

**CARACTERÍSTICAS DE CHUVAS  
PRODUZIDAS POR PIVÔ CENTRAL E SEUS  
EFEITOS SOBRE O SOLO**

**EDUARDO INÁCIO VIEIRA**

**2009**

**EDUARDO INÁCIO VIEIRA**

**CARACTERÍSTICAS DE CHUVAS PRODUZIDAS POR PIVÔ  
CENTRAL E SEUS EFEITOS SOBRE O SOLO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras,  
como parte das exigências do Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Agrícola, área de  
concentração em Engenharia de Água e Solo, para a  
obtenção do título de "Doutor".

Orientador  
Prof. Manoel Alves de Faria

LAVRAS  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2009

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca Central da UFLA**

Vieira, Eduardo Inácio.

Características de chuvas produzidas por pivô central e seus efeitos sobre o solo / Eduardo Inácio Vieira. – Lavras : UFLA, 2009.  
59 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2009.  
Orientador: Manoel Alves de Faria.  
Bibliografia.

1. Intensidade de aplicação. 2. Energia cinética. 3. Tamanho de gotas. 4. Salpicamento. 5. Escoamento superficial. 6. Retenção de água. 7. Condutividade hidráulica do solo saturado. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 631.587

**EDUARDO INACIO VIEIRA**

**CARACTERÍSTICAS DE CHUVAS PRODUZIDAS POR PIVÔ  
CENTRAL E SEUS EFEITOS SOBRE O SOLO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras,  
como parte das exigências do Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Agrícola, área de  
concentração em Engenharia de Água e Solo, para a  
obtenção do título de "Doutor".

APROVADA em 02 de outubro de 2009

Prof. Alberto Colombo	UFLA
Prof. Élio Lemos da Silva	UFLA
Prof. Mozart Martins Ferreira	UFLA
Pesq. Édio Luiz da Costa	EPAMIG

Prof. Manoel Alves de Faria  
(Orientador)  
UFLA

LAVRAS  
MINAS GERAIS – BRASIL

**DEDICO**

*Minha esposa Vera Lúcia,  
minha filha Marina e meu genro Victor Flores*

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), pelo apoio integral e oportunidade de qualificação

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), em especial ao Departamento de Engenharia (DEG), pela oportunidade de realização do curso.

A cidade de Lavras, por oferecer as condições necessárias durante os meus quatro anos de residência neste município.

Ao professor Manoel Alves de Faria, pela orientação, amizade e dedicação na condução deste trabalho

Aos professores Alberto Colombo, Élio Lemos da Silva, Luís Antonio Lima, pela valiosa ajuda na condução do experimento e análise dos dados.

Aos professores Mozart, Max, Nilton Cury e João José do Departamento de Solos, pelas contribuições no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Renato e Augusto Ramalho do Departamento de Ciências Exatas, pela ajuda na análise dos dados.

Aos professores Jacinto de Assunção, Geraldo Magela, Antonio Marciano, Carlos Rogério e Fátima Rezende do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pelos ensinamentos e agradável convívio.

Ao pesquisador Édio Luiz da Costa pela participação na banca de defesa desta tese.

Aos meus irmãos e sobrinhos pelo incentivo e convívio agradável.

A todos os colegas do curso: Débora Candeias, Marcus Vinicius, Ednaldo Liberato, Antonio Carlos, Reinaldo Aquino, Natalino Gomes, Daniel Brasil, Samuel Beskow, Marcelo Viola, Juliana Botega, Leonardo Lopes, Kátia Daniela, Marcelo Furtini, Luiz César, Moisés Santiago, Carolina Bilibio, Fábio Faria, Henrique Oliveira, Lessandro, Léo Ávila, Walfredo Figueiredo, Wellington Gomes, Kleber Mariano, Anselmo Custódio, Donizete, Renato Vilas Boas, Sadjo, Gil Neto e Joaquim, pelo incentivo.

Aos pesquisadores Adão Wagner, Gilberto Coelho e Carla de Pádua, pelo incentivo.

Aos funcionários do laboratório de Irrigação José Luís, Osvaldo (Neném), Gilson e Marli, pelo incentivo e ajuda.

À secretaria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em especial a Ana Daniela dos Santos e Greice da Costa Oliveira, pela atenção e dedicação.

Enfim, a todos aqueles que colaboraram de alguma forma para a execução deste trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	ii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT .....	v
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	2
2.1 Agricultura irrigada no Brasil.....	2
2.2 Irrigação por pivô central.....	4
2.2.1 Intensidade de aplicação de água.....	6
2.2.2 Distribuição de gotas por tamanho .....	7
2.2.3 Energia cinética.....	8
2.3 Efeitos de chuvas sobre o solo .....	13
2.3.1 Salpicamento.....	13
2.3.2 Escoamento superficial .....	15
2.3.3 Condutividade hidráulica do solo saturado.....	17
2.3.4 Retenção de água .....	18
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	19
3.1 Caracterização das chuvas .....	19
3.1.1 Simulação .....	19
3.1.2 Distribuição das precipitações .....	21
3.1.3 Distribuição de gotas por tamanho .....	21
3.1.4 Determinação da energia cinética das precipitações.....	22
3.2 Efeitos das chuvas sobre o solo .....	22
3.2.1 Simulação do pivô central.....	22
3.2.2 Unidades experimentais.....	23
3.2.3 Solo.....	25

3.2.4 Controle das irrigações .....	25
3.2.5 Determinação do escoamento superficial .....	26
3.2.6 Determinação do material salpicado .....	27
3.2.7 Determinação da condutividade hidráulica do solo saturado.....	27
3.2.8 Determinação da retenção de água .....	28
3.3 Delineamento experimental e análises estatísticas .....	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	30
4.1 Intensidade de aplicação de água.....	30
4.2 Distribuição de gotas por tamanho .....	37
4.3 Energia cinética.....	40
4.4 Efeitos das chuvas sobre o solo .....	44
4.4.1 Escoamento superficial .....	46
4.4.2 Salpicamento.....	47
4.4.3 Condutividade hidráulica do solo saturado.....	48
4.4.4 Água retida a 10 kPa.....	50
5 CONCLUSÕES .....	51
6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	52

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 Barra de irrigação e malha para caracterização da intensidade de aplicação de água. ....	20
FIGURA 2 Dispositivo com movimento lateral controlado DMLC.....	23
FIGURA 3 Unidade experimental após receber irrigações. ....	24
FIGURA 4 Área de coleta do material salpicado. ....	27
FIGURA 5 Distribuição dos valores da intensidade de aplicação de água ao longo do padrão molhado para emissores com diferentes diâmetros de bocais.....	31
FIGURA 6 Comportamento das intensidade de aplicação de água média (Imed) e máxima (Imax) em função dos diâmetros dos bocais (Db). ....	36
FIGURA 7 Distribuição percentual de água em função de diâmetros de gotas e dos bocais. ....	38
FIGURA 8 Distribuição percentual de água em função do diâmetro de bocal para diferentes classes de tamanho de gotas. ....	39
FIGURA 9 Valores de D50 em função de diâmetro de bocal. ....	40
FIGURA 10 Valores estimados de velocidade de impacto (Vi) para diferentes diâmetros de gotas (Dg). ....	41
FIGURA 11 Distribuição de energia cinética ao longo do padrão molhado para diferentes diâmetros de bocal. ....	44
FIGURA 12 Percentagem de escoamento superficial (ES) em função dos níveis de energia cinética aplicados (EC). ....	47
FIGURA 13 Valores de salpicamento em função da energia cinética. ....	48
FIGURA 14 Redução da condutividade hidráulica inicial do solo saturado em função dos níveis de energia cinética. ....	49
FIGURA 15 Valores obtidos de retenção de água em função da energia cinética. ....	50

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 Distribuição percentual de áreas irrigadas por regiões e por métodos de irrigação.....	4
TABELA 2 Valores médios da intensidade de aplicação de água, ( $\text{mm h}^{-1}$ ), ao longo do padrão molhado para bocais com diferentes diâmetros....	30
TABELA 3 Valores obtidos ( $\text{mm h}^{-1}$ ) da intensidade de aplicação média (Imed) e máxima (Imax) com os respectivos coeficientes de variação (CV) para bocais com diferentes diâmetros (Db) em uma faixa de três metros perpendicular a linha de irrigação. ....	32
TABELA 4 Valores obtidos e valores estimados pela equação apresentada por Kincaid (2005)), para intensidade de aplicação média para diferentes diâmetros de bocais (Db).....	35
TABELA 5 Valores de intensidade de aplicação máximos obtidos e estimados pela equação apresentada por Colombo (2003). ....	36
TABELA 6 Distribuição percentual do volume de água, em função do diâmetro de gotas (Dg) produzidas pelos diferentes diâmetros de bocais.....	37
TABELA 7 Distribuição percentual de água em função das classes de tamanho de gotas para bocais com diferentes diâmetros. ....	39
TABELA 8 Valores de D50 para diferentes diâmetros de bocais. ....	39
TABELA 9 Valores de energia cinética ( $\text{J m}^{-2} \text{mm}^{-1}$ ) obtidos para diferentes diâmetros de gotas (Dg) e diâmetro de bocais (Db) pela aplicação de uma lâmina de 1mm conforme frequência relativa (fr) e velocidade de impacto (vi). ....	41
TABELA 10 Valores de energia cinética ( $\text{J m}^{-2} \text{mm}^{-1}$ ) ao longo do raio de alcance do emissor para diferentes diâmetros de bocais. ....	42

TABELA 11 Valores observados e estimados de energia cinética em função de D50 para emissores com placas côncavas com 36 ranhuras médias. ....	43
TABELA 12 Valores obtidos de escoamento superficial (Es), salpicamento (Sal), redução da condutividade hidráulica do solo saturado ( $RK_0$ ) e água retida no solo à tensão de 10kPa (U), em função dos tratamentos. ....	45
TABELA 13 Resumo da análise de variância para as variáveis escoamento superficial, salpicamento, condutividade hidráulica e retenção de água segundo os tratamentos estudados. ....	45

## RESUMO

VIEIRA, Eduardo Inácio. **Características de chuvas produzidas por pivô central e seus efeitos sobre o solo**. 2009. 59 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.\*

A caracterização de chuvas artificiais produzidas por pivô central e seus efeitos sobre o solo foi realizada no laboratório de irrigação da Universidade Federal de Lavras através da simulação de funcionamento de um pivô central. Foram utilizados emissores super spray produzidos pela Senninger com os bocais de diâmetros de 6,94; 8,33; 9,33 e 10,12 mm e placas defletoras concavas com 36 ranhuras médias. A barra de irrigação foi montada a 4,5m de altura e os pendurais ajustados para altura de 2,70m, com cinco saídas e espaçamento de 2,28 m entre os emissores. O deslocamento do pivô foi simulado através de um dispositivo móvel com controle de velocidade na faixa de 0 – 350 m h<sup>-1</sup>. As unidades experimentais foram constituídas por colunas de PVC com 250 mm de diâmetro preenchidas com amostras de solo, Latossolo Vermelho Amarelo textura franco arenosa, secas ao ar e passadas em peneiras de diâmetro igual a dois milímetros. As chuvas foram caracterizadas em função de taxa de aplicação de água, distribuição de gotas por tamanho e energia cinética. O experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado com três repetições em que os tratamentos constituíam 12 níveis de energia cinética, variando de 175 a 875 J m<sup>-2</sup>. As variáveis analisadas foram: retenção de umidade, escoamento superficial, condutividade hidráulica do solo saturado e salpimento. Utilizou-se o teste F, para verificar a diferença entre os tratamentos e, quando estes foram significativos, utilizou-se a análise de regressão. Para verificar as pressuposições do teste F, foi realizado o teste de Shapiro-wilk para normalidade dos erros e o teste de Barlett para verificar a homogeneidade de variâncias. Os resultados mostraram que o espaçamento de 2,28m entre emissores produziram alta uniformidade de aplicação de água, e o efeito da aplicação de chuva produzida por pivô central sobre escoamento superficial e salpimento alcançou seu nível máximo com valores de energia cinética variando de 350 a 500 J m<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup> mantendo-se o mesmo valor para energia cinética de 613 a 875 J m<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>. A redução da condutividade hidráulica do solo saturado verificada pode ser atribuída principalmente aos primeiros ciclos de umedecimento e secagem da superfície do solo. A retenção de água na tensão de 10 kPa na camada de 5 mm não sofreu alteração devido ao processo de irrigação.

---

\* Comitê orientador: Manoel Alves de Faria (Orientador), Alberto Colombo, Augusto Ramalho de Moraes e Elio Lemos da Silva

## ABSTRACT

VIEIRA, Eduardo Inácio. **Center pivot rain characteristics and its effects over the soil** 2009. 59 p. Thesis (Doctor Program in Agricultural Engineering) – Federal University of Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brazil.\*

The characterization of the artificial rain produced by a center pivot and its effects over the soil was carried out at the Hydraulics Laboratory of the Universidade Federal de Lavras with a center pivot simulator module. Super spray emitters with 6.94; 8.33; 9.33 and 10.12 mm nozzles and concave pads presetting 36 medium grooves were used. The irrigation simulator mainline containing five outlets, in a 2.8m spacing, was mounted at a 4,5m height and drop pipes were used in order to adjust emitter height to a 2.70m value. Center pivot displacement was simulated by means of a self propelled device with a 0 to 350 m h<sup>1</sup>.range of controlled speed. Experimental units were soil columns build with 250mm PVC pipes. Columns were filed with 2,0mm sieved air drayed samples of a Latossolo Vermelho Amarelo Soil presenting a sandy clay loam texture. Center pivot precipitation was characterized in terms of precipitation rate, drop size distribution and kinetic energy. A complete randomized experimental design with 3 replication of 12 treatments, representing kinetic energy varying from 175 up to 875 J m<sup>-2</sup>, was used. Evaluated soil properties were: soil-water retention, runoff, saturated hydraulic conductivity, and splash. The F Test was used in order to identify differences among treatments and linear regression was applied to values showing significant differences. In order to verify F test presuppositions, both tests Shapiro-Wilk, for error normality, and Barlett, for variance homogeneity, were held. The results showed that the 2.28m spacing among emitters produced high water application uniformity, and the effect of the application of the rain produced by the center pivot precipitation over the runoff and splash reached its maximum with kinetic values varying from 350 to 500 J m<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup> keeping the same values for kinetic values from 613 to 875 J m<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup>. The verified hydraulic conductivity reduction of saturated soil can be attributed mainly to the first cycles of soil surface wetting and drying. The retention of water at 10 kPa tension in the 5mm soil layer did not suffered any alteration due to the irrigation process.

