

39333

**LUÍS ARTUR ALVARENGA VILELA**

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE GOTAS SOBRE A  
SUPERFÍCIE DE UM LATOSSOLO VERMELHO ESCURO  
IRRIGADO POR ASPERSÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras,  
como parte das exigências do Curso de Mestrado em Engenharia  
Agrícola, área de concentração em Irrigação e Drenagem, para obtenção  
do título de "Mestre".

**Orientador**

Prof. Dr. Luiz Antônio Lima

**LAVRAS  
MINAS GERAIS - BRASIL  
1995**

FICHA CATALOGRÁFICA PREPARADA PELA SEÇÃO DE CATALOGAÇÃO E  
CLASSIFICAÇÃO DA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFLA

Vilela, Luís Artur Alvarenga

Avaliação do impacto de gotas sobre a superfície de um Latossolo Vermelho Escuro irrigado por aspersão / Luís Artur Alvarenga Vilela.--Lavras : UFLA, 1995.

76 p. : il

Orientador : Luiz Antônio Lima

Dissertação (Mestrado) - UFLA

Bibliografia

1. Gotas - Tamanhos. - 2. Distribuição. - 3. Energia cinética. - 4. Impacto sobre solo. 5. Erosão - Salpicamento. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

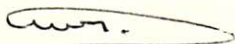
CDD - 627.5

**LUÍS ARTUR ALVARENGA VILELA**

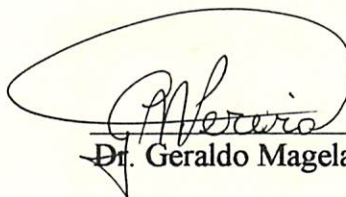
**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE GÓTAS SOBRE A  
SUPERFÍCIE DE UM LATOSSOLO VERMELHO ESCURO  
IRRIGADO POR ASPERSÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras,  
como parte das exigências do Curso de Mestrado em Engenharia  
Agrícola, área de concentração em Irrigação e Drenagem, para  
obtenção do título de "Mestre".

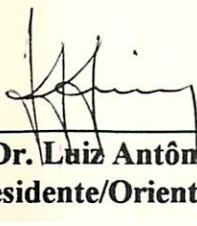
APROVADA em 29 de setembro de 1995



Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Júnior



Dr. Geraldo Magela Pereira



Prof. Dr. Luiz Antônio Lima  
(Presidente/Orientador)

*Aos meus pais, Artur e Anna Flora;*

*à minha filha, Larissa*

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), pela oportunidade concedida para a realização do curso de pós-graduação.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), pela bolsa concedida.

Aos funcionários e amigos do Departamento de Engenharia : Lindenberg, Tânia, Oswaldo, Cristina, Terezinha e Ângela.

Aos amigos Fátima, Geraldo e José Carlos.

Aos colegas de curso Maria Rute, Sílvio, Marcos Metri, João Carlos, José Antônio, José Aparecido, Luiz Gonsaga, Tadayuki e aos demais, pela colaboração e amizade criada.

Aos familiares e grandes amigos, pelo companheirismo, compreensão e bem querer.

Aos professores Luiz Antônio Lima, Marcelo Silva de Oliveira, Moacir de Souza Dias Júnior e Mozart Martins Ferreira pela orientação, incentivo e além disso, amizade.

Ao professores Manoel Alves de Faria, Antônio Marciano da Silva e Alberto Colombo pelos ensinamentos e amizade.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

## BIOGRAFIA

Lúis Artur Alvarenga Vilela é filho de Artur Bernardes Vilela e Anna Flora Alvarenga Vilela. Nasceu em São Paulo - SP, em 12 de agosto de 1966.

Cursou o 1º grau na Escola Rural da Fazenda Eldorado e Instituto Santa Cruz, ambos em Campo Mourão - PR. Em Lavras - MG, estudou na Escola Estadual Firmino Costa, Colégio Tiradentes e Instituto Gammon, onde concluiu o 2º grau.

Graduou-se Engenheiro Agrícola em julho de 1990, na Escola Superior de Agricultura de Lavras.

Trabalhou em assistência técnica e projetos de irrigação.

Em agosto de 1992 iniciou o curso de mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração Irrigação e Drenagem, na Escola Superior de Agricultura de Lavras, atual Universidade Federal de Lavras.

Em março de 1995, foi contratado como Professor Substituto pela mesma universidade.

## SUMÁRIO

	Página
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	viii
<b>RESUMO</b> .....	x
<b>SUMMARY</b> .....	xii
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	5
2.1 Generalidades.....	5
2.2 Efeitos causados pela irrigação.....	7
2.3 Fatores que afetam o salpicamento.....	11
2.4 Formação e trajetória de gotas.....	13
2.5 Velocidade de impacto de gotas emitidas por aspersores.....	17
2.5.1 Movimento ascendente.....	20
2.5.1.1 Direção "X".....	20
2.5.1.2 Direção "Y".....	21
2.5.2 Movimento descendente.....	22
2.5.3 Velocidade na direção resultante.....	22
2.6 Técnicas para determinação de tamanhos de gotas.....	23

<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	30
3.1 Preparação da farinha.....	30
3.2 Curva de calibração.....	30
3.3 Instalação do aspersor e coletores.....	32
3.4 Tamanho e distribuição de gotas.....	33
3.5 Tratamentos.....	34
3.6 Preparo das amostras de solo.....	34
3.7 Determinação da energia cinética.....	35
3.8 Determinação do salpicamento.....	36
3.9 Controle da irrigação.....	36
3.10 Determinação da curva característica de retenção de água no solo.....	37
3.11 Determinação da estabilidade de agregados.....	38
3.12 Determinação da argila dispersa em água.....	38
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	39
4.1 Curva de calibração.....	39
4.2 Distribuição de gotas.....	41
4.3 Energia cinética.....	43
4.4 Cobertura vegetal.....	44
4.5 Comportamento do salpicamento nas três irrigações.....	46
4.6 Comportamento do salpicamento durante as irrigações.....	49
4.7 Estabilidade dos agregados.....	54
4.8 Argila dispersa em água.....	57
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	59
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	62
<b>ANEXOS</b> .....	66
<b>APÊNDICE</b> .....	69

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA		página
1	O efeito da umidade do solo nas forças de adesão e coesão.....	13
2	Trajectoria balística de uma gota de água emitida por um aspersor.....	20
3	Numero médio e diâmetros de gotas para as posições de 3, 6, 9, 12 e 15 metros do aspersor.....	42
4	Valores de energia cinética e índice de precipitação para as posições de 3, 6, 9, 12 e 15 metros do aspersor.....	43
5	Amostra de solo coberto com palha de soja na posição de máxima energia cinética.....	45
6	Salpicamento do solo nas três irrigações à 3, 6, 9, 12 e 15 metros do aspersor.....	46
7	Salpicamento do solo durante a primeira irrigação para as posições de 6 e 9 metros.....	49

8	Comportamento do salpicamento durante as segunda e terceira irrigações a 6 metros do aspersor.....	50
9	Comportamento do salpicamento durante as segunda e terceira irrigações a 9 metros do aspersor.....	51
10	Salpicamento do solo durante a primeira irrigação para as posições de 12 e 15 metros.....	52
11	Comportamento do salpicamento durante as segunda e terceira irrigações a 12 metros do aspersor.....	53
12	Comportamento do salpicamento durante as segunda e terceira irrigações a 15 metros do aspersor.....	53
13	Estabilidade de agregados das amostras de solo originais e após as três irrigações para as posições de 6, 9, 12 e 15 metros do aspersor.....	55
14	Superfície da amostra de solo após três irrigações na posição de 15 metros.....	57
15	Argila dispersa em água das amostras de solo original e após três irrigações para as posições de 6, 9, 12 e 15 metros.....	58

## RESUMO

VILELA, Luís Artur Alvarenga. **Avaliação do impacto de gotas sobre a superfície de um Latossolo vermelho escuro irrigado por aspersão.** Lavras : UFLA, 1995. 76p. (Dissertação - Mestrado em Irrigação e Drenagem). \*

O salpicamento de solos não saturados, situação própria da irrigação por aspersão, até então foi muito pouco estudado. Por este motivo, conduziu-se um experimento no Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de Lavras, MG, com o objetivo de determinar o comportamento do salpicamento de um latossolo durante uma irrigação e ao longo de três irrigações subseqüentes, bem como avaliar a quantidade de material movimentado por ação de gotas de água, de diversos tamanhos, emitidas pelo aspersor ZE - 30 D (ASBRASIL S.A.). Além disto, buscou-se avaliar o efeito da cobertura vegetal, resultante de uma única safra de soja, sobre o salpicamento. Determinou-se a distribuição de gotas do aspersor em cinco posições ao longo do raio de alcance e foi calculada a energia cinética com que as gotas emitidas por este chegam à superfície do solo. Amostras de Latossolo vermelho escuro foram colocadas dentro de coletores e

---

\* Orientador : Prof. Dr. Luiz Antônio Lima (DEG/UFLA). Membros da banca : Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Júnior (DCS/UFLA); Pesq. Dr. Geraldo Magela Pereira (DEG/UFLA).

distribuídas nas mesmas posições. Determinado o salpicamento, observou-se um aumento deste do início para o fim do raio molhado e, que durante uma mesma irrigação, o salpicamento passa por um valor máximo dependente tanto do teor de umidade do solo quanto do valor da energia cinética com que as gotas chegam numa determinada posição. Foi também observado que a cobertura vegetal eliminou totalmente o salpicamento e que para valores elevados de energia cinética, superiores a 200 MJ/ha.mm, a umidade de capacidade de campo provoca o máximo salpicamento.

## **SUMMARY**

### **ESTIMATION OF SPRINKLER IRRIGATION WATER DROP IMPACT ON SOIL SURFACE.**

This work was carried out at the Hydraulics Laboratory of UFLA with the objectives to study the splash behavior of a soil during sprinkler irrigation, and evaluate the soil quantity moved from soil surface by drop impact action of different sizes, thrown by a sprinkler head. It also evaluates the soil splash at a soil surface partially covered by plant residues from one soybean crop season. The drop size distribution from the sprinklers head ZE - 30D (ASBRASIL) was determined at five positions along the distance reached by the water drops. This allowed the determination of kinetic energy of all drops. Soil samples of Dark Red Latossol were placed inside catheters, distributed at same positions for splash determination. It could be observed an increase, from near to far from the sprinkler, that during the same irrigation, the amount of soil splashed reached a maximum value which depends upon the soil water content and the energy with which

the drops impact the soil. It was also observed that the crop residues avoided totally the splash erosion.

## 1 INTRODUÇÃO

A irrigação, dentro do contexto da agricultura moderna, pode ser considerada como mais uma técnica capaz de incrementar a produção agrícola. Além disto, pode ser vista como um seguro para os investimentos realizados, garantindo a produção tanto nas áreas secas quanto naquelas de maiores índices pluviométricos mas, que muitas vezes estão sujeitas a pequenos períodos secos (veranicos) mesmo durante a estação chuvosa.

Um dos métodos de irrigação mais utilizados é a aspersão. Neste método, a água é aspergida sobre a cultura na forma de chuva artificial. O uso deste método se deve à uniformidade de aplicação de água, à elevada eficiência do sistema, ao bom controle do volume de água, à adaptação às diversas condições de topografia e de solos, bem como à possibilidade de seu uso, tanto em culturas já estabelecidas como naquelas em plantio (Faria e Vieira, 1986).

Diversos autores vem ao longo dos anos estudando o efeito das gotas de chuva natural ou artificial sobre a superfície do solo (Bubenzer e Jones ,1971; Carter et. al., 1974; Lima et. al., 1993). A energia que as gotas maiores possuem pode causar danos aos vegetais, tanto nas fases de germinação, crescimento,

desenvolvimento ou de produção (Scaloppi, 1986). Além disto, são capazes de modificar as condições físicas da camada superficial do solo desagregando as partículas, reduzindo a capacidade de aeração e a velocidade de infiltração de água (Garcia, 1986).

Com a redução da taxa de infiltração aumenta-se o risco da água acumular-se sobre a superfície do solo podendo escoar com velocidade acentuada, favorecendo dessa forma, o processo erosivo. Este processo, além de reduzir a capacidade de produção das áreas agrícolas contribui para o assoreamento de cursos e reservatórios de água, reduzindo suas capacidades de transporte e armazenamento, bem como ainda aumentando o grau de poluição destes mananciais pois a água pode carrear resíduos químicos de fertilizantes e agrotóxicos. O próprio impacto da gota sobre o solo também é capaz de intensificar este processo e é conhecido como erosão por embate.

De acordo com Alfani, citado por Garcia (1986), nas precipitações naturais as gotas produzidas variam de 0,5 a 1,0 mm de diâmetro e que somente nas tempestades é que são observadas gotas com diâmetros superiores a 3,0 mm. Segundo o autor, no terço final do raio de alcance dos aspersores, as gotas facilmente superam 4,0 mm de diâmetro e que, quanto maior for a altura e a distância percorrida pelo jato, maiores serão os danos causados ao solo. Por esta razão e pelo fato de que no Brasil são irrigados cerca de 1 milhão de hectares somente por aspersão (Guia Rural, 1991), acredita-se que o impacto das gotas possa trazer grandes prejuízos para os solos irrigados.

A maioria dos estudos que avaliam os efeitos de gotas sobre o solo ou plantas utilizam simuladores de chuva. Petterson e Bubenzer (1986) listam 30 trabalhos científicos nos quais são utilizados simuladores de chuva cujas gotas produzidas tem diâmetro em torno de 3 mm. Entretanto, sob condições naturais de campo, a própria irrigação por aspersão conduz a tamanhos diversos de gotas diferentes daquelas verificadas sob simuladores de chuva.

Os estudos realizados em condição de laboratório também diferem da aspersão pois seguem quase sempre a metodologia proposta por Ellison (1944) onde as amostras de solo, expostas à chuva artificial para verificar a erosão, são sempre pré-saturadas.

A erosão por embate causa um fenômeno conhecido como salpicamento que consiste basicamente no arremesso das partículas destacadas do solo a distâncias que podem chegar até a 1,5 metros (Bertoni e Lombardi, 1990).

Muito pouco ainda se conhece sobre efeito do tamanho de gotas e da variação da umidade do solo sobre o salpicamento. A variação destes parâmetros é uma situação particular da irrigação por aspersão e um estudo envolvendo-os seria de grande importância para um maior entendimento do salpicamento. Desta forma o presente trabalho terá por objetivos:

- avaliar a quantidade de solo movimentada pelo salpicamento de partículas atingidas por gotas, de diversos tamanhos, em diferentes pontos ao longo do raio de alcance do aspersor ZE - 30 D (ASBRASIL S.A.), equipado com bocais de 5,5 x 4,5 mm, após três irrigações e durante cada uma delas;

- verificar o efeito da palhada de soja, resultante de uma única safra, sobre o salpicamento.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Generalidades

Para a produção econômica e desenvolvimento de uma cultura é necessário que os diversos fatores contribuintes para este processo estejam disponíveis a níveis satisfatórios, o que garantiria, dentro de uma viabilidade econômica aceitável, o máximo rendimento da cultura.

Dentre estes fatores destaca-se a água que é imprescindível nos processos fisiológicos da planta. Conseqüentemente, tanto o seu excesso quanto a sua falta são capazes de comprometer a produção agrícola (Reichardt, 1985).

O suprimento de água ao solo pode ser realizado naturalmente através das chuvas, ou artificialmente pelos sistemas de irrigação, ou pela combinação de ambos os processos, denominada irrigação complementar (PRONI, 1986).

