

## Aplicação da análise de redes complexas em um estudo de interações ecológicas entre macrófitas e invertebrados aquáticos

## Application of complex network analysis in a study of ecological interactions between macrophytes and aquatic invertebrates

### RESUMO

A análise de redes complexas permite obter conclusões sobre diversos aspectos das comunidades ecológicas, como robustez e estabilidade e conservação de espécies, contribuindo para inferências do impacto humano sobre ecossistemas. Este estudo verificou a estrutura e variação temporal da interação entre macrófitas flutuantes e invertebrados aquáticos no Lago de Itaipu por meio da análise de redes complexas. Foram realizadas quatro coletas trimestrais entre abril e dezembro de 2017 em 10 bancos de macrófitas às margens do Refúgio Biológico de Santa Helena, Santa Helena, PR. Dois indivíduos de cada espécie de macrófita foram coletados em cada banco, ensacados e levados ao laboratório para lavagem e pesagem das raízes e verificação dos invertebrados aquáticos associados. Quatro matrizes de interação macrófitas-invertebrados foram construídas para verificação da estrutura da rede por meio de métricas de redes complexas. Foram coletados 72.394 invertebrados associados a 230 raízes de oito espécies de macrófitas. A rede de interação macrófitas-invertebrados teve baixos valores de aninhamento e de especialização demonstrando o padrão generalista da interação. Os resultados demonstraram a estrutura e complexidade das interações macrófitas-invertebrados aquáticos e a diversidade de relações estabelecidas, bem como a existência de fatores que influenciam na variação da interação entre esses dois grupos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Artrópodes aquáticos. Interações interespecíficas. Itaipu. Macrófitas flutuantes.

### ABSTRACT

Complex network analysis allows conclusions about several aspects of the ecological communities, such as robustness and stability and conservation of species, contributing to inferences of the human impact on ecosystems. This study verified the structure and temporal variation of the interactions between floating macrophytes and aquatic invertebrates in Lake Itaipu using the complex network analysis. Four data collections were carried out quarterly between April and December 2017 in 10 macrophyte banks on the margins of Refúgio Biológico de Santa Helena, Santa Helena, PR. Two individuals of each macrophyte species were collected from each bank. These were bagged and taken to the laboratory for root washing and weighing and verification of associated aquatic invertebrates. Four macrophyte-invertebrate interaction matrices were built to verify the network structure using complex network analysis metrics. In total, were collected 72,394

**Bruna Finardi**  
[finardi@alunos.utfpr.edu.br](mailto:finardi@alunos.utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Santa Helena, Paraná, Brasil.

**Kelin Carine Richter**  
[kelin\\_richter@hotmail.com](mailto:kelin_richter@hotmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Santa Helena, Paraná, Brasil.

**Denise Lange**  
[deniselange@utfpr.edu.br](mailto:deniselange@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Santa Helena, Paraná, Brasil

**Recebido:** 19 ago. 2019.

**Aprovado:** 01 out. 2019.

**Direito autoral:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



invertebrates associated with 230 roots of eight macrophyte species. The macrophyte-invertebrate interaction network had low nestedness and specialization values showed the generalist pattern of interaction. The results indicated the structure and complexity of macrophyte-aquatic invertebrate interactions and the diversity of associations established, as well as the existence of factors that influence the temporal variation of interaction between these two groups.

**KEYWORDS:** Aquatic arthropods. Interspecific interactions. Floating macrophytes. Itaipu.

## INTRODUÇÃO

Interações ecológicas são associações entre organismos que interferem na sobrevivência de pelo menos um dos envolvidos (BEGON; TOWNSEND; HARPER, 2007). A utilização da análise de rede em estudos de interações ecológicas permite tirar conclusões sobre diversos aspectos como robustez da comunidade, manutenção da biodiversidade e conservação de espécies (BASCOMPTE; JORDANO; OLESEN, 2006).

