

MODELAGEM NÃO-LINEAR PARA A SELEÇÃO DE ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA CONSERVAÇÃO

Dr. Bryon Richard Hall

Instituto de Matemática e Estatística, UFG
74001-970, Goiânia, GO
E-mail bryon@mat.ufg.br

Dr. Geci José Perreira da Silva

Instituto de Matemática e Estatística, UFG
74001-970, Goiânia, GO
E-mail geci@mat.ufg.br

Dr. Laerte Guimarães Ferreira Jr.

Instituto de Estudo Ambientais, UFG
74001-970, Goiânia, GO
E-mail laerte@iesa.ufg.br

Dra. Maria Socorro Duarte da Silva Couto

Instituto de Matemática e Estatística, UFG
74001-970, Goiânia, GO
E-mail socorro_dsc@hotmail.com

Resumo: *A modelagem matemática da qualidade do meio ambiente e consequente conservação da biodiversidade tem se limitada à linearização dos fatores relevantes, motivado principalmente pelo uso de software comercial para realização deste trabalho. Isso levou à grande limitação na modelagem realizada, com exclusão de fatores não linearizáveis. Propomos usar programação não-linear num digrafo onde cada nó corresponde a uma área remanescente a ser incluída ou não numa proposta de conservação. O programa resultante, implementado em Scilab, se mostra muito eficiente e abre a possibilidade de programação não-linear ser mais amplamente usado.*

A criação do primeiro parque brasileiro, o Parque Nacional de Itatiaia, em 1937, representou a materialização de longos anos de debates e mobilizações que só se efetivaram após a introdução da figura da unidade de conservação na legislação brasileira pelo antigo Código Florestal (Decreto nº 23.793, 1934). Ao todo, desde 1960 ocorreu um processo de rápida expansão do sistema viário e crescimento de aglomerados urbanos no interior do país. Até o final do século XX já acumulava evidência de existir uma forte degradação nos biomas Amazonas, Mata Atlântica, Cerrado e Caatinga. A partir de 2001, o governo federal começou a criar novas unidades de conservação conforme as sugestões do PROBIO. O bioma Cerrado, que nas últimas quatro décadas, em função dos avanços tecnológicos e baixo custo da terra, sofreu grande ação antrópica, no qual grande parte foi transformada em áreas de pastagem e agricultura. Estudos recentes, com base em dados de sensoriamento remoto, estimaram uma perda de 39,5% a 55% da cobertura vegetal nativa do Cerrado ([4] e [5]).

A modelagem matemática da existência de biodiversidade e de avaliação de propostas de conservação foi realizada ao longo destes anos pela Programação Linear, por motivo principal da facilidade de sua implementação.

Apesar de seu caráter pioneiro e rigor técnico científico, o uso de métodos de programação linear não permite a incorporação de critérios potencialmente úteis à tomada de decisão como, por exemplo, em relação à distância e a conectividade entre os remanescentes, aos processos ecológicos e à fragmentação do *habitat*, os quais são baseados nos princípios da dinâmica e de outros processos não-lineares ([2] e [3]).

Outra limitação dos métodos de programação linear diz respeito à definição da função-objetivo do modelo, a qual não permite fazer uma análise de sensibilidade a partir da variação dos parâmetros dos objetos de conservação, de tal forma a encontrar soluções alternativas, por meio da geração de vários cenários.

Especificamente, o modelo que será apresentado neste trabalho busca responder às seguintes perguntas de pesquisa:

1. A seleção de áreas prioritárias para conservação do Cerrado goiano envolvendo interações não-lineares é um método alternativo eficiente de seleção?
2. O uso de dados biológicos, juntamente com dados ambientais, gera soluções mais viáveis que àquelas baseadas apenas em indicadores ambientais?
3. As unidades de análise "naturais" são mais adequadas para a seleção de áreas prioritárias?
4. É possível fazer a conectividade entre diferentes áreas prioritárias com vistas à formação de mosaicos e/ou corredores que maximizam o potencial de conservação?

