

Uso de Modelos de Nicho Ecológico para Herpetofauna

Fabiana G. Barbosa^{1,*}, Priscila Lemes²

¹ Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC). Avenida Universitária, 1.105, CEP 88806-000, Criciúma, SC, Brasil.

² Departamento de Zoologia, Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista. Avenida 24A, 1.515, Jardim Bela Vista, CEP 13506-900, Rio Claro, SP, Brasil.

* Autor para correspondência, e-mail: fabibarbos@gmail.com

MODELOS DE NICHU ECOLÓGICO

Modelo de nicho ecológico, modelo de distribuição das espécies ou modelos de envelope bioclimático são diferentes nomenclaturas para modelos que relacionam a ocorrência da espécie com variáveis ambientais por meio de um método teórico-estatístico, gerando uma superfície de resposta com a probabilidade de ocorrência da espécie (Araújo e Peterson 2012; Rangel e Loyola 2012). Os modelos de nicho ecológico (MNEs) são cada vez mais utilizados para investigar a distribuição potencial das espécies (Alexandre *et al.* 2013; Barbosa e Schneck 2015; Vaz *et al.* 2015) a partir de uma medida de adequabilidade climática cujas projeções podem ser feitas tanto no tempo geológico quanto em cenários futuros de clima (Peterson *et al.* 2011). Os MNEs podem ser utilizados com o propósito de conservação da biodiversidade (Lemes e Loyola 2013), em estudos filogeográficos (Alvarado-Serrano e Knowles 2014), além de prever os impactos das mudanças climáticas globais nas espécies nativas (Anderson 2013) ou em invasoras (Giovannelli *et al.* 2008; Nori *et al.* 2011).

Para construir os MNEs são necessários um conjunto de dados de presença (e ausência, se houver) e outro de variáveis ambientais (Peterson *et al.* 2011). A questão fundamental é: *quando e onde* a espécie sobrevive (ou sobreviveu)? Ainda: quais

foram as *condições ambientais* nesses locais? A resposta depende exclusivamente da escala espacial e temporal dos dados disponíveis. A escala diz respeito à extensão e à resolução dos dados. A extensão é determinada pelo tamanho da área de estudo, enquanto que a resolução é definida pela distância mínima (espacial ou temporal) entre as observações e corresponde ao tamanho do pixel utilizado (Franklin 2009). Os modelos, geralmente, são construídos em uma resolução grosseira e podem não captar toda a variabilidade espacial de um componente climático ao longo de um gradiente ambiental (Lenoir *et al.* 2013). Geralmente, os registros de ocorrência são obtidos por meio de (exaustivas) buscas na literatura científica por dados já coletados em campo. Atualmente, existem grandes bancos de dados de registros de ocorrência de espécies como o Global Biodiversity Information Facility (GBIF) (www.gbif.org) e o SpeciesLink (<https://specieslink.cria.org.br>), dentre outros.

As variáveis ambientais mais frequentemente utilizadas são oriundas de dados refinados através de técnicas de interpolação (e.g., dados climáticos e de imagens de satélites; Hijmans *et al.* 2005; Bradley e Fleishman 2008; Andrew e Ustin 2009), como por exemplo, a cobertura e uso do solo, dados topográficos, índices de cobertura vegetal e tipos de vegetação. Os dados de clima ou modelos de circulação climática global são uma representação matemática dos processos físicos (atmosfera, oceano, criosfera, biosfera, uso da paisagem) e interações do sistema climático. Há pelo menos dois bancos de dados globais – o Worldclim (www.worldclim.org; Hijmans *et al.* 2005) e

