

## Mudanças Climáticas e a Biodiversidade dos Biomas Brasileiros: Passado, Presente e Futuro

*Climate Change and Biodiversity of Brazilian Biomes: Past, Present, and Future*

Alexandre Aleixo<sup>1\*</sup>, Ana Luisa Albernaz<sup>2</sup>, Carlos Eduardo Viveiros Grelle<sup>3</sup>,  
Mariana Moncassim Vale<sup>3</sup> & Thiago Fernando Rangel<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Coordenação de Zoologia, Museu Paraense Emílio Goeldi, CP 399, CEP 66040-170, Belém, PA, Brasil

<sup>2</sup> Coordenação de Ciências da Terra e Ecologia, Museu Paraense Emílio Goeldi, CP 399, CEP 66040-170, Belém, PA, Brasil

<sup>3</sup> Departamento de Ecologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, CP 68020, CEP 21941-902, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

<sup>4</sup> Departamento de Ecologia, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Goiás – UFG, CP 131, CEP 74001-970, Goiânia, GO, Brasil

Os biomas brasileiros abrigam uma porção significativa da biodiversidade mundial, constituindo importantes centros de biodiversidade pela combinação de altos níveis de riqueza e endemismo. No entanto, essa rica biodiversidade vem sendo crescentemente ameaçada por atividades antrópicas, principalmente aquelas ligadas à conversão das paisagens naturais em áreas de produção agro-pecuária e ocupação imobiliária. Altíssimos níveis de devastação ambiental já colocaram dois biomas brasileiros – a Mata Atlântica e o Cerrado – na lista dos “Hotspots” de biodiversidade, que são conjuntos de ecorregiões prioritárias para conservação em nível mundial (Myers *et al.* 2000). Para piorar a situação, o conhecimento sobre a real diversidade dos grupos biológicos que compõe a biodiversidade brasileira ainda pode ser considerado bastante incipiente, mesmo para aqueles grupos que tradicionalmente sempre foram considerados bem conhecidos, como é o caso das aves (Vale *et al.* 2008), o que pode inviabilizar seu uso como fonte confiável de informações para planejamentos sistemáticos e desenvolvimento de políticas de conservação (Aleixo 2010).

Além das alterações recentes nas paisagens naturais, mudanças climáticas em curso e previstas constituem um segundo fator de ameaça à biodiversidade dos biomas brasileiros, com especial ênfase para aqueles predominantemente florestais e com maior riqueza de espécies e endemismo: a Amazônia e a Mata Atlântica. Apesar da sua importância, a produção científica nesta área do conhecimento é ainda pequena se comparada

à outras relacionadas com a Biologia da Conservação (Grelle *et al.* 2009). Na América do Sul, temperaturas mais altas e uma maior duração da estação seca poderão aumentar a frequência de estiagens sazonais rigorosas iniciadas pelo episódio El Niño / Oscilação Sul (ENSO) e de anomalias da temperatura da superfície do mar (SST) no Atlântico, contribuindo para incêndios cada vez mais frequentes e intensos, os quais ameaçarão a distribuição e integridade ambiental dos biomas brasileiros, em particular os predominantemente florestais (Marengo *et al.* 2009).

Um conhecimento essencial para o desenvolvimento de políticas de minimização dos efeitos das mudanças climáticas sobre a biodiversidade brasileira é a reconstrução do grau de suscetibilidade e resposta das biotas dos diferentes biomas às alterações climáticas intensas de passado recente, como aquelas ocorridas ao longo dos últimos 2 milhões de anos (*i.e.* período Quaternário). Dados recentes sobre a filogeografia e modelagem de nicho ecológico obtidos para várias linhagens de organismos da Amazônia e Mata Atlântica, dão uma ideia da suscetibilidade dos diferentes biomas. Enquanto para alguns grupos os últimos ciclos de diversificação correlacionaram-se aparentemente com essas alterações climáticas recentes, em outros, estas pouco ou nada contribuíram para seu padrão contemporâneo de riqueza de espécies e distribuição geográfica (Carnaval *et al.* 2009, Antonelli *et al.* 2010). O entendimento das variáveis determinantes deste padrão dicotômico de resposta frente às alterações climáticas intensas, em curtos períodos de tempo, adquire uma importância fundamental no contexto do aquecimento global já verificado e previsto para várias regiões do planeta, inclusive para os biomas brasileiros (Marengo *et al.* 2009).

