

Abelhas buscam néctar em flores e levam pólen de uma para outra, promovendo sua fecundação. Assim, as plantas produzem frutos que alimentam morcegos, aves e outros animais: estes dispersam suas sementes, aumentando as chances de gerarem novas plantas. Formigas defendem vegetais contra ataques e estes fornecem a elas abrigos para viver. São muitos os exemplos de interações mutuamente benéficas entre animais e plantas, e desvendar a estrutura dessas redes de parcerias é fundamental para compreender importantes processos ecológicos – como a polinização e a dispersão de sementes. A teoria de redes (que surgiu entre matemáticos e físicos, mas ‘invadiu’ outras áreas da ciência) tem ajudado nessa tarefa, permitindo investigar e identificar as semelhanças entre sistemas muito diferentes, dos mutualismos às redes sociais.

**Marco Aurelio Ribeiro Mello**

Instituto de Ecologia Experimental,  
Universidade Ulm (Alemanha)  
marmello@gmail.com  
<http://web.me.com/marmello/marcomello>



# REDES



“C

omo o mundo é pequeno!” Certamente você já ouviu essa frase em alguma ocasião. Ela pode ser dita, por exemplo, quando se descobre que o comediante brasileiro Sérgio Mallandro está apenas a três ‘passos’ do ator norte-americano Kevin Bacon: Mallandro contracenou no filme *Menino do Rio* (de 1982) com a atriz brasileira Cláudia Ohana, que atuou em *Desejo de amar* (de 1988) com a norte-americana Diane Lane, que, por sua vez, atuou com Bacon em *Meu cachorro Skip* (de 2000) (encontre outras conexões cinematográficas na página [oracleofbacon.org](http://oracleofbacon.org)). Se essa ideia de mundo pequeno lhe soa familiar, então você conhece pelo menos um pouco sobre a teoria de redes.

A origem da teoria de redes remonta à teoria de grafos, criada em 1735 pelo matemático suíço Leonhard Euler (1707-1783). Um grafo nada mais é que uma figura composta por um conjunto de pontos (vértices ou nós) ligados por linhas (arestas ou

## PEQUENOS MUNDOS DE INTERAÇÕES ENTRE ANIMAIS E PLANTAS



# MUTUALISTAS

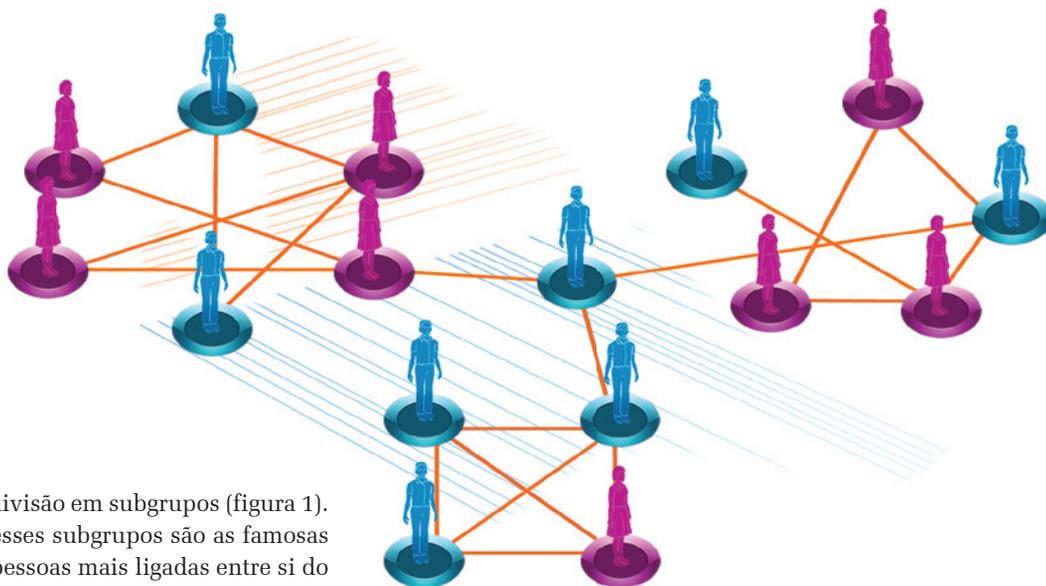
conexões). O primeiro grafo da história representava a cidade de Königsberg, na Prússia (hoje Kaliningrado, na Rússia). Euler queria resolver o problema conhecido como ‘as sete pontes de Königsberg’: seria possível dar uma caminhada pela cidade passando por todas as pontes, mas apenas uma vez por cada uma? Ninguém chegava a uma resposta (ver ‘As pontes de Königsberg’, em *CH* nº 233), e Euler decidiu simplificar a representação do sistema, mantendo apenas as informações essenciais.

