

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ**  
**CENTRO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS EXATAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS PESQUEIROS E**  
**ENGENHARIA DE PESCA**

**WANE CRISTINA PICANÇO FORTUNATO**

Eficiência da escada para peixes da UHE Engenheiro Sérgio Motta em transpor  
*Rhinelepis aspera* (Spix & Agassiz, 1829): uma abordagem ecohidráulica

Toledo

2021

**WANE CRISTINA PICANÇO FORTUNATO**

Eficiência da escada para peixes da UHE Engenheiro Sérgio Motta em transpor  
*Rhinelepis aspera* (Spix & Agassiz, 1829): uma abordagem ecohidráulica

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca – Nível de Mestrado, do Centro de Engenharias e Ciências Exatas, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca.

Área de concentração: Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Makrakis

Coorientador: Dr. Leandro Fernandes Celestino

Toledo

2021

Fortunato, Wane Cristina Picanço  
Fe Eficiência da escada para peixes da UHE  
Engenheiro Sérgio Motta em transpor Rhinelepis  
aspera (Spix & Agassiz, 1829): uma abordagem  
ecohidráulica / Wane Cristina Picanço Fortunato;  
orientador Sergio Makrakis; coorientador Leandro  
Fernandes Celestino. -- Toledo, 2021.  
35 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de  
Toledo) -- Universidade Estadual do Oeste do  
Paraná, Centro de Engenharias e Ciências Exatas,  
Programa de Pós-Graduação em Recursos Pesqueiros e  
Engenharia de Pesca, 2021.

1. passagem para peixes. 2. monitoramento. 3.  
migrador. 4. cascudo-preto. I. Makrakis, Sergio,  
orient. II. Fernandes Celestino, Leandro, coorient.  
III. Título.

## FOLHA DE APROVAÇÃO

**WANE CRISTINA PICANÇO FORTUNATO**

Eficiência da escada para peixes da UHE Engenheiro Sérgio Motta em transpor a *Rhinelepis aspera* (Spix & Agassiz, 1829): uma abordagem ecohidráulica

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca – Nível de Mestrado, do Centro de Engenharias e Ciências Exatas, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca, pela Comissão Julgadora composta pelos membros:

### COMISSÃO JULGADORA

---

Prof. Dr. Sergio Makrakis  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Presidente)

---

Prof. Dra. Elaine Antoniassi Luiz Kashiwaqui  
Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul

---

Profª. Dra. Maristela Cavicchioli Makrakis  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Aprovada em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
Local de defesa:

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família, aos meus pais, Márcia e Raimundo, e aos meus irmãos, que sempre foram meu alicerce e grandes incentivadores, para meu crescimento pessoal e profissional e que sempre confiaram em mim.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus;

À minha família motivo de minha existência, em especial a minha mãe-amiga que sempre incentivou o meu crescimento pessoal e profissional;

Ao professor Dr. Sergio Makrakis, por orientar este trabalho, pelo incentivo, oportunidade e paciência;

Ao Dr. Leandro Fernandes Celestino, pela coorientação, paciência e contribuições para o desenvolvimento do trabalho;

À professora Maristela Makrakis, pelo seu incentivo, carisma, preocupação e estadia durante essa jornada, a senhora foi fundamental na nossa permanência, serei eternamente grata;

Ao GETECH - Grupo de Pesquisa em Tecnologia em Ecohidráulica e Conservação de Recursos Pesqueiros e Hídricos, Unioeste – Toledo/PR, pela oportunidade de trabalho, apoio e a todos os pesquisadores que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho;

À Dra. Patrícia Sarai (a Coris), a pessoa mais calma que conheci, obrigada por ser assim e pela amizade. Obrigada também por nos repassar o seu conhecimento, foram de grande valia;

À Dra. Lucileine Hartmann, obrigada pelos ensinamentos, conversas, conselhos, preocupações;

Às Dra. Elaine Antoniassi Luiz Kashiwaqui e a Dra. Milza Celi Fedatto Albelha, pelas valiosas contribuições;

Aos meus amigos-família do coração Adriani dos Santos, Alan Nascimento, Diego Silva, Daniel Ladislao, Jéssica Guimarães, Pauliana Leão, Pâmela Oliveira e Tamiris Tércia pelo apoio, carinho e amizade. Vocês são incríveis;

Aos amigos que a pós-graduação me deu, Alice Ferreira, Andressa Tosta, Isabel Monteiro, Luci Ogawa, Marta Cruz, Priscila Pinho e Rafael Cavaretto;

À Companhia Energética de São Paulo-CESP, pela oportunidade oferecida para realização da pesquisa;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela bolsa de pesquisa concedida.

## Eficiência da escada para peixes da UHE Engenheiro Sérgio Motta em transpor *Rhinelepis aspera* (Spix & Agassiz, 1829): uma abordagem ecohidráulica

### RESUMO

A fim de mitigar os efeitos negativos causados devido a fragmento do ambiente, sistemas de transposição para peixes (STPs) são implementados em barragens de hidrelétricas, com a finalidade de restaurar a conectividade estrutural dos rios e permitir a passagem de migradores (conectividade funcional), como o cascudo-preto, *Rhinelepis aspera*, espécie migradora que está ameaçada de extinção, apesar de possuir grande importância econômica e ecológica. O estudo avaliou a escada para peixes da UHE Engenheiro Sergio Motta – CESP, no período de dezembro/2015 a junho/2016, e avaliou a influência de variáveis hidráulicas e hidrológicas, a atração e eficiência da escada para peixes na ascensão de *R. aspera*. Utilizou-se o sistema de rádio frequência (RFID – *Radio Frequency Identification*), com oito antenas instaladas ao longo da escada para peixes e transponders (PIT-tags) de 32 mm que foram implantados na cavidade abdominal de 200 espécimes adultos. Para o cálculo da atratividade da escada, foi considerado a porcentagem de indivíduos que encontraram a entrada, o tempo de trânsito e o tempo cumulativo de trânsito entre os segmentos de antenas. Os fatores hidráulicos (velocidade, vazão, potência dissipada) e hidrológicos (cota jusante, cota escada e cota reservatório) foram usados para avaliar a interferência na ascensão de *R. aspera* por meio da análise de regressão de COX. Do total de indivíduos marcados e liberados a jusante da barragem, 71% (142) entraram na escada para peixes. O tempo que *R. aspera* levou para entrar na escada para peixes desde o momento da soltura variou entre 196,71h à 1878,75h. Indivíduos liberados na margem esquerda, onde fica a escada, apresentaram maior taxa de entrada (80, 76%). Apenas 25% movimentaram até última antena na escada, onde foram registrados pela antena A8. Concluímos que a escada para peixes da UHE Porto Primavera foi atrativa para *R. aspera*, entretanto o sistema de transposição apresenta características estruturais e hidráulicas que limitam a ascensão dos indivíduos desta espécie. O que foi evidenciado pela redução significativa no número de indivíduos entre os trechos de antena 3-4 e reduzida na transposição da espécie. Embora o estudo tenha mostrado resultados importantes acerca da eficiência da escada para peixes de Porto Primavera para a espécie estudada, questões importantes como a capacidade natatória, comportamento alimentar e reprodutivo da espécie naquela região precisam ainda ser respondidas.

Palavras-chave: passagem para peixes, monitoramento, migrador, cascudo-preto.

## Efficiency of the fish ladder at the Engenheiro Sérgio Motta HPP in crossing *Rhinelepis aspera* (Spix & Agassiz, 1829): an ecohydraulic approach

### **ABSTRACT**

In order to mitigate the effects caused by fragments of the environment, fish transposition systems (STPs) are implemented in hydroelectric dams, in order to restore the structural connectivity of rivers and allow the passage of migrants (functional connectivity), such as the armored catfisher, *Rhinelepis aspera*, a migratory species that is threatened with extinction, despite having great economic and ecological importance. The study evaluated the fish ladder at HPP Engenheiro Sergio Motta - CESP, from December / 2015 to June / 2016, and evaluated the influence of hydraulic and hydrological variables, the attraction and efficiency of the ladder for fish on the ascent of *R. aspera*. Use the Radio Frequency Identification (RFID) system, with eight antennas installed along the fish ladder and 32 mm transponders (PIT-tags) that were implanted in the abdominal cavity of 200 adult specimens. To calculate the attractiveness of the stairs, it was considered a percentage of property that the entrance, the transit time and the cumulative transit time between the antenna segments. Hydraulic factors (speed, flow, dissipated power) and hydrological factors (downstream level, ladder level and reservoir level) were used to evaluate an interference in the rise of *R. aspera* through COX regression analysis. Of the total reserved marked and released downstream of the dam, 71% (142) entered the fish ladder. The time it took *R. aspera* to enter the fish ladder from the moment of release ranged from 196.71h to 1878.75h. Individuals released on the left margin, where the ladder is, source the highest entry rate (80, 76%). Only 25% moved to the last antenna on the ladder, where they were registered by antenna A8. We conclude that the UHE Porto Primavera fish ladder was supplied to *R. aspera*, however the transposition system has characteristics and hydraulics that limit the ascent of this species. This was evidenced by the significant reduction in the number of preference between the 3-4 antenna stretches and the reduced transposition of the species. Although the study has important results on the efficiency of the Porto Primavera fish ladder for the studied species, important questions such as swimming capacity, feeding and reproductive behavior of the species in this region still need to be answered.

Palavras-chave: fishway, monitoring, migrator, armored catfish.

Exame Geral de Qualificação elaborado e formatado conforme as normas da publicação científica *Sustainability*. Disponível em: <https://www.mdpi.com/journal/sustainability>

## SUMÁRIO

<b>1. Introdução .....</b>	<b>10</b>
<b>2. Material e métodos .....</b>	<b>11</b>
2.2 Área de estudo .....	11
2.3 Captura, marcação e soltura.....	13
2.4 Monitoramento de passagem .....	13
2.5 Variáveis hidrológicas e hidráulicas .....	14
2.5 Análise de dados .....	16
<b>3. Resultados .....</b>	<b>17</b>
3.1 Atratividade e eficiência .....	17
3.2 Fatores hidrológicos e hidráulicos e ascensão de <i>Rhinelepis aspera</i> .....	20
<b>4. Discussão .....</b>	<b>24</b>
<b>Referências .....</b>	<b>27</b>

## 1. Introdução

A maioria das construções de barragens existentes no mundo foram construídas após a Segunda Guerra Mundial, como consequência do desenvolvimento econômico. Atualmente, existem cerca de 6000 barragens de grande porte e incontáveis de pequeno porte construídas ou planejadas em todo o mundo [1,2]. Os países com maior potencial hidrelétrico instalado são China (280 GW), Brasil (89 GW), Estados Unidos (79 GW), Canadá (77 GW), Rússia (48 GW) e Índia (45 GW) [3]. Notadamente, o Brasil possui amplo aproveitamento hidrelétrico [4], por apresentar grande disponibilidade hídrica [5] e predomínio de rios de planalto com grande volume de água [6]. Essas vantagens lhe concedeu a posição de um dos maiores construtores de barragens hidrelétricas do mundo [7,8].

