

5

Eficiência de Deposição de Agrotóxicos em Culturas Rasteiras

*Aldemir Chaim
Pedro José Valarini*

Introdução

O objetivo principal de uma pulverização é aplicar a quantidade mínima de ingrediente ativo sobre o alvo, obtendo o máximo de eficiência sem contaminar as áreas não alvo. O aumento da contaminação do meio ambiente devido a deriva de produtos químicos tóxicos tem causado freqüentes condenações às pulverizações, principalmente quando os efeitos são visíveis. Para determinados inseticidas, os efeitos não são facilmente detectáveis, mas para determinados herbicidas, como o 2,4-D, determinadas plantas podem exibir os sintomas de intoxicação a quilômetros de distância, devido à ação do vento. Outro exemplo: resíduos de organofosforados foram detectados no leite proveniente de vacas alimentadas próximo à área tratada (Matthews, 1982).

As perdas que ocorrem durante as aplicações de agrotóxicos são originadas por um conjunto de causas. Nas pulverizações com grandes volumes de calda, muitas gotas caem entre as folhagens das plantas, especialmente nos espaços entre as linhas da cultura e entre as plantas, atingindo o solo. Uma grande quantidade de gotas atinge as folhas, coalescendo-se e formando gotas maiores, que não conseguem mais ficar retidas, escorrendo para as partes inferiores das plantas e caindo finalmente no solo (Courshee, 1960). A pulverização com intenção de molhar totalmente as plantas é muito praticada atualmente, apesar de ter sido “inventada” no século passado. Na

prática, o que acontece nesse tipo de aplicação é que, uma vez que se inicia o escoamento, a retenção dos produtos químicos pelas folhas é menor do que se a pulverização fosse interrompida exatamente antes do início do escoamento. Esse ponto dificilmente é conseguido, e a quantidade de produto químico retida nas folhas é proporcional à concentração da calda e independe do volume aplicado. Se o objetivo for reduzir o volume de aplicação, exigir-se-á produção e distribuição adequadas de gotas e, neste caso, as perdas por evaporação e deriva podem ser acentuadas.

Atualmente, as recomendações contidas nos rótulos das embalagens dos agrotóxicos deixam a seleção do volume de aplicação a critério do aplicador. Algumas recomendações dão opções entre 200 a 1.000 litros de calda por hectare. Na prática, o usuário utiliza um mesmo volume para uma grande variedade de pragas e para os vários estádios de crescimento da cultura. Quando a cultura se apresenta com pequena quantidade de folhas, o volume aplicado pode ser excessivo e, por outro lado, quando as plantas já estão desenvolvidas, o volume pode ser insuficiente para fornecer uma boa cobertura da cultura (Matthews, 1982).

O volume de aplicação depende do tipo de tratamento que se deseja executar, mas apresenta uma forte relação com o tamanho das gotas produzidas pelos bicos, o qual determina a distribuição do agrotóxico no alvo. Pouca atenção tem sido dada ao tamanho das gotas e uma grande variedade de bicos tem sido utilizada ao longo dos anos. A maioria dos bicos produz um espectro de gotas de tamanhos variados e, em muitos casos, as gotas grandes se chocam com as folhas mais expostas e não conseguem penetrar para se depositar nas superfícies “escondidas” do vegetal. Essa deposição externa pode se dar em tal intensidade que acaba escoando para o solo, produzindo o que é denominado endoderiva. Por outro lado, as gotas pequenas, que são mais adequadas para penetração entre as folhas da planta, podem ser levadas pelo vento para fora da área tratada, provocando a exoderiva e, além disso, são

mais sensíveis à evaporação. O tamanho de gota ótimo é aquele que promove o máximo de deposição de produto no alvo, com um mínimo de contaminação do meio ambiente (Himel, 1969; e Himel & Moore, 1969).

A contaminação do solo pode provocar grandes variações nas populações de organismos não-alvo, principalmente aqueles que degradam a matéria orgânica e melhoram a fertilidade. Muitas vezes essas perdas são responsáveis por desequilíbrios favoráveis ao aparecimento de novas pragas e doenças. Um solo contaminado pode ser levado pelas águas de chuva para rios, açudes e lagos, colocando em risco não só aquelas populações que vivem nesses sistemas, mas também os indivíduos que utilizam essa água para sua sobrevivência, como os animais e o próprio homem.

Para compensar as perdas que ocorrem durante as aplicações, as dosagens aplicadas são extremamente superestimadas. Por exemplo, Brown (1951) já afirmava que para matar um determinado inseto era necessário apenas 0,0003 miligrama de um determinado produto; para controlar uma população de 1.000.000 de indivíduos (população que promovia dano econômico na cultura), seriam necessários apenas 30 miligramas do mesmo produto. Apesar disso, o volume das aplicações efetuadas no campo era de mais de 3.000 vezes a dose necessária, para obter um controle adequado.

A aplicação de agrotóxicos tem sido caracterizada como uma ciência aplicada, de natureza multidisciplinar, envolvendo conhecimentos nas áreas de biologia, engenharia e química (Matthews, 1982). A necessidade de conhecimento na área de biologia está relacionada, principalmente, com os níveis de controle, baseados em critérios econômicos como, por exemplo, a densidade crítica de ervas daninhas, ou a população máxima de determinados insetos. Os requisitos biológicos determinam parâmetros como o tamanho e o número de gotas, bem como a concentração do agrotóxico, sendo que estes ainda podem variar de acordo com o alvo e o modo de ação do produto aplicado, para atingir um nível satisfatório de controle (Combella, 1981).

