVA, P. A. S. F. Estudo Numérico de Turbinas Hidrocinéticas de Eixo Horizontal. 2014. 104 f. **Dissertação** (Mestrado) - Curso de Mestrado em Ciências Mecânicas, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

SILVA, P. F. A. et al. Proposta de sistema de fundeio e flutuação para turbina hidrocinética. 2015. 118 f. **TCC** (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

SORNES, K. Small Scale Water Turbines for River Applications. **Zero Emission Resource Organization** (ZERO). 2010. Disponível em: <https://zero.no/wp-content/uploads/2016/05/small-scale-water-current-turbines-for-river-applications.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2021.

SPÖRL, C. ROSS, J. L. S. Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. **Geosp: Espaço e Tempo**, São Paulo, v. 1, n. 15, p. 39-49, jan. 2004. Disponível em: <http://www.geografia.ffe.usp.br/publicacoes/Geosp/Geosp15/Artigo3.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2018.

TIAGO FILHO, G. L. et al., Um panorama das pequenas centrais do Brasil. In: **SIMPOSIO DE PEQUENAS E MEDIAS CENTRAIS HIDRELETRICAS**. 5, 2006, Florianópolis, 2006.

TRICHES, M. R. GOMES, N. R. Análise energética de aviários de corte. **Curso de Pós-Graduação em Eficiência Energetica Aplicada aos Processos Produtivos**. Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. 2016

VALLE, I. C.; FRANCELINO, M. R.; PINHEIRO, H. S. K. Mapeamento da fragilidade ambiental na bacia do rio Aldeia Velha, RJ. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 2, p. 295-308, 2016.

VAN ELS, R. C. O. CAMPOS, A. M. HENRIQUES, L. F. BALDUINO, Hydrokinetic Propeller Type Turbine for the Electrification of Isolated Householders or Community and Social End-Users, 17th **Congress of Mech. Eng.**, S. Paulo, Brazil, 2003.

WATEROTOR. Waterotor energy technologies inc. 2018. Disponível em: <https://waterotor.com/>. Acesso em: 08 jun. 2020.

WEBER, E. LAHM, R. KAEHLER, J. W. CARVALHO, T. M. RIGHETO, J. ZANONI, C. BARROS, M. FREITAS, E. O Geoprocessamento na Gestão da Transmissão e Distribuição de Energia: Um Estudo de Caso. **Anais XI SBSR**, Belo Horizonte, Brasil, INPE, p. 1027-1034. 2003.

WEGNER, N. Levantamento do potencial hidroenergético na bacia do Paraná 3 utilizando geotecnologias. 2018 95f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2018.

WEGNER, N. et al. Hydro energy potential considering environmental variables and water availability in Paraná Hydrographic Basin 3. **Journal of Hidrology**. 580. 2019.

WILSON, R. Capital improvement project evaluation: a hydroelectric generation economic perspective. **Int J Energy Res** 2015; vol. 39, p.1402–19.

WEC, World Energy Council. Variable renewable energy sources integration in electricity systems 2016 - **How to get it right**, 2016.

WRUBLACK, S. C. **Aplicação conjunta de técnicas de sensoriamento remoto orbital e sistemas de informações geográficas na gestão dos recursos hídricos**. 2016. 120f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2016.

WU, Y. et al. Smart solar concentrators for building integrated photovoltaic façades. **Solar Energy**, v. 133, p. 111 – 118, 2016.

YAAKOB, O. B. AHMED, Y. M., ELBATRAN, A. H., SHABARA, H. M. 2014. A review on micro hydro gravitational vortex power and turbine systems. **Jurnal teknologi** (Sciences Eng. 69 (7)), 1–7.

YUEN, K. THOMAS, K. GRABBE, M. DEGLAIRE, P. BOUQUEREL, M. ÖSTERBERG, D. Matching a permanent magnet synchronous generator to a *fixed* pitch vertical axis turbine for marine current energy conversion. **Control Syst Technol** IEEE 2009;2009 (34):24–31.