Dentre as bacias que compõe o país, a bacia do rio Paraná é a mais fragmentada por barragens na América do Sul [2], apresentando 389 usinas hidrelétricas em operação e 577 em fase de planejamento [9]. Estes empreendimentos afetam negativamente os ambientes aquáticos, causando mudanças na fisiografia das bacias hidrográficas [1], regulando o fluxo a jusante [10], restringindo o transporte de sedimentos e nutrientes [11,12], e impossibilita a migração longitudinal dos peixes para a reprodução [13,14].

Para minimizar um dos efeitos negativos das barragens sobre a migração de peixes, foram implementados sistemas de transposição para peixes (STPs), com a finalidade de restaurar a conectividade estrutural dos rios e permitir a passagem dos peixes migradores [15,16], rumo aos ambientes de desova ou alimentação [17,18] (conectividade funcional). Esses mecanismos podem ser do tipo eclusas, canais de migração, elevadores e escadas [19], sendo este último mais utilizado na Bacia do Alto Rio Paraná [9]. Para garantir que esses projetos possibilitem a transposição da maioria das espécies de peixes migradores [20], é necessário adequar os parâmetros hidráulicos e estruturais da escada para peixes com o comportamento e capacidade natatória [21,22,23,24], os aspectos morfológicos [25,26] e fisiológicos dos peixes migradores [27], visando tornar este sistema atrativo [21] e possibilitar a passagem segura, sem danos e com um custo mínimo de energia e tempo [28,29].

O Alto Rio Paraná possui descrito mais de 310 espécies de peixes [30], das quais 19 migram longas distâncias rio acima para a reprodução entre os meses de outubro a março [15]. Uma dessas espécies é o cascudo-preto, *Rhinelepis aspera* (Spix & Agassiz, 1829), pertencente à ordem Siluriformes, da família Loricariidae [31]. É um migrador de longa distância [9], que atinge maturação aos 25 cm e chega a um comprimento máximo de 44 cm [32], com reprodução principalmente nos meses de janeiro e fevereiro [33]. A espécie prefere habitats de fundos

rochosos e com correntezas [32,34,35], onde possivelmente desovam [34], sem nenhum cuidado parental [33]. Diferentemente dos demais peixes migradores da bacia do rio Paraná, *R. aspera* possui estrutura morfológica particular, com corpo coberto por placas dérmicas ósseas e boca ventral com ventosa, que além de ser uma adaptação ao hábito alimentar iliófago [33,36], também auxilia na fixação em substratos em ambientes de correnteza [37,38]. É uma espécie altamente suscetível a ações antrópicas como sobrepesca, poluição e construção de barragens [39], devido a mudança em seu habitat. E apesar de possuir grande importância econômica e ecológica [36], está ameaçada de extinção [40].

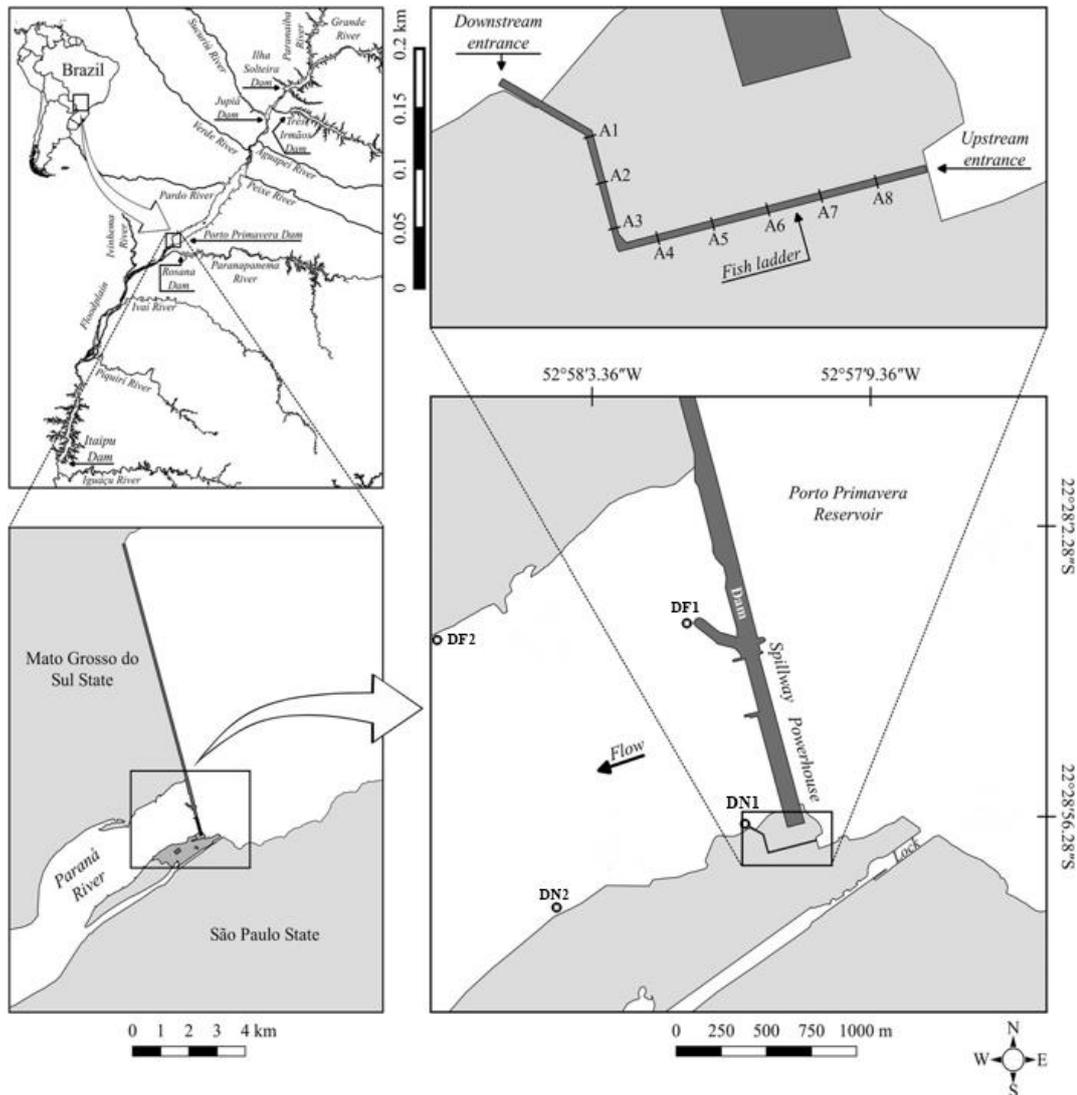
Apesar de ser considerada uma espécie migradora da bacia do Alto Rio Paraná [10,41], muitas questões sobre o seu comportamento migratório ainda não foram sanadas. Alguns estudos mostram que o cascudo preto *R. aspera* possui dificuldades em ascender a escada para peixes de Porto Primavera [19,41], e considerando que poucas são as informações das características hidrodinâmicas desta escada [18,21]. Analisando a arquitetura da escada para peixes de Porto Primavera e referências sobre *R. aspera* e transposição, acreditamos que a eficiência da escada para essa espécie seja inexpressível. Assim, foram determinados cinco objetivos para aceitar ou não a hipótese: i) avaliar se há seletividade na eficiência em relação ao tamanho e peso dos peixes; ii) verificar o tempo de registro de entrada e o tempo de transição dos indivíduos no sistema; iii) objetivo foi avaliar se as variáveis hidráulicas como: nível de água na escada, velocidade, vazão e potência dissipada influenciam na eficiência de ascensão do *Rhinelepis aspera*; iv) estimar a eficiência da escada para peixes em três diferentes cenários hidráulicos e o v) analisar se essas variáveis hidráulicas atuam em conjunto e influenciam na eficiência de ascensão da espécie.

## **2. Material e métodos**

### **2.2 Área de estudo**

A Usina Hidrelétrica Engenheiro Sérgio Motta, também conhecida como UHE de Porto Primavera (Figura 1), localiza-se no Alto Rio Paraná, entre os estados de Mato Grosso do Sul e São Paulo [18]. Esta usina entrou em operação no ano de 1999, sendo concluído o segundo estágio de enchimento do reservatório em 2003, atingindo o nível operacional de 257 m neste ano [42]. Sua barragem é a mais extensa do Brasil, com 10.186,20 metros de comprimento [43]. O reservatório é do tipo fio d'água e não apresenta amplas oscilações de nível, possuindo 2.250 km<sup>2</sup>, com capacidade de descarga de até 53.600 m<sup>3</sup>/s<sup>-1</sup> [43].

A usina dispõe de dois sistemas de transposição para peixes, um elevador e uma escada para peixes [9], sendo este último, o único a operar no período de estudo. A escada para peixes (Figura 1) situa-se na margem esquerda do Rio Paraná, permitindo a conectividade longitudinal entre os ambientes de jusante e reservatório da barragem [18]. A escada para peixes (Figura 1) situa-se na margem esquerda do Rio Paraná, permitindo a conectividade longitudinal entre os ambientes de jusante e reservatório da barragem [18]. A escada possui comprimento de 472,5 m, com inclinação média de 4%, com um total 50 degraus-tanques, delimitados por defletores com três orifícios inferiores (0,8 por 0,8 m cada) e três vertedouros (0,8 por 0,8 m cada), que são controlados por comportas móveis [44]. Em cada defletor da escada, permanece aberto dois orifícios de fundo e um vertedouro livre. Do total de degraus-tanques, 47 apresentam oito metros de comprimento com cinco metros de largura e dois metros de altura, enquanto três degraus-tanque são modificados para proporcionar áreas de descanso (tanque 11 = 16,0 m, tanque 22 = 24,6 m e o tanque 36 = 18,0 m de comprimento) para os peixes [27; 44].



**Figura 1.** Escada para peixes da UHE Engenheiro Sergio Motta e distribuição das antenas (01 a 08) ao longo da escada. Fonte: Celestino et al., (2019).

### 2.3 Captura, marcação e soltura

Foram capturados 200 exemplares de *R. aspera* próximos a entrada da escada, a jusante da barragem de Porto Primavera em dezembro 2015, por meio de tarrafa de 13 mm entre nós adjacentes. Estes exemplares foram anestesiados com benzocaína (75 mg. L<sup>-1</sup>), diluído em álcool etílico (92,8° GL), medidos (comprimento total e padrão - cm), pesados (g) e marcados com PIT-tags (*Passive Integrated Transponder*), da marca *Texas Instruments*, modelo RI-TRP-WR2B, 32 mm de comprimento, 3,85 mm de diâmetro e 0,85 g de peso. As marcas foram introduzidas na cavidade abdominal, por meio de uma incisão na região póstero ventral, após a nadadeira pélvica. Posteriormente ao procedimento de marcação, os peixes foram colocados em caixas com água e transportados de barco até os locais de solturas (margem direita e esquerda a jusante da barragem). Quatro locais de soltura foram determinados, dois na margem direita e dois na margem esquerda. A distância dos locais de soltura para a entrada da escada foi de: EJ1=0 km; EJ2= 1,2 km; DJ1= 1km; DJ2= 2,3 km (Figura 1).