---

\* Guidance committee: Manoel Alves de Faria (Adviser), Alberto Colombo, Augusto Ramalho de Moraes and Elio Lemos da Silva.

## 1 INTRODUÇÃO

O sistema de irrigação pivô central é utilizado em aproximadamente vinte por cento das áreas irrigadas no Brasil, para diferentes situações de solos e culturas. A ocorrência do escoamento superficial é uma das limitações do uso deste sistema de irrigação. Esta limitação se deve ao aumento das taxas de aplicação de água que ocorrem na medida em que se desloca do ponto pivô para a extremidade da linha de irrigação o que é limitante para solos com baixas taxa de infiltração e de armazenamento superficial de água. Existem várias maneiras para prevenir o escoamento superficial, uma delas é a utilização de pivô central com capacidade para irrigar áreas menores.

Em visita a áreas irrigadas na cultura de batata na região de Ibicoara/Mucugê no estado da Bahia verificou-se a ocorrência de escoamento superficial em solos inicialmente com alta taxa de infiltração, Latossolo Vermelho Amarelo textura média, em pivôs com capacidade para irrigar áreas de 25 a 100 hectares. Isto levou a inferir que o escoamento superficial verificado nestas áreas pode ser devido às características do equipamento ou fatores relacionados com o manejo da área irrigada. Dessa forma, objetivou-se com este trabalho avaliar as características das precipitações produzidas por um sistema de irrigação pivô central e seus efeitos sobre o solo através da simulação, em laboratório, das condições de funcionamento de um sistema de irrigação pivô central com as mesmas características de um pivô em operação nesta referida área, visando entender a causa de tal escoamento em um solo que, aparentemente, não deveria ocorrer.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Agricultura irrigada no Brasil**

A água é um dos insumos básicos na agricultura irrigada e este recurso natural passou a ter valor econômico e medidas restritivas ao seu uso e estas são crescentes ao longo do tempo devido aos impactos ambientais e conflitos gerados pela demanda para atender aos usos múltiplos.

O uso de água pela agricultura irrigada é da ordem de 70% e a eficiência média de sua utilização obtida pelos sistemas de irrigação é de 64%. As razões desta baixa eficiência são atribuídas principalmente às perdas por condução e distribuição do volume de água captado. Apesar das novas tecnologias, modernos equipamentos e técnicos especializados, o Brasil tem avançado lentamente nas questões do manejo da irrigação e do uso racional da água (Brasil, 2006).

A agricultura irrigada no Brasil teve início em 1903 na cultura de arroz no Rio Grande do Sul, posteriormente em São Paulo, em café irrigado por aspersão, e na região nordeste nas décadas de 60 e 70. A partir de 1996, o crescimento observado é atribuído à expansão da irrigação privada, utilizando principalmente métodos pressurizados para produção de frutas, grãos e café (Bahia, São Paulo e Minas Gerais); frutas (Pernambuco, Ceará e Rio Grande do Norte) grãos (Goiás, Mato Grosso e Tocantins (Brasil, 2008).

Os projetos públicos de irrigação existentes foram implantados sem que a questão do mercado fosse determinante na avaliação da sua viabilidade. A experiência da maioria dos perímetros públicos implantados no Brasil mostrou que produzir não é o fator mais difícil a ser vencido. Na tentativa de melhorar o desempenho destes projetos de irrigação e diminuir o aporte de recursos governamentais na fase produtiva, desde o final de 2004, vem se intensificando esforços para acelerar o processo de transferência da gestão aos usuários,

basicamente, o fornecimento de água e a manutenção das estruturas (Brasil, 2008).

O panorama passado ou atual da agricultura irrigada pública e principalmente a privada é difícil devido à inexistência de dados confiáveis. Usualmente os dados sobre a área irrigada, são produzidos por Christofidis, que é uma das poucas, senão a única, fonte de informação disponível (Brasil, 2008).

A superfície irrigada no Brasil, na safra 2003/2004 é estimada em 3,44 milhões de hectares equivalente a 5,89 % da área total plantada. A relação área plantada e área irrigada por regiões é a seguinte: Norte 3,89, Nordeste 6,12, Sudeste 8,41, Sul 6,77 e Centro-Oeste 2,46. Os estados com maior área irrigada expressos em hectares são: Rio Grande do Sul (1.086.000), São Paulo (499.800), Minas Gerais (350.200), Bahia (292.330) e Goiás (197.700) (Christofidis, 2008).

No Brasil a dotação média de água derivada dos mananciais é de 11.430 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, sendo este indicador superior ao verificado em nível mundial que é de 10.108 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Esta diferença pode ser atribuída ao fato de grande parte da área irrigada no Brasil, cerca de 40 %, ser dedicada ao cultivo de arroz, nas regiões Sul, Norte e Centro-Oeste, e esta cultura apresentar necessidade hídrica maior. Outro fator é decorrente da possibilidade de haver mais de uma colheita anual, o que elevaria a área total de colheita de produtos irrigados. Desta maneira é possível que a água derivada anualmente para irrigar cada hectare seja da ordem de 9.500 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Christofidis, 2008).

Os dados referentes à distribuição percentual de áreas irrigadas por método de irrigação e por regiões estão apresentados na Tabela 1.

A agricultura irrigada, em 1998, produziu 16% da safra de alimentos e 35 % do valor da produção. Cada hectare irrigado equivale a três hectares de sequeiro em produtividade física e a sete hectares em produtividade econômica (Brasil, 2004).

TABELA 1 Distribuição percentual de áreas irrigadas por regiões e por métodos de irrigação.

Regiões	Superfície	Aspersão		Localizada
		Convencional	Pivô central	
Norte	2,60	0,19	0,04	0,05
Nordeste	6,06	7,70	3,87	4,39
Sudeste	6,92	7,81	11,51	2,65
Sul	34,79	2,61	0,02	0,60
Centro-Oeste	1,52	1,24	5,24	0,20
Brasil	51,89	19,55	20,68	7,89

Fonte. Christofidis (2008)

## 2.2 Irrigação por pivô central

A irrigação por aspersão pode ser definida como qualquer sistema de irrigação que distribui água em forma de gotas discretas no ar (Kincaid, 1996).

Pivô central é um sistema de irrigação por aspersão definido por Colombo (2003) como um sistema de movimentação mecânica, constituído por uma lateral móvel, com vários emissores, suspensos por torres sobre rodas, que irriga uma área circular através da rotação da linha lateral de aspersão em torno de um ponto fixo ou ponto pivô.

Devido às características da área a ser irrigada pelo pivô central, forma circular, para que toda a parcela seja irrigada durante um determinado período de tempo, as diferentes torres terão que se deslocarem a diferentes velocidades em função da sua distância ao ponto pivô. Assim, para que cada ponto do terreno receba água durante menos tempo, e para se conseguir aplicar a mesma quantidade de água em todo a área irrigada, a intensidade de aplicação terá que aumentar ao longo da linha lateral. Para manter a mesma lâmina de aplicação de água, existem duas maneiras: aumentar a taxa de aplicação com o aumento do diâmetro dos bocais dos emissores, mantendo o mesmo espaçamento entre os emissores, ou manter o mesmo bocal e reduzir o espaçamento entre estes. A primeira situação é a mais comum.

Os emissores e placas defletoras são os componentes do pivô central que estão sujeitos as maiores modificações. Estes são produzidos com características de aplicação de água com alta uniformidade e tamanho de gotas controladas, largura do padrão molhado médio e pressão de serviço baixa (Tarjuelo, 2005).

Colombo (2003) define largura do padrão molhado como a largura, medida perpendicularmente à linha lateral do pivô, da faixa que é irrigada simultaneamente pelo pivô

Os emissores fixos podem ser utilizados com uma ampla variedade de placas defletoras que podem ser substituídas rapidamente em função do tipo de cultura a ser irrigada e também das exigências de clima e solo. A forma das placas defletoras (plana, côncava ou convexa) controla a trajetória do jato (spray), enquanto que o tipo de superfície (lisa, ranhuras médias ou ranhuras grossas), controla o tamanho das gotas.

A expansão deste sistema de irrigação tem sido atribuída às suas características que promovem boa uniformidade de aplicação de água, fácil controle da lâmina de água aplicada, grande versatilidade para diversas condições topográficas, tipos de explorações agrícolas e de solos, possibilidade de quimigação, baixa demanda por mão de obra, facilidade de manejo da área irrigada e transporte (Bernardo et al, 2005).

Segundo Christofidis (2008) o crescimento das áreas irrigadas por superfície tem mantido baixo. O aumento de uso de métodos de irrigação mais eficientes, irrigação por aspersão e localizada, possibilitará a incorporação de tecnologias poupadoras de água e poderá nos próximos vinte anos chegar a consumir valores próximos a 8.500 m<sup>3</sup> de água por hectare irrigado anualmente.

O principal problema associado à irrigação com pivô central continua a ser a possibilidade de escoamento superficial devido às altas taxas de aplicação de água inerente a este sistema (Kincaid, 2005).

O conhecimento das respostas do solo à taxa de aplicação de água e ao impacto das gotas sobre a superfície deste permite melhorar o manejo de áreas irrigadas.

### **2.2.1 Intensidade de aplicação de água**

A intensidade, ( $\text{mm h}^{-1}$ ), de aplicação de água está relacionada com a infiltrabilidade do solo e com a sua capacidade de armazenamento superficial. Quando a intensidade de aplicação de água é superior a infiltrabilidade e a capacidade de armazenamento superficial do solo ocorre o escoamento superficial.

A intensidade de aplicação de água pode ser descrita em termos de intensidade de aplicação média e intensidade de aplicação máxima.

Para fins de projeto, usualmente é suficiente utilizar valores de intensidade de aplicação média, mas em condições de solos com baixa infiltrabilidade e capacidade de armazenamento de água na superfície do solo baixas, a intensidade de aplicação máxima deve ser considerada (Kincaid, 2005).

A variação espacial da intensidade de aplicação de água é devido ao movimento circular da lateral do pivô e às variações de alcance e vazão dos emissores instalados ao longo da lateral móvel (Colombo, 2003).

Segundo Rodrigues et al (2003), a maior dificuldade no dimensionamento de um pivô central é estimar corretamente a intensidade máxima de aplicação de água.

A intensidade de aplicação média, intensidade de aplicação máxima, largura do padrão molhado, distribuição de gotas por tamanho e energia de impacto das gotas tem levado a indústria a produzir diferentes tipos de emissores e placas defletoras visando adequar a aplicação de água para diferentes tipos de culturas e condições de clima e solos (Kincaid, 2005).

A intensidade de aplicação de água em cada ponto da área irrigada é determinada pelo tamanho dos bocais, tipos de placas defletoras, pressão da água, espaçamento entre os emissores, a distância do ponto pivô, e tipo de emissor utilizado (Tarjuelo, 2005).

### **2.2.2 Distribuição de gotas por tamanho**

As chuvas são compostas por diferentes tamanhos de gotas as quais possuem diferentes velocidades de impacto sobre a superfície do solo.

O sistema de irrigação pivô central distribui água em forma de chuvas, e esta pode ter a mesma intensidade, mas tamanhos de gotas diferentes. O padrão de distribuição de tamanho de gotas possibilita determinar a energia cinética para cada tipo de chuva. O tamanho de gotas varia de 0,5 a 5 mm (Keller & Bliesner, 1990) e segundo Laws & Parsons (1943), o limite superior para tamanho de gotas de chuvas naturais varia de seis a oito mm.

Os tipos de emissores mais utilizados atualmente em sistema de irrigação pivô central são os estáticos e o tamanho de gotas produzidas por esses emissores é mais influenciado pelo diâmetro dos bocais (Kincaid, 1996).

Laws & Parsons (1943) são considerados como referência no estágio inicial do conhecimento atual sobre medida de tamanho de gotas. Existem vários métodos para determinar a distribuição de gotas por tamanho. O grande desenvolvimento em fotografias digitais tem orientado a pesquisa em direção a um método fotográfico o qual possa ser usado para obter dados adequados para análise de sistemas de irrigação (Salvador et al., 2009).

Kohl (1974) observou que para aspersores de tamanho médio o tamanho da gota diminui com o aumento da velocidade relativa da água no ar, com a redução dos bocais e com o aumento da pressão.

Kohl & De Boer (1984) determinaram a distribuição de gotas de um aspersor de baixa pressão do tipo spray e observaram que as gotas menores, por

apresentarem maiores coeficientes de arraste, caíram a distâncias mais próximas ao aspersor e que a distribuição de gotas por tamanho mostrou-se mais sensível ao diâmetro do bocal e a geometria da placa defletora. Coeficiente de arraste expressa a ação do atrito da gota com o ar.

Carvalho (1991) determinou a distribuição do tamanho de gotas para dois aspersores de média pressão e concluiu que o diâmetro do bocal e a pressão de serviço exerceram influência no tamanho das gotas, sendo a pressão o fator que maior efeito apresentou, seguida do diâmetro do bocal.

Montero et al. (2003), estudando a distribuição de gotas, constataram que a qualquer distância do aspersor caem gotas de diferentes tamanhos, mas quanto maior a distância do emissor maior é o diâmetro das gotas.

A determinação da distribuição de gotas por tamanho permite calcular a energia cinética produzida para diferentes padrões de aplicação de água e estimar as perdas de água por evaporação e pelo vento e seus efeitos sobre a superfície dos solos. As gotas menores estão mais sujeitas as perdas por evaporação e pelo vento enquanto que as gotas maiores possuem maior energia de impacto sobre a superfície do solo (Kincaid, 1996).

O melhor parâmetro para caracterizar distribuição de gotas por tamanho é o D50, definido como o valor no qual a metade da amostra (em volume) é composta por gotas maiores e a outra metade por gotas menores (Brandt, 1990).

O tamanho das gotas está relacionado com velocidade de impacto e dessa maneira com a energia cinética (Laws, 1941).

### **2.2.3 Energia cinética**

A energia cinética produzida pelas chuvas representa a energia capaz de promover a desagregação e transporte de partículas do solo, sendo sugerida como um indicador da habilidade das chuvas em causar erosão.

Poucos trabalhos têm sido realizados para avaliar a resposta do solo à energia cinética produzida por emissores utilizados em pivô central (Lehrsch & Kincaid, 2006).

