

**DESENVOLVIMENTO DE EMISSOR TIPO
LEPA DE BAIXO IMPACTO EROSIVO**

MOISÉS SANTIAGO RIBEIRO

2009

MOISÉS SANTIAGO RIBEIRO

**DESENVOLVIMENTO DE EMISSOR TIPO LEPA DE BAIXO
IMPACTO EROSIVO**

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. Ph.D. Luiz Antônio Lima

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
2009

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

Ribeiro, Moisés Santiago.

Desenvolvimento de emissor tipo LEPA de baixo impacto erosivo / Moisés Santiago Ribeiro. – Lavras : UFLA, 2009.
124 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2009.
Orientador: Luiz Antônio Lima.
Bibliografia.

1. Pivô central. 2. LEPA. 3. Quad-Spray. 4. Erosão hídrica. 5. Perda de solo. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 627.52

MOISÉS SANTIAGO RIBEIRO

**DESENVOLVIMENTO DE EMISSOR TIPO LEPA DE BAIXO
IMPACTO EROSIVO**

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 13 de novembro de 2009.

Prof. Ph.D. Alberto Colombo	UFLA
Prof. D.Sc. Geraldo Magela Pereira	UFLA
Prof. D.Sc. Marx Leandro Naves Silva	UFLA
Prof. D.Sc. Adão Wagner Pêgo Evangelista	UFG

Prof. Ph.D. Luiz Antônio Lima
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

A Deus, por estar sempre presente e ter permitido que chegasse a essa etapa de minha vida com muita perseverança, persistência, alegria, paz e saúde,

DEDICO.

Aos meus pais, Dílson Almeida Ribeiro (*in memoriam*) e Iolanda Santiago Ribeiro, por me terem dado o dom e o sentido da vida. Em especial a minha mãe, que sempre me apoiou e proporcionou a formação superior, confiando em mim em todos os momentos.

A minha namorada, Paula Francis Gomes Viana que, com toda a sua alegria e amor, me deu força e coragem para a realização de meus sonhos.

Aos meus irmãos, Maurício Malone Santiago Ribeiro e Wivianne Santiago Ribeiro, que sempre me incentivaram e foram bons exemplos e motivos de grande orgulho em minha vida.

A minha graciosa sobrinha Letícia Lima Silva Ribeiro e aos meus sobrinhos Ravi Lima Silva Ribeiro e Davi Ribeiro Silva que, com a alegria e ingenuidade de criança, trazem a cada dia uma felicidade ímpar na vida de meus familiares.

A minha cunhada Naiana Lima Silva Ribeiro e ao meu cunhado Marcus José Santos Silva, por mostrarem-se pessoas de bom coração, atuando junto aos meus irmãos.

Aos meus tios e tias, primos e primas, pela presença marcante em minha vida. Em especial, a José Augusto de Cerqueira Lima Muccini e Ieda Santiago Muccini, pelo incentivo e estímulos para seguir neste caminho.

Aos amigos que, sempre se mostraram dispostos a colaborarem na minha caminhada, em especial a Kallyn da Guarda Silva e Paulo César Seixas.

OFEREÇO.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia (DEG), pela oportunidade e apoio que tornaram possível a conclusão do doutorado.

À Capes, pela concessão da bolsa de estudos ao longo do curso e pelos recursos concedidos.

À Fapemig, pelos recursos concedidos ao projeto.

Agradeço, de forma especial, ao professor Ph.D. Luiz Antônio Lima, pela maneira simples e competente de orientar, pelos ensinamentos e amizade, fundamentais para a realização deste trabalho e, principalmente, para a minha formação pessoal e profissional.

Ao professor Ph.D. Alberto Colombo, pela coorientação e por mostrar-se disposto a contribuir com este trabalho.

Ao professor Dr. Marx Leandro Naves Silva, pela ajuda e sugestões no trabalho e por fazer parte da banca examinadora.

Ao professor Dr. Geraldo Magela Pereira, por mostrar-se disposto a colaborar com este trabalho.

Ao professor Dr. Adão Wagner Pêgo Evangelista, pela sua disposição em ajudar no trabalho e por fazer parte da banca examinadora.

Ao professor Ph.D. Elio Lemos da Silva, pelos ensinamentos e orientação durante o mestrado e por sua contribuição para a melhoria deste trabalho.

À pesquisadora Dra. Fátima Conceição Rezende, pela atenção e colaboração que tem dado ao Laboratório de Hidráulica e Irrigação e por sua contribuição para este trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia, pelos ensinamentos.

Aos funcionários do Laboratório de Hidráulica, José Luiz Moraes Rodrigues e Oswaldo Francisco de Carvalho, pelo apoio na instalação e manutenção do experimento.

Às secretarias Ana Daniela dos Santos e Greice da Costa Oliveira, por sempre estarem dispostas a colaborar para o bom desempenho do programa de pós-graduação.

A Walmes Marques Zeviani, M.Sc. em Estatística e Experimentação Agropecuária, pelo suporte nas análises estatísticas.

À amiga Ana Cecília Dayrell Martins Caldeira, bolsista do projeto de TESE, pela colaboração na execução do experimento.

Aos amigos e colegas de turma de doutorado, pela solidariedade, estudo e trabalho compartilhado ao longo do curso, em especial Samuel Beskow, Fábio Henrique de Souza Faria e Walfredo Sérgio Carneiro Figueirêdo.

Aos amigos e colegas de pós-graduação, pela agradável companhia e solidariedade ao longo do curso. Em especial, a Eduardo Inácio Vieira, Antônio Carlos da Silva, Lessandro Coll Faria, Ednaldo Liberato de Oliveira, Henrique Fonseca Elias de Oliveira, Luciano Oliveira Geisenhoff e Joaquim Alves de Lima Junior.

Aos amigos Gustavo Alvarenga Rodrigues, Débora Candeias Marques de Moura, Alexandre Pinho de Moura, José Romário de Melo, Thiago Oliveira e Charles Neri Moreira, entre outros que compartilharam comigo momentos felizes.

A todos aqueles que contribuíram para a confecção deste trabalho e tornado meus dias em Lavras mais felizes.

BIOGRAFIA

Moisés Santiago Ribeiro, filho de Dilson Almeida Ribeiro (*in memoriam*) e Iolanda Santiago Ribeiro, nasceu em 21 de junho de 1980, em Jequié, BA.

Em agosto de 1999, ingressou no curso de Engenharia Agrônômica, na Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, em Vitória da Conquista, BA. Durante a graduação, foi estagiário no Laboratório de Análises Químicas de Solos, bolsista de monitoria da disciplina Fisiologia Vegetal III e bolsista de Iniciação Científica da Fundação de Apoio e Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) e EMBRAPA, na área de fisiologia de plantas cultivadas. Também participou de estágios extracurriculares na área de extensão rural, na Empresa Baiana de Desenvolvimento Agrícola (EBDA), gerência regional de Jequié, BA. Foi membro do conselho fiscal da Empresa Junior de Agronomia por dois anos, tendo participado de projetos vinculados ao governo do estado voltados à agricultura familiar. Gradou-se Engenheiro Agrônomo em janeiro de 2005.

Trabalhou como Engenheiro Agrônomo na empresa TopDados - Topografia e Construção Ltda., em Jequié, BA, de novembro de 2005 a julho de 2006.

Iniciou o mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Irrigação e Drenagem, na Universidade Federal de Lavras, em Lavras, MG, em março de 2005, concluindo em junho de 2006.

Em agosto de 2006, ingressou no doutorado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Água e Solo, na Universidade Federal de Lavras, em Lavras, MG, concluindo em novembro de 2009.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	i
ABSTRACT	iii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1 Sistema de irrigação pivô central.....	4
2.2 Cafeicultura irrigada por pivô central	7
2.3 Erosão hídrica	9
2.3.1 Erosão por salpico.....	11
2.4 Taxa de aplicação de água	13
2.5 Impacto de gotas de chuva no solo	20
2.6 Velocidade de gotas	22
2.7 Energia cinética de gotas	26
3 MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1 Caracterização da área experimental	31
3.2 Caracterização química, física e físico-hídrica do solo.....	32
3.3 Condução do experimento (Etapa I)	33
3.3.1 Características construtivas do emissor <i>Quad-Spray</i> tipo LEPA.....	34
3.3.2 Instalação do emissor.....	35
3.3.3 Controle da irrigação	37
3.3.4 Vazão	38
3.3.5 Padrão de distribuição de água	38
3.3.6 Estimativa da velocidade de deslocamento dos bocais.....	39
3.3.7 Taxa média de aplicação de água.....	40
3.3.8 Uniformidade de distribuição de água	42

3.3.9 Avaliação das perdas de solo por erosão hídrica	43
3.4 Condução do experimento - (Etapa II).....	45
3.4.1 Características construtivas dos protótipos de emissor tipo LEPA.....	46
3.5 Condução do experimento - (Etapa III)	49
3.5.1 Instalação dos protótipos de emissor tipo LEPA	49
3.5.2 Controle da irrigação	51
3.5.3 Vazão	51
3.5.4 Padrão de distribuição de água	51
3.5.5 Taxa média de aplicação de água.....	53
3.5.6 Uniformidade de distribuição de água	54
3.5.7 Avaliação das perdas de solo por erosão hídrica	54
3.6 Análise de dados	54
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	56
4.1 Emissor <i>Quad-Spray</i> tipo LEPA.....	56
4.1.1 Perdas de solo por erosão hídrica.....	59
4.2 Protótipos de emissor tipo LEPA: tubo corrugado e tubo liso.....	78
4.2.1 Perdas de solo por erosão hídrica.....	84
5 CONCLUSÕES	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
ANEXOS	111

