

Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics

Manejo de plantas daninhas: o problema econômico

Elenice W. Stiegelmeier¹

Departamento de Matemática, UTFPR, Cornélio Procópio, PR,

Luiz H. B. Bertolucci e Eduardo F. Costa²

Departamento de Matemática Aplicada e Estatística, USP São Carlos, SP

Vilma A. Oliveira³

Departamento Engenharia Elétrica e Computação, USP, São Carlos, SP

Resumo. Neste trabalho é avaliado um modelo de otimização econômico para o manejo de plantas daninhas que busca maximizar o lucro em um determinado período de tempo levando em consideração a evolução da resistência à herbicidas. São investigados os efeitos provocados pela evolução da resistência à herbicidas a partir de diferentes condições iniciais. Resultados numéricos são obtidos via técnica de programação não linear e indicam que com o tempo o lucro vai ser reduzido devido a presença de plantas resistentes.

Palavras-chave. Otimização, manejo de plantas daninhas, programação não linear.

1 Introdução

A presença de plantas daninhas em solos agrícolas tem ocasionado reduções significativas na produtividade das culturas, sendo esta estimada em torno de 13% na produção mundial de grãos, e ainda, o uso de herbicidas se destaca como a forma de controle mais utilizada em campo. Visando reduzir as perdas causadas pelas plantas daninhas e os impactos causados pelo uso de herbicidas diversas estratégias de controle tem sido propostas [1, 5]. Em [1] técnicas de programação dinâmicas são utilizadas para obter a estratégia ótima do problema de controle de plantas daninhas em face a resistência. Já em [5] é proposto um modelo de otimização do manejo de plantas daninhas usando estratégias de programação não linear (PNL).

Neste trabalho será utilizado técnicas de PNL para obter a solução do modelo apresentado por [1] para dinâmica de resistência à herbicidas. O objetivo é analisar os efeitos causados pela evolução da resistência ao longo de um período pré-determinado a partir de um problema de otimização econômico que visa maximizar o lucro do produtor. Um modelo de simulação numérica é empregado para avaliar as soluções dadas pela PNL na evolução da resistência, e, com isso, verificar a hipótese de que através da minimização do banco de sementes, o retorno econômico do manejo da planta daninha possa ser maximizado.

¹elenicew@utfpr.edu.br,

²bertolucci@icmc.usp.br, efcosta@icmc.usp.br

³vilma@sc.usp.br

2 Modelo dinâmico de plantas daninhas

Seja t o ciclo de vida da planta e assumindo todos os parâmetros não negativos. O modelo populacional de plantas daninhas considerando o fenômeno da resistência à herbicidas é descrito por:

$$y_t = x^g \delta x_t, \quad x_{t_0} = x_0 \quad (1)$$

$$y_t^a = c_t y_t \quad (2)$$

$$x_t^r = \exp[\gamma \ln y_t^a / (\mu + \varepsilon \ln y_t^a)] \quad (3)$$

$$x_t^n = \kappa x_t^r - \eta + \xi \quad (4)$$

$$x_{t+1} = x_t^n + (1 - \Psi)(1 - \delta)x_t, \quad (5)$$

com x_t densidade do banco de sementes (m^{-2}), y_t densidade de plantas que germinaram (m^{-2}), y_t^a densidade de plantas adultas (m^{-2}), x_t^r densidade de sementes resultantes da reprodução das plantas adultas (m^{-2}), x_t^n densidade das novas sementes adicionadas ao banco de sementes (m^{-2}), x^g taxa de sobrevivência das sementes emergentes, δ taxa de germinação anual, c_t taxa de mortalidade inferida pelo herbicida, γ, μ, ε coeficientes de regressão, κ taxa de sobrevivência de novas sementes, η densidade de sementes exportadas (m^{-2}), ξ densidade de sementes importadas (m^{-2}) e Ψ taxa de mortalidade das sementes dormentes.