Assim, será formulado um problema de seleção de áreas prioritárias para conservação como um problema de programação não-linear, onde a função-objetivo consiste em minimizar o número de áreas prioritárias, minimizando a soma das distâncias entre as áreas selecionadas, ao mesmo tempo em que maximiza a qualidade total. Em seguida, será implementado um algoritmo computacional heurístico para determinar soluções deste problema, uma vez que, com áreas mais aglomeradas, tem-se uma melhora na viabilidade ecológica, no custo de conservação e na redução dos atritos entre a conservação da biodiversidade e o desenvolvimento sócio-econômico regional [1]. A expectativa neste caso é de que, ao anexar a não-linearidade na estrutura do problema, seja possível obter um modelo matemático de seleção de áreas prioritárias para o estado de Goiás com soluções mais viáveis dentro dos critérios ecológicos, econômicos e políticos envolvidos.

Para determinar a conectividade das bacias selecionadas na escolha de áreas prioritárias, será utilizado a seguinte modelagem. Cada fragmento de remanescente será representado por um nó de digrafo, com as arestas entre nós correspondentes a vínculos fluviais devidamente orientados. Será procurada uma solução ótima de fragmentos remanescentes como elementos de bacias conectadas, isto é, a solução final consiste de um conjunto mínimo de bacias que, além de fazer a cobertura dos objetos de conservação propostos, gere corredores ecológicos com a finalidade de maximizar o potencial de conservação.

Formula-se um modelo de programação não-linear (PNL), que seleciona um conjunto de bacias hidrográficas com índice de importância $B(l) \in [0, 1]$, o qual indica a importância de inclusão da bacia l com propósito de preservação, dentre as 1511 bacias hidrográficas maiores ou iguais a 9.500 ha situadas no estado de Goiás.

A importância de inclusão de uma bacia l depende dos fragmentos remanescentes que nela estejam. Ou seja, a inclusão de uma bacia está associada à qualidade ou importância de inserção de seus fragmentos de vegetação remanescentes (ou simplesmente fragmentos remanescentes) na proposta de conservação. Desta forma, associa-se a cada fragmento de remanescente i um parâmetro de qualidade/importância $\alpha(i) \in [0, 1]$. O valor de $\alpha(i)$ varia de acordo com os seguintes indicadores/dados ambientais e dados de espécies:

1. áreas grandes de remanescentes próximas às nascentes dos rios;
2. maior número de remanescentes em ambientes ripários (*buffer* de 100m ao longo da linha de drenagem);
3. compacidade dos remanescentes (mínimo de perímetro externo/área);
4. preço da terra, valor do PIB e do IDH (associados ao fragmento remanescente dentro da bacia);
5. conectividade e adjacência das áreas dos remanescentes i ;

6. áreas remanescentes sem interseção de rodovia;
7. afastamento do fragmento do ponto final da sub-região hídrica;
8. observação de espécies (presença ou ausência).

Consideramos como sendo sub-região hídrica o conjunto de bacias que tem em comum uma linha de drenagem principal.

A seleção de áreas prioritárias para conservação consiste, em princípio, do processo de escolher o nó de digrafo, que corresponde ao centróide de cada fragmento remanescente i dentro da bacia, e associar a ele um valor $\alpha(i) \in [0, 1]$, atribuindo-lhe um valor de importância relativa ao objetivo de conservação.

Cada nó do digrafo está associado a uma matriz que contém as seguintes informações a respeito do fragmento de remanescente associado:

- nf = identificação do fragmento remanescente;
- nb = identificação da bacia;
- a_i = área do fragmento remanescente i ;
- b_i = área do *buffer* do fragmento remanescente i dentro da bacia;
- e_{ij} = vetor de presença ou ausência de espécie j dentro do fragmento remanescente i ;
- P_i = preço da terra correspondente ao município que contém o fragmento i ;
- Q_i = PIB correspondente ao município que contém o fragmento i ;
- I_i = IDH correspondente ao município que contém o fragmento i ;
- p/a_i = razão entre o perímetro e a área do fragmento remanescente i ;
- r_i = índice de interseção (0, $\frac{1}{2}$ ou 1) do fragmento remanescente i com a rodovia;
- R = sub-região hídrica a qual pertence o fragmento remanescente;
- d_i = distância de saída da sub-região hídrica, isto é, o número de fragmentos remanescentes que estão rio abaixo do fragmento i até o ponto final da linha de drenagem. Esta variável está relacionada com a posição dos remanescentes dentro da sub-região que o contém;
- m_i = identificação do fragmento remanescente i mais próximo rio abaixo;
- M_i = identificação do fragmento remanescente i mais próximo rio acima;
- $\alpha(i)$ = variável de qualidade/importância de inclusão do fragmento remanescente i em proposta de conservação. Esta variável tem valor inicial de zero e varia ao longo do algoritmo. A determinação de seu valor é a finalidade do algoritmo;
- $\beta(i)$ = variável que reflete a existência de fragmentos remanescentes adjacentes ao fragmento i na proposta de conservação. Esta variável reflete a importância da vizinhança na solução do problema, que favorece a conectividade entre os fragmentos remanescentes.

