

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA “LUIZ DE QUEIROZ”
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA DO SOLO
PROJETANDO AGRICULTURA COMPROMISSADA EM SUSTENTABILIDADE

Renan Tasca
Benjamim Clemente Marinho

Herbicidas: Inibidores da ALS

Piracicaba
2024

RENAN TASCA
BENJAMIM CLEMENTE MARINHO

Herbicidas: Inibidores da ALS

Revisão bibliográfica apresentada ao
PACES - Projetando Agricultura
Compromissada em Sustentabilidade, na
Esalq - Escola Superior de Agricultura "Luiz
de Queiroz", USP - Universidade de São
Paulo, no Departamento de Ciências do
Solo (LSO).

Orientadores: Prof. Fernando Dini Andreote
e Prof. Moacir Tuzzin de Moraes.

Coordenadores: Kaio Eduardo P. Álvares e
Thales Góes P. de Souza.

Piracicaba

2024

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	5
2 CARACTERÍSTICAS GERAIS.....	6
3 MODO/MECANISMO DE AÇÃO.....	9
4 SINTOMATOLOGIA.....	11
5 CASOS DE RESISTÊNCIA.....	13
6 MISTURAS DE TANQUE.....	15
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	17

RESUMO: Na década de 1980, a introdução do primeiro herbicida inibidor da enzima acetolactato sintase (ALS) revolucionou o controle de plantas daninhas, sendo utilizado em diversas culturas como soja, trigo e arroz. Esses herbicidas incluem o grupo das imidazolinonas, sulfonilureias e triazolopirimidinas, são conhecidos por sua baixa toxicidade para mamíferos e alta seletividade. Eles atuam inibindo a síntese dos aminoácidos valina, leucina e isoleucina, essencial para o crescimento das plantas, resultando em paralisia no desenvolvimento vegetal e na morte das plantas daninhas. No entanto, o uso extensivo desses herbicidas levou ao surgimento de resistência em várias espécies de plantas daninhas, como *Kochia scoparia* e *Amaranthus hybridus*, o que tem desafiado o manejo dessas espécies. Alternativas de manejo incluem a combinação de herbicidas ALS com outros mecanismos de ação, como inibidores de PROTOX e do fotossistema II, mostrando eficácia no controle de espécies resistentes.

1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes marcos do mercado de controle de plantas daninhas foi na década de 1980, no qual foi introduzido a primeira molécula de um herbicida inibidor da enzima acetolactato sintase (ALS), podendo ser empregada em diversas culturas, como a soja, o trigo e o arroz. Esse mecanismo de ação é dividido em alguns grupos químicos, sendo as imidazolinonas, sulfonilureias e triazolopirimidinas, tendo uma baixa toxicidade para mamíferos e boa seletividade às culturas que são utilizadas (Saari *et al.*, 1994).

A atuação desses herbicidas são caracterizados por interferirem na rota de formação de alguns aminoácidos, sendo eles: valina, leucina e isoleucina. Portanto, a enzima acetolactato sintase (ALS) é inibida pela molécula herbicida, assim provocando na planta a paralisação de seu crescimento, amarelecimento de seus pontos de desenvolvimento e deficiência no crescimento radicular (Saari *et al.*, 1994).

Devido a essas características, ao longo do tempo, foram sendo selecionadas novas espécies resistentes ao mecanismo em questão, por volta de cinco anos após seu desenvolvimento. Atualmente, ainda temos espécies em ascensão relacionadas a isso, como, por exemplo, as plantas *Kochia scoparia*, *Amaranthus strumarium*, *Sorghum bicolor* e *Bidens pilosa* (Ponchio, 1997).