No sistema de irrigação por aspersão, a água é aplicada sobre a cultura na forma de chuva artificial. Neste sistema, o jato líquido ao passar sobre pressão pelos aspersores, adquire grande velocidade e quando choca-se com o ar, pulveriza-se formando gotas (Faria e Vieira, 1986).

Keller (1984) observou que os tamanhos de gotas provenientes de aspersores variam de 0,5 a 5,0 mm de diâmetro, com velocidades terminais de 2,0 a 22,0 m/s e altura de queda variando de 3,0 a 6,0 m, respectivamente. Portanto, é de se esperar que o efeito do impacto das gotas sobre o solo também seja variável.

Outro aspecto a ser levado em consideração sobre o efeito nocivo da gota é a energia de impacto. A energia de impacto das gotas está relacionada com a energia cinética com que estas chegam a superfície do solo, por unidade de água ou milímetro de chuva (Kohl , 1974; Carter et al, 1974; Stillmunkes e James, 1982; Eigel e Moore, 1983; Lima et. al., 1993).

Dadio e Wallender (1985) comentam que áreas irrigadas por aspersão sem uma cobertura suficientemente capaz de interceptar gotas, estão sujeitas a uma desintegração das partículas da superfície do solo.

Queiróz, citado por Alencar (1988), relata que a velocidade de infiltração pode ser condicionada pelos seguintes fatores: cobertura vegetal, compactação, erodibilidade, textura, estrutura, adensamento de perfis, comportamento de argilas, flora e fauna do solo, quantidade de água no solo, duração de aplicação de água, carga hidráulica, temperatura e qualidade de água.

As gotas ao tocarem a superfície do solo também podem provocar uma compactação suficiente para reduzir a velocidade de infiltração da água no solo.

Addink, citado por Leme (1987), observou a ocorrência de menor potencial de escoamento superficial com o uso de sistema de irrigação de alta

pressão, comparativamente com bocais ou aspersores que operam a baixa pressão e produzem gotas de maiores tamanhos.

## **2.2 Efeitos causados pela irrigação**

A irrigação por aspersão pode apresentar efeitos benéficos ou adversos. Os efeitos benéficos tem sido atribuídos principalmente ao aumento da quantidade e qualidade da produção, e além disso, por ser uma prática agrícola que permite um suprimento regular de água às plantas, torna-se um fator de garantia da produção agrícola (PRONI, 1986).

Os efeitos adversos relacionam-se tanto com a planta quanto com o solo.

Acredita-se que o impacto das gotas sobre a superfície de solos ou de vegetais seja um fator capaz de reduzir, imediatamente ou ao longo dos anos, os índices de produtividade.

Scaloppi (1986) deixa evidente que dentre as desvantagens da irrigação por aspersão estão os prejuízos causados à polinização e fixação de botões florais ou mesmo frutos em início de desenvolvimento, em virtude do impacto das gotas que caem sobre a vegetação.

Ollita (1978) relata que quando as gotas são maiores que 4,0 mm, tendem a prejudicar as folhas delicadas das plantas e a formar incrustações na superfície de solos argilosos.

Garcia (1986) comenta que a impermeabilização da camada superficial, causada pelo impacto de gotas, além de impedir a infiltração de água no solo, impossibilita a circulação de ar, que são essenciais para desenvolvimento da planta.

Kohl (1974) e Garcia (1986) também registram que gotas demasiadamente pequenas são facilmente transportadas pela ação do vento, podendo ocorrer tanto distorções na distribuição de água quanto perdas de água diretamente para a atmosfera ou para fora da área útil a ser irrigada. Entretanto, Pereira (1995) concluiu que as perdas de água por evaporação das gotas ao longo de sua trajetória foram praticamente desprezíveis quando comparadas com as perdas por arrastamento pelo vento.

Bertoni e Lombardi (1990) comparam gotas a bombas em miniatura que golpeiam a superfície do solo, rompendo grânulos e torrões, reduzindo-os a partículas menores. Segundo os autores, o impacto das gotas de chuva sobre a superfície do solo é a principal causa do processo erosivo pois desprendem as partículas do solo no local que sofre o impacto, transportam, por salpicamento as partículas desprendidas, e finalmente imprimem energia, em forma de turbulência, à água superficial. Relatam ainda que a cobertura da superfície do solo é a única forma de protegê-lo contra os efeitos maléficis das gotas de chuva.

Bubenzer e Jones (1971) trabalhando com simuladores de chuva relatam que uma única chuva pode desprender mais de 200 toneladas de solo por hectare e que as partículas de solo podem ser deslocadas a uma altura de 1,0 m e cobrir um

raio de 1,5 m. Comentam ainda que uma chuva intensa, agindo sobre um terreno cultivado, resulta em um apreciável movimento de solo no sentido da declividade deste.

Ellison (1944) comenta que o processo de erosão por embate muitas vezes não é visível devido às altas velocidades com que as partículas se movimentam. O autor comenta que as gotas, após tocarem a superfície do solo, se misturam com as partículas deste, muitas destas já resultantes da desagregação devido ao impacto, formando uma mistura de água, areia, silte e argila. Durante o processo de infiltração, a fração areia é depositada sobre a superfície e as outras partes são retiradas da mistura enquanto percolam através desta camada, promovendo desta maneira, um selamento da superfície suficiente para reduzir a taxa de infiltração poucos minutos após o início da precipitação. Com a redução da taxa de infiltração poderá ocorrer um acúmulo de água sobre a superfície. Caso exista qualquer declividade, a água irá deslocar-se para pontos de menor energia, com maior ou menor velocidade dependendo do gradiente de declividade, arrastando consigo partículas de solo.

Ellison, citado por Dadio e Wallender (1985) verificou a formação de uma fina camada superficial de baixa condutividade hidráulica formada por partículas consolidadas e reorientadas, capaz de reduzir a infiltração de água no solo.

Malano, citado por Stringham (1988) reportou que o movimento de partículas finas dentro do espaço poroso do solo também pode reduzir a infiltração de água nestes.

Allem, citado pelo mesmo autor, relata que a desintegração de partículas pode ocorrer também devido a outros fenômenos, tais como o "slaking" (desintegração de partículas de maior tamanho quando totalmente imersas na água) e hidratação de argilas.

Ellison (1944) relaciona os principais fatores que influenciam o processo de erosão causado por gotas de chuva, dentre eles a velocidade com que a gota chega à superfície do solo, intensidade de precipitação, declividade da área, direção e velocidade do vento. Nas partículas maiores, o impacto das gotas transfere-lhes energia suficiente para promover seu movimento no sentido da declividade do terreno. Os maiores ou menores efeitos causados pelas gotas estão relacionados com a quantidade de energia cinética com que chegam ao solo. Tanto a velocidade de impacto quanto a massa da gota influenciam no valor da energia cinética.

Russel (1973) apresentou dados que mostram que aumentando 4,5 vezes o diâmetro da gota da chuva, a velocidade terminal aumenta 2,4 vezes enquanto a energia cinética aumenta cerca de 500 vezes

Lima et. al. (1993) estudaram o salpicamento de latossolos provocados por gotas de chuvas e verificaram que os danos causados à superfície do solo

aumentaram exponencialmente com acréscimos na energia cinética, exceto para Latossolo Amarelo, onde o aumento fôra essencialmente logarítmico.

### 2.3 Fatores que afetam o salpicamento

Os fatores que afetam o salpicamento estão relacionados com o módulo de ruptura e as forças de coesão e adesão.

O módulo de ruptura é definido como sendo a tensão necessária para que a ligação entre as partículas do solo deixe de ocorrer. O aumento do teor de umidade dos solos reduz o módulo de ruptura, facilitando o destacamento ou a desagregação das partículas que o constituem (Vomocil e Chancellor, 1967; Marshall e Holmes, 1988).

Jorge (1986) comenta que algumas propriedades dos solos são alteradas com a variação do teor de umidade destes, dentre elas as forças de adesão e coesão. A amplitude da faixa de variação em que estas forças se manifestam é variável e depende da granulometria do solo, da natureza da fração argila, da natureza dos íons adsorvidos e do teor de matéria orgânica, além da quantidade de água existente nos solos.

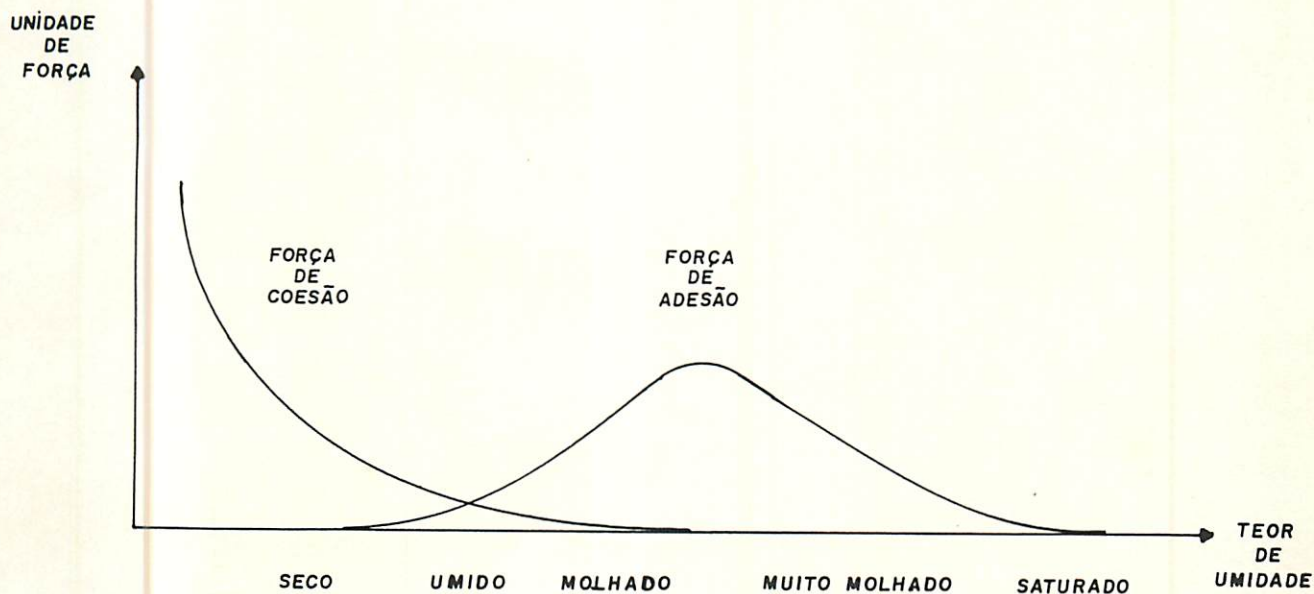
Gavande (1973) relata que as forças de adesão e coesão são de origens diferentes:

a. força de coesão : ocorre devido às cargas elétricas superficiais das camadas de argila e das atrações entre partículas (forças de Van der Waals). A

força de coesão será grande somente se as partículas do solo estiverem muito próximas umas das outras e terem superfícies de contato relativamente grandes em comum. No caso particular das argilas, força de coesão é maior nos solos secos. A medida que tornam-se úmidos, a água penetra entre as partículas podendo fazer com que se separem, reduzindo desta maneira a coesão;

b. força de adesão : a causa desta força é a presença de um filme de água formando uma película elástica entre partículas adjacentes capaz de resistir a pequenos esforços. Este filme somente se formará nas superfícies de contato entre dois líquidos não miscíveis ou entre um líquido e um gás. A força por unidade de área ou comprimento necessária para romper esta película denomina-se tensão superficial. A facilidade de rompimento da película que mantém unidas partículas de solo está relacionada com a tensão superficial da água e com o teor de umidade deste. Em solos secos a linha de ruptura deste filme é pequena e a força de ligação das partículas também. Com a elevação do teor de umidade, a linha de ruptura aumenta e as partículas ficam mais fortemente unidas. Em solos muito úmidos, a quantidade de ar existente entre as partículas é menor, diminuindo as forças de ligação entre partículas originadas da tensão superficial. Além disto a água em excesso passa a atuar como um lubrificante entre as partículas. No estado de saturação a adesão deixa de ocorrer.

A Figura 1 apresenta uma idéia do comportamento das forças de coesão e adesão em função do teor de umidade dos solos.



**FIGURA 1.** O efeito da umidade do solo nas forças de coesão e adesão

#### 2.4 Formação e trajetória de gotas

Fica evidente a influência das gotas, quer sejam elas provenientes de chuvas ou de irrigações, sobre as condições superficiais dos solos. Por este motivo, diversos pesquisadores têm buscado compreender o processo de formação de gotas e descobrir maneiras para quantificar o tamanho destas.

Kohl (1974) relata que o processo de formação de gotas em aspersores é de natureza complicada. Bernuth e Gilley (1984) afirmam que este processo ainda não é totalmente entendido.

Segundo Kohl (1974), o jato de água que sai dos bocais e entra em contato com a atmosfera, divide-se em gotas, pois ocorre uma perturbação na forma inicial desse jato. O autor relata ainda que a formação de gotas se deve principalmente à combinação de três fatores:

- a. a resistência oferecida pelo ar ao movimento do jato de água;
- b. a não limitação, após a saída do jato, antes feita pela parede do bocal, provoca pequenos turbilhonamentos (eddies) que conduzem à saída de gotas de água para fora do jato;
- c. a própria turbulência do movimento de água;

Rouse et al., também citado por Kohl (1974), comentam que os pequenos turbilhonamentos (eddies) são responsáveis pela expansão lateral da seção transversal do jato d'água após sua saída pelo bocal, formando na periferia do jato uma mistura de ar com gotas de água dispersas. Estas gotas, sujeitas à resistência do ar, perdem velocidade e caem sobre o solo. A parte central do jato d'água é continuamente desintegrada até que se formem as últimas gotas. Desta maneira, o jato parece desaparecer no meio do ar.

O autor ainda relata que a água que desvia do jato principal para a periferia está sujeita a um diferencial de velocidade relativa ao ar circundante e crescente na mesma direção. Merrigton e Richardson, citados pelo mesmo autor, mostraram que o diâmetro de gotas formadas pela desintegração do jato é inversamente proporcional à velocidade relativa do ar circundante ao jato.

Desta forma, a água próxima à periferia do jato resultará em gotas pequenas, enquanto a água mais ao centro do jato, com velocidade relativa do ar menor, produzirá gotas maiores. Pela ação da resistência do ar, gotas pequenas perdem velocidade mais facilmente que as maiores e tendem a cair mais proximamente do bocal. Assim, o tamanho médio de gotas aumenta do emissor para a periferia do raio molhado.

Além do processo de desintegração do jato, a ação do braço defletor é mais uma forma de produção de gotas nos aspersores de impacto (Bernuth e Gilley, 1984). Segundo estes autores, as gotas podem se originar tanto no momento em que o jato toca o braço defletor quanto após o seu retorno, devido a ação de pesos ou molas.

Matsura (1993) cita que Bernuth também constatou a ocorrência de gotas grandes próxima do aspersor, produzidas pela interferência do braço oscilante.

Finkel, citado por Oliveira (1991), relata que a combinação de pressão e bocal determina a formação de tamanhos de gota e sua distribuição sobre a área molhada.

Kohl (1974) verificou que o efeito do tamanho do bocal é menor do que o da pressão no processo de formação de gotas para aspersores de tamanho médio. Segundo o autor, um decréscimo no diâmetro do bocal reduz o tamanho médio das gotas mas, um acréscimo na pressão tem muito mais influência na redução do tamanho de gotas. Seus resultados mostraram que o diâmetro médio

das gotas decresce de forma aproximadamente linear à medida que a pressão aumenta. Esta tendência também foi observada por Levine, citado por Bernuth e Gilley (1984).

Devido as características de funcionamento dos equipamentos utilizados na irrigação por aspersão e a necessidade de se obter uma uniformidade mínima aceitável de distribuição sobre a superfície do solo, a água deve chegar aos emissores com uma certa pressão especificada pelo fabricante.