RESUMO

RIBEIRO, Moisés Santiago. **Desenvolvimento de emissor tipo LEPA de baixo impacto erosivo**. 2009. 124 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.¹

Os emissores tipo *Low Energy Precision Application* (LEPA), que aplicam água de maneira localizada na cultura do cafeeiro sobre a copa das plantas, têm sido muito utilizados, principalmente nas regiões norte de Minas Gerais e oeste da Bahia. A aplicação precisa de água, a possibilidade de praticar a fertirrigação, o baixo consumo de energia e a economia de água, entre outras vantagens, têm tornado os emissores tipo LEPA altamente competitivos. Entretanto, têm-se notado problemas técnicos, associados a seus valores muito elevados de taxa instantânea de aplicação de água sobre as plantas e o solo, causando escoamento superficial, erosão e, conseqüentemente, baixos níveis de eficiência de irrigação. O trabalho foi realizado com o objetivo de desenvolver um emissor tipo LEPA de baixo impacto erosivo, com aplicação de água localizada sob a copa de cafeeiros. O estudo foi conduzido no Laboratório de Hidráulica e Irrigação, do Departamento de Engenharia, na Universidade Federal de Lavras, em Lavras, MG. Foram avaliados 22 bocais do emissor *Quad-Spray* tipo LEPA e um protótipo de barra associada a dois diferentes protótipos de emissor tipo LEPA: tubo corrugado e tubo liso, quanto à taxa média de aplicação de água e perdas de solo por erosão hídrica. O delineamento experimental utilizado para a avaliação de 22 bocais do emissor *Quad-Spray*, bem como o esquema fatorial, composto por três modelos de emissor (*Quad-Spray*, tubo corrugado e tubo liso) e cinco diâmetros de bocal (2,38, 3,97, 5,95, 7,94 e 9,92 mm usados no emissor *Quad-Spray* e dois bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56 e 6,94 mm usados no emissor tubo corrugado e tubo liso), foi o inteiramente casualizado, com três repetições. Diante dos resultados obtidos, concluiu-se que as perdas de solo por erosão hídrica é extremamente dependente das taxas médias de aplicação de água, ao longo da área molhada pelos emissores tipo LEPA: *Quad-Spray*, tubo corrugado e tubo liso. Entretanto, valores médios ponderados de perdas de solo não apresentaram boa relação com valores médios ponderados de taxa média de aplicação de água, com o aumento de diâmetro de bocal. O emissor tubo corrugado mostrou-se menos impactante que o emissor tubo liso apenas quando associados aos menores diâmetros de bocal. As características construtivas do emissor tubo corrugado quando associado aos maiores diâmetros de bocal não favorece no aprimoramento de um emissor de baixo impacto erosivo. O padrão de distribuição de água dos protótipos de emissor tubo corrugado e tubo liso, instalados próximos ao solo,

foi extremamente importante na redução de seu poder de impacto erosivo e o emissor tubo liso foi o de menor impacto erosivo, comprovando que outros tipos de emissores tipo LEPA podem superar o emissor *Quad-Spray* disponível no mercado na minimização da quantidade de solo perdido por erosão hídrica. Características operacionais, como altura de instalação, largura do padrão de molhamento e energia cinética, devem ser estudadas, para maiores esclarecimentos sobre o poder de impacto erosivo de bocais dos emissores tipo LEPA.

¹ Comitê Orientador: Prof. Ph.D. Luiz Antônio Lima, DEG/UFLA (Orientador), Prof. Ph.D. Alberto Colombo, DEG/UFLA.

ABSTRACT

RIBEIRO, Moisés Santiago. **Development of LEPA nozzle of low erosive impact**. 2009. 124 p. Thesis (Doctor of Science in Agricultural Engineering/Soil and Water Engineering) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.¹

The Low Energy Precision Application (LEPA) type nozzles that apply water localized on the plant crown in the coffee culture have been widely used, mainly in the North of Minas Gerais and West Bahia regions. The precision water application, turning possible the practice of fertigation, low energy consumption, water economy, among other advantages, have made the LEPA type nozzles highly competitive. However, technical problems have been noticed, associated to their very high instantaneous water application rate values on the plants and on the ground, causing surface run off, erosion and consequently, low levels of irrigation efficiency. This work had the objective to develop a LEPA type emitter of low erosive impact, with water application located under the canopy of coffee plants. The study was carried out at the Hydraulic and Irrigation Laboratory of the Department of Engineering, at the Universidade Federal de Lavras, in Lavras, MG. Twenty two (22) Quad-Spray LEPA emitter nozzles were evaluated, and a new LEPA type emitter prototype associated to two different prototypes: corrugated pipe and smooth pipe, as well their average rate of water application and soil losses by water erosion. The experimental design used for the evaluation of 22 Quad-Spray emitter nozzles, as well as the factorial outline, composed by three emitter models (Quad-Spray, corrugated Pipe and smooth Pipe) and five nozzle diameters (2.38, 3.97, 5.95, 7.94 and 9.92 mm used in the Quad-Spray emitter and two nozzles of 1.59, 2.78, 4.17, 5.56 and 6.94 mm used in the corrugated pipe and smooth pipe emitters), was entirely randomized, with three replications. From the results, it was concluded that the soil losses by water erosion were extremely dependent of the average water application rates, throughout the area wetted by the Quad-Spray, corrugated Pipe and smooth Pipe emitters. However, the weighted average soil loss values did not present a good relation to weighted average values of average water rate application, with the increase on nozzle diameter.

¹Guidance Committee: Prof. Ph.D. Luiz Antônio Lima, DEG/UFLA (Major Professor), Prof. Ph.D. Alberto Colombo, DEG/UFLA (Co-adviser).

The water distribution pattern of the LEPA emitter type prototypes installed near the ground surface was extremely important in the reduction of its erosive impact, and the smooth pipe type LEPA emitter showed the least erosive impact, proving that other types of emitters can surpass the LEPA available on the market to reduce the amount of soil loss by erosion. Operational characteristics such as installation height, wetting pattern width and kinetic energy must be studied, in order to clarify erosive impact of LEPA type nozzles.

1 INTRODUÇÃO

A área irrigada total no Brasil é de 3,44 milhões de hectares, que representam 5,89% da área plantada total, dos quais 710 mil hectares são irrigados por pivô central, ou 20,65% da área irrigada, perdendo apenas para o método de irrigação por superfície, com 50,28%, segundo levantamentos de Christofidis (2005).

O pivô central é um equipamento que tem sido amplamente comercializado no país, tornando-se mais competitivo em relação aos demais sistemas de irrigação a partir da utilização do emissor tipo LEPA (sigla do inglês *Low Energy Precision Application*), fabricado pela empresa americana *Senninger Irrigation*. Segundo Tomazela et al. (2003), o conceito LEPA de irrigação surgiu da idéia básica de desenvolver um sistema de aplicação de água que pudesse reduzir as exigências de energia e permitir a aplicação mais precisa de água na irrigação.

Atualmente, a utilização de emissores tipo LEPA vem aumentando progressivamente na irrigação da cultura do cafeeiro, com o emprego do plantio circular. A sua utilização expandiu-se para regiões com baixa ocorrência de precipitação pluviométrica e que apresentam maiores riscos e períodos extensos de deficiência hídrica como o Triângulo Mineiro, o Norte de Minas e o Alto Paranaíba, em Minas Gerais, o norte do Espírito Santo e as regiões sul e oeste da Bahia.

Apesar de apresentar vantagens, como alta eficiência de irrigação e uniformidade de aplicação de água, alguns problemas são verificados em áreas com pivô central. Nestes sistemas, a taxa de aplicação de água aumenta gradativamente no sentido do centro do pivô até a extremidade final da linha lateral, por cobrir maior área por unidade de comprimento da lateral, portanto, agravando-se mais em grandes equipamentos. Em pivôs central equipados com

emissores tipo LEPA, a redução da área molhada busca torná-lo um sistema de irrigação localizada e, com isso, diminuir o consumo de água. Quando utilizado na cultura do cafeeiro, por exemplo, apesar do espaçamento de aproximadamente 3,7 m entre ruas, a faixa molhada tem, em geral, apenas 2 m. Entretanto, a redução da área molhada e a aplicação de chuva artificial de modo intensivo são feitas equivocadamente, sem considerar os impactos causados à superfície do solo. O problema é ainda maior em culturas como o café, pois, em sua fase inicial de desenvolvimento, não apresenta cobertura vegetal suficiente para proteger a superfície do solo do impacto das gotas de água, ocorrendo desagregação de sua superfície, bem como escoamento superficial. Tais problemas são passíveis de ocorrerem em maiores proporções em solos de textura média, como é o caso dos Latossolos presentes nas áreas com predominância do sistema de irrigação LEPA.

A erosão por embate ocorre pelo impacto das gotas de água no solo, estando este desprovido de vegetação, sendo as partículas desagregadas facilmente e arrastadas pelas enxurradas. Já as partículas mais finas, que permanecem em suspensão, atingem camadas mais profundas do solo por deposição e pode acontecer de essas partículas encontrarem um horizonte que as impeça de passar, provocando danos ainda maiores (Gomes, 2006). Segundo Bertoni & Lombardi Neto (1990), esse tipo de erosão causa um fenômeno conhecido como salpicamento, que consiste, basicamente, no arremesso das partículas destacadas do solo a distâncias que podem chegar a até um metro e meio, sendo considerada etapa inicial do processo de erosão.

