



Relatório final

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA PRESENÇA DE POLUENTES SOBRE A ECOLOGIA TRÓFICA DA ICTIOFAUNA DA BACIA DO RIO DOCE

Projeto: Estudo da ictiofauna da bacia do rio Doce após o rompimento da barragem de rejeito da Samarco

Dra. Débora Reis de Carvalho
Dr. Paulo dos Santos Pompeu

Outubro, 2022

Sumário

Lista de figuras	3
Lista de tabelas	8
Sumário executivo	10
1. Introdução	10
1.1 Rompimento da barragem do Fundão e seus efeitos sobre a ecologia trófica dos peixes.....	10
1.2 Uso dos isótopos estáveis em estudos ecológicos.....	12
1.3 Objetivos.....	14
2. Metodologia	16
2.1 Área de Estudo e Desenho amostral.....	16
2.2 Amostragem de peixes.....	24
2.3 Amostragem de recursos alimentares.....	25
2.4 Parâmetros de qualidade da água.....	29
2.5 Análise isotópica.....	32
2.6 Análise de dados.....	33
2.6.1 Efeitos da presença de rejeitos sobre a estrutura trófica e fluxo de carbono das comunidades de peixes da bacia do rio Doce:.....	33
2.6.2 Efeitos de outros poluentes (esgoto) sobre as composições isotópicas dos peixes e recursos alimentares:.....	36
2.6.3 Obtenção de informações sobre a história de vida, residência e circulação de peixes na bacia do rio Doce.....	38
3. Resultados e Discussão	39
3.1 Efeitos da presença de rejeitos sobre a estrutura trófica e fluxo de carbono nas comunidades de peixes da bacia do rio Doce.....	41
3.2 Efeitos de outros poluentes (esgoto) sobre as composições isotópicas dos peixes e recursos alimentares.....	65
3.3 Obtenção de informações sobre a história de vida, residência e circulação de peixes na bacia do Rio Doce.....	80
4. Conclusões	90
5. Referências	93

Lista de figuras

- Figura 1** Desenho esquemático de um gráfico bi-plot (eixo x: $\delta^{13}\text{C}$; eixo y: $\delta^{15}\text{N}$) demonstrando a aplicabilidade dos isótopos estáveis de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) em estudos que avaliam a estrutura trófica de comunidades aquáticas. 13
- Figura 2** Desenho esquemático demonstrando a aplicabilidade dos isótopos estáveis de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) em estudos que avaliam o nicho trófico de populações e comunidades aquáticas. 14
- Figura 3** Pontos amostrados para isótopos estáveis ao longo da bacia Hidrográfica do rio Doce. I = Pontos Impactados pelo rompimento da barragem (I-1 a I-7); C = Pontos controle, não impactados pelo rompimento da barragem (C-1 a C-3). C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candongá); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina. 18
- Figura 4** Ponto controle (C-1) no Rio Piranga, próximo à cidade de Guaraciaba, MG. 19
- Figura 5** Ponto controle (C-2) no Rio Santo Antônio, próximo à cidade de Santo Antônio do Rio Abaixo, MG. 20
- Figura 6** Ponto controle (C-3) no Rio Manhuaçu, próximo à cidade de Aimorés, MG. 20
- Figura 7** Ponto impactado (I-1) no Rio Gualaxo do Norte, afluente do Rio Doce. 21
- Figura 8** Ponto impactado (I-2) no reservatório da UHE Risoleta Neves, no Rio Doce. 21
- Figura 9** Ponto impactado (I-3) no Rio Doce, próximo à cidade de São José do Goiabal. ... 22
- Figura 10** Ponto impactado (I-4) no Rio Doce, próximo à cidade de Naque, MG. 22
- Figura 11** Ponto impactado (I-5) no Rio Doce, próximo à cidade de Tumiritinga, MG. 23
- Figura 12** Ponto impactado (I-6) no Rio Doce, próximo à cidade de Aimorés, MG. 23
- Figura 13** Ponto impactado (I-7) no Rio Doce, próximo à cidade de Colatina, ES. 24
- Figura 14** Amostras de recursos alimentares coletadas em um dos 10 pontos amostrais ao longo da bacia hidrográfica do rio Doce. 26
- Figura 15** Processamento das amostras líquidas em laboratório: a) filtros de quartzo de 25mm utilizados para filtrar amostras líquidas; b) mufla utilizada para calcinar os filtros (a 500°C) antes da filtração; c) processo de filtração das amostras líquidas; d) amostras filtradas, pesadas e prontas para irem para estufa e, posteriormente, serem moídas a pó fino e homogêneo utilizando almofariz e pilão. 27
- Figura 16** Processamento das amostras sólidas em laboratório: a) amostras sendo desidratadas no liofilizador; b) amostra ao final do processo de desidratação; c) amostra

pronta para ser moída; d) amostras sendo moídas a pó fino e homogêneo utilizando almofariz e pilão..... 28

Figura 17 Processamento das amostras em laboratório: a) amostras sendo moídas a pó fino e homogêneo utilizando almofariz e pilão e b) amostra moída e pronta para ser encaminhada ao laboratório para análise isotópica 29

Figura 18 Site do “Portal de Monitoramento do rio Doce” da Fundação Renova, de onde as informações de qualidade da água dos pontos foram obtidas. 30

Figura 19 Estrutura trófica dos 10 pontos amostrados ao longo da bacia hidrográfica do Rio Doce considerando a composição isotópica dos peixes (média) e recursos alimentares (média e desvio padrão). C = Controle (C-1 a C-3); I = Impactado (I-1 a I-7). C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candongá); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina. Peixes: *Astyanax lacustris* (1); *Australoheros facetus* (2); *Awaous tajasica* (3); *Brycon dulcis* (4); *Brycon opalinus* (5); *Characidium timbuiense* (6); *Cichla kelberi* (7); *Cichla monoculus* (8); *Clarias gariepinus* (9); *Coptodon rendalli* (10); *Crenicichla lacustris* (11); *Crenicichla lepidota* (12); *Cyphocharax gilbert* (13); *Delturus carinotus* (14); *Deuterodon cf. intermedius* (15); *Deuterodon intermedius* (16); *Eleotris pisonis* (17); *Geophagus aff. brasiliensis* (18); *Geophagus sp.* (19); *Gymnotus sylvius* (20); *Hasemania nana* (21); *Henochilus wheatlandii* (22); *Hoplias intermedius* (23); *Hoplosternum littorale* (24); *Hypomasticus copelandii* (25); *Hypostomus affinis* (26); *Hypostomus luetkeni* (27); *Knodus moenkhausii* (28); *Lophiosilurus alexandri* (29); *Loricariichthys castaneus* (30); *Megaleporinus conirostris* (31); *Microcambeva sp.* (32); *Microphis lineatus* (33); *Oligosarcus acutirostris* (34); *Oligosarcus argenteus* (35); *Oligosarcus solitarius* (36); *Oreochromis niloticus* (37); *Pachyurus adspersus* (38); *Parotocinclus doceanus* (39); *Parotocinclus sp.* (40); *Pimelodus maculatus* (41); *Poecilia reticulata* (42); *Poecilia vivipara* (43); *Prochilodus argenteus* (44); *Prochilodus costatus* (45); *Prochilodus vimboides* (46); *Psalidodon aff. fasciatus* (47); *Psalidodon sp.* (48); *Pterygoplichthys pardalis* (49); *Pygocentrus nattereri* (50); *Rhamdia quelen* (51); *Salminus brasiliensis* (52); *Serrapinnus heterodon* (53); *Serrasalmus brandtii* (54); *Synbranchus marmoratus* (55); *Trachelyopterus striatulus* (56); *Trichomycterus aff. alternatus* (57); *Trichomycterus astromycterus* (58); *Trichomycterus sp.* (59)..... 44

Figura 20 Estrutura trófica dos 10 pontos amostrados ao longo da bacia hidrográfica do Rio Doce considerando apenas a composição isotópica dos peixes (média e desvio padrão). C = Controle (C-1 a C-3); I = Impactado (I-1 a I-7). C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candongá); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina. 46

Figura 21 Riqueza relativa (%) dos grupos tróficos da ictiofauna registrada em cada ponto amostrado na bacia do Rio Doce. C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candongá); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina. 47

Figura 22 Posições tróficas (moda) ocupadas por cada espécie de peixe em cada ponto amostral ao longo da bacia hidrográfica do Rio Doce. Obs: Espécies com poucos indivíduos apresentam grande variação no cálculo da posição trófica. 52

Figura 23 Variação nas métricas de diversidade trófica propostas por Layman et al. (2007) (1) amplitude de Carbono ($\delta^{13}\text{C}$) que representa a variedade de recursos utilizados pela comunidade; 2) amplitude de Nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) que indica a distância entre os valores mais e menos enriquecidos de $\delta^{15}\text{N}$ para os recursos e para os consumidores. Geralmente, uma maior amplitude de $\delta^{15}\text{N}$ sugere a presença de mais níveis tróficos em uma comunidade; 3) distância média do centroide que fornece uma medida do grau médio de diversidade trófica dentro de uma teia trófica; 4) distancia média do vizinho mais próximo (MNND) que representa uma medida da densidade total da comunidade. Quanto menor a MNND, maior a redundância trófica; 5) desvio padrão das distancias euclidianas do vizinho mais próximo (SDNND) que fornece uma medida da uniformidade da densidade espacial que é menos influenciada que o MNND pelo tamanho da amostra. Quanto menor o SDNND mais uniforme é a distribuição dos nichos tróficos. I = Pontos Impactados pelo rompimento da barragem (I-1 a I-7); C = Pontos controle, não impactados pelo rompimento da barragem (C-1 a C-3). C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candongá); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina..... 54

Figura 24 Recursos alimentares que sustentam as comunidades de peixes de cada ponto amostrado na bacia do Rio Doce. C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candongá); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina..... 57

Figura 25 Proporção de assimilação de cada recurso alimentar por cada espécie de peixe amostrada na bacia do Rio Doce (todos pontos em conjunto). 60

Figura 26 Nicho trófico (SEA – Standart Elipse Area) dos 10 pontos amostrados ao longo da bacia hidrográfica do Rio Doce. I = Pontos Impactados pelo rompimento da barragem (I-1 a I-7); C = Pontos controle, não impactados pelo rompimento da barragem (C-1 a C-3). C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candongá); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina..... 62

Figura 27 Nicho trófico (SEA – Standart Elipse Area) dos 10 pontos “separadamente” amostrados ao longo da bacia hidrográfica do Rio Doce. I = Pontos Impactados pelo rompimento da barragem (I-1 a I-7); C = Pontos controle, não impactados pelo rompimento da barragem (C-1 a C-3). C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candongá); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina. A área total ocupada pela comunidade é expressa pela linha pontilhada. 65

Figura 28 Variação nas assinaturas isotópicas de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) dos recursos alimentares e peixes amostrados em 10 pontos ao longo na bacia hidrográfica do Rio Doce. I = Pontos Impactados pelo rompimento da barragem (I-1 a I-7); C = Pontos controle, não impactados pelo rompimento da barragem (C-1 a C-3). C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candongá); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina..... 66

Figura 29 Variação nas assinaturas isotópicas de nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) dos recursos alimentares e peixes amostrados em 10 pontos ao longo na bacia hidrográfica do Rio Doce. I = Pontos Impactados pelo rompimento da barragem (I-1 a I-7); C = Pontos controle, não impactados pelo rompimento da barragem (C-1 a C-3). C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candongá); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina..... 69

Figura 30 Variação nas assinaturas isotópicas de carbono - $\delta^{13}\text{C}$ (a) e nitrogênio - $\delta^{15}\text{N}$ (b) de *Astyanax lacustris*, a espécie mais abundante e amplamente distribuída nos 10 pontos amostrados ao longo na bacia hidrográfica do Rio Doce. I = Pontos Impactados pelo rompimento da barragem (I-1 a I-7); C = Pontos controle, não impactados pelo rompimento da barragem (C-1 a C-3). C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candongá); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina..... 71

Figura 31 Registro fotográfico de canalização e lançamento de esgoto no Rio Doce na região de Colatina, ES..... 77

Figura 32 Relação entre amplitude de nicho trófico das comunidades de cada ponto amostral (SEAc) e concentrações de nitrato na água. C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candongá); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina..... 79

Figura 33 Nicho trófico ocupado por espécies migradoras (preto) e não migradoras (em vermelho) na bacia do rio Doce, considerando todos os 10 pontos amostrais juntos..... 80

Figura 34 Nicho trófico ocupado por espécies migradoras (preto) e não migradoras (em vermelho) na bacia do rio Doce, considerando cada um dos 10 pontos amostrados separadamente..... 82

Figura 35 Variação da composição isotópica de a) carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e b) nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) de *Knodus moenkhausii* em pontos impactados (1RD, 2RD e 3RD) e não impactados pelo rompimento da barragem do Fundão (1A, 2A e 3A) amostrados na porção alta (1RD= UHE Risoleta Neves e 1A = Rio Piranga), média (2RD= Rio Doce em Naque e 2A = Rio Santo Antônio) e baixa (3RD= Rio Doce em Aimorés e 3A = Rio Manhuaçu) da bacia do rio Doce. Caixa à direita = resultados teste post hoc. Note que a nomenclatura (siglas dos pontos) utilizada aqui é diferente das demais figuras..... 84

Figura 36 Nicho trófico (SEA) de *Knodus moenkhausii* em pontos impactados (1RD, 2RD e 3RD) e não impactados pelo rompimento da barragem do Fundão (1A, 2A e 3A) amostrados na porção alta (1RD= UHE Risoleta Neves e 1A = Rio Piranga), média (2RD= Rio Doce em Naque e 2A = Rio Santo Antônio) e baixa (3RD= Rio Doce em Aimorés e 3A = Rio Manhuaçu) da bacia do rio Doce..... 85

Figura 37 Elipses (standard ellipse area - SEA- calculadas usando intervalo de confiança de 40%) representando o nicho trófico da comunidade de peixes nativos e não nativos nos pontos amostrados na bacia do rio Doce. C-1 = Rio Piranga; C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-2 = Rio Doce (UHE Risoleta Neves); I-3 = Rio Doce (São José do Goiabal)

; I-4 = Rio Doce (Naque); I-5 = Rio Doce (Tumiritinga); I-6 = Rio Doce (Aimorés); I-7 = Rio Doce (Colatina). *No ponto I1 (Rio Gualaxo do Norte) não foram coletados indivíduos de espécies exóticas de peixes..... 89

Lista de tabelas

Tabela 1 Coordenadas geográficas dos pontos amostrados para isótopos estáveis ao longo da bacia Hidrográfica do rio Doce. I = Pontos Impactados pelo rompimento da barragem (I-1 a I-7); C = Pontos controle, não impactados pelo rompimento da barragem (C-1 a C-3). Coord. = Coordenadas..... 19

Tabela 2 Métricas de qualidade da água obtidas através do Portal de Monitoramento do rio Doce. Mês de referência: agosto/2020 (período em que as coletas deste projeto foram realizadas). Para os pontos em que não havia informação de *vazão*, *largura* e *profundidade máxima* optamos por pegar essa informação do ponto mais próximo (indicados com *). Prof. máx. = profundidade máxima; Temp. = Temperatura. C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candongá); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina..... 31

Tabela 3 Número de amostras para análise de isótopos estáveis coletadas de em cada ponto amostrado ao longo da bacia hidrográfica do Rio Doce. I = Pontos Impactados pelo rompimento da barragem (I-1 a I-7); C = Pontos controle, não impactados pelo rompimento da barragem (C-1 a C-3). C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candongá); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina..... 32

Tabela 4 Número de amostras para análise de isótopos estáveis coletadas de cada espécie de peixe em cada ponto amostrado ao longo da bacia hidrográfica do Rio Doce. I = Pontos Impactados pelo rompimento da barragem (I-1 a I-7); C = Pontos controle, não impactados pelo rompimento da barragem (C-1 a C-3). C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candongá); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina..... 39

Tabela 5 Posições tróficas ocupadas por cada espécie de peixe em cada ponto amostral ao longo da bacia hidrográfica do Rio Doce. C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candongá); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina..... 49

Tabela 6 Estimativa de nicho trófico (SEA – Standart Elipse Area) dos 10 pontos amostrados ao longo da bacia hidrográfica do Rio Doce. I = Pontos Impactados pelo rompimento da barragem (I-1 a I-7); C = Pontos controle, não impactados pelo rompimento da barragem (C-1 a C-3). C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candongá); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina. 61

Tabela 7 Média e desvio padrão da composição isotópica de **carbono ($\delta^{13}\text{C}$)** de cada espécie de peixe amostradas nos 10 pontos ao longo da bacia do Rio Doce. C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candongá); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em

Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina..... 72

Tabela 8 Média e desvio padrão da composição isotópica de **nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$)** de cada espécie de peixe amostradas nos 10 pontos ao longo da bacia do Rio Doce. C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candongá); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina. 74

Tabela 9 Correlação (Spearman) entre concentração de nitrato na água e composições isotópicas de nitrogênio no tecido dos peixes e recursos alimentares..... 78

Tabela 10 Partição de recursos alimentares de *Knodus moenkhausii* nos pontos impactados (1RD, 2RD e 3RD) e não impactados pelo rompimento da barragem do Fundão (1A, 2A e 3A). Produtores primários = perifíton (PE) + algas filamentosas (AL); Invertebrados = Invertebrados terrestres (IT) + macroinvertebrados aquáticos (BE). Recursos mais assimilados estão representados em negrito. 87

Sumário executivo

Através dos isótopos estáveis de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ foi possível reconstruir as teias tróficas das comunidades de peixes de 10 pontos da bacia do Rio Doce. Vimos que as comunidades de peixes dos pontos mais próximos ao rompimento apresentam menor diversidade trófica do que os demais pontos ao longo do Rio Doce. Entre as fontes de carbono que sustentam as comunidades de peixes do Rio Doce, vimos que invertebrados aquáticos (bentos), perifíton e algas filamentosas constituem os principais recursos alimentares. Entretanto a importância deles varia entre cada região estudada. De modo geral, peixes dos pontos controle consumiram recursos mais nutritivos (invertebrados aquáticos), enquanto peixes de pontos impactados pelo rompimento consumiram mais os produtores primários (algas filamentosas e perifíton). Apesar de serem observadas variações entre pontos amostrais, não foram observados valores muito atípicos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ nos peixes e recursos. Entretanto, as composições isotópicas empobrecidas em $\delta^{15}\text{N}$ do ponto em Colatina (I-7) chamaram atenção para uma provável entrada de esgoto na teia trófica. Também constatamos pouca ou nenhuma correlação entre a qualidade da água (concentrações de nitrato) e as composições isotópicas de $\delta^{15}\text{N}$ dos peixes e recursos, bem como com a amplitude de nicho. Vimos também que peixes migradores de alguns pontos amostrais (principalmente os da porção baixa da bacia) parecem ter nichos distintos aos das espécies residentes, o que sugere que eles possam estar se alimentando em regiões diferentes de onde foram coletados. Por fim, observamos uma grande sobreposição de nichos tróficos entre espécies exóticas e nativas, assim como o fato de algumas espécies exóticas (tilápias) conseguirem explorar nichos diversificados e não explorados por outras espécies de peixes.

1. Introdução

1.1 Rompimento da barragem do Fundão e seus efeitos sobre a ecologia trófica dos peixes

Em novembro de 2015 aconteceu um dos piores desastres ambientais brasileiros, o rompimento da barragem do Fundão. Os rejeitos provenientes dessa barragem de minério

devastaram uma área estimada em 1.469 ha incluindo áreas de preservação permanente (IBAMA, 2015), e atingiu um dos principais rios da região sudeste do país, o Rio Doce. Este rio, que apesar de já sofrer pelos impactos causados por inúmeras atividades antrópicas desenvolvidas ao longo da bacia há décadas, se viu também carreando aproximadamente 39.2 milhões de m³ de rejeitos de mineração por 670km até desembocar no oceano Atlântico (SÁNCHEZ et al., 2018), onde também causou diversos impactos. Esse desastre ambiental, além do seu grande impacto social e econômico na região (FERNANDES et al., 2016), também teve grande impacto na fauna e na flora, além de promover um intenso assoreamento dos copos d'água (SÁNCHEZ et al., 2018). Desastres ambientais, como o rompimento da barragem de Fundão, podem ter impactos severos na estrutura trófica das comunidades aquáticas, uma vez que podem promover a simplificação da comunidade devido à exclusão de espécies sensíveis e ao favorecimento de espécies resistentes à degradação ambiental. Além disso, espera-se também que ocorram alterações no comportamento alimentar dos consumidores (ANDRADES et al., 2020, 2021) em consequência de mudanças na disponibilidade de recursos alimentares.

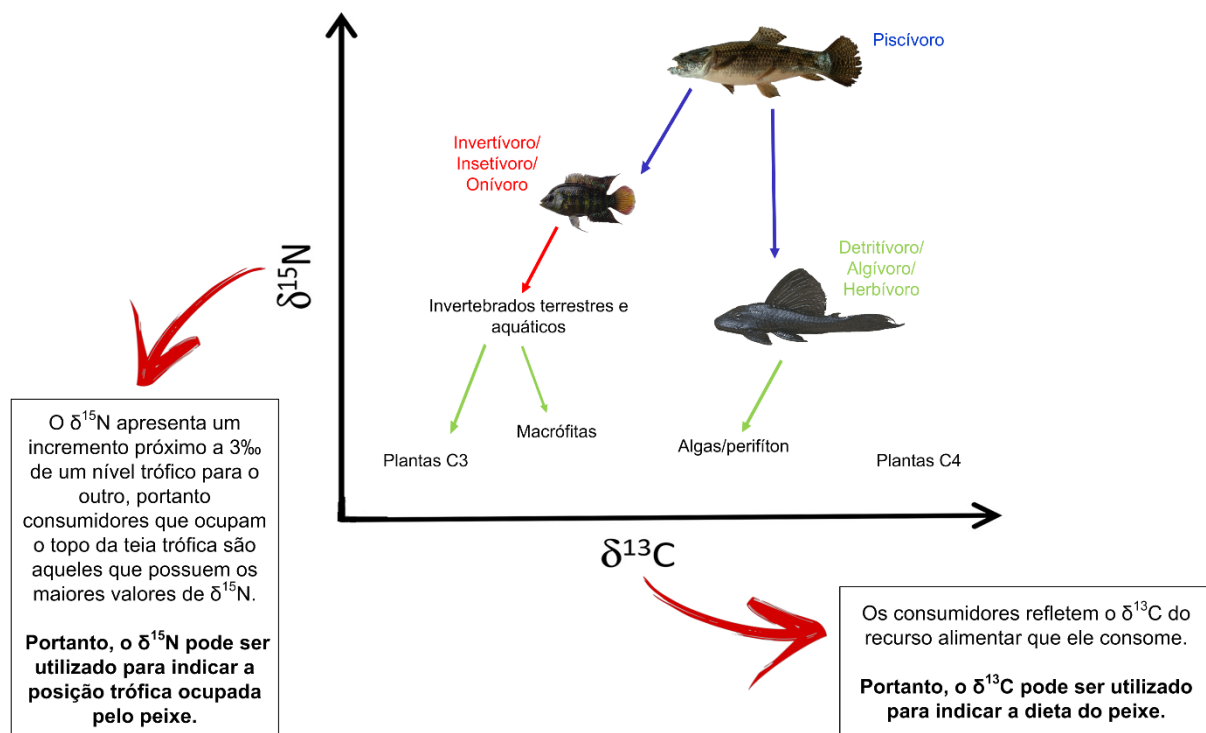
Os peixes são amplamente utilizados em estudos que avaliam o impacto de atividades antrópicas sobre a teia trófica de ambientes aquáticos (DE CARVALHO et al., 2017b, 2020b; LOOMER et al., 2015), uma vez que apresentam características vantajosas na obtenção de informações ambientais. Dentre elas, destacam-se: importância reconhecida pela população em geral, ampla distribuição, representatividade em diferentes níveis tróficos, identificação relativamente fácil e capacidade de responder à degradação (KARR; DUDLEY, 1981). Além disso, é sabido que as espécies de peixes neotropicais apresentam grande plasticidade trófica, podendo se alimentar de diferentes itens alimentares de acordo com a abundância dos mesmos (ABELHA; AGOSTINHO; GOULART, 2001). Desta forma, a avaliação da estrutura trófica e fluxo de carbono nas comunidades de peixes se torna uma ferramenta interessante para se obter informações sobre as condições ambientais da bacia do Rio Doce após o desastre ambiental.

1.2 Uso dos isótopos estáveis em estudos ecológicos

Nos últimos anos, os isótopos estáveis de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) surgiram como uma ferramenta inovadora na avaliação das teias tróficas e do fluxo de energia (ALBRECHT et al., 2021; ALONSO et al., 2020; DE CARVALHO et al., 2017b), devido à capacidade de determinação das fontes de alimento para consumidores em teias tróficas aquáticas e terrestres (PEREIRA; BENEDITO-CECILIO, 2007). A transferência da assinatura isotópica de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) ao longo da teia trófica é conservativa (ou seja, apresenta pequena variação de um nível trófico para o outro) podendo ser utilizada para traçar o fluxo de energia em sistemas onde existem vários tipos de alimentos com diferenças nos valores de ^{13}C (DENIRO; EPSTEIN, 1978). Isso é possível uma vez que os recursos basais, como os produtores primários (algas, perifíton, vegetação, entre outros), apresentam composições isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ distintas em decorrência das diferentes vias fotossintéticas empregadas na assimilação do carbono (ALBRECHT et al., 2021). Portanto, os consumidores destes produtores primários (como os peixes) irão apresentar uma composição isotópica de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) similar à composição isotópica do recurso alimentar consumido por eles, como exemplificado na **Figura 1**. O isótopo de nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$), por outro lado, é fracionado consistentemente ao longo da teia trófica, o que possibilita inferências sobre as relações tróficas dos consumidores com a sua dieta (VANDER ZANDEN; CABANA; RASMUSSEN, 1997). Por apresentar um incremento (fracionamento trófico) próximo a 3‰ de um nível trófico para o outro (POST, 2002a), os consumidores com maior $\delta^{15}\text{N}$ serão aqueles que ocupam as posições tróficas mais elevadas em uma comunidade (**Figura 1**). Além disso, esse último isótopo é amplamente utilizado em trabalhos em áreas poluídas (DE CARVALHO et al., 2020a, 2021; HADWEN; ARTHINGTON, 2007), uma vez que o tecido dos organismos reflete a elevada concentração de nitrogênio de ambientes aquáticos com este tipo de degradação.

Desta forma, o uso em conjunto destes esses dois isótopos permite a reconstrução de teias tróficas, mostrando de onde os consumidores obtém sua energia (**Figura 1**), além de possibilitar inferências sobre o seu grau de degradação. Para isso, é necessário coletar tecidos dos consumidores (peixes) e dos principais recursos alimentares disponíveis no

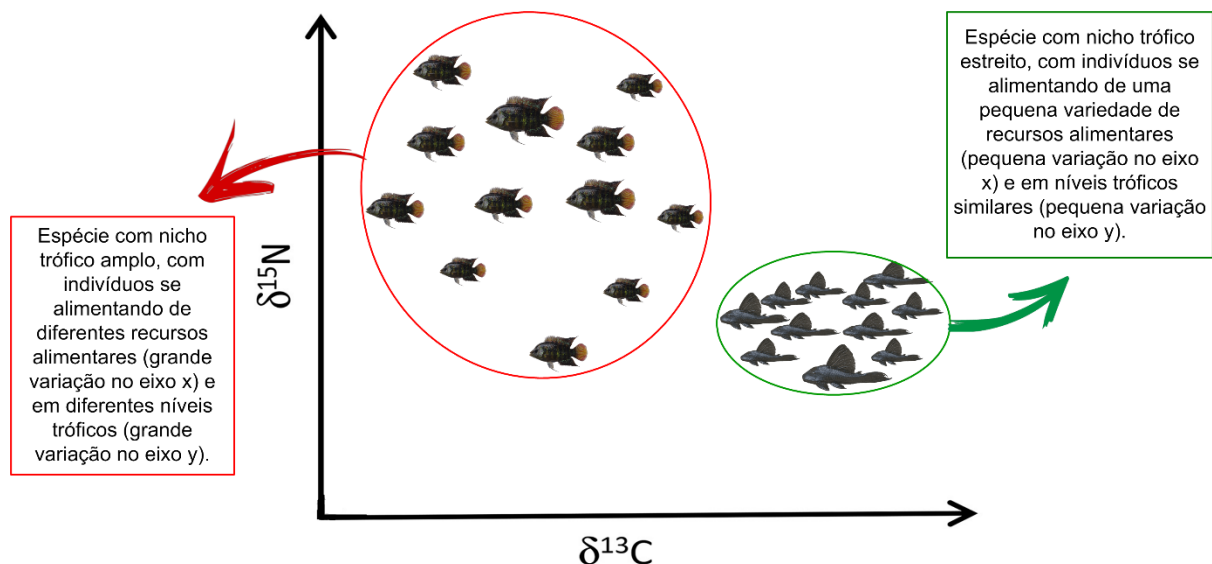
ambiente. Ao se obter a composição isotópica destes compartimentos, a reconstrução de teias tróficas se torna possível através da avaliação do espaço bi-plot, que consiste no emprego do isótopo de carbono no eixo x e do isótopo de nitrogênio no eixo y. Assim, de forma resumida, no eixo x os peixes irão estar localizados logo acima da assinatura de carbono do recurso consumidos por eles, mas irão apresentar um enriquecimento em torno de 3‰ no eixo y, devido ao fracionamento que ocorre no $\delta^{15}\text{N}$ de um nível trófico para o outro (Figura 1). Entretanto, sabemos que em condições naturais os peixes podem se alimentar de diversos recursos alimentares, incluindo recursos de origem animal e vegetal. Portanto, a composição isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ dos peixes refletirá a mistura de recursos consumidos por eles em um período prévio, que pode variar de semana a meses, dependendo do tecido analisado e das características dos peixes, como metabolismo e estágio ontogenético (MCINTYRE; FLECKER, 2006).