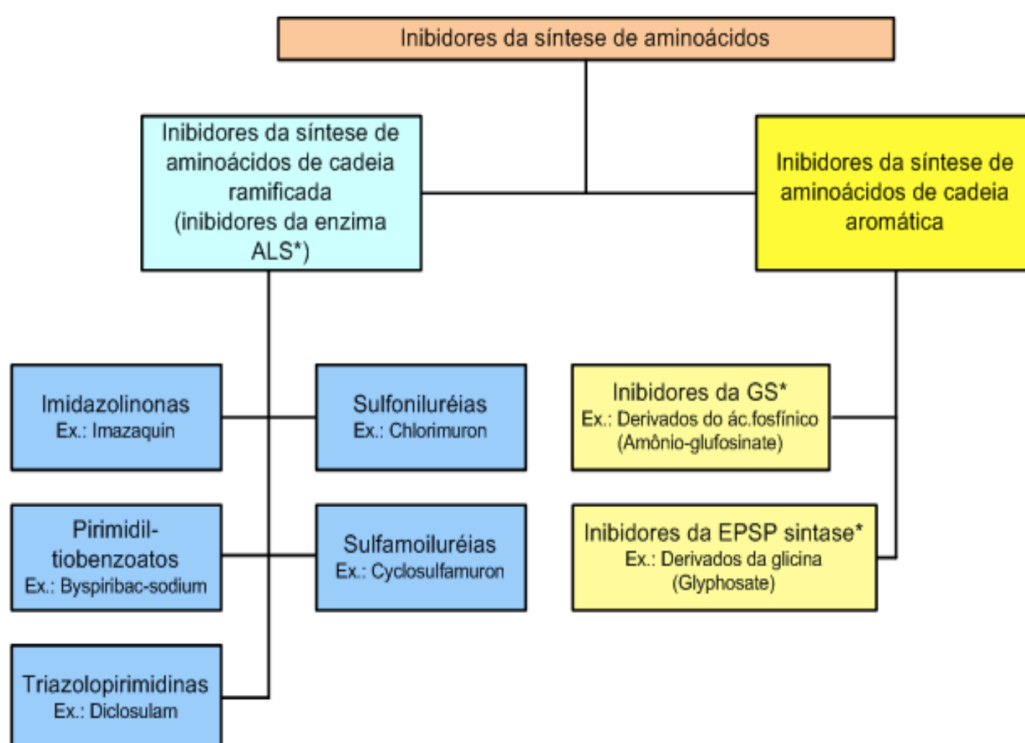
2 CARACTERÍSTICAS GERAIS

Os inibidores da ALS têm sido intensivamente utilizados em função da alta eficiência em doses muito baixas, baixa toxicidade para mamíferos e boa seletividade para várias das culturas de grande importância econômica. A combinação do uso generalizado e da facilidade com que plantas daninhas desenvolvem resistência a este grupo resultou na seleção de um grande número de espécies resistentes aos inibidores da ALS, em diversos países (Oliveira Jr., 2011).

Os herbicidas inibidores da enzima ALS podem ser utilizados em pré e pós-emergência com vias de absorção radicular e foliar, já que há ingredientes ativos com translocação tanto pelo xilema como pelo floema, acumulando-se nos meristemas de crescimento (Christoffoleti, 2016).

Christoffoleti (2016) explica que os herbicidas inibidores da enzima acetolactato sintase (ALS) ou aceto-hidroxiácido sintase (AHAS) pertencem a diversos grupos químicos (Figura 1), dentre eles as sulfonilureias (azimsulfuron, chlorimuron-ethyl, thoxysulfuron, metsulfuron-methyl, halosulfuron, flazasulfuron, pirazosulfuron-etil, nicosulfuron, oxasulfuron, cyclosulfamuron, trifloxysulfuron-sodium, iodosulfuron-methyl, oramsulfuron), imidazolinonas (imazamox, imazethapyr, imazapic, imazaquin, imazapyr), triazolopirimidinas (flumetsulan, diclosulan, cloransulam-methyl) e pirimidiloxitiobenzoatos (pyrithiobacsodium, bispyribac-sodium).

Figura 1 - Grupos químicos que inibem biossíntese de aminoácidos



Fonte: Christoffoleti (2016).

Os principais grupos químicos e herbicidas inibidores da ALS encontram-se na tabela 1.