O termo "grau de pulverização" tem sido usado para definir a relação entre a pressão de serviço do emissor (m. c. a) e o diâmetro do orifício de saída da água (mm). Desta maneira, culturas com a mesma sensibilidade a tamanho de gotas são agrupadas e valores mínimos de grau de pulverização a que podem ser submetidas são estabelecidos.

Hanson, Schulbach e Meyer, citados por Dadio e Wallender (1985), comentam que a popularidade de aspersores de baixa pressão tem aumentado em resposta a elevação dos custos de energia. Segundo o autor, a troca de emissores que operam sob maiores pressões por aqueles que operam à pressões inferiores pode trazer economia de energia. No entanto, a uniformidade de aplicação é frequentemente a primeira característica enfatizada, mas o tamanho de gota pode ser o fator limitante, especialmente em solos mais susceptíveis a erosão e desprotegidos.

## 2.5 Velocidade de impacto de gotas emitidas por aspersores

A maioria dos estudos sobre impacto de gotas baseiam-se no trabalho de Kohl, realizado em 1944. Neste trabalho foram determinadas velocidades terminais de gotas de diversos diâmetros, caindo em trajetória vertical (Keller, 1984). No entanto, as gotas emitidas pelos aspersores apresentam uma trajetória bastante diferente e dependente de diversos fatores, como por exemplo, pressão de serviço, ângulo de emissão e altura do aspersor. Além disto, o mecanismo utilizado para imprimir movimento giratório nestes equipamentos também pode produzir gotas com trajetórias e velocidades diferentes daquelas produzidas pelos bocais.

Segundo Vories e von Bernuth (1984), a partir do momento da formação das gotas, estas podem ser tratadas como projéteis individuais e que cada gota formada está sujeita a uma força de arrastamento aerodinâmica, que atua ao longo do vetor velocidade, porém, em sentido oposto.

Seginer (1965) propôs que a força de resistência do ar pode ser definida como:

$$F_r = m \cdot f \quad (01)$$

onde:  $F_r$  = força de resistência do ar (N);  
 $m$  = massa da gota (kg);  
 $f$  = aceleração de arrastamento ( $m/s^2$ ).

O autor também propõe que a aceleração de arrastamento deva ser aproximada por:

$$f = C_n \cdot V^n \quad (02)$$

onde :  $n$  = expoente da velocidade;

$C_n$  = coeficiente de arrastamento cuja dimensão depende do valor de  $n$ ;

$V$  = velocidade de deslocamento da gota (m/s).

Green (1952), avaliando a resistência oferecida pelo ar às gotas caindo em trajetória vertical, sugeriu que o valor de  $n$  fosse igual a unidade. Entretanto, Seginer (1965) observou que o valor de  $n$  igual a 2 apresentou melhor resultado que o valor unitário. Desta forma:

$$f = C_2 \cdot V^2 \quad (03)$$

onde:  $C_2$  = coeficiente de arrastamento ( $m^{-1}$ ).

O autor propõe ainda que o valor de  $C_2$  deva ser estabelecido em função do coeficiente de arraste:

$$C_2 = \frac{C_d \cdot \rho \cdot A}{2 \cdot m} \quad (04)$$

onde  $C_d$  = coeficiente de arraste (adimensional);

$\rho$  = massa específica do ar ( $\text{kg/m}^3$ );

$A$  = área de projeção da gota ( $\text{m}^2$ ).

Roberson e Crowe, citados por Stillmunkes e James (1982) proporam que a equação acima pode ser simplificada obedecendo-se as condições normais de temperatura e pressão (temperatura do ar  $20^\circ\text{C}$ , pressão atmosférica 101 kPa):

$$C_2 = \frac{C_d}{1,109.D} \quad (05)$$

onde:  $D$  = diâmetro da gota (mm).

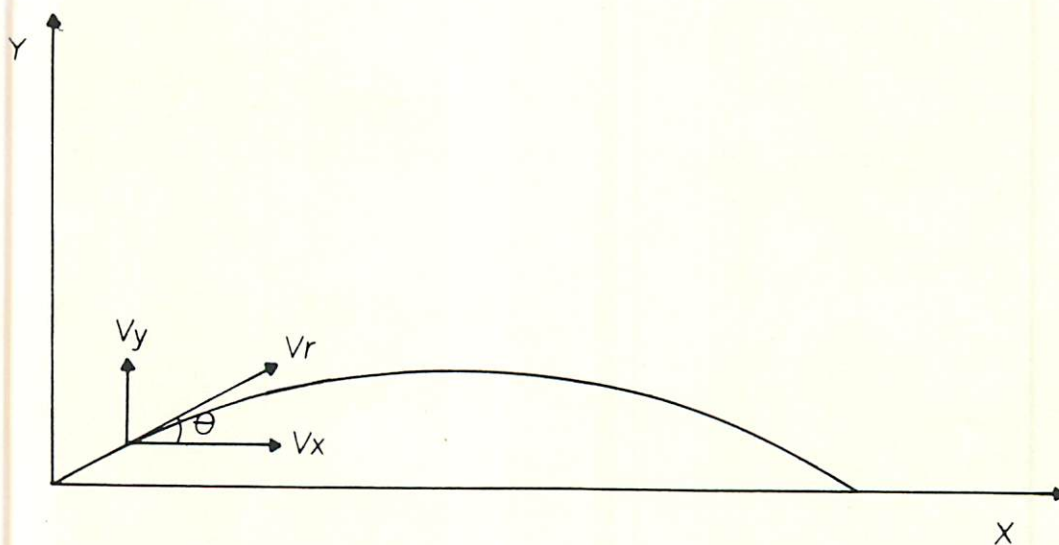
Hills <sup>1</sup> obteve a seguinte equação para  $C_2$  :

$$C_2 = \frac{0,804 - 0,264 . D + 0,066 . D^2 - 0,004 . D^3}{1,109 . D} \quad (06)$$

Baseado na teoria balística de uma gota d'água emitida por um aspersor, pode-se dividir a trajetória das gotas em dois tipos de movimento (ascendente e descendente) (Seginer, 1965)

<sup>1</sup>. Hill, D. University of California . Advanced sprinkler irrigation. 1988. (notas de aula)

Além disso, a velocidade das gotas pode ser decomposta nas coordenadas cartesianas como pode ser visto na Figura 2.



**FIGURA 2.** Trajetória balística de uma gota de água emitida por um aspersor.

### 2.5.1 Movimento ascendente

#### 2.5.1.1 Na direção "X"

A força de resistência oferecida pelo ar na direção horizontal pode ser escrita da seguinte maneira :

$$F_x = - C_2 \cdot V_r^2 \cdot \cos \theta \cdot m \quad (07)$$

onde:  $\theta$  = ângulo formado entre a trajetória da gota e o plano horizontal.

No entanto:

$$V_x = V_r \cdot \cos \theta \quad (08)$$

então,

$$F_x = - C_2 \cdot V_r \cdot V_x \cdot m \quad (09)$$

A força na direção "X" pode ser escrita como:

$$F_x = m \frac{dV_x}{dt} \quad (10)$$

Desta maneira:

$$\frac{dV_x}{dt} = - C_2 \cdot V_r \cdot V_x \quad (11)$$

#### 2.5.1.2 Na direção "Y"

Nesta direção, Seginer (1965) considera que as forças atuantes sobre a gota são a resistência oferecida pelo ar e a gravidade.

Desta forma:

$$F_y = - C_2 \cdot V_r^2 \cdot \text{sen } \theta \cdot m - m \cdot g \quad (12)$$

Semelhantemente à direção "X":

$$\frac{dV_y}{dt} = - C_2 \cdot V_r \cdot V_y - g \quad (13)$$

### 2.5.2 Movimento descendente:

Neste caso, a Equação 11 permanece a mesma e a Equação 13, devido ao peso da gota estar atuando no sentido do movimento, se altera para:

$$\frac{dV_y}{dt} = - C_2 \cdot V_r \cdot V_y + g \quad (14)$$

### 2.5.3 Velocidade na direção resultante

Para a obtenção da velocidade na direção resultante, Bernuth e Gilley (1984) sugeriram que se faça a soma algébrica entre as componentes X e Y da velocidade:

$$\frac{dV_r}{dt} = - C_2 \cdot V_r \cdot (V_x + V_y) + g \quad (15)$$

No caso do movimento ascendente, basta inverter a influência da aceleração da gravidade.

Entretanto, em se tratando de soma vetorial, buscou-se uma nova equação para a velocidade resultante que pode ser escrita como: <sup>2</sup>

$$\frac{dV_R}{dt} = \sqrt{C_2^2 \cdot V_r^4 \pm 2 \cdot C_2 \cdot V_R^2 \cdot \text{sen } \theta \cdot g + g^2} \quad (16)$$

## 2.6 Técnicas para determinação do tamanho de gotas

Segundo Hudson (1981), a primeira mensuração de tamanhos de gotas foi realizada por Lowe em 1892, utilizando placas lisas de ardósia sobre as quais as gotas, após o impacto, rolavam e estabelecia-se uma relação entre o diâmetro da gota e o tamanho da superfície molhada da ardósia.

A partir do método de Lowe, diversas técnicas para determinação do tamanho de gotas foram sugeridas.

<sup>2</sup> Luiz Antônio Lima. Universidade Federal de Lavras - UFLA. Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola. Irrigação por Aspersão - DER - 510, 1993. (notas de aula).

No Apêndice F estão relacionadas as principais vantagens e desvantagem dos métodos para determinação de tamanhos de gotas mais utilizados.

Eigel e Moore (1983) apresentaram o método da mancha como outra técnica para determinação de diâmetro da gota. Segundo os autores, o método foi introduzido por Wiesner em 1895 e de lá para cá tem sido utilizado por diversos pesquisadores. A técnica assume que gotas que caem sobre uma superfície absorvente produzem manchas cujos diâmetros são proporcionais aos diâmetros das gotas.

Várias superfícies absorventes tem sido utilizadas: papel filtro, papel mata-borrão, papel de cópia heliográfica, papel toalha, papel fotográfico e papel de máquina de calcular, dentre outros.

Hall (1970) relata que deve se estabelecer, previamente e experimentalmente, uma relação entre diâmetros de manchas e gotas de tamanhos conhecidos para posterior utilização do método.

Segundo o mesmo autor, Lowe utilizou seringas hipodérmicas e correntes de ar concentradas sobre a agulha para variar o tamanho das gotas durante a calibração prévia. Lowe verificou que tamanhos diferentes de gotas poderiam ser produzidas pela variação da velocidade da corrente de ar.

O autor ainda comenta sobre as dificuldades encontradas com gotas maiores que tendem a esparramar sobre a superfície absorvente, formando

manchas imperfeitas, e que o tamanho da mancha também é função da velocidade de impacto para gotas maiores que 1,0 mm.

Eigel e Moore (1983) citam como desvantagem a intensa calibração para posterior utilização do método. Laws e Parson, citados por Nierderdofer, citados pelos autores, obtiveram um erro médio para o método variando de 14 a 6% para gotas pesando 0,037 e 37,0 mg, respectivamente.

Segundo os mesmos autores, métodos mais sofisticados para determinação de diâmetros de gotas como os fotográficos, transdutores de pressão e sensores piezoelétricos, além de apresentarem um alto custo e grande dificuldade de utilização no campo, não produzem resultados satisfatórios. Os sensores acústicos citados por Hudson (1981) também apresentam as mesmas desvantagens.

Solomon, Zoldoske e Oliphant (1991) apresentaram um sistema de laser ótico para a determinação do tamanho e velocidades de gotas provenientes de aspersores ou precipitações naturais. Neste equipamento a gota atravessa um feixe luminoso e intercepta-o impedindo a sensibilização de diodos foto-sensíveis. Desta forma e com auxílio de softwares especialmente desenvolvidos para esta função, é possível determinar tanto a distribuição do tamanho quanto a velocidade das gotas. A principal desvantagem do método, quando comparados aos outros, é o alto custo dos equipamentos.

Baseados nas dificuldades encontradas até 1983, Eigel e Moore (1983) apresentaram o método da imersão que, segundo os autores, é simples, direto e

não requer calibração prévia ou equipamento especial, exceto uma câmara fotográfica, sendo possível a determinação de uma faixa de diâmetros de gotas que variam de 0,1 a 4,75 mm ou além desta.

O método assume que gotas de água suspensas num fluido menos denso porém mais viscoso que a água, assumem uma forma esférica quase perfeita devido às tensões superficiais e distribuição de pressão sobre as gotas.

Neste método, placas de Petri preenchidas com misturas de óleos especiais são rapidamente expostas à precipitação. Logo após são tomadas fotografias verticais das placas, utilizando iluminação de fundo, e ao lado das placas, são colocadas escalas métricas para determinação mais precisa do tamanho das gotas. Após a revelação do filme, as imagens podem ser projetadas em telas e determinados diâmetros e número de gotas.

⇒ Outro método largamente utilizado pelos pesquisadores é o da farinha. (Carter et. al. (1974); Kohl (1974); Dadio e Wallender (1985); Carvalho (1991); Mergulhão (1992); outros).

Carter et. al. (1974) relatam que o método da farinha foi introduzido por Bently em 1904. Eigel e Moore (1983) comentam que vem sendo usado, com modificações, por muitos pesquisadores, principalmente nos EUA.

O método é simples e prático, não necessitando de equipamentos sofisticados e por esta razão, um dos mais utilizados. Consiste basicamente em expor à precipitação bandejas contendo uma camada de farinha de trigo, peneirada e não compactada. As gotas em contato com a farinha produzirão grânulos que em

seguida serão secos ao ar e, posteriormente secos em estufa a uma temperatura de 105 - 110° C por um período de 24 horas. Com uma curva de calibração, determinada previamente sob mesmas condições, e para vários tamanhos de gotas produzidas em laboratório, determina-se o diâmetro da gota, considerando-se estas com forma esféricas, em função da massa do grânulo (Mergulhão, 1992).

Diversos equipamentos têm sido utilizados em laboratório para a formação de gotas de tamanhos diferentes, dentre eles destacam-se as seringas e agulhas hipodérmicas.

Carter et. al. (1974) utilizaram tubos de vidro para a formação de gotas grandes. Verificaram também que uma fina camada de parafina sobre as pontas de agulhas era suficiente para reduzir a adesão da água a estas, facilitando a formação de gotas pequenas. Técnicas de vibração ainda facilitaram a formação de gotas menores que 0,4 mm de diâmetro. No mesmo trabalho, os autores verificaram que a velocidade de queda (altura) tem pequena influência na curva de calibração.

Oliveira (1991) enfrentou dificuldades semelhantes para produzir gotas com diâmetros inferiores a 1,0 mm, fazendo uso da técnica de vibração para superar estas dificuldades. O autor obteve a seguinte equação para relacionar diâmetro de gota com massa do grânulo formado de farinha mais água (pellet) determinada para gotas variando de 0,5 a 7,2 mm :

$$D = 1,257 M^{0,353} \quad (17)$$

onde: D = Diâmetro da gota (mm);

M = massa do grânulo (mg).

Dadio e Wallender (1985) estudando distribuição de tamanhos de gotas em aspersores de baixa pressão, utilizaram o método da farinha com modificações na temperatura de secagem para 38<sup>o</sup> C e determinaram a seguinte equação:

$$D = 1,27 M^{0,324} \quad (18)$$

onde os parâmetros D e M possuem as mesmas denominações e unidades da Equação 17.