Juntos, os isótopos de $\delta^{15}\text{N}$ e $\delta^{13}\text{C}$ podem ser utilizados para reconstruir teias tróficas!

Figura 1 Desenho esquemático de um gráfico bi-plot (eixo x: $\delta^{13}\text{C}$; eixo y: $\delta^{15}\text{N}$) demonstrando a aplicabilidade dos isótopos estáveis de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) em estudos que avaliam a estrutura trófica de comunidades aquáticas.

Ao avaliar profundamente uma teia trófica é possível se obter estimativas do fluxo de energia e da estruturação da cadeia alimentar, avaliar quais os recursos alimentares que sustentam a comunidade aquática, avaliar como os consumidores exploram a gama de recursos disponíveis, assim como estimar o nível e o nicho trófico ocupado por cada espécie de peixe (Figura 2). Com os anos, novas análises surgiram para auxiliar nessas estimativas, como as análises de modelos de mistura (PARNELL et al., 2013) que permitem estimar as proporções dos recursos assimilados, análises de estimativas das posições tróficas (POST, 2002a; QUEZADA-ROMEGIALLI et al., 2018), assim como do nicho trófico ocupado pelos peixes (Figura 2) (JACKSON et al., 2011) e da diversidade trófica de uma comunidade (LAYMAN et al., 2007).



A avaliação do nicho trófico permite inferir se uma espécie apresenta hábito generalista ou especialista, assim como pode ser aplicada a nível de comunidade para se obter informações sobre a diversidade trófica (isto é, comunidades com nichos mais amplos apresentam maior diversidade trófica).

Figura 2 Desenho esquemático demonstrando a aplicabilidade dos isótopos estáveis de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) em estudos que avaliam o nicho trófico de populações e comunidades aquáticas.

1.3 Objetivos

Como os isótopos estáveis podem ser aplicados em abordagens desde o indivíduo até o nível ecossistêmico, essa ferramenta se torna interessante em estudos que avaliam os impactos de atividades antrópicas sob ecossistemas aquáticos. Portanto, este estudo teve

como objetivo principal avaliar a estrutura trófica das comunidades de peixes da bacia do Rio Doce, a qual sofreu fortemente com o desastre ambiental decorrente do rompimento da barragem de Fundão. Avaliamos diversos aspectos tróficos das comunidades de peixes em áreas impactadas e não impactadas pelos rejeitos minério provenientes do rompimento da barragem de Fundão, dividindo nossos objetivos específicos em três tópicos principais:

1) Efeitos da presença de rejeitos sobre a estrutura trófica e fluxo de carbono das comunidades de peixes do rio Doce:

- Comparar a estrutura trófica da comunidade de peixes de pontos afetados pelo rejeito com a comunidade de peixes de pontos que não foram afetados pelo rompimento da barragem.
- Avaliar se há variação na estrutura trófica da comunidade e se ela ocorre devido à substituição de espécies ou em resposta às alterações nos hábitos alimentares dos peixes.
- Avaliar como a presença do rejeito altera o uso do carbono pelas comunidades de peixes da bacia do rio Doce.
- Quantificar os recursos alimentares que suportam as comunidades de peixes ao longo do gradiente de contaminação.

2) Efeitos de outros poluentes (esgoto) sobre as composições isotópicas dos peixes e recursos alimentares:

- Investigar se ocorre absorção e assimilação do $\delta^{15}\text{N}$ enriquecido ou empobrecido com o efluente de esgoto (ou de outras fontes poluidoras) através de toda a teia trófica.
- Avaliar se através do enriquecimento do isótopo de nitrogênio nos recursos é possível fazer predições sobre a dispersão e níveis de poluentes ao longo da bacia do rio Doce.

- Correlacionar a assinatura de nitrogênio de recursos e consumidores com variáveis que interferem nas condições de preservação da bacia, como a qualidade de água.

3) Obtenção de informações sobre a história de vida, residência e circulação de peixes na bacia do rio Doce.

- Avaliar se, através das assinaturas isotópicas de carbono e nitrogênio no tecido dos peixes, é possível fazer predições sobre a residência e circulação (migração) dos peixes da bacia do Rio Doce.
- Avaliar como os isótopos estáveis podem auxiliar no fornecimento de informações sobre a história de vida dos peixes mais abundantes e distribuídos na bacia (p.e.: área de vida).

E por fim, a partir dessas informações, objetivou-se reconstruir a estrutura trófica de cada comunidade de peixes de diferentes pontos ao longo da bacia do Rio Doce, buscando também avaliar como se encontram as comunidades de peixes 5 anos (coletas realizadas em 2020) após o rompimento da barragem de Fundão. O trabalho foi desenvolvido por uma pesquisadora de pós-doutorado, Débora Reis de Carvalho, sob orientação dos professores Dr. Paulo dos Santos Pompeu (Universidade Federal de Lavras – UFLA) e Dr. Jorge Abdala Dergam dos Santos (Universidade Federal de Viçosa - UFV). Este estudo é o subprojeto II do projeto “Estudo da ictiofauna da bacia do rio Doce após o rompimento da barragem de rejeito da Samarco” financiado pela Fundação Renova e gerenciado pela Sociedade de Investigações Florestais (SIF) associada à Universidade Federal de Viçosa.

2. Metodologia

2.1 Área de Estudo e Desenho amostral

A bacia do Rio Doce situa-se na região sudeste brasileira, compreendendo uma área de drenagem de 86.715 km² abrangendo cerca de 222 municípios onde residem

aproximadamente 3,6 milhões de pessoas. As nascentes do rio Doce estão em Minas Gerais, nas serras da Mantiqueira e do Espinhaço. Suas águas percorrem 853 km até atingir o oceano Atlântico no povoado de Regência, no Espírito Santo (SÁNCHEZ et al., 2018). Quando se rompeu, em novembro de 2015, a barragem de Fundão liberou cerca de 39,2 milhões de m³ de rejeitos da mineração no Rio Doce, dos quais cerca de 24,3 milhões de m³ de partículas compostas, essencialmente, por quartzo e hematita, foram depositados em um trecho de aproximadamente 100 km do rio entre as barragens de Fundão e Candonga. Um volume estimado de 18,9 milhões de m³ – composto, em sua maioria, por partículas finas – ultrapassou o maciço de concreto da barragem e, após um percurso de 16 dias, desembocou no oceano, 670 km a jusante, espalhando-se pela área costeira (SÁNCHEZ et al., 2018).

De forma a abranger toda a bacia, as amostragens desse subprojeto foram realizadas em 10 pontos amostrais distribuídos entre tributários e calha principal da bacia do Rio Doce (Figura 3,

Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candongá); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina.

Tabela 1 Coordenadas geográficas dos pontos amostrados para isótopos estáveis ao longo da bacia Hidrográfica do Rio Doce.

I = Pontos Impactados pelo rompimento da barragem (I-1 a I-7); C = Pontos controle, não impactados pelo rompimento da barragem (C-1 a C-3). Coord. = Coordenadas.

Ponto Projeto	Sigla	Condição	Drenagem / Referência	Estado	Fuso	Coord. (E)	Coord. (N)
5	C-1	Controle	Rio Piranga (Guaraciaba)	MG	23K	709518	7726784
11	C-2	Controle	Rio Santo Antônio (S. Ant. Rio abaixo)	MG	23K	687610	7872625
34	C-3	Controle	Rio Manhuaçu (Aimorés)	MG	24K	261172	7842938
3	I-1	Impactado	Rio Gualaxo do Norte (Paracatu de baixo)	MG	23K	688284	7754717
10	I-2	Impactado	Rio Doce (UHE Risoleta Neves)	MG	23K	721890	7764082
13	I-3	Impactado	Rio Doce (São José do Goiabal)	MG	23K	735965	7785306
9	I-4	Impactado	Rio Doce (Naque)	MG	23K	782354	7869156
21	I-5	Impactado	Rio Doce (Tumiritinga)	MG	24K	219512	7900508
23	I-6	Impactado	Rio Doce (Aimorés)	MG	24K	282205	7844032
36	I-7	Impactado	Rio Doce (Colatina)	ES	24K	327949	7838898



Figura 4 Ponto controle (C-1) no Rio Piranga, próximo à cidade de Guaraciaba, MG.



Figura 5 Ponto controle (C-2) no Rio Santo Antônio, próximo à cidade de Santo Antônio do Rio Abaixo, MG.



Figura 6 Ponto controle (C-3) no Rio Manhuaçu, próximo à cidade de Aimorés, MG.



Figura 7 Ponto impactado (I-1) no Rio Gualaxo do Norte, afluente do Rio Doce.



Figura 8 Ponto impactado (I-2) no reservatório da UHE Risoleta Neves, no Rio Doce.



Figura 9 Ponto impactado (I-3) no Rio Doce, próximo à cidade de São José do Goiabal.



Figura 10 Ponto impactado (I-4) no Rio Doce, próximo à cidade de Naque, MG.



Figura 11 Ponto impactado (I-5) no Rio Doce, próximo à cidade de Tumiritinga, MG.



Figura 12 Ponto impactado (I-6) no Rio Doce, próximo à cidade de Aimorés, MG.



Figura 13 Ponto impactado (I-7) no Rio Doce, próximo à cidade de Colatina, ES.

2.2 Amostragem de peixes

A amostragem de peixes foi realizada com dois conjuntos de redes de emalhar de diferentes tamanhos de malhas (15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 70 e 80mm entre nós adjacentes), totalizando 20 redes em cada ponto. Além das redes de espera, foram utilizadas redes de arrasto, peneiras e tarrafa com malha de 20 mm (mesmo esforço amostral em cada ponto = 2h de amostragem). Após a captura, os peixes foram previamente identificados, pesados (g) e mensurados (mm). Para análise de isótopos estáveis foi padronizada a coleta de pelos menos cinco amostras de cada espécie de peixe em cada ponto amostral, sempre que possível. Em campo, os exemplares de peixes de maior tamanho tiveram uma parte do músculo retirado para análise isotópica. Já os peixes de menor tamanho (< 2 cm) foram analisados inteiros e tiveram somente o trato digestório retirado. Todas as amostras foram mantidas congeladas até o processamento em laboratório. Em laboratório as amostras de peixes foram liofilizadas por 24 horas e moídas a pó fino e homogêneo utilizando almofariz e pilão. Além disso, todas as espécies foram classificadas nas seguintes guildas tróficas de

acordo com dados da literatura: algívoros, detritívoros, herbívoros, onívoros, invertívoros/insetívoros e carnívoros.

2.3 Amostragem de recursos alimentares

Também foi padronizada a coleta de cinco amostras (em cada ponto amostral) de cada um dos seguintes recursos alimentares (Figura 14): (a) perifíton (biofilme); (b) algas filamentosas; (c) matéria em suspensão; (d) matéria orgânica particulada fina (FPOM); (e) CPOM (matéria orgânica particulada grossa); (f) macrófitas, (g) invertebrados aquáticos (bentos) e (h) invertebrados terrestres. Todo o processo de armazenamento e processamento das amostras de recursos ocorreu de acordo com metodologia específica (DE CARVALHO et al., 2017b), como descrito a seguir.

O perifíton (PE) foi coletado por raspagem de pedras com uma pequena escova e armazenado com água destilada em potes plásticos. Amostras de matéria orgânica particulada grossa (CPOM), algas filamentosas (AL) e macrófitas (MA) foram coletadas aleatoriamente no leito de todos os pontos amostrais em que foram encontradas. Amostras de matéria orgânica particulada fina (FPOM) depositada no sedimento foram obtidas ressuspensando o sedimento e passando por peneiras específicas. A matéria em suspensão (MS, ou seja, seston) foi obtida fixando uma rede fitoplanctônica (malha de 45 μm) na coluna de água por um período de 3 minutos. Invertebrados aquáticos/bentos (BE) foram amostrados usando redes tipo Kick net e peneiras perto das margens, em macrófitas aquáticas, bancos de folhiços e em corredeiras. Invertebrados terrestres (IT) foram amostrados manualmente em diferentes pontos da mata ciliar e margens dos rios. Após a coleta, todas as amostras foram armazenadas em frascos de plástico e mantidas em gelo até seu congelamento em freezers e processamento em laboratório (Figura 14).



Figura 14 Amostras de recursos alimentares coletadas em um dos 10 pontos amostrais ao longo da bacia hidrográfica do rio Doce.

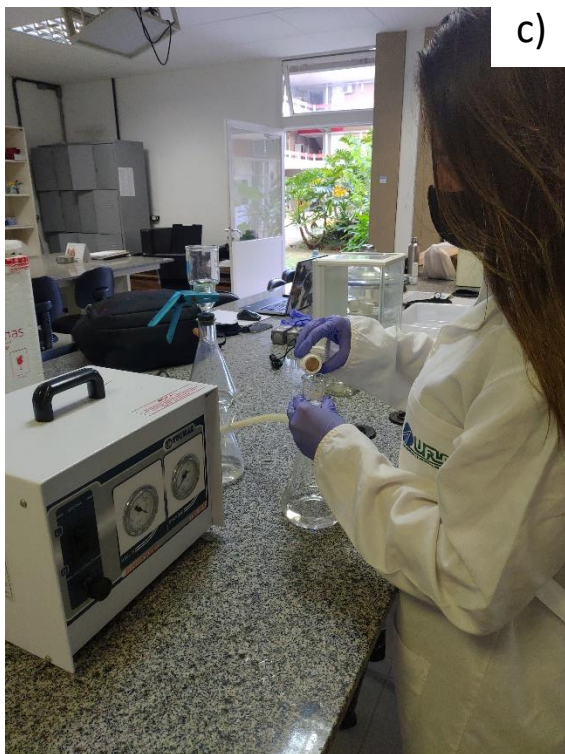
Em laboratório, as amostras de perífiton, FPOM e de matéria em suspensão foram filtradas através de filtros de fibra de quartzo previamente calcinados (filtros de quartzo Whatman® QMA) usando um aparelho de filtração acoplado a uma bomba de vácuo (Figura 15). Após a filtração, os filtros com as amostras foram secos em estufa a 40°C até estabilização do peso. As demais amostras de recursos basais foram liofilizadas por um período mínimo de 24h (Figura 16) e em seguida foram moídas até pó fino e homogêneo utilizando almofariz e pilão (Figura 17).



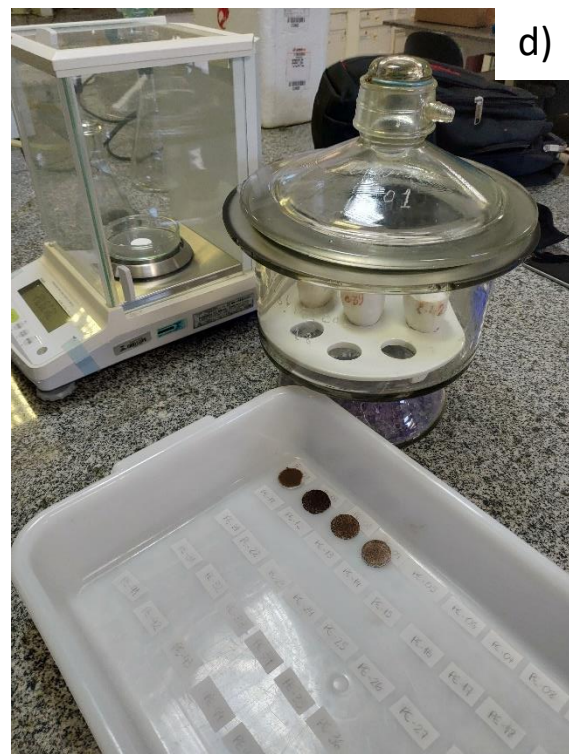
a)



b)



c)



d)

Figura 15 Processamento das amostras líquidas em laboratório: a) filtros de quartzo de 25mm utilizados para filtrar amostras líquidas; b) mufla utilizada para calcinar os filtros (a 500°C) antes da filtragem; c) processo de filtragem das amostras líquidas; d) amostras filtradas, pesadas e prontas para ir para estufa e, posteriormente, serem moídas a pó fino e homogêneo utilizando almofariz e pilão.



a)



b)



c)



d)

Figura 16 Processamento das amostras sólidas em laboratório: a) amostras sendo desidratadas no liofilizador; b) amostra ao final do processo de desidratação; c) amostra pronta para ser moída; d) amostras sendo moídas a pó fino e homogêneo utilizando almofariz e pilão.



Figura 17 Processamento das amostras em laboratório: a) amostras sendo moídas a pó fino e homogêneo utilizando almofariz e pilão e b) amostra moída e pronta para ser encaminhada ao laboratório para análise isotópica

2.4 Parâmetros de qualidade da água

As informações referentes à qualidade da água dos pontos amostrados foram obtidas através do portal do “Programa de Monitoramento Quali-quantitativo Sistemático de Água e

Sedimento (PMQQS)” que foi implementado em 2017 com o objetivo de acompanhar, ao longo do tempo, a recuperação da bacia hidrográfica do rio Doce e zona costeira e estuarinas adjacentes (<https://portal-de-monitoramento-rio-doce-fundacaorenova.hub.arcgis.com/>) (Figura 18). Através deste portal (para o período do mês de agosto de 2020, ou seja, mesma data da realização as coletas) acessamos as concentrações de: Carbono orgânico dissolvido (mg/L); Condutividade in situ ($\mu\text{S}/\text{cm}$); Nitrato (mg/L); Nitrogênio amoniacal (mg/L); Oxigênio dissolvido in situ (mg/L); pH in situ; Sólidos dissolvidos totais (mg/L); Temperatura da amostra in situ ($^{\circ}\text{C}$); Turbidez in situ (NTU) e Sulfato (mg/L). Além disso, também obtivemos informações de profundidade máxima (cm), largura (m) e vazão (m^3/s) (Tabela 2). Para obtenção dessas informações, foram selecionadas estações de captação de dados mais próximas aos nossos pontos amostrais.

The image shows a web browser window with the URL portal-de-monitoramento-rio-doce-fundacaorenova.hub.arcgis.com/pages/pa-download. The page has a dark blue header with navigation links: Página Inicial, Governança, Impactos na Bacia, Monitoramento Convencional, Monitoramento Automático, Documentos, Institucional, Dúvidas, and Download de Dados. Below the header is a banner image of a river with the text "Download de Dados" overlaid. The main content area is titled "Download" and contains a search form with the following fields and options:

- Origem:** Manual (selected) and Automático
- Pontos:** Seleccione (dropdown)
- Tipo de amostra:** Seleccione (dropdown)
- Período:** dd/mm/aaaa (calendar icon) and dd/mm/aaaa (calendar icon)
- Parâmetros:** Seleccione (dropdown)

Below the form, there are links for "Informações Complementares" and "Listas Taxonômicas Comunidades Aquáticas PMQQS". At the bottom right of the form area are buttons for "Limpar" and "Pesquisar". The word "Itens" is visible at the bottom left of the page.

Figura 18 Site do “Portal de Monitoramento do rio Doce” da Fundação Renova, de onde as informações de qualidade da água dos pontos foram obtidas.

Tabela 2 Métricas de qualidade da água obtidas através do Portal de Monitoramento do rio Doce. Mês de referência: agosto/2020 (período em que as coletas deste projeto foram realizadas). Para os pontos em que não havia informação de *vazão*, *largura* e *profundidade máxima* optamos por pegar essa informação do ponto mais próximo (indicados com *). Prof. máx. = profundidade máxima; Temp. = Temperatura. C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candongia); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina.

Ponto do Portal de Monitoramento do rio Doce	Ponto projeto	Prof. máx. (cm)	Vazão (m ³ /s)	Largura (m)	Temp. (°C)	Turbidez (NTU)	pH	Condutividade (µS/cm)	Carbono orgânico dissolvido (mg/L)	Nitrato (mg/L)	Nitrogênio amoniacal (mg/L)	Oxigênio dissolvido (mg/L)	Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	Sulfato (mg/L)
RPG-01	C1	358	38.511	48.4	20.7	8.08	6.67	46.1	<2	0.34	<0.05	8.77	32	0.85
RSA-01 e RSA-01M*	C2	163	55.083	145.1	23.2	7.75	6.89	33.2	<2	0.18	<0.05	8.08	23	0.59
RMH-01	C3	241	47.184	110.06	23.2	3.12	7.69	44.5	<2	0.44	<0.05	8.95	31	0.93
RGN-01 e RGN-01M*	I1	82	1.276	6.4	19.9	4	7.62	94.4	9.1	0.23	<0.05	8.39	66	2.8
RDO-01 e RDO-01M*	I2	334	62.029	78.54	20.2	7.43	7.66	49.6	<2	0.37	<0.05	8.94	34	1.2
RDO-03	I3	261	71.152	66.75	20.9	12.39	7.17	51	<2	0.39	<0.05	8.23	35	1.3
RDO-05	I4	221	150.851	188.17	22.9	18.84	6.3	97.5	<2	0.67	<0.05	8.68	68	6.1
RDO-09	I5	364	255.943	360.39	22.6	3.87	7.73	73	<2	0.51	<0.05	9.79	51	4.3
RDO-11	I6	1887	292.242	186.52	23.4	1.17	7.42	65.5	<2	0.50	<0.05	8.40	49	3.1
RDO-13 e RDO-14*	I7	369	313.948	417.49	23.7	2.08	7.4	68.1	<2	0.51	<0.05	8.25	51	3.3

2.5 Análise isotópica

Para a análise isotópica selecionamos cerca de 2-5 mg de material seco do tecido animal e de aproximadamente 5-10 mg para amostras vegetais (Figura 17). Após o término da preparação do material, as amostras foram encaminhadas ao laboratório especializado em análise isotópica, CENA/USP. Todas as amostras foram analisadas por razões isotópicas ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ e $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) de carbono total e teor de nitrogênio.

Um total de 936 amostras foi coletado, sendo 560 amostras de peixes, 50 amostras de perifíton, 50 amostras de algas filamentosas; 50 amostras de matéria em suspensão; 50 amostras de matéria orgânica particulada fina (FPOM); 50 amostras de CPOM (matéria orgânica particulada grossa); 26 amostras de macrófitas (único recurso não encontrado em todos pontos amostrais), 50 amostras de invertebrados aquáticos e 50 amostras de invertebrados terrestres (Tabela 3).

Tabela 3 Número de amostras para análise de isótopos estáveis coletadas de em cada ponto amostrado ao longo da bacia hidrográfica do Rio Doce. I = Pontos Impactados pelo rompimento da barragem (I-1 a I-7); C = Pontos controle, não impactados pelo rompimento da barragem (C-1 a C-3). C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candonga); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina.

Amostras	C-1	C-2	C-3	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	I-7	Total
Alga filamentosa	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	50
Perifíton	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	50
Folhíço (CPOM)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	50
Macrófitas			5		5		1	5	5	5	26
Material em suspensão	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	50
Sedimento (FPOM)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	50
Inv. terrestres	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	50
Inv. aquáticos (bentos)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	50
Peixes	40	76	73	15	67	56	44	75	50	64	560
Total	75	111	113	50	107	91	80	115	90	104	936

Das 936 amostras, 907 foram analisadas isotopicamente no Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP). Vinte e nove amostras de FPOM não foram analisadas, pois o processamento em laboratório foi prejudicado devido a um defeito detectado no

aparato de filtração nas últimas amostras que estavam sendo processadas. Entretanto, a ausência destas amostras não afetou os resultados, uma vez que as amostras de FPOM (matéria orgânica do sedimento) que foram analisadas apresentaram assinaturas isotópicas similares ao da matéria orgânica em suspensão na água, a qual foi analisada integralmente e utilizada nas análises.

2.6 Análise de dados

Os dados isotópicos das amostras coletadas foram analisados estatisticamente de forma a contemplar os objetivos específicos que foram distribuídos em três tópicos:

2.6.1 Efeitos da presença de rejeitos sobre a estrutura trófica e fluxo de carbono das comunidades de peixes da bacia do rio Doce:

Análises:

Estrutura trófica (bi-plot)

Para avaliar a estrutura trófica de cada ponto amostral foram construídos gráficos bi-plot através das composições isotópicas dos peixes e recursos (eixo x: $\delta^{13}\text{C}$ e eixo y: $\delta^{15}\text{N}$). Através destes gráficos é possível representar a estrutura trófica de cada ponto amostral, além de extrair informações importantes como por exemplo: 1) Qual espécie ocupa a base e o topo da teia trófica? 2) Quais recursos alimentares parecem ser mais importantes para sustentar as comunidades de peixes? 3) Quais espécies possuem dietas similares e quais apresentam dietas mais distintas? 4) Em qual ponto os peixes se alimentam de fontes de carbono (recursos alimentares) mais variadas? Para essa abordagem fizemos o gráfico de duas formas para facilitar a compreensão e observação da estrutura trófica de cada ponto: 1ª) Gráfico construído com os valores médios da composição isotópica dos peixes, enquanto os recursos são representados por valores médios e o desvio padrão (cruz). Neste gráfico é possível ter uma dimensão da estrutura trófica e recursos consumidos pela comunidade de peixes; 2ª) Gráfico contendo apenas as composições isotópicas dos peixes, incluindo também

o desvio padrão das composições isotópicas para cada espécie. Neste gráfico conseguimos avaliar quais espécies apresentam maior variação intraespecífica na alimentação (maior desvio padrão), assim como avaliar quais espécies sobrepõem suas dietas.

Riqueza relativa (%) dos grupos tróficos da ictiofauna

Para avaliar se a variação na estrutura trófica da comunidade ocorre devido à substituição de espécies ou em resposta às alterações nos hábitos alimentares dos peixes, nós calculamos riqueza relativa (%) dos grupos tróficos da ictiofauna registrada em cada ponto amostrado na bacia do Rio Doce (classificação em guildas tróficas feita através de dados da literatura).

Posições tróficas

Estimamos a posição trófica ocupada por cada espécie em cada ponto amostral por meio do pacote Bayesiano *tRophicPosition* implementado no pacote estatístico R (QUEZADA-ROMEGIALLI et al., 2018) para avaliar se os peixes mudam sua posição trófica dependendo do local em que habitam. Resumidamente, a análise *tRophicPosition* inclui variação isotópica (valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$, porcentagem de C e N e razão C/N) na linha de base (baseline) e no consumidor, a fim de fornecer uma estimativa robusta da posição trófica do consumidor. Para definir as linhas de base (*baseline*) que utilizaremos para estimar as posições tróficas, primeiro avaliamos os recursos basais que parecem ser mais assimilados pelos peixes de acordo com os gráficos *bi-plot* (ou seja, recursos com valores de $\delta^{13}\text{C}$ semelhantes aos peixes). Portanto, calculamos a posição trófica usando o "modelo completo de duas linhas de base" (em que um modelo de mistura incorpora o $\delta^{13}\text{C}$ permitindo a diferenciação entre duas fontes distintas de nitrogênio) considerando como linhas de base ($\lambda = 1$) as amostras de invertebrados aquáticos (baseline 1) e de algas filamentosas (baseline 2). Assumiu-se fracionamento isotópico de acordo com McCutchan et al. (2003) (tecido muscular $\Delta^{15}\text{N}$: 15 valores com média $2.9 \pm 0.32\text{‰}$ e $\Delta^{13}\text{C}$: 18 valores com média $1.3 \pm 0.3\text{‰}$).