A função de controle c_t é modelada considerando os fenótipos resistente (R) e suscetível (S) presente em uma população e a taxa global de mortalidade induzida pelo herbicida é calculada como

$$c_t = (1 - \rho_R(u_t))R_t + (1 - \rho_S(u_t))(1 - R_t), \quad (6)$$

onde u_t é a dose de herbicida, R_t é a frequência de indivíduos resistentes e $\rho_i(u_t)$ é a função dose resposta descrita em [4] como

$$\rho_i(u_t) = c_i + \frac{d_i - c_i}{1 + \exp[b_i(\ln(u_t) - \ln(GR_{50i}))]}, \quad i = S, R.$$

Empregando o modelo genético descrito em [1] e considerando a mudança que ocorre no banco de sementes após a aplicação do herbicida, a frequência do alelo é descrita por

$$p_{t+1} = \frac{p_t(1 - \Psi)(1 - \delta)x_t + p_t^n x_t^n}{(1 - \Psi)(1 - \delta)x_t + x_t^n}, \quad (7)$$

com

$$p_t^n = \frac{w_{AA}p_t^2 + w_{Aa}p_tq_t}{w_{AA}p_t^2 + 2w_{Aa}p_tq_t + w_{aa}q_t^2}$$

e $q_t = 1 - p_t$. Considerando que a pressão seletiva é imposta pela dose de herbicida aplicado e assumindo que **A** represente o gene ligado a resistência da planta e que este seja dominante. Então, as probabilidades de sobrevivência da fase zigótica para a fase reprodutiva são dadas por

$$w_{AA} = (1 - \rho_R(u_t)), \quad w_{Aa} = (1 - \rho_R(u_t)) \quad e \quad w_{aa} = (1 - \rho_S(u_t)).$$

A frequência de plântulas resistentes R_t segue os princípios da genética populacional [2] e é modelada como

$$R_t = (p_t)^2 + 2p_t(1 - p_t). \quad (8)$$

Com isso, o modelo dinâmico populacional de plantas daninhas captura informação da dinâmica do banco de sementes e da evolução da resistência a certo herbicida.

3 Problema de otimização econômico

O problema econômico que visa maximizar o lucro considerando os efeitos da evolução da resistência é formulado como

$$\max_{u_t} J(x_0, p_0) = \sum_{t=0}^T \alpha^t \pi(x_t, p_t, u_t) \quad (9)$$

sujeito a

$$x_{t+1} = g(x_t, p_t, u_t), \quad x(0) = x_0 \quad (10)$$

$$p_{t+1} = v(x_t, p_t, u_t), \quad p(0) = p_0 \quad (11)$$

$$0 \leq u(t) \leq u_{max} \quad (12)$$

$$x_t, p_t, u_t \in \mathbb{R}^+$$

onde π é a função lucro, g é a dinâmica do banco de sementes dada em (5), v é a dinâmica da frequência do alelo dada em (7), T é o horizonte final, $\alpha^t \in (0, 1)$ taxa de desconto e u_{max} a dose máxima permitida em campo. O funcional objetivo J é uma função não linear e geralmente uma função concava.

Seguindo [5] a função lucro, π , para o problema de manejo de plantas daninhas é definida como

$$\pi(x_t, p_t, u_t) = P_y Y(x_t, p_t, u_t) - P_u u_t - C, \quad (13)$$

com P_y preço por unidade produzida, P_u preço da unidade de controle (herbicida), C custo fixo de produção e Y função de produção, dada por $Y = Y_0(1 - Y_L)(1 - Y_p)$, onde Y_0 é a produção livre de planta daninha, Y_L é a perda associada a planta daninha, e Y_p é a perda associada ao efeito fitotóxico do herbicida. Assim, a função lucro (13) é determinada pela variável de controle u_t e pela densidade do banco de sementes x_t e frequência do alelo p_t .

A solução numérica do problema de manejo de plantas daninhas foi obtida via técnica de programação não linear, uma vez que as variáveis de decisão são dadas por u_t , $t = 0, 1, \dots, T$, e as variáveis de estado x_t e p_t passam a ser determinadas em função de u_t . Nesse caso, será utilizado o método Active Set Algorithm (ASA) proposto por [3] para obtenção da solução ótima.

