



## I SIMPÓSIO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO

Integrando conhecimentos científicos em defesa do Velho Chico

---

### **Aplicação da modelagem de distribuição geográfica potencial para macrófitas aquáticas: um estudo de caso com a invasora *Egeria densa* Planch. no rio São Francisco**

*Edson Gomes de Moura Júnior*<sup>\*1,2</sup>; *Renato Garcia Rodrigues*<sup>1</sup>; *José Pires de Lemos Filho*<sup>2</sup>; *William Sveri*<sup>3</sup> & *Luciana H. Yoshino Kamino*<sup>4</sup>

#### **RESUMO**

A modelagem de distribuição geográfica potencial tem sido uma ferramenta ecológica útil no manejo de espécies invasoras. Entretanto, os estudos de modelagem com macrófitas aquáticas ainda seguem paradigmas metodológicos voltados às plantas terrestres, como por exemplo, a utilização de registros obtidos de metadados e camadas ambientais bioclimáticas. Assim, o presente estudo objetivou avaliar a aplicabilidade da modelagem para macrófitas aquáticas, baseando-se no confronto de modelos que seguem ou não aos paradigmas metodológicos indicados para plantas terrestres, sendo a invasora *Egeria densa* utilizada como objeto de estudo no rio São Francisco. Foram confrontados: (i) modelos computados com registros obtidos em campo ou metadados; (ii) modelos computados com preditores ambientais bioclimáticos ou limnológicos. Os resultados mostraram que os paradigmas indicados para plantas terrestres não se aplicam para macrófitas aquáticas. A deriva de propágulos atrelada à incerteza da veracidade dos registros de *E. densa* influenciaram negativamente no desempenho dos modelos computados com metadados. O discreto gradiente latitudinal da área de estudo constituiu-se em um sistema bioclimático homogêneo pouco atuante na distribuição da espécie. Ficou evidente que a modelagem pode ser utilizada como uma ferramenta para o manejo de macrófitas invasoras, desde que respeitado determinadas premissas metodológicas e biológicas desses organismos.

**Palavras-chave:** Bioinvasão, limnologia, Maxent;

<sup>1</sup>Núcleo de Ecologia e Monitoramento Ambiental (NEMA), Universidade Federal do Vale do São Francisco, Petrolina, PE, Brasil.

<sup>2</sup>Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Biologia, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>3</sup>Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Engenharia de Pesca, Recife, PE, Brasil.

<sup>4</sup>Instituto Prístino, Belo Horizonte, MG, Brasil.

\* Autor Correspondente: mourajunioreg@gmail.com

## INTRODUÇÃO

A modelagem de distribuição geográfica potencial é um procedimento determinado por algoritmo matemático que otimiza (correlaciona) locais de ocorrência de uma espécie alvo com informações ambientais desses locais e, a partir dessas correlações, indica em uma base cartográfica os ambientes adequados à manutenção dessa população (Guisan e Thuiller 2005).

Nesse contexto, os modelos de distribuição geográfica potencial têm sido amplamente utilizados como uma ferramenta para direcionar estudos em biogeografia ou biologia da conservação e mudanças climáticas (Guisan e Thuiller 2005). Diante do crescente processo de degradação do meio abiótico do rio São Francisco e, conseqüentemente, dos danos ecológicos e sociais causado pelo crescimento desordenado de macrófitas aquáticas invasoras (Moura-Júnior *et al.* 2011; Siqueira-Filho 2012), a modelagem de distribuição geográfica potencial poderá prevenir eventos de bioinvasão dessas plantas, auxiliando, conseqüentemente, na conservação dos recursos hídricos do rio.

