



Mudanças climáticas, biodiversidade e sociedade: como a teoria de redes pode ajudar a compreender o presente e planejar o futuro?

Marcos Silveira Buckeridge

Universidade de São Paulo - Instituto de Biociências – Departamento de Botânica
Rua do Matão, 277 - Caixa Postal 11461 - CEP 05422-970 - Cidade Universitária - Butantã - SP - Brasil
Telefone 55 11 30917592 - msbuck@usp.br

Resumo

Neste artigo são discutidos alguns dos principais efeitos das mudanças climáticas globais sobre a biodiversidade. Primeiramente, as entidades vivas são caracterizadas como desenhos *genomorfofisiológicos* (*dgmf*) que respondem às variações climáticas de uma forma dinâmica, integrando seus diferentes níveis de organização (genético, metabólico e morfo-fisiológico) de forma a gerar padrões emergentes específicos. Em seguida são discutidas as formas de reação da biodiversidade às mudanças climáticas globais utilizando o conceito de *dgmf*. A teoria de redes é introduzida através de um exemplo do dia-a-dia, usando o episódio da queda do vôo 1907 da GOL e o caos aéreo que se sucedeu. À luz dos conceitos fundamentais sobre redes dos tipos ao acaso e hierárquicas, os mesmos são aplicados para levantar a hipótese de que a biodiversidade provavelmente responde ao “ataque” às redes hierárquicas nos mesmos moldes que as redes aéreas ou a Internet. Tendo em mente o conceito de redes da biodiversidade, são feitas propostas para que se previnam os ataques às redes estudando nós de rede com baixa redundância (que são os nós mais vulneráveis) e/ou nós da rede que, apesar de não tão importantes, podem estar conectados a nós centrais das redes de biodiversidade, podendo provocar ataques do tipo *cracker* a estas redes, como ocorreu no caso do caos aéreo no Brasil. Finalmente, a visão de redes hierárquicas é expandida numa discussão sobre a conexão com a sociedade com base na proposição de Willian Ruddiman da existência de um período Antropoceno que compreende alterações provocadas pelo homem há 8.000 anos. É levantada a hipótese de que os ataques às redes de biodiversidade têm sido mais do tipo *hacker* do que *cracker*, mas se houver um ataque *cracker* relacionado a fatores das mudanças climáticas, tais como variações acima de certo limiar nas concentrações atmosféricas de CO₂, na temperatura e na disponibilidade da água para os organismos fotossintéticos, o sistema de redes da biosfera pode alterar seu equilíbrio de forma muito drástica, gerando uma singularidade e passando para um novo estado. Sugere-se que já temos tecnologia e conhecimento suficiente para encontrar caminhos que evitem o desequilíbrio

global, mas que isto exigirá um grande esforço intelectual e que provavelmente incluirá o uso da teoria de redes como ferramenta estratégica.

Palavras Chaves: Antropoceno; Desenhos genomorfofisiológicos; Redes hierárquicas; Hacker; Cracker.

Introdução

Apesar da grande quantidade de artigos e informações que se obtém hoje sobre as mudanças climáticas globais, não há como escrever sobre o assunto sem primeiramente definir alguns parâmetros e estabelecer alguns conceitos para que o raciocínio ao longo do texto tenha um contexto apreensível. Por este motivo, discorrerei sobre o assunto rapidamente para que a idéia principal (que é a aplicação de idéias associadas à teoria de redes) possa ser discutida e aplicada aos efeitos das mudanças climáticas sobre as organizações biológicas em diferentes níveis, do metabolismo à sociedade. É importante salientar que para que se compreenda bem a idéia central deste artigo será necessário compreender como funcionam os sistemas em rede. A parte sobre a aplicação destes conceitos ao que vem acontecendo no âmbito das mudanças climáticas será discutida no final do artigo e de forma especulativa, para que seja possível contemplar uma discussão multidisciplinar.

Discutirei primeiramente como as espécies e o clima se correlacionam em um período de tempo geológico, em seguida tratarei dos efeitos das mudanças climáticas sobre a biodiversidade em geral, depois mostrarei como funcionam os sistemas em rede e, finalmente, apresentarei uma pequena discussão sobre a inserção da sociedade neste contexto.

É importante ainda destacar que o tamanho deste artigo não permite grande aprofundamento. Portanto, a escolha dos vieses discutidos não expõe a relevância de aspectos importantes relacionados à biosfera, os quais adicionam ainda mais complexidade às idéias apresentadas. Mesmo assim, tenho a esperança de que as idéias principais aqui apresentadas sejam suficientes para serem aplicadas (ou adaptadas) a outros campos da biologia.

Variações climáticas em tempo geológico: um grande cenário dinâmico

Ao examinar uma fotografia de nosso planeta tirada de um satélite, podemos hoje apreciar o contorno de florestas que no Brasil se apresentam de maneira impactante na Amazônia e um resto de Mata Atlântica. Apesar de se discutir muito hoje em dia a preservação e a conservação destas florestas, a sua dinâmica ao longo do tempo em escala geológica (milhares ou milhões de anos) é pouco conhecida, isto principalmente devido ao número relativamente pequeno de evidências que dão suporte a teorias desse tipo.

Durante milhões de anos, diariamente, nosso planeta tem sido varrido por pulsos de luz solar que aquecem a sua superfície e, conseqüentemente, os gases em sua atmosfera. Este fenômeno de aquecimento da atmosfera mantém a média de temperatura (hoje cerca de 16°C) em níveis tais que, em comparação com os demais planetas e luas do Sistema Solar, a possibilidade de existência de vida como conhecemos parece existir exclusivamente Terra. Estas variações rítmicas geram padrões climáticos que resultam da interação complexa entre “forças” que, em última análise, determinam a existência e distribuição de todos os seres vivos na Terra. Como os padrões climáticos são determinados por mecanismos de alta complexidade e são cíclicos, os organismos vivos têm que ter a capacidade de se manter no ecossistema durante os diversos ciclos climáticos e é esta capacidade de sobrevivência aos múltiplos ciclos climáticos que determina o grau de adaptação de uma dada espécie.