A energia cinética de chuvas naturais com baixas intensidades tem sido relacionada com a intensidade de precipitação, mas existe uma tendência de estabilidade destes valores em 25 a 29 J m<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup> quando a intensidade de precipitação excede a 40 mm h<sup>-1</sup> (Kinnell, 1987).

Amorim (2000) obteve o valor de 27 J m<sup>-2</sup> mm<sup>-1</sup> para chuvas produzidas por simulador.

As pesquisas sobre erosão do solo através de chuvas simuladas estão relacionadas aos valores de energia cinética obtidos por simuladores de chuvas que produzem energia cinética com valores muito superiores aos produzidos por pivô central. Geralmente, chuvas com energia cinética da ordem de 500 J m<sup>-2</sup> são aplicados. Os valores elevados de energia cinética utilizados nestas pesquisas dificultam a comparação com os resultados obtidos para pivô central. A intensidade de aplicação de água em sistemas de irrigação pivô central não pode ser comparada com chuvas naturais de mesma intensidade devido aos diferentes padrões de distribuição de gotas.

A equação de Stillmunkes & James (1982) para estimar a energia cinética por área é dada pela equação;

$$\frac{EC}{a} = \frac{\rho l v^3}{2} \quad (1)$$

Onde

EC/a - energia cinética por unidade de área (J m<sup>-2</sup>)

ρ - densidade da água

l - lâmina de água aplicada (mm)

v - velocidade da gota (m s<sup>-1</sup>)

A energia cinética, por unidade de massa, de uma gota de água sobre a superfície do solo depende da sua velocidade de impacto e pode ser determinada por:

$$ECg = \frac{Vig^2}{2} \quad (2)$$

Onde

$ECg$  - energia cinética por unidade de massa ( $J\ kg^{-1}$ );

$Vig$  - velocidade de impacto da gota de água no solo ( $m\ s^{-1}$ ).

A energia cinética total por unidade de massa de um determinado padrão de distribuição, em função das velocidades de impacto das gotas de diferentes tamanhos pode ser determinada por;

$$ECt = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n frVi^2 \quad (3)$$

Onde

$ECt$  - energia cinética total por unidade de massa ( $J\ kg^{-1}$ )

$fr$  - frequência relativa de gotas com diâmetro correspondente ao intervalo  $i$ ;

$Vi$  - velocidade de impacto das gotas de água no solo ( $m\ s^{-1}$ )

$n$  - número total de intervalos de diâmetro de gotas

A energia cinética para cada evento de irrigação, em  $J\ m^{-2}$ , é determinado pelo produto da energia cinética total em  $J\ kg^{-1}$  e a lâmina de irrigação aplicada (mm). Considera-se que um kg de água seja igual a um  $mm\ m^{-2}$ .

Segundo Li & Kawano (1995), a velocidade de impacto das gotas de água no solo é calculada resolvendo as equações (4) e (5) determinadas com base na teoria da balística aplicada a uma gota de água:

$$\frac{dx}{dt} = -3/4(\rho_a/\rho_w) * (C_d/d) * V * V_x \quad (4)$$

$$\frac{dz}{dt} = -3/4(\rho_a/\rho_w) * (C_d/d) * V * V_z - g \quad (5)$$

Onde

x - componente de posição na direção horizontal (m);

z - componente de posição na direção vertical (m);

t - tempo (s)

$V_x = dx/dt$  - componente horizontal de velocidade V (m s<sup>-1</sup>)

$V_z = dz/dt$  - componente vertical de velocidade V (m s<sup>-1</sup>)

$\rho_a$  - densidade do ar

$\rho_w$  - densidade da água

$C_d$  - coeficiente de arraste

d - diâmetro da gota (m)

g - aceleração da gravidade (m s<sup>-1</sup>)

As equações (4) e (5) foram resolvidas usando a técnica numérica de quarta ordem de Runge – Kutta. O coeficiente de arraste foi o mesmo utilizado por Vilela (1995).

A frequência relativa é obtida pelos dados de distribuição de gotas por tamanho, transformando-se os dados de diâmetro de gotas em volume de gotas para cada chuva específica.

Segundo Dijk et al. (2002) a velocidade terminal para gotas de água de diâmetro variando de 0,1 a 7 mm pode ser estimada pela equação apresentada a seguir:

$$V_t = 0,0561D^3 - 0,92D^2 + 5,03D - 0,254 \quad (6)$$

Onde

D - diâmetro da gota (mm)

V<sub>t</sub> - velocidade terminal (m s<sup>-1</sup>)

A velocidade terminal de uma gota é definida como a velocidade final alcançada por uma gota com movimento livre no ar (Seginer, 1965).

A velocidade de impacto aumenta com o aumento do tamanho das gotas (Gunn & Kinzer, 1949; De Ploey & Gabriels, 1980) e como consequência a energia cinética das gotas aumenta rapidamente com o tamanho das gotas (Laws & Parsons, 1943).

A velocidade de impacto das gotas pode ser determinada por técnicas fotográficas (Laws, 1941) e por espectrômetro óptico (Tossel et al., 1990). A estimativa da velocidade pode ser feita pela utilização da equação do movimento descrita por Stillmunkes & James (1982) e Li & Kawano (1995).

A energia cinética por área aumenta com o aumento do diâmetro de gotas, mas alcança um nível onde a energia cinética por área é praticamente constante com o aumento do tamanho das gotas (Kohl et al., 1985). Este fato é explicado pela pequena diferença na velocidade das gotas quando estas ultrapassam o tamanho de dois a três milímetros. Segundo Stillmunkes & James (1982), a energia cinética por unidade de área apresenta pequenas variações quando as gotas são maiores que três milímetros.

A energia cinética por unidade de área é proporcional ao diâmetro de gotas, enquanto que o coeficiente de arraste, como apresentado por Seginer (1965), é inversamente proporcional ao diâmetro de gotas.

## **2.3 Efeitos de chuvas sobre o solo**

### **2.3.1 Salpicamento**

O salpicamento é o resultado da ação do impacto das gotas de chuvas sobre a superfície do solo. É um dos agentes erosivos mais importantes para o desprendimento de partículas deste (Morgan, 1977).

Erosão do solo é usualmente conceituada como uma interação entre a erosividade das chuvas, a qual se refere à capacidade da mesma e do escoamento superficial em desagregar e transportar partículas do solo e da erodibilidade, a qual representa a facilidade do solo em liberar as partículas (Darboux & Le Bissonnais, 2007).

A umidade inicial do solo tem grande influência na desagregação e transporte de partículas do solo. As diferenças entre as condições de umidade inicial dependem das propriedades do solo e estas diferenças podem ser tão importantes como as diferenças entre solos. Este comportamento é devido ao mecanismo de quebra dos agregados, isto é, a expulsão do ar em solos secos e a quebra mecânica em solos úmidos. Este mecanismo produz diferentes tamanhos de partículas os quais afetam a dinâmica de formação do selamento e do escoamento superficial (Le Bissonnais et al., 1995).

Segundo Meyer & Harmon, (1984) a desagregação e transporte de materiais do solo pelos agentes erosivos podem ser subdivididos em sub processos, os quais podem ocorrer de forma simultânea.

- i) desagregação do solo pelo impacto direto das gotas de chuva;
- ii) transporte do solo pelo efeito do salpico;

- iii) desagregação do solo pela ação do escoamento superficial e
- iv) transporte do solo pela ação do escoamento superficial

A energia de impacto das gotas de água é responsável pela desagregação da maioria do material que será transportado pelo escoamento superficial. (Bradford & Huang, 1991).

Segundo Gerits et al. (1990) o impacto das gotas de água sobre a superfície do solo é afetado pela altura da lâmina de escoamento, declividade, comprimento da pendente e velocidade de impacto destas.

A energia de impacto das gotas de água produzidas por emissores sobre a superfície do solo, sem cobertura, pode causar aumento da densidade, alterar a distribuição dos tamanhos de poros e reduzir a estabilidade ou promover a quebra dos agregados (Truman et al., 1990). A quebra dos agregados facilita o transporte das frações primárias do solo (areia, silte e argila). A fração argila proveniente da quebra dos agregados pode tornar-se dispersa e ser transportada junto com as outras partículas primárias e os fragmentos menores dos agregados pela água de infiltração para dentro dos espaços porosos existentes na superfície do solo podendo provocar a obstrução destes e formar o selamento superficial (Le Bissonnais et al., 1989).

O selamento reduz a infiltração resultando em aumento do escoamento superficial e erosão do solo (Le Bissonnais & Singer, 1992). Os autores verificaram um decréscimo de sedimentos no escoamento com sucessivos eventos de chuvas embora a taxa de escoamento mantivesse a mesma. Esta redução foi atribuída à menor quantidade de material salpicado devido à formação de selamento superficial no solo.

Dados obtidos em laboratório indicam que a percentagem de volume de poros na camada onde ocorre o selamento superficial decresce com o aumento do impacto da energia cinética (Ragab & Cooper, 1993).

### **2.3.2 Escoamento superficial**

Escoamento superficial corresponde ao segmento do ciclo hidrológico relacionado ao deslocamento das águas sobre a superfície do solo (Pruski et al., 2004)

A infiltração de água no solo é definida como o processo pelo qual a água entra no solo através de sua superfície (Libardi, 2005). Portanto os fatores que interferem na infiltração de água no solo possuem grande influência no escoamento superficial.

O escoamento inicia-se quando a intensidade de chuva é superior à taxa de infiltração instantânea e a água excedente é superior a quantidade retida superficialmente (Wischmeier & Smith, 1958).

Uma das causas da ocorrência de escoamento superficial em áreas irrigadas por aspersão é a redução da taxa de infiltração de água no solo devido à ocorrência do selamento superficial formado pelo impacto das gotas de chuva. Selamento ou encrostamento superficial ocorre quando as partículas do solo são rearranjadas e consolidadas em uma estrutura superficial coesa, cuja espessura pode variar de 0,1 mm até valores superiores a cinco mm (Valentin & Bresson, 1992).

A susceptibilidade do solo à formação do selamento superficial está relacionada com as suas características físicas, químicas e biológicas. Segundo Lutz (1952) o selamento pode formar em solos de diferentes classes texturais exceto nos de classe arenosa, onde a percentagem de silte e argila são extremamente baixas. Os solos com elevados teores de silte estão mais sujeitos a formação do selamento (Tackett & Pearson, 1965) ou os que apresentam baixa estabilidade de agregados (Bradford & Huang, 1991; Fox & Le Bissonnais, 1998). O selamento superficial é fortemente dependente da mineralogia e estrutura do solo (Mermut et al., 1995).

O impacto das gotas de chuva sobre uma fina camada de água provoca turbulência no escoamento superficial, aumentando a capacidade do fluxo em desagregar e transportar partículas de solo. O aumento da espessura do fluxo, a partir de três mm e até três vezes o diâmetro da gota, causa o amortecimento da energia de impacto das gotas, diminuindo a desagregação do solo (Kinnell, 1988).

Existem diferentes mecanismos envolvidos no selamento superficial, incluindo o entupimento de poros devido ao transporte de partículas finas que preenchem os espaços porosos; deposição e reorientação de partículas finas; compactação e posterior consolidação com os ciclos de umedecimento e secagem (West et al., 1992).

Stillmukes & James (1982) fizeram um sumário da literatura mostrando que o selamento está relacionado com a quantidade de energia cinética por área de impacto e a acumulação desta energia com o tempo.

O grau de resistência ou vulnerabilidade do solo a ação de forças externas, por exemplo, o impacto da gota de chuva, é definido pela estabilidade dos agregados. A estabilidade de agregados é determinada por agentes cimentantes, que são basicamente representados pela matéria orgânica e pelos óxidos de Fe e Al. Os óxidos de Fe (hematita e goethita) e Al (gibbsita) são os minerais secundários de maior importância na agregação de solos como os Latossolos. A presença destes compostos nos Latossolos aumenta a possibilidade destes apresentarem uma estrutura mais estável (Ferreira et al., 1999).

Reichert et al. (1992) constataram que solos argilosos ricos em caulinita possuem maior resistência à desagregação pelo impacto das gotas de chuva e menor encrostamento, mantendo as taxas de infiltração mais elevadas quando comparadas com solos esmectíticos (com menor grau de intemperismo).

Bernuth & Gilley (1985), citando diversos trabalhos, concluíram que a porcentagem de redução da infiltração da água no solo é dependente do diâmetro das gotas, da velocidade de impacto das gotas com a superfície do solo e das características do solo.

### **2.3.3 Condutividade hidráulica do solo saturado**

A condutividade hidráulica representa a propriedade que expressa a facilidade com que um fluido é transportado através de um meio poroso (Libardi, 2005). Para um dado solo, a condutividade hidráulica é tanto maior quanto maior for sua umidade, atingindo seu valor máximo quando o solo está saturado, denominando-se condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ).

A condutividade hidráulica do solo saturado é considerada um dos parâmetros mais importantes no manejo da água no solo, sendo largamente aplicada em projetos de irrigação e drenagem (Klute, 1965).

Bouma (1991) detalha os possíveis efeitos e interferências das características dos solos no movimento de água e solutos, principalmente da porosidade, discutindo a influência da continuidade dos poros no solo. O autor afirma que poros menores, porém contínuos, permitem maior fluxo de água e de solutos do que poros maiores descontínuos no perfil do solo.

A condutividade hidráulica, a infiltração, a redistribuição rápida da água e a aeração ocorrem principalmente através dos poros de maior diâmetro, nos quais o efeito da força da gravidade é o componente principal que rege o movimento da água (Baver et al., 1972).

Fohrer et al. (1999) mostraram que ciclos de umedecimento e secagem influenciam o processo de formação do selamento superficial e este processo interfere nas propriedades hidráulicas dos solos.

Mapa et al. (1986) verificaram que a redução da condutividade hidráulica foi maior após o primeiro ciclo de umedecimento e secagem. Este efeito foi atribuído à redução dos macroporos.

A condutividade hidráulica, a qual é uma função direta da espessura do selamento é um bom parâmetro para quantificar a intensidade do selamento (Bedaiwy, 2008)

#### **2.3.4 Retenção de água**

Segundo Libardi (2005) a retenção da água no solo pode ser explicada por dois processos: capilaridade e adsorção. Essas duas forças, que operam na matriz do solo para a retenção da água, são denominadas de forças mátricas. A capilaridade atua na retenção de água dos solos na faixa úmida, quando os poros se apresentam razoavelmente cheios de água. Quando o solo seca, os poros vão se esvaziando e filmes de água recobrem as partículas sólidas. Nessas condições, o fenômeno de adsorção passa a dominar a retenção (Baver et al., 1972). A energia de retenção da água na adsorção é muito maior e, por isso, grandes quantidades de energia são requeridas para se retirar essa água do solo (Reichardt, 1987).