### 2.4 Monitoramento de passagem

Os movimentos migratórios dos indivíduos foram monitorados de dezembro de 2015 a junho de 2016, através da escada para peixes, com por meio do sistema RFID (Radio Frequency Identification). Este sistema emite um sinal de rádio frequência (134,2 kHz), que forma um campo eletromagnético nas antenas [45]. O sistema RFID utilizado para monitoramento foi composto por oito antenas retangulares (3,0 por 1,5 m), fixadas em molduras de madeira, distribuídas ao longo da escada. A primeira antena (A1) encontrava-se a 96,5 m da entrada de jusante da escada e a última antena (A8) a 44,5 m da tomada de água (Figura 1). A distância entre a A1 e a A8 é de 331,5 m, onde as demais antenas (A2-A7) foram distribuídas equidistantes no espaço intermediário entre A1 e A8, totalizando 7 segmentos [44] (Tabela 1).

**Tabela 1.** Distância (m) e declividade (%) entre as antenas A1-A8, na escada para peixes da UHE Engenheiro Sergio Motta. Fonte: Wagner et al., (2012).

<b>Antenas</b>	<b>Distância (m)</b>	<b>Declividade (%)</b>
1-2	50,11	5,05
2-3	27,23	5,05
3-4	70,45	5,12
4-5	46,32	4,34
5-6	46,81	4,99
6-7	42,43	4,02
7-8	39,08	4,99

Considerou-se segmento, o trecho entre uma antena a outra. As antenas registraram o exato momento em que o peixe marcado com a PIT entra no campo eletromagnético e foram utilizadas para identificar a direção do movimento - ascendente ou descendente [44,46]. Além disso, as antenas possibilitaram identificar até qual segmento da escada os peixes alcançaram, quantificando o tempo gasto para transpor cada respectivo segmento. As informações dos movimentos migratórios dos peixes dentro da escada foram armazenadas em um computador. Os procedimentos realizados no presente estudo foram aprovados pelo Comitê de Ética de Experimentação Animal da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Número de protocolo 63/09).

A atratividade da escada para peixes foi aferida pela proporção de indivíduos que entraram no sistema (%) (indivíduos que foram detectados pela primeira antena - A1) em relação ao total de indivíduos que foram marcados e liberados a jusante da barragem. Para aferir o tempo de registro da entrada da escada, foi levada em consideração o tempo decorrido entre a soltura e o primeiro registro dos indivíduos dentro do sistema. Para isso, adotou-se intervalos de tempo em dia [47]. Foram medidos o tempo de trânsito e o tempo cumulativo de trânsito entre os segmentos de antenas. Considera-se o tempo cumulativo a soma do tempo de trânsito nas antenas que registraram os indivíduos. Para determinar o tempo de transição entre os segmentos de antenas foi utilizado a velocidade média de transição, dada pela razão entre o tempo gasto entre as antenas e a distância horizontal entre elas.

## **2.5 Variáveis hidrológicas e hidráulicas**

Para avaliar os fatores hidráulicos e hidrológicos que poderiam limitar a passagem de *R. aspera* pela escada para peixes de Porto Primavera, a cota de jusante da escada para peixes e do reservatório, e as variáveis hidráulicas da escada (velocidade de escoamento do fluido,

vazão e potência dissipada) foram consideradas. Os dados referentes à cota de jusante e reservatório foram fornecidos pela Companhia Energética de São Paulo – CESP, que monitora diariamente os níveis do rio e reservatório. Esses dados foram usados como base para avaliar a variação de nível da cota média a montante de 257 m e a cota média a jusante de 237 m ao nível do mar. Para aferir a cota mensal da escada para peixes no período de monitoramento do estudo, as variações da profundidade da água da escada para peixes foram medidas bissemanalmente, por meio de uma régua instalada na parede lateral à margem direita do degrau-tanque 49, com precisão de 1 cm.

Para análise da cota da escada por segmento, foi realizada a medição da profundidade da água por tanque em uma coleta extra, em fevereiro de 2019. Neste caso, a profundidade da água foi registrada na parte central de cada tanque, com auxílio de uma régua milimétrica de aço inox, com precisão de 2,5 cm. A partir dessas medidas foi possível estimar a profundidade média por segmento. A profundidade hidráulica mínima registrada no interior da escada foi comparada com o nível mínimo do reservatório.

O comportamento hidráulico da escada foi aferido pela velocidade de escoamento, vazão e potência dissipada. A velocidade de escoamento da água ( $V$ ) na escada para peixes foi estimada utilizando o coeficiente de perda de carga ( $c$ ), a aceleração da gravidade ( $g$ ) e o desnível entre tanques ( $\Delta H$ ), conforme a equação [48]:

$$V = c * \sqrt{2 * g * \Delta H} \text{ m/s} \quad (1)$$

A vazão ( $Q$ ) do sistema através das paredes transversais da escada foi determinada pela somatória da vazão individual dos orifícios de fundo e vertedouro livre, por meio do coeficiente de descarga ( $C$ ), fixado em 0,876 para orifício de fundo e 0,6 para vertedouro livre [49], da largura do orifício/vertedouro ( $b$ ), da altura do orifício ( $a$ ), da aceleração da gravidade ( $g$ ), desnível entre os tanques ( $\Delta H$ ) e nível médio de água do fluxo no tanque em relação à montante do entalhe (m) ( $h_1$ ), através das equações (2) e (3):

$$Q = C * b * a * \sqrt{2 * g * \Delta H} \text{ m}^3/\text{s} \quad (2)$$

$$Q = \frac{2}{3} * C * b * \sqrt{2 * g} * h_1^{1,5} \text{ m}^3/\text{s} \quad (3)$$

A dissipação de energia ( $P_{uv}$ ) foi estimada para cada um dos sete segmentos da escada para peixes, obtida por meio da densidade da água ( $\rho$ ), da aceleração da gravidade ( $g$ ), da vazão média de cada segmento ( $Q$ ), do desnível entre os tanques ( $\Delta H$ ), da largura do tanque ( $B$ ), do comprimento do tanque ( $L$ ) e da profundidade média do escoamento a jusante do vertedouro e orifício ( $t_{med}$ ), conforme a equação (4):

$$P_{uv} = \frac{\rho * g * Q * \Delta H}{B * L * t_{med}} \quad \text{W/m}^3 \quad (4)$$

Considerando que o desnível entre os tanques ( $\Delta H$ ) da escada de Porto Primavera é de 0,40 m, foi adotado um valor de desnível ( $\Delta H$ ) abaixo (0,35 m) e outro acima (0,45 m) do desnível referência (0,40 m), visando estimar a velocidade de escoamento, vazão do sistema e potência dissipada nestes diferentes cenários.

## 2.5 Análise de dados

Para verificar se o tempo de registro da entrada na escada para peixes, para correlacionar com o comprimento padrão (CP) e o peso total (PT) dos peixes, foi realizada a análise de correlação de *Spearman*. Com o intuito de verificar a relação entre a cota do reservatório e cota da escada para peixes, foi realizada a regressão linear simples. Visando identificar diferenças do número de indivíduos que entraram e saíram da escada para peixes mediante as classes de cotas de jusante, escada para peixes e reservatório, foi aplicado o teste de *Kruskal-Wallis*. Os dados obtidos para a espécie pelas antenas cobriram todas as 24 horas de cada dia e, para verificar se os peixes estavam mais ativos durante o dia ou à noite, os dados foram agrupados em dois períodos: diurno (06:00 - 17:59 h) e noturno (18: 00-05: 59 h). Esses dados foram divididos em quatro subperíodos usados para analisar ainda mais os dados de movimentos diários: amanhecer (00: 00-05: 59 h), manhã (06: 00-11: 59 h), tarde (12: 00-17: 59 h), e noite (18: 00-23: 59 h) [50].

Para avaliar a eficiência de ascensão da espécie entre as antenas A1 e A8, foi realizado a abordagem de riscos competitivos. Essa abordagem deduz que a eficiência é o resultado de duas taxas concorrentes, “sucesso” e “falha”, onde, o sucesso de passagem na escada acontece quando a proporção de indivíduos que alcançaram a última antena (A8) e completaram o movimento ascendente é maior que a taxa de peixes que não completaram o movimento e, portanto, falharam [46,51].

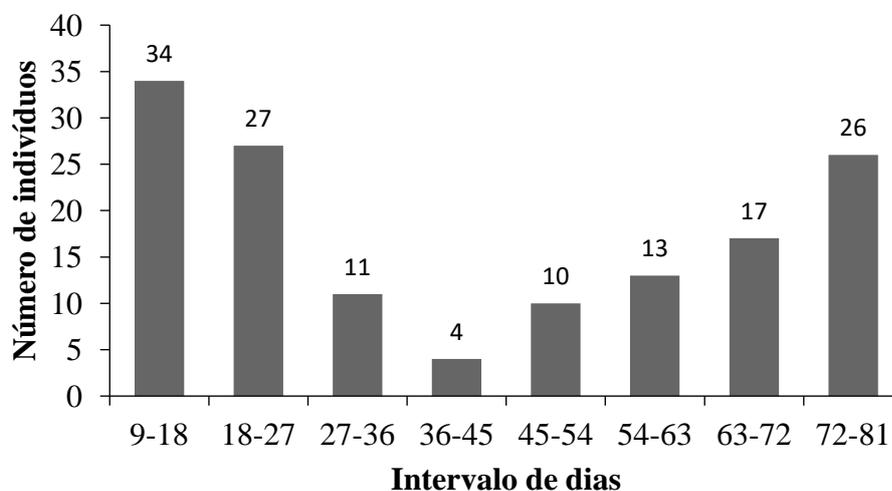
A avaliação dos efeitos das variáveis hidrológicas (cota de água de jusante, da escada e do reservatório) e hidráulicas da escada (velocidade de escoamento, vazão total, vazão do orifício de fundo e do vertedouro livre, e potência dissipada) em conjunto sobre a eficiência e o risco de ascensão de *R. aspera* na escada para peixes, foi realizada por meio do modelo de regressão de COX [52], analisados com o pacote estatístico de Análise de Sobrevida PROC PHREG. A regressão de COX assume que às covariáveis hidráulicas e hidrológicas são tempo dependentes, ou seja, mudam com o tempo [53]. Para o modelo de regressão, a interação entre proporção de peixe que atingiu cada segmento e os respectivos tempos (proporção\*tempo) foi a variável resposta. Os indivíduos que não foram detectados no período de estudo foram

considerados censurados a direita. Para realização das análises de regressão linear, correlação de *Spearman* e o teste de *Kruskal-Wallis* foi utilizado o *software* Statistica (StatSoft) 7.0 e o SAS ® University Edition 9.4 para o modelo de regressão de COX.