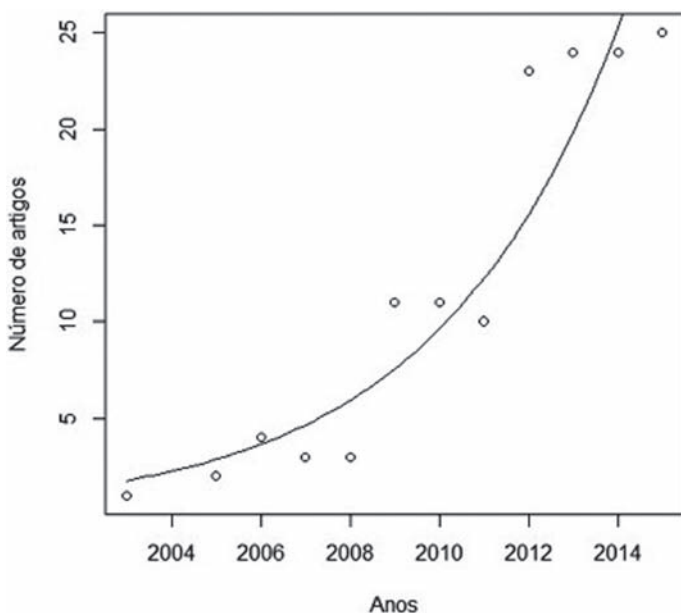


Figura 1: Número de artigos sobre o uso de Modelos de Nicho Ecológico para Herpetofauna (N = 141). Publicações de 2003 a 2015.

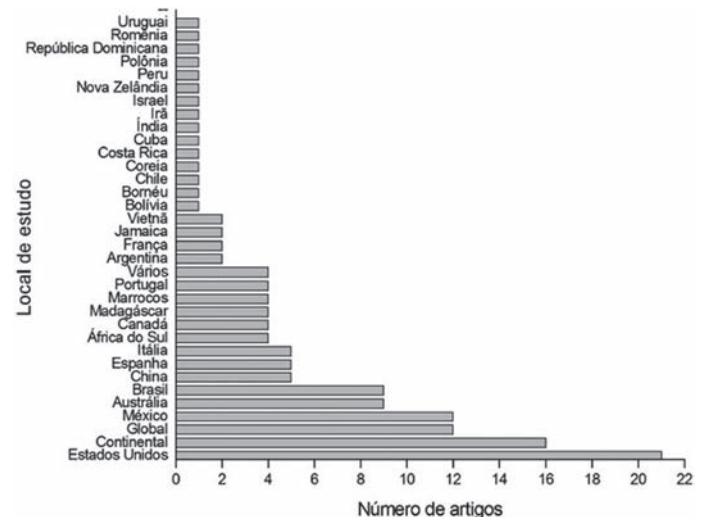


Figura 2: Número de artigos de acordo com o local de estudo. “Vários” inclui trabalhos que foram realizados em mais de um país.

o ecoClimate (<http://ecoclimate.org>; Lima-Ribeiro *et al.* 2015) que disponibilizam as 19 variáveis bioclimáticas de temperatura e precipitação e suas variações, como a temperatura média do quadrimestre mais chuvoso (BIO8). Na literatura, ainda é bastante limitada a definição dos pressupostos sobre a escolha das variáveis preditoras (Franklin 2009; Peterson *et al.* 2011), todavia, existem métodos que reduzem a autocorrelação entre os dados, como as Análises de Componentes Principais e as Análises Fatoriais (ver mais em Peterson *et al.* 2011).

Os MNEs podem ser construídos por meio de modelos mecânicos, correlativos ou híbridos (correlativos e mecânicos), porém, o uso mais comum são os MNEs correlativos (*i.e.*, Pacifici *et al.* 2015). Os MNEs mecânicos podem fornecer uma boa compreensão dos fatores que determinam os padrões de distribuição de espécies em grandes escalas espaciais (Hofmann e Todgham 2009), uma vez a distribuição geográfica é delimitada pelas restrições fisiológicas das espécies (Buckley *et al.* 2010). Os MNEs mecânicos utilizam, geralmente, dados provenientes de experimentos, por exemplo, de tolerância térmica (Casseiro *et al.* 2012), porém, existe uma dificuldade em adequar os limites estabelecidos experimentalmente à realidade das espécies na natureza. Ainda, existe dificuldade em definir quais parâmetros determinam a distribuição de uma espécie e, sobretudo, ainda faltam informações sobre fisiologia, plasticidade fenotípica e capacidade de adaptação evolutiva para a maioria das espécies.