Para altos valores de umidade (baixas tensões), a curva de retenção está relacionada ao tamanho, distribuição e forma dos poros, que, por sua vez, são influenciados pela estrutura (Reichardt, 1987).

Mapa et al. (1986) encontraram na camada de 0 – 0,08 m decréscimo na retenção de água em potenciais maiores que -30 kPa, devido aos ciclos de umedecimento e secagem, enquanto que Karunatilake & Van Es (2002) observaram diferenças não consistentes na retenção de água após aplicação de chuvas artificiais.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no laboratório de irrigação do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, no município de Lavras, MG.

Após a caracterização das chuvas produzidas pelos diferentes bocais, aplicou-se os seguintes tratamentos de energia cinética por unidade de área sobre o solo. T1=175 J m<sup>-2</sup>; T2 = 192 J m<sup>-2</sup>; T3 =223 J m<sup>-2</sup>; T4 = 250 J m<sup>-2</sup>; T5 = 350 J m<sup>-2</sup>; T6 = 384 J m<sup>-2</sup>; T7 = 446 J m<sup>-2</sup>; T8 = 500; J m<sup>-2</sup>; T9 = 613 J m<sup>-2</sup>; T10 = 673 J m<sup>-2</sup>; T11 =780 J m<sup>-2</sup> e T12 = 875 J m<sup>-2</sup>.

As características avaliadas foram escoamento superficial, salpicamento, condutividade hidráulica do solo saturado e retenção de água a 10 kPa.

#### 3.1 Caracterização das chuvas

##### 3.1.1 Simulação

As chuvas produzidas pelo pivô central foram simuladas através da instalação de uma barra de irrigação fixada a uma altura de 4,50 m com cinco saídas para água com espaçamento de 2,28 m e através de pendurais foram instalados os emissores a uma altura de 2,70 m em relação ao piso do laboratório e posteriormente ajustados à superfície das unidades experimentais, conforme Figura 1.

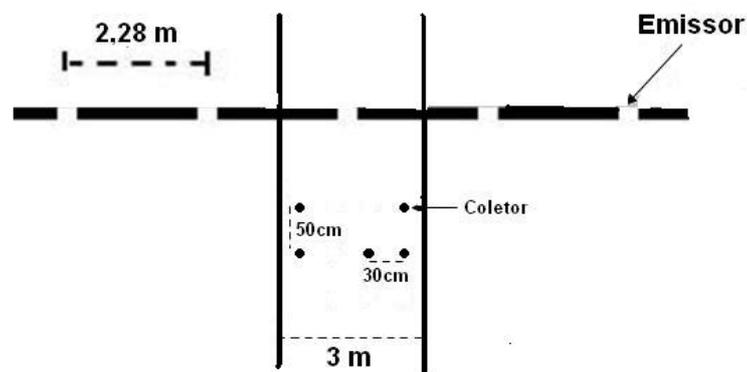


FIGURA 1 Barra de irrigação e malha para caracterização da intensidade de aplicação de água.

Utilizou-se para cada ensaio cinco emissores com o mesmo diâmetro de bocal. Foram utilizados emissores super spray produzidos pela Senninger de números 17,5; 21,0; 23,5 e 25,5 correspondendo respectivamente aos bocais de diâmetros 6,94; 8,33; 9,33 e 10,12 mm. As vazões destes emissores sob pressão de 69 kPa foram respectivamente de 1,604; 2,291; 2,808; 3,261 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>

Utilizaram-se placas defletoras, côncavas (CC), estriadas com 36 ranhuras de média profundidade (MG- médium groove) de cor azul.

A pressão foi controlada por válvulas reguladoras de pressão de 10psi, médio fluxo (4-16 GPM) e monitoradas com manômetro de mercúrio para controle da pressão de saída da água, medindo-a após passagem pela válvula e antes que a mesma entrasse em contato com a placa defletora.

A escolha dos emissores, placas defletoras e válvulas reguladoras de pressão foi em função de um sistema de irrigação com pivô central em funcionamento na região de Ibicoara no estado da Bahia. Dividiu-se o comprimento da linha de irrigação do pivô em quatro, correspondendo cada uma a 25% da área total irrigada que é de 100 hectares. As distâncias simuladas do ponto de instalação dos emissores em relação ao ponto pivô foram de 280,6;

400,0; 486,9 e 557,8 m, correspondendo ao final das áreas irrigadas de 25; 50; 75 e 100 hectares.

### **3.1.2 Distribuição das precipitações**

A distribuição das precipitações foi determinada, ao longo do diâmetro de alcance do emissor, (perpendicular a linha de irrigação), e em uma faixa de três metros de largura, cujo comprimento coincide com o diâmetro de alcance dos emissores, com coletores dispostos em malha de 0,50 por 0,30 m.

Utilizou-se coletores de diâmetro de coleta igual a 0,08 m e altura de 0,08 m, dispostos 0,30 m acima da superfície do solo. Adotou-se o tempo de 20 minutos para cada ensaio, e estes foram realizados com três repetições.

### **3.1.3 Distribuição de gotas por tamanho**

A distribuição de gotas por tamanho foi avaliada no centro da faixa cuja largura tinha três metros a qual foi usada para avaliar a distribuição das precipitações.

As gotas foram coletadas em bandejas com 0,26 m de largura e 0,04 m de profundidade.

A distribuição do tamanho de gotas foi determinada pelo método da farinha conforme usado por Oliveira (1991). Os grânulos obtidos foram separados em classes de tamanhos, utilizando-se um conjunto de oito peneiras com abertura de 2, 800; 2, 000; 1,700; 1,180; 1,000; 0,850; 0,600 e 0,425 mm o que correspondeu aos diâmetros de gotas de 3,53; 2,40; 1,76; 1,22; 0,94; 0,85; 0,64 e 0,46 mm obtidos conforme equação 7. A massa média dos grânulos para cada peneira foi obtido pela relação entre o peso total e o número de grânulos retidos em cada peneira.

O diâmetro médio de gota correspondente foi determinado utilizando-se a curva de calibração, obtida por Vilela (1995) usando o mesmo intervalo de diâmetros de gotas determinados neste trabalho.

$$D = 1,087486P^{0,364412} \quad (7)$$

Onde

D – diâmetro médio da gota de água (mm)

P - massa média do grânulo (mg)

### **3.1.4 Determinação da energia cinética das precipitações**

A energia cinética por área para as diferentes chuvas foi determinada pela equação (3).

A frequência relativa foi obtida após transformação de diâmetro de gotas em volume.

A estimativa da velocidade de impacto para cada tamanho de gota foi realizada com a utilização de planilha do programa Excel baseada em Li & Kawano (1995). Os valores de coeficiente de arraste foram estimados conforme Vilela (1995).

## **3.2 Efeitos das chuvas sobre o solo**

### **3.2.1 Simulação do pivô central**

O movimento do pivô central foi simulado através de um dispositivo móvel lateral com controle de velocidade de deslocamento “DMLC” construído para este fim.

O referido “DMLC” foi construído com estrutura de ferro, recoberto com chapas galvanizadas com deslocamento sobre trilhos fixados no centro da área do laboratório. Utilizou-se um motor elétrico instalado na parte interna

inferior do “DMLC” com controle de velocidade na faixa de 0 a 350 m h<sup>-1</sup> obtido pela utilização de um inversor de frequência. A visão geral do DMLC e do controle de frequência encontra-se na Figura 2.



FIGURA 2 Dispositivo com movimento lateral controlado DMLC.

### 3.2.2 Unidades experimentais

As unidades experimentais, conforme Brandão (2003) foram construídas com tubos de PVC de 250 mm de diâmetro e 250 mm de altura. Os fundos das colunas, distantes 20 mm da extremidade foram fechados com placas de PVC, onde foram feitos orifícios com 10 mm de diâmetro para permitir a livre drenagem da água.

As unidades experimentais foram preenchidas com uma camada de 20 mm de areia seguida por uma camada de 180 mm de terra fina seca ao ar, (TFSA), ambos secas ao ar e peneiradas em peneira com malha de dois

milímetros. O preenchimento das unidades experimentais com TFSA foi realizado pela adição sucessiva de camadas de espessura igual a cinco cm acomodadas de maneira a obter a densidade do solo de  $1,32 \text{ g cm}^{-3}$  correspondente a densidade da camada de solo no campo antes da coleta. As paredes das unidades experimentais foram recobertas com uma pasta de argila umedecida com água para permitir uma melhor adesão das partículas de solo às paredes de PVC das unidades experimentais visando reduzir o fluxo preferencial de água.

As colunas possuíam na parte superior uma abertura retangular de 20 mm de altura e 80 mm de comprimento para possibilitar a saída do escoamento superficial.

Foram montadas nove unidades experimentais para cada diâmetro de bocal, totalizando 36 unidades experimentais. Estas unidades eram descartadas após cada avaliação. O aspecto de uma unidade experimental após receber irrigações é apresentado na Figura 3.



FIGURA 3 Unidade experimental após receber irrigações.

Desta maneira, após as avaliações referentes a segunda irrigação foram descartadas 12 unidades experimentais, ocorrendo o mesmo após a quarta irrigação.

### **3.2.3 Solo**

A classe de solo utilizada foi classificada como Latossolo Vermelho Amarelo textura franco arenosa (Embrapa, 1999). As amostras foram coletadas na camada de 0 –0, 20 m, em área sob vegetação de mata, no município de Itumirim-MG. A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta (Embrapa, 1997), usando como dispersante químico o hidróxido de sódio 1M (NaOH -1mol L<sup>-1</sup>). Os resultados obtidos da análise granulométrica expressos em porcentagem foram: areia grossa (2-0,2 mm) 22, areia fina (0,2-0,05 mm) 47, silte (0,05-0,002 mm) 10 e argila (< 0,002 mm) 21.

A umidade na capacidade de campo foi determinada utilizando-se o método da dessorção de água, utilizando-se amostras de terra fina seca ao ar. As amostras foram submetidas à tensão de 10kPa em câmaras de pressão (Richards & Fireman, 1943). Considerou-se como capacidade de campo a umidade retida à tensão de 10kPa, cujo valor foi de 0,19(g.g<sup>-1</sup>). Segundo Reichardt (1987), a capacidade de campo na maioria dos solos se encontra entre os potenciais matriciais de –10 kPa e –33 kPa.

### **3.2.4 Controle das irrigações**

As unidades experimentais, após saturação e determinação da condutividade hidráulica do solo saturado, foram colocadas ao ar livre até o momento das irrigações. O intervalo de tempo entre as irrigações foi determinado em função de perdas de umidade das unidades experimentais. O momento da irrigação foi sempre que houvesse perda de água equivalente a uma lâmina de armazenamento média de oito mm abaixo do armazenamento na

capacidade de campo. Foram aplicadas sete irrigações a estas amostras sendo que as avaliações dos efeitos destas sobre o solo foram realizadas após a segunda, quarta e sétima irrigação representando o resultado da ação dos níveis de energia cinética de  $T1=175 \text{ J m}^{-2}$ ;  $T2 = 192 \text{ J m}^{-2}$ ;  $T3 =223 \text{ J m}^{-2}$   $T4 = 250 \text{ J m}^{-2}$ ;  $T5 = 350 \text{ J m}^{-2}$   $T6 = 384 \text{ J m}^{-2}$   $T7 = 446 \text{ J m}^{-2}$   $T8 = 50 \text{ J m}^{-2}$   $T9 = 613 \text{ J m}^{-2}$   $T10 = 673 \text{ J m}^{-2}$   $T11 =780 \text{ J m}^{-2}$   $T12 = 875 \text{ J m}^{-2}$  respectivamente.

Para cada evento de irrigação foi aplicado uma lâmina de 8 mm de água. Este valor corresponde à capacidade de aplicação de água pelo pivô central no tempo de funcionamento de 20 horas

O controle de umidade, tomado como referência à capacidade de campo, foi realizado através de pesagens. O valor calculado da velocidade do DMLC foi aferido usando-se um pluviômetro com área de coleta igual à área da unidade experimental de forma a obter a velocidade exata de deslocamento do DMLC para que a lâmina de água aplicada fosse realmente de oito mm. Após cada irrigação as unidades experimentais foram colocadas ao ar livre para atingir o momento da irrigação seguinte.

### **3.2.5 Determinação do escoamento superficial**

Considerou como escoamento superficial a diferença de peso obtida entre o peso das unidades experimentais no momento da irrigação acrescido do peso da água adicionada na irrigação, lâmina de 8 mm, menos o peso da unidade experimental logo após a irrigação.

Escoamento = (Peso da unidade experimental + peso da lâmina de água aplicada) – (Peso da unidade experimental após irrigação). Utilizou-se um recipiente na parte inferior das unidades experimentais para coleta de água drenada durante as irrigações, caso isso acontecesse.

### 3.2.6 Determinação do material salpicado

O material salpicado proveniente das unidades experimentais foi coletado em recipiente com forma circular, numa seção de 13 cm de largura em torno da amostra de solo, conforme apresentado na Figura 4.

O peso do material salpicado foi determinado após secagem em estufa (105 a 110°C) por 24 horas e os resultados foram expressos em g m<sup>-2</sup> em relação a área da unidade experimental.

Na Figura 4 o círculo menor representa à área da unidade experimental e o maior a área de coleta do material salpicado.

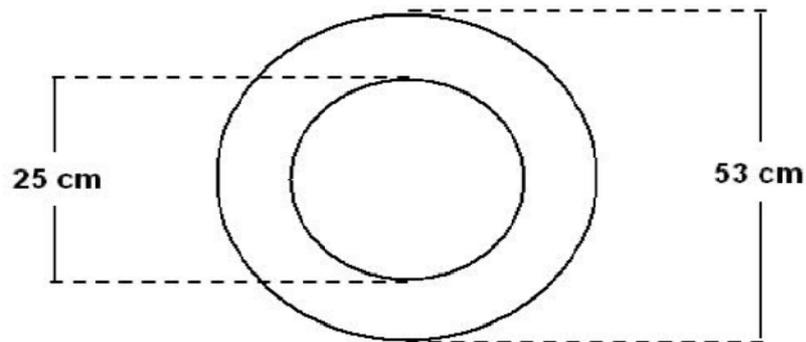


FIGURA 4 Área de coleta do material salpicado.