### 3. Resultados

#### 3.1 Atratividade e eficiência

No geral, 200 indivíduos adultos de *R. aspera* com comprimento padrão médio de 30,9 cm  $\pm$  2,2 cm (mínimo 24,0; máximo 37,0 cm) e peso médio de 853 g  $\pm$  182,4 g (mínimo 470; máximo 1400 g) foram marcados. Do total de indivíduos marcados e liberados a jusante da barragem, 71% (n=142) entraram na escada para peixes, sendo registrados pela primeira antena (A1). O tempo que *R. aspera* levou para entrar na escada para peixes desde o momento da soltura variou entre 196,71h (cerca de 9 dias) à 1878,75h (cerca de 79 dias), com uma de média de  $42 \pm 24$  dias (Figura 2). Entretanto, a maior quantidade de entrada na escada foi registrada nos primeiros dias 27 dias após a soltura (Figura 2). O comprimento padrão ( $r = -0,06$ ;  $p > 0,05$ ) e o peso total ( $r = -0,15$ ;  $p > 0,05$ ) dos peixes não apresentam correlação com o tempo de entrada na escada.



**Figura 2.** Frequência absoluta do número de indivíduos marcados e liberados, com o intervalo de dias que levaram para entrar na escada para peixes de UHE Engenheiro Sérgio Motta.

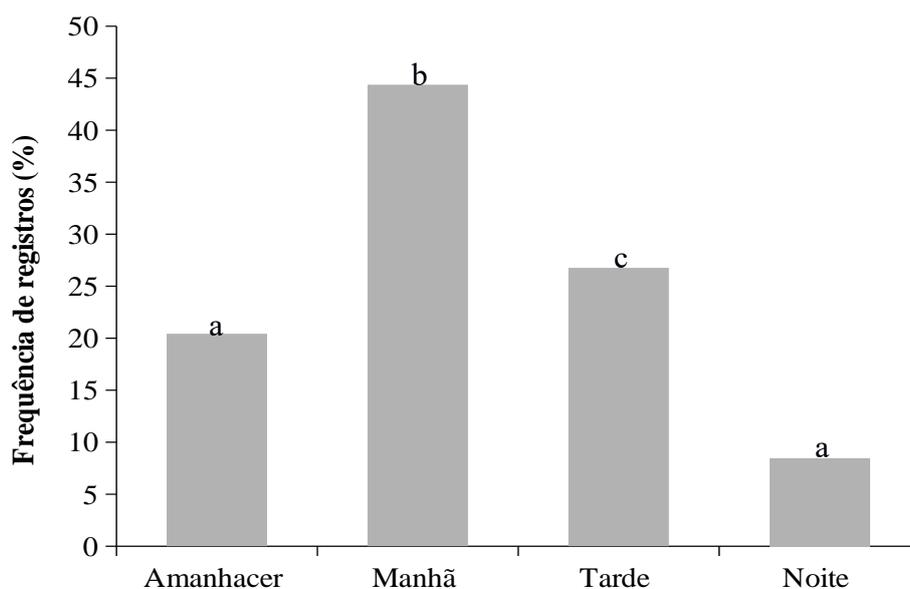
Indivíduos liberados na margem esquerda, onde fica a escada, apresentaram maior taxa de entrada em relação aos indivíduos liberados na margem direita, entretanto, os indivíduos liberados na margem direita encontram a escada em menor tempo (Tabela 1). A direção de soltura não influenciou no tempo de chegada em horas ou em dias dos indivíduos registrados pela primeira antena.

**Tabela 2.** Taxa de entrada de *Rhinelepis aspera* na escada para peixes de UHE Engenheiro Sérgio Motta. Tempo

gasto para os indivíduos encontrarem a escada. Peso e tamanho médio dos indivíduos estudados. DJ1=Direita Jusante 1; DJ2=Direita Jusante 2; EJ1=Esquerda Jusante 1; EJ2=Esquerda Jusante 2.  $\pm$  =Desvio padrão.

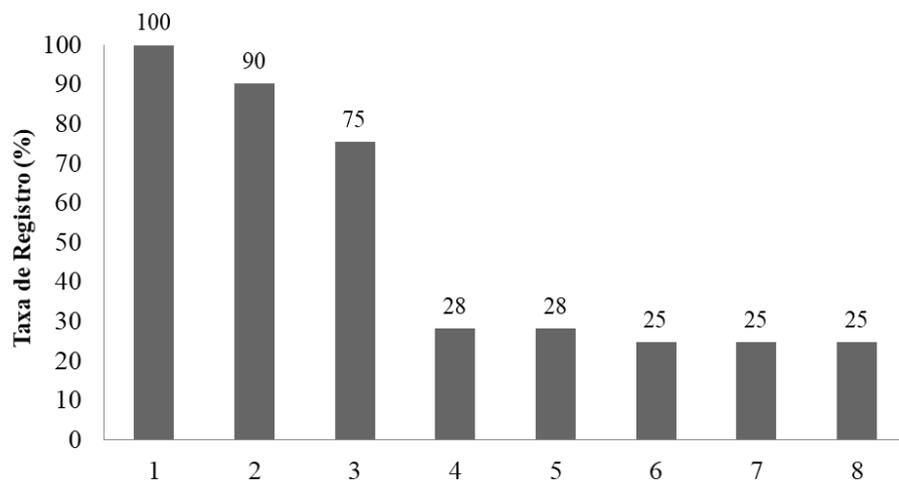
Locais de soltura	Taxa de entrada (%)	Tempo médio gasto (dias)	Peso médio (g)	Comprimento padrão médio (cm)
DJ1	66	21 $\pm$ 25	850 $\pm$ 181,5	31 $\pm$ 2,2
DJ2	62	30 $\pm$ 23	830 $\pm$ 161,4	31 $\pm$ 1,8
EJ1	80	53 $\pm$ 25	830 $\pm$ 165,1	30 $\pm$ 1,9
EJ2	76	45 $\pm$ 23	885 $\pm$ 215,8	31 $\pm$ 2,7

No geral, *Rhinelepis aspera* não apresentou um comportamento migratório nictemeral restrito a um determinado período do dia, uma vez que a migração pela escada ocorreu no período diurno e noturno, entretanto o período diurno com 101 (71%) diferenciou ( $p < 0,01$ ) do período noturnos 41 (29%). No período diurno, a maior frequência de registro ocorreu pela manhã (6h às 11:59h) (Figura 3).



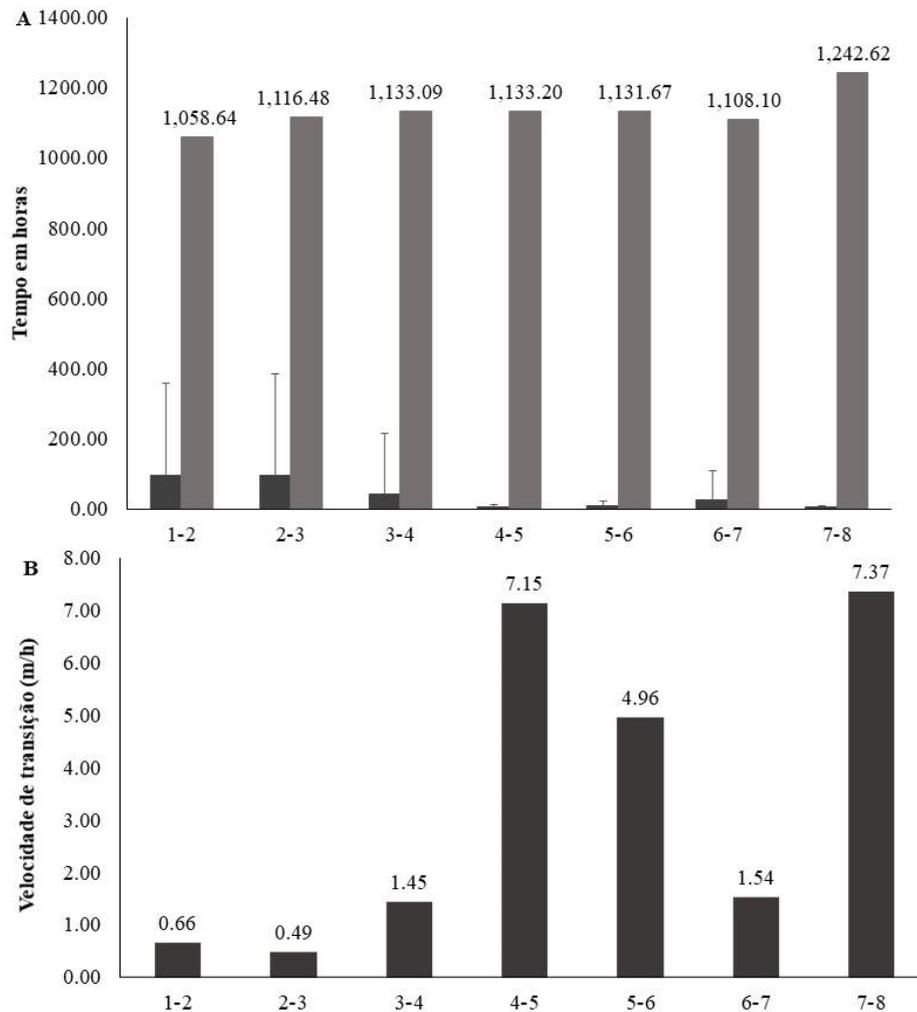
**Figura 3.** Frequência relativa (%) de exemplares de *Rhinelepis aspera* registrados na escada para peixes da UHE Engenheiro Sérgio Motta no decorrer das horas do dia.

Do total de indivíduos que entraram na escada para peixes ( $n = 142$ ) que foram registrados pela antena A1, apenas 25% ( $n = 35$ ) movimentaram até última antena na escada, onde foram registrados pela antena A8, possivelmente moveram em direção ao reservatório (Figura 4). Foi observado que o número de indivíduos reduzia conforme se aproximava da saída a montante da escada para peixes (Figura 4), havendo redução drástica do número de indivíduos da antena 3 para a antena 4 (Figura 4). Estes peixes que chegaram até a terceira antena e que não completaram o movimento ascendente, permaneceram na escada por até 1271,40 horas.



**Figura 4.** Porcentagem (%) de *Rhinelepis aspera* registrados entre as antenas de monitoramento (A1 à A8) da escada para peixes da UHE Engenheiro Sérgio Motta.