Todavia, os trabalhos sobre modelagem têm preconizado as espécies vegetais terrestres. Por isso, os paradigmas metodológicos dos estudos sobre modelagem de macrófitas aquáticas seguem àqueles estabelecidos para plantas terrestres, os quais ainda necessitam de investigação quanto a sua aplicabilidade para as macrófitas (Cacian e Camargo 2011). Os estudos sobre modelagem de plantas terrestres tem otimizado registros obtidos em metadados com camadas ambientais bioclimáticas, exportadas do banco de dados do BioClim. Embora esses modelos tenham evidenciado resultados pertinentes sobre a distribuição de espécies terrestres, a aplicação desse conjunto de dados bióticos ou ambientais para a modelagem de macrófitas aquáticas ainda necessita de investigação.

Assim, o objetivo do presente estudo foi avaliar a aplicação da modelagem de distribuição geográfica potencial para macrófitas aquáticas, baseando-se no confronto de modelos que seguem ou não aos paradigmas metodológicos indicados para plantas terrestres, sendo a invasora *Egeria densa* utilizada como objeto de estudo no rio São Francisco. Para tanto, foram comparados: (i) modelos computados com registros obtidos em campo ou de coleções de botânicas e/ou artigos científicos (metadados); (ii) modelos computados com preditores ambientais de diferentes categorias (bioclimáticas do banco de dados BioClim x limnológicas aferidas em campo).

## METODOLOGIA

O presente estudo foi desenvolvido nos trechos médio, sub-médio, e baixo do rio São Francisco, onde se encontram cinco Usinas Hidroelétricas (UHE) distribuídas em cascata: Sobradinho, Itaparica, Moxotó, Paulo Afonso e Xingó (Figura 1).

Os registros de ocorrência de *E. densa* foram obtidos a partir de 12 expedições a campo realizadas trimestralmente entre outubro de 2006 e outubro de 2009, sendo seis dessas expedições realizadas no período de cheia e seis no período de vazante do rio. Paralelamente, foram obtidos registros da espécie a partir de informações de herbários brasileiros (Specieslink 2015) e artigos científicos desenvolvidos na área de estudo.

Durante as expedições a campo, foram coletados também dados limnológicos de condutividade, oxigênio dissolvido, pH, temperatura, transparência, turbidez, clorofila, feofitina, nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal, fosfato inorgânico e fósforo total, sendo esses aferidos ao longo de 69 pontos amostrais (Figura 1).