### 3.2.7 Determinação da condutividade hidráulica do solo saturado

A determinação da condutividade hidráulica do solo saturado foi feita usando-se o método do permeâmetro de carga constante, conforme descrito por Libardi (2005).

$$K_0 = \frac{VL}{At(h+L)} \quad (8)$$

Onde

$K_0$  - condutividade hidráulica do solo saturado

V - volume de água coletado no intervalo de tempo t

L - comprimento da amostra

A - área da seção transversal da amostra

h - potencial de pressão (carga hidráulica) no topo da amostra

As unidades experimentais foram saturadas lentamente com fluxo ascendente de água de maneira a não causar interferência na superfície das amostras. A condutividade hidráulica do solo saturado tomada como referência da condição inicial do solo foi determinada em amostras na forma de terra fina seca ao ar, com energia cinética igual a zero, determinada após a primeira saturação das unidades experimentais considerando-se a área total de cada unidade experimental.

Após irrigações e ciclos de umedecimento e secagem das amostras de solo nas unidades experimentais visando evitar possíveis fluxos preferenciais resultantes de escoamento junto às paredes da unidade experimental a condutividade foi determinada com a introdução de um tubo de PVC com diâmetro igual a 150 mm, após a saturação das amostras, no centro e até a extremidade inferior das unidades experimentais.

### **3.2.8 Determinação da retenção de água**

Determinou-se a retenção de água na tensão de 10 kPa em amostras indeformadas coletadas na camada de 0 -5 mm nas unidades experimentais após determinação da condutividade hidráulica do solo saturado.

### 3.3 Delineamento experimental e análises estatísticas

Os dados foram analisados considerando-se um delineamento inteiramente casualizado constituído por 12 tratamentos e três repetições. Foram analisadas as seguintes variáveis: escoamento superficial, salpicamento, condutividade hidráulica do solo saturado e retenção de água à tensão de 10 kPa.

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R Foundation For Statistical Computing (2008), considerando o seguinte modelo estatístico:

$$y_{ij} = \mu + t_i + \varepsilon_{ij},$$

Sendo

$y_{ij}$  - valor da variável dependente no j-ésimo repetição que recebeu o i-ésimo tratamento;

$\mu$  - constante inerente a cada observação;

$t_i$  - efeito do i-ésimo tratamento, com  $i = 1, \dots, 12$ ;

$\varepsilon_{ij}$  - erro experimental associado à parcela, independente e identicamente distribuído de uma Normal com média zero e variância  $\sigma^2$ .

Utilizou-se o teste F, para verificar a diferença entre os tratamentos, e quando estes foram significativos utilizou-se a análise de regressão. Para verificar as pressuposições do teste F, foram realizados o teste de Shapiro-wilk para normalidade dos erros e do teste de Barlett para verificar a homogeneidade de variâncias (Montgomery, 2000).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Intensidade de aplicação de água

Os valores médios da intensidade de aplicação de água, Tabela 2, representam a média dos valores de uma faixa molhada de três metros de largura perpendicular à barra de irrigação com coletores espaçados de 0,30 m.

TABELA 2 Valores médios da intensidade de aplicação de água, ( $\text{mm h}^{-1}$ ), ao longo do padrão molhado para bocais com diferentes diâmetros.

Distância do emissor (m)	Diâmetro de bocal (mm)			
	6,94	8,33	9,33	10,12
0,0	40	37	44	52
0,5	66	81	90	109
1,0	114	142	165	186
1,5	107	140	168	184
2,0	97	129	157	175
2,5	90	121	148	163
3,0	78	111	140	155
3,5	60	89	111	140
4,0	42	63	83	120
4,5	26	40	62	94
5,0	9	22	43	67
5,5	0	3	10	23

Verifica-se que os maiores valores de intensidade de aplicação de água ocorreram a um metro de distância da linha de irrigação.

Os valores de intensidade de aplicação de água ao longo do padrão molhado, obtidos em uma faixa de três metros perpendicular à linha de irrigação, para os diferentes diâmetros de bocais, encontram-se na Figura 5.

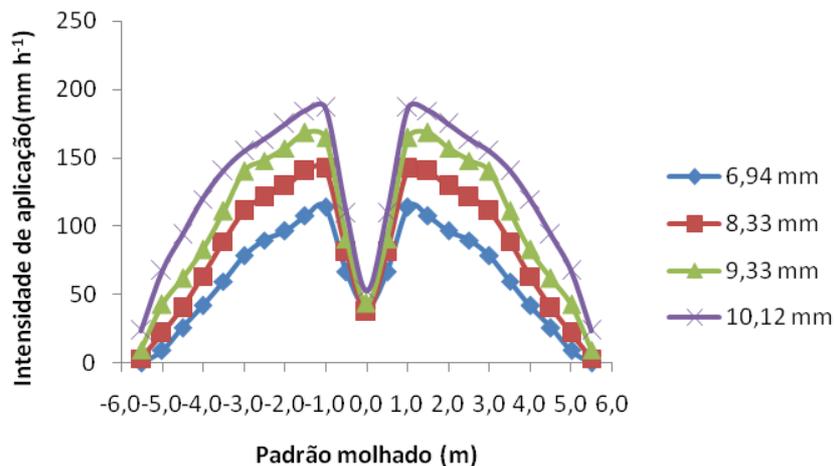


FIGURA 5 Distribuição dos valores da intensidade de aplicação de água ao longo do padrão molhado para emissores com diferentes diâmetros de bocais.

A Figura 5 indica uma pequena variação da largura do padrão molhado e valores crescentes da intensidade de aplicação de água em função do diâmetro dos bocais. A largura do padrão molhado em função de diâmetro de bocal variou de 10 a 11 metros. Obteve-se o valor de 10 metros para o bocal com diâmetro de 6,94mm e 11 metros para os demais diâmetros de bocais.

A largura do padrão molhado pode ser estimada pela equação proposta por Kincaid (2005) como apresentada a seguir;

$$W = 4,35(H^{1,2}M)^{0,31} \quad (9)$$

Sendo

$W$  - largura do padrão molhado (m)

$$M = qnP^{0,5}$$

$qn$  - vazão do bocal ( $L s^{-1}$ )

*P* - pressão da água no bocal (kPa)

Aplicando-se a equação (9) aos dados obtidos obtêm-se os valores de largura de padrões molhados de 9,46; 10,57; 11,26 e 11,79 m. Os dados obtidos através de informativo da empresa fabricante dos emissores indicam padrão molhado de 10 a 12 metros. Verifica-se que os dados estimados e os fornecidos pelo fabricante dos emissores estão bastante próximos dos obtidos experimentalmente.

Admite-se que um emissor que distribua água em um padrão molhado com maior largura seja mais adequado por possibilitar a distribuição de água com menor intensidade, mas isto pode não ser verdade como em situações onde a diferença entre a intensidade de aplicação máxima e a intensidade de aplicação média é muito grande.

Os valores de intensidade de aplicação média e intensidade de aplicação máxima com os respectivos coeficientes de variação encontram-se na Tabela 3.

TABELA 3 Valores obtidos ( $\text{mm h}^{-1}$ ) da intensidade de aplicação média (*I*<sub>med</sub>) e máxima (*I*<sub>max</sub>) com os respectivos coeficientes de variação (CV) para bocais com diferentes diâmetros (*Db*) em uma faixa de três metros perpendicular a linha de irrigação.

<b>Db (mm)</b>	<b>I<sub>med</sub></b>	<b>CV(%)</b>	<b>I<sub>max</sub></b>	<b>CV(%)</b>
6,94	66	7,91	106	3,45
8,33	82	3,59	137	2,16
9,33	102	4,40	163	2,92
10,12	122	6,83	182	3,42

Os valores da Tabela 3 indicam que a intensidade de aplicação média de água variou de 66 a 122  $\text{mm h}^{-1}$  e a taxa de aplicação máxima de água variou de 106 a 182  $\text{mm h}^{-1}$  em função do diâmetro dos bocais.

O aumento da intensidade de aplicação de água ao longo da linha de irrigação do pivô central é considerado uma das possíveis causas do escoamento superficial em áreas irrigadas por este sistema de irrigação. Uma das

possibilidades para reduzir o escoamento superficial seria a utilização de sistemas com capacidade para irrigar áreas menores. Neste caso em estudo a intensidade de aplicação média de água no final da área irrigada de 25 hectares é de  $65\text{mmh}^{-1}$  e no final de uma área irrigada de 100 hectares é de  $122\text{mmh}^{-1}$ .

Os valores de coeficientes de variação indicam que o espaçamento de 2,28 m entre os emissores produziu alta uniformidade de aplicação de água.

A representação gráfica das variações de intensidade de aplicação de água e as equações ajustadas em função do diâmetro dos bocais encontram-se na Figura 6.

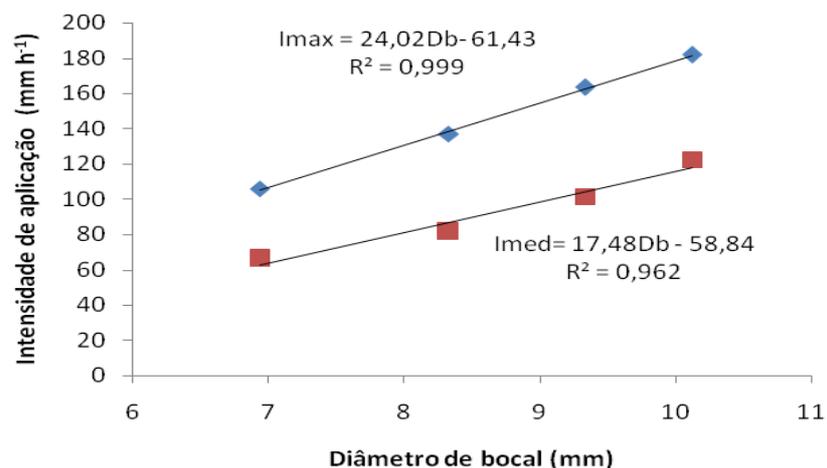


FIGURA 6 Comportamento das intensidade de aplicação de água média (Imed) e máxima (Imax) em função dos diâmetros dos bocais (Db).

A intensidade de aplicação máxima de água foi obtida pela média dos valores que ocorrem nas posições de 1,0; 1,5 e 2,0 m de distância da linha de irrigação. A intensidade de aplicação média refere-se à média dos valores que ocorrem ao longo do raio molhado por emissores com diferentes diâmetros de bocais, conforme dados apresentados na Tabela 4.

O padrão de aplicação de água pode ser descrito por um tipo trapezoidal sendo este definido pela relação entre a intensidade de aplicação máxima e a intensidade de aplicação média denominada de I. Quando o valor I for igual a um, o padrão de distribuição assume a forma retangular e quando esta relação for igual a dois o padrão assume a forma triangular (Kincaid, 2005).

Os valores de I observados para os diferentes diâmetros de bocais são respectivamente de 1,45; 1,62; 1,56 e 1,46 indicando que a intensidade de aplicação máxima é em média 52% superior a intensidade de aplicação média de água. Desta maneira a intensidade de aplicação máxima pode ser obtida multiplicando-se os valores de intensidade de aplicação média por 1,52. Os valores de intensidade de aplicação máxima ocorrem entre um e dois metros de distância da linha de irrigação e estas intensidades de aplicação correspondem aproximadamente a 36% da largura do padrão molhado Kincaid (2005) determinou o valor de I para diferentes emissores com diferentes diâmetros de bocais, placas defletoras, altura e níveis de pressão e obteve valores de I variando de 1,20 a 1,88. Os valores obtidos para emissores tipo spray variaram de 1,46 a 1,76, com valor médio de 1,6. Para emissores tipo i-wob os valores de I variaram de 1,27 a 1,83.

O perfil de distribuição de água ideal seria aquele com um padrão de distribuição uniforme e largura do padrão molhado suficiente para distribuir água com intensidade de precipitação compatível com a infiltrabilidade do solo e a capacidade de armazenamento superficial deste, evitando assim o escoamento superficial.

A grande dificuldade em projetar um sistema de irrigação do tipo pivô central é determinar a intensidade máxima de aplicação de água para cada condição específica de uso e manejo sem que ocorra escoamento superficial.

O tempo de molhamento necessário para aplicação de uma lâmina de 8 mm para os bocais de 6,94; 8,33; 9,33 e 10,12 mm é de 6,81; 4,77; 4,31 e 3,77

minutos. A aplicação de água por pivô central é feita por lâminas pequenas, com intensidade de aplicação elevadas e tempo de aplicação pequeno. Estas condições destacam a importância da capacidade de armazenamento superficial de água na superfície do solo assim como sua infiltrabilidade.

A intensidade de aplicação média pode ser estimada pela equação apresentada por Kincaid (2005) como apresentada a seguir:

$$I_{med} = 0,26Lb24h \frac{rs}{Wrs} \quad (10)$$

Fonte: Kincaid (2005).

Onde

$I_{med}$  - intensidade de aplicação média ( $\text{mm h}^{-1}$ ).  $Lb24h$  - lâmina bruta para o tempo de giro de 24 horas.  $rs$  - distância do emissor ao ponto pivô (m).  $Wrs$  - largura do padrão molhado (m)

Os valores obtidos e os valores estimados pela equação apresentada por Kincaid (2005) encontram-se na Tabela 4.

TABELA 4 Valores obtidos e valores estimados pela equação apresentada por Kincaid (2005), para intensidade de aplicação média para diferentes diâmetros de bocais (Db).

Db (mm)	rs(m)	Wrs(m)	Lb24h (mm)	I <sub>med</sub> ( $\text{mm h}^{-1}$ )	
				Obtidos	Estimados Eq. (10)
6,94	280,6	10	9,6	66	70
8,33	400	11	9,6	82	91
9,33	486,9	11	9,6	102	111
10,12	557,8	11	9,6	122	127

A diferença entre os valores estimados e os obtidos experimentalmente deve-se a diferenças devido ao perfil de distribuição de água. A equação

proposta por Kincaid (2005) foi desenvolvida para perfis de distribuição semi elíptico.

Os valores de intensidade de aplicação máxima de água podem ser estimados pela equação apresentadas Colombo (2003) como apresentada a seguir;

$$I_{max} = 8 \left( \frac{Lb}{Tg} \right) * rs/wrs \quad (11)$$

Onde

$I_{max}$  –Intensidade de aplicação máxima.

$Lb$  – Lâmina bruta

$Tg$  – Tempo de giro

Os valores obtidos e os estimados pela aplicação desta equação estão apresentados na Tabela 5

TABELA 5 Valores de intensidade de aplicação máximos obtidos e estimados pela equação apresentada por Colombo (2003).

