

Otimização dinâmica multiobjetivo da aplicação de herbicida considerando a resistência de plantas daninhas

Ulcilea A. S. Leal¹, Geraldo N. Silva²,

DCCE, IBILCE, UNESP – 15.054-000, São José do Rio Preto/SP.

Décio Karam³,

Embrapa Milho e Sorgo – 35.701-970, Sete Lagoas/MG.

Resumo. Neste trabalho apresenta-se um modelo de otimização dinâmica multiobjetivo da aplicação de herbicida. A densidade de sementes no início do plantio e a frequência dos alelos são tomadas como variáveis de estado. A variável de controle é a dose de herbicida aplicada em cada período de plantio. O modelo de otimização considera a diminuição da eficiência do herbicida ao longo do tempo, em função da evolução da resistência da planta daninha. Os objetivos são: 1) maximizar o lucro do produtor e 2) minimizar o acréscimo na resistência da planta daninha, promovido pelo uso do herbicida. Assim, o problema de otimização dinâmica multiobjetivo formulado é resolvido utilizando-se a abordagem ϵ -restrito. Os problemas resultantes desta abordagem são resolvidos via programação não-linear, utilizando o método ASA.CG. Resultados de simulações numéricas descrevem o conjunto de Pareto-ótimo da aplicação do herbicida nicosulfuron visando o controle da infestação da planta daninha *Bidens subalternans* em períodos de 5 e 10 anos, respectivamente.

Palavras-chave: *Otimização multiobjetivo; Controle ótimo; Resistência de plantas daninhas.*

¹ulcilea0803@hotmail.com

²gsilva@ibilce.unesp.br

³karam@cnpmc.embrapa.br.

1. Introdução

A infestação por plantas daninhas é considerada um grande problema na agricultura, pois causa perdas em diversos níveis e, por este motivo, busca-se controlá-las. A principal técnica utilizada para o controle em sistemas de produção tecnificados é a aplicação de herbicidas, porém esses geram custos significativos ao produtor e impactos ambientais. Assim, tem-se buscado modelos matemáticos que descrevem a dinâmica dessas plantas, com o intuito de melhor compreender a sua evolução e auxiliar na tomada de decisão no campo. Modelos de otimização para o controle da aveia selvagem numa colheita de grãos são apresentados em Jones e Cacho (2000) e Jones (2005).

O uso intensivo de produtos químicos com o mesmo mecanismo de ação no controle de plantas daninhas contribui para o aumento da proporção de indivíduos resistentes para a próxima geração (Christoffoleti, 2008).

A resistência de plantas daninhas aos herbicidas ocorre em função de um processo evolutivo e o desenvolvimento de biótipos de plantas daninhas resistentes é imposto através da pressão de seleção causada pelo uso intensivo dos herbicidas. As funções de frequência genética dos alelos dominante e recesivo em face da pressão seletiva imposta pelo herbicida seguem os princípios da genética populacional descrita segundo Britton (2003). Segundo Christoffoleti et al. (1994) a probabilidade de ocorrer seleção natural de indivíduos resistentes na população, em curto período de tempo, está relacionado com quanto maior é a frequência inicial do alelo do biótipo resistente. Assim, é de fundamental importância o conhecimento de técnicas de manejo e controle dos mecanismos e fatores que favorecem o aparecimento de biótipos de plantas daninhas resistentes.

Buscando reduzir a perda de rendimento causada pela competição da planta daninha com a lavoura, vários modelos de controle foram desenvolvidos, que visam maximizar os lucros em uma determinada estação ou ano e, consequentemente, diminuir os custos em um sistema de colheita de grãos (Jones e Cacho, 2000; Jones, 2005; Jones et al., 2006; Leal et al., 2011; Stiegelmeier, 2012). Outro fator importante a ser considerado é o aparecimento da resistência da planta daninha ao herbicida causado pelo uso intensivo ou prolongado de um herbicida de mesmo princípio ativo. Interessa aqui minimizar a evolução da resistência da planta daninha ao herbicida e reduzir os impactos ambientais causados pelo uso de produtos químicos.