As macrófitas realizam diversas interações com outros grupos de organismos, como insetos, moluscos bivalves e gastrópodes, crustáceos, oligoquetos, bactérias, protozoários, algas e peixes se associam a essas plantas (AGOSTINHO; PELICICE; GOMES, 2008; THOMAZ et al., 2008; THOMAZ; CUNHA, 2010). Elas podem servir como substrato para colonização, refúgio e berçário para alguns desses organismos citados anteriormente, pois sua porção inferior forma áreas mais oxigenadas devido aos aerênquimas presentes nas raízes (LARCHER, 2000). Além disso, são fonte direta de alimentos para herbívoros e indireta para filtradores, pois suas raízes retêm sedimentos em suspensão na represa, aumentando a disponibilidade de matéria orgânica e complexidade do substrato disponível (CALLISTO et al., 2005). Assim, elas podem maximizar a quantidade e riqueza de interações ecológicas, contribuindo para o aumento da diversidade biológica (AGOSTINHO; PELICICE; GOMES, 2008; THOMAZ et al., 2008; THOMAZ; CUNHA, 2010).

Alguns estudos envolvendo macrófitas flutuantes do reservatório de Itaipu objetivaram o levantamento de espécies, outros, a sua relação com a qualidade da água, decomposição da biomassa e associações com outras espécies (NOGUEIRA; HENRY; JORCIN, 2006). Entretanto, pouco se sabe a respeito da sua importância para as comunidades interagentes. Assim, o objetivo deste trabalho de pesquisa consistiu em verificar a estrutura e variação temporal da interação entre macrófitas flutuantes e invertebrados aquáticos no reservatório de Itaipu por meio da análise de redes complexas.

## MATERIAIS E MÉTODOS

No Lago de Itaipu, às margens do Refúgio Biológico do município de Santa Helena, no extremo oeste do estado do Paraná (24°51'37" S; 54°19'58" O) foram realizadas quatro coletas trimestrais em 10 bancos de macrófitas entre abril e dezembro de 2017. A distância entre os bancos foi de no mínimo 300 m para manter a independência das amostras. Em cada banco, foi realizada a identificação botânica *in loco* das plantas encontradas e coletados dois indivíduos de cada espécie de macrófita flutuante, os quais foram retirados da água manualmente e armazenados em sacos plásticos para evitar a perda de invertebrados. Em laboratório, as raízes foram lavadas individualmente em água corrente e os

invertebrados filtrados numa malha de 0,01 mm, em seguida, foram acondicionados em álcool 70% para posterior quantificação e identificação. Após a lavagem e identificação das plantas, as raízes foram secadas em estufa a 60<sup>o</sup> C por cerca de 60 h, sendo novamente pesadas para obtenção da biomassa seca.

Para verificar a estrutura e variação temporal da interação macrófitas-invertebrados aquáticos por meio da análise de redes, foram formadas quatro matrizes de incidência, abrangendo as interações entre as espécies de macrófitas e os táxons de invertebrados aquáticos encontrados, sendo uma matriz para cada coleta. Posteriormente, foram calculadas as seguintes métricas: conectância (%); grau médio de cada grupo (macrófitas e invertebrados), índice de aninhamento (NODF) e de especialização ( $H_2'$ ). As métricas conectância e índice de aninhamento (NODF) variam de 0 (padrão especialista) a 100 (generalista). O índice  $H_2'$  varia de 0 (padrão generalista) a 1 (especialista). Para verificar a variação temporal no peso seco das raízes das espécies de macrófitas coletadas, a abundância de indivíduos e riqueza de táxons de invertebrados encontrados nas raízes entre as quatro coletas foi utilizado o teste não paramétrico Kruskal-Wallis (teste H) com teste a posteriori de Dun levando em consideração que as amostras eram independentes. O teste H também foi utilizado para verificar se existe diferença no peso das raízes entre as espécies de macrófitas. As análises envolvendo o peso seco das raízes foram realizadas utilizando apenas os dados das três primeiras coletas. As análises foram feitas usando os programas GraphPad Prism 5.0, R versão 3.5 e Aninhado 3.0. A normalidade dos dados foi verificada utilizando o teste Kolmogorov-Smirnov considerando o nível de 5 % de significância.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