Diversidade trófica

Para avaliar se a diversidade trófica das comunidades de peixes varia entre locais impactados e não impactados, calculamos as métricas propostas por Layman et al. (2007), quais sejam: 1) amplitude de Nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) que indica a distância entre os valores mais e menos enriquecidos de $\delta^{15}\text{N}$ para os recursos e para os consumidores. Geralmente, uma maior amplitude de $\delta^{15}\text{N}$ sugere a presença de mais níveis tróficos em uma comunidade; 2) amplitude de Carbono ($\delta^{13}\text{C}$) que representa a variedade de recursos utilizados pela comunidade; 3) distância média do centroide que fornece uma medida do grau médio de diversidade trófica dentro de uma teia trófica; 4) distância média do vizinho mais próximo (MNND) que representa uma medida da densidade total da comunidade. Teias tróficas com uma grande proporção de espécies com ecologias tróficas semelhantes (maior redundância trófica) terão uma MNND menor do que as teias em que as espécies são, em média, mais divergentes em relação ao seu nicho trófico; 5) desvio padrão das distâncias euclidianas do vizinho mais próximo (SDNND) que fornece uma medida da uniformidade da densidade espacial que é menos influenciada pelo tamanho da amostra do que o MNND. Valores baixos de SDNND sugerem uma distribuição mais uniforme de nichos tróficos. Para o cálculo dessas métricas também utilizamos o pacote Stable Isotope Bayesian Ellipses in R (SIBER) (JACKSON et al., 2011).

Fluxo de carbono / Fontes de carbono que sustentam a ictiofauna

As principais fontes de carbono que sustentam as comunidades de peixes foram determinadas através de modelos bayesianos de mistura isotópica (MOORE; SEMMENS, 2008; PARNELL et al., 2010), especificamente usando o pacote MixSIAR em R (STOCK; SEMMENS, 2016). Para esta análise é necessário primeiramente determinar quais são os recursos que parecem ser mais utilizados pelos peixes. Portanto, para determinar quais recursos utilizar no modelo de mistura, buscamos informações na literatura sobre os hábitos alimentares de cada espécie (classificação em guildas tróficas). Para espécies de hábito detritívoro, e/ou algívoros, consideramos os recursos: CPOM, algas, perifíton, material em suspensão e macrófitas (apenas nos locais em que as macrófitas foram amostradas). Para

espécies de hábito herbívoro consideramos os recursos: CPOM, algas, perifíton e macrófitas. Para espécies de hábito onívoro e invertívoro/insetívoro consideramos os recursos: invertebrados terrestres, invertebrados aquáticos, algas, perifíton e material em suspensão. Finalmente, para espécies com hábito carnívoro/piscívoro, utilizamos como recursos: invertebrados aquáticos, invertebrados terrestres e peixes. Os valores de fracionamento usados para os consumidores foram 1.3 ± 0.3 ‰ para carbono e 2.9 ± 0.32 ‰ para nitrogênio por nível trófico (MCCUTCHAN et al., 2003).

Nichos tróficos (nichos isotópicos)

Estimamos os nichos isotópicos (estimativa de nicho trófico) das comunidades de peixes de cada ponto amostral utilizando o pacote SIBER (SEA, SEAc e SEAb - expressas em ‰ 2) para avaliar se há diferenças entre os locais impactados e não impactados pelo rejeito (JACKSON et al., 2011). A área de elipse padrão (SEA) representa o espaço de nicho isotópico central e um proxy da riqueza e uniformidade dos recursos consumidos pela população (BEARHOP et al., 2004). Uma pequena correção do tamanho da amostra (indicada pela letra "c") foi aplicada a SEA para aumentar a precisão das comparações, permitindo a comparação de nichos de comunidades com diferentes tamanhos de amostra.. As métricas SEA e SEAc foram calculadas individualmente para os pontos amostrais.

2.6.2 Efeitos de outros poluentes (esgoto) sobre as composições isotópicas dos peixes e recursos alimentares:

Análises:

Estudos prévios realizados em uma bacia hidrográfica vizinha, bacia do Rio das Velhas, verificaram que a composição isotópica dos peixes e seus recursos alimentares (como algas e perifíton) estão intimamente relacionados com a concentração de nitrato e nitrogênio amoniacal na água (DE CARVALHO et al., 2020a, 2020b, 2021). As concentrações de nitrato e nitrogênio amoniacal, por sua vez, são elevadas em locais antropizados (em especial, áreas urbanas). Portanto, para avaliar se as composições isotópicas dos peixes e

recursos do Rio Doce são influenciadas pela qualidade da água de cada ponto amostrado na bacia do Rio Doce, fizemos as seguintes análises:

Variação das composições isotópicas de Carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e Nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) dos peixes e recursos

Para avaliar se as composições isotópicas de Carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e Nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) dos peixes e recursos variam entre os 10 pontos amostrais, foram realizadas análises de variância (ANOVAs), quando as suposições de normalidade e/ou homogeneidade de variância foram atendidas (Shapiro-Wilk e teste de Levene). O teste não paramétrico Kruskal-Wallis foi usado para dados com distribuições não normais. Fizemos esta mesma análise separadamente para a única espécie amostrada em todos os 10 pontos amostrais, o Lambari *Astyanax lacustris*.

Influência da qualidade da água no $\delta^{15}\text{N}$ dos peixes e recursos

Para avaliar se a qualidade da água influencia na composição isotópica dos peixes e recursos, fizemos análises de correlação (Spearman) entre o $\delta^{15}\text{N}$ encontrado nos peixes e recursos e a concentração de nitrato de cada ponto amostral. Não correlacionamos com o nitrogênio amoniacal uma vez no portal consultado eram apresentadas as mesmas concentrações em todos pontos amostrais (Tabela 2).

Influência da qualidade da água no nicho trófico

Para avaliar se a amplitude do nicho trófico é influenciada pelas concentrações de nitrogênio na água (como observado por DE CARVALHO et al., (2021) na bacia do Rio das Velhas), correlacionamos a área da elipse (SEAc) da comunidade de peixes de cada ponto com a concentração de nitrato na água. Assim como mencionado anteriormente, não correlacionamos com o nitrogênio amoniacal pois na base consultada tal parâmetro não apresentava variações, sendo os resultados abaixo do limite de quantificação (Tabela 2).

2.6.3 Obtenção de informações sobre a história de vida, residência e circulação de peixes na bacia do rio Doce

Predições sobre a residência e circulação dos peixes migradores

Para avaliar se através das composições isotópicas de Carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e Nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) do tecido dos peixes é possível fazer predições sobre a residência e circulação dos peixes da bacia do rio Doce, testamos se as espécies migradoras possuem nichos tróficos (SEAc, vide metodologia descrita acima) distintos do nicho da comunidade em que elas foram amostradas. Dessa forma, caso as espécies migradoras se alimentem em outros sítios de alimentação, elas apresentarão nichos distintos dos nichos das espécies residentes/ hábito sedentário.

Predições sobre a história de vida dos peixes mais abundantes e distribuídos na bacia

Knodus moenkhausii

Por ser uma espécie bem distribuída na bacia, e por apresentar plasticidade trófica como forma de adaptação ao ambiente (DE CARVALHO et al., 2019b), o *Knodus moenkhausii* se torna uma espécie de peixe de interesse especial. Portanto, comparamos a ecologia trófica do *K. moenkhausii* em 3 pontos impactados por rejeitos e em 3 pontos a montante destes pontos que não foram impactados pelo rompimento (pontos controle). Os pontos foram distribuídos de forma a contemplar as 3 porções da bacia: alto Rio Doce (ponto impactado I-2/UHE Risoleta Neves e não impactado C-1/Piranga); médio Rio Doce (ponto impactado I-4/Naque e não impactado C-2/Santo Antônio); e baixo Rio Doce (ponto impactado I-6/Aimorés e não impactado C-3/Manhuaçu). Comparamos as composições isotópicas do *K. moenkhausii* em cada um destes pontos utilizando ANOVA, assim como avaliamos o nicho trófico (SIBER) e as fontes de carbono mais assimiladas pelos indivíduos desta espécie (MIXSIAR). Todas as análises citadas já foram detalhadas anteriormente.

Espécies exóticas

A bacia do Rio Doce é conhecida pelo grande número de espécies de peixes não-nativos na bacia, uma vez que 25.5% da sua fauna de peixes (39 espécies) é considerada introduzida (BUENO et al., 2021). Considerando os inúmeros impactos atrelados à introdução de espécies, consideramos importante utilizar nossos dados para obtermos o maior número de informações possíveis sobre a relação das espécies exóticas com as espécies nativas desta bacia. Portanto, avaliamos se há sobreposição de nichos tróficos entre espécies nativas e exóticas de peixes na bacia em questão. Para isso, estimamos a amplitude e sobreposição de nichos através do pacote SIBER, já mencionado anteriormente.

3. Resultados e Discussão

Um total de 59 espécies de peixes foi coletado para análise isotópica nos 10 pontos amostrados ao longo da bacia hidrográfica do Rio Doce (Tabela 4). *Astyanax lacustris* foi a espécie com maior número de amostras, sendo também a única espécie amostrada em todos os pontos.

Tabela 4 Número de amostras para análise de isótopos estáveis coletadas de cada espécie de peixe em cada ponto amostrado ao longo da bacia hidrográfica do Rio Doce. I = Pontos Impactados pelo rompimento da barragem (I-1 a I-7); C = Pontos controle, não impactados pelo rompimento da barragem (C-1 a C-3). C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candonga); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina.

Espécies de peixe	C-1	C-2	C-3	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	I-7	Total
<i>Astyanax lacustris</i>	3	4	10	2	19	8	6	13	7	7	79
<i>Australoheros facetus</i>				1							1
<i>Awaous tajasica</i>										3	3
<i>Brycon dulcis</i>						1					1
<i>Brycon opalinus</i>		6									6
<i>Characidium timbuiense</i>		3									3
<i>Cichla kelberi</i>			3								3
<i>Cichla monoculus</i>			1								1
<i>Clarias gariepinus</i>			1			1					2
<i>Coptodon rendalli</i>			1		5	5		11			22
<i>Crenicichla lacustris</i>			2								2
<i>Crenicichla lepidota</i>									6	1	7
<i>Cyphocharax gilbert</i>						1					1
<i>Delturus carinotus</i>	1	3	4								8
<i>Deuterodon cf. intermedius</i>			5				5				10

Espécies de peixe	C-1	C-2	C-3	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	I-7	Total
<i>Deuterodon intermedius</i>			2								2
<i>Eleotris pisonis</i>										1	1
<i>Geophagus aff. brasiliensis</i>	6	4	5	1	2	4		8		5	35
<i>Geophagus sp.</i>		7	5			2					14
<i>Gymnotus sylvius</i>	3		3			1			2	2	11
<i>Hasemania nana</i>				1							1
<i>Henochilus wheatlandii</i>		5									5
<i>Hoplias intermedius</i>		2	3	1	6	6	4	2	6		30
<i>Hoplosternum littorale</i>			6			1					7
<i>Hypomasticus copelandii</i>		1	1								2
<i>Hypostomus affinis</i>	4			5						6	15
<i>Hypostomus luetkeni</i>	3	5	2		1			2	1		14
<i>Knodus moenkhausii</i>	5	5	5		5	5	5	5	5		40
<i>Lophiosilurus alexandri</i>								1			1
<i>Loricariichthys castaneus</i>			2		3		4				9
<i>Megaleporinus conirostris</i>	2		4		4			1	1	2	14
<i>Microcambeva sp.</i>					2						2
<i>Microphis lineatus</i>										5	5
<i>Oligosarcus acutirostris</i>							3	7	7		17
<i>Oligosarcus argenteus</i>	7	4	1		7	6	5	1			31
<i>Oligosarcus solitarius</i>		3									3
<i>Oreochromis niloticus</i>					7	5	6	13	5	5	41
<i>Pachyurus adpersus</i>	4	8						1		2	15
<i>Parotocinclus doceanus</i>			1			3					4
<i>Parotocinclus sp.</i>		5	1							2	8
<i>Pimelodus maculatus</i>							2		1	2	5
<i>Poecilia reticulata</i>									1	5	6
<i>Poecilia vivipara</i>			3						4	5	12
<i>Prochilodus argenteus</i>									1		1
<i>Prochilodus costatus</i>							3	5			8
<i>Prochilodus vimboides</i>					1	5		1			7
<i>Psalidodon aff. fasciatus</i>	1				3						4
<i>Psalidodon sp.</i>		5									5
<i>Pterygoplichthys pardalis</i>										2	2
<i>Pygocentrus nattereri</i>								3		6	9
<i>Rhamdia quelen</i>	1			3							4
<i>Salminus brasiliensis</i>							1	1			2
<i>Serrapinnus heterodon</i>						2					2
<i>Serrasalmus brandtii</i>										1	1
<i>Synbranchus marmoratus</i>									2	2	4
<i>Trachelyopterus striatulus</i>			2						1		3
<i>Trichomycterus aff. alternatus</i>		6									6
<i>Trichomycterus astromycterus</i>					1						1
<i>Trichomycterus sp.</i>				1	1						2
Total	40	76	73	15	67	56	44	75	50	64	560

3.1 Efeitos da presença de rejeitos sobre a estrutura trófica e fluxo de carbono nas comunidades de peixes da bacia do rio Doce

Estrutura trófica (bi-plot)

A **Figura 19** representa a estrutura trófica de cada ponto amostral e foi construída com os valores médios da composição isotópica de carbono e nitrogênio dos peixes, enquanto para os recursos foram representados os valores médios e o desvio padrão (cruz). Uma primeira avaliação importante a se fazer é: os recursos alimentares mais consumidos pelos peixes geralmente são aqueles que se encontram bem abaixo dos peixes no gráfico (isto é, possuem assinaturas de carbono similares aos dos peixes, mas são menos enriquecidos em $\delta^{15}\text{N}$ por estarem pelo menos um nível trófico abaixo). Em uma primeira análise, recursos como CPOM, material em suspensão e macrófitas (com algumas exceções) não parecem ser assimilados diretamente pelos peixes, mas isso não descarta a possibilidade de serem assimilados indiretamente (como através dos invertebrados). De forma geral, perifíton, algas filamentosas, invertebrados terrestres e invertebrados aquáticos parecem ser os recursos mais assimilados pelos peixes (**Figura 19**). Entretanto, a importância de cada recurso para a comunidade de peixes varia entre pontos, conforme será explorado posteriormente.

O ponto mais próximo ao rompimento I-1 foi o ponto com estrutura trófica mais simplificada, o que provavelmente é reflexo da baixa riqueza e abundância de peixes observadas (**Figura 19**). De forma geral, a complexidade das teias tróficas (i.e. maior faixa de carbono e nitrogênio explorada) vai aumentando ao longo do gradiente do rio com exceção do ponto I-4, em Naque, em que a estrutura trófica se mostrou mais compactada em relação às demais e muito similar com a observada no Rio Santo Antônio (C-2) (**Figura 19**).

O grau de compactação das espécies no espaço bi-plot indica se em uma comunidade as espécies apresentam dietas similares ou diferentes umas das outras. Nesse sentido, os pontos I-3, I-5 e I-6 são aqueles em que as espécies possuem uma dieta mais variada (por

serem mais distribuídas no espaço bi-plot, em especial no eixo x / carbono) (Figura 19). Interessante notar que a comunidade do ponto I-7 também apresenta pequena compactação, mas a variação se dá principalmente no eixo y / nitrogênio. Essa grande variação no eixo do $\delta^{15}\text{N}$ pode ser indicativo de que os peixes ocupam níveis tróficos bem diversificados na comunidade (POST, 2002a, 2002b). No I-7, por exemplo, observa-se que os peixes possuem uma amplitude de $\delta^{15}\text{N}$ que varia entre 5 e 15‰. Há evidências crescentes para o papel do tamanho do ecossistema na determinação do comprimento da cadeia alimentar em sistemas aquáticos, onde ecossistemas maiores suportam teias alimentares com comprimentos de cadeia alimentar mais longos (POST, 2002b). Entretanto, temos que considerar que a poluição também pode afetar as estimativas de comprimento de teia trófica e nichos tróficos (DE CARVALHO et al., 2021; DE CARVALHO; ALVES; POMPEU, 2021), como será discutido mais adiante.

Algumas espécies destoam do restante da comunidade (apresentando assinaturas mais enriquecidas de $\delta^{13}\text{C}$). Dentre elas destacam-se as tilápias *Coptodon rendalli* (número 10) e *Oreochromis niloticus* (número 37), principalmente nos pontos C-3, I-3, I-4, I-5 e I-6 (Figura 19). Essas duas espécies não são nativas na bacia do Rio Doce, e provavelmente possuem uma dieta bem diferente dos demais peixes. Observa-se que não foi coletado nenhum recurso alimentar com assinatura de $\delta^{13}\text{C}$ similar ao dessas espécies de tilápia (ou seja, alguns pontos não têm nenhum recurso abaixo das espécies 10 e 37 no gráfico bi-plot). Algumas hipóteses podem ser levantadas para tentar encontrar os possíveis recursos alimentares utilizados por essas espécies. Primeiramente, *Coptodon rendalli* e *Oreochromis niloticus* apresentam assinaturas enriquecidas em $\delta^{13}\text{C}$ a partir do consumo de gramíneas C4, as quais utilizam via fotossintética C4 e apresentam altos valores de $\delta^{13}\text{C}$ (MANETTA; BENEDITO-CECILIO, 2003). Entretanto as gramíneas C4 não foram amostradas nesse estudo por serem considerados recursos alimentares pouco nutritivos e de difícil digestão. Entretanto, não podemos descartá-las como um item alimentar para determinadas espécies de peixes, como já observado anteriormente (CARVALHO et al., 2015; FERREIRA et al.,

2012; HOEINGHAUS; WINEMILLER; AGOSTINHO, 2007). Devemos também considerar que esse recurso (gramíneas) pode estar entrando na dieta das tilápias de forma indireta, através do consumo de esterco de gado. Desta forma, sugerimos que esse recurso seja considerado em estudos posteriores.

Uma outra hipótese é de que essas tilápias podem ter escapado de pesqueiros/criatórios/tanques-rede, os quais alimentam os peixes com ração que geralmente apresentam composições isotópicas enriquecidas de $\delta^{13}\text{C}$ (BRITTON; CUCHEROUSSET; DOMINGUEZ ALMELA, 2022). Entretanto, essa hipótese é enfraquecida pelo fato de que valores enriquecidos de $\delta^{13}\text{C}$ foram observados nas tilápias amostradas em praticamente todos os pontos em que estiveram presentes, e não apenas pontualmente. Além disso, tal explicação seria conflitante com o observado anteriormente (MORAES; ATTAYDE; HENRY-SILVA, 2020), no sentido que *O. niloticus* se alimenta preferencialmente de itens alimentares naturais mesmo quando confinadas em tanques-rede com fornecimento de ração comercial. Vale mencionar que valores enriquecidos de $\delta^{13}\text{C}$ também foram observados em tilápias coletadas na bacia do Rio das Velhas (DE CARVALHO et al., 2020b). Entretanto, nos pontos amostrados na bacia do Rio das Velhas, além das gramíneas, as algas filamentosas também foram enriquecidas em $\delta^{13}\text{C}$, o que dificulta a diferenciação de qual recurso é preferencialmente consumido pelas tilápias. Por fim, também temos que considerar a hipótese de que as tilápias estão consumindo algum outro recurso alimentar desconhecido (i.e. não coletado por nós) além das opções supracitadas. Portanto, sugerimos que estudos adicionais sejam feitos (incluindo também análise de conteúdo estomacal) para compreender o hábito alimentar dessas espécies.

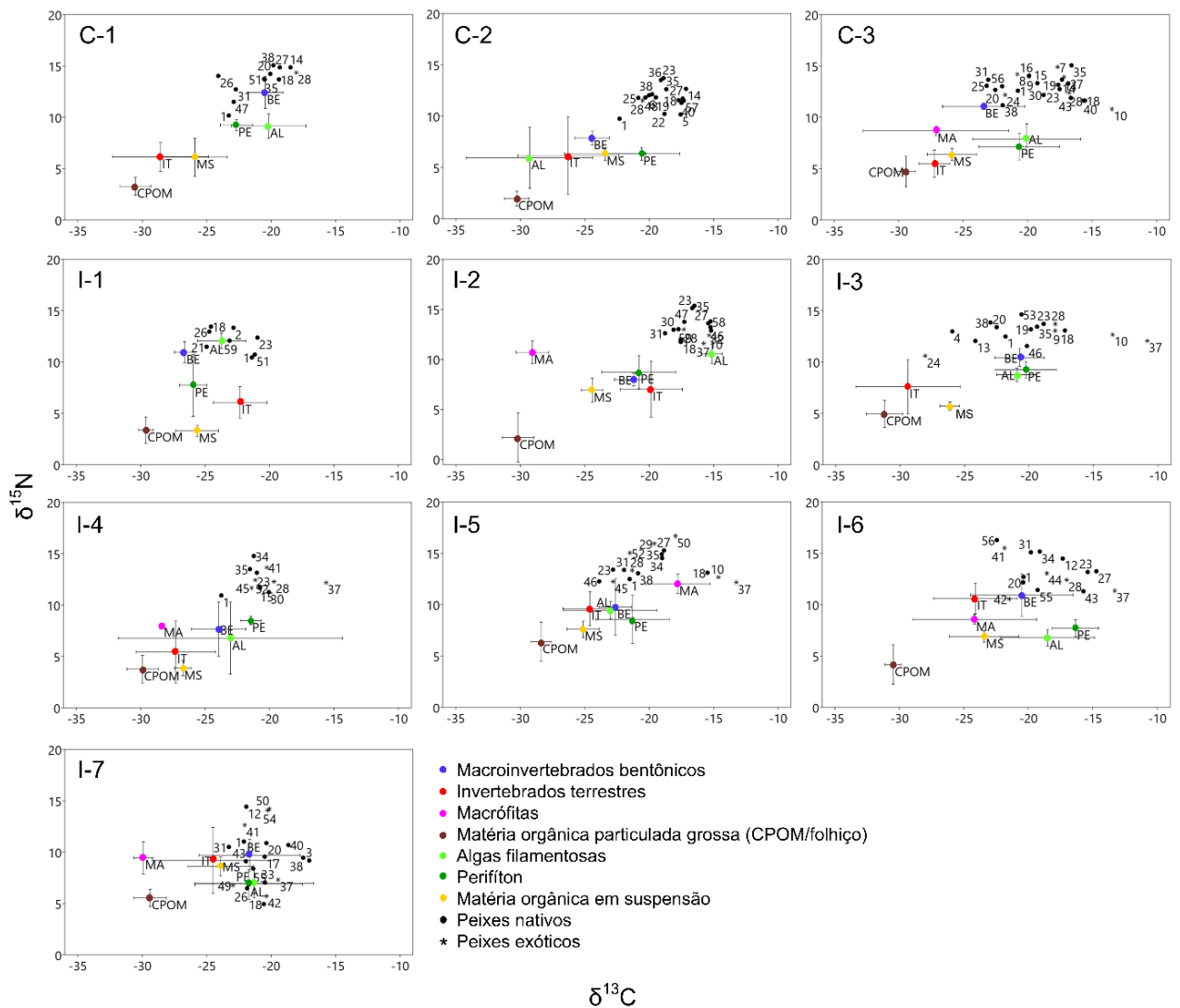


Figura 19 Estrutura trófica dos 10 pontos amostrados ao longo da bacia hidrográfica do Rio Doce considerando a composição isotópica dos peixes (média) e recursos alimentares (média e desvio padrão). C = Controle (C-1 a C-3); I = Impactado (I-1 a I-7). C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candonga); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina. Peixes: *Astyanax lacustris* (1); *Australoheros facetus* (2); *Awaous tajasica* (3); *Brycon dulcis* (4); *Brycon opalinus* (5); *Characidium timbuiense* (6); *Cichla kelberi* (7); *Cichla monoculus* (8); *Clarias gariepinus* (9); *Coptodon rendalli* (10); *Crenicichla lacustris* (11); *Crenicichla lepidota* (12); *Cyphocharax gilbert* (13); *Delturus carinotus* (14); *Deuterodon cf. intermedius* (15); *Deuterodon intermedius* (16); *Eleotris pisonis* (17); *Geophagus aff. brasiliensis* (18); *Geophagus sp.* (19); *Gymnotus sylvius* (20); *Hasemania nana* (21); *Henochilus wheatlandii* (22); *Hoplias intermedius* (23); *Hoplosternum littorale* (24); *Hypomasticus copelandii* (25); *Hypostomus affinis* (26); *Hypostomus luetkeni* (27); *Knodus moenkhausii* (28); *Lophosilurus alexandri* (29); *Loricariichthys castaneus* (30); *Megaleporinus conirostris* (31); *Microcambeva sp.* (32); *Microphis lineatus* (33); *Oligosarcus acutirostris* (34); *Oligosarcus argenteus* (35); *Oligosarcus solitarius* (36); *Oreochromis niloticus* (37); *Pachyurus adspersus* (38); *Parotocinclus doceanus* (39); *Parotocinclus sp.* (40); *Pimelodus maculatus* (41); *Poecilia reticulata* (42); *Poecilia vivipara* (43); *Prochilodus argenteus* (44); *Prochilodus costatus* (45); *Prochilodus vimboides* (46); *Psalidodon aff. fasciatus* (47); *Psalidodon sp.* (48); *Pterygoplichthys pardalis* (49); *Pygocentrus nattereri* (50); *Rhamdia quelen* (51); *Salminus*

brasiliensis (52); *Serrapinnus heterodon* (53); *Serrasalmus brandtii* (54); *Synbranchus marmoratus* (55); *Trachelyopterus striatulus* (56); *Trichomycterus aff. alternatus* (57); *Trichomycterus astromycterus* (58); *Trichomycterus* sp. (59).

Uma outra forma de avaliar esse mesmo gráfico é considerar apenas as espécies de peixes, mas incluindo também o desvio padrão de suas composições isotópicas. Dessa forma, conseguimos observar quais espécies tem maior variação intraespecífica em suas dietas (Figura 20). Espécies como *A. lacustris* (número 1) e *Hypostomus affinis* (número 26), por exemplo, apresentam grande variação intraespecífica em quase todos os pontos. O fato de *A. lacustris* possuir uma dieta caracterizada como onívora (se alimentando de itens de origem animal e vegetal) com tendência herbívoria-insetívoria (ANDRIAN; SILVA; PERETTI, 2001), pode explicar tamanha variação intraespecífica. Por outro lado, para *H. affinis* não era esperado observar tanta variação, uma vez que os cascudos são conhecidos por terem uma dieta principalmente iliófaga-detritívora (DE CARVALHO et al., 2020a). No entanto, não podemos descartar a possibilidade de ingestão de larvas/restos de insetos e material vegetal nos detritos, o que pode explicar a grande a variação intraespecífica na forma de explorar o alimento em comparação com as demais espécies.

Um outro resultado que chama a atenção, são as espécies de peixes com valores baixos de $\delta^{15}\text{N}$ no ponto I-7, como por exemplo *Hypostomus affinis* (número 26), *Geophagus aff. brasiliensis* (número 18) e *Poecilia reticulata* (número 42). Ao se comparar o $\delta^{15}\text{N}$ destas espécies em outros pontos em que estiveram presentes, podemos perceber que apenas no ponto I-7 elas são mais empobrecidas em $\delta^{15}\text{N}$. Além disso, não existem recursos alimentares logo abaixo dessas espécies no gráfico bi-plot (Figura 19), indicando que o recurso alimentar utilizado por essas espécies no ponto I-7 (rio Doce próximo a Colatina), não foi coletado por nós. Uma hipótese é de que esse alimento não coletado por nós possa ser o esgoto, uma vez que assinaturas empobrecidas de $\delta^{15}\text{N}$ ($1.5 \pm 0.45\text{‰}$) do esgoto foram observadas em pontos muito poluídos, na bacia do Rio das Velhas (DE CARVALHO et al., 2019a). Nesse mesmo estudo, os autores viram que *P. reticulata*, uma espécie introduzida em bacias brasileiras, apresentou valores muito baixos de $\delta^{15}\text{N}$ em pontos muito poluídos, fruto da ingestão direta de esgoto (DE CARVALHO et al., 2019a). A hipótese de que o esgoto possa estar sendo

consumido por algumas das espécies de peixes do ponto próximo à cidade de Colatina se torna mais robusta, considerando que em 2012 a cidade tratava apenas 5.49% do seu esgoto. Há lançamentos de esgotos in natura nos rios e córregos locais, assim como o uso de soluções individuais pouco eficientes no tratamento (como fossas sépticas e fossas rudimentares), principalmente nas áreas rurais (PREFEITURA MUNICIPAL DE COLATINA, 2016). Lançamentos de esgoto a céu aberto também foram observados por nós durante as coletas realizadas em 2020. Entretanto, será necessário coletar o esgoto diretamente da fonte, bem como caracterizá-lo isotopicamente, para avaliar se realmente está sendo utilizado como recurso alimentar para algumas espécies de peixes.