O problema das pontes de Königsberg pode parecer apenas uma brincadeira, mas a partir dele surgiram ideias fascinantes, com muitas aplicações (ver ‘Redes complexas: modelagem simples da natureza’, em *CH* nº 213). Essa caminhada por um grafo, por exemplo, ajuda a planejar o transporte público em grandes cidades. A principal ‘moral da história’ das pontes é que uma pergunta difícil pode ser respondida fazendo-se uma representação simples de um sistema complexo.

Então, qual é a diferença entre um grafo e uma rede? As redes – que se tornaram populares a partir da década de 1950 – são grafos aos quais se adicionam informações sobre a natureza dos pontos e das conexões. Um grafo é puramente abstrato; uma rede é real. Voltando de Euler a Mallandro, o que significa, cientificamente, dizer que o mundo é pequeno? Imaginando que as ligações sociais formam uma enorme rede, onde as pessoas são os pontos e as relações sociais (amizade, parentesco, trabalho etc.) são as conexões, dá para ‘caminhar’ de uma pessoa a outra qualquer do mundo passando, em média, por apenas seis conexões. São os famosos ‘seis graus de separação’, tema de uma peça de teatro, de um conto e de muita conversa de botequim.

E o tema também de pesquisas científicas. Com base no estudo pioneiro do psicólogo norte-americano Stanley Milgram (1933-1984) e na teoria formalizada depois pelo matemático australiano Duncan Watts, diz-se, em termos científicos, que um mundo pequeno é uma rede que mistura ▶

Figura 1. Grafo representando uma estrutura de ‘mundo pequeno’ em uma rede social. Note como uma pessoa popular no centro da rede conecta diferentes subgrupos, diminuindo a distância média entre todas as pessoas



grande conectividade com divisão em subgrupos (figura 1). No caso das redes sociais, esses subgrupos são as famosas ‘panelinhas’: conjuntos de pessoas mais ligadas entre si do que a outras pessoas.

## BENEFÍCIOS MÚTUOS, SERVIÇOS PARA O ECOSISTEMA

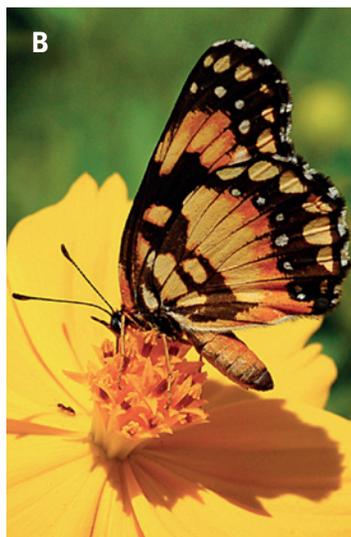
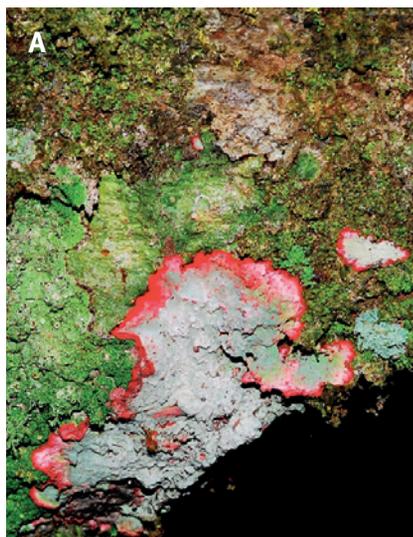
Entre os vários tipos de redes do tipo ‘mundo pequeno’, um muito interessante é visto nas redes de interações ecológicas. Em muitos casos, dois organismos de espécies diferentes se prejudicam (na predação, por exemplo). Porém, há outros tipos de interação em que ambos saem ganhando, porque aumentam suas chances de sobrevivência e reprodução: são os chamados mutualismos. Há vários tipos de mutualismo, que podem ser classificados como obrigatórios ou facultativos.