Para tal propósito, obtém-se um problema com dois objetivos, sendo

esses objetivos conflitantes entre si. Tais problemas são conhecidos por multiobjetivos ou multicritério e distinguem-se dos problemas clássicos mono-objetivo devido ao conceito de solução que lhes é atribuído. Os problemas multiobjetivos apresentam um conjunto de soluções ótimas (Deb, 2001).

2. Objetivos

O objetivo deste trabalho é mostrar uma abordagem de otimização multicritério na aplicação de herbicida para o controle de plantas daninhas visando, ao mesmo tempo, maximizar o lucro do produtor e minimizar o acréscimo da resistência dessas plantas causada pelo uso de herbicida. Isto leva indiretamente a minimização do impacto ambiental, tornando mais racional a técnica de manejo químico de plantas daninhas.

3. Metodologia

As plantas daninhas competem rigorosamente com as colheitas, resultando em grande perda de rendimento, pois essas plantas possuem um alto poder de reprodução, gerando um grande número de sementes, afetando diretamente o tamanho do banco de sementes no solo. O modelo que descreve a dinâmica populacional para as plantas daninhas é descrito segundo Jones e Cacho (2000):

$$y_t = x^g \delta x_t \quad (1)$$

$$y_t^a = (1 - \rho(u_t))y_t \quad (2)$$

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

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

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

com variáveis e parâmetros definidos na tabela 1. A taxa de mortalidade induzida pelo herbicida, $\rho(u_t)$, é dada segundo Seefeldt et al. (1995):

$$\rho(u_t) = c + \frac{d - c}{1 + \exp[b(\ln(u_t) - \ln(GR_{50}))]}, \quad (6)$$

em que, c é o limite inferior da curva que corresponde às respostas médias com doses altas de herbicidas, d é o limite superior da curva que corresponde à

resposta média da testemunha, b é a declividade da curva em torno de GR_{50} , GR_{50} corresponde à dose necessária para reduzir 50% do crescimento da planta daninha em relação a testemunha.

Tabela 1: Definição dos parâmetros e variáveis

Populacionais	
x_t	Densidade do banco de sementes (m^{-2}) no início do ano t
p_t	Frequência do alelo dominante no ano t
q_t	Frequência do alelo recessivo no ano t
y_t	Dens. de plantas daninhas jovens (m^{-2}) no ano t
y_t^a	Dens. de plantas daninhas emergentes (m^{-2}) na fase adulta
x_t^r	Dens. de sementes (m^{-2}) reprodução da planta daninha
x_t^n	Novas sementes adic. ao banco de sementes (m^{-2}) no ano t
x_t^g	Porcentagem de sementes germinadas que emergiram (m^{-2})
δ	Taxa de germinação anual das sementes da planta daninha
u_t	Dose de herbicida aplicada (litro ha^{-1}) no ano t
ρ	Taxa de mort. de plantas daninhas pelo herbicida no ano t
γ, μ, ε	Coefficientes de x_t^r
κ	Taxa de sobrevivência de novas sementes
η	Retirada de sementes na colheita
ξ	Importação de sementes (vento, pássaros, etc)
Ψ	Índice de mortalidade de sementes dormentes
Econômicos	
π	Lucro anual da fazenda (R\$ ha^{-1})
P_y	Preço de cada unidade do produto (R\$ $tonelada^{-1}$)
P_u	Custo por unidade de controle (R\$ $litro^{-1}$)
C	Constante dos custos de aplicação do controle e produção

A relação entre a dose de herbicida e a resposta da planta é de fundamental importância para analisar a eficácia do herbicida e o meio de ação. A função de dose-resposta é usada para quantificar a sensibilidade ou resistência da planta daninha ao herbicida.

A resistência pode ser interpretada como uma diminuição significativa da eficiência do herbicida sobre plantas específicas, já que GR_{50} é utilizado para medir a eficiência do herbicida. Em toda uma população, a diminuição

gradual dessa eficiência é o comportamento esperado, pois, o biótipo resistente se torna gradualmente mais presente no banco de sementes.

O modelo que descreve o comportamento da evolução da resistência GR_{50} , desenvolvido por Stiegelmeier et al. (2010), é expresso da seguinte forma:

$$GR_{50t}(R_t) = R_t GR_{50R} + (1 - R_t) GR_{50S}, \quad (7)$$

onde GR_{50R} e GR_{50S} correspondem às doses necessárias para reduzir em 50% as respostas das plantas daninhas resistente e suscetível, respectivamente, e R_t é a resistência ao herbicida no tempo t , a qual é obtida como uma função da frequência dos alelos.