Vários fatores estão envolvidos na relação entre as gotas e o alvo, os quais, em função do número dessas interações, determinam a retenção ou perda do agrotóxico. Dentre esses fatores estão a forma do alvo (Johnstone, 1973), a natureza física da superfície e o ângulo de incidência das gotas em relação à superfície. Os fatores que influenciam o impacto e a retenção das gotas no alvo são seu tamanho e a pressão com que são pulverizadas, além das condições micrometeorológicas durante a aplicação.

O tipo de formulação do produto, sua viscosidade, e o veículo líquido usado na pulverização também exercem uma importante influência na retenção das gotas pelo alvo (Combella, 1981).

A eficiência do movimento da gota na direção do alvo é influenciada tanto pelo processo de aplicação como pelas características da formulação do produto. Nessa fase, a gota é influenciada pelas condições da natureza, tais como temperatura, umidade relativa do ar, velocidade vertical e horizontal do vento, turbulência do ar e pressão atmosférica.

Fatores que afetam a eficiência da deposição dos agrotóxicos

Pulverização ou geração de gotas: São necessários poucos gramas de ingrediente ativo para controlar os problemas fitossanitários em uma determinada área. Na maioria dos casos, os ingredientes ativos não apresentam as características físicas necessárias para serem aplicados diretamente, com os pulverizadores comerciais. Assim, esses ingredientes ativos recebem a adição de uma série de adjuvantes, estabelecendo uma “formulação”. Numa questão puramente física e matemática, dispõe-se de um pequeno volume para ser espalhado em uma grande área. Desta forma, a grande maioria das formulações é desenvolvida para ser diluída novamente em água. Mesmo com a diluição em água, o volume final ainda é insuficiente para que o produto

químico entre em contato com toda a área de superfície do alvo. É necessário, portanto, aumentar a superfície do líquido, para que ele possa ser espalhado uniformemente na área alvo. A única maneira de aumentar a superfície do líquido, para que ele possa ser distribuído uniformemente numa grande área, é dividi-lo em partículas líquidas denominadas gotas.

O número de gotas que podem ser produzidas com um determinado volume de líquido é inversamente proporcional ao seu diâmetro, elevado ao cubo. De acordo com Matthews (1982), o número médio de gotas que se deposita por centímetro quadrado em uma superfície plana pode ser calculado por:

$$n = \frac{60}{\pi} \times \left(\frac{100}{d} \right)^3 \times Q$$

onde: n é o número médio de gotas que se deposita por cm²; d é o diâmetro da gota (μm); e Q é o volume aplicado em litros por hectare.

Assim, a densidade teórica de gotas do mesmo tamanho obtidas quando se pulveriza um litro por hectare, assumindo que a superfície é plana, é dada na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Densidade teórica de gotas quando se pulveriza um litro por hectare.

Diâmetro das gotas(μm)	Número de gotas por cm ²
10	19.999
20	2.387
50	153
100	19
200	2,4
400	0,298
1000	0,019

Tamanho das gotas: As pulverizações produzem um grande número de gotas – pequenas esferas de líquido – sendo a maioria menor que 0,5 mm. O tamanho da gota é muito importante para os agrotóxicos serem aplicados eficientemente com um mínimo de contaminação do meio ambiente. As pulverizações dos agrotóxicos são normalmente classificadas de acordo com o tamanho das gotas (Tabela 5.2).

Tabela 5.2. Classificação das pulverizações de acordo com o tamanho das gotas

Diâmetro mediano volumétrico (μm)	Classificação da pulverização
< 50	Aerossol
51-100	Neblina
101-200	Pulverização fina
201-400	Pulverização média
> 400	Pulverização grossa
> 500	Garoa

A pulverização aerossol é adequada para pulverização sob deriva, contra insetos voadores. Algumas gotas aerossóis – 30 a 50 μm – e neblina são ideais para tratamento de folhagens em aplicações com volumes ultra baixos (menos de 5,0 l/ha). Quando é necessário reduzir a deriva, as pulverizações média e grossa são as mais adequadas, independentemente do volume aplicado. A pulverização fina é adequada quando é necessário um ajuste entre reduzir a deriva e promover uma boa cobertura.

O tamanho das gotas é expresso como o diâmetro de uma gota em vôo, medido em micrômetros (μm) – um micrômetro é 1/1000 mm. Quando se choca contra o alvo, a gota se espalha, deixando de ser uma esfera e, assim, fornece uma falsa impressão do seu tamanho original. A intensidade do espalhamento depende da formulação e da natureza da superfície do alvo.

A maioria dos dispositivos usados para a pulverização não consegue produzir gotas de um único tamanho. Dentro de uma pulverização

convencional, existe uma variação do tamanho das gotas, referido como *espectro de gotas*, e é importante a compreensão do tamanho das gotas e a relação com sua recuperação pelo alvo. Os espectros de gotas são categorizados de acordo com o tamanho médio das partículas. Os dois padrões internacionais utilizados para definir os espectros são o diâmetro mediano volumétrico e diâmetro mediano numérico.