\*Send correspondence to: Alexandre Aleixo  
Coordenação de Zoologia, Museu Paraense Emílio Goeldi,  
CP 399, CEP 66040-170, Belém-PA, Brasil  
E-mail: aleixo@museu-goeldi.br

## Mudanças Climáticas e Biodiversidade: o Passado como Chave para Entender o Futuro

Uma das hipóteses até hoje mais difundidas e intensamente debatidas sobre a origem da grande biodiversidade Neotropical e brasileira contemporâneas (*i.e.* hipótese dos refúgios pleistocênicos), coloca as mudanças climáticas no centro do processo de geração de barreiras que promovem a vicariância e geração de novas linhagens e espécies, num processo conhecido como cladogênese (Haffer 2008). Segundo a hipótese, as máximas glaciais, como aquela ocorrida há cerca de 20 mil anos atrás, teriam levado a temperaturas mais baixas e a uma drástica redução na pluviosidade média de alguns biomas brasileiros, com inferida redução e fragmentação dos biomas florestais e expansão de formações abertas; já os períodos inter-glaciais, com características semelhantes ao clima atual, teriam fornecido, de modo inverso, condições ideais para a expansão dos biomas florestais e a retração de formações abertas (Vonhof & Kaandorp 2010). O efeito destes ciclos nas populações dos diferentes organismos teria variado, dependendo do bioma. Durante períodos glaciais, populações de espécies florestais teriam sua distribuição fragmentada, ficando isoladas em “refúgios” florestais e se diferenciando uma das outras, ao passo que espécies de ambientes abertos expandiriam suas distribuições acompanhando a expansão destes ambientes. Em períodos inter-glaciais, o oposto teria ocorrido e espécies florestais recém diferenciadas expandiriam suas distribuições, entrando em contato, enquanto que espécies de área abertas teriam suas distribuições fragmentadas e passariam a se diferenciar pelo isolamento.

Embora a hipótese dos refúgios tenha sido aquela mais discutida para a biota Neotropical até hoje e inclusive corroborada por diferentes estudos (ver revisões em Haffer (2008) e Antonelli *et al.* (2010)), diferentes estudos paleoclimáticos e filogenéticos falsificaram algumas das suas mais importantes previsões, evidenciando claramente as limitações desta hipótese. Por exemplo, alguns estudos palinológicos não encontraram evidências de vegetações abertas durante a Última Máxima Glacial (UMG; 20 mil anos atrás) em grandes extensões da Amazônia ocidental, conforme previsto pela hipótese dos refúgios, mas sim indícios de uma cobertura florestal similar à atual (Colinvaux 1993). De modo análogo, a maior parte das datações obtidas para a separação de espécies irmãs de vertebrados no bioma Amazônia, aponta para uma origem bem anterior à UMG, demonstrando que períodos glaciais, por si só, não seriam responsáveis pelo mais recente ciclo de cladogênese nestas linhagens (Antonelli *et al.* 2010).

Independentemente de ter contribuído decisivamente ou não para formação de novas linhagens e espécies em diferentes contextos, é indiscutível que as mudanças climáticas ocorridas durante a UMG afetaram de modo bastante intenso o nicho ecológico potencial ocupado por espécies associadas aos