Db (mm)	Valores de taxa máxima de aplicação (mm h <sup>-1</sup> )		
	Obtidos	Estimados Eq. (11)	Imed*1,52
6,94	106	90	100
8,33	137	116	125
9,33	163	142	155
10,12	182	162	185

Os valores obtidos pela equação 11 subestimam os valores para taxa de aplicação máxima de água.

Esta diferença pode ser atribuída ao fato desta equação ser desenvolvida para perfil de distribuição de água semi-elíptico. Os valores obtidos com o produto da intensidade media de aplicação pelo fator 1,52 são mais

representativos da intensidade máxima de aplicação do que os obtidos pela equação da elipse (Equação 11) conforme apresentado na Tabela 5.

#### 4.2 Distribuição de gotas por tamanho

A distribuição percentual do volume de água, em função do diâmetro de gotas produzidas pelos diferentes tamanhos de bocais encontra-se na Tabela 6 e Figura 7.

TABELA 6 Distribuição percentual do volume de água, em função do diâmetro de gotas (Dg) produzidas pelos diferentes diâmetros de bocais

Dg (mm)	Diâmetro de bocal (mm)			
	6,94	8,33	9,33	10,12
3,53	4	6	13	21
2,4	17	17	25	26
1,76	13	22	13	15
1,22	28	22	24	23
0,94	10	12	6	3
0,85	12	9	8	5
0,64	11	8	7	4
0,46	5	4	4	3

Os dados da Tabela 6 e Figura 7 indicam valores crescentes para diâmetro de gotas de 3,53 mm e decrescente para gotas com diâmetro inferior a 0,94mm, indicando maiores possibilidades de perda de água por evaporação e pelo vento para os bocais com menores diâmetros.

A percentagem de água aplicada por gotas com diâmetro entre 1,22 e 2,4 mm apresenta pequenas alterações percentuais.

A distribuição de gotas por tamanho apresentada na Figura 7 indica a ocorrência de todos os tamanhos de gotas determinados para os diferentes tamanhos de bocais.

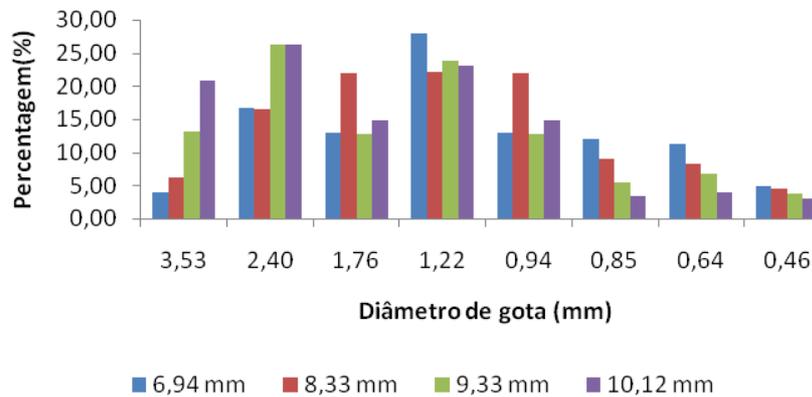


FIGURA 7 Distribuição percentual de água em função de diâmetros de gotas e dos bocais.

A quantidade de água aplicada por gotas de tamanho inferior a 0,94mm é mais susceptível de perdas por evaporação e pelo vento, enquanto que as gotas de diâmetro igual a 3,53 mm são as que possuem maiores valores de energia cinética e possuem maior poder de causar modificações à superfície do solo, Kohl et al. (1987).

O agrupamento de tamanho de gotas nas classes de 3,53 mm, 1,22 a 2,4 mm e 0,46 a 0,92 mm apresentados na Tabela 8 facilitam a avaliação das possibilidades de perdas de água por evaporação e pela ação do vento assim como a capacidade de causar modificações à superfície do solo.

Os dados referentes a distribuição de gotas por classe de tamanho estão na Tabela 7 e Figura 8.

Conforme dados apresentados na Tabela 7, verifica-se que a percentagem de água aplicada por gotas com diâmetro de 3,53 mm variou de 4 a 21% em função do diâmetro dos bocais.

A percentagem de água aplicada por gotas menores decresce com o aumento do diâmetro de bocais e a classe de tamanho de 1,22 a 2,40 mm permanece ao redor de 60 % conforme apresentado na Figura 8.

TABELA 7 Distribuição percentual de água em função das classes de tamanho de gotas para bocais com diferentes diâmetros

Dg (mm)	Diâmetro de bocal (mm)			
	6,94	8,33	9,33	10,12
3,53	4	6	13	21
1,22 - 2,4	58	61	62	64
0,46 - 0,92	38	33	25	15

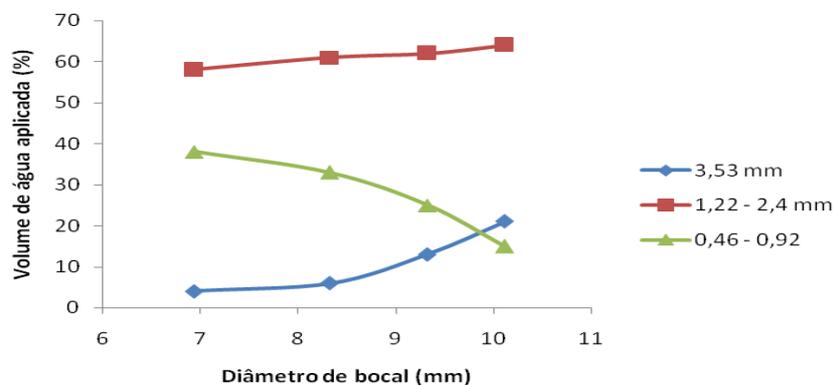


FIGURA 8 Distribuição percentual de água em função do diâmetro de bocal para diferentes classes de tamanho de gotas.

Um dos parâmetros mais utilizados para caracterizar a distribuição de gotas por tamanho é o valor do índice denominado D50. Os valores obtidos para este índice encontram-se na Tabela 8. Os valores de D50 variam ao longo do raio de alcance do emissor para bocais com o mesmo diâmetro.

TABELA 8 Valores de D50 para diferentes diâmetros de bocais.

Diâmetro do bocal (mm)	D50 (mm)
6,94	1,14
8,33	1,23
9,33	1,41
10,12	1,63

Os dados obtidos indicam que para os bocais com diâmetro de 6,94; 8,33; 9,33 e 10,12 mm a percentagem de gotas com diâmetro inferior a 1,14; 1,23; 1,41 e 1,63 é de 50%, e respectivamente a mesma percentagem para gotas com diâmetros superiores.

A relação entre diâmetro de bocal e D50 encontra-se na Figura 9.

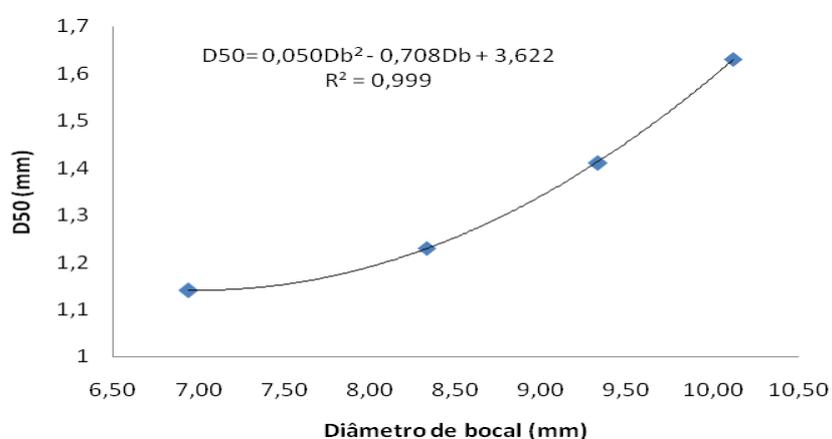


FIGURA 9 Valores de D50 em função de diâmetro de bocal

A utilização de bocais com diâmetros maiores produz maiores valores de D50 e desta maneira maiores valores de energia cinética.

#### 4.3 Energia cinética

Os valores estimados de velocidade de impacto em função do diâmetro de gotas e a equação de regressão estão apresentados na Figura 10.

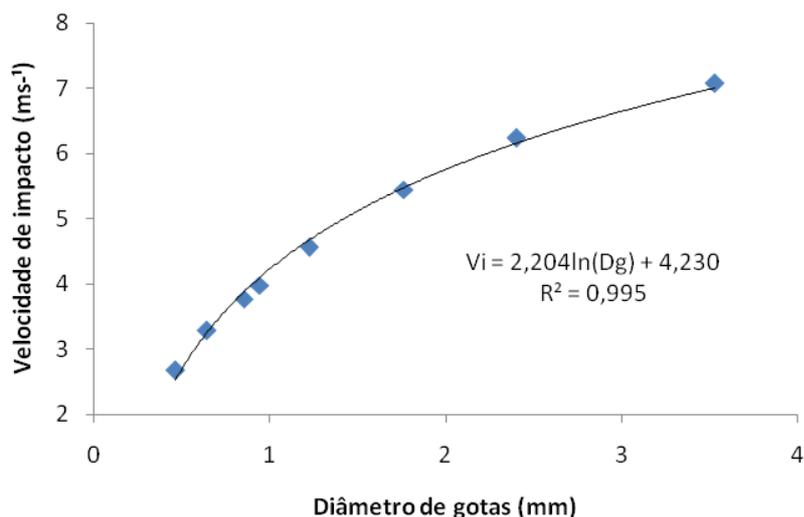


FIGURA 10 Valores estimados de velocidade de impacto ( $V_i$ ) para diferentes diâmetros de gotas ( $D_g$ ).

Os valores de energia cinética obtidos para os diferentes bocais encontram-se na Tabela 9.

TABELA 9 Valores de energia cinética ( $J\ m^{-2}\ mm^{-1}$ ) obtidos para diferentes diâmetros de gotas ( $D_g$ ) e diâmetro de bocais ( $D_b$ ) pela aplicação de uma lâmina de 1mm conforme frequência relativa ( $fr$ ) e velocidade de impacto ( $v_i$ ).

$D_g$ (mm)	$v_i$ (m s <sup>-1</sup> )	Diâmetro de bocal (mm)							
		6,94		8,33		9,33		10,12	
		$fr$	$EC^1$	$fr$	$EC$	$fr$	$EC$	$fr$	$EC$
0,46	2,68	0,06	0,18	0,05	0,14	0,04	0,14	0,03	0,11
0,64	3,29	0,11	0,6	0,08	0,43	0,07	0,38	0,04	0,22
0,85	3,77	0,12	0,85	0,09	0,64	0,08	0,57	0,05	0,36
0,94	3,98	0,1	0,79	0,12	0,95	0,06	0,48	0,03	0,24
1,22	4,56	0,28	2,91	0,22	2,29	0,24	2,5	0,23	2,39
1,76	5,45	0,13	1,93	0,22	3,27	0,13	1,93	0,15	2,23
2,4	6,24	0,17	3,31	0,16	3,12	0,26	5,06	0,26	5,06
3,53	7,08	0,03	0,75	0,06	1,5	0,13	3,26	0,21	5,26
		11,32		12,34		14,32		15,87	

$$1 - EC = 0,5(frvi^2)$$

Os valores de energia cinética obtidos ao longo do raio de ação do emissor visando caracterizar a distribuição da energia cinética são apresentados na Tabela 11.

Os valores da Tabela 10 indicam maiores valores de energia cinética no final do raio de alcance devido aos maiores diâmetros de gotas. Estes resultados mostram que a relação entre intensidade de precipitação e energia cinética é dependente do espectro de gotas produzidas por cada emissor.

TABELA 10 Valores de energia cinética ( $J m^{-2} mm^{-1}$ ) ao longo do raio de alcance do emissor para diferentes diâmetros de bocais.

Distância do emissor (m)	Diâmetro de bocal (mm)			
	6,94	8,33	9,33	10,12
0,25	11,21	12,75	13,02	13,38
0,75	9,02	11,75	14,05	12,8
1,25	10,26	10,68	11,4	14,94
1,75	9,35	9,76	12,43	15,4
2,25	8,61	11,51	13,99	13,97
2,75	9,31	10,52	12,75	13,79
3,25	11,09	11,16	12,26	15,65
3,75	11,75	12,88	13,32	15,94
4,25	12,84	13,71	15,31	17,3
4,75	17,06	14,09	16,53	19,01
5,25	17,83	13,89	18,09	17,35

Comparando-se os dados obtidos, para energia cinética, pela equação de regressão ajustada aos valores observados e os estimados pela equação proposta por Kincaid (1996) obtêm-se valores semelhantes conforme as equações:

$$EC = 9,2978D^{50} + 0,394 \quad (12)$$

(Equação de regressão)

$$EC = 7,2D50 + 2,79 \quad (13)$$

Fonte: (Kincaid, 2005)

Os valores de energia cinética determinados e estimados encontram-se na Tabela 11.

Os valores da Tabela 11 indicam que os dados obtidos foram semelhantes aos estimados pela equação proposta por Kincaid (1996).

TABELA 11 Valores observados e estimados de energia cinética em função de D50 para emissores com placas côncavas com 36 ranhuras médias.

D50	Energia cinética (J m <sup>-2</sup> mm <sup>-1</sup> )		
	Determinada	Estimada	Kincaid (1996)
1.14	10.94	10.99	11.00
1.23	12.01	11.83	11.65
1.41	13.90	13.50	12.94
1.63	15.63	15.55	14.53

Os valores obtidos de distribuição da energia cinética ao longo do padrão molhado para os diferentes diâmetros de bocais encontram-se na Figura 11.