Parâmetros de tamanho das gotas - VMD e NMD: O parâmetro mais comum utilizado para expressar o tamanho das gotas é o diâmetro mediano volumétrico -**VMD**. Nesse caso, soma-se o volume de todas as gotas de uma amostra representativa, e o VMD é o diâmetro daquela gota que divide a amostra em duas partes iguais, de maneira que metade do volume é composto por gotas menores que o VMD, e a outra metade contém gotas maiores. Neste caso, umas poucas gotas grandes podem ser responsáveis por uma grande proporção do volume total da amostra, e isso aumenta o valor do VMD, que sozinho não serve para indicar a variação do tamanho das gotas. Assim, utiliza-se um outro parâmetro: o diâmetro mediano numérico – NMD. Ele divide a amostra de gotas em duas partes iguais pelo número, sem referência aos seus volumes, de maneira que metade do número total de gotas é menor que o NMD, e a outra metade é maior. Esse parâmetro enfatiza as gotas menores, as quais quase sempre estão em maior proporção numa amostra. Pelo fato de o VMD e o NMD serem afetados, respectivamente, pela proporção de gotas grandes e pequenas, a relação entre os dois parâmetros é utilizada para expressar o grau de uniformidade dos tamanhos. A relação entre VMD e NMD fornece um indicativo da uniformidade do espectro, de maneira que o tamanho das gotas é tanto mais uniforme, quanto mais próxima de 1 estiver essa relação.

A determinação de VMD e NMD consome muito tempo, porque é necessário coletar e medir um grande número de gotas. Existem métodos de medição que usam tecnologia laser, mas atualmente essa tecnologia é muito cara e restrita a alguns laboratórios ou estabelecimentos de pesquisa europeus

ou americanos. Para a maioria das operações comerciais tem sido empregada a seguinte equação:

$$\text{VMD} = 0,45 \times D_{\text{max}}$$

na qual: D_{max} é o diâmetro da maior gota – e é importante utilizar uma amostra suficientemente grande para obter o valor D_{max} .

VMD e NMD são medidas úteis para a caracterização das pulverizações pois, ainda que dêem apenas uma pequena indicação da variedade de gotas presentes, não existe um outro meio para quantificá-las.

Relação entre o tamanho das gotas e o alvo de aplicação: Existe uma diversidade muito grande de alvos para as aplicações de agrotóxicos. Como estes são biologicamente muito ativos, a eficiência da aplicação pode ser melhorada se for selecionado um tamanho ótimo de gota, para aumentar a quantidade de produto que atinge e adere ao alvo. É necessário pesquisar para definir o tamanho ótimo de gota para cada tipo de alvo, entretanto Matthews (1982) apresenta uma tabela com algumas generalizações (Tabela 5.3).

Tabela 5.3. Tamanho ótimo de gotas para alguns tipos de alvo.

Alvos	Tamanho de gotas (μm)
Insetos em vôo	10-15
Insetos em folhagem	30-50
Folhagens	10-100
Solos ou para reduzir deriva	250-500

A seleção do tamanho das gotas deve ser bastante criteriosa. Por exemplo, imaginando-se que uma gota de 50 μm possui a dose letal de um determinado inseticida para um determinado inseto, uma gota de 200 μm teria uma dose 64 vezes maior. Entretanto, se as duas gotas fossem perdidas, a gota maior desperdiçaria 64 vezes mais produto que a gota menor.

Coleta das gotas pelos alvos: As gotas são coletadas na superfície dos insetos ou das plantas por sedimentação ou impacto, sendo este último mais importante para gotas aerossóis ($< 50 \mu\text{m}$). A deposição por impacto é proporcionada por uma interação complexa entre tamanho e velocidade das gotas e tamanho do alvo. Em geral, a eficiência da coleta aumenta proporcionalmente com o aumento da velocidade relativa e tamanho da gota, e diminui à medida que aumenta o tamanho do alvo. Uma gota de 10 mm, submetida à ação de um fluxo de ar constante, conseguiria se desviar de uma laranja colocada na sua trajetória; entretanto, provavelmente não conseguiria se desviar de um fino fio de cabelo.

O impacto das gotas sobre as folhas depende muito da posição da sua superfície em relação à trajetória das gotas. Uma grande parte das gotas são coletadas pelas folhas que estão balançando pela ação da turbulência do ar. Entretanto, se a velocidade do vento for muito grande – e isso ocorre em muitos casos, em pulverizações com equipamentos que produzem correntes de ar em alta velocidade – a folha pode assumir uma posição paralela ao jato de ar, de forma que apresenta uma área mínima para interceptar as gotas.

A superfície dos alvos pode afetar sensivelmente a deposição, como no caso das superfícies pilosas ou serosas, que não conseguem reter as gotas. Nesse caso, é necessário adicionar algum produto que reduza a tensão superficial da calda de pulverização, para melhorar o molhamento ou espalhamento e adesão das gotas.