Já os MNEs correlativos utilizam os registros de ocorrência das espécies para derivar funções que relacionam a probabilidade de ocorrência da mesma considerando o clima ou até mesmo outros fatores (já mencionados), como topografia e uso da terra (Franklin 2009; Peterson *et al.* 2011). Os MNEs correlativos são aplicados dentro de uma abordagem de envelope climático e avaliado se o nicho fundamental ocupado por uma espécie continuará, ou não, a existir na distribuição atual. O principal pressuposto dos MNEs, no entanto, é o equilíbrio espécie-clima atual e nem todas as condições climáticas sob as quais a espécie

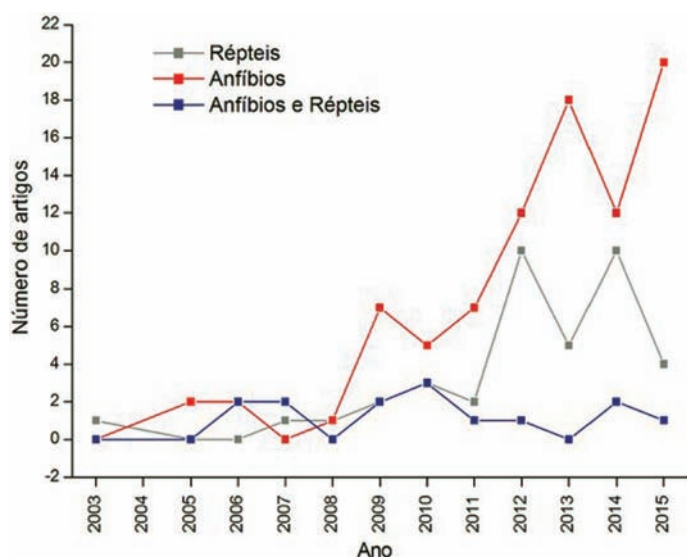


Figura 3: Variação temporal do número de artigos que estudaram os anfíbios, os répteis e ambos (anfíbios e répteis).

pode existir são incluídas no modelo (Peterson *et al.* 2011). Nos anos 80, pesquisadores da Austrália começaram a estudar a modelagem bioclimática para o propósito de entomologia aplicada (CLIMEX; Sutherst e Maywald 1985), depois desenvolveram o BIOCLIM (Busby 1991) e DOMAIN (Carpenter *et al.* 1993), também conhecidos como modelos de envelope climático.

Hoje, são mais de 17 métodos de modelagem que associam a ocorrência das espécies às variáveis ambientais (Naimi e Araújo 2016) e não há um consenso na literatura sobre o melhor método de modelagem preditiva ou a melhor forma de avaliá-los. Contudo, há uma abordagem promissora que têm sido frequentemente utilizada para estabelecer a direção das mudanças na distribuição das espécies considerando mais de um método na mesma solução – os modelos consensuais (*ensemble forecasting*; Araújo e New 2007). Os modelos consensuais combinam projeções geradas a partir de diferentes métodos de modelagem, com o intuito de encontrar regiões consensuais para as quais todos os métodos projetam presenças e ausências de espécies.

A avaliação do desempenho e a significância estatística dos MNEs talvez seja a fase mais crítica da construção do modelo, isso porque é necessário demonstrar que o modelo tem qualidade para projetar a distribuição potencial da espécie melhor do que o acaso (Peterson *et al.* 2011). Se as previsões de um modelo são as mesmas de uma previsão ao acaso, então tal modelo não é confiável. Nessa etapa, é necessário quantificar o desempenho entre as taxas de erro de omissão e comissão *versus* a significância do modelo (Franklin 2009; Peterson *et al.* 2011). Duas outras importantes distinções são entre a abordagem dependente do limiar (*i.e.*, sensibilidade, especificidade e kappa) e a independente do limiar (*i.e.*, ROC/AUC; para maiores detalhes veja Peterson *et al.* 2011; Lima-Ribeiro e Diniz-Filho 2013). O AUC é bem útil para avaliar o desempenho do modelo, contudo, a precisão da previsão é apenas uma medida de avaliação do modelo e a escolha da abordagem deve ser baseada no objetivo do estudo.