Ao longo do tempo geológico os organismos vivos passam por períodos de grandes mudanças que afetam populações inteiras, colocando espécies em perigo de extinção e chegando muitas vezes às vias de fato. Por exemplo, a cada intervalo de cerca de 100 mil anos a Terra passa por um período de grande queda na temperatura média, período este chamado de glaciação. Estas variações acabam por determinar a capacidade adaptativa das espécies ao sistema como um todo, inclusive quando considerado em sua dimensão temporal. Em outras palavras, as variações climáticas constituem um cenário dinâmico no qual indivíduos, populações, espécies, comunidades e ecossistemas exercem seus papéis ao longo do tempo geológico.

O resultado deste processo é uma espécie de sucessão de episódios de destruição criativa que promovem uma série de *reboots* no sistema, alterando-o de tal forma que existe a possibilidade de que o sistema da biosfera como um todo aumente gradativamente seu nível de complexidade.

No parágrafo acima, o ponto central para discussão foi ao nível da espécie e do indivíduo, mas é importante lembrar que estes são compostos por órgãos, células e moléculas. Porém, para que um indivíduo continue existindo, este conjunto tem que responder harmonicamente às variações específicas do clima num dado momento. Se a resposta não for harmônica, o indivíduo deixa de existir e aquela “tentativa” fracassa. Se o conjunto de tentativas (indivíduos da espécie em diferentes populações) fracassa, a extinção é iminente.

Examinemos agora em maior detalhe o que seria esta “tentativa”.

Para facilitar a discussão vou atribuir à espécie um conceito estendido que denominarei *desenho genomorfofisiológico* ou *dgmf* (mas que nada tem a ver com o conceito de *design* inteligente). O *dgmf* seria um conjunto de “manifestações (ou possibilidades) morfofuncionais geradas por um genoma”. Assim, neste conceito, uma espécie seria um conjunto de ações coordenadas de genes que formam um conjunto de indivíduos capazes de se reproduzir e interagir com o ambiente de uma determinada forma, que é limitada pelas possibilidades do seu próprio genoma. Note que o *dgmf* é um conceito muito próximo ao de espécie, mas estendido no sentido de considerar a espécie como uma interação entre seus diversos níveis de emergência com capacidade de gerar informação no sentido explicitado por Testa e Kier (1). Assim, ao se reproduzirem, os indivíduos geram descendentes que apresentam variações em relação ao seu próprio desenho (variabilidade genética) e, se considerarmos a espécie como um todo, isto é, com toda a sua coleção dos seus *dgmf*, que se sucedem no tempo ou que vivem em conjunto ao mesmo tempo durante um grande período geológico, é como se olhássemos para um ponto central com variações ao seu redor (Figura 1).

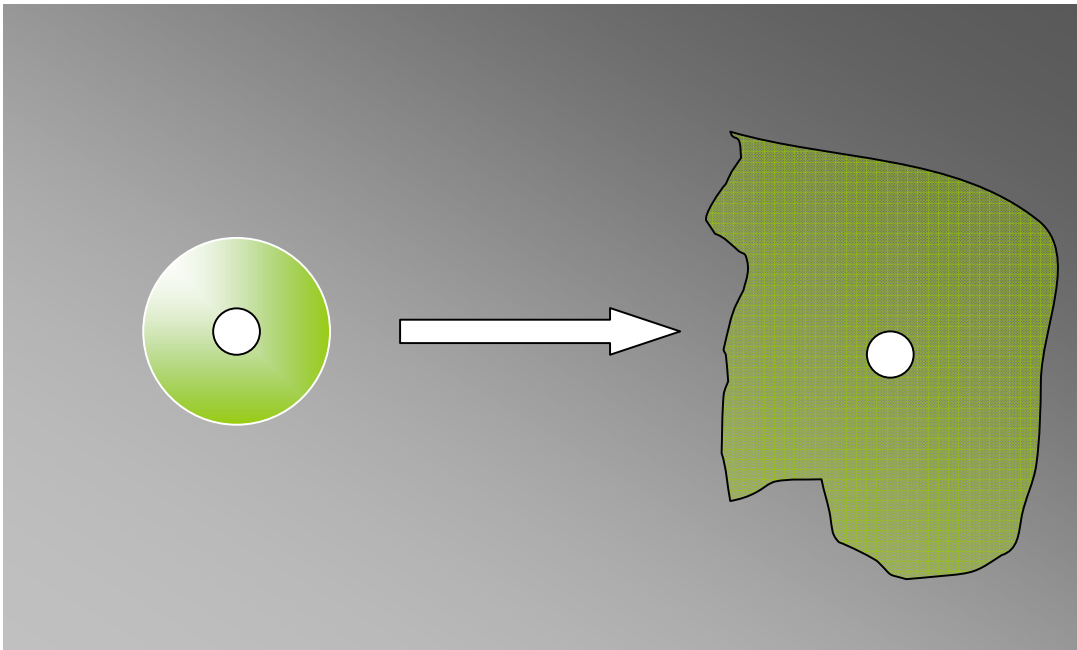


Figura 1. Representação esquemática de alterações no desenho genomorfofuncional (*dgmf*) gerado pela “manifestação” média do genoma de uma espécie (considerando todas as possibilidades em sua população) em um ambiente cujo clima varia dinamicamente no tempo geológico.