O percentual de resistência R_t do biótipo resistente, assim como do seu complementar S_t , o biótipo suscetível, pode ser inferido através do conhecimento do fenótipo esperado da planta. Este é a característica observável do indivíduo, nesse caso os biótipos resistentes e suscetíveis, resultado da interação do genótipo com o ambiente. Kajino et al. (2010) utiliza dos conceitos de Mendel e do equilíbrio de Hardy-Weinberg, presentes em Britton (2003), para obter a relação do alelo com o genótipo, dado por:

$$R_t = \begin{cases} p_t^2 & \text{para o caso recessivo,} \\ p_t^2 + 2p_t(1 - p_t) & \text{para o caso dominante.} \end{cases} \quad (8)$$

sendo que, p_t é a frequência do alelo no ano t , dada pela função Fisher-Haldane-Wright - FHW (Britton, 2003). No caso do alelo ter resistência dominante nuclear, a função FHW é dada seguinte forma:

$$p_{t+1} = p_t + s(u_t)p_tq_t \frac{q_t}{1 + s(u_t)(p_t^2 + 2p_tq_t)} \frac{x_t^n}{x_t}, \quad (9)$$

onde $s(u_t) = Au_t$ é o coeficiente de pressão seletiva, A é um coeficiente de ajuste e $q_t = 1 - p_t$. O termo de ponderação x_t^n/x_t em (9) funciona como um “buffer” genético, atrasando a evolução da resistência ao expor somente as plantas adultas aos fatores de pressão seletiva. Considerando, assim, a existência do banco de sementes como alvo da evolução da resistência, englobando toda população, inclusive as sementes dormentes.

Considerando o modelo (1)-(5), e fazendo a substituição de (1) em (2), e sucessivamente até substituir (4) resultante em (5) e, além disso, substituindo a função de dose-resposta (6) por $\rho(u_t, R_t)$, GR_{50} por $GR_{50t}(R_t)$ dado por (7), R_t descrito segundo (8) e p_t dado por (9), obtemos o seguinte modelo:

$$x_{t+1} = (1 - \Psi)(1 - \delta)x_t + \kappa \exp^{\frac{\gamma \ln((1 - \rho(u_t, R_t))x_t^g \delta x_t)}{\mu + \varepsilon \ln((1 - \rho(u_t, R_t))x_t^g \delta x_t)}} - \eta + \xi \quad (10)$$

$$p_{t+1} = p_t + s(u_t)p_t q_t \frac{q_t}{1 + s(u_t)((p_t)^2 + 2p_t q_t)} \frac{x_t^n}{x_t}. \quad (11)$$

Estas equações descrevem a dinâmica de mudança do número de sementes no banco juntamente com a frequência do alelo que diz respeito a resistência ao herbicida.

O objetivo é avaliar as mudanças na densidade de plantas daninhas na lavoura através da aplicação de herbicidas, ou seja, não será utilizada qualquer outra técnica de controle além da aplicação do defensivo químico. Dessa forma, apenas dois fatores serão tomados como variáveis: a população inicial de plantas daninhas, x_t , e a dosagem de herbicida aplicada, u_t , e todos os outros fatores serão fixos denotados por z_t (Jones e Cacho, 2000). A função de produção pode ser escrita da seguinte forma:

$$Y = f(x_t, u_t, z_t). \quad (12)$$

O efeito de x_t em Y é reduzir o rendimento alcançado na lavoura, enquanto que o efeito de u_t é amenizar a perda causada por x_t . A função de produção (12) pode ser separada em outras duas funções: Y_0 , que é o rendimento de produção numa lavoura livre de plantas daninhas, e Y_L que é a perda de rendimento associada com a densidade e controle da planta daninha, expresso por:

$$\begin{aligned} Y_0 &= f_1(z_t) \\ Y_L &= f_2(x_t, u_t), \end{aligned}$$

no qual Y_L corresponde à perda de rendimento através da concorrência entre a cultura e a planta daninha. Segundo Cousens (1985) a função que melhor descreve a perda de rendimento como uma função de densidade de planta daninhas é um hiperbolóide, pois, para uma baixa densidade de plantas daninhas têm-se uma maior competição com a cultura e assim causa uma redução na produção. No entanto, quando a densidade de planta daninha é alta o aumento da concorrência intra-específica tende a reduzir a perda de rendimento. A função hiperbolóide é dada da seguinte forma:

$$Y_L = \frac{aD}{1 + \frac{a}{r}D},$$

onde a é o parâmetro que representa a perda de rendimento causada a cada adição de uma planta daninha por m^2 (baixas densidades de plantas daninhas), r é o parâmetro que indica a perda de rendimento quando a densidade de plantas daninhas tende ao infinito (altas densidades de plantas daninhas) e D é uma função da densidade inicial da planta daninha e da proporção de plantas daninhas mortas pela aplicação do herbicida de acordo com $\rho(u_t, R_t)$:

$$D = x_t(1 - \rho(u_t, R_t)), \quad 0 \leq \rho \leq 1.$$

Quando o herbicida é aplicado, há uma perda de rendimento na produção devido à ação tóxica do produto químico, Y_p , e dessa forma, a função de produção Y é descrita por:

$$Y = Y_0(1 - Y_L)(1 - Y_p).$$

Definida a função de produção, a função lucro para um problema no qual deseje-se determinar a dosagem ótima do herbicida aplicado na lavoura levando em consideração a resistência de planta e o custo de produção, é dada por:

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

com parâmetros definidos na tabela 1. O termo $P_y Y$ de (13) é o rendimento total, sendo determinado não apenas pelo nível da variável de controle, mas também pela densidade inicial de plantas daninhas, x_t , e pela frequência do alelo, p_t . Portanto, o rendimento total para qualquer variação de u_t será especificado pelo valor inicial de x_t e p_t . De modo geral, o objetivo é determinar de que maneira, e em qual intensidade, o banco de sementes, x_t , de cada estação ou ano, é alterado com aplicação do herbicida, u_t , visando assim reduzir o uso do herbicida e, conseqüentemente, maximizar o lucro do produtor e minimizar o acréscimo da resistência da planta daninha causada pelo uso do herbicida num período pré-determinado.

O problema de otimização dinâmica multiobjetivo é descrito da seguinte

forma (Leal, 2012):

$$\max (J_1, J_2) = \left(\sum_{t=0}^T \alpha^t \pi(x_t, p_t, u_t), -R_T \right)$$

sujeito a:

$$\begin{aligned} x_{t+1} &= g(x_t, p_t, u_t) \\ p_{t+1} &= v(x_t, p_t, u_t) \\ x(0) &= x_0 \\ p(0) &= p_0 \\ 0 &\leq p(t) \leq 1 \\ \frac{10^{-6}}{A} &\leq u(t) \leq \min\{u_{\max}, \frac{0.5}{A}\} \end{aligned}$$

onde J_1 é o lucro alcançado em um período de T anos, π é uma função suave dada por (13), J_2 é o oposto da resistência da planta daninha para o caso dominante dada por (8), g é a taxa de mudança no banco de sementes a partir da aplicação do herbicida dada por (10), v é a taxa de mudança na frequência dos alelos decorrente da pressão de seleção exercida pelo herbicida dada por (11), A é um coeficiente de ajuste, α é um fator de desconto (Kennedy, 1986), u_{\max} é a dose máxima de herbicida permitida em campo.

O problema em questão apresenta dois objetivos a serem otimizados que são conflitantes entre si, ou seja, é impossível melhorar um objetivo sem deteriorar o outro. Para a resolução desse problema foi utilizado a abordagem ϵ -restrito, essa consiste em transformar o problema multi-objetivo em um problema mono-objetivo, de forma que apenas um objetivo seja otimizado e os outros objetivos são restritos sob determinadas condições que garantem que a solução obtida seja uma solução eficiente (Haimes et al., 1971; Deb, 2001). Neste problema especificamente foi otimizado o lucro, e o oposto da resistência no tempo final tornou-se uma restrição.