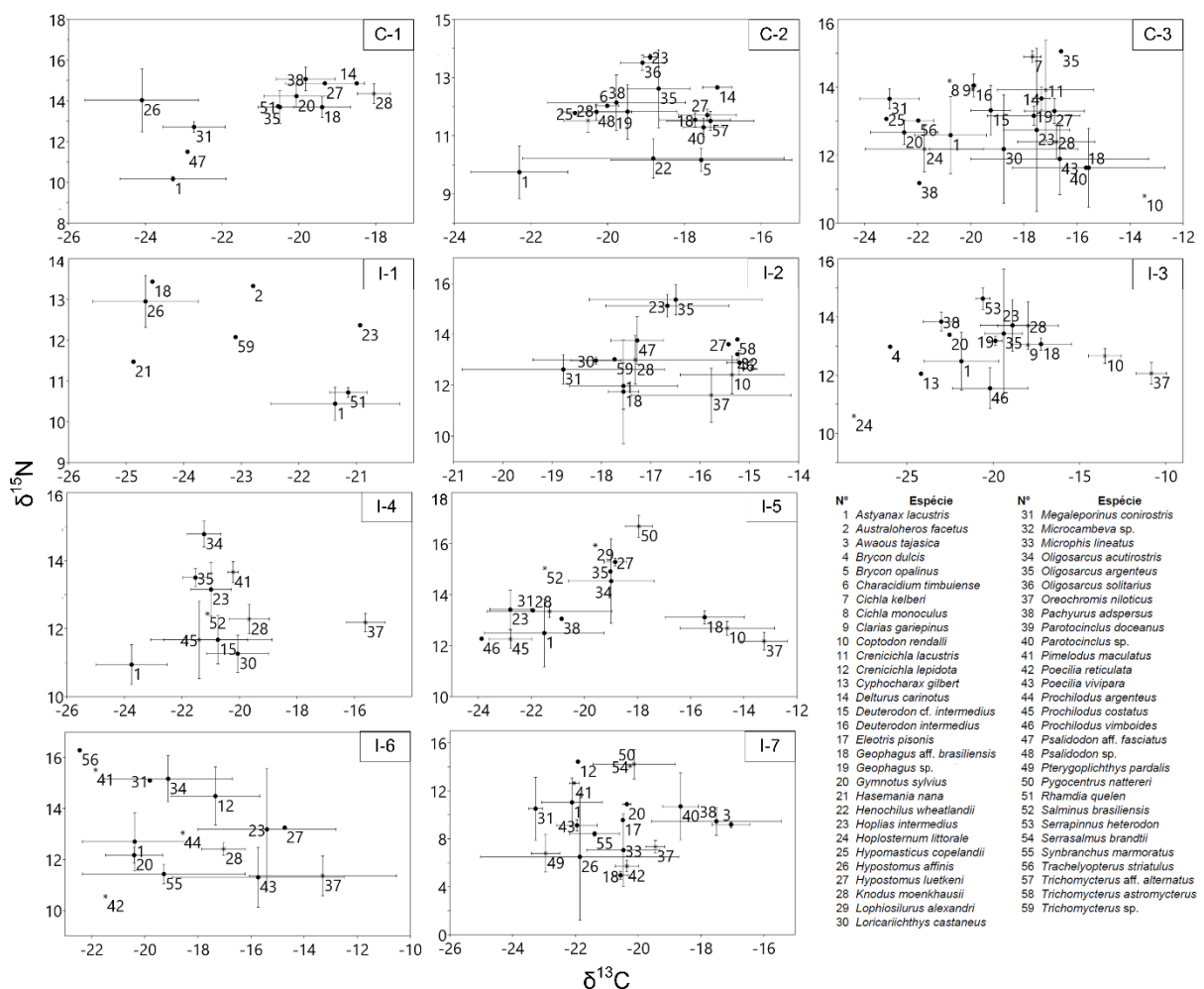


Figura 20 Estrutura trófica dos 10 pontos amostrados ao longo da bacia hidrográfica do Rio Doce considerando apenas a composição isotópica dos peixes (média e desvio padrão). C = Controle (C-1 a C-3); I = Impactado (I-1 a I-7). C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candonga);

I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina.

Riqueza relativa (%) dos grupos tróficos da ictiofauna

A riqueza relativa (%) dos grupos tróficos variou entre pontos (Figura 21). Em geral, os peixes de hábito onívoro predominaram na bacia do Rio Doce. Peixes detritívoros (mais abundantes no ponto C-1), invertívoros/insetívoros (mais abundantes no ponto I-1) e carnívoros (mais abundantes no ponto I-4, I-5 e I-7) também foram encontrados em todos os pontos amostrais. Peixes herbívoros não foram amostrados no ponto I-1, I-3 e I-4, enquanto peixes de hábito algívoro só foram encontrados no ponto I-2 (localizado no reservatório da UHE Risoleta Neves/Candonga) (Figura 21).

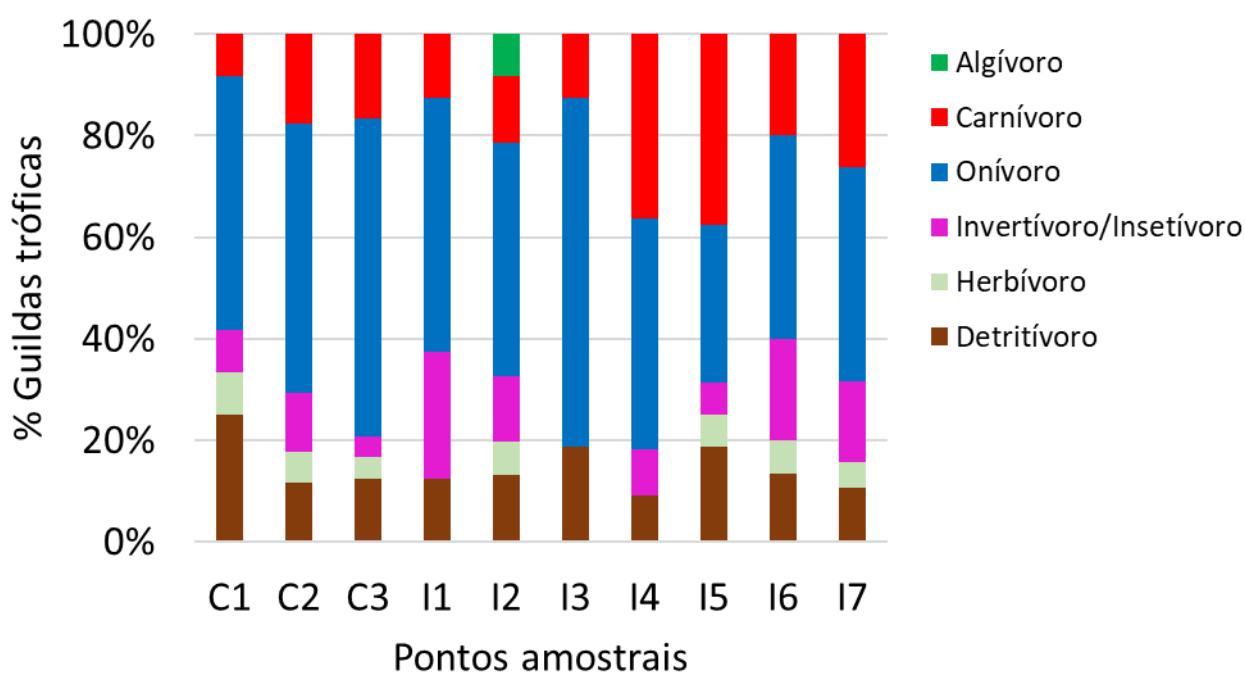


Figura 21 Riqueza relativa (%) dos grupos tróficos da ictiofauna registrada em cada ponto amostrado na bacia do Rio Doce. C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candonga); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina.

Posições tróficas

As posições tróficas médias ocupadas pelos peixes da bacia do Rio Doce variaram entre 2.05 (*Microphis lineatus*) e 4.24 (*Pygocentrus nattereri*) (Tabela 5). *Astyanax lacustris*, a única espécie presente em todos os pontos amostrados, apresentou pequena variação na posição trófica ocupada entre pontos (entre 2.03 e 3.13). As espécies com maior variação foram as de hábito piscívoro como o trairão *Hoplias intermedius* (2.41 no ponto I-1 e 4.38 no ponto C-2) e lambari-bocarra *Oligosarcus argenteus* (2.60 no ponto C-1 e 4.26 no ponto C-2). Espécies de hábito piscívoro podem consumir recursos menos nutritivos, seja por modificações na dieta ao longo do desenvolvimento ontogenético, quanto por alterações na disponibilidade e abundância do recurso preferencial, como já observado para a traíra (*Hoplias malabaricus*) (POMPEU; GODINHO, 2001) no médio Rio Doce. Entretanto, devemos considerar que tanto a presença de rejeitos, quanto as características de cada local avaliado (como a presença de espécies piscívoras não-nativas), podem estar afetando a disponibilidade dos recursos preferenciais destas espécies piscívoras, o que explicaria a grande variação nas posições tróficas ocupadas por elas. A presença de rejeitos, por exemplo, pode ter influenciado no tipo de recurso alimentar disponível para os peixes através da simplificação do hábitat e da influência direta nos organismos fotossintetizantes (algas filamentosas, fitoplâncton, perifíton e macrófitas), seja pelo aumento da turbidez na água, ou pela deposição nos substratos. Além disso, a sedimentação pode ter resultado na perda de importantes grupos funcionais alimentares de macroinvertebrados de hábito bentônico, ou seja, organismos que são intimamente associados ao substrato dos rios. Tais alterações na base da teia trófica, por sua vez, podem se refletir ao longo de toda a cadeia alimentar. Importante mencionar que tanto a *H. intermedius*, quanto o *O. argenteus*, ocuparam as posições tróficas mais elevadas no ponto do Rio Santo Antônio, possivelmente o ponto mais preservado da bacia (Tabela 5). De maneira geral, no rio Santo Antônio (C-2) também foram observadas as maiores posições tróficas considerando todas espécies e todos os pontos, sendo a posição trófica média de 3.68 (Tabela 5, Figura 22). A média das posições tróficas do ponto C-2 só foi menor do que a do ponto I-4 (média de 3.82), que por sua vez é o ponto onde

o Rio Santo Antônio desemboca. Tal resultado ressalta a importância do Rio Santo Antônio para a bacia.

Tabela 5 Posições tróficas ocupadas por cada espécie de peixe em cada ponto amostral ao longo da bacia hidrográfica do Rio Doce. C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candongá); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina.

Espécie	C-1	C-2	C-3	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	I-7	Média
<i>Astyanax lacustris</i>	2.03	2.90	2.90	2.13	3.04	2.90	3.13	2.98	3.05	2.77	2.78
<i>Australoheros facetus</i>				2.77							2.77
<i>Awaous tajasica</i>										2.42	2.42
<i>Brycon dulcis</i>						3.08					3.08
<i>Brycon opalinus</i>		3.06									3.06
<i>Characidium timbuiense</i>		3.71									3.71
<i>Cichla kelberi</i>			4.01								4.01
<i>Cichla monoculus</i>			3.41								3.41
<i>Clarias gariepinus</i>			3.46			3.31					3.38
<i>Coptodon rendalli</i>			2.63		2.90	3.06		3.12			2.93
<i>Crenicichla lacustris</i>			3.66								3.66
<i>Crenicichla lepidota</i>									3.94	3.91	3.93
<i>Cyphocharax gilbert</i>						2.85					2.85
<i>Delturus carinotus</i>	3.39	3.94	3.70								3.68
<i>Deuterodon cf. intermedius</i>			3.31				3.54				3.42
<i>Deuterodon intermedius</i>			3.49								3.49
<i>Eleotris pisonis</i>										2.51	2.51
<i>Geophagus aff. brasiliensis</i>	2.78	3.57	3.01	2.67	2.86	3.28		3.28		2.03	2.94
<i>Geophagus sp.</i>		3.75	3.46			3.16					3.46
<i>Gymnotus sylvius</i>	2.87		2.76			3.23			2.89	2.88	2.93
<i>Hasemania nana</i>				2.22							2.22
<i>Henochilus wheatlandii</i>		3.05									3.05
<i>Hoplias intermedius</i>		4.38	3.45	2.41	4.19	3.42	4.01	3.16	3.79		3.60
<i>Hoplosternum littorale</i>			2.65			2.44					2.55
<i>Hypomasticus copelandii</i>		3.69	2.94								3.31
<i>Hypostomus affinis</i>	2.93			2.49						2.13	2.52
<i>Hypostomus luetkeni</i>	3.30	3.69	3.36		3.52			4.04	3.56		3.58
<i>Knodus moenkhausii</i>	3.36	3.59	3.31		3.37	3.45	3.80	3.26	3.41		3.44
<i>Lophiosilurus alexandri</i>								4.20			4.20
<i>Loricariichthys castaneus</i>			3.00		3.47		3.49				3.32
<i>Megaleporinus conirostris</i>	2.61		3.05		3.33			3.19	3.85	2.30	3.05
<i>Microcambeva sp.</i>					3.06						3.06
<i>Microphis lineatus</i>										2.05	2.05
<i>Oligosarcus acutirostris</i>							4.48	3.85	3.95		4.09
<i>Oligosarcus argenteus</i>	2.60	4.26	4.14		4.16	3.26	4.06	3.96			3.78
<i>Oligosarcus solitarius</i>		4.22									4.22

Espécie	C-1	C-2	C-3	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	I-7	Média
<i>Oreochromis niloticus</i>					2.62	2.86	3.94	2.94	3.32	2.03	2.95
<i>Pachyurus adspersus</i>	3.18	3.81						3.27		2.51	3.19
<i>Parotocinclus doceanus</i>			2.56			3.39					2.97
<i>Parotocinclus</i> sp.		3.58	2.80							3.12	3.17
<i>Pimelodus maculatus</i>							4.23		4.10	3.35	3.89
<i>Poecilia reticulata</i>									2.36	2.02	2.19
<i>Poecilia vivipara</i>			2.96						3.16	2.16	2.76
<i>Prochilodus argenteus</i>									3.39		3.39
<i>Prochilodus costatus</i>							3.48	2.85			3.17
<i>Prochilodus vimboides</i>					3.36	2.68		2.71			2.92
<i>Psalidodon aff. fasciatus</i>	2.25				3.65						2.95
<i>Psalidodon</i> sp.		3.61									3.61
<i>Pterygoplichthys pardalis</i>										2.07	2.07
<i>Pygocentrus nattereri</i>								4.58		3.89	4.24
<i>Rhamdia quelen</i>	2.81			2.05							2.43
<i>Salminus brasiliensis</i>							3.90	3.68			3.79
<i>Serrapinnus heterodon</i>						3.63					3.63
<i>Serrasalmus brandtii</i>										3.86	3.86
<i>Synbranchus marmoratus</i>									2.88	2.07	2.47
<i>Trachelyopterus striatulus</i>			2.88						4.37		3.62
<i>Trichomycterus aff. alternatus</i>		3.70									3.70
<i>Trichomycterus astromycterus</i>					3.54						3.54
<i>Trichomycterus</i> sp.				2.28	3.21						2.75
Média	2.84	3.68	3.20	2.38	3.35	3.13	3.82	3.44	3.47	2.64	3.22

Ao se avaliar as posições tróficas dos peixes de cada ponto, observa-se alguns padrões diferentes dependendo da localidade (Figura 22). A menor amplitude de posições tróficas foi observada no ponto mais próximo ao rompimento (I-1), onde os peixes ocuparam posições tróficas baixas variando entre 2.05 e 2.77. Apesar deste resultado poder estar relacionado com o menor número de espécies coletadas nesse ponto, sugere-se também que as espécies, mesmo pertencentes a guildas tróficas distintas, se alimentam em posições tróficas similares, o que por sua vez pode indicar uma escassez de tipos de recursos alimentares. Em contrapartida, o ponto I-6 (Aimorés) apresentou uma comunidade com maior amplitude de posições tróficas, com peixes ocupando posições tróficas entre 2.36 e 4.36, sendo esta última posição representada pela piranha-vermelha, possivelmente a espécie introduzida mais bem sucedida no baixo Rio Doce (RRDM, 2020).

Algumas espécies apareceram repetidamente ocupando as menores posições tróficas das comunidades, como é o caso do *A. lacustris* (número 1), *Poecilia reticulata* (número 42) e *Prochilodus costatus* (número 45). Por outro lado, as espécies *Hoplias intermedius* (número 23), *Oligosarcus argenteus* (número 35) e *Pygocentrus nattereri* (número 50), todas reconhecidamente piscívoras, aparecem constantemente ocupando o topo da teia trófica (Tabela 5, Figura 22).

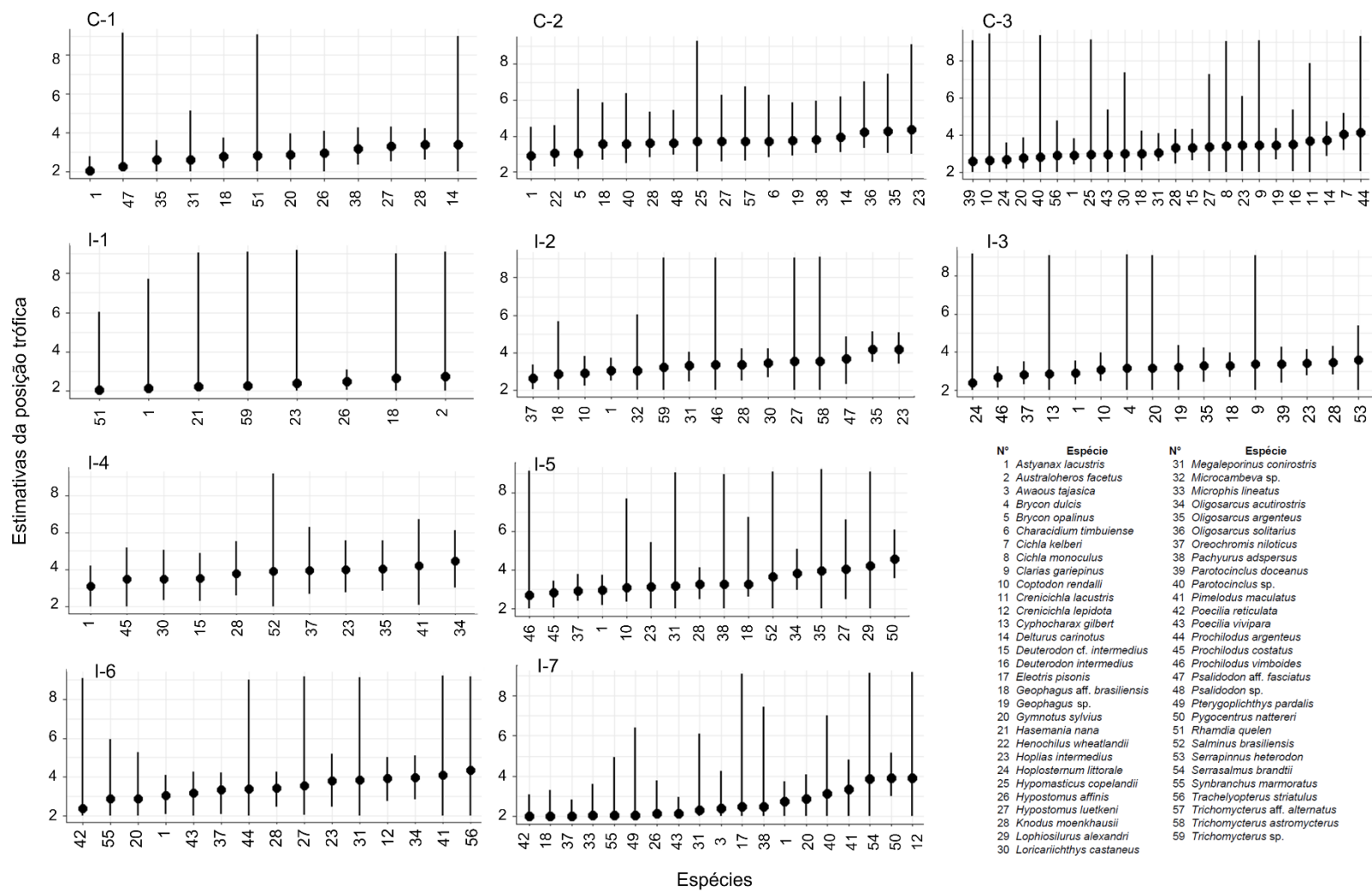


Figura 22 Posições tróficas (moda) ocupadas por cada espécie de peixe em cada ponto amostral ao longo da bacia hidrográfica do Rio Doce. Obs: Espécies com poucos indivíduos apresentam grande variação no cálculo da posição trófica.

Diversidade trófica

Além da avaliação do gráfico bi-plot, algumas outras métricas podem fornecer informações complementares para o entendimento da diversidade trófica ao longo da bacia do Rio Doce (**Figura 23**). A primeira delas é a amplitude de carbono que representa a variedade de recursos alimentares isotopicamente distintos utilizados pela comunidade de peixes. Nesse quesito, os pontos I-1 e I-2 apresentaram a menor e o ponto I-3 apresentou a maior amplitude de carbono, respectivamente. Entre os pontos controle, o ponto C-3 foi o que apresentou a maior amplitude de carbono. A amplitude de nitrogênio, por sua vez, indica a amplitude de níveis tróficos em uma comunidade. Nesse quesito, observou-se um aumento gradativo na amplitude de nitrogênio ao longo da bacia (pontos I-1 a I-7). Entretanto, é interessante mencionar que apesar do ponto I-7 apresentar a maior amplitude de nitrogênio, o ponto I-6 foi o que apresentou maior amplitude de posições tróficas (vide **Tabela 5**). A área total considera tanto a amplitude de nitrogênio quanto a amplitude de carbono, e representa a área total ocupada pelos indivíduos no espaço bi-plot. Desta forma, a maior área total foi observada no ponto I-3, I-5, I-6, I-7 e C-3. De forma similar, o mesmo padrão foi observado para a distância do centroide que fornece uma medida do grau médio de diversidade trófica dentro de uma teia trófica. A distância média do vizinho mais próximo (MNND) representa uma medida da densidade total da comunidade. O menor MNND foi observado no ponto I-2, sugerindo que esse ponto apresenta a maior redundância trófica. Por fim, o desvio padrão das distâncias euclidianas do vizinho mais próximo (SDNND) fornece uma medida da uniformidade da densidade espacial que é menos influenciada que o MNND pelo tamanho da amostra. O menor SDNND foi também observado no ponto I-2, sugerindo que nesta comunidade a distribuição dos nichos tróficos de cada espécie é mais uniforme.

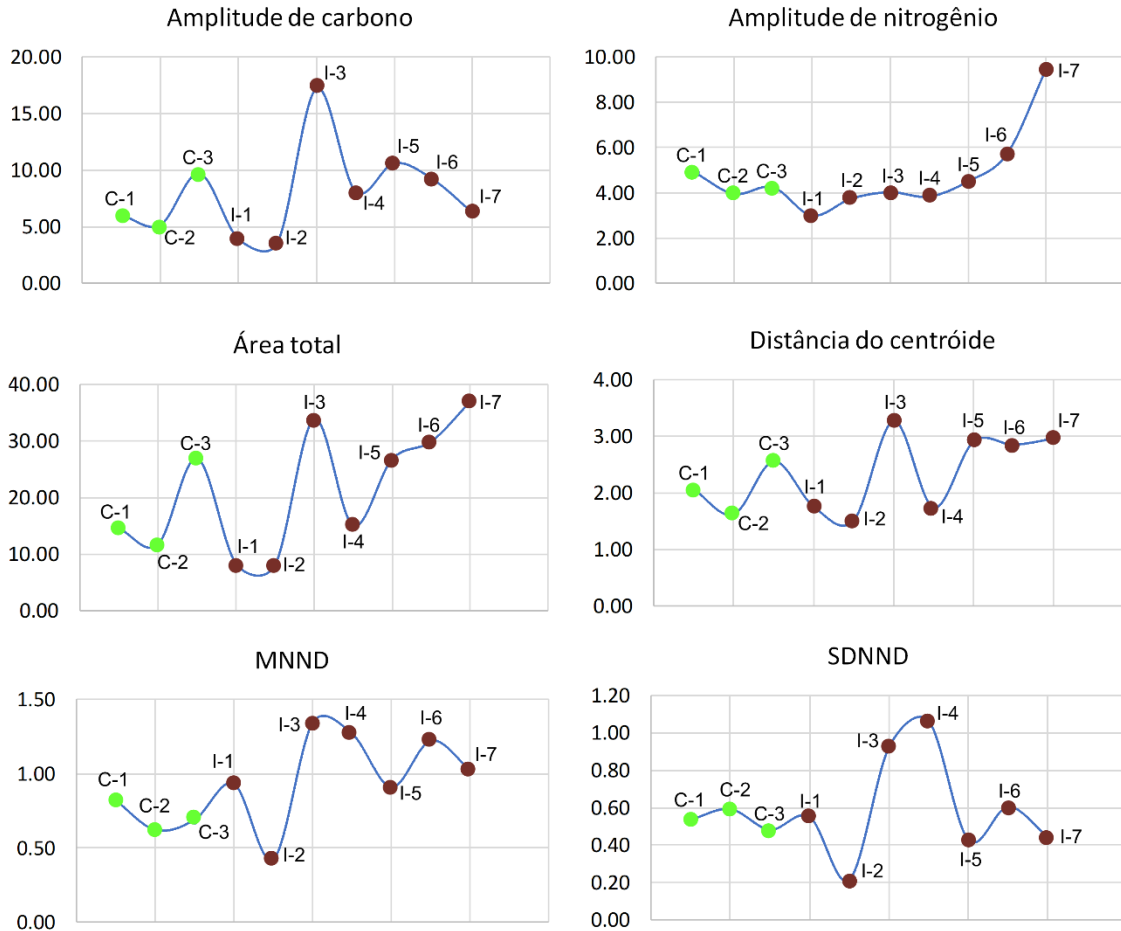


Figura 23 Variação nas métricas de diversidade trófica propostas por Layman et al. (2007) (1) amplitude de Carbono ($\delta^{13}\text{C}$) que representa a variedade de recursos utilizados pela comunidade; 2) amplitude de Nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) que indica a distância entre os valores mais e menos enriquecidos de $\delta^{15}\text{N}$ para os recursos e para os consumidores. Geralmente, uma maior amplitude de $\delta^{15}\text{N}$ sugere a presença de mais níveis tróficos em uma comunidade; 3) distância média do centróide que fornece uma medida do grau médio de diversidade trófica dentro de uma teia trófica; 4) distancia média do vizinho mais próximo (MNND) que representa uma medida da densidade total da comunidade. Quanto menor a MNND, maior a redundância trófica; 5) desvio padrão das distancias euclidianas do vizinho mais próximo (SDNND) que fornece uma medida da uniformidade da densidade espacial que é menos influenciada que o MNND pelo tamanho da amostra. Quanto menor o SDNND mais uniforme é a distribuição dos nichos tróficos. I = Pontos Impactados pelo rompimento da barragem (I-1 a I-7); C = Pontos controle, não impactados pelo rompimento da barragem (C-1 a C-3). C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candongá); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina.

Todas essas métricas são de difícil associação com impactos específicos, como o despejo de esgotos domésticos, a criação de um reservatório (p.e. Candonga) ou o próprio rompimento. Isto porque são esperadas variações ao longo de uma bacia, das cabeceiras em

direção à foz, em função de mudanças nas comunidades de peixes. No entanto, sua determinação é fundamental na definição de parâmetros de monitoramento que possam apontar tendências (mudanças temporais) de recuperação ou degradação de partes específicas da bacia.