Na Figura 1, o quadro cinza ao fundo representa o cenário temporal em curso (milhões de anos, por exemplo). À esquerda uma espécie (círculo branco) e as variações de seu *dgmf* (imaginemos um círculo cinza esverdeado para facilitar a compreensão), que sofre alterações em seu *dgmf* de tal forma a alterar a posição do *dgmf* básico inicial (círculo branco à direita) em relação aos limites de variação do *dgmf* que ainda são capazes de se reproduzir (mancha verde). Note que o *dgmf* sempre está em uma espécie de “centro de gravidade” da coleção de variações que corresponde à espécie.

Se, ao invés de uma figura estática como a Figura 1, elaborássemos uma simulação em forma de filme, veríamos os limites do *dgmf* se alterando e adquirindo formas múltiplas e provavelmente bastante variáveis ao longo dos milhões de anos. Tudo isso em um cenário climático de fundo (também variável) que sustenta ou permite a existência daquele *dgmf*.

Neste contexto, é fácil de deduzir que caso as variações climáticas sejam muito drásticas, o *design* pode simplesmente deixar de existir, pois perde a estabilidade e a conectividade com as alterações climáticas. Se, por outro lado, as variações climáticas forem muito brandas, é possível que os limites de variação do *dgmf* se tornem mais restritos, ou seja, próximos ao círculo central do *dgmf*.

Como a biodiversidade reage às mudanças climáticas?

O termo efeito estufa tem sido frequentemente utilizado com uma conotação negativa, de que algo errado está acontecendo com a atmosfera. No entanto, o que esta conotação raramente traz é que a vida na terra só é possível por causa do efeito estufa. Para se ter uma idéia da importância do efeito estufa, pode-se usar como exemplo uma comparação entre a Terra e a Lua. Enquanto a camada de ar que envolve o nosso planeta se mantém entre extremos aproximados de -10°C e $+50^{\circ}\text{C}$, a Lua, que até onde sabemos não possui seres vivos, apresenta extremos de até -150°C à noite e $+100^{\circ}\text{C}$ na superfície exposta ao Sol. Estas diferenças existem a despeito do fato de que ambos os corpos celestes se encontram praticamente à mesma distância do sol. Tais diferenças existem porque a terra possui uma camada de gases capazes de absorver parte da radiação emitida pelo Sol. De toda a radiação que chega à Terra, apenas a luz visível e parte das ondas de rádio são capazes de atingir a superfície sem interferência, enquanto a luz ultravioleta é absorvida na estratosfera, provocando seu aquecimento. A energia absorvida faz com que as moléculas de certos gases vibrem, chocando-se entre si e com outras moléculas no ar, promovendo produção de calor, o qual em parte acaba sendo re-emitido para o espaço e em parte é responsável pela manutenção dos sistemas vivos na superfície terrestre. É fácil de ver que este é o efeito estufa benéfico, sem o qual a vida na Terra seria impossível (ver o item sobre de onde vem o CO_2).

Por outro lado, quando se fala do lado negativo do efeito estufa isto significa que o aumento artificial, e desproporcionalmente rápido, na concentração de certos gases que provocam este efeito (como o CFC, óxido nítrico e o CO_2 , por exemplo) vem provocando um aumento de temperatura da atmosfera. Isto pode provocar mudanças climáticas

significativas para a manutenção da vida como a conhecemos. De acordo com simulações de computador, alterações de temperatura que para nós parecem relativamente pequenas (por exemplo, 1° ou 2°C a mais na média mundial) poderão produzir alterações climáticas drásticas, principalmente devido à possibilidade de descongelamento de parte da água que se encontra em forma de gelo nos pólos e nas geleiras em terra. A presença de maior proporção de água líquida na atmosfera não somente aumentaria os níveis de água nos oceanos, mas também faria com que os regimes de chuvas de várias regiões se alterassem. Outro fator que raramente se comenta é que o vapor de água é, na realidade, um dos principais fatores para aumentar o efeito estufa e mais água líquida pode significar mais água em forma de vapor e mais aumento de temperatura. Paralelamente, os próprios efeitos do aumento de temperatura fariam com que os movimentos de massas de ar também se alterassem e, inclusive, influenciassem os regimes de chuvas. Dados e referências sobre este assunto podem ser encontrados nos relatórios do IPCC 2007 (2).

Este cenário de mudanças climáticas já ocorreu diversas vezes em nosso planeta e dados obtidos a partir de registros fósseis indicam que houve grandes mudanças no conjunto de seres vivos do planeta (ou seja, na biodiversidade).

Os maiores focos de diversidade biológica em nosso planeta encontram-se nas regiões costeiras e nas regiões que abrigam florestas tropicais. A biodiversidade marinha e costeira forma o conjunto mais amplo de biomas do planeta, cobrindo cerca de 71% da superfície terrestre. As regiões costeiras estão entre os ecossistemas naturais mais produtivos (estuários, lagunas, recifes de coral, etc.). A diversidade biológica marinha é comparável às florestas tropicais terrestres. Alguns autores inclusive comparam os biomas marinhos com os terrestres, dizendo que o ambiente marinho é equivalente a uma floresta tropical submersa.

Em um cenário onde o aumento nos gases do efeito estufa provoque mudanças ambientais muito rápidas, o aquecimento das águas degradaria os ecossistemas marinhos, afetando diversas espécies de diferentes formas. As alterações nos níveis do mar numa frequência maior do que muitos dos biomas poderiam suportar, provocariam estresse em

muitos dos organismos sensíveis à temperatura, tais como os corais, causando a morte e favorecendo o estabelecimento de doenças. Com a perda dos corais, por exemplo, várias comunidades que vivem a eles associadas e/ou deles dependem - e isso inclui um grande número de espécies animais e vegetais - correriam o risco de desaparecer, isto porque muitas não teriam tempo para se adaptar às novas condições climáticas. Portanto, parece claro que o efeito estufa gerado por atividade humana pode levar à perda de espécies e, portanto, à diminuição da biodiversidade.