biomas brasileiros. Isso pode ter ocasionado, no mínimo, grandes mudanças na distribuição geográfica destas espécies em relação ao contexto atual. Estima-se que, particularmente a Amazônia e Mata Atlântica, ficaram bastante reduzidas em relação à sua distribuição atual, conforme revelado pela distribuição do nicho ecológico potencial de várias linhagens associadas a esses biomas durante períodos glaciais, incluindo a UMG (*e.g.* Carnaval *et al.* 2009). Talvez um dos pontos mais obscuros sobre os efeitos dos ciclos glaciais de mudanças climáticas na biodiversidade dos biomas brasileiros seja o seu potencial de promover extirpações locais e até extinções completas de linhagens e espécies. Infelizmente, as assinaturas desses eventos não podem ser recuperadas de modo direto através de reconstruções filogenéticas (Rabosky 2010). De todo modo, mesmo com a drástica redução da cobertura dos biomas Amazônia e Mata Atlântica na UMG, isso parece não ter sido suficiente para a extinção de várias linhagens modernas, conforme evidenciado por diversos estudos filogenéticos e de modelagem do nicho ecológico pretérito e contemporâneo.

Desse modo, três grandes questões inter-relacionadas se impõem hoje no estudo da biodiversidade brasileira num contexto de mudanças climáticas globais intensas em curso e previstas para o futuro próximo: (1) quais as características ecológicas das linhagens que apresentam uma resistência natural ou vulnerabilidade à mudanças climáticas, conforme revelado por seu passado evolutivo?, (2) qual o limiar de alteração climática necessário para gerar não apenas alterações em padrões de distribuição, mas também alterações nas fitofisionomias e extinções de linhagens inteiras nos biomas brasileiros? e (3) mudanças climáticas podem continuar atuando, como no passado, como fatores que contribuem, em diferentes contextos, para a geração de novas linhagens e espécies em biomas cada vez mais descaracterizados por paisagens antropizadas?

## O Componente “Biodiversidade” da Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais: Modelando o Presente para Diagnosticar o Futuro

A Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais (conhecida como Rede-Clima) foi criada em dezembro de 2007 e tem sua sede no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em São José dos Campos (SP), contando com diversas atribuições na formulação e acompanhamento de políticas públicas sobre Mudanças Climáticas Globais no Brasil, inclusive “estudar alternativas de adaptação dos sistemas sociais, econômicos e naturais do Brasil às mudanças climáticas”.

Para esse fim, foi constituída uma sub-rede dentro da Rede-Clima, com foco na biodiversidade dos biomas brasileiros e cuja finalidade principal é entender melhor os efeitos das mudanças climáticas sobre a biota brasileira,

possibilitando a elaboração de estratégias para minimizar seus efeitos deletérios. Atualmente, a sub-rede Biodiversidade da Rede Clima executa projetos de pesquisa na sua temática de especialidade nos biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica, devendo em breve expandir sua rede de colaboradores para os demais biomas brasileiros. Neste primeiro momento, os projetos em execução na sub-rede têm três focos principais: (1) usando modelagem de nicho ecológico, mapear possíveis redistribuições geográficas para determinadas linhagens de organismos, sob cenários diversos de emissão de gases de efeito estufa, identificando espécies e áreas prioritárias para a conservação num futuro marcado por mudanças climáticas em andamento; (2) reconstruir os contextos temporal, espacial e ecológico do histórico de diversificação de determinadas linhagens de organismos, com vistas a identificar um conjunto de variáveis bio-geo-climáticas responsáveis pela diversificação e não extinção destes grupos no passado, que podem ser determinantes para a sua sobrevivência num futuro marcado pelas mudanças climáticas em andamento e (3) modelar o comportamento de diferentes tipos de fitofisionomias dos biomas brasileiros frente à mudanças climáticas, com o objetivo principal de prever alterações na sua distribuição futura.

Para atingir estes objetivos, é necessária uma abordagem que integre diversas disciplinas, como, por exemplo, a sistemática filogenética molecular e a modelagem de nicho ecológico Grinneliano. Estudos das relações filogenéticas entre táxons próximos, muitos deles considerados atualmente como subespécies ou complexos de espécies, são importantes para se delimitar apropriadamente espécies e evidenciar padrões temporais e espaciais de diversificação. A partir desses resultados, é possível verificar se há padrões comuns que possam ser relacionados a eventos históricos. Para compreender os processos históricos mais recentes, em especial os relacionados a alterações climáticas Pleistocênicas, são necessários estudos populacionais, intra-específicos, que podem indicar padrões demográficos comuns a diferentes grupos que ocorrem nas mesmas regiões geográficas, além de técnicas de modelagem de nicho ecológico com base na distribuição geográfica das linhagens investigadas.