Tabela 1 - Grupos químicos e herbicidas

Grupo químico	Herbicidas	
	Nomes comuns	Nomes comerciais
Imidazolinonas	Imazamox	Raptor, Sweeper
	Imazapic	Plateau
	Imazapyr	Chopper Florestal, Contain
	Imazaquin	Imazaquin Ultra Nortox, Scepter, Soyaquin, Topgan
	Imazethapyr	Differ, Dinamaz, Imazet, Imazetapir Plus
		Nortox, Imazetapir Prentiss, Pistol, Pivot, Vezir, Wide, Zaphir, Zethapyr
Sulfoniluréias	Azimsulfuron	Gulliver
	Chlorimuron-ethyl	Caput, Chlorimuron Agripec, Classic, Clorim, Clorimuron Master Nortox, Clorimuron Prentiss, Clorimuron 250 BR, Conquest, Garbor, Panzer, Smart, Staron, Stilo, Twister
		Cyclosulfamuron
		Invest
		Ethoxysulfuron
		Gladium
	Flazasulfuron	Katana
	Halosulfuron-methyl	Sempre
	Iodosulfuron-methyl	Hussar
	Metsulfuron-methyl	Accurate, Ally, Nufuron, Wolf, Zartan
	Nicosulfuron	Accent, Loop, Nicosulfuron Nortox, Nippon, Nisshin, Pramilho, Sanson
		Oxasulfuron
Triazolopirimidinas	Pyrazosulfuron-ethyl	Chart
	Trifloxysulfuron-sodium	Sirius
	Cloransulam-methyl	Envolve
	Pacto	Pacto
	Diclosulam	Coact, Spider
	Flumetsulam	Prevail, Scorpion
Pirimidinil(tio)benzoatos	Penoxsulam	Ricer
	Bispyribac-sodium	Nominee, Sonora
	Pyrithiobac-sodium	Staple

Fonte: Oliveira Jr. (2011).

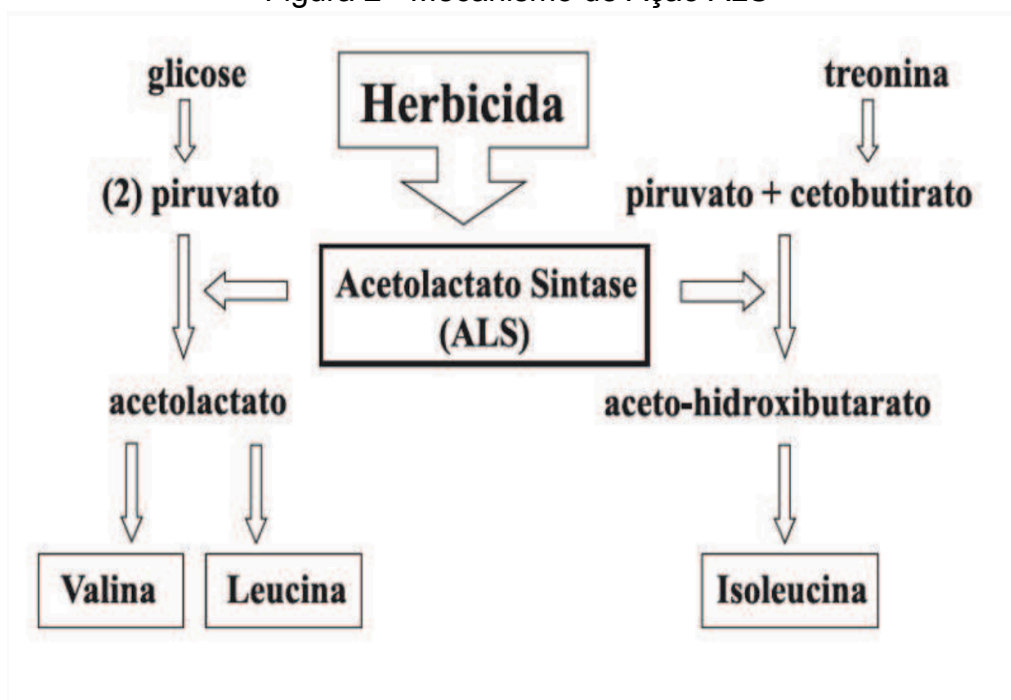
3 MODO/MECANISMO DE AÇÃO

Esses herbicidas apresentam como mecanismo de ação a inibição da síntese dos aminoácidos alifáticos de cadeia lateral: valina, leucina e isoleucina (Figura 2). A via biossintética desses três aminoácidos apresenta em comum o uso de uma enzima chamada ALS, que participa na fase inicial do processo metabólico, catalisando uma reação de condensação (Christoffoleti, 2016).