Fluxo de carbono / Fontes de carbono que sustentam a ictiofauna

A proporção de assimilação de cada recurso alimentar pelos peixes foi diferente entre cada ponto amostral (Figura 24). Nos três pontos controles, os invertebrados aquáticos e o perifíton foram os recursos mais assimilados pelas comunidades de peixes. A importância de tais recursos alimentares nos pontos não impactados pelo rompimento da barragem do Fundão pode estar relacionada a uma melhor condição ambiental. A mudança na geomorfologia do rio devido à deposição de rejeitos nas margens e leitos do rio após o rompimento, assim como o aumento de partículas finas em suspensão (SÁNCHEZ et al., 2018) também podem influenciar esse resultado, uma vez que o perifíton (que cresce sobre as superfícies rochosas e depende de luminosidade) e os macroinvertebrados bentônicos (altamente vinculados ao substrato) são recursos altamente associados ao fundo dos rios, e conseqüentemente, podem ter sofrido com o processo abrasivo e deposição de sedimento ocorrido com a passagem do rejeito de minério.

No Rio Santo Antônio (C-2), possivelmente um dos rios mais preservados da bacia, os invertebrados terrestres também foram uma importante fonte de carbono para a comunidade. Nesse mesmo local, o consumo de peixes por espécies carnívoras também foi mais elevado do que nos demais pontos controle. Tais resultados refletem as boas condições ambientais do Rio Santo Antônio, uma vez que a presença de peixes carnívoros/piscívoros (predadores de topo) (KARR, 1981) e invertívoros/insetívoros (DE CARVALHO et al., 2017a) são bons indicadores de integridade biótica, uma vez que essas populações tendem a diminuir ou desaparecer à medida que a integridade ecológica diminui.

Entre os pontos no caminho da passagem do rejeito de minério, o ponto I-2 foi o que mais se diferenciou dos demais em respeito à proporção dos recursos que sustentam as

comunidades de peixes. No ponto mais próximo ao rompimento (I-1), algas e invertebrados (terrestres e aquáticos) juntos foram responsáveis por mais de 70% dos recursos assimilados. No ponto I-2, localizado no reservatório da UHE Risoleta Neves (Candongia), alga filamentosa foi o recurso mais assimilado pelos peixes (45% da assimilação) e invertebrados tiveram pouca importância. Peixes de água doce em geral possuem uma diversidade de táticas e estratégias alimentares que favorecem a sua adaptação a ambientes alterados, inclusive em ambientes alterados como os represamentos (HAHN; FUGI, 2007). A importância de algas filamentosas na dieta de peixes em reservatórios já vem sendo documentada na literatura (HAHN, N.S.; AGOSTINHO, A.A.; GOMES, L.C.; BINI, 1988; HAHN; FUGI, 2007). Como mencionado anteriormente, no nosso estudo o ponto I-2 foi o único ponto com espécies de hábito algívoro (Figura 21). Tal resultado reforça que as condições proporcionadas pelo reservatório (ambiente lêntico) tem grande influência no hábito alimentar das espécies de peixes, o que pode inclusive, agir selecionando espécies que se adaptem melhor a tais condições.

Nos pontos seguintes, observou-se uma redução no consumo de algas e um aumento na assimilação de invertebrados (terrestres e aquáticos) e perifíton. O ponto I-4 (que recebe o Rio Santo Antônio) foi aquele em que foi observado o maior consumo de peixes como presa (sendo também o ponto com maior número de espécies de hábito carnívoro juntamente com o I-5, Figura 21). Os recursos CPOM, material em suspensão e macrófitas, por sua vez, não foram muito assimilados nos 10 pontos amostrados (Figura 24).

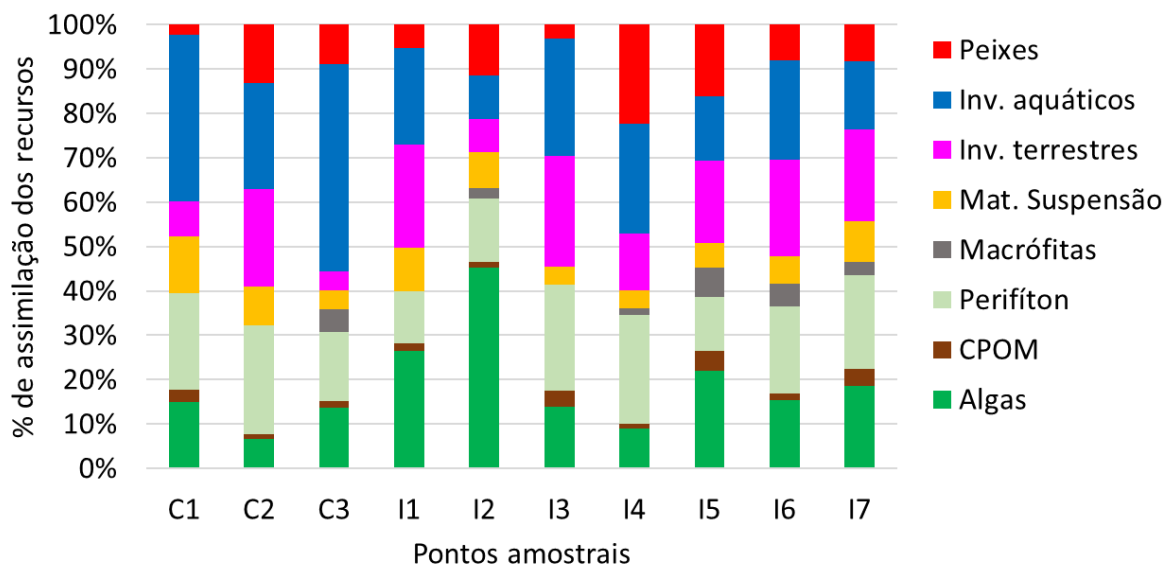


Figura 24 Recursos alimentares que sustentam as comunidades de peixes de cada ponto amostrado na bacia do Rio Doce. C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candonga); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina.

Ao se avaliar a proporção e assimilação de recursos por cada espécie de peixe separadamente (Figura 25), observamos que os peixes de hábito carnívoro se alimentam preferencialmente de outros peixes (50%), apesar de invertebrados aquáticos também serem um recurso alimentar importante (32%). Entre as espécies de hábito carnívoro, *Oligosarcus solitarius* foi a que se alimentou de outros peixes em maior proporção (73%). Entre os peixes de hábito detritívoro, algívoro e herbívoro os recursos mais assimilados foram algas filamentosas e perifíton, com a proporção variando entre espécies. Duas espécies se destacaram pela grande preferência por um único recurso: *Microcambeva* sp. (encontrada apenas no ponto I-2) por assimilar majoritariamente algas filamentosas (80%) e *Henochilus wheatlandii* (encontrada apenas no ponto C-2) por se alimentar preferencialmente de perifíton (78%). Peixes de hábito onívoro e invertívoro/insetívoro assimilaram invertebrados aquáticos em maior proporção, embora algas filamentosas, perifíton e invertebrados terrestres também tenham sido muito assimilados. Entre essas espécies, algumas se destacaram, como: *Cichla monoculus* e *Deuterodon intermedius* por assimilarem preferencialmente invertebrados

aquáticos (aprox. 80%), e *Brycon dulcis* por assimilar majoritariamente invertebrados terrestres (66%).

Entre essas espécies mencionadas, *Hemichilus wheatlandii* (andirá) e *Brycon dulcis* (piabanha) merecem atenção por serem endêmicas e/ou por sofrerem algum nível de ameaça (ALVES et al., 2021). *Hemichilus wheatlandii* (única espécie do gênero) é uma espécie encontrada apenas no Rio Santo Antônio, e se encontra criticamente ameaçada, tendo inclusive, sido considerada como extinta por mais de um século (SILVA, 2012). Entretanto, apesar de terem sido encontrados restos de matéria vegetal e insetos em seu conteúdo estomacal (VIEIRA; ALVES, 2001), pouco se sabe sobre sua história de vida ou hábito alimentar. *Hemichilus wheatlandii* parece ser dependente de áreas sem distúrbios antrópicos e requer condições especiais de habitat, principalmente relacionadas à ordem do riacho, características do substrato e qualidade da água (VIEIRA; ALVES, 2001). Além disso, essa espécie se encontra ameaçada à sua distribuição restrita à bacia do Rio Santo Antônio e pela possibilidade de construção de um grande número de barramentos nesse rio. Portanto, um maior conhecimento sobre as características ambientais relacionadas à sua área de distribuição são urgentemente necessários para realizar uma gestão de conservação eficaz (VIEIRA; ALVES, 2001). Nossos resultados contribuem de forma significativa, uma vez que apresentam pela primeira vez a estrutura trófica do Rio Santo Antônio (Figura 19), mostrando a posição trófica basal ocupada por *H. wheatlandii* (Figura 22) e sua preferência alimentar por perifíton (Figura 25).

Brycon dulcis, por outro lado, originalmente habitava diversas regiões da bacia do Rio Doce, mas nos últimos 10 anos vem sendo detectada principalmente no trecho médio da bacia (ALVES et al., 2021). Os ambientes preferenciais de *B. dulcis* vêm sendo progressivamente impactados pela remoção de vegetação ciliar, poluição, assoreamento, construção de barragens e introdução de espécies não nativas na bacia (como a piranha *Pygocentrus nattereri*) (ALVES et al., 2021). Portanto, especialistas também enfatizam a importância de se elucidar os aspectos biológicos básicos da espécie, como reprodução,

alimentação, hábitos migratórios e sítios de desova, para auxiliar na proposição de estratégias de conservação efetivas (ALVES et al., 2021). Infelizmente amostramos apenas um indivíduo de *B. dulcis* no ponto I-3 que, por sua vez, é o ponto mais próximo do Parque Estadual do Rio Doce /PERD, onde essa espécie tem sido encontrada (ALVES et al., 2021). Para esse indivíduo, observou-se a importância dos invertebrados terrestres como recurso alimentar, evidenciando a importância da manutenção da vegetação ripária para sua conservação.

Em relação à análise de partição de recursos, vale ressaltar que, para algumas espécies, possivelmente o recurso assimilado por elas não tenha sido amostrado em nossas coletas. Tal é o caso das duas espécies de tilápia (números 10 e 37, Figura 19), que se encontram deslocadas do restante dos peixes no gráfico bi-plot (e sem nenhum recurso com assinatura de $\delta^{13}\text{C}$ similar), como já mencionado anteriormente.

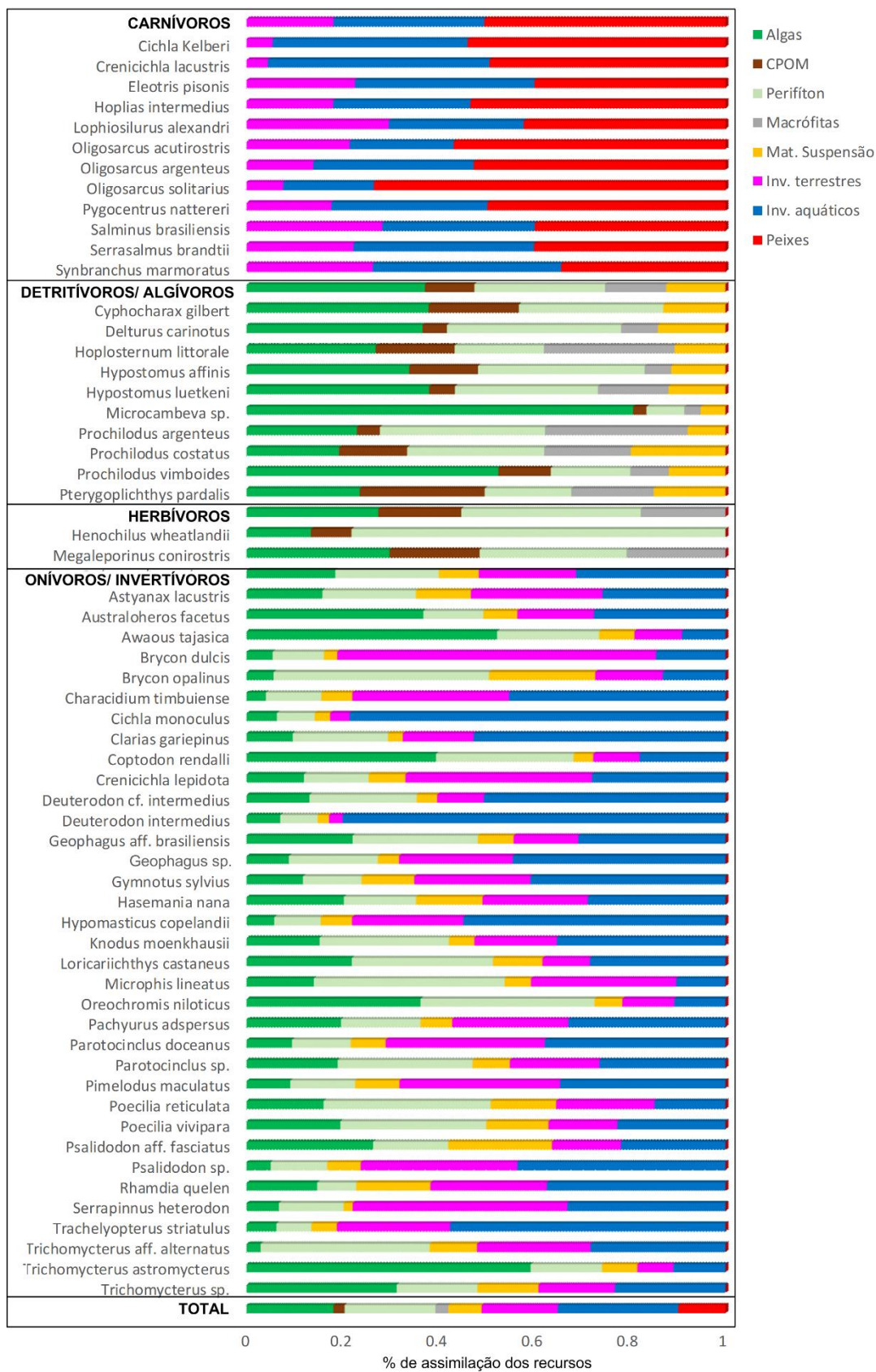


Figura 25 Proporção de assimilação de cada recurso alimentar por cada espécie de peixe amostrada na bacia do Rio Doce (todos pontos em conjunto).

Nichos tróficos (nichos isotópicos)

A partir da distribuição dos indivíduos de cada espécie no espaço bi-plot, torna-se possível a estimativa dos nichos tróficos (nichos isotópicos) de cada comunidade. De forma geral, observa-se um aumento na amplitude do nicho trófico ao longo percurso percorrido pelos rejeitos de minério (I-1 a I-7), sendo o ponto I-4 a única exceção (Tabela 6). Os nichos tróficos mais amplos foram observados nos pontos das porções média e baixa da bacia, como os pontos I-3, I-5, I-6 e I-7, enquanto o nicho mais estreito foi observado no ponto mais próximo ao rompimento (I-1) (Tabela 6, Figura 26, Figura 27).

Tabela 6 Estimativa de nicho trófico (SEA = Standard Ellipse Area e SEAc = SEA corrigida pelo tamanho da amostra, permitindo a comparação de nichos de comunidades com diferentes tamanhos de amostra) dos 10 pontos amostrados ao longo da bacia hidrográfica do Rio Doce. I = Pontos Impactados pelo rompimento da barragem (I-1 a I-7); C = Pontos controle, não impactados pelo rompimento da barragem (C-1 a C-3). C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candongá); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina.

Pontos	SEA	SEAc
C-1	7.95	8.15
C-2	6.65	6.74
C-3	10.20	10.34
I-1	5.27	5.68
I-2	7.32	7.43
I-3	15.27	15.56
I-4	9.15	9.37
I-5	16.58	16.81
I-6	16.82	17.17
I-7	19.37	19.68

Ao se avaliar todos os nichos em conjunto, nota-se que as comunidades do ponto I-1 (mais próximo ao rompimento) e I-7 (mais próximo a foz) destoam do restante dos pontos (Figura 26). O nicho da comunidade de peixes amostrada no reservatório de Candonga (I-2) também se destoa em parte dos demais pontos, assim como o ponto mais preservado da bacia, o rio Santo Antônio (C-2). É interessante notar que a comunidade de peixes do ponto I-6 é que apresenta os valores mais altos de $\delta^{15}\text{N}$, enquanto os valores mais baixos são

observados no ponto vizinho, o I-7 (Figura 26). Essa grande diferença nos nichos das comunidades, mesmo em pontos tão próximos como Aimorés e Colatina (I-6 e I-7) ressalta a grande variação na ecologia trófica dos peixes da bacia do rio Doce, sendo difícil, inclusive, avaliar quais fatores estão por trás de tamanha variação (i.e. poluição, barramentos, presença de rejeitos, etc.).

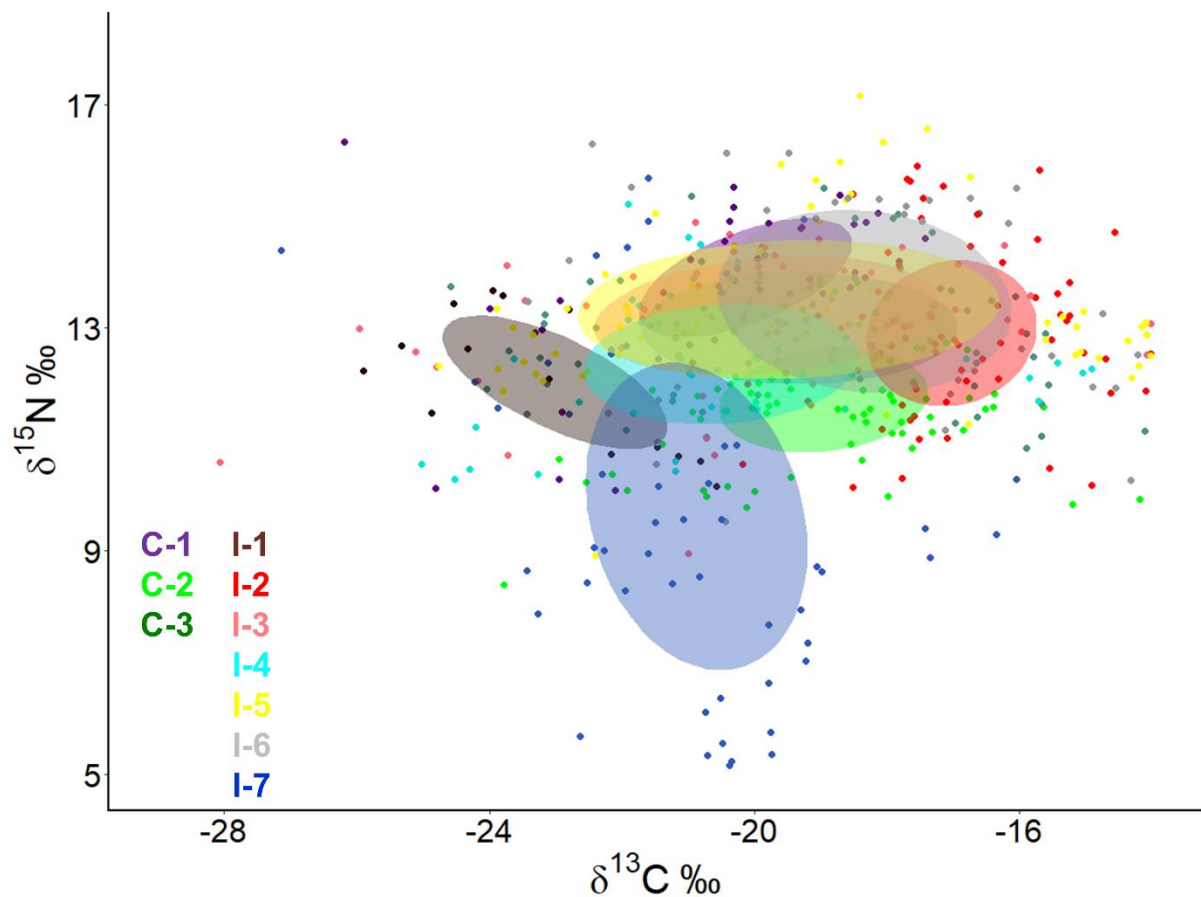


Figura 26 Nicho trófico (SEA – Standard Ellipse Area) dos 10 pontos amostrados ao longo da bacia hidrográfica do Rio Doce. I = Pontos Impactados pelo rompimento da barragem (I-1 a I-7); C = Pontos controle, não impactados pelo rompimento da barragem (C-1 a C-3). C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candongá); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina.

Ao se avaliar o nicho trófico das comunidades de peixes de cada ponto separadamente, também é possível observar a área total ocupada pelos peixes no espaço bi-plot (linha pontilhada da Figura 27). A comunidade do ponto I-3 é a que apresenta o nicho trófico mais amplo no eixo do carbono (o que sugere o consumo de recursos alimentares

isotopicamente distintos) e a comunidade do ponto I-7 é a que apresenta o nicho trófico mais amplo no eixo do nitrogênio (o que sugere uma grande variação nas posições tróficas ocupadas pelos peixes dessa comunidade ou presença de poluição) (Figura 27).

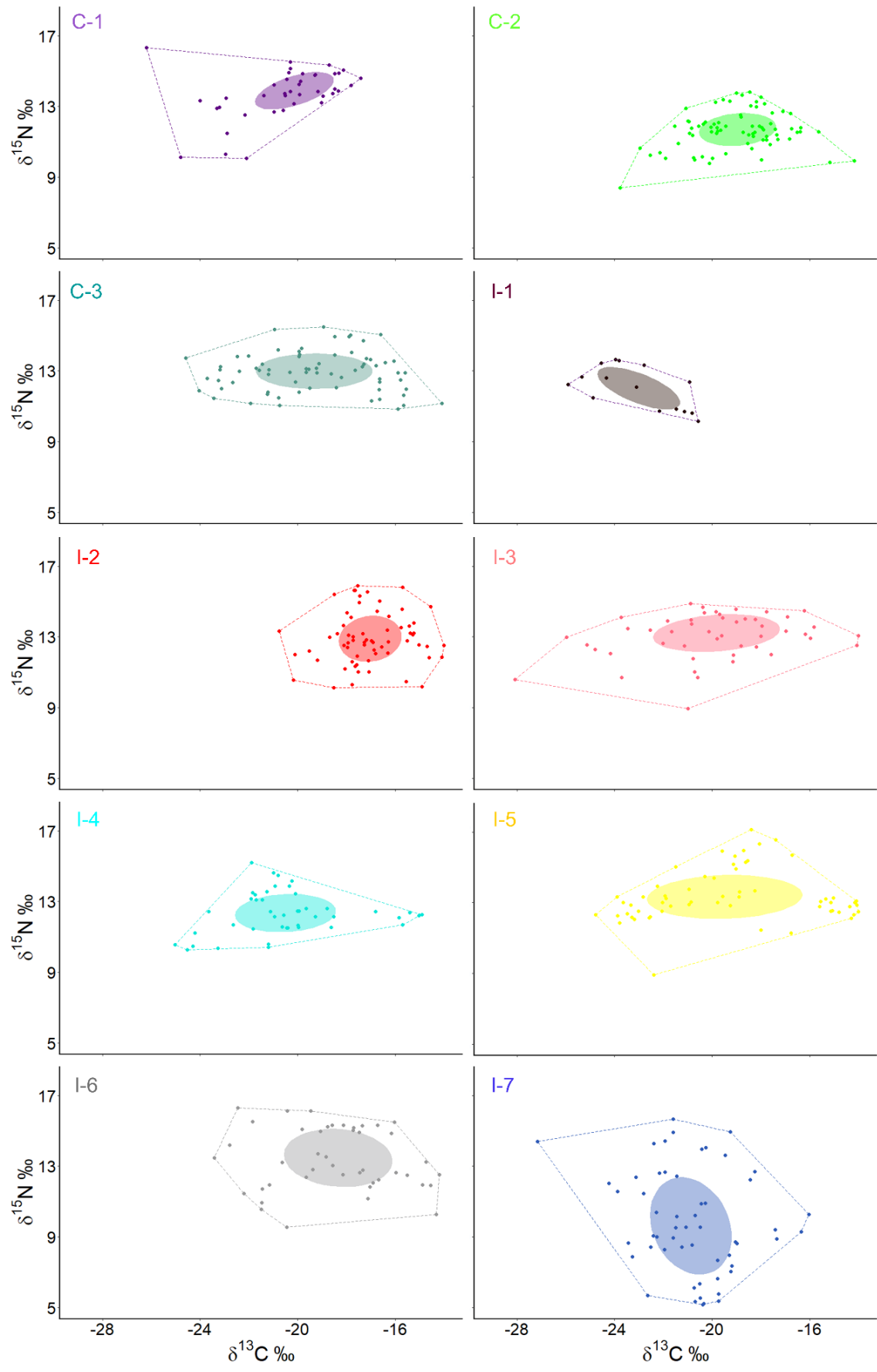


Figura 27 Nicho trófico (SEA – Standard Ellipse Area) dos 10 pontos “separadamente” amostrados ao longo da bacia hidrográfica do Rio Doce. I = Pontos Impactados pelo rompimento da barragem (I-1 a I-7); C = Pontos controle, não impactados pelo rompimento da barragem (C-1 a C-3). C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candonga); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina. A área total ocupada pela comunidade é expressa pela linha pontilhada.

3.2 Efeitos de outros poluentes (esgoto) sobre as composições isotópicas dos peixes e recursos alimentares

Variação das composições isotópicas de Carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e Nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) dos peixes e recursos

Praticamente todos recursos alimentares e os peixes apresentaram composições isotópicas de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) diferentes entre pontos (Figura 28), a única exceção foi o material em suspensão (Figura 28g). De maneira geral, não foi possível observar um padrão de variação entre os recursos amostrados. O $\delta^{13}\text{C}$ das algas filamentosas variou entre -35.82 e -13.03‰, o perifíton entre -27.30 e -13.74‰, macrófitas entre -30.91 e -15.80‰, CPOM entre -32.18 e -27.17‰, invertebrados aquáticos entre -28.75 e -18.12‰, invertebrados terrestres entre -34.41 e -16.10‰, material em suspensão entre -28.35 e -19.50‰ e peixes entre -28.07 e -9.70‰ (Figura 28, Tabela 7). O CPOM foi o recurso em que as amostras apresentaram composições isotópicas mais similares em um mesmo ponto (menor amplitude de variação), o que já é esperado, uma vez que é um recurso alóctone que não é tão influenciado pelos nutrientes e condições do ambiente aquático, como os produtores primários autóctones (algas, perifíton e macrófitas), que acabam por refletir diferentes fontes de degradação. Mas ainda assim foram observadas diferenças nas composições de $\delta^{13}\text{C}$ do CPOM entre pontos (Figura 28dTabela 7).

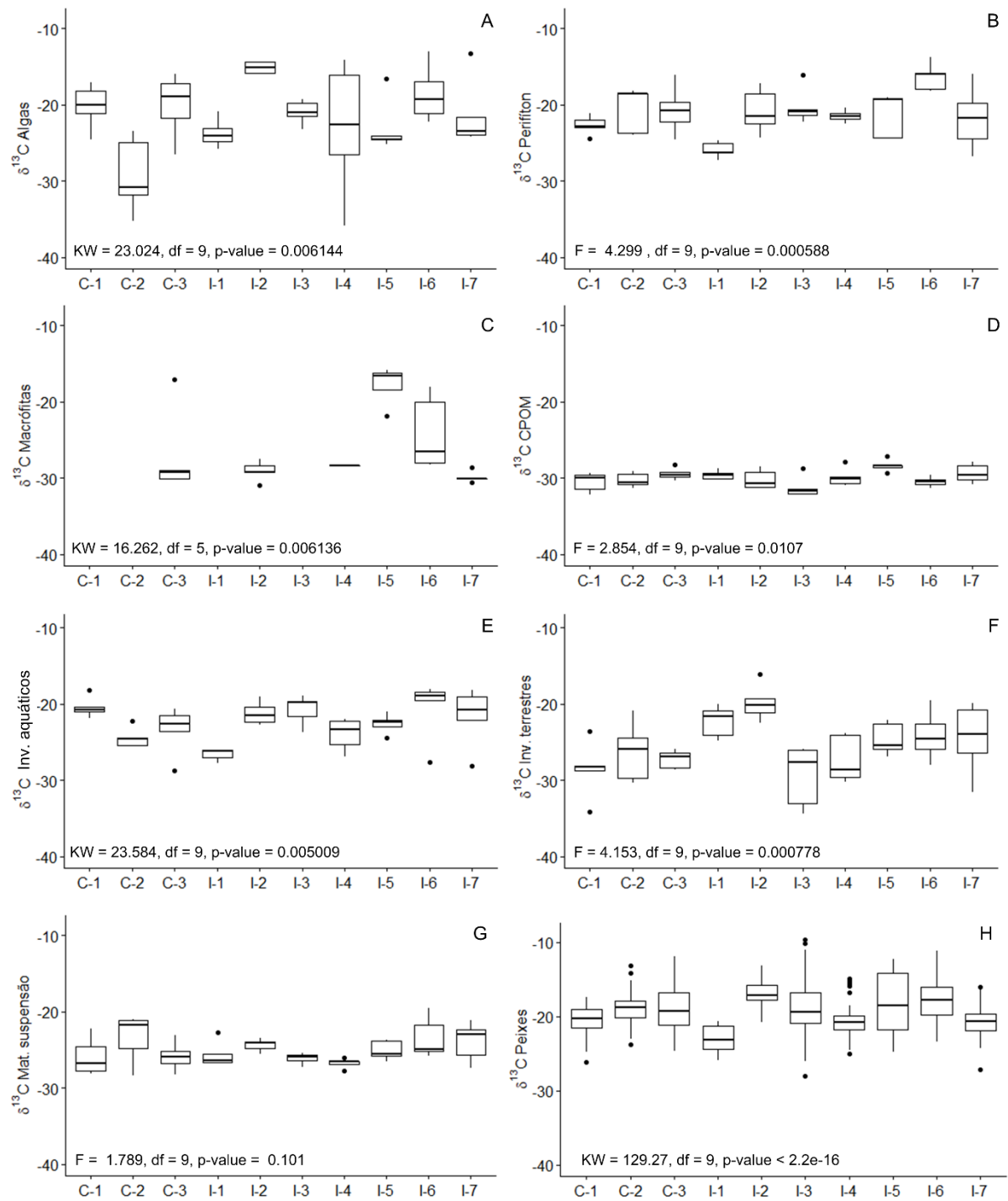


Figura 28 Variação nas assinaturas isotópicas de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) dos recursos alimentares e peixes amostrados em 10 pontos ao longo na bacia hidrográfica do Rio Doce. I = Pontos Impactados pelo rompimento da barragem (I-1 a I-7); C = Pontos controle, não impactados pelo rompimento da barragem (C-1 a C-3). C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candonga); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina.