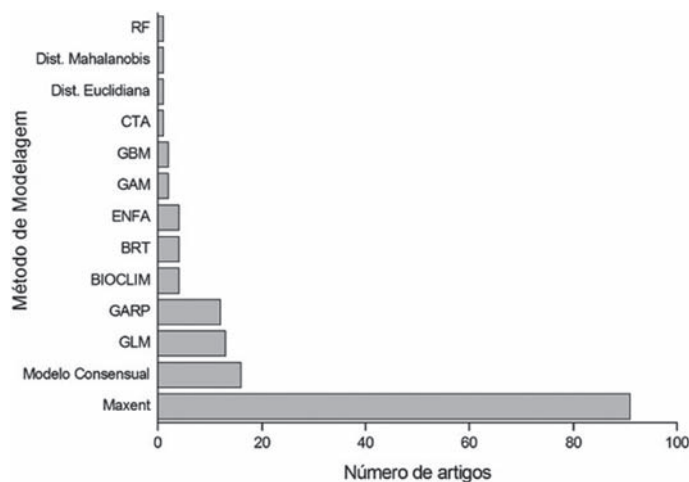


Figura 4: Número de artigos de acordo com o Método de Modelagem de Nicho Ecológico utilizado na Herpetofauna. RF = *Random Forest*, Dist. Mahalanobis = Distância de Mahalanobis, Dist. Euclidiana = Distância Euclidiana, CTA = *Classification and Regression Tree Models*, GBM = *Generalized Boosted Models*, GAM = *Generalized Additive Models*, ENFA = *Ecological Niche Factor Analysis*, BRT = *Boosted Regression Trees*, GARP = *Genetic Algorithm for Rule-Set Production*, GLM = *Generalized Linear Model*, Maxent = *Maximum Entropy*.

TENDÊNCIAS E LACUNAS SOBRE O USO DE MODELOS DE NICHO ECOLÓGICO PARA HERPETOFAUNA

Conduzimos uma análise cienciométrica para determinar as principais tendências e lacunas de estudos sobre o uso de modelos de nicho ecológicos (MNEs) para herpetofauna. Para isso, realizamos uma busca na base de dados *Thomson Web of Science* (www.webofknowledge.com) por artigos publicados até 2015 que apresentavam as seguintes combinações de palavras-chave: ["*species distribution model*"* or "*bioclimatic envelope model*"* or "*ecological niche model*"* or "*habitat suitability model*"*] and ["*herpetol*"* or "*reptile*"* or "*amphibian*"*]. Para cada artigo encontrado foram coletadas as seguintes informações: (i) ano de publicação, (ii) revista onde o artigo foi publicado, (iii) nacionalidade do primeiro autor, (iv) país onde o trabalho foi desenvolvido, (v) grupo taxonômico estudado (anfíbios, répteis ou ambos), (vi) método de modelagem utilizado e (vii) tema abordado no artigo.

Encontramos 141 artigos que utilizaram MNEs para herpetofauna no período de 2003 a 2015. O primeiro artigo é de 2003, sendo o número de publicações crescente ao longo dos anos ($z = 8,21$; $P < 0,001$; $N = 12$), especialmente nos últimos anos (Figura 1). O interesse por essa ferramenta pode ser explicado pela maior acessibilidade de programas de MNEs (Naimi e Araújo 2016), desenvolvimento de novas técnicas e métodos para sua avaliação e validação. Cada vez mais os MNEs têm sido utilizados para diversos grupos taxonômicos (e.g., Barbosa *et al.* 2012; Alexandre *et al.* 2013) para conhecer a distribuição geográfica das espécies em diferentes áreas da ecologia (Peter-son *et al.* 2011).