Essa reação de condensação consiste na fusão de duas moléculas de piruvato, gerando o acetolactato, ou na condensação de uma molécula de piruvato com uma molécula de 2-cetobutirato, formando 2-aceto-2-hidroxibutirato, como o primeiro passo da biossíntese do aminoácido isoleucina. Cada um destes produtos é convertido posteriormente por outras três reações, catalisadas pelas enzimas aceto-hidroxiácido isômero reductase (KARI), hidroxiácido desidratase e aminotransferase, resultando em valina e isoleucina (Christoffoleti, 2016).

Na biossíntese da leucina, o precursor da valina 2-ceto-isovalerato é ainda convertido em uma série de 4 reações que utilizam as enzimas 2-isopropil malato sintase, isopropylmalate isomerase, desidrogenase e aminotransferase (Christoffoleti, 2016).

Figura 2 - Mecanismo de Ação ALS



Fonte: Christoffoleti (2016).

Os herbicidas inibidores da ALS impedem que essas reações de condensação aconteçam, provocando, como consequência, o bloqueio na produção dos aminoácidos alifáticos de cadeia lateral. Quando o herbicida se encontra presente dentro da célula de uma planta susceptível, ocorre uma inibição não competitiva pelo herbicida com o substrato, de tal maneira que não ocorre a formação do acetolactato, indispensável para que as demais reações prossigam e resultem na formação dos aminoácidos. A paralisação na síntese dos aminoácidos leva a uma interrupção na divisão celular e consequente paralisação do crescimento da planta (Christoffoleti, 2016).

4 SINTOMATOLOGIA

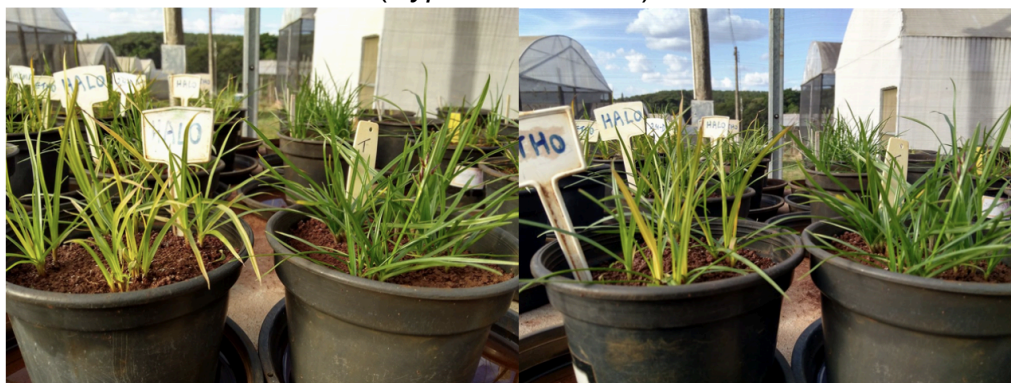
Os sintomas visuais dos efeitos causados pelos herbicidas inibidores da ALS nas plantas sensíveis geralmente envolvem a inibição do crescimento das plantas, tanto das raízes quanto parte aérea. Pode-se observar o encurtamento da raiz principal e a proliferação de raízes laterais (“escova de limpar garrafas”) (Almeida; Ferrão, 2022; Giraldeli, 2019).

No entanto, podem haver outros sintomas, como vermelhidão das nervuras, clorose foliar, morte de meristemas, necroses que se desenvolvem lentamente entre os dias após a aplicação, murchamento da planta e, em última análise, a morte da planta (Figura 3) (Almeida; Ferrão, 2022)

Em plantas de folha larga pode-se ter nervuras avermelhadas na parte de baixo das folhas (Figura 5). Nas gramíneas, por sua vez, ocorre a redução do comprimento dos entrenós e espessamento do colmo (Figura 4) (Giraldeli, 2019).

A paralisação do crescimento ocorre de uma a duas horas após a aplicação, enquanto a morte das plantas ocorre entre 7 e 14 dias após a aplicação dos herbicidas (Giraldeli, 2019).

Figura 3 - Sintomas de halosulfuron (esquerda) e ethoxysulfuron (direita) em tiririca (*Cyperus rotundus*)



Fonte: Giraldeli (2019).

Figura 4 - Sintomas de imazapyr (4 vezes a dose) em muda pré-brotada de cana-de-açúcar, em aplicação pré-plantio, no mesmo dia do plantio.



Fonte: Giraldeleli (2019).