Densidade da deposição: Quando se pratica a pulverização com grandes volumes de calda, o desejo é promover uma cobertura completa das plantas. Para se reduzir o volume de aplicação existe a necessidade de se aplicar gotas de forma dispersa e, exceto em poucos casos, o controle não tem sido tão bom como o conseguido com a aplicação de grandes volumes. Para se aplicar pequenos volumes de calda, é necessário conhecer a densidade, distribuição e tamanho das gotas que se depositam no alvo, de maneira que a

quantidade do ingrediente ativo do agrotóxico seja suficiente para um controle efetivo do problema fitossanitário. Na aplicação de produtos sistêmicos, a distribuição de gotas não influencia o resultado do controle, porque o produto é absorvido pelas plantas e redistribuído, através do seu sistema de circulação de seiva. Entretanto, quando o produto tem ação de contato, a densidade e a distribuição afetam sensivelmente o resultado do controle. Insetos que apresentam grande mobilidade, como as cigarrinhas e algumas espécies de lagartas, podem ser facilmente controladas sem uma cobertura completa dos alvos. Mas para insetos minadores de folhas e algumas espécies de cochonilhas, a cobertura tem que ser bastante uniforme.

Alguns trabalhos têm demonstrado que é necessária a deposição de uma gota com pelo menos 100 μm de VMD, por milímetro quadrado de folha, para o controle de uma determinada cochonilha em citros. O controle de doenças fúngicas sem uma cobertura completa pode parecer impossível, desde que a hifa do fungo penetre na folha no local da deposição do esporo. Entretanto, Matthews (1982) reportou que cada gota possui uma zona de influência fungicida, de maneira que se as gotas estiverem distribuídas dentro de distâncias adequadas, a proteção é muito boa.

Dinâmica das gotas: A deposição das gotas de pesticidas sobre um alvo definido é sujeita a uma série de influências. Influências como velocidade do vento e temperatura podem ser parcialmente controladas pela escolha do momento da aplicação; entretanto, outros fatores – estabilidade atmosférica, turbulência, umidade relativa, eficiência de coleta de gotas pela cultura e outros – estão fora de controle. O conhecimento do mecanismo dessas influências, associado com a nova geração de agrotóxicos, equipamentos e técnicas, auxilia o planejamento das aplicações para obtenção de máxima eficiência.

Trajatória das gotas: Durante a pulverização, as gotas passam por alguns tipos de influência, que determinam se elas atingem o alvo ou são

levadas pela deriva. A importância relativa dessas influências dependerá do tipo da aplicação, do sistema de pulverização e das condições micrometeorológicas, durante a pulverização.

a) Influência do equipamento: A sedimentação das gotas é afetada pela velocidade com que elas são projetadas para o alvo, e pela turbulência criada pelo próprio jato ou vento provocado pelo equipamento.

b) Influência do microclima: A partir do momento em que a gota está livre da influência do equipamento, ela será afetada pelas condições de turbulência e ventos predominantes. Dependendo da velocidade do vento e da altura da cultura, as turbulências podem ser maiores, iguais ou menores que a velocidade média de sedimentação do espectro das gotas. Dentro das culturas, com exceção das florestas onde a folhagem é densa, a velocidade média do vento é muito baixa e as gotas acima de 45 μm tendem a sedimentar-se sobre as superfícies.

Durante a trajetória das gotas, seu tamanho sofrerá diminuição devido à evaporação, e a temperatura e umidade relativa devem ser consideradas, principalmente para as pulverizações baseadas em água. Como será indicado posteriormente, isso é mais significativo para gotas menores do que 150 μm . O objetivo do estudo da dispersão das gotas é compreender a interação de todos esses processos, para se fazer previsões dos depósitos sobre os alvos, não alvos e deriva. Algumas discussões sobre dispersão de gotas e particulados envolvem alguns conhecimentos de aspectos fundamentais em física.

Evaporação das gotas: A evaporação ocorre quando a energia é transportada para uma superfície em evaporação, e se a pressão de vapor do ar está abaixo de um valor de saturação. A pressão de vapor saturado aumenta com a temperatura. A variação do estado de líquido para vapor requer energia para ser gasta na expansão das atrações intermoleculares das partículas de água. Essa energia é geralmente fornecida pela radiação solar e suplementada

pela remoção de calor do meio envolvente, causando uma aparente perda de calor, e uma conseqüente queda de temperatura. O calor latente de vaporização, para evaporar um grama de água em 0°C, é 600 cal. A taxa de evaporação depende de uma série de fatores, sendo que os dois mais importantes são a diferença entre a pressão de saturação de vapor da água e a pressão de vapor do ar, e a existência de um fornecimento contínuo de energia para a superfície. A velocidade do vento também afeta a taxa de evaporação, porque geralmente está associada com a importação de ar fresco e não saturado, o qual absorverá a umidade disponível.

A perda de líquido de uma pulverização, por evaporação depende muito da temperatura e da umidade relativa, mas também da composição da calda e do tamanho das gotas. A temperatura e a umidade relativa são incontroláveis e podem ser alteradas apenas pela seleção do momento da aplicação, de acordo com as variações diurnas do local da aplicação. As gotas grandes, acima de 150 µm, caem relativamente rápido e não são significativamente afetadas pela evaporação, no casos em que se pulveriza com aeronaves até 3 metros de altura ou pulverizadores tratorizados de barra, para aplicação em culturas rasteiras. Contudo, à medida que o tamanho das gotas diminui, ocorre um rápido aumento na relação entre a área de superfície e o volume das gotas e, conseqüentemente, na taxa de evaporação. Para complicar o problema, a velocidade de sedimentação – ou velocidade terminal – também diminui à medida que as gotas ficam menores. Isso indica que o tempo para a gota atingir a cultura fica mais longo e isso, por sua vez, aumenta o tempo disponível para a evaporação. Se a evaporação atingir o ponto em que o líquido evapora totalmente, uma partícula de resíduo do material ativo ficará flutuando no ar e poderá ser levada pela ação da deriva a distâncias consideráveis, antes de se depositar. A Tabela 5.4 apresenta o tempo de vida e a distância de queda das gotas, em ar parado, em diferentes condições de temperatura e umidade relativa.