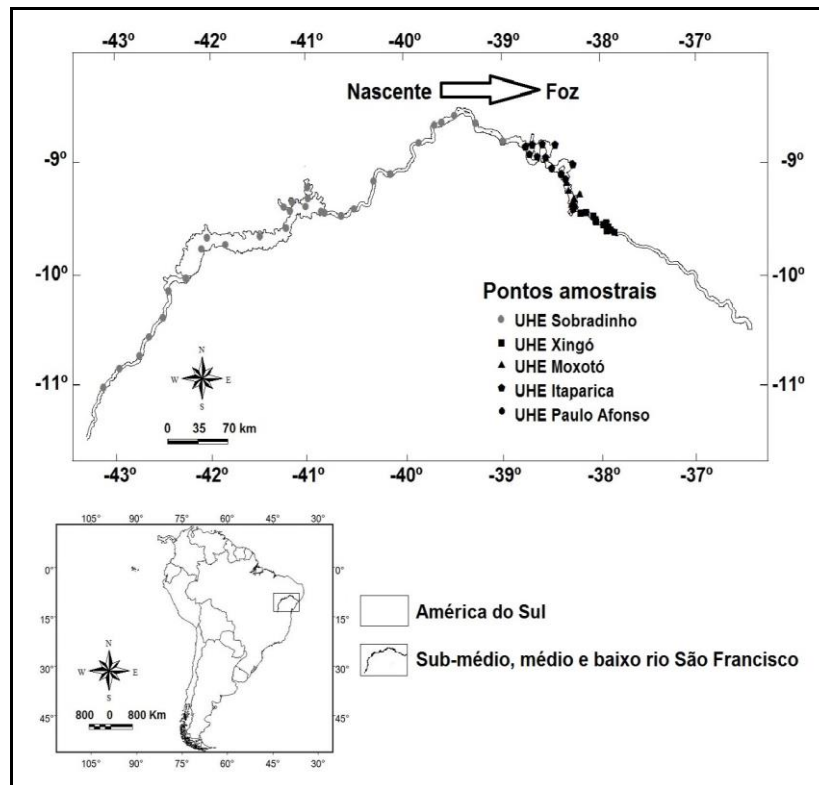


Figura 1 – Localização geográfica da área de estudo e dos pontos amostrais alocados nas UHE's dos trechos médio (em cinza) e sub-médio e baixo (em preto) do rio São Francisco. Pontos de aferição dos dados limnológicos no sentido nascente foz do rio.

Os dados dessas variáveis limnológicas foram interpolados e, posteriormente, transformados em camadas ambientais aquáticas com resolução espacial de 1 km<sup>2</sup>. As camadas ambientais bioclimáticas (temperatura ou precipitação) foram exportadas do banco de dados do WorldClim 7, para uma resolução de 1 km<sup>2</sup> (Hijmans *et al.* 2005).

Para a realização da modelagem foi utilizado o procedimento de otimização, o qual relacionou os registros de ocorrência da espécie com as camadas ambientais bioclimáticas do BioClim e/ou limnológicas. O algoritmo Maxent foi o escolhido para computar os procedimentos de otimização, sendo esses realizados no software Maxent 3.3.2 (Phillips *et al.* 2006). O algoritmo Maxent tem se mostrado eficiente (com bons índices de acurácia) na modelagem exploratória, cujos dados de presença estejam entre cinco e 20 registros (Kamino 2009). Para cada conjunto de pontos e camadas ambientais testados foram realizados 10 procedimentos de otimização (teste interno), com diferentes combinações de pontos treino (~70%) e testes (~30%), sendo essas combinações realizadas aleatoriamente pelo software Maxent (versão 3.3.2). Os valores médios do teste interno foram considerados resultados de cada modelo.

O método utilizado para confrontar o desempenho de modelos foi o teste binomial, o qual é reconhecido como o melhor método de comparação de desempenho entre modelos com o mesmo conjunto dos registros da espécie alvo e camadas ambientais (Phillips *et al.* 2004, 2006). Esse teste avalia se o modelo apresenta desempenho distinto do acaso, baseando-se no tamanho da área indicada como adequada para a presença da espécie (dentro limite de corte – *Threshold*) e no

número de erros causados por omissão não prevista pela modelagem (Phillips *et al.* 2004, 2006). Os testes binomiais foram realizados no *software* BioEstat 5.0 (Ayres *et al.* 2007).

## RESULTADOS e DISCUSSÃO

Os valores de  $p$  dos testes binomiais obtidos a partir dos modelos computados para *E. densa* evidenciaram que aqueles gerados a partir de registros de herbário ou informação de trabalhos científicos obtiveram desempenho insatisfatório ( $p > 0.05$ ) e inferior àqueles computados a partir de dados obtidos em campo (Tabelas 1). Foram constatados 7 erros causados por omissão, dos quais cinco foram para modelos computados a partir de registros obtidos de metadados.

Embora tenhamos conferido a identificação taxonômica e confirmado a acurácia e exatidão das coordenadas geográficas referenciadas para os espécimes de *E. densa* citados em herbários/artigos, a presença desses espécimes pode não representar seus ambientes originais, em função da capacidade de deriva desses organismos. Muitas vezes macrófitas fixas ao solo fragmentam-se, sendo conduzida pela correnteza até regiões a jusante do seu habitat natural (Bernard *et al.* 1998; Sousa *et al.* 2009). Dessa forma, o baixo desempenho dos modelos computados para *E. densa* com registros de herbário e/ou artigos científicos (todos não satisfatórios) frente aqueles gerados a partir de registros de campo (todos satisfatórios) pode ser explicado pela falta de informações que comprovem que os espécimes citados em herbário ou artigos estivessem fixos ao solo no momento em que foram coletados, diferente dos nossos dados bióticos de campo.