No caso das florestas tropicais o efeito seria muito similar, mas por vias distintas. No ambiente terrestre uma das alterações mais importantes seria na distribuição da água na superfície, determinada pelos movimentos de massa de ar. As previsões do IPCC (2007) são de que os aumentos de temperatura na Região Amazônica podem ser da ordem de 4° a 6°C após 2050 e tais variações estariam associadas a uma diminuição significativa na precipitação em certas regiões.

Mas o problema não está nas mudanças climáticas, pois, como dito acima, isto já aconteceu várias vezes no planeta. O problema está, na realidade, no tempo. Como nos ecossistemas marinhos, se no ambiente terrestre as mudanças forem excessivamente rápidas, várias espécies não conseguiriam migrar com rapidez suficiente para encontrar um ambiente adequado para a sua adaptação. Essas espécies correm, portanto, o risco de desaparecer, o que novamente significa perda de diversidade biológica. Alguns autores acreditam que os efeitos mais drásticos nas florestas seriam sobre as árvores, pois muitas apresentam ciclo de vida longo e muitas espécies estão muito bem adaptadas a condições microclimáticas relativamente restritas. Espécies com essas características não teriam chances de encontrar um novo hábitat.

Assim, o principal mecanismo de perda de diversidade biológica seria a perda de diversos tipos de hábitat, gerada pelo desaparecimento de certas espécies e conseqüentemente de várias das espécies associadas à primeira. Considerando a biodiversidade como um conjunto de genomas que gera *dgmf* distintos, a perda de espécies significa a perda irrecuperável não somente de espécies, mas também de

associações destas em níveis de complexidade mais altos, como ecossistemas e comunidades.

Com a perda das árvores, que são os principais organismos processadores e armazenadores de carbono no planeta, com cerca de 200 bilhões de toneladas, mais CO₂ ficaria livre na atmosfera, aumentando ainda mais a temperatura e piorando o problema.

Como o mesmo raciocínio é válido para o ambiente marinho, bem como para os biomas em regiões temperadas do planeta, a perda de organismos fotossintetizantes levaria à sobra de CO₂. Isso levaria a mais mudanças climáticas e, a partir de certo ponto, o sistema poderia entrar em um ciclo irreversível de perda de diversidade biológica. Assim, somente algumas espécies mais flexíveis em relação à adaptação permaneceriam no sistema. Vale lembrar que tudo isso ainda é bastante especulativo, pois ainda não conhecemos o suficiente sobre os mecanismos de adaptação de mais de 95% das espécies de nosso planeta. O que sabemos hoje é muito pouco perto do que há para saber sobre a biodiversidade e, por isso, as previsões correntes poderiam estar erradas tanto para o lado positivo quanto para o negativo. Por outro lado, é bastante provável que, a esta altura, as previsões estejam bem próximas da realidade, caso as emissões de carbono continuem no ritmo em que estão atualmente.

A teoria de redes

Por que explicar a teoria de redes de forma tão enfática? Se pensarmos na situação explicada acima, de que efeitos de retro-alimentação podem levar à perda acelerada de espécies com conseqüências importantes para a biodiversidade, é de importância estratégica que comecemos a compreender quais são os mecanismos envolvidos no processo. Como a teoria de redes é relativamente nova e tem certo grau de complexidade, explicarei como ela funciona com exemplos mais gerais do dia-a-dia e posteriormente discutirei as possibilidades de aplicá-la para compreender melhor o impacto das mudanças climáticas sobre a biodiversidade.

Em novembro de 2006, o choque entre dois aviões no céu da Amazônia desencadeou um processo em cadeia que quase um ano depois ainda repercute e gera conseqüências para a sociedade.

Apesar de a queda do avião da GOL (vôo 1907) ser uma tragédia, é inusitado o fato de outras tragédias similares não terem causado tantos problemas no longo prazo. Por que isto acontece? A queda do avião em si gerou uma série de conseqüências, com a comoção e alteração no destino de diversas famílias devido à morte de seus parentes. Pessoas que morreram no desastre teriam um futuro e uma inserção na teia de conexões com outras pessoas da sociedade, mas estas foram cortadas repentinamente. Portanto, o fato de tais conexões não existirem mais alterou a história. Mas há algo mais complexo do que isso.

Uma das conexões com o acidente do vôo 1907 gerou conseqüências inesperadas. Por trás do que ocorreu estava um problema crônico relacionado aos controladores de vôo em todo o Brasil. Não se sabe ao certo quem foi o culpado, mas os controladores de vôo resolveram expor um problema que poderia estar por trás do acidente. Este problema seriam as suas próprias condições de trabalho.

O que complicou ainda mais a situação foi que, os controladores, devido aos problemas trabalhistas, resolveram em determinado momento aumentar o intervalo entre pousos e decolagens nos aeroportos mais movimentados do país, alegando que isto aumentaria a segurança aérea. O sistema aéreo, então, entrou em colapso, com centenas de pessoas presas em aeroportos por todo o país, negócios perdidos, casamentos que não aconteceram, etc. Em outras palavras, as conseqüências da atitude dos controladores de vôo se tornaram de impacto nacional.

A pergunta que surge a partir de tudo isso é: como se explica o fato de um evento que apesar de uma grande tragédia, mas de conseqüências até certo ponto locais, tenha culminado em uma série de eventos de conseqüências nacionais que ainda continuariam afetando grande parte da população durante meses?