Por outro lado, a composição isotópica de nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) de todos os recursos e peixes foi significativamente diferente entre os pontos de coleta (Figura 29). Assim como para o carbono, para o nitrogênio também não foi observado um padrão de variação entre os recursos amostrados. O $\delta^{15}\text{N}$ das algas filamentosas variou entre 1.35 e 13.07‰, o perifíton entre 2.91 e 10.41‰, macrófitas entre 7.51 e 12.94‰, CPOM entre 0.83 e 8.99‰, invertebrados aquáticos entre 4.89 e 14.44‰, invertebrados terrestres entre 1.85 e 13.19‰, material em suspensão entre 2.46 e 9.47‰, e peixes entre 2.65 e 17.16‰.

Alguns desses valores de nitrogênio são atípicos para alguns recursos, como é o caso de valores acima de 6‰ para produtores primários como algas, perifíton e folhiço (CPOM). Também não se espera observar valores baixos (menor que 3‰) de nitrogênio para consumidores como os invertebrados e peixes. Para os peixes, a maior variação no $\delta^{15}\text{N}$ foi observada no ponto I-7, com valores entre 2.65 e 15.68‰ (Tabela 8). Apesar dessa grande variação no $\delta^{15}\text{N}$ dos peixes do ponto I-7 poder indicar grande amplitude de níveis tróficos, um outro fator pode estar influenciando, como já mencionado anteriormente. Estudos prévios em uma bacia vizinha indicam que em ambientes impactados por poluição urbana, a entrada de nitrogênio proveniente do esgoto pode promover alterações nas composições isotópicas dos recursos alimentares e peixes, e conseqüentemente, influenciar nas amplitudes de nicho da comunidade (DE CARVALHO et al., 2021). Isso ocorre uma vez que parte da comunidade de peixes se alimenta de esgoto (apresentando composições isotópicas de $\delta^{15}\text{N}$ pouco enriquecidas), enquanto o restante se alimenta de outros recursos (apresentando composições isotópicas de $\delta^{15}\text{N}$ mais enriquecidas). Tal comportamento alimentar acaba sendo refletido na amplitude do nicho (DE CARVALHO et al., 2021).

Em geral, espécies de hábito detritívoro são aquelas que apresentam o maior consumo de esgoto (DE CARVALHO et al., 2020b), o que pode estar acontecendo com *Hypostomus affinis* no ponto de Colatina, uma vez que essa espécie apresentou grande variação em suas composições isotópicas de carbono e nitrogênio, além de valores empobrecidos de $\delta^{15}\text{N}$ ($6.49 \pm 5.27\text{‰}$) (Figura 19, Figura 20, Tabela 7 e Tabela 8). Cascudos

do gênero *Hypostomus* são reconhecidos pela sua capacidade de refletir a qualidade ambiental dos ambientes que vivem (DE CARVALHO et al., 2020a; PRADO et al., 2020a). Algumas características dos cascudos os tornam potenciais bioindicadores, como seus hábitos residentes, ampla distribuição e alta diversidade de espécies em ecossistemas de água doce. Além disso, devido à capacidade de algumas das espécies do gênero (como *Hypostomus affinis*) de sobreviver em áreas poluídas, se tornam bons candidatos para programas de monitoramento que visam acompanhar a eficácia dos esforços de recuperação da bacia do rio Doce.

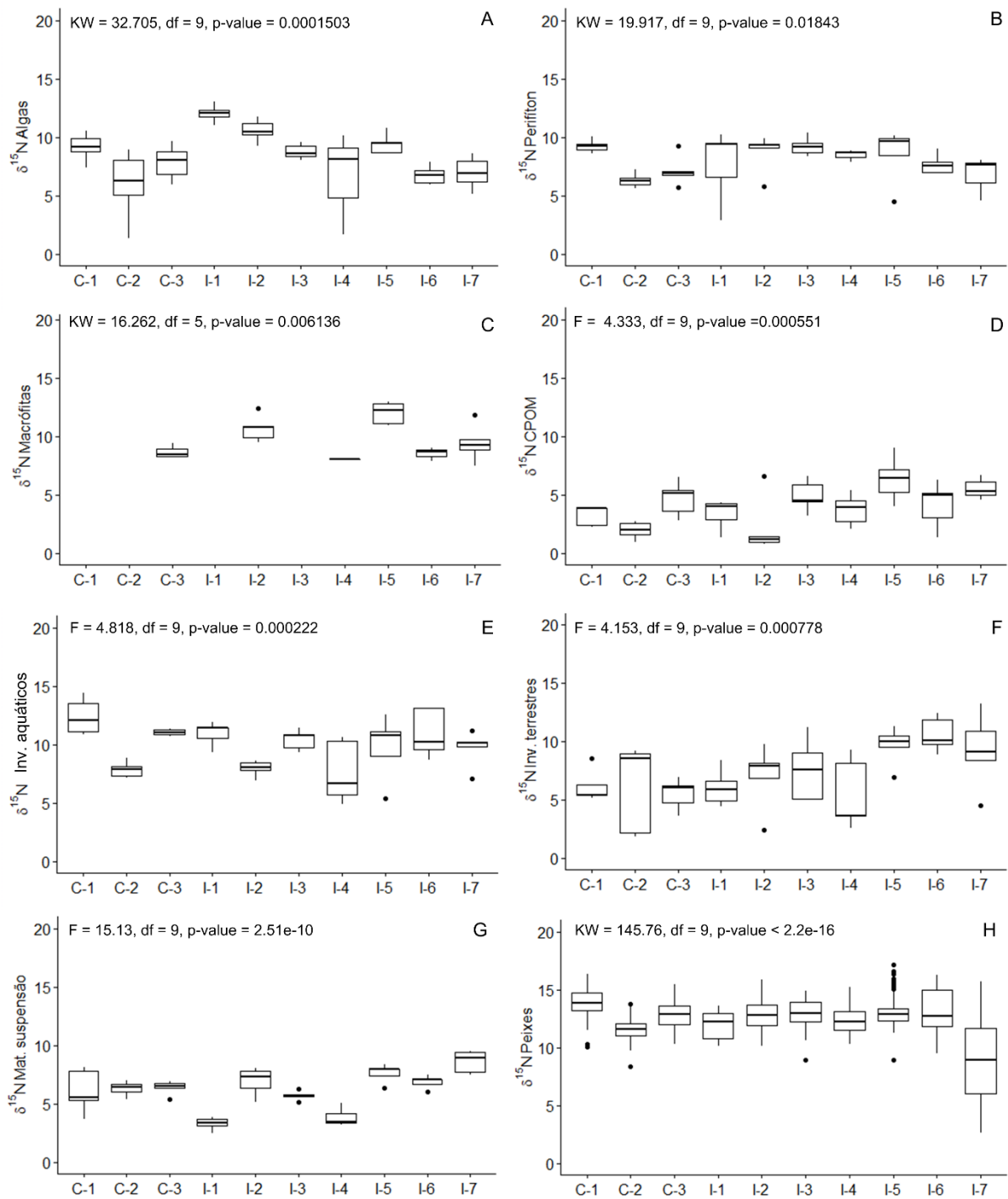


Figura 29 Variação nas assinaturas isotópicas de nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) dos recursos alimentares e peixes amostrados em 10 pontos ao longo na bacia hidrográfica do Rio Doce. I = Pontos Impactados pelo rompimento da barragem (I-1 a I-7); C = Pontos controle, não impactados pelo rompimento da barragem (C-1 a C-3). C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candonga); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina.

A única espécie presente em todos os pontos amostrais, *Astyanax lacustris*, também apresentou diferentes composições isotópicas de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) entre pontos (Figura 30). Os valores mais enriquecidos de $\delta^{13}\text{C}$ foram observados no ponto I-2, enquanto os mais empobrecidos foram observados no I-4. A maior variação intraespecífica no $\delta^{13}\text{C}$ do *A. lacustris* foi observada no ponto I-5, indicando que os indivíduos amostrados tem uma dieta variada nesse ponto. Para o $\delta^{15}\text{N}$, os maiores valores foram observados no I-6 e os menores no C-1 e C-2. A maior variação intraespecífica no $\delta^{15}\text{N}$ do *A. lacustris* foi observada no ponto I-7, indicando que os indivíduos amostrados ocupam posições tróficas bem variadas nesse ponto (Figura 30). *Astyanax lacustris* é uma espécie que vem sendo bastante estudada na bacia do Rio Doce, provavelmente devido à sua abundância e ampla distribuição. Abordagens experimentais realizadas com a água do Rio Doce após o rompimento, indicam que essa espécie pode apresentar alterações histológicas no fígado e brânquias, perturbação do equilíbrio iônico, respostas celulares ao estresse (MACÊDO et al., 2020), bem como apresentar inibição de acetilcholinesterase (AChE) e bioacumulação de Fe e Mn no fígado e nas brânquias (PASSOS et al., 2020). Também foi observado alto dano histológico gonadal em *A. lacustris* expostos à água contaminada, o que pode influenciar diretamente o desenvolvimento e a reprodução do organismo a longo prazo (MERÇON et al., 2021). Entretanto, os resultados supracitados são de estudos experimentais (com peixes provenientes de criatórios e que foram expostos à água contaminada por apenas alguns dias), que deixam em aberto questionamentos sobre os reais impactos dos rejeitos sobre os peixes em seu habitat natural. Desta forma, devemos ressaltar a importância de se obter o máximo de informações possíveis sobre as espécies de peixes do Rio Doce, para assim entendermos os possíveis impactos que o rompimento teve sobre a fauna da bacia.

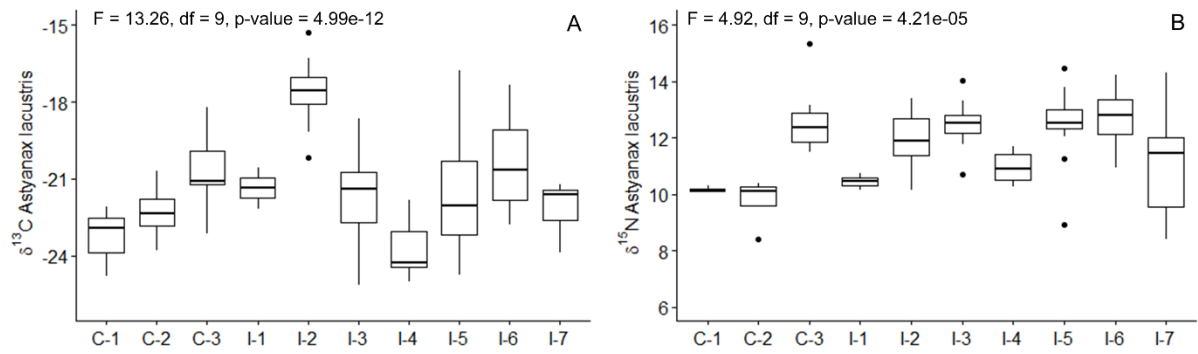


Figura 30 Variação nas assinaturas isotópicas de carbono - $\delta^{13}\text{C}$ (a) e nitrogênio - $\delta^{15}\text{N}$ (b) de *Astyanax lacustris*, a espécie mais abundante e amplamente distribuída nos 10 pontos amostrados ao longo na bacia hidrográfica do Rio Doce. I = Pontos Impactados pelo rompimento da barragem (I-1 a I-7); C = Pontos controle, não impactados pelo rompimento da barragem (C-1 a C-3). C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candongá); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina.

Tabela 7 Média e desvio padrão da composição isotópica de **carbono ($\delta^{13}\text{C}$)** de cada espécie de peixe amostradas nos 10 pontos ao longo da bacia do Rio Doce. C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candonga); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina. O símbolo “-“ representa os peixes com apenas um indivíduo (ou seja, sem informação de desvio padrão).

Espécie	C-1		C-2		C-3		I-1		I-2		I-3		I-4		I-5		I-6		I-7	
	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)
<i>Astyanax lacustris</i>	-23.28	1.38	-22.30	1.26	-20.76	1.35	-21.37	1.12	-17.55	1.10	-21.84	2.17	-23.75	1.24	-21.51	2.26	-20.38	1.96	-22.11	0.96
<i>Australoheros facetus</i>							-22.79	-												
<i>Awaous tajasica</i>																			-17.04	0.60
<i>Brycon dulcis</i>											-25.97	-								
<i>Brycon opalinus</i>			-17.56	2.36																
<i>Characidium timbuiense</i>			-20.01	0.31																
<i>Cichla kelberi</i>					-17.68	0.32														
<i>Cichla monoculus</i>					-20.80	-														
<i>Clarias gariepinus</i>					-19.92	-					-17.99	-								
<i>Coptodon rendalli</i>					-13.46	-			-15.35	1.05	-13.53	0.94			-14.62	1.78				
<i>Crenicichla lacustris</i>					-17.18	1.82														
<i>Crenicichla lepidota</i>																	-17.34	1.67	-21.92	-
<i>Cyphocharax gilbert</i>											-24.18	-								
<i>Delturus carinotus</i>	-18.49	-	-17.14	0.38	-17.34	0.33														
<i>Deuterodon cf. intermedius</i>					-19.25	0.74							-20.75	1.88						
<i>Deuterodon intermedius</i>					-19.89	0.08														
<i>Eleotris pisonis</i>																			-20.49	-
<i>Geophagus aff. brasiliensis</i>	-19.39	0.74	-17.72	0.92	-15.56	2.86	-24.54	-	-17.55	0.31	-17.23	1.77			-15.47	1.49			-20.56	0.24
<i>Geophagus sp.</i>			-19.48	1.29	-17.63	1.75					-19.87	0.38								
<i>Gymnotus sylvius</i>	-20.06	0.84			-22.51	1.27					-22.53	-					-20.40	1.07	-20.36	0.13
<i>Hasemania nana</i>							-24.87	-												
<i>Henochilus wheatlandii</i>			-18.81	3.41																
<i>Hoplias intermedius</i>			-18.89	0.16	-17.52	1.25	-20.93	-	-16.66	1.25	-18.88	1.87	-20.99	0.70	-22.79	0.77	-15.40	2.60		
<i>Hoplosternum littorale</i>					-21.75	2.23					-28.07	-								
<i>Hypomasticus copelandii</i>			-20.85	-	-23.18	-														
<i>Hypostomus affinis</i>	-24.09	1.48					-24.66	0.91											-21.86	3.16

Espécie	C-1		C-2		C-3		I-1		I-2		I-3		I-4		I-5		I6		I-7	
	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)
<i>Hypostomus luetkeni</i>	-19.32	1.03	-17.40	0.75	-16.85	1.13			-15.42	-					-18.84	0.42	-14.73	-		
<i>Knodus moenkhausii</i>	-18.04	0.43	-20.51	0.63	-16.78	1.46			-17.31	2.07	-17.98	1.75	-19.66	0.70	-21.31	2.34	-17.03	0.82		
<i>Lophiosilurus alexandri</i>															-19.59	-				
<i>Loricariichthys castaneus</i>					-18.76	2.79			-18.11	0.51			-20.06	1.08						
<i>Megaleporinus conirostris</i>	-22.73	0.81			-23.06	1.12			-18.77	2.05					-21.94	-	-19.81	-	-23.27	0.22
<i>Microcambeva</i> sp.									-15.20	0.25										
<i>Microphis lineatus</i>																			-20.47	1.16
<i>Oligosarcus acutirostris</i>													-21.23	0.58	-18.99	1.61	-19.12	2.42		
<i>Oligosarcus argenteus</i>	-20.49	0.57	-18.67	0.82	-16.60	-			-16.49	1.75	-19.39	1.08	-21.53	0.43	-19.02	-				
<i>Oligosarcus solitarius</i>			-19.09	0.57																
<i>Oreochromis niloticus</i>									-15.77	1.62	-10.84	0.88	-15.62	0.68	-13.23	0.87	-13.30	2.77	-19.45	0.30
<i>Pachyurus adspersus</i>	-19.82	0.76	-19.77	1.80											-20.86	-			-17.51	2.07
<i>Parotocinclus doceanus</i>					-21.94	-					-23.01	1.03								
<i>Parotocinclus</i> sp.			-17.50	0.53	-15.66	-													-18.65	0.57
<i>Pimelodus maculatus</i>													-20.22	0.18			-21.85	-	-22.04	0.16
<i>Poecilia reticulata</i>																	-21.48	-	-20.36	0.37
<i>Poecilia vivipara</i>					-16.65	3.35											-15.73	3.24	-21.95	0.64
<i>Prochilodus argenteus</i>																	-18.57	-		
<i>Prochilodus costatus</i>													-21.40	1.68	-22.78	0.80				
<i>Prochilodus vimboides</i>									-15.24	-	-20.18	2.18			-23.87	-				
<i>Psalidodon aff. fasciatus</i>	-22.90	-							-17.27	0.53										
<i>Psalidodon</i> sp.			-20.29	0.92																
<i>Pterygoplichthys pardalis</i>																			-22.95	0.45
<i>Pygocentrus nattereri</i>															-17.95	0.51			-20.13	1.31
<i>Rhamdia quelen</i>	-20.54	-					-21.14	0.32												
<i>Salminus brasiliensis</i>													-21.11	-	-21.49	-				
<i>Serrapinnus heterodon</i>											-20.60	0.41								
<i>Serrasalmus brandtii</i>																			-20.26	-
<i>Synbranchus marmoratus</i>																	-19.28	3.06	-21.39	0.79
<i>Trachelyopterus striatulus</i>					-21.98	0.58											-22.45	-		
<i>Trichomycterus aff. alternatus</i>			-17.32	1.14																

Espécie	C-1		C-2		C-3		I-1		I-2		I-3		I-4		I-5		I6		I-7	
	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)
<i>Trichomycterus astromycterus</i>									-15.24	-										
<i>Trichomycterus sp.</i>								-23.10	-	-17.73	-									

Tabela 8 Média e desvio padrão da composição isotópica de **nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$)** de cada espécie de peixe amostradas nos 10 pontos ao longo da bacia do Rio Doce. C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candonga); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina. O símbolo “-” representa os peixes com apenas um indivíduo (ou seja, sem informação de desvio padrão).

Espécie	C-1		C-2		C-3		I-1		I-2		I-3		I-4		I-5		I6		I-7	
	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)
<i>Astyanax lacustris</i>	10.17	0.11	9.75	0.91	12.59	1.13	10.44	0.40	11.97	0.91	12.48	0.99	10.94	0.58	12.49	1.33	12.70	1.14	11.04	2.04
<i>Australoheros facetus</i>							13.33	-												
<i>Awaous tajasica</i>																			9.19	0.27
<i>Brycon dulcis</i>											12.98	-								
<i>Brycon opalinus</i>			10.17	0.40																
<i>Characidium timbuiense</i>			12.03	0.04																
<i>Cichla kelberi</i>					14.90	0.17														
<i>Cichla monoculus</i>					14.19	-														
<i>Clarias gariepinus</i>					13.94	-					13.04	-								
<i>Coptodon rendalli</i>					10.80	-			12.41	0.74	12.66	0.26			12.68	0.27				
<i>Crenicichla lacustris</i>					13.92	1.47														
<i>Crenicichla lepidota</i>																	14.49	1.14	14.43	-
<i>Cyphocharax gilbert</i>											12.05	-								
<i>Delturus carinotus</i>	14.86	-	12.66	0.06	13.67	0.34														
<i>Deuterodon cf. intermedius</i>					13.32	0.73							11.67	0.71						
<i>Deuterodon intermedius</i>					14.05	0.34														
<i>Eleotris pisonis</i>																			9.56	-
<i>Geophagus aff. brasiliensis</i>	13.69	0.50	11.55	0.24	11.63	1.16	13.44	-	11.75	2.04	13.07	0.21			13.11	0.26			4.95	0.33
<i>Geophagus sp.</i>			11.83	0.94	13.16	0.28					13.18	0.16								
<i>Gymnotus sylvius</i>	14.23	0.55			12.67	0.36					13.39	-					12.17	0.32	10.89	0.01

Espécie	C-1		C-2		C-3		I-1		I-2		I-3		I-4		I-5		I6		I-7	
	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)	Média	(DP)
<i>Hasemanina nana</i>							11.47	-												
<i>Henochilus wheatlandii</i>			10.22	0.68																
<i>Hoplias intermedius</i>			13.71	0.09	12.74	2.40	12.37	-	15.12	0.44	13.71	0.88	13.15	0.79	13.41	0.76	13.18	2.40		
<i>Hoplosternum littorale</i>					12.18	0.67					10.60	-								
<i>Hypomasticus copelandii</i>			11.78	-	13.07	-														
<i>Hypostomus affinis</i>	14.03	1.55					12.95	0.63											6.49	5.27
<i>Hypostomus luetkeni</i>	14.86	0.06	11.71	0.20	13.30	0.37			13.61	-					15.28	0.15	13.25	-		
<i>Knodus moenkhausii</i>	14.35	0.48	11.52	0.40	12.39	0.49			13.00	0.96	13.70	0.81	12.28	0.43	13.34	0.24	12.41	0.25		
<i>Lophiosilurus alexandri</i>															15.94	-				
<i>Loricariichthys castaneus</i>					12.18	1.60			12.97	0.14			11.26	0.55						
<i>Megaleporinus conirostris</i>	12.72	0.27			13.66	0.29			12.62	0.57					13.38	-	15.10	-	10.51	2.63
<i>Microcambeva</i> sp.									12.89	0.48										
<i>Microphis lineatus</i>																			7.05	3.01
<i>Oligosarcus acutirostris</i>													14.78	0.38	14.53	1.66	15.17	0.91		
<i>Oligosarcus argenteus</i>	13.69	0.80	12.62	1.34	15.06	-			15.36	0.60	13.43	2.21	13.50	0.26	14.91	-				
<i>Oligosarcus solitarius</i>			13.51	0.26																
<i>Oreochromis niloticus</i>									11.61	1.06	12.06	0.37	12.18	0.27	12.17	0.35	11.36	0.78	7.33	0.52
<i>Pachyurus adspersus</i>	15.07	0.57	12.14	0.95											13.05	-			9.46	1.17
<i>Parotocinclus doceanus</i>					11.18	-					13.84	0.32								
<i>Parotocinclus</i> sp.			11.29	0.32	11.63	-													10.70	2.81
<i>Pimelodus maculatus</i>													13.66	0.31			15.52	-	12.64	0.04
<i>Poecilia reticulata</i>																	10.55	-	5.72	0.49
<i>Poecilia vivipara</i>					11.89	1.05											11.30	1.18	9.12	0.46
<i>Prochilodus argenteus</i>																	13.05	-		
<i>Prochilodus costatus</i>													11.67	1.14	12.25	0.35				
<i>Prochilodus vimboides</i>									13.22	-	11.55	0.70			12.27	-				
<i>Psalidodon aff. fasciatus</i>	11.50	-							13.76	0.93										
<i>Psalidodon</i> sp.			11.82	0.27																
<i>Pterygoplichthys pardalis</i>																			6.78	1.56
<i>Pygocentrus nattereri</i>															16.68	0.43			14.22	1.22
<i>Rhamdia quelen</i>	13.73	-					10.72	0.12												

Espécie	C-1	C-2	C-3	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I6	I-7
	Média (DP)	Média (DP)	Média (DP)	Média (DP)	Média (DP)	Média (DP)	Média (DP)	Média (DP)	Média (DP)	Média (DP)
<i>Salminus brasiliensis</i>							12.44 -	15.04 -		
<i>Serrapinnus heterodon</i>						14.63 0.37				
<i>Serrasalmus brandtii</i>										14.07 -
<i>Synbranchus marmoratus</i>									11.43 0.38	8.41 0.18
<i>Trachelyopterus striatulus</i>			13.02 0.03						16.29 -	
<i>Trichomycterus aff. alternatus</i>		11.51 0.33								
<i>Trichomycterus astromycterus</i>					13.80 -					
<i>Trichomycterus sp.</i>				12.08 -	13.02 -					

Influência da qualidade da água no $\delta^{15}\text{N}$ dos peixes e recursos

Durante as coletas realizadas nos 10 pontos amostrados na bacia do Rio Doce, o maior aporte de esgoto não tratado foi observado no ponto I-7, em Colatina. Durante a realização das coletas, foram observadas tanto canalizações de pequeno porte (Figura 31), como grandes manilhas despejando esgoto sem tratamento no rio.



Figura 31 Registro fotográfico de canalização e lançamento de esgoto no Rio Doce na região de Colatina, ES.

Tal aporte de esgoto para o meio aquático pode influenciar a alimentação dos peixes, como mencionado anteriormente, se refletindo nas assinaturas isotópicas, nichos, fluxo de carbono, etc. (ALONSO et al., 2020; DE CARVALHO et al., 2020a, 2021; PRADO et al., 2020b; WANG et al., 2016). Entretanto, não observamos correlação entre as composições isotópicas de $\delta^{15}\text{N}$ dos peixes com as concentrações de nitrato na água, enquanto que para os recursos só foram observadas correlações entre a concentração de nitrato e o $\delta^{15}\text{N}$ das algas filamentosas (correlação negativa) e o $\delta^{15}\text{N}$ do CPOM (correlação positiva) (Tabela 9). Estes resultados diferem de outros estudos que avaliam o efeito da poluição sobre as

composições isotópicas dos peixes e recursos (DE CARVALHO et al., 2020a, 2021). Vale salientar que os dados de qualidade da água utilizados nesse relatório foram obtidos através do Portal de Monitoramento do rio Doce da Fundação Renova. Sendo assim, os pontos amostrais avaliados pela Renova (e que foram considerados como correspondentes aos nossos), podem não ter refletido exatamente as mesmas condições dos pontos da amostragem de peixes e recursos alimentares, pois deve-se ponderar o fator da distância entre pontos. Além disso, os dados de nitrogênio amoniacal do Portal de Monitoramento do rio Doce não puderam ser utilizados para correlacionar com as composições isotópicas de $\delta^{15}\text{N}$, uma vez que não houve variação nos dados, pois todos estiveram abaixo do limite de quantificação (ver Tabela 2). Portanto, sugerimos que em próximos estudos, a avaliação da qualidade da água seja feita concomitantemente e nos mesmos locais em que serão realizadas as amostragens de peixes e recursos alimentares. Somente dessa forma conseguiremos ter um panorama correto da influência da qualidade da água sobre a composição isotópica dos organismos aquáticos.