Nos obrigatórios, também chamados de simbiose, os organismos ficam em contato por um tempo muito longo, às vezes por toda a vida, e um não vive sem o outro. É o caso dos

líquens (organismos que associam um fungo e uma alga ou cianobactéria) (figura 2A), das micorrizas (associação entre fungos e raízes) e das mitocôndrias (organelas situadas no interior das células, inclusive nas humanas, e consideradas remanescentes de antigos seres unicelulares), por exemplo.

Uma interação mutualista, porém, não precisa ser tão íntima sempre. Nos mutualismos facultativos, organismos de espécies diferentes ficam bem menos tempo em contato um com o outro e sobrevivem mesmo se não estiverem juntos. Quando um inseto visita uma flor para coletar néctar ou pólen, por exemplo, ele acaba promovendo sua polinização (figura 2B). Outro mutualismo facultativo importante é a dispersão de sementes. Nessa interação, por exemplo, um morcego pega um fruto de determinada planta para comer (ver ‘Morcegos e frutos: interação que gera florestas’, CH nº 241) e depois deixa as sementes caírem em locais distantes da planta-mãe, ajudando assim em sua reprodução (figura 2C).

Figura 2. Líquen (A), mutualismo simbiótico em que fungos e seus parceiros que realizam fotossíntese (algas ou cianobactérias) vivem de forma tão interdependente que formam um organismo complexo. Borboleta da espécie *Chlosyne lacinina* (B) visitando uma flor para beber néctar. Quando essas visitas resultam em transporte de pólen de uma flor a outra, ocorre a polinização. Morcego (C) da espécie *Platyrrhinus lineatus* comendo fruto de caqui-do-cerrado (*Diospyros hispida*). Caso o morcego leve as sementes para longe da planta-mãe, sem danificá-las, pode ser chamado de dispersor de sementes



Como a grande maioria das plantas dos trópicos precisa da ajuda de animais para a polinização e a dispersão de sementes, esses mutualismos são essenciais. Podemos dizer que as interações mutualistas geram serviços ambientais. Ou seja, é como se as abelhas e os morcegos de uma área ‘trabalhassem’ para garantir a reprodução das plantas. Cada um cuidando de uma parte do serviço, dentro de uma ‘panelinha’ (módulo). No caso da polinização, o serviço é prestado até diretamente aos humanos, pois as flores de suas plantações são polinizadas gratuitamente. As plantas, por sua vez, também são ‘prestadoras de serviços’, já que produzem alimento para os animais.

## DE ANTAGONISMOS A MUTUALISMOS

A teoria de redes permitiu descobrir várias coisas interessantes sobre os sistemas mutualistas. A abordagem de redes é usada em ecologia pelo menos desde a década de 1940, quando começaram os trabalhos clássicos sobre antagonismos, cadeias alimentares e fluxos de matéria e energia nos ecossistemas. Entretanto, em especial graças aos trabalhos dos biólogos espanhóis Pedro Jordano e Jordi Bascompte (ambos atualmente na Estação Biológica de Doñana), elas entraram em cena no campo dos mutualismos.