A introdução do pivô central equipado com emissores tipo LEPA em partes das regiões do Cerrado mineiro e Cerrado baiano alterou alguns aspectos do solo, relacionados à interação superfície do solo e ao impacto de gotas, que devem ser esclarecidos para melhor entendimento e consequente maximização do sistema de produção.

Nesse contexto, este estudo foi realizado com o objetivo de desenvolver um emissor tipo LEPA de baixo impacto erosivo, com aplicação de água localizada mais próxima da superfície do solo, sob a copa de cafeeiros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sistema de irrigação pivô central

O sistema de irrigação por pivô central foi desenvolvido em 1952, no Colorado, EUA, mas, até 1960, seu uso ainda não estava consolidado. A partir de 1961 começou a ser empregado com mais frequência. Em 1973, somente nos EUA, já se irrigavam 800.000 ha por pivô central (Bernardo et al., 2005). Dados do ano de 2007 mostram que, no mundo, quatro milhões de hectares são irrigados com pivô. No Brasil, esse sistema ocupa 710.000 hectares e são comercializadas, aproximadamente, 800 unidades a cada ano. Somente os estados de São Paulo, Goiás, Minas Gerais e Bahia respondem por mais de 80% da área irrigada por pivô central, fazendo deste o segundo sistema mais utilizado, com 21% das áreas irrigadas (Carvalho & Silva, 2007).

O pivô central é constituído, basicamente, por uma linha lateral móvel de aspersão, que irriga uma área circular, por meio da rotação da linha lateral de aspersão em torno de um ponto fixo (ponto do pivô). O suprimento de água para o ponto do pivô é feito por meio de uma adutora enterrada. A lateral móvel é sustentada acima da superfície do solo por estruturas triangulares (torres móveis) dotadas de um mecanismo de propulsão e rodas. No espaço entre torres, denominado vão, a tubulação é sustentada por uma estrutura dotada de treliças e tirantes (Colombo, 2003). Pode ser equipado com aspersores de diferentes tamanhos e espaçamentos, conferindo-lhe maiores ou menores demandas por pressão e, conseqüentemente, energia.

Quando os pivôs foram introduzidos, eram utilizados aspersores de impacto de alta pressão. O tempo de aplicação era maior e as taxas de aplicação eram menores em razão do grande raio de alcance do jato. Porém, os aspersores de impacto de alta pressão e o alto ângulo de trajetória apresentavam baixa uniformidade de irrigação, especialmente em condições de vento. Segundo

Tomazela et al. (2003), com o objetivo de minimizar as perdas por deriva pelo vento, aspersores de impacto com ângulos de trajetória de 23° foram substituídos por aspersores com ângulo de trajetória de 6°, instalados sobre a tubulação do pivô, ou seja, na parte mais alta do equipamento.

Em razão do alto custo com energia elétrica, foram desenvolvidos sistemas de aspersão de baixa pressão visando reduzir os custos com energia elétrica e aumentar a eficiência de irrigação (Broner, 2005). Segundo o autor, o principal obstáculo de um sistema de aspersão de baixa pressão é seu reduzido raio de alcance. Essa significativa redução no raio de alcance, por consequência resulta no aumento da taxa de aplicação instantânea para possibilitando ao sistema aplicar a mesma lâmina de água no mesmo intervalo de tempo. Uma alta taxa de aplicação pode, frequentemente, induzir o escoamento superficial de água, resultando em redução na eficiência de irrigação.

Segundo Tomazela et al. (2003) e Carvalho & Silva (2007), na evolução dos emissores de baixa pressão, os primeiros a serem desenvolvidos foram do tipo *spray*, que se localizavam entre a tubulação do pivô e a superfície da cultura irrigada, posição essa que permitiu uma redução significativa das perdas por deriva do vento e evaporação, quando comparadas com os sistemas anteriores. Devido à sua localização intermediária, esses sistemas de aplicação foram classificados como MESA, do inglês *medium elevation spray application*.

Em seguida, visando à aplicação de água mais próxima às culturas, foi desenvolvido o sistema classificado como LESA (sigla para o inglês *low elevation spray application*), caracterizado por aplicar a água bem próximo às culturas irrigadas. Sempre objetivando a redução nas perdas por evaporação e deriva pelo vento, surgiram emissores mais eficientes em termos de distribuição de água, como *Wobbler*, *i-Wobbler*, LDN, etc (Tomazela et al., 2003).

Os sistemas de aplicação citados anteriormente se caracterizavam por aplicar a água em toda a área irrigada, conforme os métodos de irrigação por

aspersão. Visando uma maior eficiência de aplicação, os engenheiros agrícolas Bill Lyle e James Bordovsky, da Estação Experimental de Agricultura de Lubbock, Texas, EUA, desenvolveram, em 1983, o sistema de irrigação *low energy precision application*, ou LEPA, que gerou o aparecimento de emissores que procuram distribuir a água de maneira localizada, em sulcos ou próximo às raízes das plantas (Carvalho & Silva, 2007).

Segundo King & Kincaid (1997), a eficiência de aplicação de sistema LEPA é da ordem de 90% a 95%. Esta eficiência é o resultado da reduzida evaporação. Devido à localização dos emissores muito próxima aos cultivos e perto da superfície do solo, a porção de área molhada no solo e superfície da planta é minimizada. Entretanto, esse sistema tem como característica a elevada taxa de aplicação instantânea que, geralmente, excede a taxa de infiltração de água no solo, necessitando da construção de bacias para o armazenamento de água, enquanto ocorre a infiltração. Sua elevada taxa de aplicação e seu limitado espaço de cobertura tornaram os emissores LEPA inadequados para terrenos declivosos.

Segundo Tomazela et al. (2003), no início da utilização dos emissores LEPA, os produtores e os técnicos que orientavam e disseminavam a utilização desse sistema simplesmente faziam o redimensionamento dos bocais e as adaptações necessárias à mudança, sem se preocuparem com o redimensionamento de motobombas e com a utilização dos seus benefícios. Segundo o autor, após diversos estudos e observações de campo, chegou-se aos seguintes parâmetros para o dimensionamento desses equipamentos: espaçamento dos emissores variável entre 1,6 a 3,9 m, economia de água da ordem de 35%, faixa molhada pelo emissor de 2m, em média e limite de declividade do terreno em 4% em áreas circulares.

Em áreas de pivôs instalados com lâminas dimensionadas para a irrigação de plantios em área total e que passaram a ter lâminas altíssimas em

função da irrigação sobre a copa (localizada), até hoje, são observados problemas, como precipitação instantânea elevada e escoamento superficial; deficiência de aeração do solo, principalmente em solos de drenagem insuficiente, etc., sem, portanto, o devido conhecimento de características técnicas de emissores utilizados nesses sistemas, tão importante para o seu uso adequado e uma irrigação sustentável.

2.2 Cafeicultura irrigada por pivô central

A utilização da irrigação na cafeicultura redesenhou a distribuição geográfica do cultivo do café no Brasil, incorporando áreas antes não recomendadas para o plantio e transformando-as em novos polos de desenvolvimento da cultura e das regiões. A área de pouco menos de dez mil hectares de café irrigado, plantada em 1998, foi ampliada, uma década depois, para 233 mil hectares de café irrigados pelos mais diversos sistemas de irrigação, representando cerca de 10% da cafeicultura brasileira (Fernandes, 2008). Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa (2004), as lavouras cafeeiras irrigadas estão concentradas, principalmente, nos estados do Espírito Santo (60% a 65%), Minas Gerais (20% a 25%), Bahia (10% a 15%) e, em menores áreas, em Goiás, Mato Grosso, Rondônia e São Paulo.

Por volta de 1997, na Bahia, começou a ser difundido o sistema de irrigação tipo LEPA, utilizando-se emissores *Quad Spray*, da *Senninger*, para a cultura de café, em equipamentos tipo pivô central. O emprego do LEPA vem aumentando a cada ano, em regiões que apresentam maiores riscos de baixa precipitação pluviométrica e períodos extensos de deficiência hídrica. De acordo com Fernandes & Santinato (2003), essas áreas somavam cerca de 130 a 150 mil hectares de cafés plantados e tinham potencial para mais 100 a 110 mil hectares que, se irrigados, poderiam produzir de 8 a 10 milhões de sacas beneficiadas de café por ano, com produtividade de 2 a 3 vezes maior que a média histórica das

regiões tradicionais sem irrigação. Levantamentos indicam que a Bahia tinha, em 2004, aproximadamente 20.000 ha de cafeicultura irrigada com forte capacidade de expansão. O oeste baiano vem se destacando na implantação de um parque cafeeiro, totalmente irrigado (cerca de 14.000 ha) e de alta produtividade (60 sacas/ha). Do total de 14.000 ha implantados com café, até 2004, apenas 770 ha eram irrigados por gotejamento e o restante por pivô central, aproximadamente 94% da área (Associação dos Agricultores e Irrigantes do Oeste da Bahia - AÍBA, 2004). Destacam-se nessas áreas a utilização de pivôs central equipados com emissores do tipo LEPA e emissores “alternativos”, que aplicam água sobre a fileira de plantas, em plantio circular. Os emissores alternativos são diversas tentativas de uso do conceito LEPA de irrigação na cultura do cafeeiro, muitas vezes utilizadas sem nenhum critério de dimensionamento, como vazão, taxa instantânea de aplicação de água no solo, etc., causando problemas de erosão.