4 Resultados e discussões

Nesta seção são avaliadas a dinâmica do banco de sementes e a evolução da resistência da planta daninha *Bidens subalternans*, a qual apresenta um alelo dominante e múltipla

resistência aos herbicidas que atuam na inibição da acetolactato sintase (ALS) e inibidores da fotossíntese II (PS2). Foram utilizados os herbicidas Nicosulfuron e Atrazine como forma de controle da planta daninha presente na cultura do milho.

Os parâmetros adotados para as curvas dose respostas, ρ_i , foram obtidos via software estatístico R a partir de experimentos realizados pela Embrapa Milho e Sorgo (veja Tab. 1). A Figura 1 ilustra as curvas dose respostas resultantes para ambos os herbicidas.

Nas simulações numéricas considera-se a densidade inicial do banco de sementes fixo, $x_0 = 500$ (*sementes/m²*), a frequência inicial do alelo R variando entre $0 < p_0 < 1$ e um horizonte de simulações de 20 anos. Na Tabela 2 são reportados os parâmetros econômicos e populacionais utilizados nas simulações numéricas.

Na Figura 2 e 3 são apresentadas as dinâmicas do banco de sementes e as respostas dos alelos resistentes a partir de diferentes condições iniciais, p_0 , obtidas via estratégia PNL. Observa-se que o banco de sementes sofre uma redução significativa inicialmente, para ambos os herbicidas, porém, quando a densidade de plantas resistentes se torna elevada, ocorre um aumento no banco de sementes (veja Fig. 2), pois, se a planta resistente completar seu ciclo na safra seguinte haverá uma maior densidade de plantas resistentes.

Na Figura 3 verifica-se que até ocorrer uma evidência perceptível do fenótipo R, geralmente $p_t > 0.1$, podem decorrer 5, 10 ou até 15 anos de uso continuado de herbicidas com o mesmo mecanismo de ação. Geralmente quando detectado, o problema já é significativo.

Tabela 1: Parâmetros da função dose-resposta obtidos experimentalmente.

Herbicide	Biótipo	b	c	d	GR_{50}
Nicosulfuron	Suscetível	-0.80721	-3.06521	102.65965	8.57764
	Resistente	-1.28707	-0.30570	34.41258	36.12024
Atrazine	Suscetível	-1.38747	-1.30678	105.86746	783.09583
	Resistente	-0.68405	0.12445	212.9900	57375.0

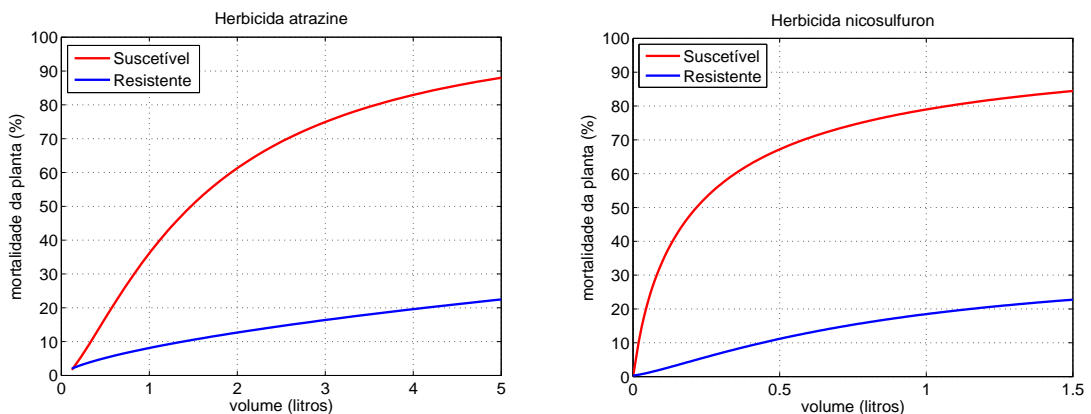


Figura 1: Taxa de mortalidade das plantas suscetíveis, ρ_S , e resistentes, ρ_R .