Para otimizar a proposta de conservação da biodiversidade deseja-se minimizar certas variáveis e maximizar outras. Baseada na literatura [2,3], propõe-se uma função não-linear de variáveis a_i , b_i , P_i , Q_i , I_i , p/a_i , r_i , d_i , e_i , $\alpha(i)$ e $\beta(i)$ e de parâmetros de peso c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , c_5 , c_6 , c_7 , c_8 , c_9 , e c_{10} .

Estes parâmetros poderão ser alterados para atribuir importância maior ou menor aos diversos fatores envolvidos na função-objetivo.

Portanto, propõe-se o seguinte modelo de PNL:

$$\begin{aligned} \text{Min } \sum & \left[-\left(\frac{c_1}{P_i} + \frac{c_2}{Q_i} + \frac{c_3}{I_i} \right) \cdot (1 - \alpha(i)) a_i - c_4 (1 - \alpha(i)) b_i + c_5 \cdot \left(\frac{p_i}{a_i} \right) - c_6 \cdot \beta(i) + \right. \\ & \left. c_7 \cdot r_i - c_8 \cdot d_i + \frac{c_9 \alpha_i^T D \alpha_i}{(g^2(i) - g(i))} - c_{10} \cdot e_i \right] \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{s. a. } \sum \alpha(i) \cdot a_i \geq K$$

A função-objetivo do modelo (1) minimiza as variáveis: preço de terra, PIB, IDH, interseção com rodovia, razão do perímetro/área e a distância entre as áreas a serem preservadas; ao mesmo tempo, maximiza as variáveis: área de *buffer* e de remanescente, a distância de saída da sub-região. A distância minimizada se refere aos fragmentos remanescentes da mesma sub-região. D é a matriz de distância entre os centróides dos fragmentos remanescentes em um sub-região, de forma que se os centróides forem de regiões distintas, a distância entre eles é igual a zero. A função $g(i)$ conta o número de fragmentos de vegetação remanescente em cada região que foi incluído na solução; a divisão de $c_9 b_i^T D b_i$ por $(g^2(i) - g(i))$ é devida à necessidade de corrigir a não-linearidade do numerador – caso contrário teria peso dominante na função quando muitos remanescentes de uma sub-região já foram incorporados na solução. A minimização de distância entre remanescentes ocorre somente quando há pelo menos dois remanescentes na sub-região, i.e. quando $g(i) > 1$. O parâmetro K indica o valor ponderado de áreas remanescentes de um conjunto de regiões que se pretende preservar. Os parâmetros c_i são determinados pelo peso de diversos fatores (ex. presença de rodovia, de *buffer*, etc.), com sinal conforme interesse em minimizar ou maximizar.

A variação dos valores de c_i determina soluções distintas. A discussão sobre a natureza e a sensibilidade destas soluções depende dos valores dos c_i atribuídos ao problema. Os valores usados inicialmente no problema dão peso aproximadamente igualitário a cada fator da função-objetivo, os quais são obtidos por meio do estudo de cada parcela desta função.

Deseja-se um conjunto de nós, associado a um parâmetro, de digrafo que minimiza a função-objetivo. Note que se certo remanescente faz parte da solução, isto afeta a probabilidade de outro remanescente fazer parte também. Por este motivo o algoritmo não é a simples minimização de uma função (não-linear), mas da construção gradativa de uma solução final do problema (1).