Tabela 5.4. Tempo de vida e distância de queda de gotas, em ar parado, em diferentes condições de temperatura e umidade relativa.

Tamanho original da gota (μm)	T = 20°C $\Delta T = 2,2$ UR = 80%		T = 25°C $\Delta T = 4,0$ UR = 72%		T = 30°C $\Delta T = 7,7$ UR = 50%	
	t = (s)	D = (m)	t = (s)	D = (m)	t = (s)	D = (m)
30	5	0,07	3	0,04	1	0,02
50	14	0,30	8	0,29	4	0,15
70	28	2,05	15	1,13	8	0,58
100	57	8,52	31	4,69	16	2,44
150	128	43,14	70	23,73	37	12,33
200	227	136,36	125	75,00	65	38,96
300	511	690,34	281	379,69	146	197,24
400	909	2181,81	500	1200,00	290	623,37

T = temperatura, ΔT = diferença de temperatura entre termômetros de bulbo seco e úmido, UR = umidade relativa, t = tempo, e D = distância.

Pode ser observado que à medida que aumenta a diferença entre as temperaturas dos termômetros de bulbo seco e úmido (depressão psicrométrica), a taxa de evaporação aumenta consideravelmente.

A evaporação de gotas pode ser considerada como o principal fator determinante da eficiência da aplicação de agrotóxicos. Isto ocorre, em parte, porque a eficiência da aplicação é inversamente relacionada ao tamanho das gotas, ou seja, a grande maioria das pesquisas tem apontado que a eficiência das aplicações aumenta à medida que se diminui o tamanho das gotas. Alguns pesquisadores têm afirmado que a eficiência é maior quando as gotas são menores do que 100 μm , e não só no controle de pragas e doenças, mas também na aplicação de herbicidas. Na prática, quando empregam caldas diluídas em água, as pulverizações com gotas menores do que 60 μm evaporam tão rapidamente, que seria impossível utilizá-las sob determinadas condições micrometeorológicas.

Um dos fatores que afetam a evaporação das gotas é sua área de contato com o ar. A área de superfície de um líquido aumenta em grandes proporções quando ele é quebrado em gotas.

A área da superfície de uma esfera é dada pela seguinte equação:

$$S = 4.\pi.r^2$$

na qual: S é a superfície e r é o raio da esfera.

O volume de uma esfera é dado por:

$$V = \frac{4}{3}.\pi.r^3$$

onde V é o volume e r é o raio da esfera.

A relação superfície/volume é calculada por:

$$\frac{S}{V} = \frac{4.\pi.r^2}{\frac{4}{3}.\pi.r^3} = \frac{3}{r}$$

Com esta última equação se observa que, à medida que diminui o diâmetro das gotas, a relação superfície/volume aumenta, contribuindo para a aceleração da evaporação. A Tabela 5.4 ilustra o tempo de vida e a distância de queda de gotas de diferentes tamanhos, em diferentes condições de temperatura e umidade relativa. O tempo de vida é calculado pela seguinte fórmula:

$$t = \frac{d^2}{80 \times \Delta T}$$

onde: t é o tempo de vida (s), d é o diâmetro das gotas (μm), e ΔT é a diferença de temperatura entre termômetros de bulbo seco e úmido ($^{\circ}\text{C}$).

A distância de queda é calculada pela seguinte fórmula:

$$D = \frac{1,5 \times 10^{-3} \times d^4}{80 \times \Delta T}$$

na qual: **D** é a distância de queda (cm) e **d** é o diâmetro das gotas (μm).

A velocidade com que as gotas diminuem de tamanho é muito grande sob as condições tropicais. Assim, Johnstone et al. (1977) recomendam que as pulverizações de formulações baseadas em água, em 20 a 50 l/ha com 200 a 250 μm , devem cessar quando ΔT – diferença entre as temperaturas de bulbo úmido e seco de um psicrômetro – exceder 8° C, ou a temperatura do bulbo seco exceder 36° C.

Uma gota em queda livre atinge uma velocidade constante – velocidade terminal – quando as forças do arrasto aerodinâmico contrabalançam a força gravitacional. Para as gotas usadas normalmente nas pulverizações agrícolas, essa velocidade é atingida dentro de 2 metros do ponto de emissão. Para as pequenas gotas (20 - 60 μm), a aplicação da lei de Stoke é precisa, mas, para as gotas grandes, o desvio se torna significativo e a sedimentação é resultado de um complexo de fatores: tamanho, forma e escoamento interno. As grandes gotas, ao cair através do ar, tornam-se achatadas, apresentando uma área frontal maior que a de uma esfera do mesmo volume. Além disso, as gotas grandes apresentam um vórtice interno no escoamento (com o eixo alinhado com o escoamento do ar local), por meio do qual o escoamento do ar local força o líquido a fluir para cima, em torno das bordas da gota, e dentro do topo emergente inferior. Esse efeito pode reduzir o arrasto e aumentar a velocidade de sedimentação. A densidade e viscosidade do ar também afeta a velocidade de sedimentação.