O uso da irrigação na função LEPA (*bubble e aerated bubble*), desde a fase inicial de desenvolvimento da cultura do café e com os problemas de elevadas taxas de aplicação de água, levaram à formação de crosta superficial nos solos (Tomazela et al., 2003). Os autores salientam que, para uma região como Barreiras, BA, onde existem áreas de cafeeiros irrigadas com emissor LEPA e os solos são de textura média, forma-se, nos sulcos de plantio, uma camada de material mais friável, de altura equivalente à profundidade de abertura desses sulcos. Dessa maneira, há uma tendência maior de infiltração de água nos sulcos de plantio, resultando na formação de um sistema radicular mais concentrado.

Segundo Tomazela et al. (2003), diferentes e intrigantes tentativas de uso do conceito LEPA de irrigação na cultura do café foram feitas, como, por exemplo, a dos tubos de PVC recurvado e perfurado, bacias, baldes e sacos plásticos, entre outras. Porém, essas tentativas apresentam sérios problemas

superficiais e desestruturação da superfície do solo, devido ao impacto das gotas de água contra ele.

Uma preocupação constante de grande parte dos cafeicultores irrigantes é o fato de que a irrigação possa prejudicar a qualidade do café produzido, principalmente no que tange à qualidade da bebida. Tal receio baseia-se no aumento da umidade provocado pela irrigação, que pode facilitar a fermentação dos frutos, tanto no chão quanto na planta (Vilela & Faria, 2002).

Percebeu-se que o desenvolvimento de um emissor para pivô central que agregasse baixo impacto erosivo e aplicação de água localizada sob a copa de cafeeiros seria extremamente econômico e benéfico ao meio ambiente.

2.3 Erosão hídrica

A degradação dos solos afeta drasticamente as terras agrícolas intensamente exploradas pelo homem e pode ser considerada um dos mais importantes problemas ambientais dos nossos dias.

Segundo Carvalho et al. (2002), dentre os tipos de degradação, a erosão hídrica é considerada a que mais tem contribuído para a baixa produtividade dos solos, incorporados aos sistemas de produção vegetal e animal, acelerada pelo homem, com suas práticas inadequadas de manejo.

A quebra dos agregados do solo causada pelo impacto direto das gotas de chuva e o escoamento superficial são os agentes ativos e o solo, o agente passivo no processo de erosão hídrica. A resistência dos solos à erosão hídrica apresenta grande amplitude devido à variabilidade climática, que influencia na erosividade das chuvas e a variedade de solos com características diferenciadas que se reflete na sua erodibilidade (Martins et al., 2003).

O processo erosivo consiste de três eventos sequenciais caracterizados pelo desprendimento, seguido de arraste e deposição das partículas do solo. O desprendimento é definido como a liberação de partículas dos agregados e, uma

vez desprendidas, elas podem permanecer próximas ao agregado ou ser transportadas (Kinnell & Cummings, 1993; Amorim, 1999; Gomes, 2006).

Segundo Carvalho et al. (2002), a erosão hídrica pode ocorrer na forma laminar, sulcos e voçorocas. A erosão laminar se caracteriza pela remoção de camadas delgadas da superfície do solo, apenas sendo perceptível na amostragem quando colocadas em béquer de um litro, após grande quantidade de solo ter sido removida. Tal fato não se torna perceptível no campo, a “olho nu”, uma vez que as partículas do solo removidas e que permanecem em suspensão e dispersas na água de escoamento são muito pequenas. Amorim et al. (2001) se referem a ela como a erosão entre sulcos, diferindo-a da erosão em sulcos, que se caracteriza pela formação de pequenas irregularidades no sentido da declividade do terreno, fazendo com que o escoamento superficial se concentre nos pontos mais baixos, atingindo volume e velocidade suficientes para formar canais com várias profundidades. Em complemento, caracteriza-se como voçoroca o deslocamento de grande quantidade de solo com a formação de canais de grandes dimensões, impedindo o trânsito de máquinas e reduzindo a área de plantio (Pruski, 1996).

Diferentes tipos de solo podem apresentar susceptibilidade diferenciada à erosão, mesmo para condições semelhantes de declividade, cobertura vegetal e práticas de manejo. Essas diferenças devem-se às propriedades do próprio solo e são denominadas erodibilidade do solo (Bertoni & Lombardi Neto, 1990; Ribeiro, 2006). Os autores classificam o fenômeno como a vulnerabilidade do solo ou a sua susceptibilidade à erosão, que é a recíproca da sua resistência à erosão. As propriedades do solo que mais influenciam a sua erodibilidade são aquelas que afetam a taxa de infiltração da água no solo, associada à sua resistência ao cisalhamento, sendo a textura um importante atributo relacionado à erodibilidade.

É grande a variabilidade espacial e temporal da erosão dos solos brasileiros, explicada pela diversidade climática, que influi no potencial erosivo das chuvas, e pela variabilidade de solos, que tem influência na sua susceptibilidade à erosão (Bertol, 1994; Bertol et al., 2002). Dessa maneira, os solos se tornam mais ou menos suscetíveis à erosão, não apenas associada à sua pedogênese, mas também em função do manejo adotado.

2.3.1 Erosão por salpico

A quantidade de solo desagregado e movimentado pelo impacto das gotas de chuva foi denominada, por Bolin (1978), como erosão por salpico.

A avaliação da ação erosiva da chuva, em sua fase inicial, independente da capacidade da enxurrada em transportar as partículas minerais e orgânicas, não será completa se os mecanismos de desagregação e salpico do solo pelo impacto das gotas de chuva não forem avaliados (Silva & Carvalho, 2002).

De acordo com Guerra (1999), no momento em que as gotas de chuva atingem o solo, começa o *splash*, também conhecido como erosão por salpicamento, que é o estágio inicial do processo erosivo, em que as partículas que compõem o solo são preparadas para serem transportadas pelo escoamento superficial. Essa preparação se dá tanto pela ruptura dos agregados como pela própria ação transportadora que o salpicamento provoca nas partículas. O *splash* pode variar em função da resistência do solo ao impacto das gotas da chuva e da energia cinética contida por elas que, em função de sua intensidade, como já citado, provocarão a ruptura dos agregados.

Muitos estudos têm contribuído para o melhor entendimento sobre a dinâmica do salpicamento e têm indicado que o salpicamento é um processo dependente do tempo. Sua importância para o desprendimento e o transporte de solo depende da umidade inicial do solo e de características da chuva, tais como tamanho de gotas, velocidade de impacto e energia cinética (Truman &

Bradford, 1990; Vilela, 1995), ângulo de impacto de gotas (Cruse et al., 2000), estabilidade de agregados na superfície, selamento superficial, textura e estrutura do solo (Reichert & Cabeda, 1992; Reichert et al., 1993; Silva et al., 1995; Legout et al., 2005) e declividade do terreno (Sutherland et al., 1996).

Legout et al. (2005), avaliando a quantidade de solo salpicado devido ao impacto de gotas de chuva simulada em solos com diferentes texturas, encontraram maior salpicamento em solos arenosos, seguido dos siltosos e argilosos. Reichert et al. (1993) e Dufranc et al. (2004) encontraram efeito negativo da fração areia na estabilidade de agregados. Reichert & Cabeda (1992) demonstraram que a quantidade de material salpicado diminuiu com o aumento do conteúdo de argila, óxidos de ferro amorfo e óxidos de ferro e alumínio cristalinos.

Brandão et al. (2007), ao determinarem as perdas de solo por salpicamento em diferentes classes de solo, verificaram, para o Latossolo Vermelho-Amarelo, valores médio de perdas de solo entre 2,3; 2,0; 10,2; 20,2; 13,9 e 32,3 t ha⁻¹, ao simular chuvas com energia cinética variável entre 0, 525, 1.051, 2.102, 3.153 e 4.204 J m⁻², respectivamente. Galdino et al. (2003), ao estudarem as perdas de solo na bacia do Alto Taquari, verificaram que as Areias Quartzosas e o Latossolo Vermelho-Amarelo foram as classes de solos com maior índice de perda de solo.

Silva & Carvalho (2002) verificaram, para as condições de chuva natural em Argissolo Vermelho Amarelo, que as taxas de salpico foram positivamente correlacionadas com a erosividade da chuva e que, para a condição de solo descoberto, apesar de as taxas de salpico terem sido superiores às do solo com cobertura, houve tendência de elas decrescerem com o aumento da erosividade da chuva. Segundo Reichert & Cabeda (1992), houve um aumento nas taxas de salpico nos solos com baixa estabilidade de agregados até aproximadamente o início do escoamento superficial, atingindo uma taxa aproximadamente

constante, com a formação do selamento superficial. Contudo, esse comportamento não foi observado nos solos com alta estabilidade de agregados. Além disso, as menores taxas de salpico foram verificadas para os solos com menores teores de argila, bem como nos solos pré-umedecido, em relação ao solo seco ao ar livre.

De acordo Truma & Bradford (1990), a umidade inicial no solo antes da ocorrência de uma chuva influencia as taxas de salpico e os processos físicos que controlam a quantidade de salpico. Os autores destacam a importância de se determinar as taxas de salpico para um solo em particular, sob um dado conjunto de condições, não devendo fazer uso de extrapolações para condições diferentes. Esta consideração se deve à dinâmica do processo de salpicamento e a medidas de perdas de solo ao longo de um intervalo de tempo específico, tendo pouco significado, a menos que fatores que controlam o processo sejam definidos.

Estudar o impacto de emissores utilizados em sistemas pivôs central em laboratório e evoluir no sentido de desenvolver emissores de baixo impacto erosivo são medidas bastante importantes, principalmente quando contemplados por estudos da vulnerabilidade de áreas irrigadas aos novos emissores, ao longo do tempo.