Jordano, Bascompte e colaboradores descobriram que, nas redes mutualistas, assim como em outros tipos de rede complexa, a maioria das espécies tem poucas interações, mas algumas poucas espécies revelam altíssimo número de interações, independentemente do tamanho da rede. Portanto, o padrão nos mutualismos é um pouco diferente do padrão

em outras redes (figura 3). Biologicamente, isso significa que, nas redes mutualistas, há relativamente menos espécies supergeneralistas, como animais que podem comer quase todos os tipos de frutos de uma floresta, por exemplo. Torna-se interessante, então, estudar que fenômenos ecológicos e evolutivos restringem o número de interações de cada espécie.

Além disso, em redes de polinização e dispersão de sementes, as espécies com menos conexões interagem com um subconjunto dos parceiros das espécies que têm mais conexões. Assim, um subconjunto está ligado a um subconjunto maior e este a outros ainda mais amplos, como as *matrioshkas*, bonecas russas que se encaixam umas dentro de outras. Esse fenômeno é denominado aninhamento (figura 4). Mas, por que existe essa estrutura aninhada, se, teoricamente, a natureza



FOTOS MARCO A. R. MELLO

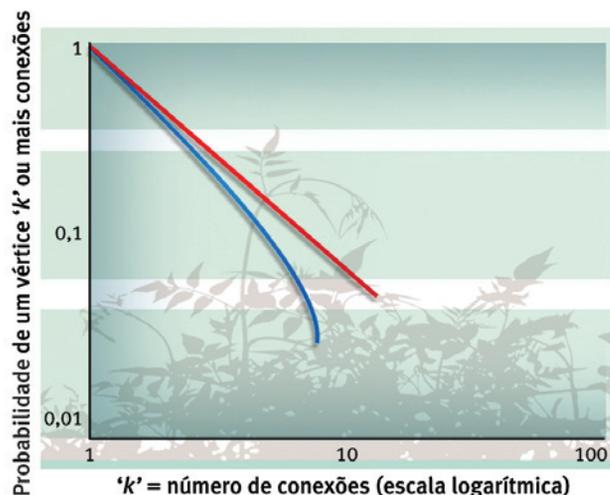


Figura 3. Distribuição de grau (número de conexões) de cada ponto em diferentes tipos de rede complexa. O eixo horizontal representa o número de conexões de cada ponto em uma rede. O eixo vertical representa a probabilidade de um ponto na rede ter um número  $k$  de conexões ou mais. A curva azul representa a distribuição de grau em vários tipos de rede complexa, como metabolismo, transporte aéreo, internet e colaboração entre atores de Hollywood. A curva vermelha representa a distribuição de grau em redes de mutualismo facultativo. É interessante notar que esse tipo de curva é uma espécie de ‘assinatura’ da rede, mostrando sua estrutura básica de forma resumida, e que sistemas aparentemente muito diferentes entre si exibem assinaturas muito similares

poderia ser diferente? Acredita-se que o aninhamento aumenta a resistência do sistema a extinções, já que as espécies com poucas interações, geralmente mais sensíveis, estariam ‘ancoradas’ nas generalistas, que costumam suportar melhor as adversidades.

Outra descoberta interessante foi feita pelo biólogo brasileiro Paulo Guimarães Júnior, da Universidade de São Paulo, e colaboradores. Eles observaram que o grau de intimidade nas interações mutualistas determina a estrutura das redes formadas entre formigas e plantas: interações de muita intimidade, como a mirmecofilia (mutualismo de defesa altamente especializado), geram redes fortemente divididas, formando subgrupos mais isolados, enquanto interações de pouca intimidade, como a dispersão de sementes, geram redes mais coesas, com subconjuntos mais ligados uns aos outros – aquele padrão das bonecas russas.