A Tabela 5.5. apresenta as velocidades terminais para as diferentes faixas de tamanhos de gotas normalmente encontradas, e para líquidos com densidade igual a 1.

Tabela 5.5 Velocidade terminal de gotas de diferentes tamanhos.

Tamanho das gotas (μm)	Velocidade de sedimentação ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
20	0,012
40	0,047
60	0,102
80	0,175
100	0,270
120	0,355
160	0,536
200	0,705
250	0,940
300	1,150
350	1,200
400	1,630
500	2,080

Para líquidos com densidade muito diferente de 1, a seguinte Equação de Stoke pode ser usada:

$$V_s = \frac{g \times \rho \times d^2}{18 \times \eta}$$

onde: V_s é a velocidade de sedimentação ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), g é a aceleração gravitacional em ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$), r é a densidade da gota ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), ρ é o diâmetro da gota (m) e η é a viscosidade do ar ($\text{Ns}\cdot\text{m}^{-2}$). Por essa equação, a velocidade é proporcional ao quadrado do diâmetro.

O conhecimento da velocidade terminal de queda de uma gota é importante porque, quanto menor o tamanho da gota, mais tempo ela gastará para se depositar, ficando durante este período sujeita à ação da evaporação e do arraste pelo vento para fora da área alvo, originando a “deriva”.

A deriva perigosa é o movimento do produto químico para fora da área intencionada, e é originada do fato de que as gotas, após serem emitidas

pelo bico de pulverização, flutuam no vento por um determinado período. As gotas pequenas, que apresentam maior relação superfície/peso e menor velocidade de queda, apresentarão conseqüentemente maior distância de deriva. Quantick (1985) apresenta uma tabela indicando a distância de deriva de gotas de diferentes tamanhos (Tabela 5.6).

Tabela 5.6 Distância da deriva de gotas liberadas a 3 metros de altura, com vento de velocidade constante de 1,34 m/s, assumindo que não ocorra evaporação (Quantick, 1985).

Diâmetro da gota (μm)	Distância da deriva (m)
500	2,1
200	4,9
100	15,25
30	152,5
15	610

O perigo da deriva é proporcionado pela possibilidade de que o produto químico aplicado atinja outras culturas – e depende, evidentemente, da toxicidade do produto aplicado. Por outro lado, a deriva causa perda do produto e reduz a eficiência da aplicação.

Eficiência da aplicação de agrotóxicos em culturas de porte rasteiro

A aplicação dos agrotóxicos, tal como utilizada atualmente, não difere essencialmente daquela praticada no século passado, caracterizando-se por um considerável desperdício de energia e de produto químico (Matuo, 1990).

Ao contrário do que vem sendo utilizado no campo, o volume consumido por hectare deve ser uma conseqüência de calibração de equipamentos para colocar o agrotóxico no alvo, mas nunca deve ser uma meta da aplicação. O objetivo de toda aplicação deve ser colocar o máximo

de produto no alvo com um mínimo de perdas ou contaminação ambiental. Para isso é necessário seguir alguns outros procedimentos importantes para a calibração.

Para se calibrar uma aplicação de agrotóxicos, é necessário conhecer qual deve ser o alvo da aplicação, ou onde se localiza o problema fitossanitário que necessita ser controlado. Como exemplo, tem-se a doença mofo branco, causada por *Sclerotinia sclerotiorum* Lib. DBy (Mofo Branco ou Murcha de Sclerotinia), que ocorre nas culturas de tomate ou feijão irrigadas (Valarini, 1994; Valarini et al., 1996), onde o fungo sobrevive no solo na forma de escleródios e ataca as plantas adultas de baixo para cima. O ataque dessa doença ocorre quando o microclima é favorável, com temperaturas ao redor de 18-20°C e umidade relativa maior do que 90%. Para controlar essa doença, é necessário testar o método de aplicação para se conhecer se ele é capaz de colocar o fungicida nas áreas-alvo, ou seja, nas regiões das plantas próximas ao solo. Da mesma maneira, é necessário estabelecer as perdas que ocorrem com o processo de aplicação, bem como o risco de contaminação do aplicador. Para esses casos, o processo mais empregado para estudar a dinâmica das pulverizações tem sido a análise das deposições, com o qual tem se tomado as decisões na escolha de técnicas.

Ao considerar a importância crescente das doenças em culturas irrigadas e o uso indiscriminado de agrotóxicos, que muitas vezes apresentam baixa eficiência no controle, o desenvolvimento de métodos de avaliação da deposição em áreas alvos ou não alvos torna-se importante ferramenta para melhorar a eficiência das pulverizações e a redução dos impactos negativos dos agrotóxicos.

Avaliações da deposição de agrotóxicos em culturas de porte rasteiro

Tanto no Brasil como no exterior, não existem informações definitivas sobre os desperdícios que ocorrem durante as pulverizações de agrotóxicos. Algumas informações disponibilizadas na literatura internacional apontam que as aplicações de agrotóxicos são extremamente ineficientes, mas essas informações são fundamentadas apenas em fatos teóricos, ou seja, são baseadas nas doses teóricas de agrotóxicos necessárias para controle de populações das pragas que produzem dano econômico.