Uma das explicações possíveis para o que vem ocorrendo com o transporte aéreo brasileiro pode estar na teoria de redes. O exemplo da história do vôo 1907 e suas conseqüências são extremamente úteis para explicar esta teoria. Para isso é necessário

lembrar que, com o aumento das redes aéreas no Brasil, o sistema de controle foi alocado nos sistemas Cindacta. Apenas 5 centros controlam todos os vôos no Brasil, tornando a rede de informação e controle de vôos altamente hierarquizada.

As redes podem ser basicamente de dois tipos: **ao acaso** e **hierárquicas** (Figuras 2A e 2C respectivamente) (3). Assim como o nosso controle aéreo, a Internet, as conexões entre empresas, pessoas na sociedade, organismos vivos e inclusive o metabolismo destes, se apresentam na maioria das vezes na forma de redes hierárquicas. Este tipo de rede tem algumas características importantes, como a de ser mais vulnerável ao ataque.

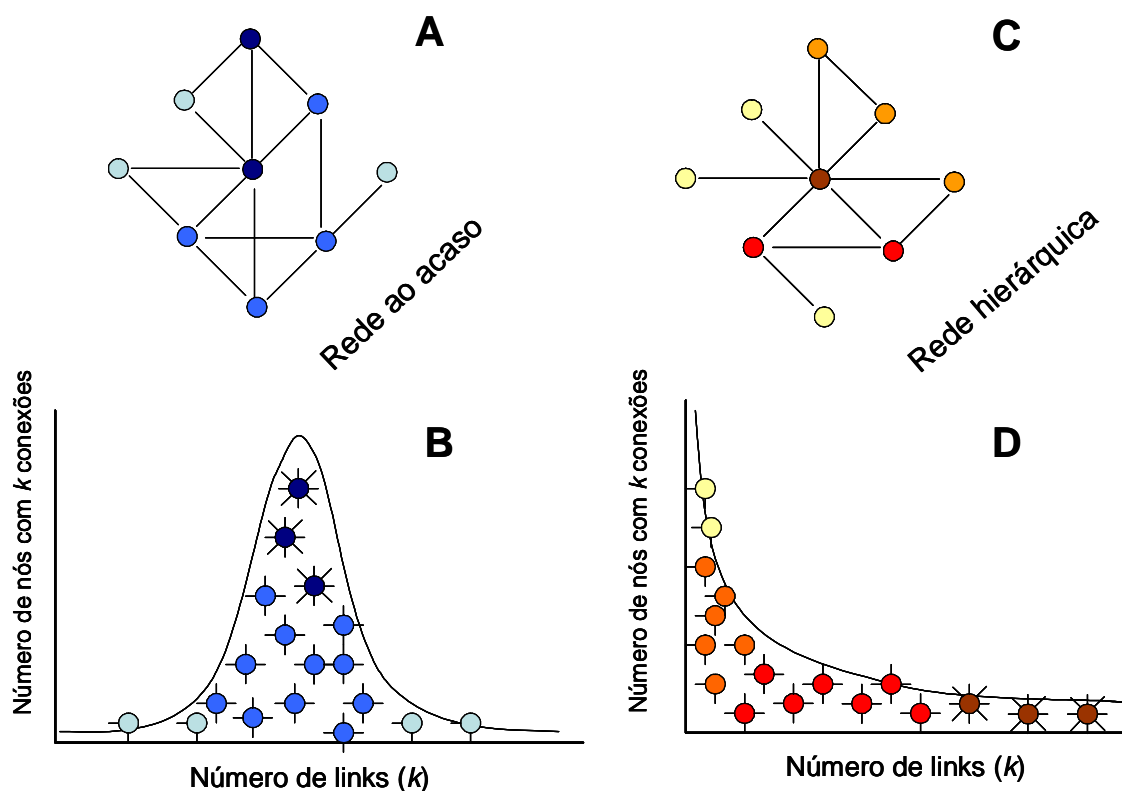


Figura 2. Características das redes ao acaso e hierárquicas. No caso das redes ao acaso, a distribuição dos nós com diferentes números de conexões é normal (A e B) enquanto nas redes hierárquicas há um grande número de nós com poucas conexões e um pequeno número de nós com muitas conexões. Isto aumenta a vulnerabilidade da rede hierárquica ao ataque.

Todas as redes são constituídas por nós e conexões. No caso das redes ao acaso, a distribuição das conexões entre os nós é ao acaso, de forma que há um grande número de nós com um número médio de conexões e pequenos números de nós com poucos e com muitos nós, ou seja, a distribuição de nós e conexões é normal (Figura 2B). No caso das redes hierárquicas a distribuição não é normal. A hierarquia neste caso significa que há um pequeno número de nós com muitas conexões e que a maioria dos nós tem poucas conexões (Figura 2D).

Para ilustrar as diferenças de funcionamento entre os dois tipos de rede podem-se usar os exemplos dos *hackers* e *crackers* que atacam a Internet. Enquanto o ataque dos *hackers* à Internet (uma rede hierárquica) é ao acaso, podendo atingir qualquer nó, o ataque dos *crackers* é direcionado a um nó hierarquicamente importante, ou seja, um nó com um grande número de conexões. A diferença entre os dois tipos de ataque é enorme, pois como a probabilidade de um *hacker* atingir um nó hierarquicamente importante é pequena, os efeitos deste tipo de ataque são quase sempre locais. No caso dos *crackers*, o ataque pode rapidamente levar a consequências globais.