2.4 Taxa de aplicação de água

De acordo com Rodrigues et al. (1999), uma das dificuldades para o dimensionamento de um pivô central é estimar a taxa de aplicação máxima que pode ser aplicada sobre o solo sem provocar escoamento superficial. Convencionalmente, a taxa de aplicação é calculada em função de um valor médio da velocidade de infiltração básica. Uma vez que as propriedades do solo variam ao longo da área irrigada, essa prática pode resultar em áreas com diferentes valores de escoamento superficial. A taxa de aplicação é um dos parâmetros de maior importância na irrigação por pivô central. Quando essa taxa

excede a capacidade de infiltração do solo, ter-se-ão o acúmulo de água sobre a superfície do terreno e a possibilidade de escoamento superficial, o que, tanto num caso como no outro, é incompatível com uma boa eficiência de irrigação.

Segundo Assouline & Ben-Hur (2006), a taxa de chuvas e a declividade da superfície estão fortemente relacionadas à erosão em entressulcos, que envolve a desagregação e o transporte de partículas de solo pelo impacto das gotas de chuva. A taxa de chuvas foi, para Watson & Laflen (1986), a mais importante variável para a estimativa da erosão em entressulcos, comparada com a resistência do solo à erosão e a declividade.

Alguns aspectos operacionais do sistema pivô central estão relacionados com a taxa de aplicação de água. Kincaid (2005) desenvolveu uma equação para prever a largura do padrão de pulverização como uma função de vazão do bocal, pressão e altura de instalação para um tipo específico de *spray*. Esta equação, combinada com um tamanho de bocal e equação de vazão e coeficientes para tipos de emissores específicos (*Spray*, *i-wob*, entre outros), promove um meio de prever a taxa média e máxima de aplicação em algum local ao longo de um pivô central ou lateral móvel, conhecido o projeto e o tipo de placa, a altura de instalação, o espaçamento e a pressão.

Com todos estes fatores relacionados com o padrão da taxa de aplicação, foram desenvolvidos muitos estudos para o conhecimento do tipo de perfil que melhor representa a taxa de aplicação de água em sistemas pivô central.

Variações temporais do valor da taxa de aplicação de água em pivôs central são analisadas sob a hipótese de que, durante o intervalo de tempo correspondente ao tempo de molhamento, a taxa de aplicação de água segue um modelo elíptico (Kincaid et al., 1969; Dillon et al., 1972; Gilley, 1984; Bernuth & Gilley, 1985). Entretanto, outros consideram que o perfil parabólico (Luz & Heermann, 2005) ou o padrão trapezoidal (DeBoer, 2001; Kincaid, 2005) são mais adequados.

A taxa de aplicação de água ao longo da tubulação lateral de um pivô pode ser descrita em termos de taxa média, taxa máxima e taxa instantânea (Kincaid, 2005). Segundo o autor, a taxa média é definida como a taxa de fluxo de água por unidade de área molhada do padrão pulverizado, e pode ser calculada a partir da vazão por unidade de comprimento da lateral e a largura padrão total ou radial dos aspersores. A taxa máxima de aplicação foi considerada como, aproximadamente, o ponto acima do padrão de aplicação médio ou suave a partir do padrão de sobreposição de aspersores ao longo da lateral. A taxa de aplicação instantânea pode ocorrer para curtos períodos de tempo, devido à concentração de pulverização a partir de muitos jatos de aspersores, ou de placas ranhuradas, não rotativas. Mas, essas taxas são difíceis de quantificar.

Considerando que em toda área irrigada é aplicada uma mesma lâmina bruta, o valor médio ($imed_{r_s}$) da taxa real de aplicação de água requerida em cada distância ao longo da lateral (r_s) ao ponto do pivô, que representa a razão entre a lâmina bruta aplicada (L_b em mm) e o tempo de molhamento (Tm_{r_s} em horas), pode ser estimado pela Equação 1, segundo Keller & Bliesner (1990) e Colombo (2003).

$$imed_{r_s} = \frac{L_b}{Tg} \frac{2\pi r_s}{W_{r_s}} \quad (1)$$

em que

$imed_{r_s}$ = valor médio da taxa real de aplicação de água em cada distância r_s do ponto do pivô, mm h^{-1} ;

L_b = lâmina bruta aplicada, mm;

$2.\pi.r_s$ = perímetro correspondente ao bocal localizado a distância r_s do ponto pivô, m;

Tg = tempo necessário para o pivô central completar um giro de 360° , h;

W_{rs} = largura média do padrão molhado do bocal na distância r_s do ponto do pivô, m.

A largura do padrão molhado é definida como a largura medida perpendicularmente à linha lateral do pivô, da faixa que é irrigada simultaneamente pelo pivô. A largura do padrão molhado é função do raio molhado dos emissores nas imediações do ponto considerado. Segundo Colombo (2003), nos equipamentos pivô central que apresentam emissores com vazão crescente ao longo da linha lateral, a largura do padrão molhado tende a aumentar à medida que se afasta do ponto central do pivô.

A lâmina bruta (L_b) a ser aplicada em uma área de pivô central pode ser calculada pela Equação 2, de acordo com Colombo (2003) e Oliveira et al. (2004).

$$L_b = \frac{Tg Qt}{10 A} \quad (2)$$

em que

Qt = vazão total do sistema, $m^3 h^{-1}$;

A = área total irrigada, ha.

Segundo Colombo (2003), uma relação entre a taxa média de aplicação ($imed_{rs}$) e a taxa máxima de aplicação ($imax_{rs}$) foi estabelecida de forma que a área sob a curva de uma função entre taxa de aplicação ($ia(t)_{rs}$) versus tempo do modelo elíptico tenha valor igual ao produto $imed_{rs} \cdot Tm_{rs}$. Assim, para uma dada distância r_s do ponto do pivô, o valor de $imax_{rs}$ e, conseqüentemente, o de $imed_{rs}$, independem da regulagem do tempo de giro. De acordo com o autor, essa

independência do tempo de giro é descrita pela Equação 3, quando se leva em conta que as razões (L_b/Tg) e (r_s/W_{rs}) são constantes e características de cada equipamento.

$$i \max_{r_s} = 8 \frac{L_b}{Tg} \frac{r_s}{W_{rs}} \quad (3)$$

em que

$i \max_{r_s}$ = valor máximo da taxa real de aplicação de água em cada distância r_s do ponto do pivô, mm h^{-1} ;

r_s = distância r_s radial ao ponto do pivô, m;

Smith et al. (2008), ao desenvolverem um modelo semiempírico para predição do padrão de aplicação de chuvas, consideraram que o perfil lateral de lâmina aplicada seja igual à integral ou o somatório do padrão de aspersão na direção paralela à direção de deslocamento. Isso consiste de lâminas mensuradas (L_i) obtidas de uma série de distância lateral (x_i), iniciando a partir do curso do trajeto do lado externo da área molhada e finalizando tão perto quanto praticamente possível do emissor. Não há, especificamente, requerimentos para essas medidas, mas é aconselhável que elas sejam espaçadas próximas e aproximadamente equidistantes. Similarmente, o padrão de aspersão é previsto como uma série de círculos concêntricos de raio (r_i) que têm a taxa de aplicação (T_i) e cujo espaçamento corresponde ao espaçamento da lâmina mensurada.

Para a primeira medida diferente de zero, a taxa de aplicação variará de zero quando o raio externo do padrão de aspersão alcançar esse ponto a um valor máximo, em que o emissor está alinhado com a distância radial e, então, se reduzirá a zero, enquanto o emissor se move (Figura 1).

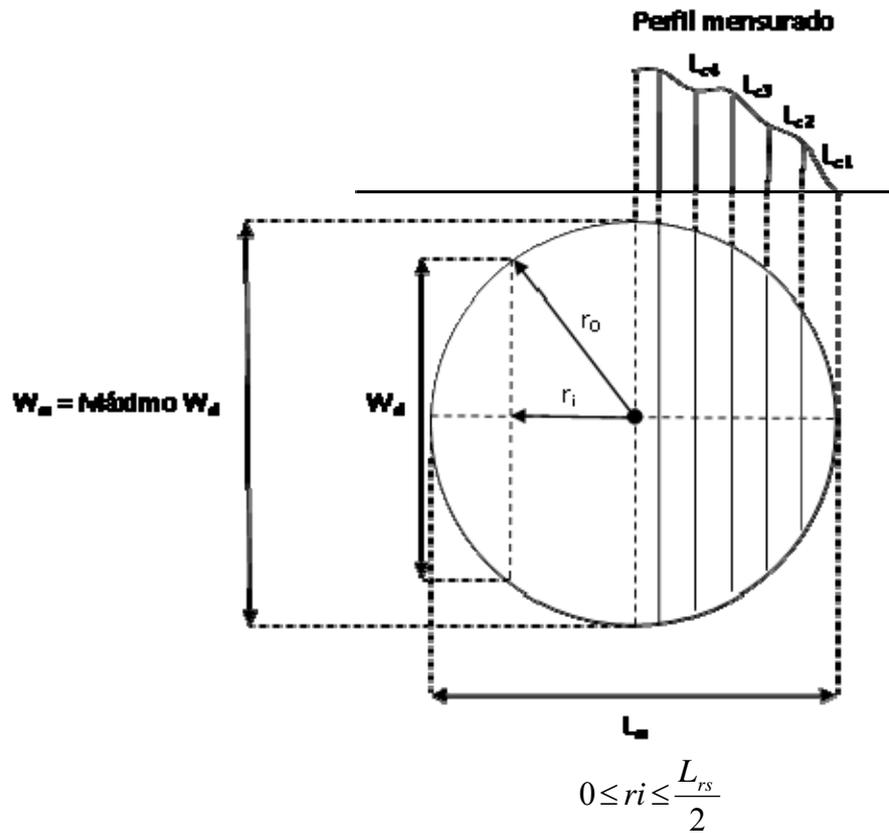


FIGURA 1 Procedimento para a determinação do perfil de distribuição de água na largura do padrão molhado mensurado.