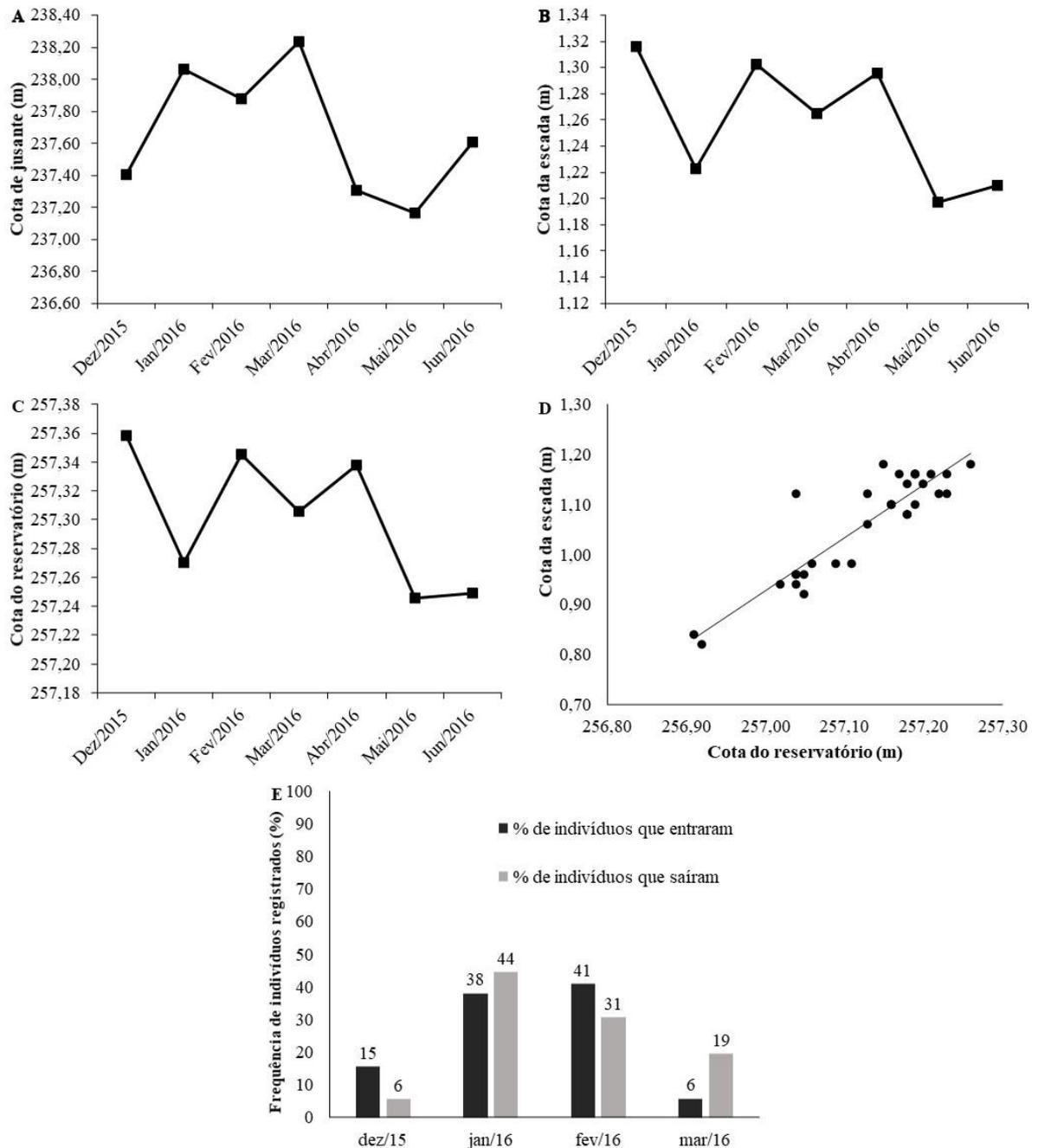
O tempo acumulativo médio de trânsito de *Rhinelepis aspera* entre as antenas A1 e a A8 foi de  $1242,62 \pm 724,36$  horas (Figura 5a). O tempo médio de deslocamento de *R. aspera* foi maior entre as antenas 1-2 (71,93 horas), 2-3 (60,92 horas) e 3-4 (46,78 horas) (Figura 5a) respectivamente, e menor tempo de deslocamento foi registrado nos últimos segmentos de antenas (4-5: 5,67 horas; 5-6: 8,66 horas; 6-7: 25,25 horas; 7-8: 5,28 horas) (Figura 5a). *Rhinelepis aspera* apresentou movimentos ascendentes em menor tempo nos três primeiros segmentos de antenas (1-2; 2-3; 3-4) e em maior tempo nos segmentos 7-8, 4-5 e 5-6, respectivamente (Figura 5b).



**Figura 5.** As barras representam o tempo médio de deslocamento (barra cinza escuro), tempo médio cumulativo de trânsito (barra cinza claro) (A) e velocidade de transição (B) de *Rhinelepis aspera* entre os segmentos de antenas na escada para peixes da UHE de Porto Primavera.

### 3.2 Fatores hidrológicos e hidráulicos e ascensão de *Rhinelepis aspera*

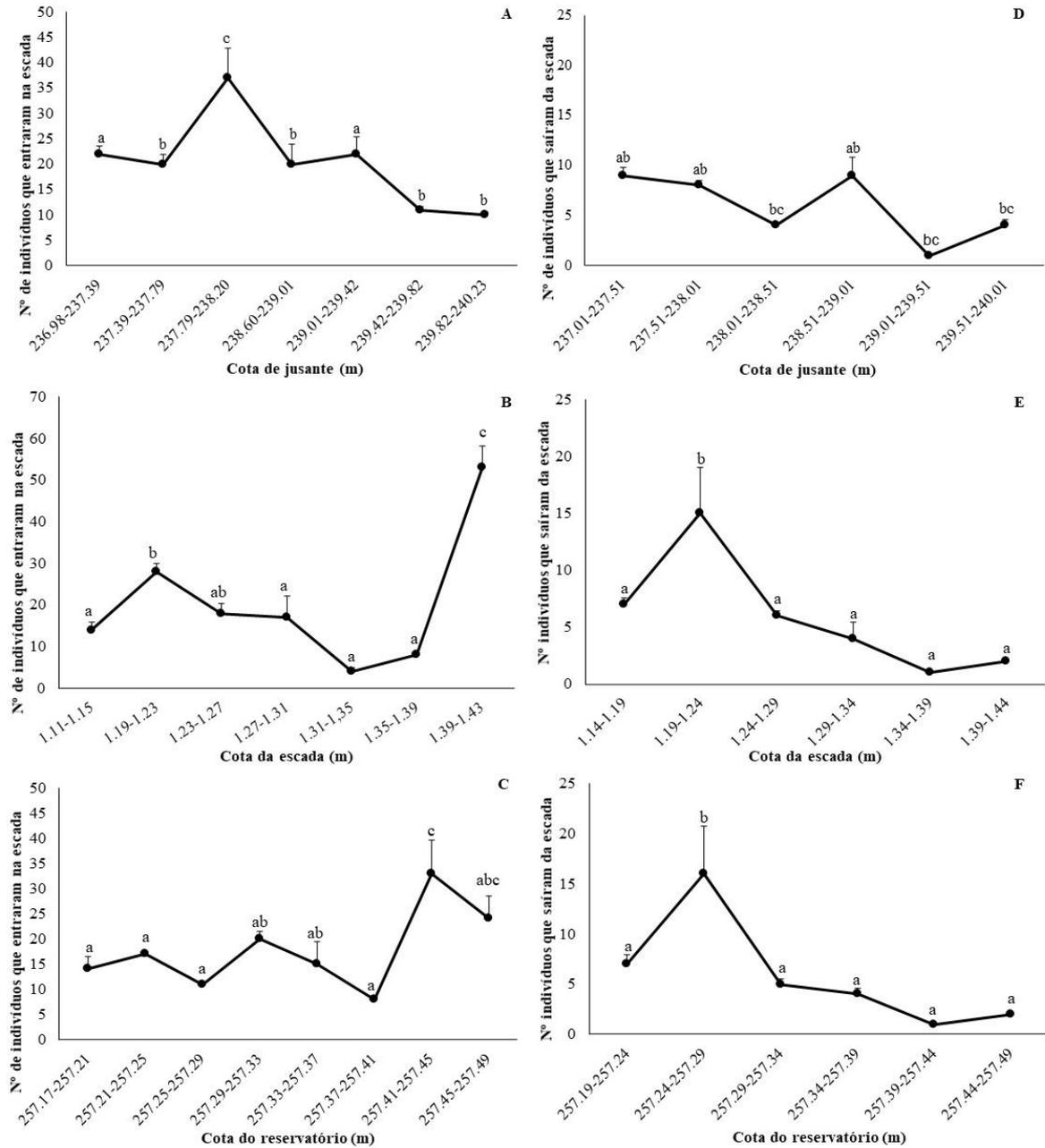
No período de estudo, a cota de jusante apresentou variação de 236,73 à 240,27 m ( $237,68 \pm 0,73$  m; Figura 6a), a cota da escada para peixes variou de 1,07 à 1,46 m ( $1,25 \pm 0,08$  m; Figura 6b), e a cota do reservatório variou de 257,12 à 257,50 m ( $257,30 \pm 0,08$  m; Figura 6c). A análise de regressão linear mostrou que as oscilações do nível de água da escada estão fortemente relacionadas com os níveis de cota do reservatório ( $R^2 = 0,81$ ;  $p < 0,01$ ; Figura 6d). Maior taxa de entrada de *R. aspera* na escada para peixes foi registrado em fevereiro de 2016 e maior taxa de saída pela escada foi observado em janeiro de 2016 (Figura 6e). O número de peixes que entraram na escada reduziu consideravelmente em março, não sendo registrado a migração de *R. aspera* pela escada nos meses de abril, maio e junho de 2016 (Figura 6e).



**Figura 6.** Cotas de jusante (A), da escada para peixes (B) e do reservatório (C) de Porto Primavera durante os meses de estudo; Análise de regressão linear da relação entre cota do reservatório com cota da escada para peixes (D); e Frequência relativa (%) de exemplares de *R. aspera* que entraram e saíram da escada nos meses em que estes foram ocorrentes (E).

O número de indivíduos que entraram na escada para peixes variou conforme as classes de cotas de água de jusante, escada e reservatório ( $p < 0,001$ , respectivamente). Maior registro de entrada de *R. aspera* na escada foi identificado entre as cotas 237,79-238,20 m de jusante (Figura 7a), na maior cota da escada (1,39-1,43; Figura 7b), e nas maiores cotas do reservatório (257,41-257,45 m e 257,45-257,49 m; Figura 7c). A taxa de indivíduos que saíram da escada para peixes também variou conforme as cotas de água de jusante, escada e reservatório

( $p < 0,001$ ), uma vez que maiores taxas de saída de *R. aspera* na escada foi registrado na cota 238,51-239,01 m de jusante (Figura 7d), com cota da escada de 1,19-1,24 m (Figura 7e) e com cota do reservatório de 257,24-257,29 m (Figura 7f).



**Figura 7.** Número de indivíduos que entraram na escada para peixes conforme a cota de jusante (A), escada (B) e reservatório (C), e Número de indivíduos que saíram pela escada mediante as cotas de jusante (D), escada (E) e reservatório (F) de Porto Primavera. Letras sobrescritas diferentes indicam diferenças significativas (*Kruskal-Wallis*;  $p < 0,05$ ).

Considerando o desnível do tanque da escada para peixes de Porto Primavera ( $\Delta H = 0,40$  m) e os demais desníveis adotados visando a comparação em diferentes cenários ( $\Delta H = 0,35$  e  $0,45$  m), foi observado que os maiores valores de velocidade da água, vazão total e potência dissipada foram registrados em desníveis mais elevados (Tabela 1). Em contrapartida, maior vazão do orifício de fundo foi registrado no desnível referência de  $0,40$  m, característico da escada de Porto Primavera, enquanto maior vazão do vertedouro livre foi registrado no desnível de  $0,45$  m (Tabela 1).