Desde a década de 90, os MNEs têm sido cada vez mais utilizados, porém, somente em 2003 foi publicado o primeiro artigo para anfíbios e répteis. Os artigos foram publicados em 66 revistas diferentes. Porém, a maior parte (77, 27%; 51 revistas) continha menos de três artigos publicados. Dentre as 15 revistas com frequência maior ou igual a três, as seguintes podem ser destacadas com frequência maior ou igual a oito artigos: *Plos One* (11 artigos), *Biodiversity and Conservation* (9), *Biological Conservation* (8) e *Diversity and Distributions* (8).

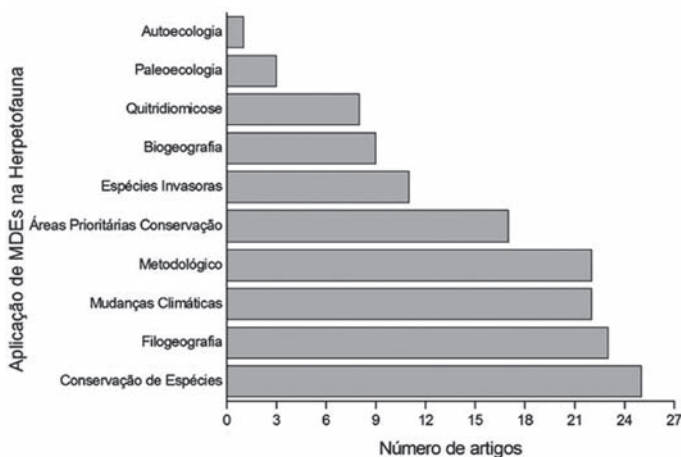


Figura 5: Número de artigos de acordo com a área de aplicação de Modelos de Nicho Ecológicos para herpetofauna.

Os artigos que utilizaram MNEs para herpetofauna foram realizados em 34 países diferentes (Figura 2). A grande maioria dos estudos foi realizada nos EUA (21 artigos), o que pode ser explicado pelo alto investimento em infraestrutura e pesquisa nesse país (Fazey *et al.* 2005). Também é possível notar um grande número de estudos realizados no México (12 artigos), muito embora os estudos continentais (16 artigos) e globais (12 artigos) também tenham sido bastante estudados.

Dentre os organismos, os anfíbios (87 artigos; $F = 9,32$; $P < 0,001$) foram os organismos mais estudados do que répteis (40 artigos) e ambos (anfíbios e répteis) (14 artigos) (Figura 3). A preferência pelos anfíbios, provavelmente, é devida à alta diversidade de espécies (Segalla *et al.* 2014) e disponibilidade de dados de ocorrência nos grandes bancos de dados (e.g., GBIF, SpeciesLink) e dados de extensão de ocorrência (IUCN 2015).

Treze métodos de modelagem foram utilizados nos artigos analisados (Figura 4). O MaxEnt foi o método mais popular entre os MNEs, aparecendo em 91 artigos, e esta preferência deve-se, provavelmente, à facilidade de uso e acesso ao programa. Os modelos consensuais também foram importantes métodos utilizados, com 16 artigos, seguido de GLM (*Generalized Linear Model*) (13 artigos) e GARP (*Genetic Algorithm for Rule-Set Production*) com 12 artigos.

Modelos de Nichos Ecológicos para herpetofauna foram aplicados em 10 áreas de pesquisa (Figura 5). A área de aplicação mais frequente está relacionada à conservação das espécies (25 artigos), seguidas de Filogeografia (23 artigos) e Metodológico e Mudanças Climáticas (ambos com 22 artigos). Este resultado mostra o interesse dos biólogos da conservação em utilizar essa ferramenta nos seus trabalhos e estabelecer estratégias de conservação e prioridades para a conservação, geralmente, para um grande número de espécies (Lemes e Loyola, 2013). Uma aplicação bastante promissora é a avaliação dos efeitos das mudanças climáticas sobre a distribuição geográfica das espécies. Cerca de 20% dos estudos projetaram a distribuição geográfica das espécies no futuro. Claro que prever como será a distribuição das espécies no futuro é, obviamente, complicado. Isso porque existem muitas incertezas acerca dos modelos, que vão desde a escolha do MNE, modelos de clima e avaliação do resultado, mas também acerca dos dados de ocorrência das espécies (Araújo e Guisan 2006, mas também veja Tassarolo *et al.* 2014).