No total, foram evidenciadas oito espécies de macrófitas flutuantes, sendo seis espécies (*Eichhornia azurea*, *Eichhornia crassipes*, *Salvinia auriculata*, *Limnobium laevigatum*, *Ludwigia helminthorrhiza*, *Pistia stratiotes*) na Coleta 1, quatro espécies (*E. azurea*, *E. crassipes*, *S. auriculata* e *L. helminthorrhiza*) na Coleta 2, sete espécies (*E. azurea*, *E. crassipes*, *S. auriculata*, *L. laevigatum*, *P. stratiotes*, *L. helminthorrhiza*, *Salvinia biloba*) na Coleta 3, sete espécies (*E. azurea*, *E. crassipes*, *S. auriculata*, *L. laevigatum*, *P. stratiotes*, *L. helminthorrhiza*, *Paspalum repens*). Associados às raízes das macrófitas foram encontrados 72.394 invertebrados distribuídos em 80 táxons, sendo 47 táxons na Coleta 1, 51 na Coleta 2, 52 na Coleta 3 e 61 na Coleta 4, distribuídos em cinco filos (Arthropoda, Anellida, Mollusca, Nematoda e Platyhelminthes).

A conectância variou entre as coletas, com maior valor na Coleta 2, seguida pela Coleta 4, 3 e 1 (Tabela 1). Os táxons de invertebrados interagiram em média com mais espécies de macrófitas na Coleta 4, seguida pela Coleta 3, 1 e 2. A quantidade de táxons associados às macrófitas variou de 7.413 (na Coleta 1) a 24.423 (na Coleta 3). Foi evidenciado baixo grau de especialização ( $H_2'$ ) na interação para as quatro coletas demonstrando que as interações estabelecidas entre esses grupos tenderam à generalização. A interação mais abundante das quatro coletas foi estabelecida entre Mytilidae (Mollusca) e *E. crassipes* (33.433 indivíduos em 45 raízes). A rede de interação macrófitas-invertebrado teve padrão aninhado nas quatro coletas (Tabela 1).

Os resultados demonstraram que existe diferença no peso seco raízes entre as espécies ( $H = 102,7$ ;  $p < 0,01$ ). O peso das raízes avaliadas foi semelhante entre as coletas ( $H = 3,016$ ;  $p = 0,221$ ). A abundância de indivíduos e riqueza de táxons de

invertebrados foi diferente entre as coletas ( $H = 20,89$ ;  $p = 0,01$ ;  $H = 21,39$ ;  $p < 0,01$ , respectivamente).

Tabela 1 – Resultado das métricas calculadas a partir das matrizes de interação macrófitas-invertebrados aquáticos para cada coleta realizada no período de novembro de 2016 a setembro de 2017 em Santa Helena, PR.

Métricas da rede	Coleta 1	Coleta 2	Coleta 3	Coleta 4
Conectância (%)	45,13	57,35	45,05	53,16
Grau médio das espécies de macrófitas	21,66	29,26	23,42	14,85
Grau médio dos táxons de invertebrados	2,70	2,29	3,09	3,70
Índice de especialização ( $H_2'$ )	0,10	0,27	0,26	0,17
Índice de aninhamento (NODF)	37,11	58,75	52,82	45,99

Fonte: Finardi et al. (2019)