Figura 5 - Sintomas de herbicida inibidor da ALS: presença de nervuras avermelhadas na parte de baixo de folhas



Fonte: Giraldeleli (2019).

5 CASOS DE RESISTÊNCIA

A seleção de plantas daninhas com biótipos resistentes ao longo do tempo pode ser determinada por diversos fatores, como sua adaptabilidade ecológica e prolificidade do indivíduo, longevidade e dormência das sementes da espécie ou do biótipo em questão, além da frequência de aplicação do mecanismo de ação e sua persistência no solo (Rizzardi *et al.*, 2002).

Quando se abordam os inibidores da ALS, as espécies tolerantes a esses herbicidas, especificamente, a imidazolinonas e sulfonilureias, geralmente apresentam aumento no metabolismo do herbicida (Tabela 2). Dentre essas plantas, a determinação de seu mecanismo de resistência foi devido à alteração do sítio de ação da ALS, tornando-a insensível aos herbicidas, sendo que, frequentemente, costumam apresentar resistência cruzada aos herbicidas pertencentes ao mesmo grupo ou de outros grupos do mecanismo (Rizzardi *et al.*, 2002).

Em avaliação em algumas espécies, foi constatado, inicialmente em *Euphorbia heterophylla*, níveis variáveis de resistência cruzada aos inibidores da ALS, tendo um comportamento semelhante em *Amaranthus hybridus*, pela molécula imazaquin. Em outros experimentos realizados, a segunda espécie citada, também apresentou biótipos resistentes ao chlorimuron. Logo, com os resultados obtidos nessas espécies, é possível constatar que essa resistência cruzada é resultante de uma única mutação ou combinação de duas mutações separadas no gene que codifica a ALS, onde cada mutação representa uma resistência à um grupo diferente (Rizzardi *et al.*, 2002).

Mutações espontâneas podem gerar um biótipo resistente entre as espécies, em que uma única substituição nas bases nitrogenadas pode conferir tal fenômeno. À exemplo disso, em *Kochia scoparia*, observa-se uma mudança na codificação da prolina devido a uma mutação, possibilitando sua resistência às sulfonilureias, enquanto, em *Amaranthus rudis*, o triptofano sofreu mutação para leucina, conferindo a resistência aos inibidores da ALS (Rizzardi *et al.*, 2002).

Tabela 2 - Espécies de plantas daninhas resistentes aos herbicidas inibidores da ALS

Espécie	Nome comum	Ano de identificação
<i>Bidens pilosa</i>	Picão-preto	1992
<i>Euphorbia heterophylla</i>	Leiteira	1992
<i>Bidens subalternans</i>	Picão-preto	1996
<i>Sagittaria montevidensis</i>	Sagitaria	1999
<i>Cyperus difformis</i>	Tiririca	2000
<i>Fimbristylis miliacea</i>	Cuminho	2001
<i>Raphanus sativus</i>	Nabo	2001
<i>Parthenium hysterophorus</i>	Losna-branca	2004

Fonte: Vidal e Trezzi (2006).

6 MISTURAS DE TANQUE

Como já citado, desde o desenvolvimento das moléculas herbicidas desse mecanismo, diversas espécies resistentes foram sendo selecionadas ao longo do tempo, elevando as dificuldades para o controle. Como forma de exemplificação, foi realizado um experimento com objetivo de apresentar alternativas para o manejo dessas plantas resistentes, com o uso dos herbicidas inibidores da ALS em mistura com alguns mecanismos alternativos, como os inibidores da protoporfirinogênio oxidase (PROTOX) e inibidores do fotossistema II (Tabela 3) (Montero; Christoffoleti, 2001).

Tabela 3 - Descrição dos tratamentos utilizados no experimento		
Tratamento	g i.a. ha-1	g ou L p.c. ha-1
1. chlorimuron-ethyl	20,0	80
2. chlorimuron-ethyl + lactofen	12,5 + 120	50 + 0,5
3. chlorimuron-ethyl + fomesafen	12,5 + 150	50 + 0,6
4. chlorimuron-ethyl + bentazon	12,5 + 384	50 + 0,8
5. chlorimuron-ethyl + imazethapyr	12,5 + 50	50 + 0,5
6. lactofen	192	0,8
7. fomesafen	225	0,9
8. bentazon	480	1,0
9. imazethapyr	100	1,0
10. testemunha	-	-

Fonte: Montero e Christoffoleti (2001).