A sub-rede biodiversidade da Rede Clima espera gerar um conjunto de dados acadêmicos/científicos com resolução e robustez inéditos sobre a origem, evolução, ecologia histórica e redistribuição em cenários de mudanças climáticas para linhagens de diversos organismos dos biomas brasileiros, que subsidiem diretamente a elaboração de estratégias de conservação futuras eficientes para estes biomas num cenário crescente de mudanças climáticas. Neste sentido, a sub-rede biodiversidade pretende aglutinar um número cada vez maior de pesquisadores e instituições focados em seus objetivos, além de promover encontros entre especialistas com o objetivo de promover a troca de experiências, o compartilhamento de dados e a formulação de sínteses de aproveitamento imediato para formulação de políticas públicas na área da conservação do meio-ambiente e biodiversidade.

## Agradecimentos

Os autores são gratos ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) e Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pelo apoio através da Rede-Clima. A. Aleixo e A. L. Albernaz agradecem ao CNPq pelo apoio através do “Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) em Biodiversidade e Uso da Terra da Amazônia” (auxílio nº. 574008/2008-0). A. Aleixo recebe uma bolsa de produtividade em pesquisa do CNPq (auxílio nº. 310593/2009-3). C. E. V. Grelle agradece ao CNPq pelos auxílios e bolsa de produtividade e a FAPERJ pelo auxílio Jovem Cientista do Estado do Rio de Janeiro. M. M. Vale agradece ao CNPq pela bolsa de Pós-doutorado Júnior.

## Referências

- Aleixo A, 2010. “Incerteza taxonômica” na biodiversidade amazônica: por que resolvê-la é imprescindível para a conservação do bioma? In: Themoteo R (Ed.). *Cadernos Adenauer - Amazônia e desenvolvimento sustentável*. 4 ed. Rio de Janeiro: Fundação Konrad Adenauer. v. 10, p. 35-57.
- Antonelli A *et al.*, 2010. Molecular studies and phylogeography of Amazonian tetrapods and their relation to geological and climatic models. In Hoorn C & Wesselingh F (Ed.). *Amazonia, Landscape and Species Evolution: a look into the past*. Blackwell Publishing. p. 386-404.
- Carnaval AC *et al.*, 2009. Stability predicts genetic diversity in Brazilian Atlantic forest hotspot. *Science*, 323:785-789.
- Colinvaux PA, 1993. Pleistocene biogeography and diversity in tropical forests of South America. In: GoldBlatt, P (Ed.). *Biological relationships between Africa and South America*. New Haven: Yale University Press. p. 473-499.
- Grelle CEV *et al.*, 2009. Uma década de Biologia da Conservação no Brasil. *Oecologia Brasiliensis*, 13:420-433.
- Haffer J, 2008. Hypotheses to explain the origin of species in Amazonia. *Brazilian Journal of Biology*, 68:917-947.
- Marengo JA *et al.*, 2009. Global warming and climate change in Amazonia. In: Keller M *et al.*, (Ed.) *Amazonia and Global Change*. Washington DC: American Geophysical Union. v. 186, p. 262-273.
- Myers N *et al.*, 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403:853-858.
- Rabosky DL, 2010. Extinction rates should not be estimated from molecular phylogenies. *Evolution*, 64:1816-1824.
- Vale MM *et al.*, 2008. Effects of Future Infrastructure development on threat status and occurrence of amazonian birds. *Conservation Biology*, 22:1006-1015.
- Vonhof HB & Kaandorp RJG, 2010. Climate variation in Amazonia during the Neogene and the Quaternary. In: Hoorn C and Wesselingh F (Ed.). *Amazonia, Landscape and Species Evolution: a look into the past*. Blackwell Publishing. p. 201-210.

Recebido: Novembro 2010  
Primeira Decisão: Novembro 2010  
Aceito: Novembro 2010