Nossa análise cienciométrica mostrou um interesse crescente no uso de Modelos de Nicho Ecológico para herpetofauna, principalmente para o grupo dos anfíbios ao longo dos últimos anos. Em contrapartida, identificamos algumas lacunas que precisam ser preenchidas, como o número relativamente pequeno de estudos realizados conjuntamente com anfíbios e répteis e a inexistência de estudos em alguns países que abrigam as maiores biodiversidades do mundo.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à FAPESP (Fundação de Apoio à Pesquisa no Estado de São Paulo – Processos: 2014/22344-6) por financiamentos e bolsa pós-doutorado de P. Lemes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexandre, R.B., M.L. Lorini e C.E.V. Grelle. 2013.** Modelagem preditiva de distribuição de espécies ameaçadas de extinção: um panorama das pesquisas. *Oecologia Australis*, 17:483-508.
- Alvarado-Serrano, D.F. e L.L. Knowles. 2014.** Ecological niche models in phylogeographic studies: applications, advances and precautions. *Molecular Ecology Resources*, 14:233-248.
- Anderson, R.P. 2013.** A framework for using niche models to estimate impacts of climate change on species distributions. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1297:8-28.
- Andrew, M.E. e S.L. Ustin. 2009.** Habitat suitability modelling of an invasive plant with advanced remote sensing data. *Diversity and Distributions*, 15:627-640.
- Araújo, Miguel B. e A. Guisan. 2006.** Five (or so) challenges for species distribution modelling. *Journal of Biogeography*, 33:1677-1688.
- Araújo, M.B. e A.T. Peterson. 2012.** Uses and misuses of bioclimatic envelope modelling. *Ecology*, 93:1527-1539.
- Araújo M.B. e M. New. 2007.** Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology and Evolution*, 22:42-47.
- Barbosa, F.G. e F. Schneck. 2015.** Characteristics of the top-cited papers in species distribution predictive models. *Ecological Modelling*, 313:77-83.
- Barbosa, F.G., F.S. e A.S. Melo. 2012.** Use of ecological niche models to predict the distribution of invasive species: a scientometric analysis. *Brazilian Journal of Biology*, 72:821-829.
- Bradley, B.A. e E. Fleishman. 2008.** Can remote sensing of land cover improve species distribution modelling? *Journal of Biogeography*, 35:1158-1159.
- Buckley, L.B., M.C. Urban, M.J. Angilletta, L.G. Crozier, L.J. Rissler, M.W. Sears Can mechanism inform species' distribution models? *Ecology Letters*, 13:1041-1054.**
- Busby, J.R. 1991.** BIOCLIM-a bioclimate analysis and prediction system. *Plant Protection Quarterly*.
- Carpenter, G., A.N. Gillison e J. Winter. 1993.** DOMAIN: a flexible modelling procedure for mapping potential distributions of plants and animals. *Biodiversity & Conservation*, 2:667-680.
- Casemiro, F.A., S.F. Gouveia, J.A.F. Diniz-Filho. 2012.** Distribuição da *Rhinella granulosa*: integrando envelopes bioclimáticos e respostas ecofisiológicas. *Revista da Biologia*, 8:38-44.
- Fazey, I., J. Fischer e D.B. Lindenmayer. 2005.** What do conservation biologists publish? *Biological Conservation*, 124:63-73.
- Franklin, J. 2009.** *Mapping species distributions: spatial inference and prediction*. Cambridge University Press.
- Giovanelli, J.G.R., C.F.B. Haddad e J. Alexandrino. 2008.** Predicting the potential distribution of the alien invasive American bullfrog (*Lithobates catesbeianus*) in Brazil. *Biological Invasions*, 10:585-590.