Foi possível concluir que os herbicidas chlorimuron-ethyl e imazethapyr, em doses recomendadas, foram ineficientes no controle, contudo, que as moléculas lactofen, fomesafen e bentazon, em mistura ou isolados, foram eficientes no controle (Tabela 4) (Montero; Christoffoleti, 2001).

Tabela 4 - Controle da planta daninha picão-preto, em experimento de campo aos 14 e 21 dias após a aplicação dos herbicidas (DAA)

Tratamento	14 DAA	21 DAA
1. chlorimuron-ethyl	42,5c	21,6c
2. chlorimuron-ethyl + lactofen	53,8bc	63,8b
3. chlorimuron-ethyl + fomesafen	72,5a	72,5ab
4. chlorimuron-ethyl + bentazon	47,5c	67,8b
5. chlorimuron-ethyl + imazethapyr	37,5c	17,2c
6. lactofen	80,0a	80,5ab
7. fomesafen	82,6a	85,3a
8. bentazon	66,7ab	72,6ab
9. imazethapyr	0,3d	0,0d
10. testemunha	0,0d	0,0d

Fonte: Montero e Christoffoleti (2001).

Além disso, outras misturas em conjunto com moléculas herbicidas inibidores da ALS são amplamente utilizadas, como: bentazona e imazamox (Amplo), glifosato e imazetapir (Alteza), imazapique e imazetapir (Only), ametrina e trioxissulfurom (Krismat), atrazina e nicossulfurom (Sanson AZ), foramsulfurom e iodosulfurom (Equip Plus) (Vilar, 2021).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É possível considerar, portanto, a importante revolução do desenvolvimento dos herbicidas inibidores da acetolactato sintase (ALS) na década de 1980, possibilitando um amplo espectro de controle e uso, em culturas como o arroz e a soja, com seus principais grupos, tendo uma boa seletividade e baixa toxicidade, inibindo a síntese de aminoácidos, sendo eles: valina, leucina e isoleucina.

Por outro lado, não demorou para se selecionarem plantas daninhas resistentes ao mecanismo em questão, tendo como exemplo as espécies *Kochia scoparia* e *Amaranthus hybridus*, sendo um ponto de atenção para isso, visto o surgimento contínuo até os dias de hoje de novos biótipos resistentes a esses herbicidas. Dessa forma, diversas estratégias vêm sendo testadas e empregadas visando gerar novas alternativas para redução dessa pressão de seleção, como as misturas de diferentes moléculas com diferentes modos de ação no metabolismo da planta, como os inibidores da PROTOX e do fotossistema II, que já apresentaram resultados positivos em biótipos resistentes.

Logo, a utilização desses herbicidas são de grande importância para o desenvolvimento agrícola do País, visto sua alta capacidade de controle de um amplo espectro de espécies, contudo, seu emprego deve ser provocado por meio de manejos integrados no campo, como sua combinação com outros herbicidas e a rotação de culturas, garantindo por um maior período sua eficácia na lavoura.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Edmilson Igor Bernardo; FERRÃO, Gregori da Encarnação. **FUNDAMENTOS EM BIOLOGIA E MANEJO DE PLANTAS DANINHAS**. São Luís: Edufma, 2022.

CARACTERÍSTICAS da resistência de acordo com o mecanismo de ação herbicida. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2006.

CHRISTOFFOLETI, Pedro Jacob. **Aspectos de resistência de plantas daninhas a herbicidas**. Piracicaba: Hrac, 2016.

VIDAL, Ribas Antonio; TREZZI, Michelangelo Muzell. **Cresce a resistência das plantas daninhas à herbicidas**. Piracicaba: Esalq, 2006.

GIRARDELI, Ana Ligia. **Herbicidas Inibidores da ALS (Grupo B)**. Santa Maria: Mais Soja, 2019.

OLIVEIRA JR., R.S. *et al.* **Biologia e manejo de plantas daninhas**. Curitiba: Omnipax, 2011.

MONQUERO, Patrícia; CHRISTOFFOLETI, Pedro. **MANEJO DE POPULAÇÕES DE PLANTAS DANINHAS RESISTENTES AOS HERBICIDAS INIBIDORES DA ACETOLACTATO SINTASE**. Viçosa: Sbcpd, 2001.