Inicia-se o algoritmo com $\alpha(i) = 0$ e $\beta(i) = 0$ para qualquer fragmento remanescente i . Enquanto o somatório $\sum \alpha(i) a_i$ for menor que K , o algoritmo é executado. O valor inicial deste somatório é zero, visto que nenhum fragmento remanescente foi incluído na solução.

A função-objetivo é avaliada em cada fragmento remanescente i e é escolhido um nó do digrafo em que o fragmento remanescente i minimiza a função-objetivo, o qual é o mais apto à inclusão numa proposta de solução. Neste momento, o fragmento remanescente i , isto é, o nó escolhido, tem valor de $\alpha(i)$ aumentado. Se $\alpha(i) = k$, a inclusão põe $\alpha(i) = k + 0,25$ até atingir o valor maximal de 1. O valor de $\alpha(i)$ após efetivação do algoritmo corresponde ao nível de importância da inclusão do remanescente na proposta de conservação, ou, alternativamente, ao grau de conservação que deve ser praticada a respeito dele.

A inclusão do fragmento remanescente i na solução faz com que $\beta(k)$ assumam valor maior que zero em todo remanescente adjacente ao fragmento i , ao longo do algoritmo, o que reflete a vantagem relativa de existência de fragmentos adjacentes em proposta de conservação. Define-se este valor como sendo o mesmo do valor acrescido $\alpha(i)$, de 0,25. Cada vez que um fragmento de mesma região é incluído na solução, g aumenta uma unidade para todo fragmento remanescente da sub-região x .

Em seguida, repete-se o processo de escolha do nó do digrafo e associa-se a ele um valor $\alpha(i) \in [0, 1]$, com intuito de satisfazer as condições iniciais para todo fragmento remanescente i . Logo, temos um subconjunto de fragmentos remanescentes de valores $\alpha(i) > 0$.

Os valores dos fragmentos sobre cada bacia permitem o cálculo de um parâmetro para a bacia entre 0 e 1, que será calculado por meio da seguinte fórmula:

$$B(l) = \frac{\sum \alpha(i) \cdot a(i)}{\sum a(i)} \quad (2)$$

Os valores de $B(l)$ dado por (2) correspondem à prioridade de preservação das bacias l em relação à paisagem como um todo. O valor específico de $B(l)$ pode dizer algo quanto à forma de se efetivar a conservação naquela bacia.

Atribuindo valores aos parâmetros de peso $c_1 = 2000$, $c_4 = 60$, $c_5 = 40000$, $c_6 = 5000$, $c_7 = 16000$, $c_8 = 1000$, e $c_9 = 5$ que foram obtidos por meio de estudos sobre a função-objetivo, de forma que cada fator desta função tenha peso de acordo com a seguinte meta de conservação, i.e. priorização dos ambientes ripários, dos maiores remanescentes e da maior conectividade entre as áreas. Temos o seguinte problema de PNL no caso de omitir os dados de biodiversidade.

$$\begin{aligned} \text{Min} \sum & \left[-\left(\frac{2000}{P_i}\right) \cdot (1 - \alpha(i)) a_i - 20 \cdot (1 - \alpha(i)) b_i + 100000 \cdot \left(\frac{p_i}{a_i}\right) - 1000 \cdot \beta(i) + \right. \\ & \left. 12000 \cdot r_i - 1000 \cdot d_i + \frac{0.25 b_i^T D b_i}{(g^2(i) - g(i))} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{s. a.} \quad \sum \alpha(i) \cdot a_i \geq 58600$$

No caso de inclusão dos dados de biodiversidade, subtrai-se $2000e_i$ dentro do colchete de termos a minimizar. Mostra-se embaixo (Fig. 1 e 2) os resultados neste caso.