Neste estudo, 35% da abundância de indivíduos e 74% da riqueza de táxons dos invertebrados encontrados pertencem ao filo Arthropoda, demonstrando a importância desse grupo nas interações entre macrófitas e invertebrados. Dentre os Arthropoda, Ostracoda (Crustacea: Maxillopoda) foi o táxon mais abundante nas duas primeiras coletas e o segundo mais abundante nas outras duas coletas. As interações envolvendo invertebrados, principalmente táxons de artrópodes, tendem a ser complexas devido a sua grande abundância de indivíduos e riqueza de espécies. Arthropoda é o filo com maior riqueza de espécies e abundância de organismos existente, sendo eles onipresentes em todos os ambientes, estabelecendo diversos tipos de interações ecológicas (HICKMAN et al., 2016)

Embora Arthropoda tenha sido o filo mais representativo em abundância e riqueza de invertebrados neste estudo, indivíduos da família Mytilidae do filo Mollusca foram os mais abundantes em duas das quatro coletas realizadas. Acredita-se que a maioria desses organismos sejam da espécie *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857), o mexilhão dourado, que provavelmente tenha sido introduzido através de água de lastro de navios oriundos da Coreia e de Hong Kong (DARRIGRAN; PASTORINO, 1995), uma espécie invasora reconhecida como uma grande ameaça para a biodiversidade de represas (CLAVERO; GARCIA-BERTHOU, 2005).

Os táxons de invertebrados encontrados em maior abundância, Ostracoda e Mytilidae, são organismos filtradores e se associam às raízes devido ao maior acúmulo de matéria orgânica nesses locais. A interação desses com as macrófitas pode ser considerada mutualística, pois acabam diminuindo a turbidez da água, fazendo com que os raios solares penetrem mais no ambiente aquático aumentando a produção pela fotossíntese nas raízes e eventuais caules submersos. Segundo Bascompte, Jordano e Olesen (2006), redes de interações que possuem a predominância de interações mutualísticas facultativas, possuem padrão generalista. Essas redes possuem índices de especialização e de aninhamento baixos. Essas características foram evidenciadas nas quatro coletas realizadas neste estudo. Esse padrão generalista e aninhado observado nas redes é um indicativo de que as interações são robustas à perda de espécies, tornando as comunidades mais estáveis. Isso porque espécies com muitas conexões dão suporte às espécies com menos interações, pois estas estão conectadas àquelas

com muitas interações. Esse padrão é conhecido por aninhado (*sensu* BASCOMPTE; JORDANO; OLESEN, 2006).

Os valores altos do grau médio das plantas demonstram o quanto as interações são generalistas, capazes de atrair uma grande diversidade de insetos (SHEPHERD; DEBINSKI, 2005). A baixa conectância e o baixo grau médio dos grupos encontrados neste estudo, principalmente dos invertebrados, devem-se à grande quantidade de táxons de invertebrados encontrados nas raízes das macrófitas. Segundo Jordano, Bascompte e Olesen (2003), a conectância diminui com o aumento de espécies na rede, diminuindo as chances das interações serem estabelecidas. Com isso, redes muito grandes tendem a ter conectância baixa. Embora a conectância tenha variado entre as coletas neste estudo, sempre foi evidenciado valores medianos a baixos corroborando outros estudos que também avaliaram redes grandes.

Além dos organismos filtradores, os quais foram os mais abundantes na rede macrófitas-invertebrados aquáticos, também foi evidenciado organismos com outros hábitos alimentares neste estudo, como os predadores.

A variação temporal da interação macrófitas-invertebrados aquáticos foi demonstrada neste estudo por meio da alteração interna na estrutura da rede, com variação nos valores das métricas e também na variação da abundância de macrófitas nos bancos avaliados e na variação na abundância e riqueza de invertebrados. Variações temporais são inerentes das interações ecológicas pois estão diretamente relacionadas à história natural dos organismos. Algumas espécies de invertebrados aquáticos possuem ciclo de vida com alternância de ambiente aquático para o terrestre. Essas alternâncias podem fazer com que o tamanho das populações varie entre ambientes ao longo no tempo, refletindo nas interações com as raízes das macrófitas.