A distância percorrida pelo emissor em um tempo de contribuição para a lâmina de água (L_i) é dada pela Equação 4, segundo Smith et al. (2008).

$$W_{ri} = 2\sqrt{r_0^2 - r_i^2} \quad (4)$$

em que

W_{ri} = largura do padrão molhado na distância r_i ao bocal, m.

r_0 = distância do coletor sem água ao bocal, m;

r_i = distância do coletor com água r_i ao bocal, m;

A taxa média de aplicação de água na largura do padrão molhado W_{ri} é dada pela Equação 5, segundo Smith et al. (2008)

$$imed_{ri} = \frac{L_c}{W_{ri}} V_{rs} \quad (5)$$

em que

L_c = lâmina média de água coletada à distância r_i do bocal, mm;

V_{rs} = velocidade de deslocamento do bocal à distância r_s do ponto do pivô, m h⁻¹.

Em trabalhos recentes (Granier et al., 2003; Smith et al., 2008; Prado, 2008; Faria et al., 2009; Oliveira et al., 2009) tem sido considerado o cálculo da distância percorrida pelo emissor, para a estimativa da taxa média de aplicação de água, conforme descrito no modelo semiempírico desenvolvido por Smith et al. (2008).

Segundo Carvalho & Silva (2007) e Tomazela et al. (2003), são verificadas elevadas taxas de aplicação em emissores do sistema de aplicação de água precisa e de baixo consumo de energia (LEPA) e, por esta razão e ainda devido à limitada altura dos emissores ao solo, os mesmos são inadequados para uso em terrenos declivosos e com topografia, cuja declividade ultrapasse a 2%, salvo cuidados especiais.

Além do conhecimento da taxa de aplicação de água, a uniformidade de distribuição de água é mais uma característica que auxilia na caracterização da precipitação produzida pelos bocais de irrigação. Para se ter conhecimento da uniformidade de distribuição de água de um sistema de irrigação pivô central, os

coeficientes mais recomendados são o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) e o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD), segundo Dourado Neto et al. (1994). Muitos pesquisadores (Folegatti et al., 1998; Rodrigues et al., 2001; Moreira et al., 2004; Bernardo et al., 2005;) têm utilizado a Equação 6 para o cálculo da uniformidade de distribuição de água (CUD).

$$CUD = 100 \frac{L_{c25\%}}{\bar{L}_c} \quad (6)$$

em que

CUD = coeficiente de uniformidade de distribuição de água, %;

$L_{c25\%}$ = lâmina média ponderada de 25% da área total que recebeu as menores precipitações, mm;

\bar{L}_c = lâmina média ponderada, considerando todos os coletores, mm.

Segundo Bernardo et al. (2005), uma vez que cada coletor representa uma área maior, à medida que se afasta do centro do pivô têm-se que ponderar os valores coletados. O fator de ponderação é o número de ordem do coletor.

2.5 Impacto de gotas de chuva no solo

Para promover as tecnologias de predição da erosão dos solos, o mecanismo de cada processo de erosão deve ser entendido suficientemente para predizer as perdas de solo em determinados eventos. Segundo Cruse et al. (2000), o mecanismo do processo inicial de erosão, desprendimento de solo causado pela queda de gotas de chuva, requer extenso entendimento para melhorar os mecanismos básicos de predições.

O impacto das gotas, associado ao escoamento superficial, constitui o mecanismo responsável pela erosão entre sulcos ou laminar (Pruski, 1996).

Segundo Cruse et al. (2000), partículas de solo são desprendidas da superfície do solo se a força de impacto de gotas de chuva exceder a resistência das partículas ao movimento. A resistência de desprendimento de partículas está relacionada à força de cisalhamento do solo. Bergeron et al. (1999) dividem o fenômeno do impacto das gotas em três estágios: impacto, expansão e retração. A expansão ocorre nos dois milissegundos após o impacto e os fenômenos físicos que ocorrem são controlados pelas forças de inércia, da viscosidade e da capilaridade. No estágio de retração, que ocorre durante os 10 e 50 milissegundos subsequentes, a gota pode respingar da superfície ou simplesmente retrair lentamente até a sua posição de equilíbrio. Esses eventos são controlados pela competição entre as forças de dissipação viscosa das gotas e as forças de capilaridade que tentam minimizar a área superficial das gotas. Após a retração, os eventos de longo tempo são controlados pelas leis clássicas da termodinâmica, como as do coeficiente de dispersão e do ângulo de contato.

Durante a maior parte das chuvas, ângulos de impactos de gotas variam consideravelmente e dependerão da velocidade do vento e da topografia do solo. Intuitivamente, ângulos de impacto raramente serão igual 90° , como foi para a grande parte dos casos de estudos controlados que relaciona quantidade de solo desprendido à resistência do solo ao cisalhamento. A componente força atuando horizontalmente ao longo da superfície do solo aumentará e a componente força vertical decrescerá com o decrescimento do ângulo de impacto (Cruse et al., 2000).

A capacidade de gotas de chuva no desprendimento do solo pode ser determinada por uma descrição acurada de massa de gotas, forma e velocidade de impacto (Guzel & Barros, 2001). O tamanho, o número e a massa das partículas salpicadas e suas distâncias percorridas, em parte, dependem da velocidade ou do tamanho das gotas de chuva impactantes (Yang et al., 1991).

Segundo Guzel & Barros (2001), o efeito erosivo produzido pelo impacto direto de gotas de chuva na superfície do solo pode ser quantificado em relação à energia cinética de gotas. A forma da gota determina o tamanho da área de solo que deve suportar a energia de impacto da gota. Conseqüentemente, a forma da gota para o impacto também tem efeito importante na quantidade de salpico por gota.

A energia cinética, medida de impacto de gotas mais comum, que caracteriza a potencial ação das chuvas, considera em seu cálculo, entre outras propriedades físicas de chuva, como, tamanho e distribuição de gotas, a velocidade de queda das gotas (Eigel & Moore, 1983).

2.6 Velocidade de gotas

Como visto anteriormente, o impacto das gotas de água pode alterar a estrutura da camada superior do solo. As taxas de desagregação da estrutura estão aparentemente relacionadas à velocidade de impacto de gotas. É importante, todavia, quando da simulação de chuvas para estudos de escoamento e erosão, saber qual é a velocidade de impacto da gota e como ela se compara com o impacto de chuva natural.

A maioria dos estudos sobre impacto de gotas baseia-se no trabalho de Kohl, realizado em 1944. Neste trabalho, foram determinadas velocidades terminais de gotas de diversos diâmetros, caindo em trajetória vertical (Keller, 1984). Entretanto, as gotas emitidas pelos aspersores apresentam uma trajetória bastante diferente e dependente de diversos fatores, como, por exemplo, pressão de serviço, diâmetro de bocal, tipo de placa, modelo de aspersor, ângulo do bocal em relação à horizontal, altura do aspersor acima do solo e velocidade de saída das gotas (DeBoer et al. 2001; Montero et al., 2003; Conceição & Coelho, 2003).

Segundo Vories & Bernuth (1986), a partir do momento da formação da gota, elas podem ser tratadas como projéteis individuais e cada gota formada está sujeita a uma força de arrastamento aerodinâmica que atua ao longo do vetor velocidade, porém, em sentido oposto.

De acordo com Seginer (1965), com base na teoria balística de uma gota d'água emitida por um aspersor, pode-se dividir a trajetória de uma gota em dois tipos de movimento (ascendente e descendente). Para a obtenção da velocidade na direção resultante, Bernuth & Gilley (1984) sugeriram que se faça a soma algébrica entre as componentes X (direção horizontal) e Y (direção vertical).

A velocidade de impacto da gota com a superfície do solo parte do pressuposto de que o jato d'água se fraciona em gotas de diâmetros diferentes ao sair de um bocal. Muitas tentativas e técnicas têm sido desenvolvidas para mensurar o tamanho e a velocidade de gotas. Por exemplo, Laws & Parson (1943) utilizaram o método da farinha para mensurar o tamanho de gotas; Eigel & Moore (1983) introduziram o método fotográfico de imersão em óleo, para medir tamanho de gotas; Solomon et al. (1991) usaram a sonda laser e, recentemente, Niu et al. (2009) utilizaram um sofisticado sistema óptico, ambos para medir o tamanho e a velocidade de gotas de chuva artificial.

Eigel & Moore (1983) relatam que os métodos mais comuns de determinação da quantidade de energia de chuva natural ou artificial baseiam-se nas propriedades físicas de gotas de chuva, os quais demandam conhecimento de velocidade de queda, tamanho de gotas e distribuição de gotas.

De acordo com Lima et al. (1993), a velocidade de impacto de gotas de chuva com velocidade inicial zero pode ser calculada pela Equação 7.

$$v = \sqrt{\frac{g}{C_2}} \tanh(t\sqrt{gC_2}) \quad (7)$$

em que

v = velocidade, $m s^{-1}$

g = aceleração da gravidade, $m s^{-2}$

t = tempo de queda, s

C_2 = coeficiente de arraste, m^{-1}

ou, simplesmente, pela Equação 8.

$$v = \sqrt{\frac{g}{C_2}} \tanh[\cosh^{-1}(\exp[zC_2])] \quad (8)$$

em que

z = altura de queda, m.