Os resultados dos modelos computados com registros de herbário/artigo científico se contrapõem a determinadas premissas estabelecidas para a modelagem de plantas terrestre. A principal diferença dos registros obtidos para plantas terrestres ou macrófitas aquáticas está na capacidade de deslocamento dos espécimes dessas plantas, que são incomuns nas plantas terrestres (sem considerar a dispersão de sementes) e comuns para as aquáticas, como mencionado anteriormente.

Os modelos computados para *E. densa* a partir de preditores bioclimáticos apresentaram desempenho inferior quando comparado aqueles gerados de preditores limnológicos (Tabela 1). Diante da diversidade de preditores ambientais utilizados na modelagem de espécies de angiospermas terrestres, os bioclimáticos são predominantes nesses estudos (Pearson *et al.* 2004; Broennimann *et al.* 2007; Santana *et al.* 2008; Kamino 2009), o que pode ser considerado um contraponto aos resultados dos nossos modelos computados com preditores limnológicos.

Áreas de estudo com acentuado gradiente latitudinal apresentam sistemas bioclimáticos heterogêneos, o que influencia drasticamente na distribuição geográfica de macrófitas aquáticas, enquanto que regiões com discretos gradientes latitudinais apresentam condições bioclimáticas (temperatura e precipitação) semelhantes e, conseqüentemente, fitofisionômicas homogêneas (Moura-Junior *et al.* 2015). Em contrapartida, alguns estudos têm apontado que as características abióticas da água podem apresentar variações marcantes entre ambientes e/ou ecossistemas inseridos em uma mesma faixa latitudinal, influenciando de forma efetiva na ocorrência das espécies (Moura-Junior *et al.* 2015).

Levando-se em consideração que a variação latitudinal da área de estudo foi pequena (menor que 2°) podemos inferir que a variabilidade bioclimática da região foi pequena e, por isso, os preditores bioclimáticos apresentaram baixa explicabilidade quando comparado aos limnológicos, nos modelos computados para *E. densa* no rio São Francisco. Nesse contexto, pode-se inferir que os

melhores preditores são aqueles que apresentam variação na área de estudo, sendo os limnológicos bons preditores para estudos desenvolvidos em escala local.

Tabela 1 – Resultados dos modelos computados para a espécie *E. densa* no rio São Francisco, Brasil.

Modelos	Registros da espécie	Área (km <sup>2</sup> )	Erros	Teste Binomial	
				P	Poder (0.05)
Bioclim	Herbário/artigos	8234	2	0.0517	0.68
Bioclim	Campo	6603	1	0.0118	0.89
Limnológicos	Herbário/artigos	5980	3	0.1442	0.14
Limnológicos	Campo	5426	1	< 0.0001	1

## CONCLUSÃO

A partir dos resultados do presente estudo ficou evidente que a modelagem de distribuição geográfica potencial pode ser utilizada como uma ferramenta para o manejo de macrófitas aquáticas invasoras e conservação de recursos hídricos, desde que respeitadas determinadas premissas metodológicas e biológicas específicas para esses organismos. Dentre as premissas, podemos destacar que os registros da espécie devem ser baseados apenas em informações de campo, nunca de metadados (não confiáveis para essas plantas) e que os melhores preditores são aqueles que apresentam variação na área de estudo (os limnológicos parecem bons preditores para estudos em escala local). Vale ressaltar que esse estudo é pioneiro sobre investigações críticas sobre modelagem de macrófitas aquáticas e, dessa forma, ainda necessita de replicações para ser considerado um novo paradigma acerca dessa temática.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF) pelo financiamento do projeto e a Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão parcial da bolsa de doutoramento do primeiro autor.