Então, mutualismos facultativos também são mundos pequenos? Sim, e ainda menores que as redes sociais. Enquanto duas pessoas estão separadas uma da outra, em média, por seis conexões, entre polinizadores a distância média é de apenas duas conexões. Entre as consequências disso está, por exemplo, o fato de que influências evolutivas de animais sobre plantas e vice-versa não ocorrem apenas em ‘panelinhas’: elas se espalham por toda a rede.

Portanto, casos extremos de coevolução em que um animal e uma planta associam-se fortemente um ao outro (no padrão chamado de chave-fechadura), como a mariposa e a orquídea de Darwin, são a exceção, não a regra. No exemplo citado, a orquídea africana *Angraecum sesquipedale* ofe-

Figura 4. Aninhamento em redes de mutualismo facultativo, como a polinização e a dispersão de sementes. No grafo abaixo, espécies de animais estão em cima e espécies de plantas, em baixo. As linhas representam interações de dispersão de sementes

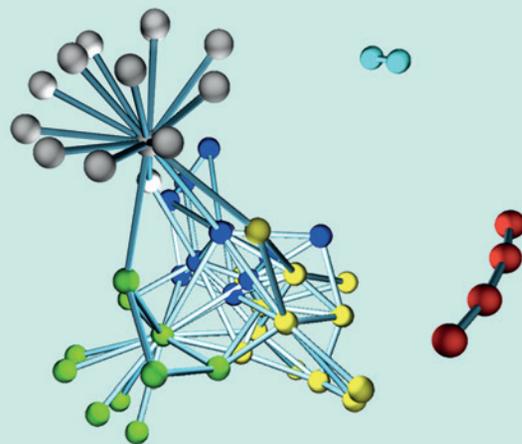
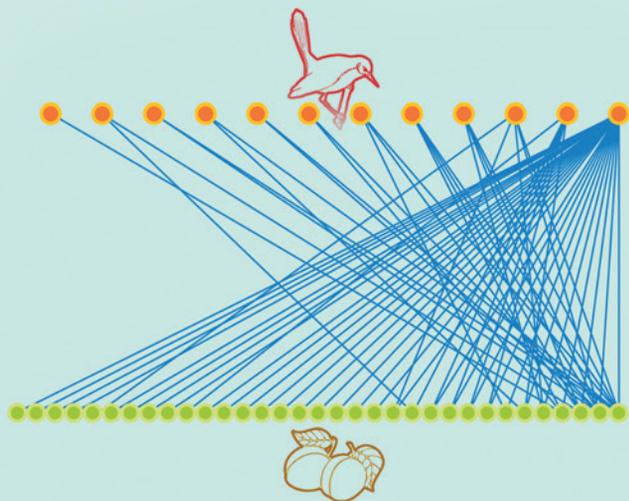


Figura 5. Grafo em três dimensões construído com ferramentas de realidade virtual, em que são representadas as interações entre abelhas coletoras de óleo e plantas malpighiáceas na mata atlântica, juntando-se dados de diferentes localidades. As cores representam módulos (subgrupos) encontrados nas análises estruturais (alguns são módulos isolados, com espécies de animais e plantas que só interagem entre si). Em três dimensões fica mais fácil ver como algumas espécies se localizam mais ao centro da rede e por isso são mais importantes para a manutenção da estrutura como um todo

rece néctar no fundo de um longo tubo, e apenas a mariposa *Xanthopan morgani*, que a poliniza, tem um apêndice bucal suficientemente comprido para sugar esse néctar. Animais e plantas, apesar de pertencerem a reinos diferentes, estão muito próximos uns dos outros nas intrincadas redes mutualistas às quais pertencem.

## ANIMAIS, PLANTAS E PESSOAS EM REDE

O campo das redes complexas está bem desenvolvido no Brasil, graças ao trabalho de vários físicos e matemáticos – em outubro, inclusive, foi realizado, no Rio de Janeiro, o 2º Workshop Internacional de Redes Complexas. As redes mutualistas, mais especificamente, demoraram um pouco mais para receber atenção no país. Desde a década de 1990, porém, Pedro Jordano tem vindo regularmente ao Brasil para dar aulas. Ele nos infectou com o vírus das redes mutualistas. Trocando em miúdos, Jordano ajudou a formar alguns pesquisadores brasileiros bem ativos na área, como Paulo Guimarães Júnior, autor do trabalho sobre formigas comentado anteriormente.