**Tabela 3.** Valores médios estimados de velocidade da água, vazão (Q) do vertedouro de fundo, do vertedouro livre, vazão total e potência dissipada em três diferentes desníveis de tanques ( $\Delta H$ ) (mensal):  $\Delta H = 0,40$  m (desnível referência da escada de Porto Primavera);  $\Delta H = 0,35$  e  $0,45$  m (desníveis simulados).

Variável hidráulica	$\Delta H = 0,35$	$\Delta H = 0,40$	$\Delta H = 0,45$
Velocidade (m/s)	2,62	2,80	2,97
$Q_{\text{orifício fundo}}$ (m <sup>3</sup> /s)	1,47	1,57	1,52
$Q_{\text{vertedouro livre}}$ (m <sup>3</sup> /s)	1,63	1,57	1,67
$Q_{\text{total}}$ (m <sup>3</sup> /s)	4,57	4,71	4,85
$P_{uv}$ (W/m <sup>3</sup> )	358,83	433,38	513,78

Foi verificado que o aumento do desnível dos tanques resultou em elevação da vazão média da escada, apresentando vazão média de  $4,45$  m<sup>3</sup>/s com desnível ( $\Delta H$ ) de  $0,35$  m;  $4,60$  m<sup>3</sup>/s com  $\Delta H$  de  $0,40$  m; e  $4,74$  m<sup>3</sup>/s com  $\Delta H$  de  $0,45$  m. Ao analisar a dissipação de energia para os sete segmentos, a potência dissipada entre os segmentos variou de  $254,55$  a  $282,73$  W/m<sup>3</sup> com  $\Delta H$  simulado de  $0,35$  m,  $269,37$  -  $300,06$  W/m<sup>3</sup> com  $\Delta H$  de  $0,40$ , e  $284,22$  -  $317,52$  W/m<sup>3</sup> com  $\Delta H$  simulado de  $0,45$  (Tabela 2). Nos três desníveis de tanques simulados, os maiores valores estimados de potência dissipada foram observados nos segmentos 3-4, 1-2, e 5-6, respectivamente, onde estão localizados os tanques de descanso (Tabela 3).

**Tabela 3.** Valores médios de dissipação de energia estimados para cada segmento da escada em três diferentes desníveis ( $\Delta H$ ) dos tanques da escada para peixes da UHE Porto Primavera.

Segmentos	$P_{uv}$ (W/m <sup>3</sup> )		
	$\Delta H = 0,35$	$\Delta H = 0,40$	$\Delta H = 0,45$
1-2	282,73	300,06	317,57
2-3	259,22	274,43	289,68
3-4	283,93	301,49	319,28
4-5	255,72	270,62	285,56
5-6	264,91	280,68	296,55
6-7	256,43	271,41	286,42
7-8	254,55	269,37	284,22

Ao avaliar a atuação das variáveis hidráulicas e hidrológicas (agrupadas) sobre a eficiência de ascensão de *R. aspera* na escada para peixes de Porto Primavera, a análise do modelo de regressão de COX demonstrou que as variáveis que exerceram algum efeito sobre a subida da espécie nos três diferentes cenários de desníveis ( $\Delta H = 0,35$  m;  $0,40$  m;  $0,45$  m) foram a cota de água da escada, cota de água de jusante, vazão do vertedouro livre e potência dissipada (Tabela 3).

**Tabela 3.** Covariáveis que possuem influência na ascendência de *Rhinelepis aspera* pela escada para peixes de Porto Primavera, conforme a análise de sobrevivência de COX. HR (*Hazard Rate*) representa a taxa de risco.

Parâmetro	$\Delta H = 0,35$		$\Delta H = 0,40$		$\Delta H = 0,45$	
	HR	<i>p</i> valor	HR	<i>p</i> valor	HR	<i>p</i> valor
Cota da escada (m)	<0,001	0,013	<0,001	0,008	<0,001	0,010
Cota de jusante (m)	1,347	0,003	1,347	<0,001	1,347	<0,001
$Q_{\text{vertedouro livre}}$ (m <sup>3</sup> /s)	1,549	0,012	1,549	0,008	1,549	0,010
$P_{uv}$ (W/m <sup>3</sup> )	0,526	0,018	0,526	0,013	0,526	0,011

#### 4. Discussão

A atratividade da escada para peixes é determinada pela combinação da localização e posicionamento da escada [54,55], e condições hidrodinâmicas encontradas na entrada do dispositivo [21]. De maneira geral, a entrada da escada deve gerar fluxos de altas velocidades [56], que sejam mais atrativas do que a velocidade da água do rio a jusante [57] e de sistemas turbulentos próximo às turbinas e vertedouros [19], e que sejam compatíveis com a capacidade físico-fisiológicas das espécies alvos [56]. A escada para peixes da UHE de Porto Primavera foi atrativa para o cascudo preto *R. aspera* no período do estudo. A elevada taxa de entrada e abundância de *R. aspera* nesta escada já foi relatada em outros estudos [18,40]. A taxa de entrada de *R. aspera* na escada para peixes (71%) neste estudo, foi consideravelmente maior do que a taxa de entrada de *Megaloporinus obtusidens* (10,3%) e *Megaloporinus piavussu* (2,6%), registrada através de um estudo de marcação e recaptura [46], sendo que estas espécies também são migradoras de longa distância na bacia do rio Paraná [9].

O tempo em que *R. aspera* levou para entrar na escada após a sua soltura foi considerado relativamente curto. Estudos evidenciam que o tempo que *R. aspera* leva para entrar na escada para peixes da UHE de Porto Primavera é consideravelmente menor comparado a de outros peixes migradores monitorados (*Brycon orbignyanus*, *Piaractus mesopotamicus*, *Prochilodus lineatus*), que levam cerca de 80-90 dias para entrar na escada [41]. Embora os peixes da família Loricariidae sejam considerados peixes de hábito noturnos [58], e que seus deslocamentos em sistemas de transposição são evidentemente mais acentuados neste período [50,59], a migração de *R. aspera* pela escada para peixes no período diurno.

O cascudo preto *R. aspera* apresentou dificuldades em ascender pela escada para peixes da UHE de Porto Primavera, resultando em baixa taxa de saída neste sistema, também verificado por outros autores para a mesma espécie [9,41]. Em um estudo realizado entre os anos de 2009 e 2010 [41], a taxa de saída de *R. aspera* na escada para peixes foi de 43%, consideravelmente maior do que a taxa de saída deste estudo (25%), realizado anos depois (2015-2016). A escada para peixes parece limitar a ascensão de alguns peixes siluriformes, como *R. aspera* [9,41], e *Pimelodus maculatus* [60].

O fato de *R. aspera* possuir preferências por ambientes rochosos e de correnteza [35] pode ter atraído os indivíduos para os primeiros segmentos da escada. Entretanto, foi evidente que a espécie enfrentou dificuldades ao se deslocar para os segmentos superiores da escada. O maior tempo de deslocamento e menor velocidade da espécie nos três primeiros segmentos de antenas (1-2; 2-3; 3-4) pode estar associado à presença dos dois primeiros tanques de descanso, que

estão localizados nos segmentos 1-2 e 3-4. Estes tanques devem possibilitar o descanso do peixe, caso necessário, antes de fazer a ascensão para os trechos superiores da escada [29,61]. Muitas espécies de peixes permanecem nesses tanques por longos períodos de tempo [62].

Nos tanques de descanso, os valores de dissipação de energia do escoamento devem ser baixos para evitar estresse e danos fisiológicos dos peixes [63]. Entretanto, neste estudo, os maiores valores de potência dissipada foram registrados nos segmentos onde se localizavam os tanques de descanso (1-2; 3-4; 5-6), e em todos os segmentos e desníveis simulados ( $\Delta H$ ), os valores de potência dissipada estavam acima do recomendado para tanques de descanso (até  $100\text{W/m}^3$ ) [64], para espécies fluviais ( $145\text{W/m}^3$ ) [65], e para peixes de pequeno a grande porte ( $150$  a  $200\text{W/m}^3$ ) [49,54]. Os maiores valores de potência dissipada no segmento 3-4, pode provocar uma desorientação do peixe devido a turbulência excessiva [54,66], que resulta em um custo energético de locomoção dos peixes a níveis extremos [28], fatores que podem ter auxiliado na redução drástica do número de indivíduos entre estes segmentos da escada, e levado a um maior tempo de deslocamento e movimentos mais lentos neste trecho. Ademais, os altos valores de potência dissipada podem causar danos corporais ou até a morte desses animais [28]. A implantação de defletores e o aumento no volume de água dos tanques são ótimas alternativas para corrigir a dissipação de energia extra [54,67]. O tempo de passagem de *R. aspera* pela escada (1.242,62 h) para peixes foi consideravelmente maior do que o seu tempo de passagens em anos anteriores (2009-2010) (178,9h) [41], e do que o tempo de passagens de peixes migradores com boa capacidade natatória [26,27], como *Prochilodus lineatus* (1,5-1,6) [41,44] e *Piaractus mesopotamicus* (2,2h), *Brycon orbinyanus* (2,9h) [41]. A demora de passagem pela escada é intrigante, uma vez que é de fundamental importância que os migradores ultrapassem os obstáculos e cheguem nas áreas de desova no momento certo [68], pois o atraso da migração pode afetar o desenvolvimento gonadal e das características sexuais secundárias, reduzindo o potencial reprodutivo [13,69] de *R. aspera*, que já se encontra ameaçada de extinção [70].

Neste estudo, as migrações de *R. aspera* pela escada para peixes de Porto Primavera ocorreram estritamente nos meses do período da piracema (que abrange de novembro a março). É importante ressaltar que as escadas para peixes não restringem o acesso de peixes não-migradores, especialmente a ocorrência de cascudos Loricariidae não-migradores frequentemente registrados em escadas para peixes na Bacia do rio Paraná [18,65,71,72].

As cotas de água exerceram uma contribuição importante para a taxa de entrada e saída de *R. aspera* pela escada para peixes. A vazão da escada é diretamente regulada pelo nível do reservatório, logo, a elevação da cota do reservatório pode tornar a escada mais atrativa para a

migração ascendente de peixes migradores [73]. A elevação da cota de jusante pode aumentar a probabilidade de migração de peixes potamódromos [74,75]. Por outro lado, é importante considerar que níveis mais altos de jusante podem ocasionar um “afogamento” da entrada da escada, tornando a sua localização menos perceptível pelos peixes migradores [21]. Em contrapartida, níveis mais baixos de jusante podem tornar o fluxo mais perceptivo e proporcionar melhor orientação dos peixes [48,76].