## REFERÊNCIAS

- AYRES, M.; AYRES, M.J.; AYRES D.L.; SANTOS S.A. (2000). *Bioestat 2.0: aplicações estatísticas nas áreas das ciências biológicas e médicas*. Sociedade Civil Mamirauá/CNPq, Brasília – DF.
- BERNARD, C.; MOUILLOT F.; CHRISTOPHE, H.P. (1998). Flood drift and propagule bank of aquatic macrophytes in a riverine wetland. *Journal of Vegetation Science* 9, pp. 631-640.
- BROENNIMANN, O.; TREIER, U.A.; MÜLLER-SCHÄRER, H.; THUILLER, W.; PETERSON, A.T.; GUIGAN A. (2007). Evidence of climatic niche shift during biological invasion. *Ecology Letters* 10(8), pp. 701-709.
- CANCIAN, L.F.; CAMARGO, A.F.M. (2011). Utilização de Sistemas de Informações Geográficas, softwares e algoritmos de modelagem para geração de modelos de distribuição geográfica potencial de espécies de macrófitas aquáticas em bacias hidrográficas. *Boletim ABLimno* 39, pp. 1-10.

- GUISAN, A.; THUILLER, W. (2005). Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters* 8, pp. 993 – 1009.
- HIJMANS, R.J.; CAMERON, S.E.; PARRA, J.L.; JONES, P.G.; JARVIS, A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25, pp. 1965-1978.
- KAMINO, L.H.Y. (2009). Modelos de distribuição geográfica potencial: aplicação com plantas ameaçadas de extinção da floresta atlântica. *Tese de doutorado em Biologia Vegetal* (Universidade Federal de Minas Gerais).
- MOURA-JÚNIOR, E.G.; PAIVA, R.M.S.; FERREIRA, A.C.; PACOPAHYBA, L.D.; TAVARES A.S.; FERREIRA, F.A.; POTT, A. (2015). Updated checklist of aquatic macrophytes from Northern Brazil. *Acta Amazonica* 45, pp. 111 – 132.
- MOURA-JÚNIOR, E.G.; ABREU, M.C.; SEVERI, W.; LIRA, G.A.S.T. (2011). O gradiente rio-barragem do reservatório de Sobradinho afeta a composição florística, riqueza e formas biológicas das macrófitas aquáticas? *Rodriguésia* 62, pp. 731-742.
- PEARSON, R.G.; PEARSON, R.G.; RAXWORTHY, C.J.; NAKAMURA, M.; PETERSON, A.T. (2007). Predicting species' distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography* 34, pp. 102-117.
- PHILLIPS, S.J.; ANDERSON, R.P.; SCHAPIRED, R.E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190, pp. 231-259.
- PHILLIPS, S.J.; DUDÍK, M.; SCHAPIRE, R.E. (2004). A maximum entropy approach to species distribution modeling. In: International Conference on Machine Learning (ed.). *Proceedings of the 21st International Conference on Machine Learning*. ACM Press, New York, 2004, 1, pp. 655-662.
- SANTANA, F.S.; DE SIQUEIRA, M.F.; SARAIVA, A.M.; CORREA P.L.P. (2008). A reference business process for ecological niche modelling. *Ecological Informatics* 3(1), pp. 75-86.
- SIQUEIRA-FILHO (2012). *A Flora das Caatingas do Rio São Francisco: história natural e conservação*. Andrea Jakobsson Estúdio Editorial, Rio de Janeiro – RJ.
- SOUSA, W.T.Z.; THOMAZ, S.M.; MURPHY, K.J.; SILVEIRA, M.J.; MORMUL, R.P. (2009). Environmental predictors of the occurrence of exotic *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle and native *Egeria najas* Planch. in a sub-tropical river floodplain: the Upper River Paraná, Brazil. *Hydrobiologia* 632, pp. 65-78.
- SpeciesLink. (2015). Lista de espécies da flora do Brasil, (<http://www.splink.org.br/index?lang=pt>). Acesso em 20/04/2015.