Também não escapei desse vírus após assistir às palestras dos professores Jordano e Guimarães. Desde 2007, mergulhei na teoria de redes e passei a estudar interações entre

morcegos, aves, abelhas e plantas também sob essa perspectiva, associando modelagem matemática a experimentos em campo. Eu, meus alunos e meus colaboradores temos estudado principalmente a modularidade das redes mutualistas e sua variação geográfica. Podemos entender modularidade como aquela estrutura de ‘panelinhas’, que faz com que uma rede se torne um mundo pequeno. É um conceito de redes diretamente relacionado aos conceitos ecológicos de guilda e grupo funcional, os quais, em uma explicação simplificada, são subconjuntos de espécies que desempenham papel similar em um ecossistema. Compreender a modularidade de uma rede mutualista é fundamental, porque cada subgrupo parece funcionar de forma diferente e, em alguns casos, um não substitui outro que seja perdido por conta de extinções naturais ou causadas pelos humanos.

Nossos estudos sobre abelhas coletoras de óleos florais produzidos por plantas da família Malpighiaceae, em áreas de caatinga, no Nordeste, revelaram evidências de que um módulo tem uma estrutura e uma dinâmica diferentes do sistema como um todo, embora todos os mutualismos facultativos sejam semelhantes. Entre outras diferenças, a distância entre espécies (número médio de conexões que leva de uma espécie a qualquer outra) nesses módulos de interações de coleta de óleo é metade da distância observada em redes de polinização completas (aquelas que incluem não só abelhas, mas todos os tipos de animais que polinizam flores, como algumas aves e morcegos), e por isso esses módulos resistem melhor a extinções.