Se forem considerados valores de “ z ” próximos ao infinito (como para chuva natural), a Equação 9 pode ser simplificada e usada para calcular a velocidade terminal.

$$v = \sqrt{\frac{g}{C_2}} \quad (9)$$

C_2 é o coeficiente de arraste, que representa a relação entre a força de arraste e a velocidade da gota. A força de arraste é a força exercida pelo ar em direção oposta ao vetor da velocidade. De acordo com Hills (1988), o coeficiente C_2 pode ser calculado para gotas maiores que 1,2mm, pela Equação 10.

$$C_2 = \left(\frac{0,804 - 0,264D + 0,066D^2 - 0,004D^3}{1,109D} \right) \quad (10)$$

em que

D = diâmetro da gota, mm

Seja para as condições de chuva natural ou para chuva simulada ou irrigação por aspersão, gotas de água de diferentes tamanhos podem alcançar diferentes velocidades de queda, fazendo com que a superfície do solo fique sujeita ao impacto dessas gotas com energia de diferentes magnitudes (Carvalho et al., 2002). Segundo Laws (1941) e Stillmunkes & James (1982), o tamanho de gotas e a altura de queda têm efeitos na velocidade de gotas. Para um mesmo diâmetro de gota, quanto maior for a altura de queda maior será a sua velocidade de impacto, até atingir valores praticamente constante (velocidade terminal), que pode ser calculada por $(g \cdot c^{-1})^{1/2}$, já que este é o limite da velocidade para altos valores de t , segundo Lima et al. (1993). Assim, quanto maior o diâmetro da gota, maior será a velocidade atingida por essa gota, como apresentado na Figura 2 e, conseqüentemente, maior será a sua energia cinética que aumenta com o quadrado da velocidade.

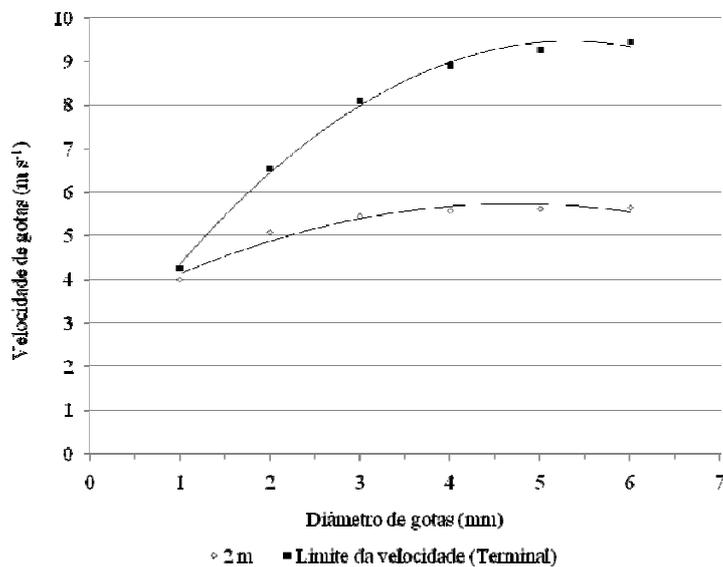


FIGURA 2 Efeito de tamanho de gotas e altura de queda na velocidade de gotas.

2.7 Energia cinética de gotas

De acordo com Bahia et al. (1992), o desprendimento das partículas de solo ocorre pelo efeito integrado da energia de impacto das gotas d'água e da força cisalhante do escoamento superficial, constituindo, assim, o estágio inicial e mais importante do processo de erosão hídrica.

Segundo Dijk et al. (2002) e Salles et al. (2002), a energia cinética de chuvas, todavia, representa o total de energia disponível para desagregar e transportar partículas pelo efeito de salpicamento proveniente de chuvas. Dessa forma, o conhecimento das relações entre energia cinética e taxa de chuva é importante para a predição de riscos de erosão.

Alguns pesquisadores (Lal, 1998; Wang et al., 2002; Lehrsch & Kincaid, 2006) desenvolveram estudos visando obter relações entre energia cinética e distribuição do tamanho de gotas. Segundo Martin et al. (2007), a energia cinética de uma gota pode ser expressa como $\pi\rho d^3v/12$, em que 'v' é a velocidade da gota, 'ρ' é a massa específica da água e 'd' o diâmetro da gota.

Se, por exemplo, uma gota de 2,74 mm de diâmetro caindo do repouso a diferentes alturas da superfície do solo tiver seu volume dividido em duas, cinco, dez, quinze e vinte partes iguais, conseqüentemente, a sua energia cinética total se reduzirá, podendo alcançar reduções significativas (Figura 3). Caso essa gota de 2,72 mm atinja a velocidade terminal, considerando-se as mesmas partes fracionadas, a sua energia cinética estimada seria reduzida em 2,6; 9,2; 24,7; 43,9 e 66 vezes, respectivamente, em relação à sua energia cinética com seu tamanho de gota inicial (Figura 4). Estas estimativas foram realizadas com base nas equações de velocidades de impacto (Lima et al., 1993) e no coeficiente de arraste (Hills, 1988).

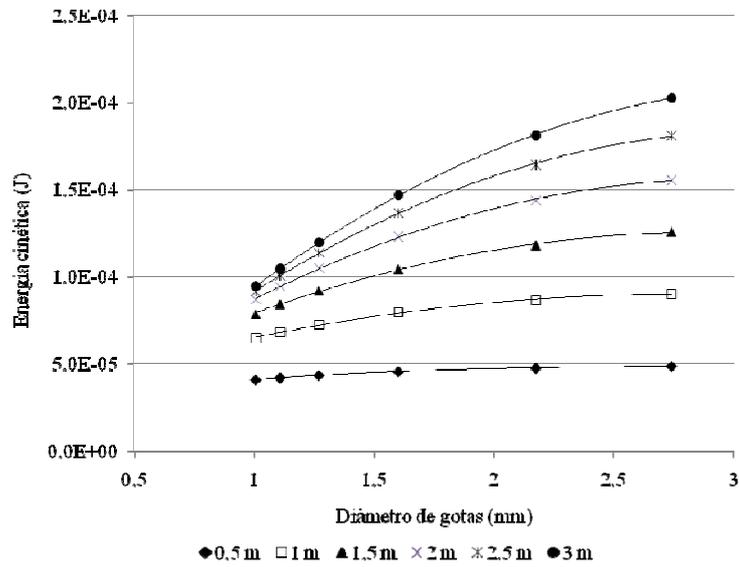


FIGURA 3 Efeito do tamanho de gotas e altura de queda na redução de sua energia cinética.

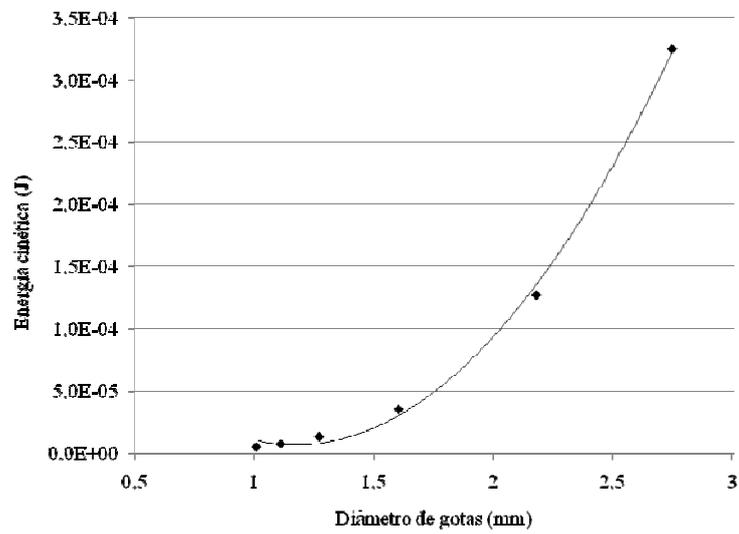


FIGURA 4 Efeito do tamanho de gotas na redução de sua energia cinética, quando alcançada a velocidade terminal.

Em alguns trabalhos (Stillmunkes & James, 1982; Thompson et al., 1993; Mohammad & Kohl, 1987) foi demonstrado que o selamento superficial está relacionado com a quantidade de energia cinética das gotas de chuva por unidade de área de impacto e a acumulação da energia com o tempo. A energia cinética por unidade de área aumenta com o diâmetro de gota, mas Kohl et al. (1985) e Martin et al. (2007) verificaram em altiplanos que, a energia cinética por unidade de área foi aproximadamente constante, mesmo com o aumento do tamanho de gotas. A energia cinética por unidade de área é proporcional ao diâmetro da gota, enquanto o coeficiente de arraste, como apresentado por Seginer (1965), é inversamente proporcional ao diâmetro da gota. Dessas interações, é certo que há relativamente pouca diferença na velocidade de gotas, quando estas excedem 2 ou 3 mm.

Modelos utilizados para predição de erosão do solo baseiam-se na energia cinética como um parâmetro de erosividade (Reichert et al., 1993; Lima & Andrade, 2001; Albuquerque et al., 2002). Como já mencionado, o conhecimento das relações entre taxa de chuva e energia cinética e suas variações no tempo e no espaço é importante para predições de erosão. Entretanto, entre consideráveis estudos, existem variações relacionadas às formas e aos coeficientes destas relações. Algumas diferenças podem ser explicadas por métodos de medição e interpretação e tamanho de amostras, escala e linha de tendência, enquanto parte da variabilidade corresponde a diferenças atuais nos mecanismos de geração de chuvas (Dijk et al., 2002).