Estudos com um novo método de determinação de volume depositado através de análise de gotas, desenvolvido por Chaim et al. (1999a), testado em um experimento com pulverização aérea de herbicidas (Pessoa & Chaim, 1999), demonstraram perdas em torno de 50% do volume de calda aplicado.

Chaim et al. (1999b) desenvolveram um método para quantificar os desperdícios que ocorrem durante as pulverizações em culturas rasteiras. Os resultados das perdas verificadas em culturas como feijão e tomate, são apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7. Eficiência da pulverização na distribuição de agrotóxicos, nas culturas de feijão e tomate.

Cultura	Altura das plantas (cm)	Planta ¹	Solo ¹	Deriva ou evaporação ¹
Feijão	15	12	73	15
Feijão	35	44	41	15
Feijão	60	41	34	25
Tomate	40	36	28	35
Tomate	70	52	14	34

¹Valores expressos em porcentagem de ingrediente ativo, em relação ao total aplicado.

Por ser uma aplicação com pulverizador de barras, onde os bicos passam a uma distância de 40 a 50 cm acima do topo das plantas, para a cultura do feijão os resultados podem apresentar-se como uma aberração. Entretanto as condições de temperatura, umidade relativa e velocidade do vento, associados com a densidade foliar da cultura são provavelmente os fatores que mais contribuem nas perdas. Devido as características intrínsecas do funcionamento dos bicos hidráulicos presentes na barra do pulverizador, o líquido ao sair pelo orifício produz um jato, com velocidade suficiente para o aparecimento de turbulências no ar, que auxilia a penetração das gotas na região interior das plantas. Entretanto, quando a cultura se apresenta no ápice do desenvolvimento vegetativo, as gotas que não conseguem penetrar na densa folhagem, e da mesma forma, a turbulência produz um efeito inverso, ou seja, o ar com movimento descendente inverte sua direção ao encontrar a densa camada de folhas. Desta forma as gotas ficam em suspensão sobre o topo da cobertura das plantas sob a ação da evaporação ou se deslocam horizontalmente, e as vezes com movimentação ascendente, com o vento predominante. Entretanto, quando essas culturas se apresentam com porte baixo, com pouca folhagem, as perdas para o solo ficam mais evidentes.

Em experimento realizado somente com a cultura de feijão (Chaim et al., 2000), a perda de agrotóxico aplicado ficou em torno de 77% sendo a deriva ou evaporação a maior componente deste desperdício, representando 59% do total aplicado (Fig. 5.1.).

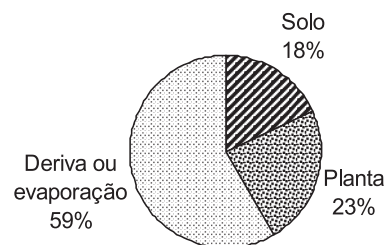


Fig. 5.1. Distribuição de agrotóxico aplicado por pulverizador de barras, na cultura do feijão rasteiro.

A eficiência da aplicação também está associada à distribuição do agrotóxico nas plantas. Por exemplo, no caso da aplicação de fungicidas para controle do mofo branco em feijão e tomate, a intenção é maximizar a deposição do agrotóxico na região basal das plantas. A partir de resultados de deposição de agrotóxicos estimados em diferentes alturas de plantas de feijão e tomate por Chaim et al. (1999b), calculou-se a porcentagem da dose que atingiu as diferentes regiões da planta (Tabela 5.8).

Tabela 5.8. Distribuição da porcentagem da dose aplicada em diferentes regiões de plantas.

Cultura	Altura das plantas (cm)	Região do topo	Região mediana	Região basal
Feijão	15	85	--	52
Feijão	35	115	73	23
Feijão	60	71	49	35
Tomate	40	60	--	23
Tomate	70	48	24	12

Numa aplicação ideal, todas as partes das plantas deveriam receber 100% da dose aplicada, mas os resultados apresentados na Tabela 5.7 demonstram que a deposição decresce do topo para a base das plantas. No caso do feijão e do tomate, as porcentagens das doses que atingem a região basal das plantas podem não ser suficientes para um controle efetivo do mofo branco. Da mesma forma, a subdosagem pode influenciar o aparecimento de resistências das pragas e doenças aos agrotóxicos.

Em estudo realizado com algodão, comparando bicos de pulverização (Tabela 5.9), e utilizando Rodamina B como traçador de calda, Chaim et al. (2004) observaram que não houve diferença entre os bicos testados. Contudo, considerando a deposição média (aproximadamente 225 mg/l de Rodamina) obtida na região apical das plantas, os autores concluíram que a deposição foi de apenas 45% da dose esperada (500 mg/l). Da mesma forma,

depositou-se 18% na região mediana e apenas 7% da dose esperada na região basal. Esses resultados corroboram aqueles encontrados por Chaim et al. (1999b; 2000) para as culturas de porte rasteiro como as de feijão e tomate.

Tabela 5.9. Concentração do traçador Rodamina (mg/l) encontrada em três regiões de amostragem em plantas de algodão, comparando três bicos de pulverização.