Carvalho (1991) e Mergulhão (1992) utilizaram técnicas semelhantes: as bandejas, após exposição à precipitação, eram colocadas para secar ao ar livre por um período de 5 horas e posteriormente separados os grânulos formados com uma peneira de número 50 da classificação "U. S. Standard". Na etapa seguinte, os grânulos eram submetidos a uma secagem em estufa a 105 - 110<sup>o</sup> C, por um período de 24 horas. Após a secagem, os grânulos eram separados e classificados de acordo com o tamanho médio, utilizando-se um conjunto de 11 peneiras "U. S. Standard" de números 4, 5, 7, 10, 12, 16, 18, 20, 30, 35, e 40. Os grânulos retidos em cada peneira eram pesados e contados. O diâmetro das gotas relativo a

cada peneira foi obtido com a equação determinada previamente em laboratório por Oliveira (1991). O volume de água precipitado em cada posição foi calculado a partir do número de gotas e seus respectivos volumes.

Dadio e Wallender (1985) também trabalharam com o método da farinha porém, utilizaram um cilindro metálico retirando as amostras para o peneiramento no centro das bandejas, visando com isto, eliminar da amostra possíveis grânulos formados por gotas de pequenos diâmetros, produzidas pelo fracionamento de gotas maiores que possam vir a se chocar nas laterais da bandeja.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras (UFLA.), em, Lavras - MG.

#### **3.1 Preparação da farinha**

A farinha de trigo (nome comercial "Clarice", fabricada pelo Moinho Sul Mineiro S.A.) utilizada em todos os testes, inclusive para a obtenção da curva de calibração, foi seca em estufa (105-110°C) durante três horas. Após este período, o material foi peneirado em peneira com abertura de 0,297 mm e acondicionado em sacos plásticos.

#### **3.2 Curva de calibração**

Diversos instrumentos e equipamentos foram utilizados para a formação de gotas de tamanhos diferentes (Quadro 5A) na determinação da curva de calibração.

Foi utilizada uma mistura de água e detergente líquido doméstico (10% de detergente) com o objetivo de reduzir a tensão superficial da água e permitir a formação de gotas de menor tamanho. Foi necessário ainda provocar vibração nas pontas das agulhas para chegar a diâmetros inferiores a 1,5 mm.

A determinação do diâmetro de cada gota foi realizada da seguinte maneira: trinta gotas produzidas por um único equipamento ou instrumento eram pesadas. Após três repetições, obtinha-se o peso médio unitário de cada gota. Considerando estas gotas como esferas perfeitas e a massa específica da água  $1.000 \text{ kg/m}^3$ , pôde-se determinar o diâmetro médio das gotas produzidas por este determinado equipamento (Apêndice A).

Após a determinação do diâmetro, o mesmo equipamento foi utilizado para produzir gotas que caíram de uma altura de um metro sobre placas de Petri preenchidas com farinha de trigo. O número de gotas aplicadas em cada placa foi determinado em função da área da placa e da área da "cratera" formada na farinha. Novamente foram tomadas três repetições e após um período de trinta minutos, as placas foram colocadas em estufa ( $105 - 110^\circ\text{C}$ ) por vinte e quatro horas. Após a secagem, o material contido em cada placa foi peneirado e os grânulos retidos pesados e contados, possibilitando a determinação do peso médio de cada grânulo (Apêndice B).

Estas determinações possibilitaram obter uma relação matemática entre peso de grânulo e diâmetro de gota, empregada posteriormente na avaliação de tamanhos e distribuição de gotas do aspersor em estudo.

### 3.3 Instalação do aspersor e coletores

Foi utilizado o aspersor ZE - 30D (5,5 x 4,5 mm), fabricado pela ASBRASIL S.A., operando sob pressão de 250 kPa, proporcionando uma vazão de 3,2 m<sup>3</sup>/h. A ponta do parafuso interceptador do jato d'água se encontrava a 9 mm da sua base de sustentação. A mola do braço defletor foi mantida com a regulagem original de fábrica.

Para determinação da pressão de operação utilizou-se manômetro metálico (Bourdon) previamente aferido. A tomada de pressão foi realizada 5 cm abaixo da rêsca de ligação do aspersor ao tubo de subida.

O controle da pressão no aspersor foi realizado através de um registro de gaveta instalado na tubulação de recalque.

O aspersor foi instalado no interior de uma campânula metálica com diâmetro de 2,90 m e 1,88 m de altura. O jato d'água deixava o interior da campânula através de uma abertura de 50 cm de largura (aproximadamente 20 graus) e caía sobre os coletores. A água que não saía por esta abertura retornava ao depósito de bombeamento.

Devido a dificuldades operacionais, os aspersores só puderam ser instalados a uma altura máxima de 15 cm acima do bordo superior dos coletores.

Tanto as bandejas de farinha para a verificação do tamanho e distribuição de gotas quanto os coletores de solo salpicado foram sustentados por uma estrutura de madeira (Figura 5) a 40 cm acima do piso do laboratório e

dispostos de 3 em 3 metros a partir do aspersor, sob o raio de alcance deste, perfazendo um total de cinco posições.

Para o estudo do salpicamento foram utilizadas calhas e anteparos confeccionados em chapa de aço galvanizada, e no interior destes, colocados os vasos com amostras de solo.

### **3.4 Tamanho e distribuição de gotas**

As bandejas contendo farinha, após exposição aos aspersores, foram mantidas ao ar livre por um período de trinta minutos e no final deste período colocadas em estufa (105 - 110°C) por vinte e quatro horas. Após a secagem, introduziu-se um anel coletor com 20 cm de diâmetro no centro das bandejas com o objetivo de eliminar gotas de pequenos diâmetros, produzidas pelo fracionamento de gotas maiores que pudessem vir a se chocar nas laterais da bandeja. O material amostrado foi então passado num jogo de peneiras com abertura de 2,800; 2,000; 1,700; 1,180; 1,000; 0,850; 0,600 e 0,425 mm. Com estes resultados e utilizando-se a curva de calibração previamente obtida determinou-se o diâmetro médio das gotas para cada peneira em função do tamanho dos grânulos formados. Conhecendo-se estes valores foi possível determinar o tamanho médio ponderado das gotas para cada posição (Apêndice E).

### **3.5 Tratamentos**

Foram usados dois tratamentos e quatro repetições para cada uma das cinco posições ao longo do raio do aspersor. No primeiro tratamento, a superfície dos vasos ficou totalmente exposta a ação das gotas, enquanto no segundo foi simulada, somente para a posição de 15 metros, a mesma densidade de cobertura observada em campo após a colheita da soja.

Logo após a colheita mecanizada de soja (colhedora equipada com picador de palhas), determinou-se a massa de palha por unidade de área e retiraram-se amostras do material para posterior simulação em laboratório da mesma densidade de cobertura.

Para o estudo da dinâmica do salpicamento durante a irrigação, subdividiu-se a lâmina total a ser aplicada na quarta repetição em cinco sub-lâminas iguais e no final da aplicação de cada uma destas, coletou-se o solo salpicado. A soma das quantidades de solo salpicado em cada sub-lâmina representa a quantidade total de salpicamento da quarta repetição.

### **3.6 Preparo das amostras de solo**

O solo utilizado nos testes foi classificado como LE (Latosolo Vermelho Escuro).

Foi retirado de uma área já cultivada no campus da própria Universidade e algumas de suas propriedades físicas e químicas se encontram nos Quadros 2A, 3A e 4A.

O material de solo foi peneirado e seco em condição ambiente (TFSA) e acondicionado em lona plástica até a data do início dos testes.

Na época dos testes, vasos comerciais de plástico número 2 (tipo violeta), com diâmetro 11,5 cm, foram totalmente preenchidos com material, pesados para posterior controle da irrigação e também identificados.

### **3.7 Determinação da energia cinética**

Inicialmente, determinou-se o diâmetro médio de gotas (ponto médio da classe para as diversas classes de tamanhos de gotas). A partir destes valores foram obtidas as velocidades de impacto (velocidade com que as gotas chegam na superfície do solo) através de um software desenvolvido e baseado na teoria balística para trajetória de gotas (Apêndice D). Determinou-se também as massas de gotas ( $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ) para todos os intervalos das classes e para todas as repetições. Desta maneira e conhecendo-se o número de gotas para cada intervalo de diâmetro, determinou-se a energia cinética. O somatório das energias cinéticas de cada classe, considerando as três repetições, foi tomado como sendo a energia cinética total para cada posição (Apêndice C).

A lâmina aplicada sobre as bandejas de farinha foi obtida através do somatório do produto do volume de cada gota pelo número de gotas de cada intervalo. Tomando-se a área do anel coletor onde foram retiradas as amostras da farinha, obtiveram-se os valores de energia cinética por unidade de área e milímetro de água aplicada.

### **3.8 Determinação do salpicamento**

Para o estudo do salpicamento, foram adaptados anteparos confeccionados em chapas de aço galvanizado sobre algumas calhas já existentes no laboratório. Estes anteparos evitaram que o solo salpicasse para fora das calhas coletoras.

Após a aplicação da lâmina de água desejada, as calhas e anteparos eram lavados com água que passava por funis dispostos de papel filtro. Tanto os papéis filtro quanto o solo retido nestes eram levados à estufa (105-110 °C) até que o peso permanecesse constante. Conhecendo-se previamente o peso do papel filtro, obtinha-se a quantidade de solo seco salpicado em cada posição.

### **3.9 Controle da irrigação**

Foram realizadas três irrigações sobre os vasos que continham as amostras de solo. As lâminas aplicadas foram calculadas com o objetivo de se

e elevar a umidade do solo no interior dos vasos à capacidade de campo (10 kPa). Para as segunda e terceira irrigações, considerou-se um fator de disponibilidade de água de 0,5 recomendado para a diversas culturas para os cálculos da umidade de irrigação e da lâmina a se aplicar.

Como os aspersores aplicam em geral menor intensidade pluviométrica na periferia, os tempos de aplicação de água variaram de posição para posição, com o objetivo de proporcionar a aplicação de uma mesma lâmina em todas as cinco posições.

Tanto o momento de irrigar quanto a lâmina aplicada durante a irrigação foram determinados através de um controle de pesagem dos vasos. Pluviômetros instalados próximos aos coletores, tiveram como único objetivo dar uma noção do momento de pesagem do vaso após a aplicação de lâmina desejada em cada posição.

### **3.10 Determinação da curva característica de retenção de água no solo**

A curva característica de retenção de água no solo foi determinada de acordo com a metodologia proposta por Klute (1986), utilizando-se placas porosas para as baixas tensões e membrana de pressão para as tensões mais elevadas.

### **3.11 Determinação da estabilidade dos agregados**

A determinação da estabilidade dos agregados foi feita através de agitador mecânico com velocidade de imersão controlável (Kemper e Rosenau, 1986).

### **3.12 Determinação da argila dispersa em água**

Na determinação da argila dispersa em água se fez uso da dispersão mecânica em água destilada, diferindo da metodologia proposta por Gee e Bander (1986) para determinação da argila total por apenas não utilizar o dispersante químico.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Curva de calibração

O método utilizado para a determinação do diâmetros de gotas foi o da farinha. A escolha deste método se deve principalmente à sua simplicidade e baixo custo, quando comparado à outros métodos. As principais vantagens e desvantagens de cada método estão relacionadas no Apêndice F.

Da mesma forma que Lowe citado por Hall (1970) e Oliveira (1991), as maiores dificuldades encontradas foram para a formação de gotas de pequeno diâmetro.

Com a mistura de detergente líquido doméstico à água e utilizando-se seringas odontológicas equipadas com agulhas e a técnica de vibração, obteve-se o menor diâmetro de gota (1,19 mm). O uso de parafina nas agulhas não permitiu a formação de gotas menores que 1,19 mm como as que Carter et al. (1974) conseguiram. Os autores obtiveram gotas que variaram de 0,4 a 6,0 mm.

Através do procedimento de regressão não linear do SAS (PROCNLIN), foi ajustada uma equação potencial correlacionando peso unitário de grânulo e diâmetro de gota. A equação obtida foi a seguinte:

$$D = 1,140333 * P^{0,349642} \quad (r^2 = 99,74) \quad (19)$$

onde :     D = diâmetro de gota (mm);  
           P = peso unitário de grânulo (mg).

Esta equação foi determinada para uma faixa de diâmetros compreendidos entre 1,19 e 7,17 mm. No entanto, durante o teste de distribuição de gotas verificou-se que o aspersor produzia gotas com menor diâmetro do que aquelas produzidas em laboratório e, que as gotas maiores não ultrapassaram 5,5 mm. Buscando-se um ajuste mais perfeito da equação, principalmente para os menores diâmetros de gotas, fez-se uma nova regressão utilizando-se 1,19 e 5,5 mm de diâmetro como limites inferior e superior, respectivamente. A nova equação, ajustada pelo mesmo método citado anteriormente, foi a seguinte:

$$D = 1,087486 * P^{0,364412} \quad (r^2=99,86\%) \quad (20)$$

onde D e P possuem as mesmas unidades e denominações que a equação anterior.

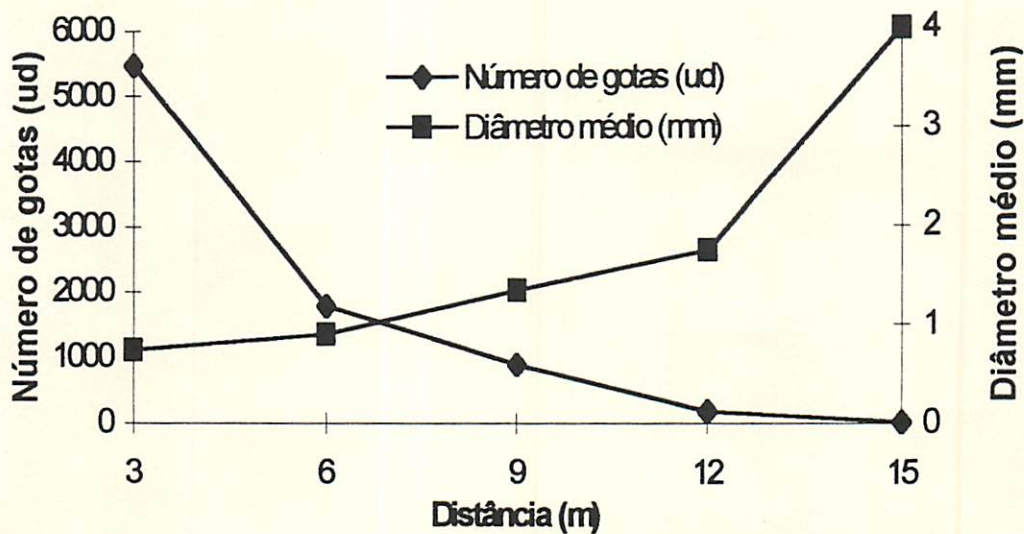
Embora sabendo-se que uma equação deva ser preferencialmente utilizada dentro da faixa de valores para os quais ela foi determinada e, diante das dificuldades encontradas para a formação de gotas de pequenos diâmetros e ainda, o alto coeficiente de determinação alcançado, assumiu-se a validade desta para valores abaixo do limite inferior utilizado na sua determinação.

Comparando-se a equação anterior com as determinadas por Dadio e Wallender (1985) e Oliveira (1991), verifica-se que os diâmetros obtidos com esta equação são inferiores para um mesmo peso de grânulo. Acredita-se que esta diferença nos resultados seja devido à qualidade da farinha e sua granulometria, fatores que podem influenciar na formação dos grânulos. Além disto, os autores não citam qual o método empregado para a obtenção da regressão e os referidos coeficientes de determinação.

#### **4.2 Distribuição de gotas**

Analisando-se os resultados da Figura 3, observa-se uma redução do número de gotas e um aumento do tamanho destas do aspersor para a periferia molhada por este, o que concorda com os resultados verificados por Kohl (1974).