Se agora mesclarmos a história do voo 1907 com os controladores de voo brasileiros e com os *hackers* e os *crackers* da Internet, uma pergunta surge: se o choque do 1907 com o Legacy foi um evento com baixa probabilidade de gerar eventos encadeados duradouros em nível nacional, por que as consequências têm sido tão drásticas?

A resposta está na forma com se fazem as conexões entre os nós de rede. Aparentemente, tudo no mundo está conectado a tudo e em média, acredita-se que o número médio de níveis que um nó deve atravessar para se conectar a qualquer outro nó é de 6. Mas há conexões separadas por 20 níveis ou por apenas um. Portanto, os efeitos globais podem sim ocorrer a partir de um evento local, desde que a conexão esteja próxima o suficiente. No caso do acidente do voo 1907, a conexão muito próxima deste com o problema trabalhista dos controladores de voo brasileiros desencadeou uma seqüência de eventos em um nível hierárquico alto da rede de conexões aéreas brasileiras, gerando o que a mídia hoje chama de caos aéreo.

A importância das conexões em redes para os efeitos das mudanças climáticas globais sobre a biodiversidade

A biosfera é uma grande rede hierárquica conectada não somente nos níveis de espécies ou de indivíduos em cada população. As conexões ocorrem também em níveis de organização inferiores (metabolismo, genomas) os quais têm seus próprios nós e conexões. Vamos examinar isto tudo mais de perto.

Primeiramente devo estabelecer que considerarei como iniciadores dos sistemas, elementos que chamo, em conjunto, de “tripé das mudanças climáticas”, a saber: gás carbônico (CO₂), temperatura e água.

Note que se assumirmos que estes são os iniciadores do problema, do ponto de vista de modificações na biosfera, como deixa claro o último relatório do IPCC (2). O disparador do processo seria o aumento no CO₂¹ atmosférico, uma vez que: 1) ele é o principal gás do efeito estufa (devido à concentração de 0,038% na atmosfera, que é maior do que dos outros gases do efeito estufa) a contribuir para o aumento da temperatura; e 2) ele é o gás utilizado pelas plantas para realizar a fotossíntese, que é a única forma de fabricar matéria orgânica e manter os ecossistemas funcionando.

Portanto, a fotossíntese parece ser um desses nós hierárquicos com altíssima conectividade que mencionei acima. Ela é, de fato, a razão biológica da existência de todo o resto da biodiversidade, pois é através dela que o carbono é fixado em carboidratos e possibilita a existência de todos os outros organismos vivos, os quais se conectam em redes em outros níveis de organização (individual, ecossistemas, cadeias alimentares, comunidades ecológicas, biomas, etc.). É importante lembrar aqui que além do CO₂, a temperatura e a água também influenciam a fotossíntese, de forma que os efeitos das mudanças climáticas sobre a biosfera têm como base o processo fotossintético, pois qualquer alteração irá afetá-lo.

¹ Note que há outros gases do efeito estufa, como mencionei acima, mas neste caso estou usando como iniciador o CO₂ porque, devido à sua concentração atmosférica, este é o principal gás do efeito estufa. Ficará claro também no texto a sua importância para a biodiversidade devido à sua participação direta como iniciador do processo fotossintético.

Na natureza, em geral, sistemas de alta importância apresentam certo nível de **redundância**, ou seja, a multiplicação de uma dada estrutura e mecanismos relacionados com a mesma função em um sistema (4). Do ponto de vista biológico, a redundância funciona como uma espécie de sistema de segurança que evita que os sistemas colapsem devido a falhas (na linguagem de redes, o ataque). A redundância é provavelmente produzida pelo processo de seleção natural, ou seja, sistemas com maior nível de redundância provavelmente têm maior sucesso evolutivo, pois a resistência às falhas lhes garantem escapar de condições adversas. Na linguagem de redes, um ataque do tipo *cracker*.

Os sistemas de produção autotrófica são sistemas que apresentam um bom nível de redundância, com microorganismos que fazem quimiossíntese, sistemas de fotossíntese dos vegetais dos tipos C₃, C₄ e CAM, cada um formando redes de integração metabólica e fisiológica que permitem diferentes desempenhos perante combinações distintas de CO₂, luz, temperatura e água.

Devido à redundância, este nível da rede (o da produção autotrófica) é mais difícil de atacar. Na realidade, o aumento da concentração de gás carbônico atmosférico e o aumento de temperatura são, em geral, benéficos para as plantas, fazendo com que a fotossíntese aumente e, com isto, haja um aumento de biomassa vegetal.

Além da redundância, que seria na realidade um conjunto de diferentes formas de entrada (com poder de alteração) nas redes interativas em vários níveis de organização, o próprio gerenciamento da troca de informação (conectividade) entre os nós das redes funcionaria também como um mecanismo de segurança contra o ataque.

Se admitirmos que as mudanças climáticas globais têm o potencial de funcionar como um ataque às redes de interação da biodiversidade, a pergunta principal seria: qual o potencial de ataque, principalmente do tipo *cracker*, e quais conseqüências teremos em nível global? Outra pergunta importante: há um limiar a partir do qual o sistema passa a ser mais vulnerável ao ataque do tipo *cracker*?

Alguns autores têm sugerido que os ecossistemas têm mecanismos de auto-ajuste que independem da latitude, estando adaptados às variações climáticas históricas, de tal forma que as alterações climáticas que vimos experimentando até agora não tiveram

grandes efeitos e poderão, de fato, ter poucos efeitos no futuro [Veja (5) e as referências nele citadas].