Tabela 9 Correlação (Spearman) entre concentração de nitrato na água e composições isotópicas de nitrogênio no tecido dos peixes e recursos alimentares

Correlações	N	Spearman R	t(N-2)	p-level
$\delta^{15}\text{N}$ Peixes x nitrato (mg/L)	560	-0.028595	-0.675744	0.499483
$\delta^{15}\text{N}$ Algas x nitrato (mg/L)	50	-0.296440	-2.15046	0.036585
$\delta^{15}\text{N}$ CPOM x nitrato (mg/L)	50	0.507699	4.082760	0.000168
$\delta^{15}\text{N}$ Perifiton x nitrato (mg/L)	50	0.006050	0.041916	0.966740
$\delta^{15}\text{N}$ Macrófitas x nitrato (mg/L)	26	0.027400	0.134281	0.894300
$\delta^{15}\text{N}$ Material em suspensão x nitrato (mg/L)	50	0.228924	1.629301	0.109796
$\delta^{15}\text{N}$ Inv. terrestres x nitrato (mg/L)	50	0.266191	1.913254	0.061690
$\delta^{15}\text{N}$ Inv. aquáticos x nitrato (mg/L)	50	-0.098733	-0.687398	0.495140

Influência da qualidade da água no nicho trófico

Não foi observada uma relação significativa ($p < 0.05$) entre a amplitude do nicho trófico de cada comunidade/ponto e as concentrações de nitrato na água (**Figura 32**). Tal padrão sugere que concentrações de nitrato, usado como proxy da qualidade da água, não está influenciando a amplitude do nicho trófico nos pontos avaliados. Entretanto, como

mencionado anteriormente, é necessário cautela para tal afirmação, uma vez que os dados de qualidade da água não foram obtidos em campo simultaneamente aos da ictiofauna, mas sim através de pontos correspondentes obtidos através do Portal de Monitoramento do rio Doce da Fundação Renova (**Tabela 9**).

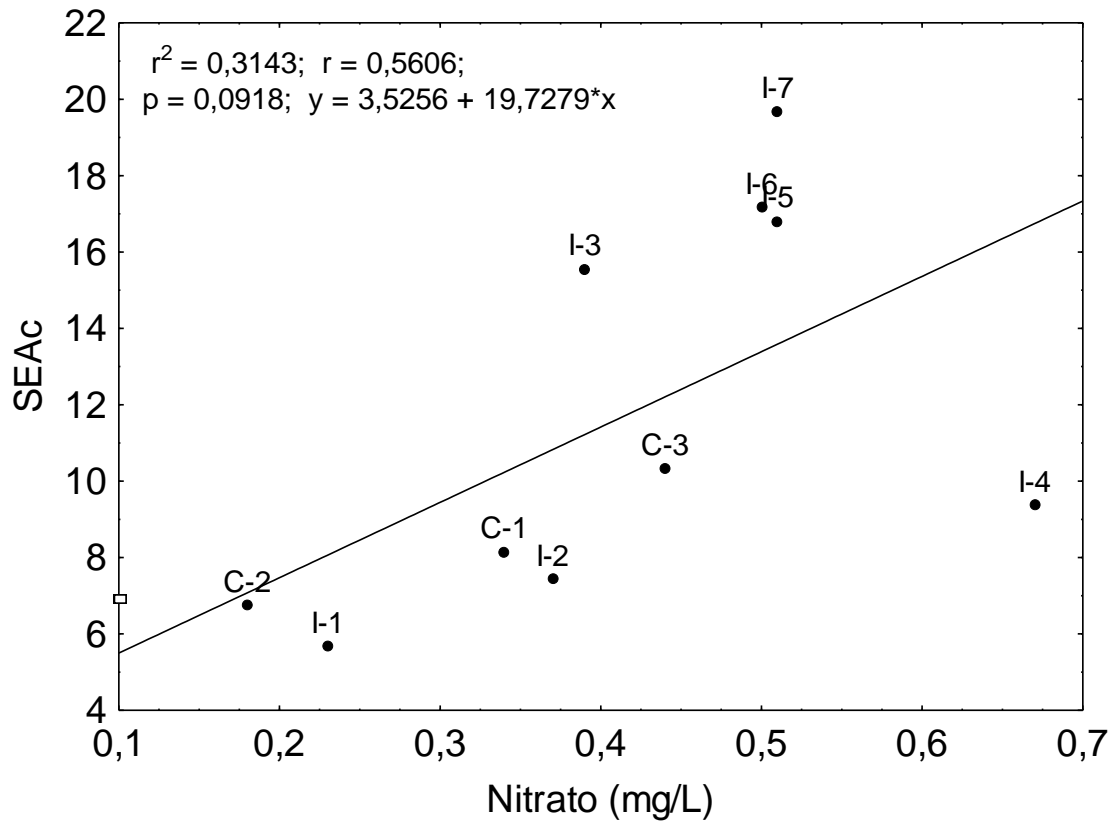


Figura 32 Relação entre amplitude de nicho trófico das comunidades de cada ponto amostral (SEAc) e concentrações de nitrato na água. C-1 = Rio Piranga, C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-1 = Rio Gualaxo do Norte; I-2 = Rio Doce na UHE Risoleta Neves (Candongá); I-3 = Rio Doce em São José do Goiabal; I-4 = Rio Doce em Naque; I-5 = Rio Doce em Tumiritinga; I-6 = Rio Doce em Aimorés; e I-7 = Rio Doce em Colatina.

3.3 Obtenção de informações sobre a história de vida, residência e circulação de peixes na bacia do Rio Doce

Predições sobre a residência e circulação dos peixes migradores

Ao usarmos os isótopos para avaliar a movimentação dos peixes em uma bacia, partimos dos pressupostos de que existe variação na composição isotópica dos recursos entre pontos e de que, se os peixes se alimentam em uma região diferente da qual ele foi coletado, ele irá apresentar um nicho diferente das espécies residentes deste ponto. De forma geral, ao avaliar todos pontos em conjunto, observa-se que peixes migradores (*Brycon opalinus*, *Hypomasticus copelandii*, *Megaleporinus conirostris*, *Pachyurus adspersus*, *Pimelodus maculatus*, *Prochilodus argenteus*, *Prochilodus costatus*, *Prochilodus vimboides* e *Salminus brasiliensis*) e não migradores (demais espécies) ocupam nichos similares na bacia do rio Doce (Figura 33).

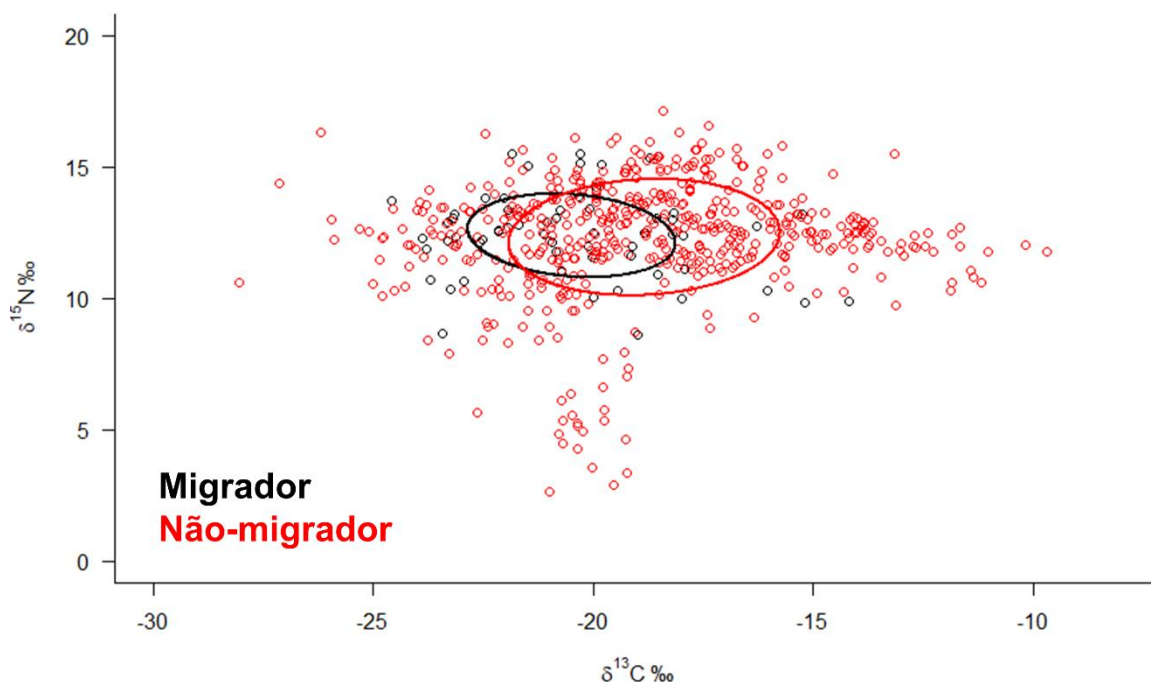


Figura 33 Nicho trófico ocupado por espécies migradoras (preto) e não migradoras (em vermelho) na bacia do rio Doce, considerando todos os 10 pontos amostrais juntos.

Entretanto, ao se avaliar cada ponto separadamente, algumas diferenciações de nicho podem ser observadas (Figura 34). Espécies migradoras possuem nichos diferentes das não

migradoras principalmente no Rio Manhuaçu (C3), no Rio Doce em São José do Goiabal (I-3), em Tumiritinga (I-5), em Aimorés (I-6) e em Colatina (I-7). É interessante mencionar que no ponto I-7, as espécies migradoras não apresentaram assinaturas empobrecidas de $\delta^{15}\text{N}$, como observado para as espécies residentes, o que pode ser um indicativo de que essas espécies migradoras não se alimentam, ou não estavam anteriormente nesse local (Figura 34). Por outro lado, em alguns pontos, como no Rio Santo Antônio (C-2), peixes migradores e não migradores possuem nichos exatamente iguais, o que indica que estão se alimentando na região em que foram capturados, ou que toda a sua área de vida possui composição isotópica similar (o que até seria esperado para uma bacia preservada). Já em pontos mais impactados por atividades antrópicas (I-3, I-5, I-6 e I-7 por exemplo), especialmente quando localizados em segmentos de rio com trechos em condições diferentes de conservação, os recursos podem variar mais nas suas assinaturas (DE CARVALHO et al., 2020a, 2021; DE CARVALHO; ALVES; POMPEU, 2021), e por isso a variação do nicho fica mais clara.

É importante mencionar que nossas coletas foram realizadas na estação seca (agosto e setembro) e, portanto, evidenciam a dieta dos peixes referente a semanas ou meses antes (provavelmente julho e agosto), dependendo da taxa de renovação do tecido analisado (ALBRECHT et al., 2021; SACRAMENTO; MANETTA; BENEDITO, 2016). Tal fato restringe as informações referentes à movimentação dos peixes, uma vez que o período da Piracema ocorre nos meses de novembro a fevereiro/março. Desta forma, acreditamos que coletas realizadas ao fim da estação chuvosa (fevereiro ou março, por exemplo) trarão informações mais claras sobre as áreas de alimentação das espécies migradoras.

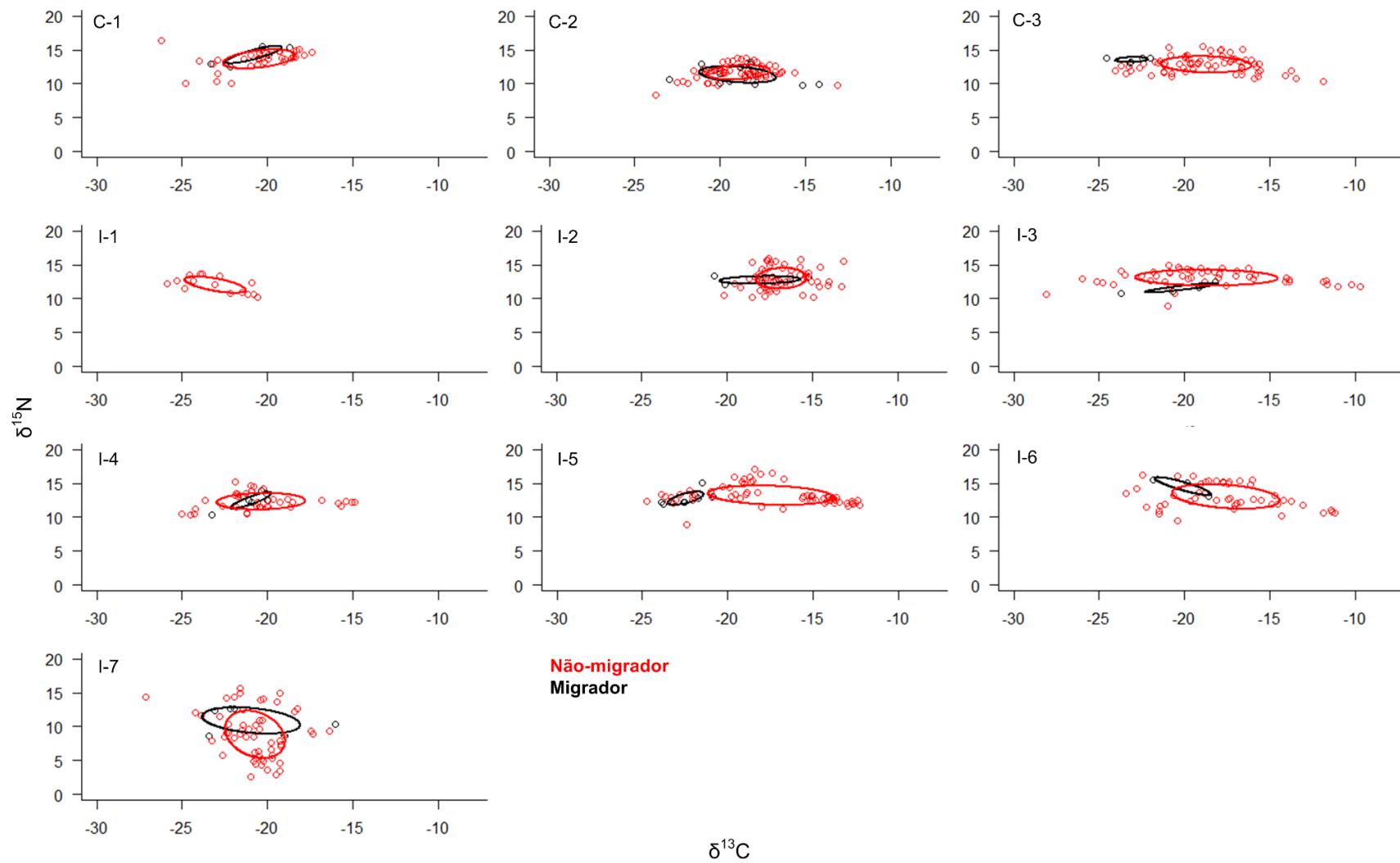


Figura 34 Nicho trófico ocupado por espécies migradoras (preto) e não migradoras (em vermelho) na bacia do rio Doce, considerando cada um dos 10 pontos amostrados separadamente.

Predições sobre a história de vida dos peixes mais abundantes e de distribuição mais ampla na bacia

Knodus moenkhausii

Knodus moenkhausii é uma espécie considerada introduzida na bacia do Rio Doce e que vem sendo bastante estudada devido à sua grande abundância e representatividade nas principais bacias brasileiras (CARVALHO et al., 2015; CENEVIVA-BASTOS; CASATTI, 2007; CENEVIVA-BASTOS; CASATTI; ROSSA-FERES, 2010; DE CARVALHO et al., 2019b). Trabalhos prévios apontam que esta espécie apresenta oportunismo alimentar, consumindo os recursos mais abundantes e disponíveis no ambiente (DE CARVALHO et al., 2019b). Portanto, essa espécie, que foi amostrada em vários pontos do presente projeto, tem potencial de fornecer informações importantes sobre o fluxo de energia em diferentes regiões dessa bacia. Por isso, optamos por avaliar as composições isotópicas e nichos tróficos de *Knodus moenkhausii* em diferentes porções (alto, médio e baixo) da bacia do Rio Doce, contemplando pontos impactados e não impactados pelo rejeito proveniente do rompimento. Vale ressaltar que essa avaliação inclui apenas seis pontos: alto Rio Doce (ponto impactado I-2/UHE Risoleta Neves e não impactado C-1/Piranga); médio Rio Doce (ponto impactado I-4/Naque e não impactado C-2/Santo Antônio); e baixo rio Doce (ponto impactado I-6/Aimorés e não impactado C-3/Manhuaçu).

Vimos que a composição isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ do *K. moenkhausii* foi diferente entre pontos amostrais, diferindo especialmente entre as regiões alta (azul), média (rosa) e baixa (verde) da bacia (Figura 35a). Por outro lado, pontos impactados e seus respectivos pontos não impactados à montante (I-2/C-1, I-4/C-2 e I-6/C-3) foram similares entre si (Figura 35a). Para o $\delta^{15}\text{N}$ também foi observada similaridade entre pontos impactados e seus respectivos pontos não impactados à montante, sendo que a principal exceção foi o ponto C-1 (Rio Piranga), onde os peixes apresentaram maior enriquecimento de $\delta^{15}\text{N}$, seguido pelo seu ponto à jusante, I-2 (UHE Risoleta Neves).

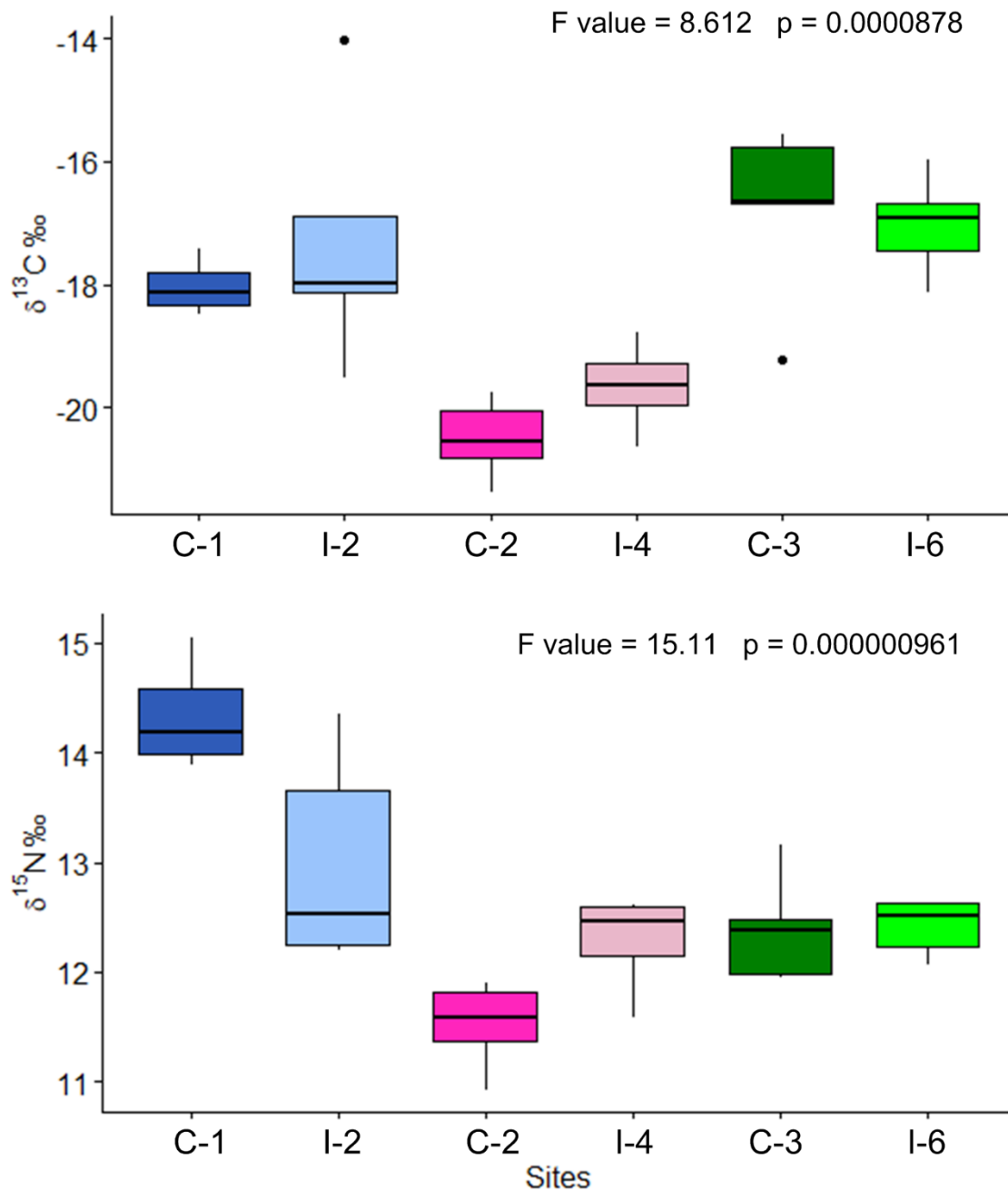


Figura 35 Variação da composição isotópica de a) carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e b) nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) de *Knodus moenkhausii* em pontos impactados (I-2, I-4 e I-6) e não impactados pelo rompimento da barragem do Fundão (C-1, C-2 e C-3) amostrados na porção alta (I-2= UHE Risoleta Neves e C-1 = Rio Piranga), média (I-4= Rio Doce em Naque e C-2 = Rio Santo Antônio) e baixa (I-6= Rio Doce em Aimorés e C-3 = Rio Manhuaçu) da bacia do Rio Doce. Caixa à direita = resultados teste post hoc.

A semelhança entre pontos impactados e seus respectivos pontos não impactados à montante fica mais evidente ao se avaliar os nichos tróficos de *K. moenkhausii* (Figura 36). O nicho mais amplo e distinto dos demais foi observado no ponto localizado no reservatório da UHE Risoleta Neves (I-2). Acredita-se que essa variação se dá pelas características do

hábitat físico deste ponto amostral, uma vez que este é o único ponto com fluxo lântico. Esse primeiro resultado chama a atenção para a necessidade de avaliação de pontos controle em diferentes regiões da bacia, uma vez que as variações podem ocorrer naturalmente devido às características de cada região (geomorfológicas, bioma inserido, atividades antrópicas principais, etc.). Isso fica claro ao vermos que até mesmo entre os pontos não impactados pelo rejeito (Rio Piranga, Rio Santo Antônio e Rio Manhuaçu) há variação nas composições isotópicas e no nicho trófico ocupado por *K. moenkhausii*, enquanto pontos próximos entre si, são mais similares.

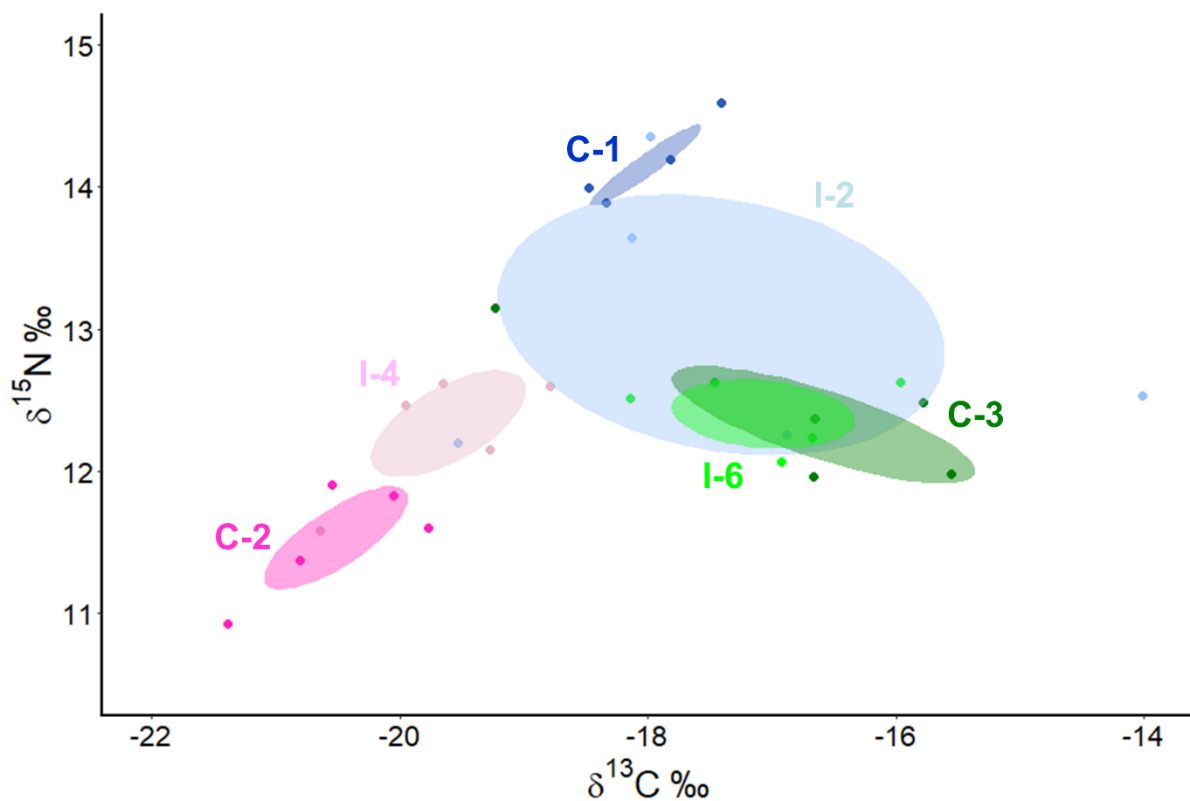


Figura 36 Nicho trófico (SEA) de *Knodus moenkhausii* em pontos impactados (I-2, I-4 e I-6) e não impactados pelo rompimento da barragem do Fundão (C-1, C-2 e C-3) amostrados na porção alta (I-2= UHE Risoleta Neves e C-1 = Rio Piranga), média (I-4= Rio Doce em Naque e C-2 = Rio Santo Antônio) e baixa (I-6= Rio Doce em Aimorés e C-3 = Rio Manhuaçu) da bacia do rio Doce.

Apesar da similaridade das composições isotópicas e nichos entre pontos impactados e seus respectivos pontos não impactados à montante, algumas diferenças nos recursos assimilados por *K. moenkhausii* podem ser observadas entre pontos impactados e não

impactados. A principal diferença é que os indivíduos de *K. moenkhausii* se alimentam de uma proporção maior de recursos mais nutritivos (invertebrados) nos pontos não impactados (Tabela 10). Já nos pontos impactados a dieta destes peixes foi baseada principalmente em produtores primários (algas e perifíton).

A preferência de *K. moenkhausii* por invertebrados já tem sido descrita na literatura, assim como sua capacidade de alterar sua alimentação de acordo com a disponibilidade do item alimentar nesse ambiente (DE CARVALHO et al., 2019b). Isso explica por que os invertebrados aquáticos são os principais recursos para *K. moenkhausii* e a sua alternância entre algas e perifíton como recurso secundário. Os pontos impactados do Rio Doce (I-2, I-4 e I-6) apresentam características físicas bem distintas dos demais rios (C-1, C-2 e C-3), como maior largura do canal e profundidade. Essas diferenças são ainda maiores considerando o ponto do reservatório da UHE Risoleta Neves. Somado a isso, temos que levar em conta que alguns desses pontos ainda recebem muita poluição das cidades que os margeiam (como Naque, Aimorés e Colatina), o que pode fazer com que esses pontos sejam mais enriquecidos em nutrientes do que os demais pontos, contribuindo para o aumento da produtividade primária. Esse segundo resultado sugere que a simplificação de habitat e a alteração na disponibilidade de recursos em decorrência da passagem do rejeito (somados à poluição) pode fazer com que os peixes se alimentem de recursos menos nutritivos em pontos impactados pelo rompimento. Resultado similar foi observado para um peixe predador (*Genidens genidens*) da região estuarina da bacia do Rio Doce (ANDRADES et al., 2021).

A qualidade da água está intimamente relacionada com o aumento da biomassa de produtores primários, uma vez que são recursos altamente dependentes de nutrientes (CONLEY et al., 2009). Apesar de não termos avaliado a biomassa de algas e perifíton, espera-se que esta seja maior nos pontos impactados, uma vez que são também os pontos com maior concentração de nitrato na água (Tabela 2). Desta forma, devido à maior abundância em locais impactados, esses recursos podem se tornar uma alternativa menos nutritiva em

caso de baixa abundância de macroinvertebrados devido às condições impostas pelo assoreamento promovido pela passagem da lama de rejeitos.

Tabela 10 Partição de recursos alimentares de *Knodus moenkhausii* nos pontos impactados (I-2, I-4 e I-6) e não impactados pelo rompimento da barragem do Fundão (C-1, C-2 e C-3). Produtores primários = perífiton (PE) + algas filamentosas (AL); Invertebrados = Invertebrados terrestres (IT) + macroinvertebrados aquáticos (BE). Recursos mais assimilados estão representados em negrito.