Os diâmetros médios representativos de cada posição foram de 0,74, 0,90, 1,35, 1,75 e 4,00 mm, respectivamente. Estes diâmetros de gotas estão dentro da faixa de diâmetros observados por Keller (1984).



**FIGURA 3.** Número médio e diâmetros de gotas para as posições de 3, 6, 9, 12 e 15 metros do aspersor.

Vale ressaltar que durante a realização dos testes verificou-se visualmente que as gotas produzidas pelo braço defletor eram de grande diâmetro e caíam exclusivamente na posição de 6 metros. Estes resultados concordam com os encontrados por Bernuth, citado por Matsura (1993), que também verificou a ocorrência de gotas grandes próximas ao aspersor, produzidas pela interferência do braço defletor. Entretanto, o número destas gotas era muito pequeno quando comparado com as produzidas pelos bocais, de forma a manter sempre crescente o diâmetro médio de gotas do aspersor para o final do seu raio molhado por este.

### 4.3 Energia cinética

Os valores totais de energia cinética e índice de precipitação para cada uma das cinco posições podem ser observados na Figura 4.

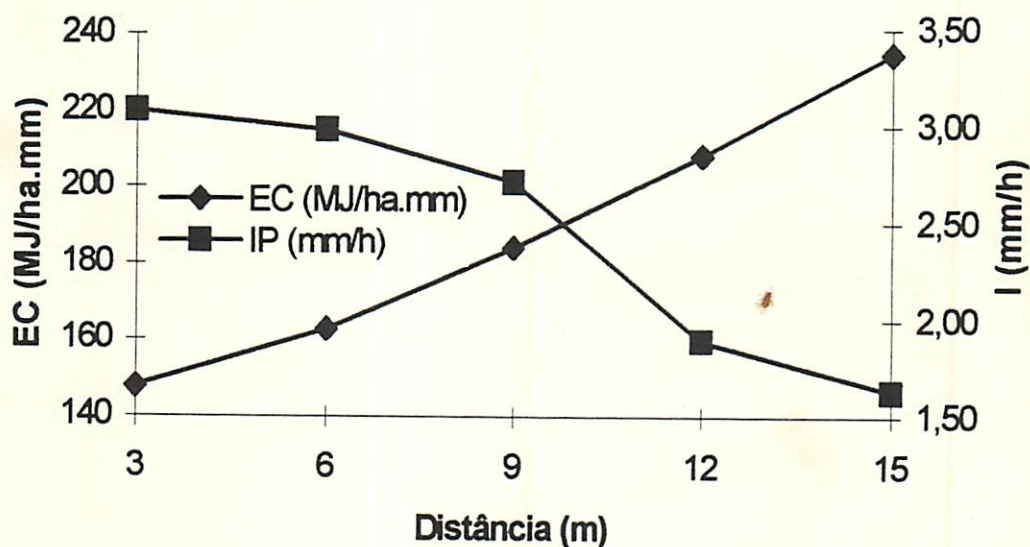


FIGURA 4. Valores de energia cinética e índice de precipitação para as posições de 3, 6, 9, 12, e 15 metros do aspersor.

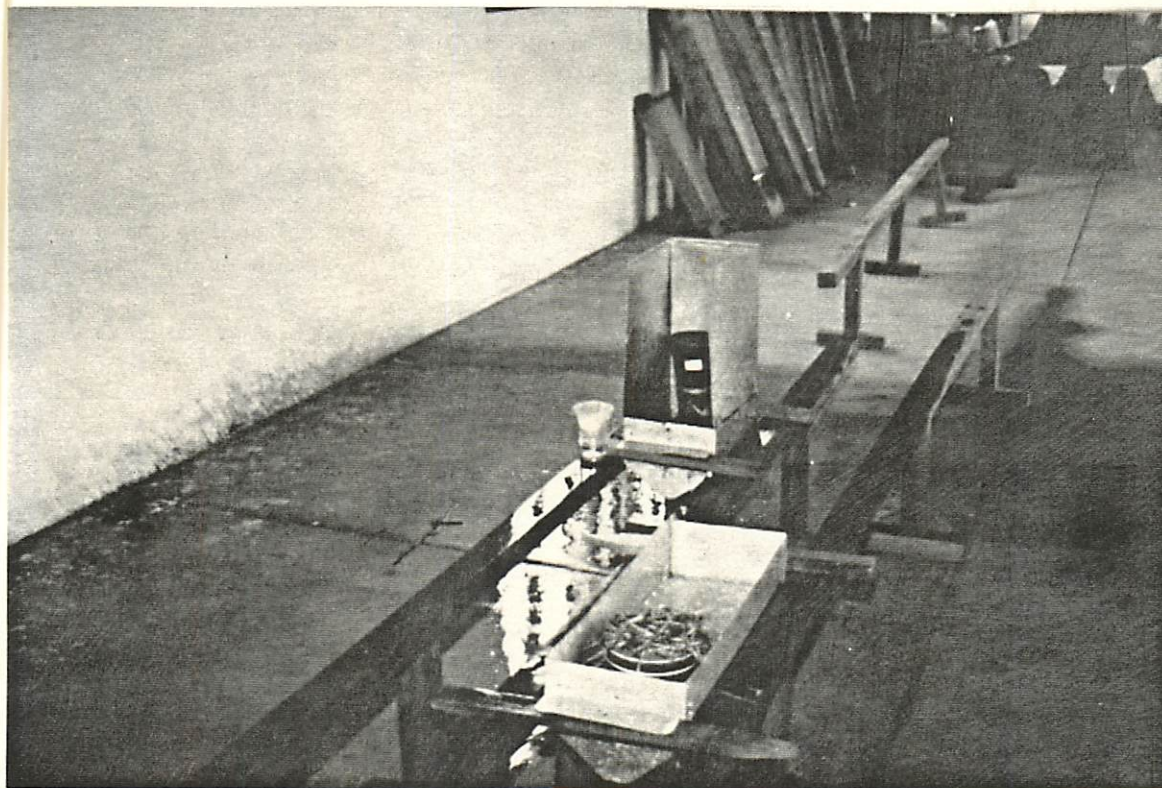
Verifica-se na Figura 4 que a energia cinética aumenta do aspersor para a periferia do seu raio molhado, mesmo havendo redução do número de gotas (Figura 3) e da intensidade de precipitação ao longo deste raio. Isto nos leva a crer que gotas maiores possuem, obviamente, massas maiores e consequentemente, velocidades de impacto mais elevadas, resultando em valores de energia cinética também mais elevados. Um pequeno aumento no diâmetro da gota provoca um acentuado acréscimo na energia cinética, e consequentemente,

no poder erosivo destas gotas, mesmo havendo redução no número de gotas e no índice de precipitação ao longo do raio de alcance. Estes resultados não concordam totalmente com os obtidos por Russel (1973), que observou um aumento exponencial para a energia cinética enquanto para os diâmetros, este aumento fora essencialmente linear. No presente trabalho, o aumento nos diâmetros médios ponderados para cada posição apresentou um comportamento linear, exceto para a posição mais distante do aspersor, enquanto o comportamento da energia cinética fora linear.

#### 4.4 Cobertura vegetal

Durante a realização dos ensaios com as amostras sem cobertura vegetal, colocou-se uma recipiente a 15 metros do aspersor contendo solo coberto com palha de soja, com a mesma densidade de cobertura verificada no campo (7,5 t/ha) (Figura 5). Observou-se que esta cobertura propiciou uma total proteção ao solo, não sendo verificado salpico algum justamente nesta posição, onde o nível de energia cinética é máximo. Por este motivo eliminou-se o tratamento onde as amostras de solo seriam cobertas com este material, considerando-se como resultado que a palhada de soja triturada e homogeneamente distribuída sobre a superfície do solo é capaz de eliminar totalmente a erosão por embate de gotas d'água provenientes de aspersores de pequeno e médio porte (gotas menores que 4,0 mm). Vale ressaltar que a

velocidade de impacto calculada para trajetória balística de gotas com 4 mm de diâmetro é de 6,83 m/s (Quadro A1). De acordo com Laws citado por Bertoni e Lombardi (1990), a velocidade terminal para gotas deste diâmetro em queda livre é de 8,8 m/s, resultando em maiores níveis de energia cinética. Portanto, tratando-se de precipitações naturais, os resultados deste trabalho só serão válidos para diâmetros abaixo de 4 mm e que resultem no máximo em 234 MJ/ha.mm de energia cinética.



**FIGURA 5.** Amostra de solo coberto com palha de soja na posição de máxima energia cinética.

#### 4.5 Comportamento do salpicamento nas três irrigações

Analisando a Figura 6, observa-se um aumento do salpicamento a cada irrigação, exceto para a posição de 3 metros onde a energia das gotas não foi suficiente para promovê-lo. Percebe-se também que os resultados da segunda e terceira irrigações estão mais próximos e são bastante superiores aos da primeira irrigação. O aumento do salpicamento com a irrigação está provavelmente relacionado com a pulverização dos agregados maiores e superficiais do solo pela ação das gotas de água, transformando-as em agregados de menor tamanho, com menor peso e desta maneira, facilitando seu deslocamento por gotas subsequentes durante a mesma ou nas próximas irrigações.

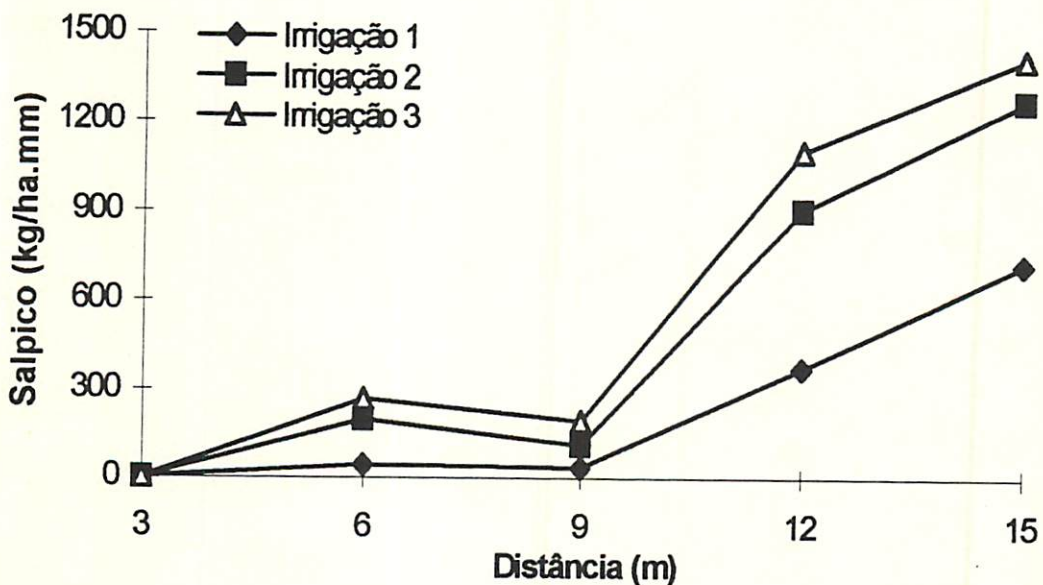


FIGURA 6. Salpicamento do solo nas três irrigações à 3, 6, 9, 12 e 15 metros do aspersor.

Outro provável motivo do aumento do salpicamento após a primeira irrigação é o teor de umidade inicial das amostras de solo. Na primeira irrigação, o solo estava bastante seco (umidade volumétrica inicial = 4,6 %), diferindo-se da segunda e terceira, onde o solo já apresentava um teor de umidade mais elevado (umidade volumétrica = 26,6 %). Acredita-se então que devido aos baixos teores de umidade inicial do solo, a água precipitada sobre as amostras era rapidamente absorvida por estas, não provocando tanto salpicamento. Além disto, a força de coesão provavelmente era de alta intensidade e os agregados seriam dificilmente movimentados. Durante a irrigação, o destacamento das agregados de solo foi facilitado com o aumento do teor de umidade. O aumento da umidade também poderia ter reduzido a coesão. Em se tratando de um solo argiloso, a ligação entre partículas seria mais fraca ainda com o aumento da umidade, facilitando o salpicamento. Estes resultados concordam com as verificações de Vomocil e Chancellor (1967), Gavande (1973), Jorge (1985) e Marshall e Holmes (1988).

A capacidade de uma gota em provocar ou não o salpicamento está diretamente relacionado com a energia cinética e o teor de umidade do solo, conforme pode-se verificar no item 4.6.

É de se esperar que após um determinado número de irrigações a quantidade de solo capaz de ser movimentado pela ação de gotas de água venha a se estabilizar ou mesmo reduzir. No entanto, somente um acompanhamento do salpicamento durante um maior número de irrigações poderá explicar a complexidade do fenômeno, não se esquecendo de outros efeitos que possam

influenciar no processo erosivo, como por exemplo, a cobertura vegetal da própria cultura.

Nota-se também na Figura 6 que, embora tenha sido exposta a menor nível de energia cinética do que na posição de 9 metros, a amostra colocada a 6 metros de distância do aspersor, além de apresentar menores diâmetros de gotas (Figura 3), evidenciou um maior salpicamento, o que pode ser explicado pela coincidência com a faixa de alcance do aspersor onde o jato sofreu a ação do braço defletor.

Entretanto, no cálculo da energia cinética assumiu-se que todas as gotas de água descreviam uma trajetória balística. Na realidade, as gotas produzidas pelo braço defletor percorrem uma trajetória que é alterada. Mesmo a porção central do jato, de maior velocidade, também é interceptada e desviada diretamente ao solo. Ainda que seja fragmentado por esta ação, a velocidade de impacto dessas gotas, que foram deslocadas pelo braço defletor, é certamente maior que aquela prevista pela teoria balística empregada no software do Apêndice D. Por outro lado, supõe-se que os diferentes ângulos de incidência destas gotas possam favorecer o salpicamento. Isto sugere que para pontos onde estes fatos ocorram deva-se buscar uma nova forma de determinação da velocidade, visando-se obter resultados mais precisos.

#### 4.6 Comportamento do salpicamento durante as irrigações

Na Figura 7 observa-se que o salpicamento é crescente até aproximadamente 20% e 25% de umidade volumétrica para a amostra colocada a 6 e 9 metros, respectivamente do aspersor. A partir deste ponto máximo, há uma redução no salpico.

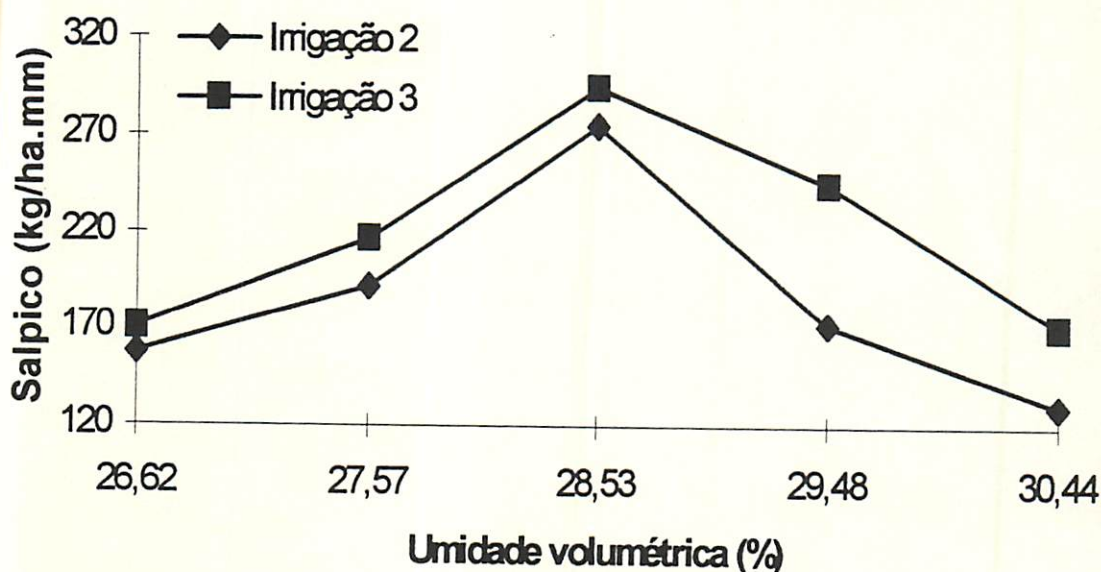


FIGURA 7. Salpicamento do solo durante a primeira irrigação para as posições de 6 e 9 metros.