Região de amostragem	Bicos de pulverização		
	TXVK8	TXVK4	TJ60-8002VS
Apical	222,4	232,4	221,3
Mediana	75,1	94,1	103,7
Basal	30,5	38,9	39,9

A Tabela 5.10 apresenta resultados de diâmetro de gotas (VMD) com as respectivas densidade de deposição. Pode ser notado que o bico TJ60-8002VS produziu gotas extremamente grandes e, conseqüentemente, a densidade depositada foi muito inferior aos outros dois bicos. Se a praga alvo apresentasse uma boa mobilidade, a baixa deposição apresentada pelo bico TJ60 não teria uma grande influência no controle; entretanto para pragas de baixa mobilidade a eficiência do controle seria prejudicada.

Tabela 5.10. Diâmetro mediano das gotas (VMD) e suas respectivas densidades de deposição, obtidos pelos três bicos testados nas diferentes regiões das plantas de algodão.

Região de amostragem	VMD (μm)			Densidade das gotas ($\text{n}^\circ/\text{cm}^2$)		
	TXVK-8	TXVK-4	TJ60-8002VS	TXVK-8	TXVK-4	TJ60-8002VS
Apical	292	228	452	122	195	53
Mediana	222	170	365	46	69	26
Basal	206	159	316	21	30	14

É necessário realizar pesquisas para determinar se as proporções de defensivos estimadas para regiões mediana e inferior das plantas são suficientes para um controle efetivo dos problemas fitossanitários que ocorrem nestes nichos das culturas de porte rasteiro.

Para melhorar a deposição geral, seria necessária a utilização de vento auxiliar, o que melhoraria a penetração de gotas no interior das plantas. Contudo, para qualquer técnica que venha a ser utilizada, a melhoria de deposição seria auxiliada com utilização de algum adjuvante para impedir a evaporação das gotas. Aparentemente, a evaporação de gotas se apresenta como a principal componente do elevado desperdício que ocorre durante as pulverizações (Chaim et al., 1999b).

Referências

- BROWN, A. W. A. **Insect control by chemicals**. New York: John Wiley, 1951. 817 p.
- CHAIM, A.; FERRACINI, V. L.; SCRAMIN, S.; PESSOA, M. C. P. Y.; PAVAN, L. A.; ALVARENGA, N. A. Método para avaliação da eficiência na aplicação de defensivos na cultura do algodão. In: CONGRESO VIRTUAL IBEROAMERICANO SOBRE GESTIÓN DE CALIDAD EN LABORATORIOS, 2., 2004, Valladolid. **Libro de comunicaciones**. Valladolid: Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León, 2004. p. 459-466.
- CHAIM, A.; MAIA, A. H. N.; PESSOA, M. C. P. Y. Estimativa da deposição de agrotóxicos por análise de gotas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 34, n. 6, p. 963 - 969, 1999a.
- CHAIM, A.; VALARINI, P. J.; OLIVEIRA, D. A.; MORSOLETO, R. V.; PIO, L. C. **Avaliação de perdas de pulverização em culturas de feijão e tomate**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente. 1999b. 29 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa, 2).
- CHAIM, A.; VALARINI, P. J.; PIO, L. C. Avaliação de perdas na pulverização de agrotóxicos na cultura do feijão. **Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, Curitiba, v. 10, p. 13-22, 2000.
- COMBELLACK, J. H. The problems involved in improving spraying efficiency. **Australian Weeds**, Victoria, v. 1, n. 2, p. 113-117, 1981.

COURSHEE, R. J. Some aspects of the application of insecticides. **Annual Review of Entomology**, Palo Alto, v. 5, p. 27-352, 1960.

HIMEL, C. M. The optimum size for insecticide spray droplets. **Journal of Economic Entomology**, College Park, v. 62, n. 4, p. 919-925, 1969.

HIMEL, C. M.; MOORE, A. D. Spray droplet size in control of spruce budworm, boll weevil, bollworm, and cabbage looper. **Journal of Economic Entomology**, College Park, v. 62, n. 4, p. 916-918, 1969.

JOHNSTONE, D. R. Insecticide concentration for ultra-low-volume crop spray applications. **Pesticide Science**, Chichester v. 4, p. 77-82, 1973.

JOHNSTONE, D. R.; JOHNSTONE, K. A.; ANDREWS, M. Performance-characteristics of a hand-carried battery-operated herbicide sprayer. **PANS**, London, v. 23, n. 3, p. 286-292, 1977.

MATTHEWS, G. A. **Pesticide application methods**. New York: Longman, 1982. 336 p.

MATUO, T. **Técnicas de aplicação de defensivos agrícolas**. Jaboticabal: FUNEP, 1990. 133 p

PESSOA, M. C. P. Y.; CHAIM, A. Programa computacional para estimativa de uniformidade de gotas de pulverização aérea. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 34, n. 1, p. 45-56, 1999.

QUANTICK, H. R. **Aviation in crop protection, pollution and insect control**. London: Collins, 1985. 447 p.

VALARINI, P. J. Manejo de doenças do solo em cultura de feijão sob irrigação por pivô central. In: SEMINÁRIO SOBRE PRAGAS, DOENÇAS E PLANTAS DANINHAS DO FEIJOEIRO, 5., Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ-USP, 1994. p. 59-74.

VALARINI, P. J.; SOUZA, M. D. E.; TOKESHI, H.; OLIVEIRA, D. A.; MORSOLLETO, R. V. Impacto ambiental de sistemas intensivos de cultivos em agricultura irrigada sobre as propriedades físico-químicas e microbiológica do solo. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 11., 1996, Campinas. **Anais...** Campinas: ABID, 1996. p. 447-479.