Estes mecanismos de auto-ajuste provavelmente estão relacionados aos mecanismos de funcionamento em redes hierárquicas que controlam o *nível de informação* do sistema, de tal forma a evitar que este entre em colapso. Podemos propor a hipótese de que estes “mecanismos de proteção” seriam os principais responsáveis pela manutenção da vida no planeta, mesmo após episódios extremos de extinção em massa. Em outras palavras, o funcionamento em rede confere alto nível de resiliência² ao sistema da biosfera.

A questão mais importante que estamos tentando responder no momento é sobre o limiar de resposta do sistema às mudanças climáticas. Se considerarmos a redundância e a conectividade como mecanismos de proteção das redes ecológicas, podemos voltar à questão: será que há um limiar a partir do qual o nível de resiliência é suplantado e o sistema muda de estado?³

No momento não temos como responder a esta pergunta, pois o nível de informação que possuímos sobre as redes da biodiversidade é muito pequeno. Como a ciência das mudanças climáticas avançou muito mais rapidamente no hemisfério norte, o desnível de informação é enorme. Isto pode ser visto no último relatório do IPCC (2), no qual há proporcionalmente mais informação sobre as causas das mudanças no clima do que sobre os efeitos destas sobre a biodiversidade. Talvez esta discrepância não esteja relacionada à quantidade de informação científica disponível, mas principalmente ao fato de que a informação sobre a biodiversidade não esteja ainda tão bem organizada.

Para que possamos responder às duas perguntas cruciais levantadas acima, teremos que aprofundar os estudos sobre a biodiversidade. Há duas formas de fazer isso, que eu denomino estratégias **horizontal** e **vertical**. No primeiro caso, o que se faz é um conjunto de levantamentos diagnósticos sobre quais são as espécies e onde elas estão. No Brasil, o termo “inventário” tem sido usado para definir esta estratégia. Por exemplo, nos

² Aqui uso o termo resiliência para me referir a sistemas que possuem mecanismos de resistência para serem tirados do equilíbrio dinâmico em que estão.

³ Refiro-me aqui à saída de um estado de equilíbrio e à entrada em outro estado distinto de equilíbrio, no qual as redes ainda seriam hierárquicas, mas com conexões e hierarquia de nós distintas.

primeiros 8 anos, desde o início do programa BIOTA-Fapesp, esta estratégia tem sido a mais utilizada. Os resultados obtidos com tal estratégia geram mapas que não somente apresentam as localizações, mas permitem visualizar padrões de distribuição. Em contrapartida, a estratégia vertical, que consiste em aprofundar a compreensão dos mecanismos de funcionamento em vários níveis de organização (ecológico, fisiológico e metabólico), só pode ser adotada se os elementos (espécies) e suas posições forem conhecidos. As duas estratégias são, portanto, complementares e não são mutuamente exclusivas. A melhor estratégia global é manter as duas em paralelo, trocando informações, de forma a obter cada vez mais informações que levem à percepção de um padrão global que integre *estrutura e função*. Este é o estágio em que nos encontramos neste momento e a teoria de redes pode ser uma ferramenta-chave para integrar os conhecimentos sobre a biodiversidade.

O que a aplicação da teoria de redes nos oferece para melhorar nosso desempenho nesta tarefa é que, ao examinarmos os sistemas do ponto de vista integrado de estrutura e função, não precisaremos continuar a estudar espécie por espécie e ecossistema por ecossistema, mas teremos que tentar divisar três pontos cruciais: 1) quais são as espécies importantes, ou seja, com menor nível de redundância funcional no sistema em que se insere?; 2) quais são as conexões que estas espécies fazem em diferentes níveis de organização? e 3) quantos são os níveis necessários para que, a partir desta espécie e suas funções, se chegue a um nó de rede hierarquicamente importante no sistema?

Se admitirmos que estas são perguntas cientificamente relevantes, uma estratégia para acelerarmos o processo de busca de soluções para o problema das mudanças climáticas no que se refere aos seus efeitos sobre a biodiversidade, nós teríamos que tentar compreender melhor: 1) as espécies com baixo nível de redundância funcional; 2) as espécies (principalmente *dgmf* de baixa redundância funcional) que fazem conexões com nós importantes em suas comunidades e biomas; e 3) as espécies que o fazem em um número de níveis pequeno com nós hierarquicamente importantes na rede. Estes talvez sejam os pontos mais sensíveis (ou vulneráveis) da rede ao ataque pelas mudanças climáticas.

Antropoceno: quando o homem começou a influenciar o clima e a biodiversidade?

A ação do homem (ou ação antrópica) desde a revolução industrial tem sido considerada um fator destrutivo (ou modificador) preponderante em nosso planeta, pois vem causando incontáveis perdas de espécies em todos os seus biomas. Apesar de oficialmente, a aceitação mais geral da idéia de que o homem está diretamente envolvido na indução de mudanças no clima, ter ganhado força com a divulgação do quarto relatório do IPCC (Intergovernmental Panel of Climatic Change) em 2007 (2), em termos de literatura séria e de qualidade, o assunto já vem sendo discutido há mais de 30 anos. Há hipóteses relativamente bem estabelecidas de que a ação antrópica não se iniciou com a revolução industrial, mas na era que Crutzen e Stoermer (6) chamaram de **Antropoceno**. Estes autores dataram o início do Antropoceno em 1800 a.C., mas posteriormente Willian Ruddiman (7) propôs, com base em testemunho de gelo antártico, que o Antropoceno teria começado na Idade da Pedra, entre 6.000 e 8.000 anos atrás e a influência antrópica sobre o clima teria crescido de forma intensa nas Idades do Bronze e do Ferro. Por volta de 7.500 anos atrás, acredita-se que os seres humanos iniciaram o cultivo de arroz selvagem e, por volta de 2.000 anos atrás, os chineses e indianos já possuíam um sistema agrícola de grande escala que incluía sistemas de irrigação. É neste cenário que, segundo Ruddiman, tem início a produção de metano, um dos gases do efeito estufa, e que o homem começa a influenciar significativamente o clima. Quanto ao CO₂, segundo este mesmo autor, variações anormais começaram a ocorrer a 8.000 anos. Este pode ter sido o início de um ataque à rede da biosfera. O que não sabemos ainda, e provavelmente não queiramos saber, é se o ataque é do tipo *hacker* ou *cracker*.