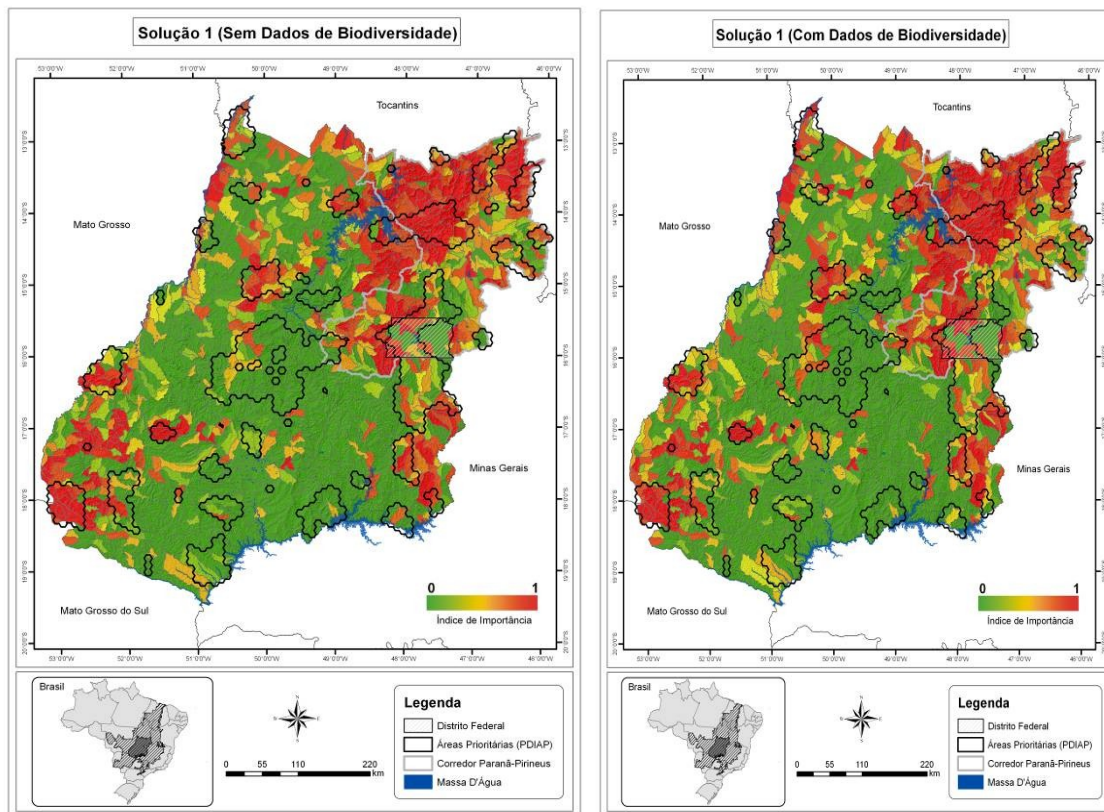


Figura 1 Solução 1 - nível de importância

das bacias sem dados de biodiversidade.

Figura 2. Solução 1 - nível de importância

das bacias com dados de biodiversidade.

Os valores dos parâmetros c_i foram alterados em experiências que procuravam detectar quais valores alterariam significativamente a solução. Destes todos, a alteração de c_4 de 20 para 60 e de c_6 de 1000 para 3000 tiveram os efeitos mais interessantes. Isso implica em triplicar a importância da área de região *buffer* no remanescente e o peso de adjacência a outro remanescente já incluído na solução. Ilustra embaixo o resultado neste caso.