O problema resultante da abordagem ϵ -restrito possui restrição sobre a variável de controle, u_t , na forma de limitantes inferiores e superiores, um método de programação não-linear para variáveis limitadas foi adotado. Utilizou-se o método ASA_CG, disponível em Hager (2010), que consiste na combinação de dois algoritmos utilizados para a resolução numérica de problemas de programação não-linear. O algoritmo consiste de duas etapas, na qual a primeira é a projeção do gradiente não monótona e a segunda realiza

uma otimização irrestrita, executada pelo método do gradiente conjugado, e também um conjunto de regras para a ramificação entre essas duas etapas. Ou seja, este algoritmo alterna entre iterações desses dois métodos.

Esse método possui garantia de convergência global. Conforme testes computacionais apresentados por Hager e Zhang (2006), o método ASA_CG possui desempenho computacional superior em relação aos principais métodos da literatura (L-BFGS-B, SPG2 v.2.1, GENCAN e TRON v. 1.2).

4. Resultados

Nesse trabalho apresenta-se um estudo de caso que analisa a dinâmica populacional da planta daninha *Bidens subalternans*, presente em infestação na cultura do milho, com aplicação de controle através do herbicida nicosulfuron, sendo utilizado o mesmo em cada aplicação. A definição dos parâmetros e variáveis considerados para estabelecimento do modelo populacional são apresentados na tabela 2.

Os valores dos parâmetros econômicos utilizados para a cultura do milho safra 2009/2010, do modelo populacional e do modelo de dose-resposta encontram-se na tabela 2. Os coeficientes técnicos e os custos de cultivo do milho, safra 2009/2010 foram obtidos de Broch e Pedroso (2009), os dados referentes ao modelo populacional foram obtidos de Jones e Cacho (2000), e os experimentos para determinar os parâmetros da função de dose-resposta foram conduzidos em casa de vegetação na Embrapa Milho e Sorgo de Sete Lagoas-MG. As sementes foram disponibilizadas pelo Dr. Dionisio Gazziero da Embrapa Soja de Londrina-PR.

Foram avaliados o desenvolvimento do banco de sementes, a dinâmica da resistência (através da frequência dos alelos), e a dose ótima do herbicida considerando 5 e 10 anos, respectivamente, com condição inicial do banco de sementes de 500 sementes m^{-2} e frequência dos alelos 0,1. Essa frequência indica um percentual de indivíduos resistentes na população próximo ao índice detectável agronomicamente.

Os resultados foram obtidos utilizando o método ASA_CG. A implementação computacional foi feita em linguagem de programação C e os testes foram executados em um microcomputador Intel Core i3, com 4 GB de memória RAM.

A Figura 1 apresenta o conjunto de Pareto-ótimo para um horizonte

de 5 anos. Tal conjunto é obtido conforme os valores de ϵ variam no intervalo $[-0,55; -0,20]$, segundo a abordagem ϵ -restrito. Analisando o conjunto de Pareto-ótimo, observa-se que a melhor solução para o problema em curso ocorre quando o lucro é R\$ 814,96 e o oposto resistência da planta daninha no tempo final é $-0,44$, pois, para valores menores do oposto da resistência ocorre um acréscimo muito pequeno no lucro e para valores maiores no oposto da resistência tem-se um decréscimo acentuado no lucro.

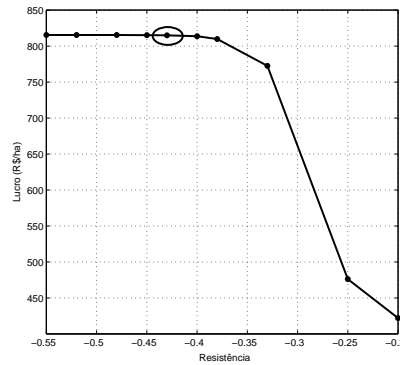


Figura 1: Pareto-ótimo para 5 anos.

Já a Figura 2 apresenta o conjunto de Pareto-ótimo para um horizonte de 10 anos. Tal conjunto é obtido conforme os valores de ϵ variam no intervalo $[-0,68; -0,20]$. Analisando o conjunto de Pareto-ótimo, considera-se que a melhor solução para o problema em curso ocorre quando o lucro é R\$ 815,24 e o oposto resistência da planta daninha no tempo final é $-0,56$, pela mesma análise feita anteriormente.