Conexões entre a biodiversidade e as redes sociais

Não haverá dúvidas de que tais conexões existam se considerarmos que nada esteja desconectado da biosfera. Da mesma forma que a queda do vôo 1907 se conectou com uma rede distinta, relacionada a problemas trabalhistas na aeronáutica brasileira, as redes da biodiversidade podem se conectar com as redes sociais (e vice-versa) e causarem problemas de conseqüências globais.

Imagine que a perda de uma espécie amazônica, com as características mencionadas no item anterior, seja perdida devido às alterações nos seus padrões reprodutivos em decorrência das mudanças climáticas. Tal espécie de perda pode levar a alterações nas conexões de sua rede de interação, tendo como conseqüência a perda da população e da comunidade, provocando assim um desequilíbrio que leve a uma reação em cadeia, com o desaparecimento de várias espécies que a ela se conectavam. Como conseqüência, uma mortandade de árvores leva à perda de parte da floresta, alterando o balanço hídrico da região e, conseqüentemente, o clima. A caminho de um novo equilíbrio que mantenha os padrões de dissipação de energia da atmosfera, as massas de ar e água mudam a sua direção e o padrão de chuvas se altera, gerando seca onde antes havia chuva. Como conseqüência, as culturas agrícolas que ali existiam passam a não ter mais viabilidade, afetando a economia e a população dependente destes recursos. Tal sucessão de eventos, quando provoca uma alteração global no equilíbrio do sistema, pode gerar uma singularidade.

Este é um caso hipotético? Sim, mas é muito provável que algo análogo já tenha acontecido algumas vezes, como no Antigo Egito e também com as populações do povo Maia. Estes povos alteraram seus respectivos ambientes até forçar os sistemas em rede ao seu redor a sair do equilíbrio vigente e passar a outro não tão “útil” às populações humanas. Os Maias migraram constantemente para outras regiões e os Antigos Egípcios esgotaram seus recursos. Estes foram eventos que podem ser considerados como locais, no contexto deste artigo. Pode-se neste momento fazer a seguinte pergunta: estamos preparados para mais um destes eventos, mas desta vez em escala global?

Creio que a resposta a esta pergunta, do ponto de vista científico, seja sim! Temos uma grande quantidade de conhecimento acumulada e teremos que trabalhar em conjunto para encontrarmos os nós de rede que não podem ser afetados, de forma a manter a biosfera no equilíbrio dentro do qual nós nos encaixamos.

Para que tenhamos sucesso é essencial compreender que as redes sociais apresentam conectividade com as redes da biodiversidade e o equilíbrio da biosfera, como um todo, depende destas conexões. O nível de inconsciência sobre estas relações já apresenta um alto custo para o sistema, com grande perda de espécies e com previsões ainda mais drásticas, já que além do que já foi perdido, as mudanças climáticas podem induzir a perda de 15 a 37% das espécies existentes durante os próximos 50 anos (8).

Nossa esperança deve residir no fato de que a expansão da consciência humana, através do aumento do conhecimento sobre a natureza, é o que tem levado a nossa espécie a se manter em equilíbrio com a biosfera. Teremos que continuar a nos valer desta capacidade de expandir nossa consciência coletiva e encontrar os caminhos mais rápidos e eficientes para manter o equilíbrio. A aplicação da teoria de redes deverá ajudar bastante nessa jornada.

Agradecimentos

Este artigo foi escrito no âmbito de um conjunto de projetos financiados pelo Ministério da Ciência e Tecnologia e pela Eletronorte. Ele é um resultado da confiança de colegas como José Miguez e Augusto Saraiva a quem agradeço. As idéias neste artigo tiveram um grande estímulo do Prof. Fabio Scarano da UFRJ, um colega extremamente inteligente, arrojado e incentivador das discussões científicas com idéias novas e ousadas. Eu concordo completamente com tais idéias e este artigo é um produto desta motivação.

Referências Bibliográficas

1. Testa, B. and Kier, L.B. 2000 Emergence and Dissolence in the Self-organization of Complex Systems. *Entropy* 2: 1-25.
2. IPCC, Intergovernmental Panel of Climatic Change - <http://www.ipcc.ch>.
3. Barabási, A.L. 2003 *Liked*. Plume, London 294p.
4. Buckeridge, M.S. 2006. Implications of emergence, degeneracy and redundancy for the modeling of the plant cell wall. In: Takahisa Hayashi. (Org.). *The Science and the Lore of the Plant Cell Wall: Biosynthesis, Structure and Function*. Boca Raton: BrownWalker Press, p. 41-47.
5. B.J. Enquist, A.J. Kerkhoff, T.E. Huxman, E.P. Economo 2007 Adaptive differences in plant physiology and ecosystem paradoxes: insights from metabolic scaling theory *Global Change Biology* 13, 591-609.
6. Crutzen, P.I. and Stoermer, E.F. 2000. The anthropocene. *IGBP Newsletter* 41:12.
7. Ruddiman, W.F. 2003 The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago. *Climatic Change* 61: 261-293.
8. M. Loreau, A.O.Yeboah, 2006 Diversity without representation. *Nature* 442: 245-246.

Data de Recebimento: 17/01/2007
Data de Aprovação: 21/03/2007