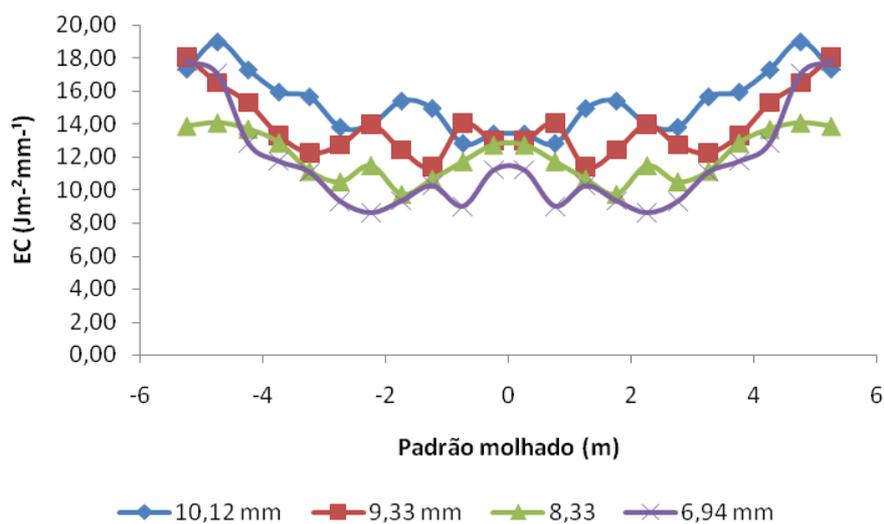


FIGURA 11 Distribuição de energia cinética ao longo do padrão molhado para diferentes diâmetros de bocal.

Verifica-se através dos padrões de distribuição de energia cinética, Figura 11, um aumento da energia cinética no final do raio de alcance do emissor e valores uniformes de distribuição em uma faixa de 0 a 3,5 m de distância da linha de irrigação para todos os bocais avaliados.

#### 4.4 Efeitos das chuvas sobre o solo

Os valores obtidos de escoamento superficial, salpicamento, condutividade hidráulica do solo saturado e retenção de umidade a 10 kPa em função dos tratamentos aplicados estão na Tabela 12.

TABELA 12 Valores obtidos de escoamento superficial (Es), salpicamento (Sal), redução da condutividade hidráulica do solo saturado (RK<sub>0</sub>) e água retida no solo à tensão de 10kPa (U), em função dos tratamentos.

Db(mm)	Tratamentos	EC (J m <sup>-2</sup> )	Es (%)	Sal (g m <sup>-2</sup> )	RK <sub>0</sub> (%)	U (g g <sup>-1</sup> )
6,94	1	175	8,67	10,67	72,00	0,19
8,33	2	192	7,67	19,67	85,33	0,21
9,33	3	223	13,67	30,00	90,00	0,19
10,12	4	250	11,33	32,00	84,67	0,19
6,94	5	350	8,33	20,33	80,33	0,21
8,33	6	384	23,00	29,33	82,33	0,19
9,33	7	446	21,00	37,00	89,67	0,23
10,12	8	500	22,00	15,67	88,00	0,21
6,94	9	613	17,00	8,33	82,67	0,21
8,33	10	673	25,67	10,67	77,33	0,21
9,33	11	780	22,33	14,33	82,33	0,22
10,12	12	875	19,67	14,00	73,33	0,19

O resumo da análise de variância encontra-se na Tabela 13.

TABELA 13 Resumo da análise de variância para as variáveis escoamento superficial, salpicamento, condutividade hidráulica e retenção de água segundo os tratamentos estudados.

Fonte de Variação	Graus de liberdade	Quadrado Médio	Valor-p	CV(%)
<b>Escoamento superficial</b>				
Tratamento	11	125,85	< 0,0001	18,43
Erro	24	9,47		
<b>Salpicamento</b>				
Tratamento	11	277,42	< 0,0001	27,59
Erro	24	30,97		
<b>Condutividade hidráulica</b>				
Tratamento	11	102,55	0,0367	7,9
Erro	24	43,08		
<b>Retenção de água</b>				
Tratamento	11	0,0004	0,0812	7,27
Erro	24	0,0002		

#### **4.4.1 Escoamento superficial**

Os resultados da Tabela 13 mostram que os tratamentos tiveram efeito significativo (valor- $p < 0,05$ ) para escoamento superficial, salpicamento e condutividade hidráulica.

Os dados da Tabela 12 indicam uma perda média de 10 % da água aplicada para os níveis de energia cinética inferiores a  $350 \text{ J m}^{-2}$  e de 21% em média para os níveis de energia cinética superiores a  $384 \text{ J m}^{-2}$ . Observa-se também que os valores para as taxas de escoamento superficial apresentaram pequenas variações entre os níveis de energia cinética de  $384$  a  $875 \text{ J m}^{-2}$  indicando que o nível de energia cinética para atingir a taxa máxima de escoamento superficial foi de  $384 \text{ J m}^{-2}$ .

As menores taxas de escoamento superficial observadas podem ser atribuídas a maior rugosidade superficial e menor nível de selamento superficial.

As taxas de escoamento superficial ocorridas em resposta aos níveis de energia cinética superiores a  $384 \text{ J m}^{-1}$  indicam condição de estabilidade das características da superfície do solo, ou seja, redução máxima da rugosidade superficial e estabelecimento de níveis de selamento superficial máximo para os níveis de energia cinética aplicados conforme dados apresentados na Figura 12.

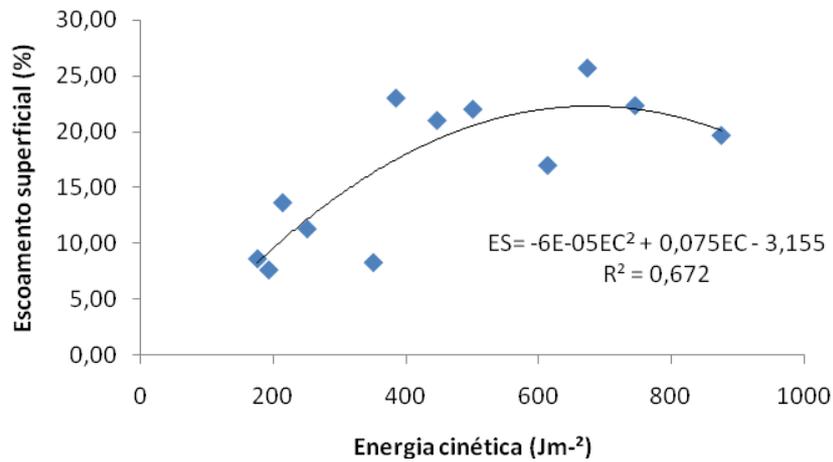


FIGURA 12 Percentagem de escoamento superficial (ES) em função dos níveis de energia cinética aplicados (EC).

#### 4.4.2 Salpicamento

Os menores valores de salpicamento estão relacionados a fase de formação do selamento superficial. Após a formação deste ocorre uma maior coesão de partículas do solo e a formação de lâmina de água na superfície deste devido a menor taxa de infiltração. Estes fatores dificultam o desprendimento de partículas e reduzem o efeito do impacto da gota de água sobre a superfície do solo.

Os menores valores de quantidade de material salpicado tem início com o nível de energia cinética de 446 J m<sup>-2</sup>. A média dos tratamentos com níveis de energia cinética inferiores a 446 J m<sup>-2</sup> é de 25,6 g m<sup>-2</sup> e para os tratamentos com níveis de energia cinética superiores ao valor relacionado é de 12,6 g m<sup>-2</sup>.

A maior coesão entre as partículas do solo reduz o salpicamento e aumenta o escoamento superficial. O maior escoamento superficial não indica obrigatoriamente maior perda de solo. Os valores de salpicamento em função de energia cinética encontram-se na Figura 13.

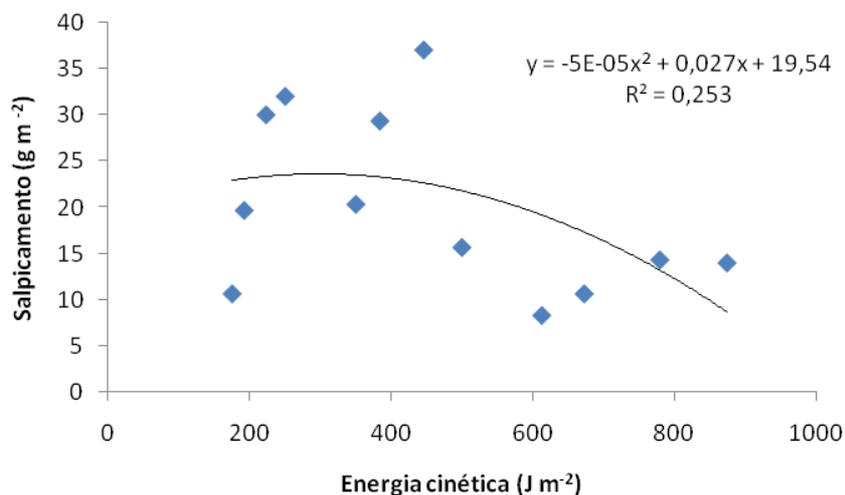


FIGURA 13 Valores de salpicamento em função da energia cinética.

O ajuste dos dados obtidos para salpicamento conforme apresentados na Figura 13 indica maior quantidade de material salpicado quando as partículas do solo apresentam menor coesão. Esta situação é semelhante as condições da superfície do solo logo após o preparo do mesmo com elevado nível de revolvimento como no sistema de preparo convencional. Nesta situação a resistência do solo à erosão é reduzida.

#### 4.4.3 Condutividade hidráulica do solo saturado

A média dos 36 valores de condutividade hidráulica do solo saturado, para amostras sem irrigação foi de 112 mm h<sup>-1</sup> com um coeficiente de variação de 73 %. A média de redução para os níveis de energia cinética de 175 a 875 foi de 82 %, indicando que a media dos valores de condutividade hidráulica do solo saturado após as irrigações é de 20,16 mm h<sup>-1</sup>. Os dados de redução de condutividade hidráulica encontram-se na Figura 14.

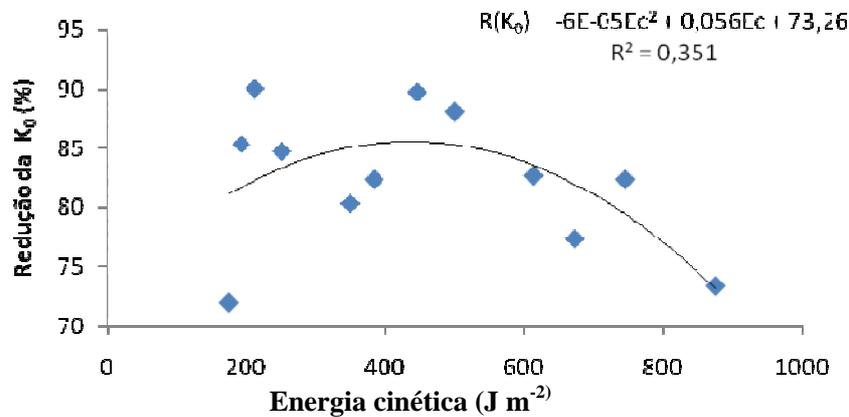


FIGURA 14 Redução da condutividade hidráulica inicial do solo saturado em função dos níveis de energia cinética.

A maior redução da condutividade hidráulica do solo saturado ocorreu após a segunda irrigação, tratamentos 1, 2, 3 e 4, apresentando pequenas variações com as irrigações subseqüentes. Esta redução pode ter ocorrido em função da acomodação do solo após umedecimento e secagem das amostras de solo. Segundo Fohrer et al. (1999) ciclos de umedecimento e secagem influenciam os processos de formação de selamento e desta maneira interfere nas propriedades hidráulicas e compactação do solo.

Brandão (2003) partindo de amostras secas ao ar (Terra fina seca ao ar) em Latossolo Vermelho Amarelo obteve dados para redução da condutividade hidráulica do solo saturado de 60% com uma única aplicação de chuva com energia cinética de  $525 J m^{-2}$ . A percentagem de redução da condutividade hidráulica do solo saturado manteve em 72% após aplicação de chuvas que produziram energia cinética de 1051, 2102 e  $3153 J m^{-2}$ . Resultados semelhantes foram encontrados por Mapa et al. (1986) e Cassel (1983).

#### 4.4.4 Água retida a 10 kPa

Os níveis de energia cinética aplicados não produziram efeitos significativos sobre a retenção de água à tensão de 10 kPa.

Na forma de avaliação utilizada neste trabalho não foi possível detectar alterações na retenção de água à tensão de 10 kPa, numa camada de 5 mm de espessura, mostrando que os tratamentos aplicados não alteraram a porosidade do solo nesta camada avaliada.

Os valores obtidos para retenção de água estão representados na Figura 15.

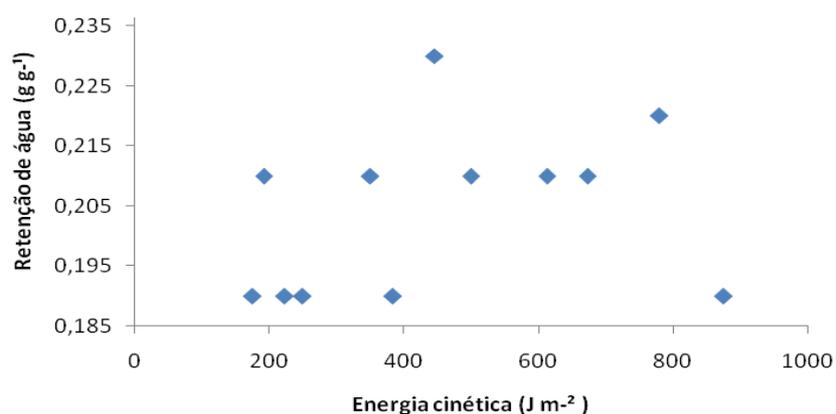


FIGURA 15 Valores obtidos de retenção de água em função da energia cinética.

## 5 CONCLUSÕES

A aplicação de uma lâmina de 8 mm de água por pivô central com intensidades de aplicação de 66 a 122 mm h<sup>-1</sup> produz níveis de energia cinética de 87,52 a 125 J m<sup>-2</sup> e provoca perda de água por escoamento superficial da ordem de 20% na quarta irrigação, quando o solo foi submetido a energia cinética de 350 a 500 J m<sup>-2</sup>.

Os valores de energia cinética ao longo do padrão molhado foram bastante uniformes com pequeno incremento nas extremidades devido a ocorrência de gotas maiores.

O efeito da aplicação de chuva produzida por pivô central sobre o escoamento superficial e o salpicamento alcançou seu nível máximo na quarta irrigação, (energia cinética de 350 a 500 J m<sup>-2</sup>) mantendo-se valores semelhantes na sétima irrigação, (energia cinética de 613 a 875J m<sup>-2</sup>).

A retenção de água na tensão de 10 kPa na camada de 5 mm não sofreu alteração devido aos tratamentos aplicados.

Mesmo com a redução do tamanho do pivô central de 100 para 25 hectares, não foi possível evitar o escoamento superficial no solo tratado.