Tabela 2: Parâmetros usados nas simulações numéricas (1 = nicosulfuron e 2 = atrazine)

Parâmetros populacionais	Valor	Parâmetros econômicos	Valor
$\delta(\%)$	60.00	P_y (R\$ ton^{-1})	534.40
$\psi(\%)$	30.00	Y_0 (ton ha^{-1})	8.64
η (m^{-2})	0.00	C (R\$ ha^{-1})	954.73
ξ (m^{-2})	0.00	P_u^1 (R\$ $liter^{-1}$)	42.90
$\kappa(\%)$	35.00	P_u^2 (R\$ $liter^{-1}$)	12.40
$x^g(\%)$	80.00	u_{max}^1 (liter ha^{-1})	1.50
γ	6.80	u_{max}^2 (liter ha^{-1})	5.00
μ	2.00	α	0.90
ε	0.67	φ^1	$8.90 \cdot 10^{-3}$
		φ^2	$2.70 \cdot 10^{-3}$
		a	$1.58 \cdot 10^{-2}$
		m	$4.83 \cdot 10^{-1}$

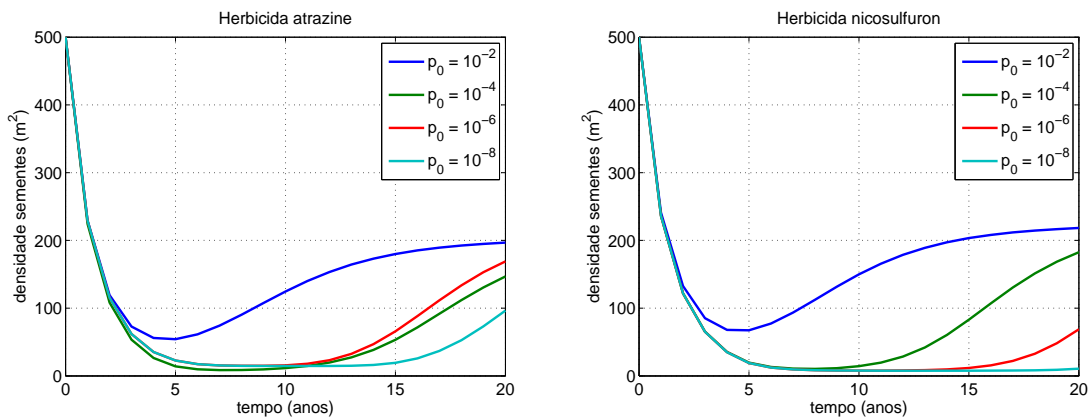


Figura 2: Densidade do banco de sementes x^* para um período de 20 anos via estratégia PNL.

A Figura 5 ilustra a dose u^* obtida via PNL para 20 anos. Observe que quando se tem baixa frequência do fenótipo R, uma dose alta pode melhorar o controle inicialmente, porém, altas doses podem intensificar a seleção do fenótipo R como mostra a Figura 4. Comparando-se os resultados da PNL com um sistema convencional de plantio, o qual é baseado na utilização da dose máxima em campo, verifica-se que a densidade de resistência é maior com o uso da dose máxima (veja Fig. 4). E, ainda, observa-se que para densidades altas de resistência, $p_0 = 10^{-2}$, a estratégia PNL apresentou melhor retorno financeiro, no entanto, para baixas densidades, $p_0 = 10^{-8}$, o lucro médio se equipara a estratégia convencional, uma vez que a presença do fenótipo R é imperceptível (veja Fig. 6).