## CONCLUSÃO

Os resultados demonstraram a complexidade e estrutura da rede de interações macrófitas-invertebrados e a diversidade de relações estabelecidas, bem como a existência de fatores moldadores ainda desconhecidos que influenciam na variação da interação entre esses dois grupos. Também demonstram a importância da presença de macrófitas para a existência de uma riqueza e diversidade de invertebrados aquáticos, os quais dependem deste substrato para seu habitat e nicho ecológico.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à J.F. Medeiros, P.F. Vogel, E.A. Bonini e Silva, E. Poier, A.V. Silva, C.R. Remor e D. Machado pela ajuda nas coletas de campo, à J.F. Medeiros, P.F. Vogel e P.F. Camargo pelo auxílio na contagem e identificação dos invertebrados, à E.A. Bonini e Silva e L. Biral pela identificação das plantas, à UTFPR pelo auxílio financeiro e infraestrutura, à Itaipu Binacional por disponibilizar o barco para as coletas e ao CNPq pela bolsa de estudos das duas primeiras autoras.

## REFERÊNCIAS

AGOSTINHO, A. A.; PELICICE, F. M.; GOMES, L. C. Dams and the fish fauna of the Neotropical region: impacts and management related to diversity and fisheries. **Brazilian Journal of Biology**, v. 68, n. 4, p.1119-1132, 2008.

BASCOMPTE, J.; JORDANO, P.; OLESEN, J. M. Asymmetric coevolutionary networks facilitate biodiversity maintenance. **Science**, v. 312, p. 431-433, 2006.

BEGON, M.; TOWNSEND, C. R.; HARPER, J. L. **Ecologia: de indivíduos a ecossistemas**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2007.

CALLISTO, M.; GOULART, M.; BARBOSA, F. A. R.; ROCHA, O. Biodiversity assessment of benthic macroinvertebrates along a reservoir cascade in the lower São Francisco river (northeastern Brazil). **Brazilian Journal of Biology**, v. 65, n. 2, p. 229-240, 2005.

CLAVERO, M.; GARCÍA-BERTHOU, E. Invasive species are a leading cause of animal extinctions. **Trends in ecology & evolution**, v. 20, n. 3, p. 110, 2005.

DARRIGRAN, G.; PASTORINO, G. The recent introduction of a freshwater Asiatic bivalve, *Limnoperna fortune* (Mytilidae) into South America. **Veliger**, v. 38, n. 2, p. 171-175, 1995.

HICKMAN, C. et al. **Princípios Integrados de Zoologia**. 16. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, p. 943, 2016.

JORDANO, P.; BASCOMPTE, J.; OLESEN, J. M. Invariant properties in coevolutionary networks of plant–animal interactions. **Ecology Letters**, v. 6, n. 1, p. 69-81, 2003.

LARCHER, W. *Ecofisiologia Vegetal*. São Carlos, Rima Artes e Textos. p. 531, 2000.

NOGUEIRA, M. G.; HENRY, R.; JORCIN, A. **Ecologia de reservatórios: impactos potenciais, ações de manejo e sistemas em cascata**. Rima, 2006.

SHEPHERD, S.; DEBINSKI, D. M. Evaluation of isolated and integrated prairie reconstructions as habitat for prairie butterflies. **Biological Conservation**, v. 126, n. 1, p. 51-61, 2005.

THOMAZ, S. M.; CUNHA, E. R. The role of macrophytes in habitat structuring in aquatic ecosystems: methods of measurement, causes and consequences on animal assemblages' composition and biodiversity. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 22, n. 2, p. 218-236, 2010.

THOMAZ, S. M. et al. Influence of aquatic macrophyte habitat complexity on invertebrate abundance and richness in tropical lagoons. **Freshwater biology T**, v. 53, n. 2, p. 358-367, 2008.