O aumento inicial do salpico parece advir da menor resistência ao cisalhamento que os solos oferecem quando úmidos. As forças de coesão foram provavelmente reduzidas com o aumento do teor de umidade. A partir de um determinado valor de umidade, as forças de adesão devem ter unido os agregados, passando o salpico por um valor máximo e que a partir deste ponto decresceu.

O elevado teor de água da superfície das amostras também deve ter amortecido o impacto das gotas sobre o solo. Estes resultados concordam com os relatos de Gavande (1973) e Jorge (1985).

O mesmo comportamento também foi verificado durante as segunda e terceira irrigações (Figura 8) porém, as máximas taxas de salpicamento ocorreram, para ambas as posições, com aproximadamente 28% de umidade.

Estes resultados parecem indicar que durante a primeira irrigação as agregados de menor tamanho, provavelmente em maior número que nas segunda e terceira irrigações, tenham sido retirados das amostras, restando apenas agregados maiores, difíceis de serem movimentadas pelos níveis de energia cinética destas posições e com teor de umidade abaixo de 28%. Além disto, provavelmente tenha havido uma redução na coesão das agregados do solo.

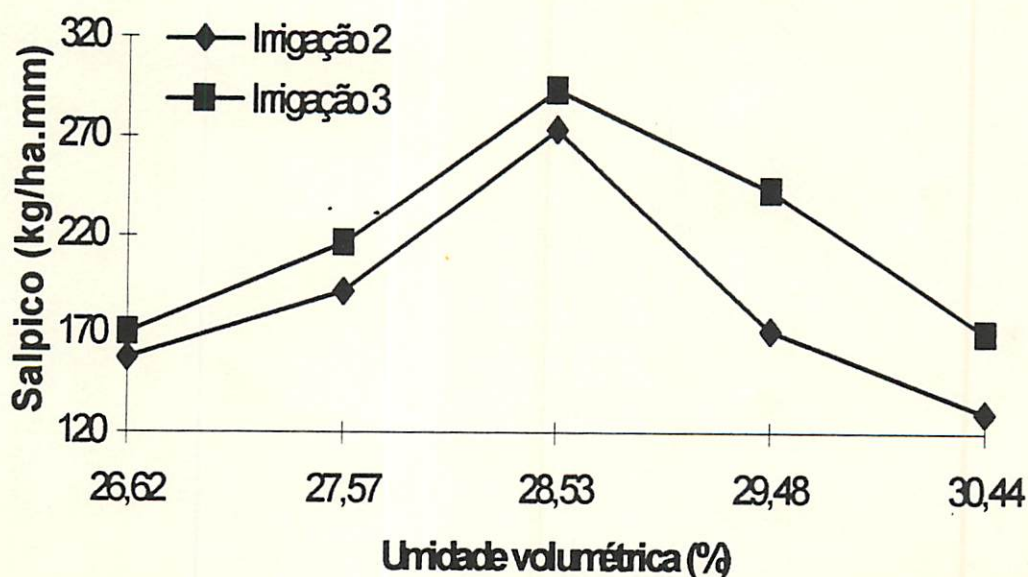


FIGURA 8. Comportamento do salpicamento durante as segunda e terceira irrigações a 6 metros do aspersor.

A redução do salpico a partir dos máximos valores observados provavelmente tenha ocorrido devido aos baixos níveis de energia cinética destas posições, não sendo suficientes para desprender os agregados de solo envolvidos por um filme d'água formado, provavelmente, a partir dos teores de umidade de máximo salpicamento.

Comparando-se os resultados da figura 7 com os das figuras 8 e 9, verifica-se que o salpicamento a 6 metros foi superior ao de 9 metros tanto na primeira quanto nas segunda e terceiras irrigações, evidenciando a ação das gotas de velocidade possivelmente maior produzidas pelo braço defletor.

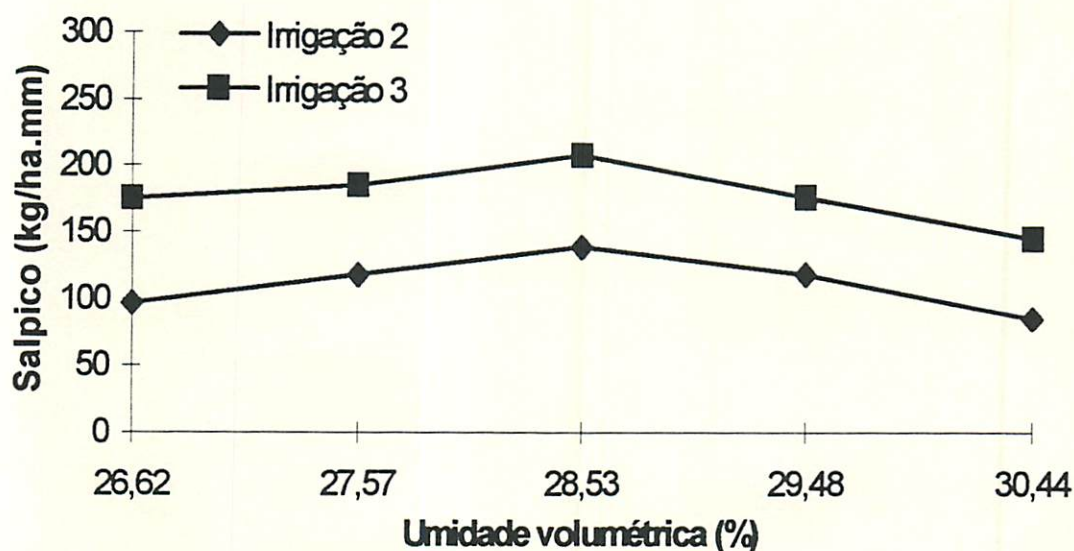


FIGURA 9. Comportamento do salpicamento durante as segunda e terceira irrigações a 9 metros do aspersor.

Nas Figuras 10, 11 e 12 observa-se que os níveis de energia cinética foram suficientes para desprender a 12 e 15 metros, sem decréscimo, as agregados

do solo. Observa-se ainda que o salpico é crescente até aproximadamente 12 % de umidade para a amostra colocada a 12 metros e 25 % para a colocada a 15 metros e a partir destes pontos, constantes. Já para as segunda e terceiras irrigações, observa-se que o salpicamento máximo coincide com a umidade de capacidade de campo das amostras.

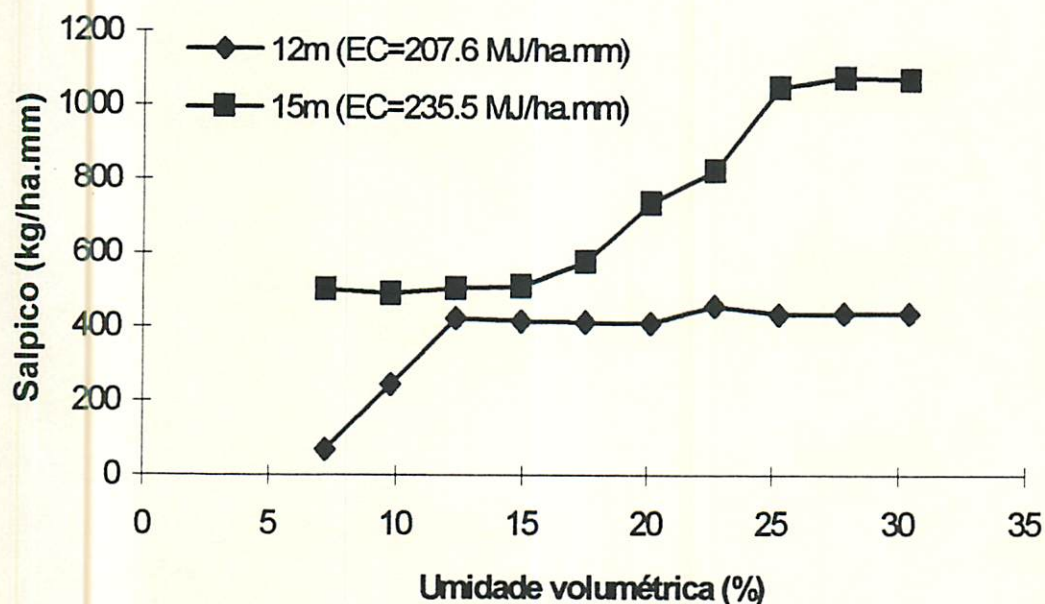


FIGURA 10. Salpicamento do solo durante a primeira irrigação para as posições de 12 e 15 metros.

Isso sugere que irrigar até à capacidade de campo requer cuidados adicionais, como por exemplo a proteção da superfície do solo com palhada de soja, para que o processo erosivo seja minimizado.

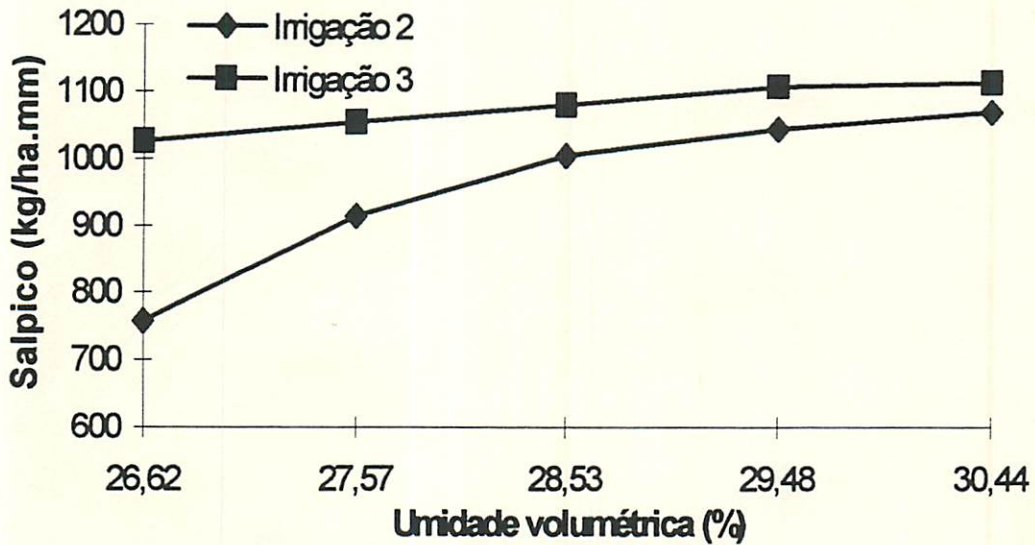


FIGURA 11. Comportamento do salpicamento durante as segunda e terceira irrigações a 12 metros do aspersor.

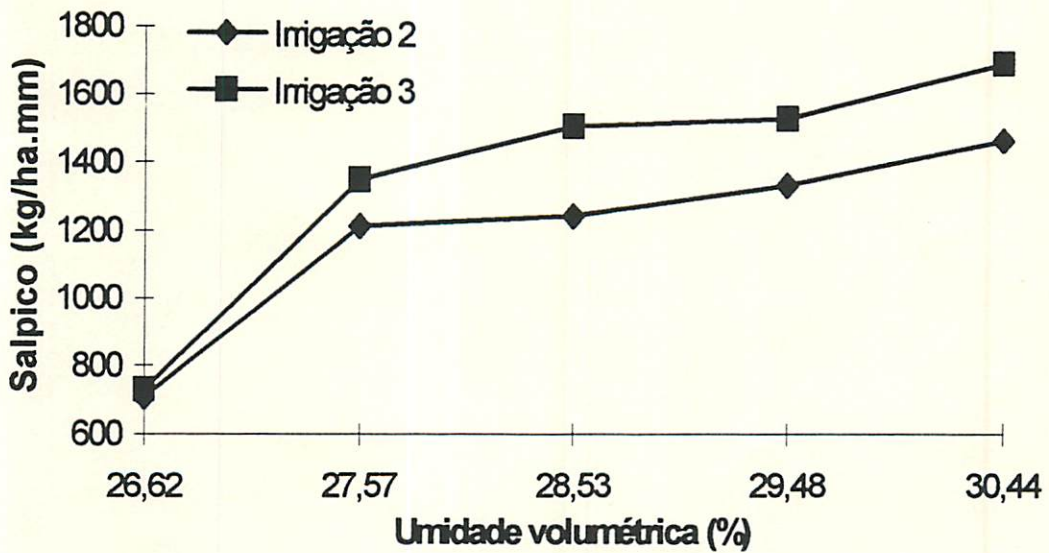


FIGURA 12. Comportamento do salpicamento durante as segunda e terceira irrigações a 15 metros do aspersor.

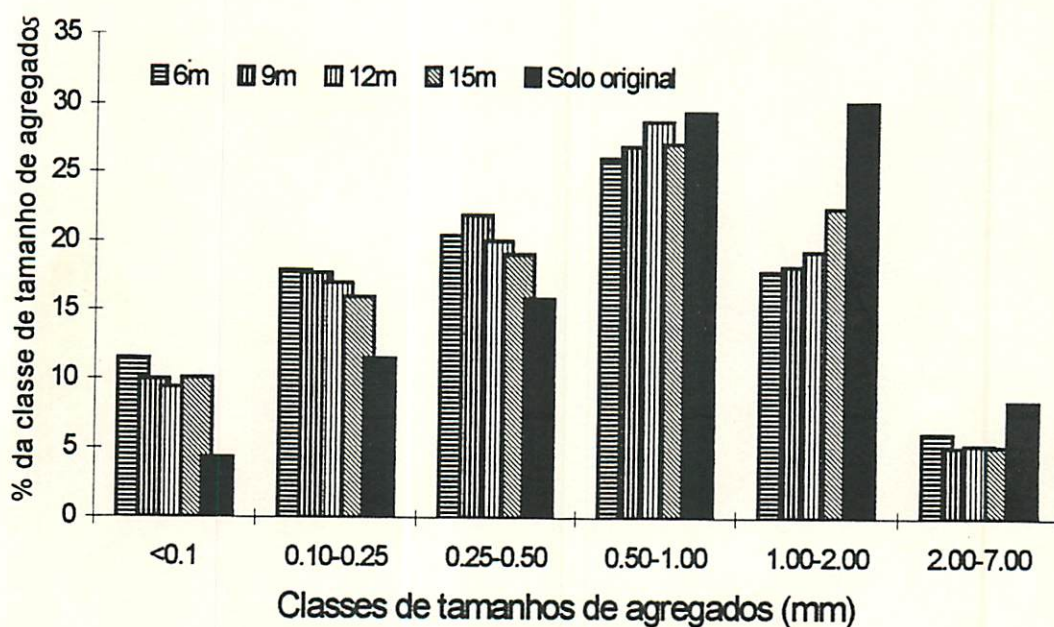
Tomando-se como exemplo uma irrigação com aplicação de uma lâmina de 25 mm e o teor de umidade próximo à capacidade de campo, a posição de 15 metros apresentaria um salpicamento superior a 26, 36 e 42 ton/ha para as primeira, segunda e terceira irrigações, respectivamente. Estes resultados podem vir a sugerir alterações no manejo da irrigação. A elevação do teor de umidade para valores próximos à capacidade de campo, prática usual na irrigação por aspersão e nos outros métodos também, pode ser um fator intensificador do processo erosivo caso a superfície dos solos não receba cobertura suficientemente capaz de reduzir o impacto das gotas. Além da cobertura superficial, o uso de outras técnicas conservacionistas parece ser de máxima importância para a redução dos efeitos e danos causados pela erosão nos solos irrigados.