Ponto	AL	PE	BE	IT	Produtores primários	Invertebrados
C-1 - Rio Piranga	0.314	0.136	0.502	0.048	0.45	0.55
C-2 - Rio Santo Antônio	0.059	0.279	0.488	0.174	0.338	0.662
C-3 - Rio Manhuaçu	0.272	0.187	0.448	0.093	0.459	0.541
I-2 - Rio Doce (UHE)	0.404	0.204	0.257	0.135	0.608	0.392
I-4 - Rio Doce (Naque)	0.089	0.643	0.185	0.083	0.732	0.268
I-6 - Rio Doce (Aimorés)	0.168	0.350	0.264	0.219	0.518	0.483

Espécies exóticas

A introdução de espécies não-nativas está entre os principais impactos sobre os ecossistemas aquáticos (RICHARDSON, 2011). Nesse estudo, 17 das 59 espécies coletadas são consideradas introduzidas na bacia do Rio Doce, são elas: *Cichla kelberi*, *Cichla monoculus*, *Clarias gariepinus*, *Coptodon rendalli*, *Crenicichla lacustris*, *Hoplosternum littorale*, *Knodus moenkhausii*, *Lophiosilurus alexandri*, *Oreochromis niloticus*, *Pimelodus maculatus*, *Poecilia reticulata*, *Prochilodus argenteus*, *Prochilodus costatus*, *Pterygoplichthys pardalis*, *Pygocentrus nattereri*, *Salminus brasiliensis* e *Serrasalmus brandtii*. Vimos que o nicho trófico destas espécies exóticas apresenta grande sobreposição ao das espécies nativas de peixes (**Figura 37**). Entretanto, vale salientar que além das espécies exóticas ocuparem nichos tróficos amplos na maioria dos pontos (exceção para os pontos controle, C1 e C2), elas também ocupam um nicho trófico não explorado pelas espécies nativas principalmente nos pontos impactados no Rio Doce: UHE Risoleta Neves (I-2), São José do Goiabal (I-3), Naque (I-4) e Tumiritinga (I-5) (**Figura 37**). Nesses pontos, os nichos tróficos são deslocados para direita (enriquecidos em $\delta^{13}\text{C}$). Como mencionado anteriormente, as

principais espécies responsáveis por explorar esses nichos, são as tilápias *Coptodon rendalli* e *Oreochromis niloticus* (Figura 19 e Figura 20).

Entre as principais implicações para esses resultados estão: 1) as espécies exóticas podem estar exercendo uma pressão competitiva sobre as espécies nativas, uma vez que se observa grande sobreposição de nichos; 2) a diversificação de nichos pode ser um fator preponderante para permitir o estabelecimento de espécies introduzidas na bacia do Rio Doce. Portanto, novas pesquisas são necessárias para se conhecer melhor quais são os reais efeitos destas introduções para as espécies nativas, avaliando inclusive, possíveis alterações nas funções ecológicas/funcionamento do ecossistema.

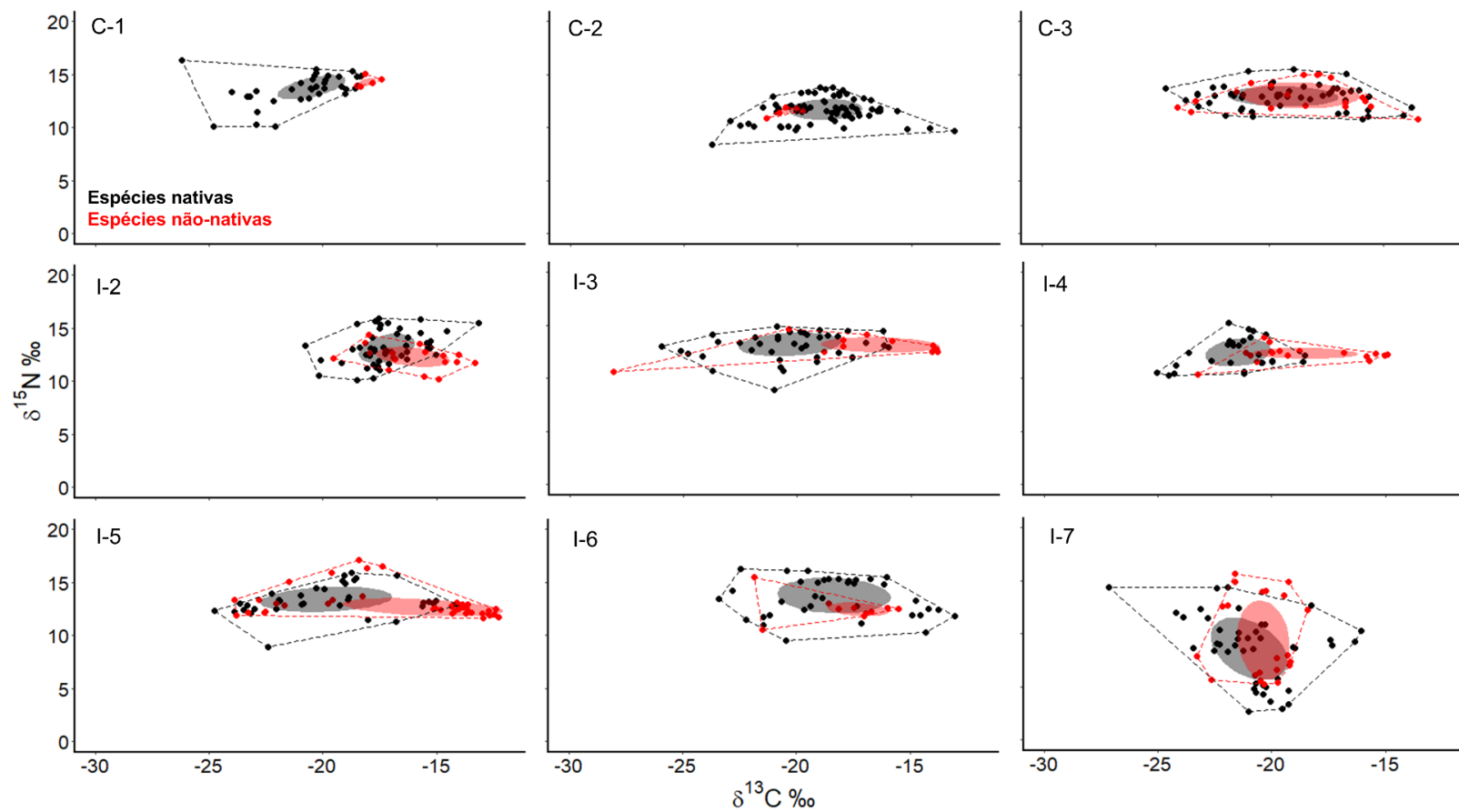


Figura 37 Elipses (Standard Ellipse Area – SEA - calculadas usando intervalo de confiança de 40%) representando o nicho trófico da comunidade de peixes nativos e não nativos nos pontos amostrados na bacia do rio Doce. C-1 = Rio Piranga; C-2 = Rio Santo Antônio; C-3 = Rio Manhuaçu; I-2 = Rio Doce (UHE Risoleta Neves); I-3 = Rio Doce (São José do Goiabal) ; I-4 = Rio Doce (Naque); I-5 = Rio Doce (Tumiritinga); I-6 = Rio Doce (Aimorés); I-7 = Rio Doce (Colatina). *No ponto I1 (Rio Gualaxo do Norte) não foram coletados indivíduos de espécies exóticas de peixes.

4. Conclusões

Através deste estudo foi possível detalhar a estrutura trófica das comunidades de peixes de diferentes pontos da bacia do Rio Doce, possibilitando também uma comparação entre pontos impactados e não impactados pelo rompimento da barragem. Apesar de não existirem informações sobre a estrutura trófica prévia ao acidente, tais resultados são extremamente importantes para se conhecer melhor o ecossistema estudado, estabelecendo uma linha de base para avaliação de tendências de uma eventual melhoria das condições da bacia em longo prazo ou como resultado das intervenções para a melhoria do ecossistema.

Abaixo listamos as principais conclusões referentes aos objetivos específicos:

Efeitos da presença de rejeitos sobre a estrutura trófica e fluxo de carbono das comunidades de peixes do rio Doce:

Pontos distintos da bacia do Rio Doce apresentaram diferentes estruturas tróficas e fontes preferenciais de carbono, com grande diferença sendo observada entre os pontos dos extremos (pontos mais próximos e pontos mais distantes do rompimento). O ponto mais próximo ao rompimento (I-1) se destacou por apresentar menor riqueza e abundância de espécies de peixes, estrutura trófica mais simplificada, menor diversidade trófica, menor amplitude de níveis tróficos e nicho trófico distinto dos demais pontos. Similarmente, o ponto I-2 também apresentou baixa diversidade trófica, grande redundância trófica e uniformidade na distribuição dos nichos tróficos das espécies, com a maioria dos peixes se alimentando de algas filamentosas. A presença de rejeitos pode ter contribuído para tal resultado, uma vez que o ponto I-1 está localizado no Rio Gualaxo no Norte, bem próximo ao local de rompimento, e o ponto I-2 está localizado no reservatório da UHE de Candonga, responsável por barrar 25% dos rejeitos provenientes do rompimento. A jusante desta barragem, nota-se um incremento na diversidade trófica nos pontos ao longo do gradiente (exceção do I-4, em Naque, que está sob influência do Rio Santo Antônio). Entretanto, é importante mencionar que o ponto I-4 também apresentou pequena diversidade trófica, mas ao contrário do I-2, no

ponto I-4 foi observada baixa redundância trófica e a distribuição dos nichos tróficos das espécies foi heterogênea.

Nossos resultados indicam que apesar de ocorrer um incremento natural na diversidade trófica ao longo de um gradiente no Rio Doce, os pontos mais próximos ao rompimento parecem ter sofrido influência negativa dos rejeitos de minério. Os resultados observados no ponto I-7 (Colatina) também sugerem que outras atividades antrópicas podem estar influenciando os padrões observados (como por exemplo, a entrada de esgoto na teia alimentar), uma vez que não foram observados resultados similares nos demais pontos avaliados. Tal aumento na diversidade trófica ao longo do gradiente do rio é esperado, devido às mudanças naturais nas características morfológicas dos rios ao longo de um continuo (VANNOTE et al., 1980). Além disso, o impacto do rompimento pode ter sido menos acentuado nos pontos à jusante da barragem.

Entre as fontes de carbono que sustentam as comunidades de peixes do Rio Doce, vimos que invertebrados aquáticos (bentos), perífiton e algas filamentosas constituem os principais recursos alimentares. Entretanto a importância deles varia entre cada região estudada. De modo geral, os invertebrados aquáticos foram mais consumidos nos pontos controle. Entre os produtores primários, algas filamentosas foram mais assimiladas nos locais diretamente impactados pelo rompimento (pontos I-1 e I-2), enquanto perífiton foi mais consumido em locais menos ou não impactados. Os resultados da partição de recursos para espécie *K. moenkhausii* também chama atenção para essa diferença, uma vez que foi observado um consumo maior de recursos mais nutritivos em pontos controle em comparação a pontos impactados pelo rompimento. Tal resultado sugere que mudanças na dieta dos peixes podem ter ocorrido como resposta às mudanças ocasionadas pela presença do rejeito.

Efeitos de outros poluentes (esgoto) sobre as composições isotópicas dos peixes e recursos alimentares:

Apesar de serem observadas variações entre pontos amostrais, não foram observados valores muito atípicos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ nos peixes e recursos, como os valores já observados em bacias muito poluídas (DE CARVALHO; ALVES; POMPEU, 2021). Entretanto, as composições isotópicas empobrecidas em $\delta^{15}\text{N}$ do ponto em Colatina (I-7) chamaram atenção para uma provável entrada de esgoto na teia trófica. Também constatamos pouca ou nenhuma correlação entre a qualidade da água (avaliada apenas pelas concentrações de nitrato) e as composições isotópicas de $\delta^{15}\text{N}$ dos peixes e recursos, bem como com a amplitude de nicho. Entretanto, os dados de qualidade da água são provenientes de dados secundários. Dessa forma, ressaltamos a importância de os próximos estudos avaliarem a qualidade da água concomitantemente e nos mesmos locais em que serão realizadas as amostragens de peixes e recursos alimentares.

Interessante mencionar que algumas espécies podem ser interessantes em estudos de monitoramento da bacia do Rio Doce, como o *Astyanax lacustris* e o *Knodus moenkhausii*, por serem amplamente distribuídos e abundantes na bacia, e espécies de cascudos do gênero *Hypostomus*, que parecem refletir a entrada de recursos alimentares atípicos (como o esgoto).

Obtenção de informações sobre a história de vida, residência e circulação de peixes na bacia do rio Doce.

Os resultados da análise isotópica nos permitiram explorar questões relacionadas a ecologia trófica dos peixes da bacia do rio Doce. Vimos que peixes migradores de alguns pontos amostrais (principalmente os da porção baixa da bacia) parecem ter nichos distintos aos das espécies residentes, o que sugere que eles podem estar se alimentando em regiões diferentes de onde foram coletados. Entretanto, as diferenças de nichos foram sutis, o que pode ter ocorrido devido à época em que as coletas foram realizadas. Portanto, coletas realizadas no fim da estação chuvosa poderão trazer respostas mais conclusivas para tal questionamento.

Por outro lado, os resultados da avaliação da ecologia trófica de *K. moenkhausii* foram interessantes e levantaram alguns aspectos importantes na avaliação da bacia do Rio Doce. Primeiro, foi verificada diferenciação nas composições isotópicas do *K. moenkhausii* entre as porções alta, média e baixa da bacia. Entretanto, houve pouca diferença entre os pontos impactados e o ponto controle imediatamente à montante. Tal resultado sugere que os pontos não impactados podem estar influenciando os pontos impactados, seja na melhoria da qualidade da água, no fornecimento de recursos alimentares ou mesmo de organismos que refletem a assinatura isotópica de seu ponto de origem. Ainda mais importante que isso, mostra a importância de se amostrar pontos controle (sem influência do rompimento) em diferentes regiões da bacia, uma vez que mesmo entre pontos controle existe variação nas composições isotópicas, os quais podem ainda estar sujeitos aos efeitos de outros poluentes. Outro resultado interessante, foi o fato de *K. moenkhausii* se alimentar de recursos mais nutritivos (invertebrados) nos pontos controle, enquanto nos pontos impactados os produtores primários são mais assimilados.

A avaliação da sobreposição de nichos tróficos entre espécies exóticas e nativas também chama a atenção para a necessidade urgente de avaliação dos potenciais impactos da introdução de espécies sobre os ambientes aquáticos. Isso fica ainda mais evidente na bacia do Rio Doce, caracterizada pelo grande número de espécies introduzidas, em especial nas partes média e baixa da bacia.

Além destes tópicos abordados, ressaltamos diversos outros resultados obtidos, como a caracterização da estrutura trófica e dieta dos peixes do Rio Doce, fornecendo inclusive informações sobre a alimentação de espécies de grande importância do ponto de vista da conservação, como as espécies ameaçadas *Brycon dulcis* e o *Hemichilus wheatlandii*.

5. Referências

ABELHA, M. C. F.; AGOSTINHO, A. A.; GOULART, E. Plasticidade trófica em peixes de água doce. **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, v. 23, n. 2, p. 425–434, mar. 2001.

ALBRECHT, M. P. et al. ISÓTOPOS ESTÁVEIS E OUTRAS FERRAMENTAS EM ESTUDOS TRÓFICOS DE PEIXES EM RIACHOS TROPICAIS. **Oecologia Australis**, v. 25, n. 02, p. 283–300, 16 jun. 2021.

ALONSO, M. B. et al. Trophic structure of a fish assemblage in a reference condition river located in a polluted watershed. **Environmental Biology of Fishes**, v. 103, n. 11, p. 1437–1452, 1 nov. 2020.

ALVES, C. B. M. et al. Peixes ameaçados de extinção na bacia do rio Doce. In: DRUMMOND, G. M.; SUBIRÁ, R. J.; MARTINS, C. S. (Eds.). . **Livro vermelho da biota aquática do Rio Doce ameaçada de extinção pós rompimento da barragem de Fundão : Mariana, Minas Gerais : crustáceos, efemerópteros, odonatos e peixes**. 1. ed. Belo Horizonte: Fundação Biodiversitas, 2021. p. 206–266.

ANDRADES, R. et al. Early evidences of niche shifts in estuarine fishes following one of the world's largest mining dam disasters. **Marine Pollution Bulletin**, v. 154, n. March, p. 111073, maio 2020.

ANDRADES, R. et al. Effects of seasonal contaminant remobilization on the community trophic dynamics in a Brazilian tropical estuary. **Science of the Total Environment**, v. 801, p. 149670, 2021.

ANDRIAN, I. DE F.; SILVA, H. B. R.; PERETTI, D. Dieta de *Astyanax bimaculatus* (Linnaeus , 1758) (Characiformes , Characidae), da área de influência do reservatóri **Acta Scientiarum - Biological Sciences**, v. 23, n. 2, p. 435–440, 2001.

BEARHOP, S. et al. Determining trophic niche width: a novel approach using stable isotope analysis. **Journal of Animal Ecology**, v. 73, n. 5, p. 1007–1012, 18 set. 2004.

BRITTON, J. R.; CUCHEROUSSET, J.; DOMINGUEZ ALMELA, V. Novel trophic subsidies from recreational angling transform the trophic ecology of freshwater fishes. **Journal of Applied Ecology**, n. June, p. 1–13, jul. 2022.

BUENO, M. L. et al. Alien fish fauna of southeastern Brazil: species status, introduction pathways, distribution and impacts. **Biological Invasions**, v. 0123456789, 2021.

CARVALHO, D. R. et al. Isotopic variation in five species of stream fishes under the influence of different land uses. **Journal of Fish Biology**, v. 87, n. 3, p. 559–578, set. 2015.

CENEVIVA-BASTOS, M.; CASATTI, L. Oportunismo alimentar de *Knodus moenkhausii* (Teleostei, Characidae): uma espécie abundante em riachos do noroeste do Estado de São Paulo, Brasil. **Iheringia. Série Zoologia**, v. 97, n. 1, p. 7–15, mar. 2007.

CENEVIVA-BASTOS, M.; CASATTI, L.; ROSSA-FERES, D. C. Meso and microhabitat analysis and feeding habits of small nektonic characins (Teleostei: Characiformes) in Neotropical streams. **Zoologia (Curitiba)**, v. 27, n. 2, p. 191–200, 2010.

CONLEY, D. J. et al. Controlling Eutrophication: Nitrogen and Phosphorus. **Science**, v. 323, n. 5917, p. 1014–1015, 20 fev. 2009.

DE CARVALHO, D. et al. Trophic responses to aquatic pollution of native and exotic livebearer fishes. **Science of The Total Environment**, v. 681, p. 503–515, set. 2019a.

DE CARVALHO, D. et al. Using $\delta^{15}\text{N}$ of periphyton and fish to evaluate spatial and seasonal variation of anthropogenic nitrogen inputs in a polluted Brazilian river basin. **Ecological Indicators**, v. 115, n. March, p. 106372, ago. 2020a.

DE CARVALHO, D. R. et al. A fish-based multimetric index for Brazilian savanna streams. **Ecological Indicators**, v. 77, n. January, p. 386–396, jun. 2017a.

DE CARVALHO, D. R. et al. The trophic structure of fish communities from streams in the Brazilian Cerrado under different land uses: an approach using stable isotopes. **Hydrobiologia**, v. 795, n. 1, p. 199–217, 7 jul. 2017b.

DE CARVALHO, D. R. et al. Stable isotopes and stomach content analyses indicate omnivorous habits and opportunistic feeding behavior of an invasive fish. **Aquatic Ecology**, v. 53, n. 3, p. 365–381, 10 set. 2019b.

DE CARVALHO, D. R. et al. Trophic diversity and carbon sources supporting fish communities along a pollution gradient in a tropical river. **Science of The Total Environment**, v. 738, p. 139878, out. 2020b.

DE CARVALHO, D. R. et al. Nitrogen pollution promotes changes in the niche space of fish communities. **Oecologia**, v. 197, n. 2, p. 485–500, 3 out. 2021.

DE CARVALHO, D. R.; ALVES, C. B. M.; POMPEU, P. S. Uncertainty in estimating fish trophic positions and food web structure in highly polluted river basins. **Environmental Biology of Fishes**, 30 nov. 2021.

DENIRO, M. J.; EPSTEIN, S. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 42, n. 5, p. 495–506, maio 1978.

FERNANDES, G. W. et al. Deep into the mud: ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. **Natureza & Conservação**, v. 14, n. 2, p. 35–45, jul. 2016.

FERREIRA, A. et al. Permeability of riparian forest strips in agricultural, small subtropical watersheds in south-eastern Brazil. **Marine and Freshwater Research**, v. 63, n. 12, p. 1272,

2012.

HADWEN, W. L.; ARTHINGTON, A. H. Food webs of two intermittently open estuaries receiving ¹⁵N-enriched sewage effluent. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 71, n. 1–2, p. 347–358, 2007.

HAHN, N.S.; AGOSTINHO, A.A.; GOMES, L.C.; BINI, L. M. Estrutura trófica da ictiofauna do reservatório de Itaipu (Paraná-Brasil) nos primeiros anos de sua formação. **Interciencia**, v. 23, n. 5, p. 299–305, 1988.

HAHN, N. S.; FUGI, R. Alimentação de peixes em reservatórios brasileiros: alterações e consequências nos estágios iniciais do represamento. **Oecologia Brasiliensis**, v. 11, n. 04, p. 469–480, dez. 2007.

HOEINGHAUS, D. J.; WINEMILLER, K. O.; AGOSTINHO, A. A. Landscape-Scale Hydrologic Characteristics Differentiate Patterns of Carbon Flow in Large-River Food Webs. **Ecosystems**, v. 10, n. 6, p. 1019–1033, 25 set. 2007.

IBAMA. **Laudo Técnico Preliminar Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis**. [s.l.: s.n.]. Disponível em:

<http://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_preliminar_ibama.pdf>.

JACKSON, A. L. et al. Comparing isotopic niche widths among and within communities: SIBER - Stable Isotope Bayesian Ellipses in R. **Journal of Animal Ecology**, v. 80, n. 3, p. 595–602, maio 2011.

KARR, J. R. Assessment of biotic integrity using fish communities. **Fisheries**, v. 6, n. 6, p. 21–27, nov. 1981.

KARR, J. R.; DUDLEY, D. R. Ecological perspective on water quality goals. **Environmental Management**, v. 5, n. 1, p. 55–68, jan. 1981.

LAYMAN, C. A. et al. Can stable isotope ratios provide for community-wide measures of trophic structure? **Ecology**, v. 88, n. 1, p. 42–48, 2007.

LOOMER, H. A. et al. Use of stable isotopes to trace municipal wastewater effluents into food webs within a highly developed river system. **River Research and Applications**, v. 31, n. 9, p. 1093–1100, nov. 2015.

MACÊDO, A. K. S. et al. Histological and molecular changes in gill and liver of fish (*Astyanax*

lacustris Lütken, 1875) exposed to water from the Doce basin after the rupture of a mining tailings dam in Mariana, MG, Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 735, p. 139505, set. 2020.

MANETTA, G. I.; BENEDITO-CECILIO, E. Aplicação da técnica de isótopos estáveis na estimativa da taxa de turnover em estudos ecológicos: uma síntese. **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, v. 25, n. 1, p. 121–129, 2003.

MCCUTCHAN, J. H. et al. Variation in trophic shift for stable isotope ratios of carbon, nitrogen, and sulfur. **Oikos**, v. 102, n. 2, p. 378–390, ago. 2003.

MCINTYRE, P. B.; FLECKER, A. S. Rapid turnover of tissue nitrogen of primary consumers in tropical freshwaters. **Oecologia**, v. 148, n. 1, p. 12–21, 3 maio 2006.

MERÇON, J. et al. Evidence of reproductive disturbance in *Astyanax lacustris* (Teleostei: Characiformes) from the Doce River after the collapse of the Fundão Dam in Mariana, Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 47, p. 66643–66655, 7 dez. 2021.

MOORE, J. W.; SEMMENS, B. X. Incorporating uncertainty and prior information into stable isotope mixing models. **Ecology Letters**, v. 11, n. 5, p. 470–480, 2008.

MORAES, C. R. F. DE; ATTAYDE, J. L. DE; HENRY-SILVA, G. G. Stable isotopes of C and N as dietary indicators of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultivated in net cages in a tropical reservoir. **Aquaculture Reports**, v. 18, p. 100458, nov. 2020.

PARNELL, A. C. et al. Source partitioning using stable isotopes: coping with too much variation. **PloS one**, v. 5, n. 3, p. e9672, jan. 2010.

PARNELL, A. C. et al. Bayesian stable isotope mixing models. **Environmetrics**, v. 24, n. 6, p. 387–399, 2013.

PASSOS, L. S. et al. Is the Doce River elutriate or its water toxic to *Astyanax lacustris* (Teleostei: Characidae) three years after the Samarco mining dam collapse? **Science of The Total Environment**, v. 736, p. 139644, set. 2020.

PEREIRA, A. L.; BENEDITO-CECILIO, E. Isótopos estáveis em estudos ecológicos: métodos, aplicações e perspectivas. **Revista Biociências**, v. 13, n. 1–2, p. 16–27, 2007.

POMPEU, P. D. S.; GODINHO, A. L. Mudança na dieta da traíra *Hoplias malabaricus* (Bloch) (Erythrinidae, Characiformes) em lagoas da bacia do rio Doce devido à introdução de peixes piscívoros. **Revista Brasileira de Zoologia**, v. 18, n. 4, p. 1219–1225, dez. 2001.

POST, D. M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions. **Ecology**, v. 83, n. 3, p. 703, mar. 2002a.

POST, D. M. The long and short of food-chain length. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 17, n. 6, p. 269–277, jun. 2002b.

PRADO, M. R. DO et al. Convergent responses of fish belonging to different feeding guilds to sewage pollution. **Neotropical Ichthyology**, v. 18, n. 1, p. e190041, 2020a.

PRADO, M. R. DO et al. Convergent responses of fish belonging to different feeding guilds to sewage pollution. **Neotropical Ichthyology**, v. 18, n. 1, 2020b.

PREFEITURA MUNICIPAL DE COLATINA. **Plano Municipal de Saneamento Básico e gestão integrada de resíduos sólidos de Colatina**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <www.infraestruturaurbana.com.br>.

QUEZADA-ROMEGLIALLI, C. et al. trophicPosition, an R package for the Bayesian estimation of trophic position from consumer stable isotope ratios. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 9, n. 6, p. 1592–1599, 23 jun. 2018.

RICHARDSON, D. M. **Fifty Years of Invasion Ecology**. [s.l.: s.n.].

SACRAMENTO, P. A.; MANETTA, G. I.; BENEDITO, E. Diet-tissue discrimination factors ($\Delta^{13}\text{C}$ and $\Delta^{15}\text{N}$) and turnover rate in somatic tissues of a neotropical detritivorous fish on C3 and C4 diets. **Journal of Fish Biology**, v. 89, n. 1, p. 213–219, jul. 2016.

SÁNCHEZ, L. et al. **Os impactos do rompimento da Barragem de Fundão: o caminho para uma mitigação sustentável e resiliente**Os impactos do rompimento da Barragem de Fundão: o caminho para uma mitigação sustentável e resiliente. [s.l.: s.n.].

SILVA, P. C. **THE UNIQUE KARYOTYPE OF HENOCHILUS WHEATLANDII, A CRITICALLY ENDANGERED FISH LIVING IN A FAST-DEVELOPING REGION IN MINAS GERAIS STATE, BRAZIL**, 2012.

STOCK, B.; SEMMENS, B. MixSIAR GUI user manual. **Version 3.1**, n. March, p. 1–59, 2016.

VANDER ZANDEN, M. J.; CABANA, G.; RASMUSSEN, J. B. Comparing trophic position of freshwater fish calculated using stable nitrogen isotope ratios ($\delta^{15}\text{N}$) and literature dietary data. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, v. 54, n. 5, p. 1142–1158, 1997.

VANNOTE, R. L. et al. The River Continuum Concept. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, v. 37, n. 1, p. 130–137, jan. 1980.

VIEIRA, F.; ALVES, C. B. M. Threatened fishes of the world : *Henochilus wheatlandii* Garman , 1890 (Characidae). **Environmental Biology of Fishes**, v. 62, 2001.

WANG, Y. et al. Selection of effective macroalgal species and tracing nitrogen sources on the different part of Yantai coast, China indicated by macroalgal $\delta^{15}\text{N}$ values. **Science of The Total Environment**, v. 542, p. 306–314, jan. 2016.