- Hijmans, R.J., S.E. Cameron, J.L. Parra, P.G. Jones e A. Jarvis, 2005.** Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25:1965-1978.
- Hofmann, G.E. e A.E. Todgham. 2010.** Living in the now: physiological mechanisms to tolerate a rapidly changing environment. *Annual Review of Physiology*, 72:127-145.
- IUCN 2015.** *The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2015-4*. <www.iucnredlist.org>. Downloaded on 1st March 2016.
- Lemes, P. e Loyola, R.D. 2013.** Accommodating species climate-forced dispersal and uncertainties in spatial conservation planning. *PLoS ONE*, 8:e54323.
- Lenoir, J., B.J. Graae, P.A. Aarrestad, I.G. Alsos, W.S. Armbruster, G. Austrheim, C. Bergendorff, H.J.B. Birks, K.A. Bråthen, J. Brunet, H.H. Bruun, C.J. Dahlberg, G. Decocq, M. Diekmann, M. Dynesius, R. Ejrnaes, J. Grytnes, K. Hylander, K. Klanderud, M. Luoto, A. Milbau, M. Moora, B. Nygaard, A. Odland, V.T. Ravolainen, S. Reinhardt, S.M. Sandvik, F.H. Schei, J.D.M. Speed, L.U. Tveraabak, V. Vandvik, L.G. Velle, R. Virtanen, Martin Zobel e J. Svenning. 2013.** Local temperatures inferred from plant communities suggest strong spatial buffering of climate warming across Northern Europe. *Global Change Biology*, 19:1470-1481.
- Lima-Ribeiro M.S., S. Varela, J. González-Hernández, G. Oliveira, J.A.F. Diniz-Filho, A.T. Peterson, L.C. Terribile. 2015.** *The ecoClimate Database*. <http://ecoclimate.org>, accessed <March 28th, 2016>.
- Lima-Ribeiro, M.S. e J.A.F. Diniz-Filho. 2013.** *Modelos ecológicos e a extinção da megafauna: clima e homem na América do Sul*. CUBO, São Carlos.
- Nabout, J.C., L.M. Bini, J.A.F. Diniz-Filho, J.A.F. 2010.** Global literature of fiddler crabs, genus *Uca* (Decapoda, Ocypodidae): trends and future. *Iheringia Série Zoologia*, 100:463-468.
- Naimi, B. e M.B. Araújo. 2016.** sdm: a reproducible and extensible R platform for species distribution modelling. *Ecography* (early view).
- Nori, J., J. Urbina-Cardona, R.D. Loyola, J.N. Lescano, G.C. Leynard. 2011.** Climate change and American Bullfrog invasion: what could we expect in South America. *PLoS ONE*, 6:e25718.
- Pacifici, M., W.F. Foden, P. Visconti, J.E.M. Watson, S.H.M. Butchart, K.M. Kovacs, B.R. Scheffers, D.G. Hole, T.G. Marin, H.R. Akçakaya, R.T. Corlett, B. Huntley, D. Bickford, J.A. Car, A.A. Hoffmann, G.F. Midgley, P. Pearce-Kelly, R.G. Pearson, S.E. Williams, S.G. Willis, B. Young e C. Rondinini. 2015.** Assessing species vulnerability to climate change. *Nature Climate Change*, 5:215-224.
- Rangel, T.F. e R.D. Loyola. 2012.** Labeling ecological niche models. *Natureza & Conservação* 10:119-126.
- Segalla, M.V., U. Caramaschi, C.A.G. Cruz, T. Grant, C.F.B. Haddad, J.A. Langone, P.C.A. Garcia. 2014.** Brazilian Amphibians: List of Species. *Herpetologia Brasileira*, 3:37-48.
- Sutherst R.W. e G.E. Maywald. 1985.** A computerised system for matching climates in ecology. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 13:281-299.
- Tessarolo G., T.F. Rangel, M.B. Araújo e J. Hortal. 2014.** Uncertainty associated with survey design in Species Distribution Models. *Diversity and Distributions*, 20:1258-1269.
- Vaz, U.L., H.F. Cunha e J.C. Nabout. 2015.** Trends and biases in global scientific literature about ecological niche models. *Brazilian Journal of Biology*, 75:17-24.



Ameerega trivittata, Tarauaca, AC. Foto: Paulo Bernarde.