#### **4.7 Estabilidade de agregados**

De acordo com os resultados da Figura 13, observa-se que a irrigação aumentou o número de agregados menores que 0,5 mm, possivelmente pela pulverização dos agregados maiores. Portanto, o embate das gotas também alterou o tamanho dos agregados das amostras de solo

Observa-se ainda na Figura 13 que os agregados menores que 0,25 mm permaneceram em maior quantidade na amostra colocada a 6 metros quando comparada com a colocada a 9 metros do aspersor. O salpicamento também foi maior na posição de 6 metros. Estes resultados devem-se provavelmente ao fato

de que as amostras colocadas a 6 metros estavam submetidas a uma energia cinética maior, resultante das gotas de maior velocidade e não determinadas pelo software, decorrentes da ação do braço defletor sobre o jato secundário do aspersor.



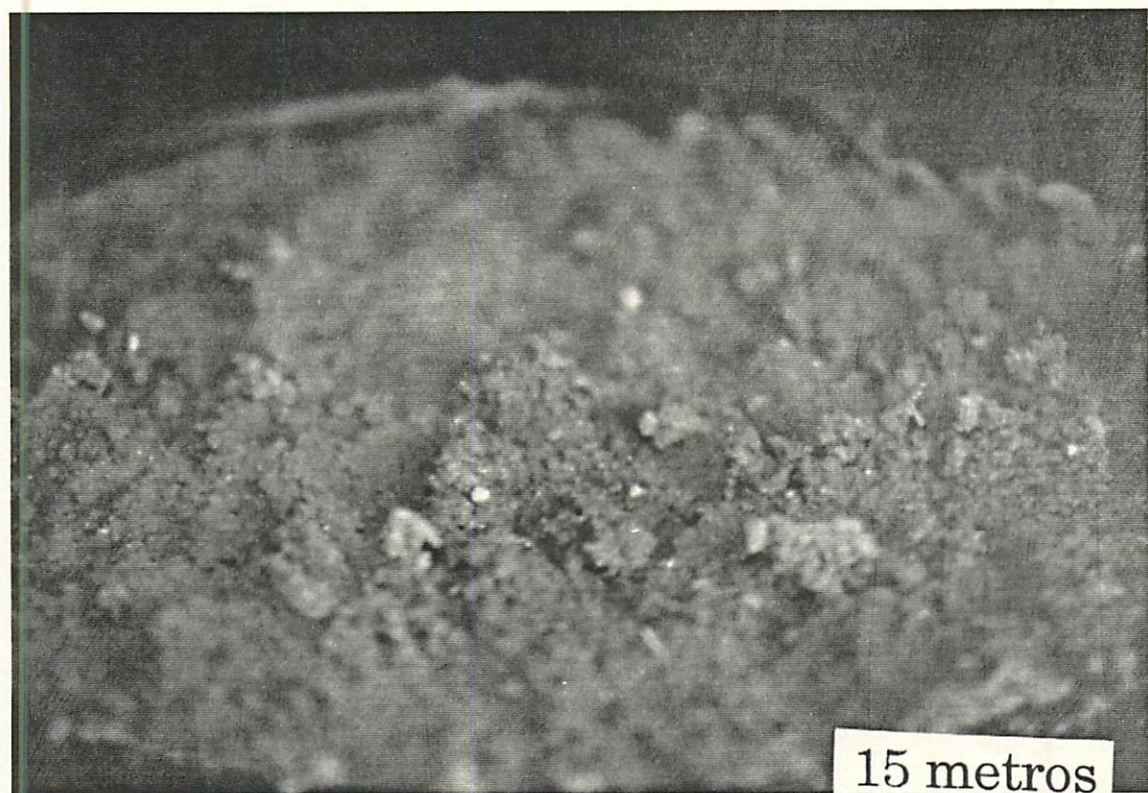
**FIGURA 13.** Estabilidade de agregados das amostras de solo originais e após as três irrigações para as posições de 6, 9, 12, e 15 metros.

Nota-se também que não existe uma diferenciação muito acentuada do tamanho de agregados após a irrigação nas diversas posições. Este resultado provavelmente se deve ao fato de que a análise para estabilidade de agregados foi realizada utilizando-se solo de uma fina camada superficial das amostras (5 mm). Caso a análise fosse realizada com o material salpicado, possivelmente

verificaria-se uma redução do tamanho de agregados com o aumento dos níveis de energia cinética.

Verifica-se ainda que, apesar de ter-se utilizado TFSA durante os ensaios, onde o solo é previamente peneirado em peneira com abertura de 2 mm, ocorreram agregados com diâmetros superiores a este valor. Isto pode indicar que houve uma ligação de partículas, formando agregados superiores a 2 mm, mesmo na amostra de solo original, onde não foram realizadas irrigações. Outra provável causa do aparecimento destes agregados pode ser a irregularidade da abertura da malha da peneira utilizada para o preparo das amostras. A peneira utilizada fora do modelo comercial, normalmente adquiridas em lojas de insumos agrícolas e não do modelo utilizado em laboratório para o preparo de amostras de solo. Além disso, a peneira já havia sido utilizada e por este motivo suas aberturas poderiam apresentar alterações.

Na Figura 14 observar-se a formação de agregados de tamanhos superiores a 2 mm, provavelmente devido ao efeito do impacto das gotas sobre a superfície da amostra colocada a 15 metros. Entretanto, quando estes agregados foram submetidos ao ensaio de estabilidade, se reduziram, formando agregados de menor tamanho, como pode ser visto na Figura 13.



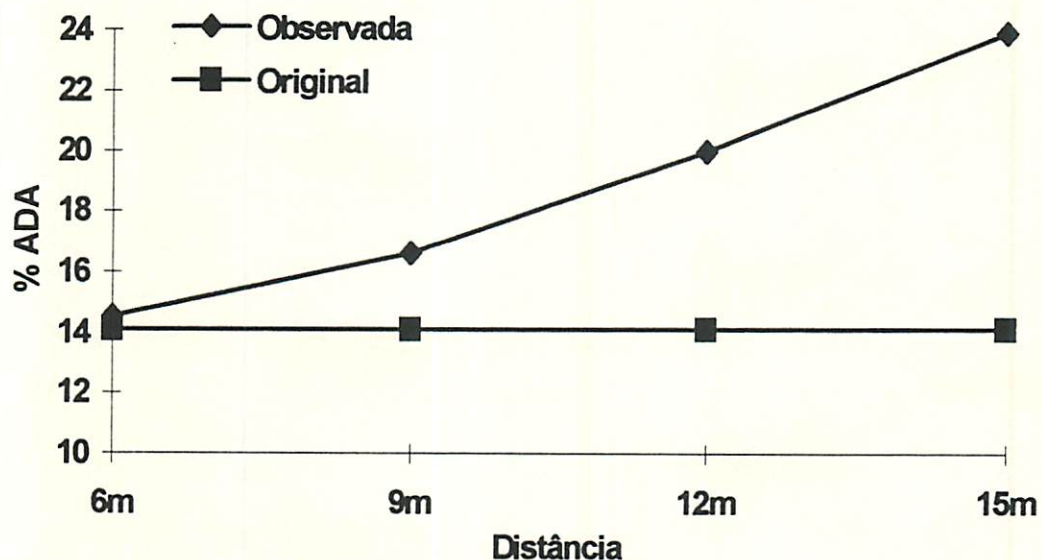
**FIGURA 14.** Superfície da amostra de solo após três irrigações na posição de 15 metros.

#### **4.8 Argila dispersa em água**

Durante a lavagem e coleta do solo salpicado no interior dos coletores, observou-se visualmente um aumento da turbidez da água do aspersor do início para a periferia do raio molhado por este, principalmente a partir dos 9 metros, indicando uma possível dispersão das argilas da amostra original.

Esta indicação foi comprovada quando determinou-se o teor de argila dispersa em água da camada superficial da amostra, com aproximadamente 5 mm

de espessura, antes e após as três irrigações. Na Figura 15 observa-se um aumento do teor de argila dispersa em água ao longo do raio de alcance do aspersor quando comparadas com as do solo original, chegando a um acréscimo de aproximadamente 70% para a posição de 15 metros. Conseqüentemente, estes resultados comprovam a existência de uma relação direta entre energia cinética e teor de argila dispersa em água.



**FIGURA 15.** Argila dispersa em água das amostras de solo original e após as três irrigações para as posições de 6, 9, 12 e 15 metros.

## 5 CONCLUSÕES

Alguns resultados encontrados neste trabalho, apesar de serem específicos para o aspersor estudado, podem ser extrapolados para outras situações, desde que tomadas algumas precauções. Diante das condições de realização deste, pode-se concluir que:

1. A formação de gotas de pequeno diâmetro em laboratório é difícil. Entretanto, a técnica da vibração, aliada a mistura de detergente líquido doméstico à água, permitiu a obtenção de gotas de até 1,19 mm.
2. O número de gotas emitidas pelo aspersor ZE-30D fabricado pela ASBRASIL S.A., reduziu do emissor para a periferia do raio molhado por este, enquanto o diâmetro médio aumentou.
3. Os valores da energia cinética total também se elevaram ao longo do raio de alcance do aspersor, mesmo havendo redução no número de gotas.
4. Verificou-se a ocorrência de gotas formadas pela ação do braço defletor na posição de 6 metros para o aspersor testado, provocando um aumento no salpicamento, provavelmente em função da maior velocidade de impacto destas gotas.

5. A palhada de soja, resultante de uma única colheita, obtida do picador de palha instalado em colhedoras automotrizes, homogeneamente distribuída sobre a superfície do solo, foi capaz de eliminar totalmente o salpicamento provocado por gotas de até 4 mm de diâmetro.

6. O salpicamento aumentou do início para o final do raio molhado pelo aspersor, exceto para a posição de 3 metros onde não verificou-se transporte de solo por ação das gotas de água.

7. Para o Latosolo Vermelho Escuro, a taxa de salpicamento parece ser menor para solos secos do que para solos úmidos. Isto provavelmente se dê ao fato de que além de uma grande força de coesão, as gotas parecem ser absorvidas pelo solo mais facilmente a baixos teores de umidade do que a teores mais elevados.

8. A irrigação aumentou a quantidade de agregados abaixo de 0,5 mm. Os agregados maiores parecem ter sido reduzidos a tamanhos menores devido à ação das gotas.

9. O teor de argila dispersa em água de uma camada superficial das amostras, com espessura de 5 mm, aumentou em aproximadamente 70% do início para o final do raio molhado pelo aspersor.

10. Valores de energia cinética superiores a 200 MJ/ha.mm e teores de umidade próximos à capacidade de campo induzem a um salpicamento máximo. Esta conclusão pode vir a sugerir alterações no manejo da irrigação e uma

comprovação da necessidade de utilização de outras técnicas conservacionistas nas áreas irrigadas.

11. O salpicamento dos solos parece estar muito relacionado com a teoria da colisão e por este motivo sugerem-se estudos adicionais nesta área.

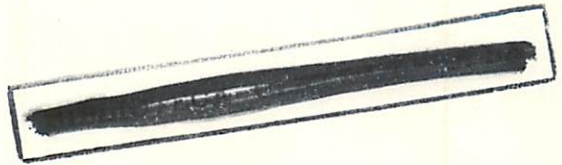
## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALENCAR, C.A.B. **Intensidade de aplicação e escoamento superficial em irrigação com pivôs centrais de baixa e média pressão.** Viçosa : UFV, 1988. 87p. (Tese - Mestrado em irrigação e Drenagem).
- BERNUTH, R.D. von ; GILLEY, J.R. Sprinkler droplet size distribution estimation from single leg test data. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v.27, n.5, p.1435-1441, Sept./Out. 1984.
- BERTONI, J.; LOMBARDI, F.N. **Conservação do solo.** São Paulo: Icone, 1990. 355p.
- BUBENZER, G.D.; JONES, B.A. Drop size and impact velocity effects on the deachment of soils under simulated rainfall. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v.14, n. 80, p.625-628, July/Aug. 1971.
- CARTER, C.E. ; GREER, J.D.; BRAND, H.J.; FLOYD, J.M. Raindrop characteristics in south central United States. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v.17, n.6, p.1033-1037, Nov./Dec. 1974.
- CARVALHO, J.A. **Tamanho de gotas e uniformidade de distribuição de água de dois aspersores de média pressão.** Viçosa : UFV. 1991. 73p. (Tese - Mestrado em Irrigação e Drenagem).
- DADIAO, C. ; WALLENDER, W.W. Droplet size distribution and water aplication with low-pressure sprinklers. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v.28, n.2, p.511-516, Mar./Apr. 1985.
- EIGEL, J.D. ; MOORE, I.D. A simple technique for measuring raindrop size and distribution. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v.26, n.4, p.1079-1084, July/Aug. 1983.

- ELLISON, W.D. Studies of raindrop erosion. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, v.25, n.4, p.131-136, Apr., 1944.
- FARIA, M.A.; VIEIRA, J. Irrigação por aspersão - sistemas mais usados no Brasil. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.12, n.139, jun. 1986.
- GARCIA, D.J.L. Riego por aspersion. In:CURSO INTERNACIONAL DE ENGENIERIA DE REGADIO, 2, Brasília : PRONI, 1986, v.1. 168p.
- GAVANDE, S.A. **Física de suelos**. Arcos de Belem : FAO, 1973. 351p.
- GEE, G.W.; BANDER, J.W. Particle - size analysis. In : **KLUTE,A.** : Methods of soil analysis. 2.ed, Madison : ASA/SSSA, 1986. v.1, n.9, 2 ed. , p.383-412.
- GREEN, R.L. Evolution of air resistance to freely falling drops of water. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, v.33, n.28, July. 1952.
- GUIA RURAL. Água : manual de irrigação. São Paulo, Abril, fev. 1991. (edição especial)
- HALL, M.J. Use of the stain method in determining the drop size distributions of coarse liquid sprays. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v.13, n. 1, p.33-41,Jan./Feb. 1970.
- HUDSON, N. **Soil conservation**. Ithaca : Cornel University Press, 1981. 324p.
- JORGE, J.A. **Física e manejo dos solos tropicais**. Campinas : ICEA,1986. 328p.
- KELLER, J. **Sprinkler irrigation**. Logan : Utah State University,1984. 621p.
- KEMPER, W.D.; ROSENAU,R.C. Aggregate stability and size distribution. In : **KLUTE,A.** : Methods of soil analysis. 2.ed. Madison : ASA/SSSA, 1986. v.1, n.9, 2ed., p.425-442.
- KLUTE, A. Water retention. In :\_\_\_\_\_ : **Methods of soil analysis**. 2.ed, Madison : ASA/SSSA, 1986. v.1, n.9, 2 ed., p.623-662.
- KOHL, R.A. Drop size size distribution from medium agricultural sprinklers. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v.17, n.4, p.690-693, July/Aug. 1974.
- LEME, E.J.A. Uso da equação de Kostiakov para seleção e adequação da intensidade de precipitação de aspersores. **ITEM - Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, n.31, p.37-40, dez. 1987.