A partir das análises feitas nos conjuntos de Pareto-ótimos, serão apresentados os resultados quando maximiza-se separadamente o lucro do produtor, minimiza-se separadamente a aceleração da resistência da planta daninha ao herbicida no último ano, e do problema multi-objetivo em questão, em que busca-se maximizar o lucro e minimizar a evolução da resistência da planta daninha, simultaneamente.

Nas figuras 3(a) e 4(a) são apresentados o valor ótimo do banco de sementes, x^* , enquanto nas figuras 3(b) e 4(b) está exposto a frequência ótima

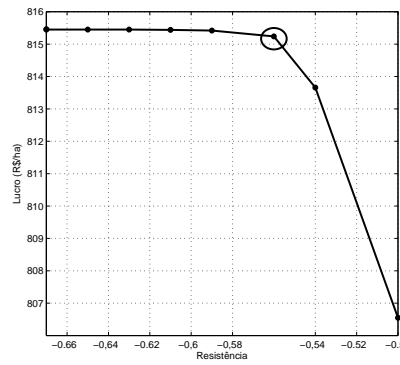


Figura 2: Conjunto de Pareto-ótimo para 10 anos.

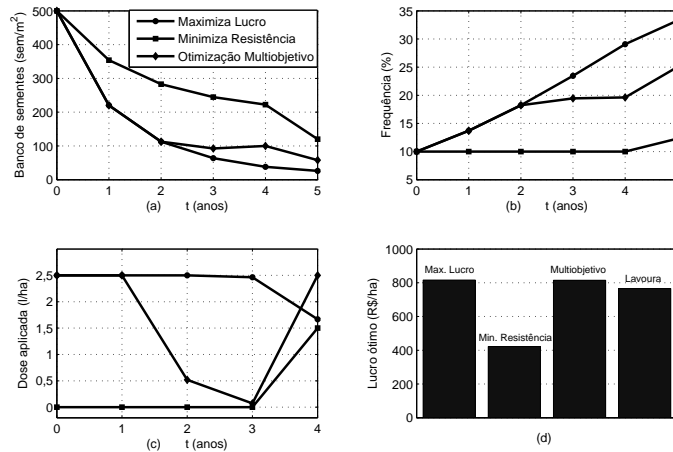


Figura 3: Resultados da otimização multicritérios para o horizonte de 5 anos.

dos alelos, p^* , e nas figuras 3(c) e 4(c) a taxa ótima de controle aplicado, u^* , para um horizonte de 5 e 10 anos de adoção do controle da plantas daninhas, respectivamente.

Verifica-se nas figuras 3(a) e 4(a) que o banco de sementes sofre um

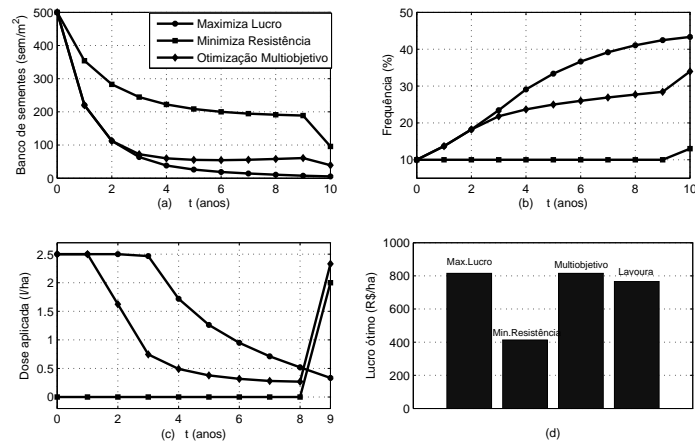


Figura 4: Resultados da otimização multicritérios para o horizonte de 10 anos.

decréscimo significativo com o passar do tempo. No caso multi-objetivo houve um pequeno acréscimo, no terceiro e sexto ano, respectivamente, devido às baixas doses do herbicida aplicadas anterior a esse período, em virtude da busca por minimizar a resistência. Nas figuras 3(b) e 4(b) observa-se um decréscimo significativo da frequência dos alelos do biótipo resistente aplicando a otimização multi-objetivo, comparado com o caso quando otimiza-se apenas o lucro, fato esse que ocorre devido às baixas doses do herbicidas aplicadas nos períodos considerados.