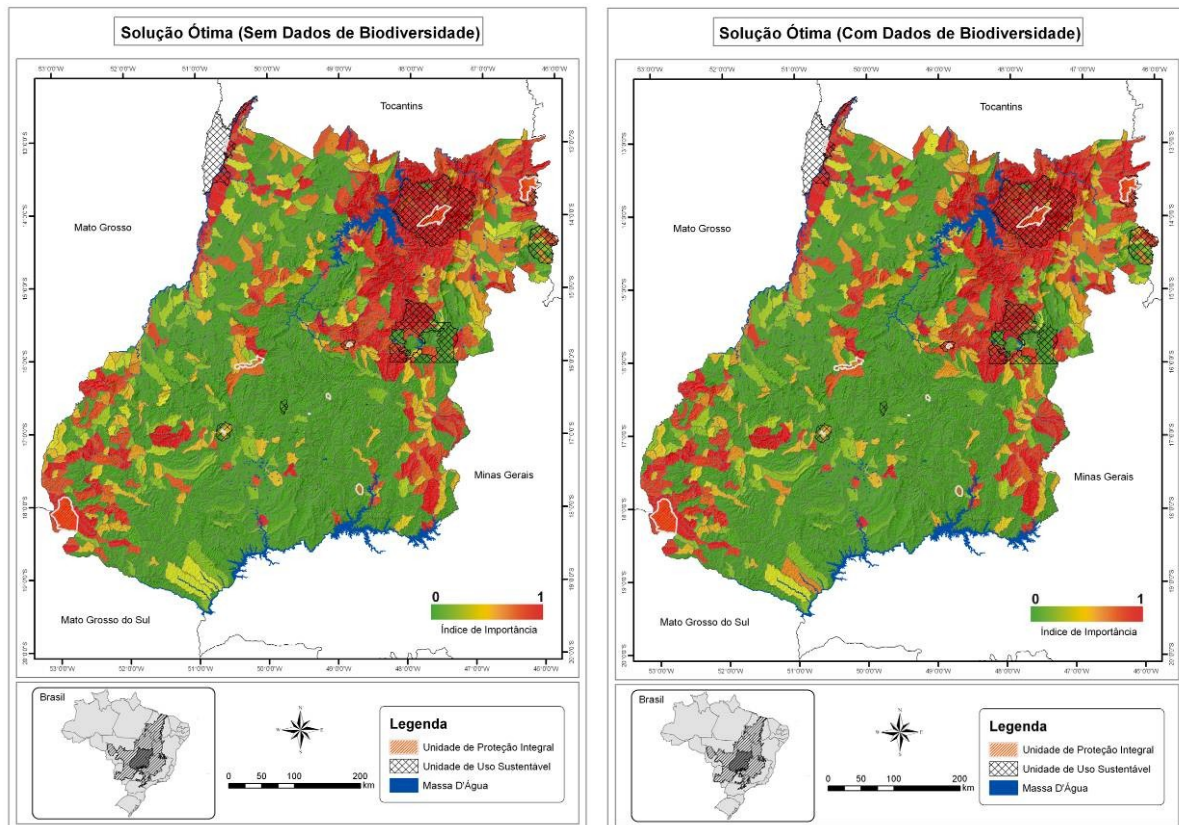


Figura 3. Solução Ótima - nível de importância das bacias sem dados de biodiversidade.

Figura 4. Solução Ótima - nível de importância das bacias com dados de biodiversidade.

Assim, o modelo matemático proposto pode contribuir tanto para valorização das áreas de vegetação remanescente para proposta de conservação, como para otimizar a restauração de áreas degradadas, principalmente de ambientes ripários, que favorecem a sua interligação.

Os dois enfoques de aplicação do modelo matemático não são mutuamente excludentes. Pelo contrário, podem ser complementares. Assim, uma próxima etapa da pesquisa prevê o aprimoramento do modelo matemático, com a introdução de novas variáveis antrópicas (e.g. agricultura e pecuária) e a maior valorização de parâmetros relacionados com os ambientes ripários e os fragmentos de vegetação remanescentes ainda existentes, tendo como intuito otimizar a restauração de áreas degradadas no estado de Goiás.

Referências

1. CABEZA, M.; MOILANEN, A. *Design of reserve network and the persistence of biodiversity*. *Trend in Ecology and Evolution* 16:242-248, 2001.

2. CABEZA, M. *Habitat loss and connectivity of reserve networks in probability approaches to reserve to reserve design*. Ecology Letters 6: 665-672, 2003.
3. EISWERTH, M. E.; HANEY, J. C. *Analysis – Maximizing conserved biodiversity: Why ecosystem indicators and thresholds matter*. Ecological Economics 38: 259-274, 2001.
4. MACHADO, R. B.; NETO, M. B. R.; PEREIRA, P. G.; CALDAS E. F.; GONÇALVES D. A.; SANTOS N. S.; TABOR K.; STEININGER, M. *Estimativas de perda do cerrado brasileiro*. Conservação Internacional. Brasília, 2004. Disponível em <<http://www.conservation.org.br/arquivos/RelatDesmatamCerrado.pdf>>. Acesso em 10/02/2007.
5. SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO J. L.; FERREIRA, L. G. *Mapeamento semidetalhado (escala de 1:250.000) da cobertura vegetal antrópica do bioma Cerrado*. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 43 (1): 153-156, 2008.