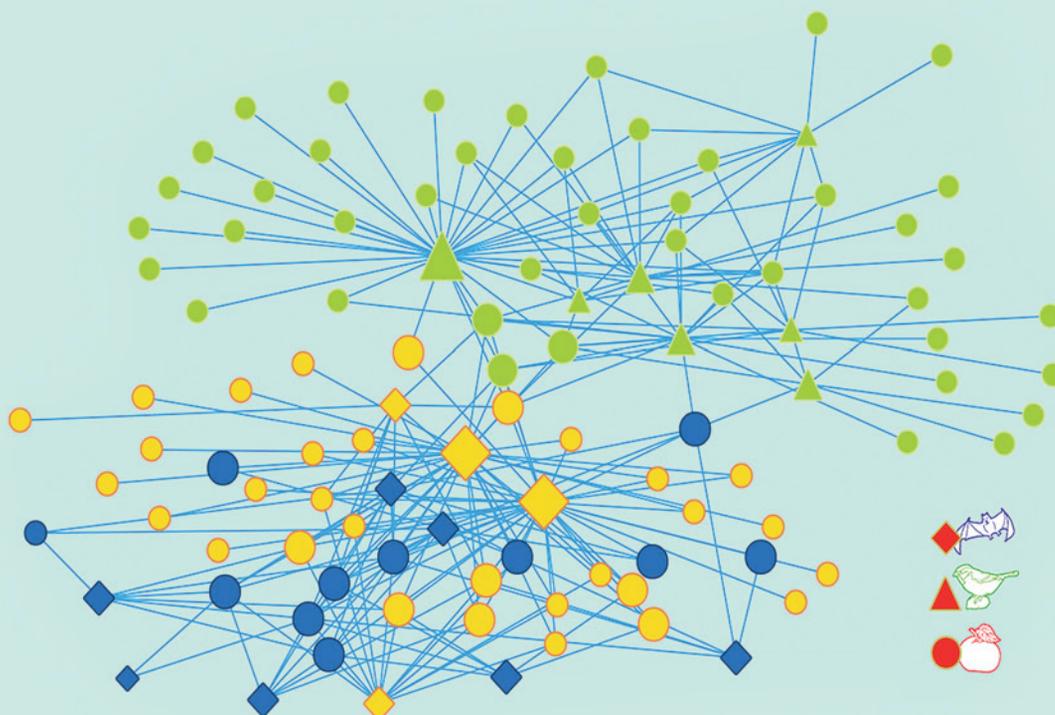


Figura 6. Rede de dispersão de sementes na floresta amazônica em território peruano, incluindo aves (triângulos), morcegos (losangos) e frutos (círculos). As linhas representam interações de dispersão de sementes e as cores indicam os subgrupos de vértices (módulos) detectados. O tamanho de cada vértice é proporcional à sua importância para a estrutura da rede como um todo. A rede foi construída a partir de dados publicados por Gorchov e colaboradores na revista *Oikos* (v. 74, nº 2) em 1995

Ainda trabalhando com essas interações de coleta de óleo, mas agora de modo comparativo com outras regiões, descobrimos que a composição dos módulos da rede e a importância relativa de cada espécie variam entre os biomas brasileiros (veja a rede da mata atlântica na figura 5). Isso corrobora a teoria proposta em 2005 pelo biólogo americano John Thompson, de que cada espécie de animal ou planta é, na verdade, um mosaico de populações, cada uma vivendo em um local e tendo parceiros mutualistas diferentes.

Foi também muito interessante descobrir que esse padrão de subgrupos não é exclusividade das redes de polinização. Ao estudarmos os serviços de dispersão de sementes realizados por aves e morcegos em um fragmento de mata atlântica, no Nordeste, notamos que a atuação desses dois grupos de animais era altamente complementar. Em outras palavras, embora haja alguma sobreposição na dieta, aves dispersam mais determinadas plantas, enquanto morcegos dispersam mais outras. Parece que as perturbações sofridas por esse fragmento, que levaram outros dispersores e também algumas plantas à extinção no local, podem ter aumentado a separação entre módulos de aves e morcegos. Foi o mesmo padrão observado em outra rede de dispersão de sementes com aves e morcegos, esta na Amazônia peruana (figura 6).

Este artigo apresentou algumas das principais descobertas recentes sobre redes mutualistas, incluindo alguns exemplos de estudos sobre o tema realizados no Brasil. O campo é relativamente novo e, portanto, ainda há muito a ser fei-

to. As perspectivas são ótimas, considerando-se que cada vez mais cientistas se interessam por redes mutualistas e dão sua contribuição, combinando teorias ecológicas com teorias como a de redes e outras. A ecologia de redes está emergindo como um campo complementar à ecologia de comunidades, já que ambas estudam conjuntos de espécies em uma dada localidade, mas a primeira foca suas investigações nas interações e a segunda, nos organismos. No futuro, algumas dessas descobertas ajudarão a entender como funciona uma importante parte da natureza e poderão ser úteis na elaboração de programas de conservação biológica, de modo que os serviços ambientais associados às redes, como a polinização e a regeneração florestal, possam ser mantidos em bom funcionamento. ■

#### Sugestões para leitura

- BARABASI, A.-L. *Linked: how everything is connected to everything else and what it means for business, science, and everyday life*. Nova York, Plume, 2003.
- BOUCHER, D. H. *The biology of mutualism: ecology and evolution*. Nova York, Oxford University Press, 1988.
- CHRISTAKIS, N. A. & FOWLER, J. H. *Connected: the surprising power of our social networks and how they shape our lives*. Nova York, Little, Brown & Company, 2009.
- DUNNE, J. & PASCUAL, M. *Ecological networks: linking structure to dynamics in food webs*. Nova York, Oxford University Press, 2006.

#### Na internet

Universidade de São Paulo (recursos sobre redes complexas): <http://cyvission.ifsc.usp.br/networks/>