As dimensões e as propriedades geométricas das paredes (defletores) que separam os tanques, aliados com as variações do nível de água a jusante e a montante do sistema, influenciam diretamente no comportamento hidráulico da passagem [77,78]. A velocidade de escoamento é uma variável importante no processo de subida ou descida a ser avaliada, recomenda-se que a velocidade nos entalhes não deve exceder o limite máximo permitido de 2,0 m/s [19,53]. Entretanto, a velocidade de escoamento da escada para peixes de Porto Primavera estava acima do limite recomendado em todos desníveis simulados. Isso é um fator preocupante, uma vez que a velocidade da água não pode ultrapassar a capacidade de nado dos peixes que a utilizam [79,80]. É conhecido que o desenho da escada para peixes de Porto Primavera e a elevada velocidade da água deste sistema dificulta a passagem de *R. aspera* [60]. A vazão encontrada nos diferentes desníveis simulados, demonstra que houve um aumento desta variável se comparado a vazão estimada por outro estudo realizado em anos (2009-2010) anteriores (3,00-3,50 m<sup>3</sup>/s<sup>-1</sup>), sendo praticamente constante, pois é determinada pelo nível da água de montante [41].

Concluimos que a escada para peixes da UHE Porto Primavera foi atrativa para *R. aspera*, entretanto o sistema de transposição apresenta características estruturais e hidráulicas que limitam a ascensão dos indivíduos desta espécie. O que foi evidenciado pela redução significativa no número de indivíduos entre os trechos de antena 3-4 e reduzida na transposição da espécie. Embora o estudo tenha mostrado resultados importantes acerca da eficiência da escada para peixes de Porto Primavera para a espécie estudada, questões importantes como a capacidade natatória, comportamento alimentar e reprodutivo da espécie naquela região precisam ainda ser respondidas, além de estudo voltados para avaliar variação hidrológica e seus efeitos sobre os organismos aquáticos precisam ser realizadas.

## Referências

1. Schmutz, S; Moog, O. Dams: ecological impacts and management. Riverine Ecosystem Management; Schmutz, S.; Sendzimir, J.. *Aquat. Ecol. Ser.*, **2018**, 8, 111-127. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-73250-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-73250-3_6).

2. Zarfl, C; Lumsdon, AE; Berlekamp, J; Tydecks L, Tockner, K. A global boom in hydropower dam construction. *Aquat. Sci.*, **2014**, 77, 161–170.
3. REN21. Renewables 2015. Global Status Report. Paris, 2015. Disponível em: <<http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/>>
4. Rodrigues, SA; Batistela, GC. Uma revisão sobre a disponibilidade hídrica Brasileira para geração de energia elétrica? *Geoamb. on-line*, **2013**, 21, 48-67. <https://doi.org/10.5216/revgeoamb.v0i21.27907>.
5. Queiroz, R; Grassi, P; Lazzare, K; Koppe, E; Tartas, BR; Kemerich, PDC. Geração de energia elétrica através da energia hidráulica e seus impactos ambientais. *Reget/UFMS*, **2013**, 13, 13, 2774-2784. <http://dx.doi.org/10.5902/223611709124>.
6. Dos Santos, RSB. Aspectos da biografia Brasileira. *Rev. Brasil. Geogr.*, **1962**, 3, 327-376.
7. Fonseca, IFA. A construção de grandes barragens no Brasil, na China e na Índia: Semelhanças e peculiaridades dos processos de licenciamento ambiental em países emergentes. Ipea: Rio de Janeiro, Brasil, 2013. pp. 38.
8. Oliveira, NCCA. A grande aceleração e a construção de barragens hidrelétricas no Brasil. *Var. Hist.*, **2018**, 34, 65, 315-346. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-87752018000200003>.
9. Makrakis, S; Bertão, APS; Silva, JFM; Makrakis, MC; Sanz-Ronda, FJ; Celestino, LF. Hydropower Development and Fishways: A Need for Connectivity in Rivers of the Upper Paraná Basin. *Sust.*, **2019**, 11, 13, 3749. <https://doi.org/10.3390/su11133749>.
10. Gubiani, EA; Gomes, LC; Agostinho, AA; Okada, EK. Persistence of fish populations in the upper Paraná River: effects of water regulation by dams. *Ecol. of Fresh. Fish*, **2007**, 16, 2, 191–197. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0633.2006.00211.x>.
11. Stevaux, JC; Martins, DP, Meurer M. Changes in a large regulated tropical river: the Paraná River downstream from the Porto Primavera Dam, Brazil. *Geomorp.*, **2009**, 113, 230–238. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.03.015>.
12. Souza-filho, EE. The Porto Primavera dam and the fluvial transport on the Porto São José section, Paraná river. *Mercat.*, **2016**, 15, 4, 65-81.
13. Agostinho, AA; Gomes, LC; Veríssimo, S; Okada, EK. Flood regime, dam regulation and fish in the Upper Paraná River: effects on assemblage attributes, reproduction and recruitment. *Reviews in Fish Biol. and Fisheries*, 2004, 14, 11–19. <https://doi.org/10.1007/s11160-004-3551-y>.
14. Carvalho, AG. Injúrias e morte de peixes em hidrelétricas estudo das usinas de peixe Angical, Luís Eduardo Magalhães e Estreito. Tese de doutorado, Universidade Federal do Tocantins, Palmas-TO, 2019.

15. Agostinho, AA; Gomes, LC.; Pelicice, F.M. Ecologia e Manejo de Recursos Pesqueiros em Reservatórios do Brasil; EDUEM: Maringá, Brasil, 2007.
16. Makrakis, S.; Dias, J.H.P.; Lopes, J.D.M.; Fontes-Junior, H.M.; Godinho, A.L.; Martinez, C.B.; Makrakis, M.C. Premissas e Critérios Mínimos para Implantação, Avaliação e Monitoramento de Sistemas de Transposição para Peixes. *Bol. Soc. Bras. Ictiol.* **2015**, 114.
17. Lucas, M. C., Baras, E. Migration of freshwater fishes. Oxford: Blackwell Science, 2001, 420p.
18. Makrakis, S.; Makrakis, M.C.; Wagner, R.L.; Dias, J.H.P.; Gomes, L.C. Utilization of the fish ladder at the Engenheiro Sergio Motta Dam, Brazil, by long distance migrating potamodromous species. *Neotrop. Ichthyol.* **2007**, 5, 197–204. <http://dx.doi.org/10.1590/S1679-62252007000200014>.
19. Clay, C.H. Design of Fishways and Other Fish Facilities, 2 ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 1995.
20. Travade, F.; Larinier, M.; Boyer-Bernard, S.; Dartiguelongue, J. *Performance of Four Fish Pass Installations Recently Built in France. In: Fish migration and fish by-passes.* Jungwirth, M.; Schmitz, S.; Weiss, S. Fish. New. Boo., Oxford, Reino Unido, 1998, pp. 146-170.
21. Martins, SL. Sistemas para a transposição de peixes. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2000.
22. Santos, H. A.; Viana, E. M. F.; Pompeu, P. S. Martinez, C. B. Optimal swim speeds by respirometer: an analysis of three neotropical species. *Neotrop. Ichthyol.*, **2012**, 10, 4, 805-811. <https://doi.org/10.1590/S1679-62252012000400013>.
23. Santos, H.A., Pompeu, P.S., Martinez, CB. A Importância do Estudo da Capacidade Natatória de Peixes para a Conservação de Ambientes Aquáticos Neotropicais. *RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, **2007**, 12 (3), 141-149.
24. Martinez, CB., Santos, H.A.E., Pompeu, P.S. Estabelecimento de Parâmetros Hidráulicos para Escadas de Peixes do Tipo Ranhura Vertical Baseados em Características de Espécies Neotropicais. *RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, **2009**, 14 (1), 99-112.
25. Assumpção, L., Makrakis, M.C., Makrakis, S., Piana, P.A., Da Silva, P.S., Lima, AF., Fernandez, D.R. Morphological differentiation among migratory fish species from the Paraná River basin. *Biota Neotropica*, **2012**, 12 (4). <https://doi.org/10.1590/S1676-06032012000400003>.
26. Assumpção, L. Makrakis, M.C., Makrakis, S., Wagner, R.L., Da Silva, P.S., Lima, A.F., Kashiwaqui, E.A.L. The use of morphometric analysis to predict the swimming efficiency of two Neotropical long-distance migratory species in fish passage. *Neotropical Ichthyology*, 2012, 10(4):797-804. <https://doi.org/10.1590/S1679-62252012000400012>.

27. Bido, A.F., Elisabeth, U., Celestino, L.F., Serra, M., Makrakis, S. Stress indicators for *Prochilodus lineatus* (Characiformes: Prochilodontidae) breeders during passage through a fish ladder. *Marine and Freshwater Research*, 2018, 69 (12), p. 1814-1821. <http://dx.doi.org/10.1071/MF18087>.
28. Silva, A., Katopodis, C., Santos, J.; Ferreira, M.; Pinheiro, A. Cyprinid swimming behaviour in response to turbulent flow. *Ecolog. Engin.*, 2012, 44, 314-328. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.04.015>.
29. Viana, E. M. F., Martinezm C.B., Faria, M.T.C., Tolentino, B.S., Tomê, F.L.F.O., Saliba, A.P.M. Análise do comportamento hidráulico de um mecanismo de transposição de peixes do tipo escada com ranhura vertical em duas declividades. *RBRH*, 2016, 21 (4), 811-820. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011615129>.
30. Langeani, F.; Oyakawa, O.T.; Shibatta, A.O.; Pavanelli, C.S.; Casatti, L. Diversidade da ictiofauna do Alto Rio Paraná: Composição atual e perspectivas futuras. *Biota Neotrop.* 2007, 7, 1–18. <http://dx.doi.org/10.1590/S1676-06032007000300020>.
31. Ota, R.R.; DE Deprá, G.C.; Da Graça, W.J.; Pavanelli, C.S. Peixes da planície de inundação do alto rio Paraná e áreas adjacentes: Revised, annotated and updated. *Neotrop. Ichthyol.* 2018, 16, 1–111. <http://orcid.org/0000-0002-5743-2758>.
32. Graça, W. J.; Pavanelli, C. S. Peixes da planície de inundação do Alto Rio Paraná e áreas adjacentes; EDUEM: Maringá, Brasil, 2007.
33. Suzuki, H. I.; Agostinho, A. A.; Winemiller, K. O. Relationship between oocyte morphology and reproductive strategy in locariid catfishes of the Paraná River, Brazil. *Jour. Fis. Biol.* 2000, 57, 791-807. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2000.tb00275.x>.
34. Sato, Y., Fenerich-Verani, N.; Godinho, H. P. *Padrões reprodutivos de peixes da bacia do São Francisco*. In: Godinho, H. P. Águas, peixes e pescadores do São Francisco das Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 468. 2003.
35. Agostinho, A.A.; Gomes, L.C.; Suzuki, H.I.; Júlio-Júnior, H.F. *Migratory fishes of the Upper Paraná River Basin, Brazil*. In *Migratory Fishes of South America*; Carolsfeld, J., Harvey, B., Ross, C., Baer, A., Eds.; World Bank: Washington, DC, USA, 2003.
36. Antoniutti, D. M.; Ranzani-Paiva, T. M. J.; Godinho, H. M.; Paiva, P. Relação peso total/comprimento, crescimento do cascudo *Plecostomus albopunatatos* Regan, 1908 (Osteichthyes, Loricariidae) do rio Jaquari. *Bol. Inst. Pesca*, 1985, 12, 3, 105-120.
37. Bemvenuti, M. A., e Fischer, L.G. Peixes: Morfologia e adaptações. *Cadernos de Ecologia Aquática*, 2010, 5, (2), p. 31-54.
38. De Souza, A.L.P., Maciel, L.A.M., Rodrigues, L.R.R. Estudo da comercialização de peixes ornamentais da família Loricariidae (Siluriformes) em Santarém/PA. *PUBVET*, 2018, 2(9), p.1-7.
39. Agostinho, A. A.; Barbieri, G.; Verani, J. R. Idade e crescimento do cascudo preto *Rhinelepis aspera* (Siluriformes, Loricariidae) no rio Paranapanema, bacia do rio Paraná. *Revista UNIMAR*, 1991, 3, 2, 259-272.