- LIMA, L.A.; SILVA, M.L.N.; CURI, N. ; MARQUES, J.J.G.S.M. O salpicamento de latossolos provocado por gotas de chuva. In : CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 14, Goiânia, 1993. Anais... Goiânia : Astro gráfica e editora, 1993. v.3, p. 163-164.
- MARSHALL, T.J. ; HOLMES, J.W. **Soil physics.** New York : Cambridge University press, 1988. 374p.
- MATSURA, E.E. Granulometria de gotas de um aspersor tipo canhão. In : CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 12, Ilhéus, 1993, Anais... Ilhéus : SBEA/CEPLAC, 1983. v.5, p.2840-2846.
- MERGULHÃO, M.R. **Distribuição de gotas por tamanho em dois modelos de aspersores tipo canhão hidráulico na ausência de vento.** Viçosa : UFV, 1992. 57p. (Tese - Mestrado em Irrigação e Drenagem).
- OLIVEIRA, R.A. **Distribuição de gotas por tamanho e perfil de precipitação de um aspersor fixo.** Viçosa : UFV, 1991. 103p.(Tese - Irrigação e Drenagem).
- OLLITA, A.F.L. **Os métodos de irrigação.** São Paulo : Nobel, 1978. 267p.
- PEREIRA, G.M. **Simulação das perdas de água por evaporação e da uniformidade de distribuição na irrigação por aspersão.** Viçosa : UFV, 1995. 125p. (Tese - Doutorado em Irrigação e Drenagem).
- PETTERSON, A.E.; BUBENZER, G.D. Intake rate : sprinkler infiltrometer. In : KLUTE, A. : **Methods of soil analysis.** 2.ed., Madison : ASA/SSSA, 1986. v.1, n.9, p.845-870.
- PRONI. **Tempo de irrigar.** Brasília : PRONI, 1987. 160p.
- REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera.** Piracicaba : CENA/CARGIL, 1985. 232p
- RUSSEL, E.W. **Conditions and plant growth.** Londres : Longman, 1973. 232p.
- SCALOPPI, E.J. Características dos principais sistemas de irrigação. **ITEM - Irrigação e Tecnologia Moderna,** Brasília, n.25, p.22-27, jun. 1986.
- SEGINER, I. Tangential velocity of sprinkler drops. **Transactions of ASAE,** St. Joseph, v.8, n.1, 1965.

- SOLOMON, H.K.; ZOLDOSKE, D.F.; OLIPHANT, J.C. Laser optical measurement of sprinkler drops sizes. In : ASAE winter meeting, Chicago, 1991. **Proceedings ...** Chicago : ASAE, 1991. p.87-96.
- STILLMUNKES, R.T. ; JAMES, L.G. Impact energy of water droplets from irrigation sprinklers. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v.25, n.1, p.130-133, Jan./Feb. 1982.
- STRINGHAM, G.E. **Surge flow irrigation** : final report of the western regional research project W-163. Utah : Utah Agricultural Experiment Station, 1988. 92p. (Boletim de Pesquisa).
- VOMOCIL, J.A. ; CHANCELLOR, W.J. Compressive tensile failure strengths of three agricultural soils. **Transaction of ASAE**, St. Joseph, v.10, n.5, p.771-779, 1967.
- VORIES, E.D. ; BERNUTH, R.D. von Single nozzle sprinkler performance in the wind. **Transaction of ASAE**, St. Joseph, v.29, n.5, p.1325-1330, July/aug, 1986.



**ANEXOS**

**QUADRO 1A.** Velocidade de impacto ( $V_t$ ), calculadas através do software, para alguns diâmetros de gotas emitidas pelo aspersor ZE - 30D (condições de equipamento, instalação e serviço utilizadas nos ensaios).

D (mm)	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0
$V_t$ (m/s)	4,96	5,49	5,94	6,59	6,83	6,94

**QUADRO 2A.** Resultados da análise química do solo utilizado nos ensaios.

pH em água	6,2
P (ppm)	9,0
K (ppm)	122,0
Ca (meq/100 cc)	4,8
Mg (meq/100 cc)	1,4
Al (meq/100 cc)	0,1
H + Al (meq/100 cc)	1,9
S (meq/100 cc)	6,5
t (meq/100 cc)	6,6
T (meq/100 cc)	8,4
m (%)	2,0
V (%)	77,0
Carbono (%)	2,0
Mat. Org. (%)	3,4

**QUADRO 3A.** Resultados da análise granulométrica do solo utilizado nos ensaios.

Argila (%)	51,65
Areia (%)	24,15
Silte (%)	24,20

**QUADRO 4A.** Resultados para obtenção da curva característica de retenção de água do solo utilizado nos ensaios.

Tensão (kPa)	1500	500	100	33	10	6	4	2
Umidade volumétrica (%)	20,88	21,65	23,77	25,61	30,44	38,31	39,14	50,14

**QUADRO 5A.** Instrumentos, equipamentos e técnicas utilizadas para formar gotas de diversos tamanhos na elaboração da curva de calibração.

Equipamento, instrumento e /ou técnica	Diâmetro de gota formado (mm)
Seringa odontológica, detergente e vibração	1,19
Seringa de insulina e detergente	1,50
Seringa odontológica	1,91
Seringa descartável com agulha fina	2,72
Seringa descartável com agulha grossa	2,88
Seringa descartável com agulha veterinária fina	3,52
Seringa descartável com agulha veterinária grossa	3,86
Seringa descartável sem agulha	4,32
Pipeta graduada 10 ml	4,64
Torneira menor (diâmetro de 1 cm)	5,01
Pipeta 20 ml (diâmetro de 1,5 cm)	5,06
Torneira maior	5,61
Mangueira adaptada à torneira	6,15
Mangueira cortada em bisel adaptada à torneira	6,52
Torneira de filtro (diâmetro de 0,4 cm)	7,17

## APÊNDICES

**APÊNDICE A.** Exemplo de determinação do diâmetro da gota.

Número de gotas pesadas : 30

Peso total das gotas : 1,2690 g

Peso unitário :  $1,2690 / 30 = 0,0423 \text{ g} = 4,23 \times 10^{-5} \text{ kg}$

Considerando a massa específica da água ( $\rho$ )  $1000 \text{ kg/m}^3$ , pode-se determinar o volume da gota da seguinte maneira :

$$\rho = \frac{\text{Massa}}{\text{Volume}}$$

$$\text{Volume} = \frac{\text{Massa}}{\rho} = \frac{4,23 \times 10^{-5}}{1000} = 4,23 \times 10^{-8} \text{ m}^3$$

Considerando ainda o formato esférico para a gota :

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

$$r = \left( \frac{3}{4 \pi} \cdot V \right)^{1/3} = 0,00216 \text{ m} \Rightarrow D = 4,32 \text{ mm}$$

**APÊNDICE B.** Exemplo de determinação do peso do grânulo.

Número de pellets secos na estufa = 10

Peso total dos pellets = 0,440 g

Peso unitário =  $0,44 / 10 = 0,044 \text{ g} = 44 \text{ mg}$

Obs.: Com os resultados do Apêndices A e B, realizadas as repetições, e ainda, para cada um dos equipamentos citados no Quadro 5A, obtiveram-se vários pontos que permitiram obter, por regressão, a curva que relaciona peso de grânulo e diâmetro de gota:

$$D = 1,087486 * P^{0,364412}$$

onde :

D = diâmetro de gota (mm);

P = peso de grânulo (mg).

APÊNDICE C. Exemplo de determinação da energia cinética.

Abertura da peneira (mm)	Número de grânulos (ud)	Peso líquido (g)	Peso Unitário (mg)	Diâmetro de gota (mm)	Diâmetro médio da classe (mm)	Massa (kg x 10 <sup>-5</sup> )	Velocidade terminal (m/s)	Volume (1 x 10 <sup>-4</sup> )	Ec (MJ/ha mm)
2,800	5	0,11	22,00	3,35	3,35	1,98	6,66	0,98	10,17
2,000	6	0,05	8,33	2,35	2,85	1,22	6,51	0,73	7,19
1,700	46	0,15	3,26	1,67	2,01	0,43	5,94	1,97	16,11
1,180	563	0,78	1,38	1,22	1,45	0,16	5,41	8,97	60,84
1,000	305	0,21	0,69	0,95	1,09	0,067	4,97	2,05	11,78
0,850	661	0,38	0,57	0,89	0,92	0,041	4,79	2,69	14,31
0,600	1126	0,34	0,30	0,70	0,80	0,026	4,57	2,97	14,43
0,425	2226	0,22	0,09	0,47	0,47	0,005	4,01	1,19	4,45
<b>TOTAIS</b>	<b>4.938</b>							<b>21,6</b>	<b>139,30</b>

Obs.: 1. Os diâmetros de gotas foram obtidos à partir da curva de calibração apresentada na observação do Apêndice B;

2. A velocidade terminal foi determinada por meio do software apresentado no Apêndice D,

3. Considerou-se para o cálculo da energia cinética a área do anel coletor que foi introduzido no centro das bandejas (diâmetro de 17,5 cm).

APPENDICE D. Listagem do programa utilizado para calculo da velocidade terminal das gotas (Turbobasic).

```

10 PRINT
40 DIM X(2900), Y(2900), VX(2900), VY(2900), VR(2900)
50 G=9.810001
60 DT=.01
90 CLS: INPUT "DIAMETRO DA GOTA (MM): "; D
95 IF D=9999 THEN STOP:END
100 INPUT "ANGULO DE ARREMESSO DO ASPERSOR (GRAUS): "; A
110 INPUT "PRESSAO DE SERVICIO DO ASPERSOR (MCA): "; PS
115 INPUT "ALTURA DO ASPERSOR (M): "; ALTASP
150 C2=(.804+.264*D+.066*D^2-.004*D^3)/(1.109*D)
170 VI=.97*SQR(2*G*PS)
190 A=A*3.1415927#/180!
210 VX(0)=VI*COS(A)
220 VY(0)=VI*SIN(A)
230 VR(0)=VI
250 FOR I=1 TO 2900
260 DVR=-((SQRT(C2^2*VR(I-1)^4)+(2*G*C2*VR(I-1)*VY(I-1))+G^2))*DT
270 VR(I)=VR(I-1)+DVR
290 DVX=(-1*C2*VR(I-1)*VX(I-1))*DT
300 VX(I)=VX(I-1)+DVX
310 VMX=(VX(I-1)+VX(I))/2
320 X(I)=X(I-1)+VMX*DT
330 DVY=(-1*C2*VR(I-1)*VY(I-1)-G)*DT
340 VY(I)=VY(I-1)+DVY
350 VMY=(VY(I-1)+VY(I))/2
360 Y(I)=Y(I-1)+VMY*DT
380 XI=X(I-1):YI=Y(I-1):TI=I*DT
390 IF VY(I)>=0 THEN I=2900
400 NEXT I
430 X(0)=XI:Y(0)=YI:VX(0)=VMX:VY(0)=VMY:VR(0)=VMX
440 FOR I=1 TO 2900
450 DVR=-((SQRT(C2^2*VR(I-1)^4)-(2*G*C2*VR(I-1)*VY(I-1))+G^2))*DT
460 VR(I)=VR(I-1)+DVR
470 DVX=(-1*C2*VR(I-1)*VX(I-1))*DT
480 VX(I)=VX(I-1)+DVX
490 VMX=(VX(I-1)+VX(I))/2
500 X(I)=X(I-1)+VMX*DT
510 DVY=(-1*C2*VR(I-1)*VY(I-1)+G)*DT
520 VY(I)=VY(I-1)+DVY
525 VMFACT=VY(I)
530 VMY=(VY(I-1)+VY(I))/2

```

```
540 Y(I)=Y(I-1)-VMY*DT
560 X2=X(I):Y2=Y(I):T2=I*DT
570 IF Y2<(-1*ALTASP) THEN I=2900
580 NEXT I
610 PRINT "ALCANCE VERTICAL (M): ";ALTASP+Y1
620 PRINT "ALCANCE HORIZONTAL (M): ";X2
630 PRINT "TEMPO DA TRAJETORIA (SEG): ";T1+T2
631 PRINT "VELOCIDADE IMPACTO (M/S): ";VIMPACT
632 INPUT "DESEJA IMPRIMIR (S/N): ";IP$
633 IF NOT (IP$="S" OR IP$="s") THEN GOTO 645
636 LPRINT
"-----"
637 LPRINT USING "DG: ###.## ANG: ###.## PS: ###.## ALT.ASP:
###.##";D,A*180/3.1415927#,PS,ALTASP
638 LPRINT USING "ALCANCE HORIZONTAL (M): ###.##";X2
639 LPRINT USING "ALCANCE VERTICAL (M): ###.##";ALTASP+Y1
641 LPRINT USING "TEMPO DA TRAJETORIA (SEG): ###.##";T1+T2
642 LPRINT USING "VELOCIDADE IMPACTO (M/S): ###.##";VIMPACT: LPRINT: LPRINT
645 PRINT:PRINT
650 INPUT "OUTRO CALCULO (S/N): ";OP$
660 IF NOT (OP$="S" OR OP$="s" OR OP$="N" OR OP$="n") THEN GOTO 650
670 IF NOT (OP$="n" OR OP$="N") THEN CLEAR: GOTO 10
680 STOP: END
```

**APÊNDICE E.** Exemplo de determinação do diâmetro médio ponderado para cada posição

<b>Abertura da peneira (mm)</b>	<b>N. de grânulos retidos (ud)</b>	<b>Peso líquido (mg)</b>	<b>Peso unitário (mg)</b>	<b>Diâmetro de gota (mm)</b>	<b>Diâm. * Número de grânulos</b>
2,800	5	0,11	22,0	3,35	16,77
2,000	6	0,058	8,33	2,35	14,13
1,700	46	0,15	3,26	1,67	76,96
1,180	563	0,78	1,38	1,22	689,49
1,000	305	0,21	0,69	0,95	289,51
0,850	661	0,38	0,57	0,89	587,51
0,600	1126	0,34	0,30	0,70	791,49
0,425	2226	0,22	0,09	0,47	1041,54
<b>Totais</b>	<b>4938</b>				<b>3507,40</b>

Diâmetro médio ponderado =  $3,507,40 / 4938 = 0,71$  mm

Obs.: Os diâmetros de gotas foram determinados da mesma maneira do Apêndice B

**APÊNDICE F.** Vantagens e desvantagens de alguns métodos utilizados para determinação de tamanhos de gotas.

<b>Método</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Ardósia	Baixo custo. Simplicidade	Imperfeição nas manchas formadas; resultados de baixa precisão.
Mancha	Baixo custo. Simplicidade	Extensiva calibração para posterior utilização do método. Dificuldade para a formação de gotas de pequeno diâmetro. Gotas maiores tendem a se esparramar sobre a superfície absorvente formando manchas imperfeitas. Manchas formadas por gotas maiores que 1 mm variaram com a velocidade de impacto.
Imersão	Simples. Não requer calibração prévia.	Custos mais elevados por necessitar de equipamentos mais sofisticados. As gotas podem se fracionar no contato com o óleo caso a viscosidade deste não seja a ideal.
Farinha	Simples, prático e barato. Não necessita de equipamentos especiais. A velocidade de impacto não tem influência no tamanho do grânulo formado.	Extensiva calibração para posterior utilização. Dificuldade para formação de gotas de pequeno diâmetro durante a calibração. A sobreposição de gotas pode formar grânulos imperfeitos e que não correspondem ao diâmetro real destas. Sua utilização só é possível em aspersores de médio a pequeno porte. Muito trabalhoso.
Transdutores de pressão; sensores piezoelétricos; fotográficos	Menos trabalhosos.	Grande dificuldade de utilização no campo. Alto custo. Não produzem resultados satisfatórios.
Raio laser	Determinação rápida e precisa de tamanhos e velocidades de gotas.	Alto custo dos equipamentos.