Já nas figuras 3(c) e 4(c) tem-se a taxa ótima da aplicação de herbicidas para um horizonte de 5 e 10 anos, respectivamente. Em cada um dos problemas analisados quando considera-se a resistência das plantas daninhas, observa-se que em quase todo o período as doses do herbicida aplicadas são baixas comparadas com o caso em que busca-se apenas maximizar o lucro.

Nas figuras 3(d) e 4(d) mostra-se o lucro ótimo obtido no último ano para cada um dos problemas analisados e o lucro de produção de uma lavoura de milho ano agrícola 2009/2010, segundo Broch e Pedroso (2009).

Comparando-se o lucro de produção de uma lavoura de milho ano agrícola 2009/2010, que gira em torno de R\$ 766,11 com o lucro otimizado R\$ 814,96 no quinto ano, e R\$ 815,45 no décimo ano, verifica-se um benefício

econômico usando o herbicida de forma seletiva e uma diminuição significativa na presença de sementes resistentes de plantas daninhas, em comparação aos resultados obtidos quando otimiza-se apenas o lucro.

Quando busca apenas maximizar o lucro, obtém-se um retorno econômico de R\$ 815,78 no quinto ano e de R\$ 815,45 no décimo ano. Porém o percentual de resistência da planta daninha gira em torno de 0,55 e de 0,68, respectivamente. Já quando utiliza-se o problema multi-objetivo, obtém-se um retorno econômico de R\$814,96 no quinto ano e de R\$815,24 no décimo ano, praticamente equivalente ao caso anterior. Entretanto, o percentual da resistência da planta daninha (*Bidens subalternans*) cai para 0,45 e 0,56, respectivamente. Justificando a adoção do modelo de otimização multiobjetivo testado.

Assim, é desaconselhável para o controle de planta daninha otimizar exclusivamente o lucro ou a resistência (ou seja, no extremo do conjunto de Pareto mostrado), pois, sempre pode-se encontrar uma alternativa que busca uma solução de compromisso, sem necessariamente ter uma redução brusca no lucro. Em outras palavras, pode-se mover de um ponto de extremidade do conjunto de Pareto (solução utópica de um funcional), buscando-se uma melhoria do outro funcional, com pouquíssimo sacrifício desse.

A utilização da otimização multi-objetivo possibilita um uso racional do herbicida, obtendo-se um maior lucro na lavoura, tornando o processo mais viável economicamente, ao mesmo tempo que promove um retardo na predição da resistência da planta daninha ao herbicida. Portanto, há uma melhor utilização do produto, em virtude de promover melhorias na técnica de controle químico dessa planta daninha na cultura do milho, tanto do ponto de vista econômico, possibilitando maior lucro ao produtor, como ambiental, em função da redução do volume de produto usado, como social, minimizando o risco de contaminação do aplicador, em virtude das menores doses adotadas.

Além dos benefícios apontados, pode-se destacar que a utilização da otimização multiobjetivo, no caso de controle químico de plantas daninhas, prolonga o período de uso da molécula de herbicida em questão, por retardar a evolução da resistência da planta daninha a mesma, promovendo ganhos econômicos a empresa detentora da molécula química, que não necessitará desprezar sua linha de produção.

Tabela 2: Valores dos parâmetros usados na simulação numérica

Populacional	Valores
$\delta(\%)$	60
$\psi(\%)$	30
$\eta(\text{sementes } m^{-2})$	0
$\xi(\text{sementes } m^{-2})$	0
$\kappa(\%)$	30
$x^g(\%)$	80
γ	6,80
μ	2,00
ε	0,67
A	0,20
Dose-resposta	
b	-0,599
c	$-0,917 \cdot 10^{-3}$
d	112,73
GR_{50S} (litro ha^{-1})	$0,125 \cdot 10^{-1}$
GR_{50R} (litro ha^{-1})	2,173
Econômicos	
P_y (R\$ tonelada $^{-1}$)	283,33
P_u (R\$ litro $^{-1}$)	49,90
Y_0 (tonelada ha^{-1})	8,64
C (R\$ ha^{-1})	436,26
u_{max} (litro ha^{-1})	7,00

5. Conclusões

Apresentamos um estudo baseado na otimização multiobjetivo o qual indica que o produtor pode usar herbicida no controle de plantas daninhas de forma seletiva, maximizando o lucro da lavoura e retardando o aumento da resistência da planta daninha ao herbicida.