40. Abilhoa, V.; Duboc, L. F. In: Mikich, S. B.; Bérnils, R. S. Livro vermelho da fauna ameaçada no Estado do Paraná. Curitiba: Instituto Ambiental do Paraná – IAP, 2004; pp. 581-682.
41. Wagner, R.L.; Makrakis, S.; Castro-Santos, T.; Makrakis, M.C.; Dias, J.H.P.; Belmont, R.F. Passage performance of long-distance upstream migrants at a large dam on the Paraná River and the compounding effects of entry and ascent. *Neotrop. Ichthyol.* **2012**, 10, 785–795. <https://doi.org/10.1590/S1679-62252012000400011>.
42. Jorcín, A.; Nogueira, MG.; Belmont, R. Spatial and temporal distribution of the zoobenthos community during the filling up period of Porto Primavera Reservoir (Paraná River, Brazil). *Braz. J. Biol.* **2009**, 69, 1, 19-29. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842009000100003>.
43. Shibatta, A.O.; Dias, J.H.P. 40 Peixes do Brasil: CESP 40 Anos, 1º ed., Doiis, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.
44. Celestino, L.F.; Sanz-Ronda, F.J.; Miranda, L.E.; Makrakis, M.C.; Dias, J.H.P.; Makrakis, S. Bidirectional connectivity via fish ladders in a large Neotropical river. *River Res. Appl.* **2019**, 35, 236–246. <https://doi.org/10.1002/rra.3404>.
45. Castro-Santos, T.; Haro, A.; Walk, S. A passive integrated transponder (PIT) tag system for monitoring fishways. *Fish. Res.*, **1996**, 28, 253–261.
46. Gutfreund, C.; Makrakis, S.; Castro-Santos, T.; Celestino, L.F.; Dias, J.H.P.; Makrakis, M.C. Effectiveness of a fish ladder for two Neotropical migratory species in the Paraná River. *Mar. Freshw. Res.* 2018, 1–9. <https://doi.org/10.1071/MF18129>.
47. Sturges, H.A. The choice of a class interval. *Journal of the American Statistical Association*, 1926, 21 (153), 65-66.
48. DVWK. *Fish Passages-Design, Dimension and Monitoring*; FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy, 2002.
49. Fuentes-Pérez, J.F., Sanz-Ronda, F. J.; Azagra, A.M., García-Veja, A. Nonuniform hydraulic behavior of pool-weir fishways: a tool to optimize its design and performance. *Ecol. Engin.*, **2016**, 86, 5-12. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.10.021>.
50. Celestino, LF., Sanz-Ronda, FJ., Kashiwaqui, EAL., Celestino, EF., Makrakis, MC., Makrakis, S. Daily movement behavior of two Neotropical armored catfish species (*Ancistrus* aff. *cirrhosus* Valenciennes, 1836 and *Hypostomus ancistroides* Ihering, 1911) at a road-stream crossing culvert. *Journal of Applied Ichthyology*, **2017**, 33 (6), 1092-1099. <https://doi.org/10.1111/jai.13446>.
51. Castro-Santos, T., Perry, R. *Time-to-event analysis as a framework for quantifying fish passage performance*. Adams, N. S.; Beeman, J. W.; Eiler, J. H.; Am. Telemetry Techniques: a user guide for fisheries research; Fish. Soc., Atlantic City, 2012, 427-452.
52. Cox, D. R. Regression models and life tables. *J. Royal Stat. Socie.*, Series B (Methodological), **1972**, 34, 2, 187-220.

53. Allison, P. D. Survival Analysis Using SAS®: A Practical Guide, Second Edition. SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, **2010**, pp. 3098-30183.
54. Larinier, M. Pool Fishways, Pre-Barrages and Natural Bypass Channels. Em: Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture. Les Ulis. Knowledge and management of aquatic ecosystems. 2002, 364, 54-82.
55. Arrais, AA., Costa, AB., Kohler, A. Implantação de sistema de transposição para peixes junto a hidrelétricas: aspectos técnicos a serem considerados para as pequenas centrais hidrelétricas. *Caderno de pesquisas*, **2012**, 24(2), 71-93. <http://dx.doi.org/10.17058/cp.v24i2.3592>.
56. Chiu, E., Heath, AL., Hebert, C., Jones, P., Marcos, K., Synkoski, E. C. Fish sustainability assessing Blockages and prioritizing passages, gemstone fish sustainability team. Tese de doutorado. University of Maryland, 2002.
57. Da Silva, L.G.M., Nogueira, L.B., Maia, BP., Resende, LB. Fish passage post construction issues: analysis of distribution, attraction and passage efficiency metrics at the Baguari Dam fish ladder to approach the problem. *Neotrop. Ichthyol*, **2012**, 10(4). <https://doi.org/10.1590/S1679-62252012000400008>.
58. Weber, C. Subfamília Hypostominae. *Check list dos peixes de água doce da América do Sul e Central*. In: Reias RE., Kullander, SO.; Ferraris Jr CJ. Editora da Pontificia Universidade Católica do Rio Grande do sul, Porto Alegre, 2003, 351-372.
59. Pompeu, OS., Martinez, CB. Variações temporais na passagem de peixes pelo elevador da Usina Hidrelétrica de Santa Clara, Rio Mucuri, leste brasileiro. *Revista Brasileira de Zoologia*, **2006**, 23, 340-349. <https://doi.org/10.1590/S0101-81752006000200005>.
60. Makrakis, S.; Fukushima, S.I.; Wagner, R.L. Piana, P.A.; Dias, J.H.P. Avaliação da eficiência da escada para peixes da UHE Engenheiro Sergio Motta - CESP, Rio Paraná (Rosana - São Paulo). XX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE. Grupo de estudo de impactos ambientais - GIA. 2009.
61. Larinier, M. Dams and Fish Migration. Toulouse. Institut de Mecanique des Fluides, 2000, 30 p.
62. Agostinho, AA., Agostinho, CS., Pelicice, FM., Marques, EE. Fish ladders: safe fish passage or hotspot for predation?. *Neotrop. Ichthyol*, 2012, 10 (4). <https://doi.org/10.1590/S1679-62252012000400001>.
63. Coletti, J. Z. Características do escoamento ao longo de uma escada de peixes do tipo Ranhura Vertical. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
64. Armstrong, G. S.; Aprahamian, M. W.; Fewins, G. A.; Gough, P. J.; Reader, N. A.; Varallo, P. V. Guidance notes on the legislation, selection and approval of fish passes in England and wales. Bristol: Environment Agency, 2010.
65. Junho, R. A.C. Migrações de peixes neotropicais e hidrelétricas: proteção a jusante de turbinas e vertedouros e sistemas de transposição. Tese de doutorado). Escola

- Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Sanitária. São Paulo, 2008.
66. Larinier, M. Upstream and downstream fish passage experience in France. In: Jungwirth, M. Schmutz, S.; Weiss, S. Fish migration and fish by-passes. Oxford and London, Fish News Books. 1998, p. 438.
  67. Martinez, C. B., Junho, R. A. C., Godinho, A. L., Macedo, A. A. Mecanismo de Transposição de Peixes. II Simpósio Brasileiro Sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas, Canela, Rio Grande do Sul. 2000
  68. Pompeu, P.S; Agostinho, A.A; Pelicice, F.M. Existing and future challenges: the concept of successful fish passage in South America river research and applications. *Riv. Res Applic.*, **2012**, 28, 4, 504-12. <https://doi.org/10.1002/rra.1557>.
  69. Fenkes, M., Shiels, H. A., Fitzpatrick, J. L. & Nudds, R. L. The potential impacts of migratory difficulty, including warmer waters and altered flow conditions, on the reproductive success of salmonid fishes. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol*, **2016**, 193, 11-21. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2015.11.012>.
  70. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade -ICMBIO. Livro vermelho da fauna Brasileira ameaçada de extinção, 1.ed., ICMBIO: Brasília, 2018, 492p.
  71. Bizzotto, PM. Trânsito de peixes na escada da UHE-Igarapava, rio Grande, Alto rio Paraná. Dissertação de mestrado. Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
  72. Kusma, C.M.; Ferreira, F. W. Mecanismo de transposição de peixes de pequena central hidrelétrica. *Ciênc Rur.*, **2009**, 40(1). <https://doi.org/10.1590/S0103-84782009005000247>.
  73. Celestino, L.F. Migração de *Prochilodus lineatus* (Valenciennes, 1836) através de escada para peixes em usina hidrelétrica: gatilhos migratórios e conectividade bidirecional. Tese de doutorado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2018.
  74. Taylor, M. K., & S. J. Cooke. Meta-analyses of the effects of river flow on fish movement and activity. *Environmental Reviews*, **2012**, 20: 211–219. <https://doi.org/10.1139/a2012-009>.
  75. Lopes, C. M., F. S. De Almeida, M. L. Orsi, S. G. D. C. Britto, R. N. Sirol, & L. M. K. Sodr . Fish passage ladders from Canoas Complex - Paranapanema River: evaluation of genetic structure maintenance of *Salminus brasiliensis* (Teleostei: Characiformes). *Neotropical Ichthyology*, **2007**, 5: 131–138. <https://doi.org/10.1590/S1679-62252007000200006>.
  76. Wilkes, M. A., M. Mckenzie, & J. A. Webb. Fish passage design for sustainable hydropower in the temperate Southern Hemisphere: an evidence review. *Reviews in Fish Biology and Fisheries Springer International Publishing*, **2017**, 28: 117–135.
  77. Larinier, M. Environmental issues, dams and fish migration. FAO fisheries technical paper, 2001, 419: 45-89.

78. Larinier, M.; Marmulla, G. Fish passes: Types, principles and geographical distribution- An overview. In Proceedings of the Second International Symposium on the Management of Large Rivers for Fisheries; Welcomme, R.L., Petr, T., Eds.; FAO Fisheries: Bangkok, Thailand, 2004; pp. 183–206.
79. Alvarez-Vázquez, L.J.; Martínez, A.; Vázquezmendez, M.E.; Vilar, M.A. An optimal shape problem related to the realistic design of river fishways. *E. Eng.*, 2008, 32, 293-300. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.10.008>.
80. Makrakis, S.; Miranda, L.E.; Gomes, L.C.; Makrakis, M.C.; Junior, H.M.F.J. Ascent of neotropical fish in the Itaipu reservoir fish pass. *River Res. Appl.* 2011, 27, 511–519. <https://doi.org/10.1002/rra.1378>.