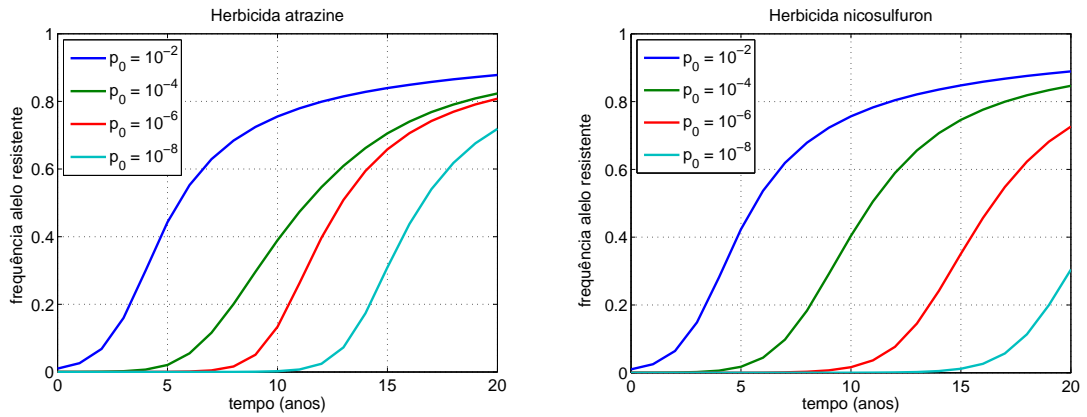


Figura 3: Frequência do alelo resistente p^* para um período de 20 anos via estratégia PNL.

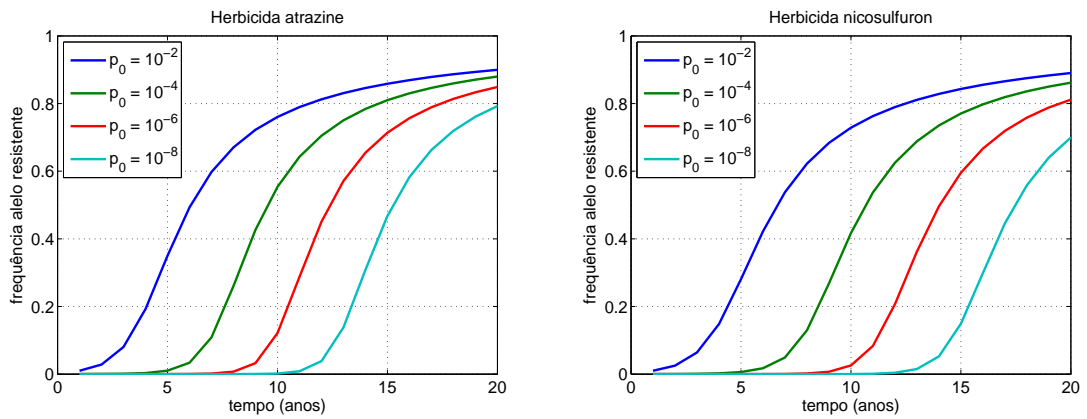


Figura 4: Frequência do alelo p^* via estratégia convencional, com $u_{max}^1 = 1.5$ $u_{max}^2 = 5$.

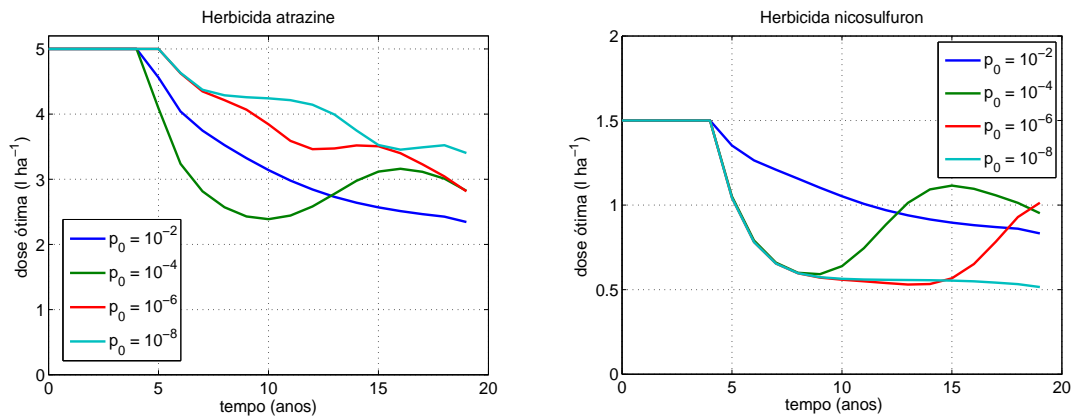


Figura 5: Dose u^* para um período de 20 anos via estratégia PNL.