Mais especificamente, verificamos que a adoção da otimização multiobjetivo possibilita o uso racional e sustentável do controle químico de *Bidens subalternas* na cultura do milho do ponto de vista econômico, ambiental e social, permitindo a redução das doses utilizadas.

Agradecimentos

Agradeço o apoio financeiro do CNPq, ref. aos processos 133180/2011-5 e 305418/2009-2, e da FAPESP pelo processo 2009/18643-0.

Referências

- Britton, N. F. (2003). *Essential Mathematical Biology*. Springer Undergraduate Mathematics Series, London, UK.
- Broch, D. L. e Pedroso, R. S. (2009). Custo de produção da cultura do milho. <http://www.fundacaoms.org.br/~request.php118>.
- Christoffoleti, P. J. (2008). *Aspectos de Resistência de Plantas Daninhas a Herbicidas*. Associação Brasileira de Ação à Resistência de Plantas Daninhas, Piracicaba, BR, 3 edition.
- Christoffoleti, P. J., Filho, V. R., e Silva, C. B. (1994). Resistência de plantas daninhas aos herbicidas. *Planta Daninha*, 12(1):13–20.
- Cousens, R. (1985). A simple model relating yield loss to weed density. *Annals of Applied Biology*, 107(2):239–252.
- Deb, K. (2001). *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. John Wiley and Sons, New York.
- Hager, W. (2010). Source code for ASA-CG version 1.3. <http://www.math.ufl.edu/~hager/papers/Software>.
- Hager, W. W. e Zhang, H. (2006). A new active set algorithm for box constrained optimization. *Journal of Optimization*, 17(2):526–557.
- Haimes, Y., Lasdon, L., e Wismer, D. (1971). On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1(3):296–297.
- Jones, R. (2005). Sustainability and integrated weed management in australian winter cropping systems: A bioeconomic analysis. In *49th Annual Conference of the Australian Agricultural and Resource Economic Society*, páginas 1–15.

- Jones, R. e Cacho, O. J. (2000). A dynamic optimisation model of weed control. In *44th Annual Conference of the Australian Agricultural and Resource Economics*, páginas 1–17.
- Jones, R., Cacho, O. J., e Sinden, J. (2006). The importance of seasonal variability and tactical responses to risk on estimating the economic benefits of integrated weed management. *Agricultural Economics*, 35(3):245–256.
- Kajino, H. S., Stiegelmeier, E. W., Oliveira, V. A., e Karam, D. (2010). Herbicides resistance model based on dose-responses curves. *Ecological Modelling*. (submetido).
- Kennedy, J. O. S. (1986). *Dynamic Programming: Applications to Agriculture and Natural Resources*. Elsevier, New York, NY.
- Leal, U. A. S. (2012). Otimização vetorial e técnicas de mistura de herbicidas aplicadas ao controle de plantas daninhas. Master's thesis, IBILCE-UNESP, São José do Rio Preto, SP.
- Leal, U. A. S., Silva, G. N., Stiegelmeier, E. W., Oliveira, V. A., e Karam, D. (2011). Otimização da concentração de mistura de herbicidas considerando a resistência de plantas daninhas. *Submetido TEMA*.
- Seefeldt, S. S., Jensen, J. E., e Fuerst, E. P. (1995). Log-logistic analysis of herbicide dose-response relationships. *Weed Technology*, 9(1):218–227.
- Stiegelmeier, E. W. (2012). Modelo de otimização para o controle de plantas daninhas usando a dinâmica de resistência.
- Stiegelmeier, E. W., Munari, P. A., Kajino, H. S., Oliveira, V. A., e Silva, G. N. (2010). Modelo de otimização da aplicação de herbicida para o controle de plantas daninhas considerando a evolução da resistência. In *XVIII Congresso Brasileiro de Automática, SBA*, páginas 886–893.