## 6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AMORIM, R. S. S. **Desprendimento e arraste de partículas de solo decorrentes de chuvas simuladas**. 2000. 74 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- AMORIM, R. S. S.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; MATOS, A. T. Influência da declividade do solo e da energia cinética de chuvas simuladas no processo de erosão entre sulcos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 124-130, jan./abr. 2001.
- BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soil physics**. New York: J. Wiley, 1972. 498 p.
- BEDAIWY, M. N. A. Mechanical and hydraulic resistance relations in crust-topped soils. **Catena**, Amsterdam, v. 72, n. 2, p. 270-281, Jan. 2008.
- BEDAIWY, M. N.; ROLSTON, D. E. Soil surface densification under simulated high-intensity rainfall. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 6, n. 4, p. 365-376, Jan./Mar. 1993.
- BEN-HUR, M.; SHAINBERG, I.; MORIN, J. Variability of infiltration in a field with surface-sealed soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, p. 1299-1302, 1987.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 7. ed. Viçosa, MG: UFV, 2005. 611 p.
- BERNUTH, R. D. von; GILLEY, J. R. Evaluation of center pivot application packages considering droplet induced infiltration reduction. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 28, n. 6, p. 1940-1946, 1985.
- BOUMA, J. Influence of soil macroporosity on environmental quality. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 46, n. 1, p. 1-36, June 1991.
- BRADFORD, J. M.; FERRIS, J. E.; REMLEY, P. A. Interrill soil erosion processes - I: effect of surface sealing on infiltration, runoff and soil splash detachment. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, n. 6, p. 1566-1571, Nov./Dec. 1987.

BRADFORD, J. M.; HUANG, C. Comparison of interrill soil loss for laboratory and field procedures. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 6, n. 4, Jan./Mar. 1991.

BRANDÃO, V. S. **Infiltração de água em solos sujeitos a encrostamento**. 2003. 68 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

BRANDT, C. J. Simulation of the size distribution and erosivity of raindrops. **Earth Surface Processes and Landforms**, Sussex, v. 15, n. 8, p. 687-698, Dec. 1990.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Agricultura irrigada: estudo técnico preliminar**. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2004. 107 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Cadernos setorial de recursos hídricos**. Brasília: Agência Brasil, 2006. 96 p.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Irrigação no Brasil: situação e diretrizes**. Brasília: IICA, 2008.

BUBENZER, C. D.; JONES, B. A. Drop size and impact velocity effects on the detachment of soil under simulated rainfall conditions **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 14, n. 4, p. 625-628, July/Aug. 1971.

CARVALHO, J. A. **Tamanhos de gotas e uniformidade de distribuição de água de dois aspersores de média pressão**. 1991. 73p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

CASSEL, D. K. Spatial and temporal variability of soil physical properties following tillage of Norfolk loamy sand. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, n. 2, p. 196-201, Mar./Apr. 1983.

CHRISTOFIDIS, D. O futuro da irrigação e a gestão das águas. **Revista ITEM**, Belo Horizonte, v. 80, p. 16-21, jul./dez. 2008

COLOMBO, A. Pivô-central. In: MIRANDA, J. H.; PIRES, R.C. (Ed.). **Irrigação**. Piracicaba: FUNEP, 2003. v. 2, p. 209-258. (Série Engenharia Agrícola).

COSTA, A. C. S. da; LIBARDI, P. L. Caracterização físico-hídrica de um perfil de terra roxa estruturada latossólica pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 3, p. 669-677, maio/jun. 1999.

DARBOUX, F.; LE BISSONNAIS, Y. Changes in structural stability with soil surface crusting: consequences for erodibility estimation. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 58, n. 3, p. 1107-1114, Oct. 2007.

DE PLOEY, J.; GABRIELS, D. Measuring soil loss and experimental studies. In: KIRKBY, M. J.; MORGAN, R. P. C. (Ed.). **Soil erosion**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1980. p. 63-108.

DIJK, A. I. J. M. van; BRUIJNZEEL, L. A.; ROSEWELL, C. J. Rainfall intensity - kinetic energy relationship: a critical literature appraisal. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 261, n. 1/4, p. 1-23, Apr. 2002.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1999. 412 p.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos da Região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 23, n. 3, p. 515-524, set./dez. 1999.

FOHRER, N.; BERKENHAGEN, J.; HECKER, J. M.; RUDOLPH, A. Changing soil and surface conditions during rainfall: single rainstorm/subsequent rainstorms. **Catena**, Amsterdam, v. 37, n. 3-4, p. 355-375, Oct./Dec. 1999.

FOX, D. M.; LE BISSONNAIS, Y. Process-based analysis of aggregate stability effects on sealing, infiltration, and interrill erosion. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, n. 3, p. 717-724, May/June 1998.

GERITS, J. J. P.; LIMA, J. L. P. D.; BROEK, T. M. W. V. D. Overland flow and erosion. In: ANDERSON, M. G.; BURT, T. P. (Ed.). **Process studies in hill slope hydrology**. Chichester: J. Wiley, 1990. p. 173-214.

GHILDYAL, B. P.; SATYANARAYAMA, T. Effects of soil compaction on the physical properties of four different soils. **Journal of the Indian Society of Soil Science**, NewDelhi, v. 13, n. 3, p. 149-155, Jul./Ago. 1965.

GUNN, R.; KINZER, G. R. Terminal velocity of water droplets in stagnant air. **Journal of applied meteorology and climatology**, Boston, v. 6, n. 1, p. 243-248, Jan. 1949.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York: Academic, 1982. 413 p.

KARUNATILAKE, U. P.; VAN ES, H. M. Rainfall and tillage effects on soil structure after alfalfa conversion to maize on a clay loam soil in New York. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 67, n. 2, p. 135-146, Sept. 2002.

KELLER, J.; BLIESNER., R. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 652 p.

KINCAID, D. C. Spraydrop kinetic energy from irrigation sprinklers. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 39, n. 3, p. 847-853, May/June 1996.

KINCAID, D. C. Application rates from center pivot irrigation with current sprinkler types. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 21, n. 4, p. 605-610, Oct./Nov. 2005.

KINNELL, P. I. A. The influence of flow discharge on sediment concentrations in raindrop induced flow transport. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 26, n. 4, p. 575-582, July/Aug. 1988.

KINNELL, P. I. A. Rainfall energy in eastern Australia intensity-kinetic energy relationships for Canberra, A.C.T. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 25 n.3, p. 547-553-582, July/Aug. 1987.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Condutividade hidráulica de um Latossolo Roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 6, p. 945-953, dez. 2002.

KLUTE, A. **Methods of soil analysis**. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 253-261.

KOHL, R. A. Drop size distribution from medium-sized agricultural sprinklers. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 17, n. 4, p. 690-693, July/Aug. 1974.

KOHL, R. A.; BERNUTH, R. D. V.; HUEBNER, G. Drop size distribution measurement problems using a laser unit. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 28, n. 1, p. 190-192, Jan./Feb. 1985.

KOHL, R. A.; DEBOER, D. W. Drop size distributions for a low pressure spray type agricultural sprinkler. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 27, n. 6, p. 1836-184, Nov./Dec. 1984.

KOHL, D. D.; KOHL, R. A.; DEBOER, D. W. Measurement of low pressure sprinkler evaporation loss. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 30, n. 4, p. 1071-1074. 1987.

LAWS, J. O. Measurement of the fall-velocity of water drops and rain drops. **Transactions/ American Geophysical Union**, Washington, v. 22, n. 4, p. 709-721, Oct./Dec. 1941.

LAWS, J. O.; PARSONS, D. A. The relationship of raindrop size to intensity. **Transactions/ American Geophysical Union**, Washington, v. 24, n. 2, p. 452-460, Apr./June, 1943.

LE BISSONNAIS, Y.; BRUAND, A.; JAMAGNE, M. Laboratory experimental study of soil crusting: relation between aggregate breakdown mechanisms and crust structure. **Catena**, Amsterdam, v. 16, n. 3, p. 377-392, July/Sept. 1989.

LE BISSONNAIS, Y.; RENAUX, B.; DELOUCHE, H. Interactions between soil properties and moisture content in crusting formation, runoff and interrill erosion from tilled loess soils. **Catena**, Amsterdam, v. 25, n. 1, p.33-46, Feb. 1995.

LE BISSONNAIS, Y.; SINGER, M. J. Crusting, runoff, and erosion response to soil water content and successive rainfalls. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 6, p. 1898-1903, Nov./Dec. 1992.

LEHRSCHE, G. A.; KINCAID, D. C. Sprinkler droplet energy effects on soil penetration resistance and aggregate stability and size distribution. **Soil Science**, Baltimore, v. 171, n. 6, p. 435-447, June 2006.

LI, L.; KAWANO, H. Simulating water-drop movement from noncircular sprinkler nozzles. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 121, n. 2, p. 152-158, Mar./Apr. 1995.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: USP, 2005. 335 p.

LUTZ, J. F. Mechanical impedance and plant growth. In: SHAWN, B. T. (Ed.). **Soil physical conditions and plant growth**. New York: Academic, 1952. p. 43-71.

MAPA, R. B.; GREEN, R. E.; SANTO, L.; Temporal variability of soil hydraulic-properties with wetting and drying subsequent to tillage. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, n. 5, p. 1133-1138, Sept./Oct. 1986.

MCINTYRE, D. S. Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact. **Soil Science**, Baltimore, v. 85, n. 2, p. 261-266, Feb. 1958.

MERMUT, A. R.; LUK, S. H.; RTIMKENS, M. J. M.; POESEN, J. W. A. Micromorphological and mineralogical components of surface sealing in loess soils from different geographic regions. **Geoderma: an international journal of soil science**, Amsterdam, v. 66, n. 1, p. 71-84, Jan. 1995.

MERMUT, A. R.; LUK, S. H.; RTIMKENS, M. J. M.; POESEN, J. W. A. Soil loss by splash and wash during rainfall from two loess soils. **Geoderma: an international journal of soil science**, Amsterdam, v. 75, n. 1, p. 203-214, Octo. 1997.

MEYER, L. D.; HARMON, W. C. Susceptibility of agricultural soils to interrill erosion. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, n. 6, p. 1152-1157, Nov./Dec. 1984.

MONTERO, J.; TARJUELO, J. M.; CARRIO, N. P. Sprinkler droplet size distribution measured with an optical spectropuviometer. **Irrigation Science**, New York, v. 22, n. 2, p. 47-56, Apr./June 2003.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion in the United Kingdom: field studies in Silsoe area, 1973-75**. Cranfield: National College of Agricultural Engineering, 1977. (Occasional Paper, 4).

OLIVEIRA, R. A. de. **Distribuição de gotas por tamanho e perfil de precipitação de um aspersor fixo.** 1991. 103 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D. da. **Escoamento superficial.** Viçosa, MG: UFV, 2006. 80 p.

R FOUNDATION FOR STATISTICAL COMPUTING. **R: A language and environment for statistical computing.** Vienna: Statistical Computing, 2008. Disponível em: < <http://cran.r-project.org/doc/manuals/refman.pdf>>. Acesso em: 16 mar. 2008.

RAGAB, R.; COOPER, J. Variability of unsaturated zone water transport parameters: implications for hydrological modelling: 1. in situ measurements. **Journal of hydrology**, Amsterdam, v. 148, n. 2, p. 109-131, Feb. 1993.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas.** Piracicaba: USP, 1987. 186 p.

REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; CABEDA, M. S. V. Selamento superficial e infiltração de água em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 16 n. 3, p. 289-298, set./dez. 1992

RICHARDS, L. A.; FIREMAN, M. Pressure-plate apparatus for measuring moisture sorption and transmission by soils. **Soil Science**, Washington, v. 56, n. 5, p. 395-404, May 1943.

RODRIGUES, L. N.; PRUSKI, F. F.; SILVA, E. M. **Procedimento para estimativa da intensidade de precipitação máxima admissível em pivô-central com base nas características do equipamento e do solo.** Planaltina: Embrapa Cerrados, 2003. 53 p.

SALVADOR, R.; BAUTISTA-CAPETILLO, C.; BURGETE, J.; ZAPATA, N.; SERRETA, A.; PLAYAN, E. A photographic method for drop characterization in agricultural sprinklers. **Irrigation Science**, New York, v. 27, n. 1, p. 01-10, Jan./Mar. 2009.

SEGINER, I. Tangential velocity of sprinkler drops. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 8, n. 1, p. 90-93, Jan./Feb. 1965.

STILLMUNKES, R. T.; JAMES, L. G. Impact energy of water droplets from irrigation sprinklers. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 25, n. 1, p. 130-133, Jan./Feb. 1982.

TACKETT, J. L.; PEARSON, R. W. Some characteristics of soil crusts formed by simulated rainfall. **Soil Science**, Washington, v. 99, n. 6, p. 407-413, June 1965.

TARCHITZKY, J.; BANIN, A.; MORIN, J.; CHEN, Y. Nature, formation and effects of soil crust formed by water drop impact. **Geoderma**: an international journal of soil science, Amsterdam, v. 33, n. 2, p. 135-155, Feb. 1984.

TARJUELO, J. M. **El riego por aspersión y su tecnología**. 3. ed. Madrid: Mundi-Prensa, 2005. 581 p.

TOSSELL, R. W.; WALL, G. J.; RUDRA, R. P. The Guelph rainfall simulator: a comparison of natural and simulated rainfall characteristics. **Canadian Agricultural Engineering**, Ottawa, v. 32, n. 2, p. 215-223, Apr./June 1990.

TRUMAN, C. C.; BRADFORD, J. M.; FERRIS, J. E. Antecedent water content and rainfall energy influence on soil aggregate breakdown. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 5, p. 1385-1392, Sept./Oct. 1990.

TRUMAN, C.; BRADFORD, J.; FERRIS, J. Antecedent water content and rainfall energy influence on soil aggregate breakdown. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 5, p. 1385-1392, Sept./Oct. 1990.

VALENTIN, C.; BRESSON, L. M. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 55, n. 3/4, p. 225-245, Nov. 1992.

VILELA, L. A. A. **Avaliação do impacto de gotas sobre a superfície de um latossolo vermelho escuro irrigado por aspersão**. 1995. 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

WEST, L.; CHIANG, S.; NORTON, L. The morphology of surface crusts. In: SUMNER, M.; STEWART, B. (Ed.). **Soil crusting**: chemical and physical processes. Florida: Lewis, 1992. p. 73-92.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Rainfall energy and its relationship to soil loss. **Transactions/American Geophysical Union**, Washington, v. 39, n. 2, p. 285-291, Apr./June 1958.