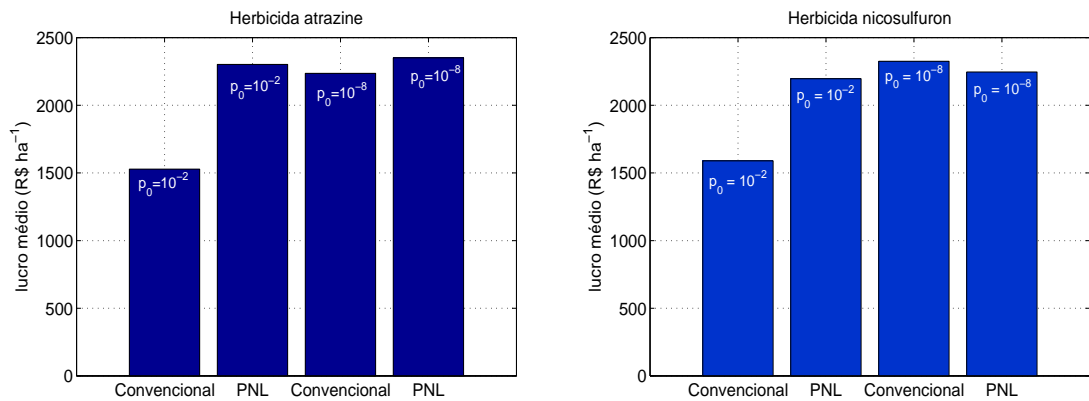


Figura 6: Lucro médio obtido via estratégia PNL e convencional, com $p_0 = 10^{-2}$ e $p_0 = 10^{-8}$.

5 Conclusão

Neste trabalho foi avaliado um modelo econômico de otimização para o manejo de plantas daninhas via técnica de PNL considerando a taxa de mortalidade de biótipos resistentes e susceptíveis. Verificou-se que os benefícios econômicos podem ser maximizados com a minimização do banco de sementes. No entanto, a estratégia convencional quanto a PNL mostram que com o tempo o lucro vai ser reduzido devido ao aumento das plantas resistentes. Isso demonstra claramente a necessidade de considerar modelos de otimização associados ao manejo da resistência. As técnicas de manejo com rotação e misturas de herbicidas é uma solução que deve ser considerada para retardar a evolução da resistência.

Referências

- [1] L. H. B. Bertolucci, E. F. Costa, V. A. Oliveira, L. Fernando and D. Karam, Herbicide dosage optimization model for weed control using the resistance dynamics, Proceedings of Congress on Modelling and Simulation, vol. 1, 220–225, (2013).
- [2] N. F. Britton, Essential Mathematical Biology, Springer Undergraduate Mathematics Series, London, UK, (2003).
- [3] W. W. Hager and H. Zhang, A new active set algorithm for box constrained optimization, Journal of Optimization, vol. 2, 526–557, (2006).
- [4] S. S. Seefeldt, J. E. Jensen and E. P. Fuerst, Log-logistic analysis of herbicide dose-response relationships, Weed Technology, vol. 1, 218–227, (1995).
- [5] E. W. Stiegelmeier, P. A. Munari Jr, H. S. Kajino, V. A. Oliveira e G. N. Silva, Modelo de otimização da aplicação de herbicida para o controle de plantas daninhas considerando a evolução da resistência, Anais Congresso Brasileiro de Automática, vol 1, 886–893, (2010).