Forte ênfase tem sido dada à energia cinética por volume-específico de chuva (EC_{mm}). Mensurações diretas de energia cinética de chuvas não estão amplamente disponíveis. Entretanto, extensas relações empíricas entre a taxa de chuva I e EC_{mm} mensuradas têm sido propostas na literatura (Salles et al., 2002).

Cantalice & Margolis (1993) verificaram que o índice EI_{30} (produto da energia cinética total da chuva pela sua intensidade máxima em trinta minutos)

apresentou um coeficiente de correlação de 72,8%, com relação às perdas de solo, enquanto o coeficiente de determinação explicou 56,1% da variação nas perdas de solo, sendo o valor máximo de intensidade de 196 mm h⁻¹, por apenas três minutos. Estes resultados estão de acordo com os encontrados por Nascimento & Chaves (1996) que, além de utilizar o intervalo de tempo de 30 minutos, utilizaram também intervalos de tempo de 5, 10, 15 e 60 minutos. Albuquerque et al. (2002) observaram que, dentre diversos parâmetros de erosividade da chuva, os que melhor se correlacionaram com as perdas de solo foram os que incluíram o produto do volume de chuva pela intensidade máxima em trinta minutos. Segundo Silva et al. (1997), valores de perdas de solo tiveram boa correlação com chuvas de curta duração, embora tenham se correlacionado melhor com chuvas de longa duração, indicando em efeito de aumento de deflúvio, em vista da capacidade de redução de infiltração de água no solo.

Stillmunkes & James (1982) concluíram que a energia cinética por unidade de área é dependente da taxa de aplicação e do intervalo de tempo em que a água é aplicada. Segundo os autores, a energia cinética por unidade de área é dada pela Equação 11.

$$\frac{Ke}{a} = \frac{\rho d v^2}{2} = \frac{\rho R T v^2}{2} \quad (11)$$

em que

Ke/a = energia cinética por unidade de área

ρ = massa específica da água

d = lâmina de água aplicada

v = velocidade da gota

R = taxa de aplicação média

T = tempo de exposição

A massa específica da água e a lâmina aplicada são, geralmente, conhecidas ou são relativamente fáceis de determinar. Todavia, apesar de a velocidade ser igualmente mensurada ou calculada, os métodos para a sua estimativa são trabalhosos, como, por exemplo, o método da farinha, enquanto métodos para mensuração possuem custo elevado. Segundo DeBoer & Monnens (2001), é relativamente elevado o custo para obter valores de parâmetros usados para estimar a distribuição do tamanho de gotas e energia cinética associada a aspersores de irrigação.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido no Laboratório de Hidráulica e Irrigação (LHI), do Departamento de Engenharia (DEG), no câmpus da Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, MG. O trabalho foi desenvolvido em três etapas, a saber:

Etapa I

Caracterização da taxa média de aplicação de água e perdas de solo por erosão hídrica (erosão em sulco e entre sulcos), de um Latossolo Vermelho-Amarelo textura média, provenientes de bocais do emissor tipo LEPA, configuração *Bubble* (LEPA 1) do *Quad-Spray* da *Senninger Irrigation*.

Etapa II

Desenvolvimento e construção de protótipos de emissor tipo LEPA, de aplicação de água localizada sob a copa de cafeeiros, a ser utilizado em plantio circular irrigado por pivô central.

Etapa III

Caracterização da taxa média de aplicação de água e perdas de solo por erosão hídrica (erosão em sulco e entre sulcos), de um Latossolo Vermelho-Amarelo textura média, provenientes de protótipos de emissor tipo LEPA.

3.2 Caracterização química, física e físico-hídrica do solo

Foram coletadas amostras de solo na profundidade de 0 a 0,2 m e, em um solo localizado no município de Itumirim, região sul de Minas Gerais. As amostras foram preparadas e submetidas às análises químicas, físicas e físico-hídricas, realizadas conforme metodologia apresentada pela Embrapa (1997). Foram determinados os atributos químicos, tais como: os teores de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e Alumínio (Al^{3+}), acidez potencial (H+Al), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica efetiva (t), capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (T), saturação de bases (V), saturação de alumínio (m), matéria orgânica (MO) e fósforo remanescente (P-rem). Foram determinados os atributos físicos do solo, tais como: textura, distribuição do tamanho de partículas do solo: areia grossa (AG), areia fina (AF), silte (S) e argila (A), densidade de partículas (dp) e densidade do solo (ds). Os atributos físico-hídricos determinados foram, a umidade do solo a 10 kPa (θ_{cc}) e a 1500 kPa (θ_{pmp}). Os resultados analíticos obtidos estão apresentados nas Tabelas 1 e 2.

TABELA 1 Resultados dos atributos químicos do solo estudado.

Sigla	Valores
pH	5,6
P (mg dm^{-3})	1,2
K (mg dm^{-3})	16
Ca^{2+} ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,2
Mg^{2+} ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,1
Al^{3+} ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,3
H+Al ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	3,6
SB ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,3
(t) ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	3,2
(T) ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	2,4
V (%)	13,9
m (%)	47
MO (g kg^{-1})	0,5
P-rem (mg L^{-1})	32,6

TABELA 2 Resultados da caracterização física e físico-hídrica do solo estudado.

Sigla	Valores
AG (%)	22
AF (%)	47
S (%)	10
A (%)	21
dp (g cm ⁻³)	2,44
ds (g cm ⁻³)	1,35
θ_{cc} (g ¹ g ⁻¹)	0,27
θ_{pmp} (g ¹ g ⁻¹)	0,11

O uso deste tipo de solo justificou-se pela sua suscetibilidade à erosão hídrica, de forma semelhante a que ocorre nas regiões que utilizam o pivô central equipado com emissores tipo LEPA, notavelmente o emissor *Quad-Spray* da *Senninger Irrigation*, permitindo assim, a comparação do impacto erosivo entre os emissores tipo LEPA avaliados. O estudo não visa obter estimativas de perdas de solo por erosão hídrica do Latossolo vermelho-Amarelo textura média por ação dos emissores tipo LEPA, igual seria em condições de campo, mas sim verificar o impacto erosivo dos emissores tipo LEPA em estudo e, conseqüentemente auxiliar no desenvolvimento de um emissor tipo LEPA de baixo impacto erosivo.

3.3 Condução do experimento (Etapa I)

A caracterização da taxa média de aplicação de água de bocais do emissor *Quad-Spray*, configuração *Bubble* (LEPA 1) e a perda de solo por erosão hídrica de Latossolo Vermelho-Amarelo textura média submetido à irrigação por este emissor, foi instalado e conduzido no LHI/DEG/UFLA, em Lavras, MG.

3.3.1 Características construtivas do emissor *Quad-Spray* tipo LEPA

O *Quad-Spray* opera em quatro diferentes modalidades: *bubble*, *aerated bubble*, *spray irrigate* e *chemigate*, que basicamente se diferenciam pela forma de distribuição da água aplicada. O *Quad-Spray* é composto pelos componentes apresentados na Figura 5, como **adaptador**, que permite a conexão de regulador de pressão no interior do emissor; **regulador de pressão**, que tem a função de controlar e manter constante a vazão de água aplicada, em que seu uso interno ao emissor é opcional; **capa**, que atua como uma proteção dos componentes internos do emissor e ajuda a manter a aplicação de água localizada; **bocal**, abertura de saída de água, conectada ao regulador de pressão e, associado a este, tem a função de controlar a vazão. Existe um total de 46 bocais possíveis de serem utilizados no emissor *Quad-Spray*; **placa defletora reversível**, componente do emissor que promove a distribuição da água que sai do bocal em jatos d'água, após incidir sobre a mesma. Possui ranhuras nos seus dois lados e a utilização de um dos lados dependerá da modalidade de uso do *Quad-Spray*.

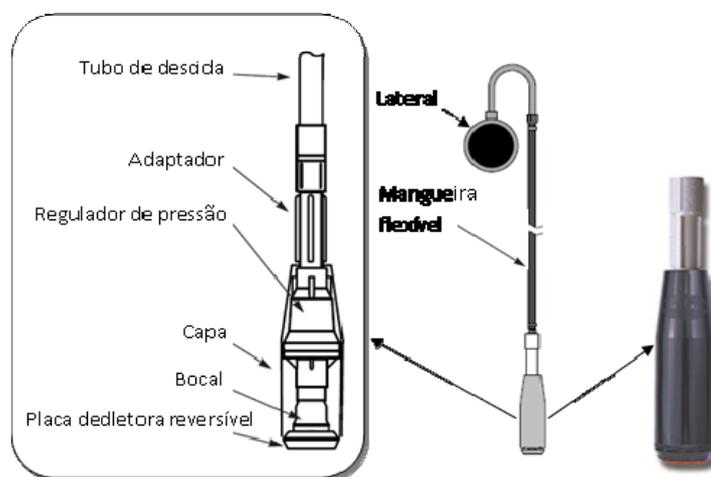


FIGURA 5 Emissor *Quad-Spray* da *Senninger Irrigation*.

Fonte: adaptado de *Senninger Irrigation Inc* (2008a,b).

3.3.2 Instalação do emissor

O emissor *Quad-Spray*, fabricado pela *Senninger Irrigation*, foi avaliado na configuração *bubble* (LEPA 1), especificamente para aplicação precisa de água a baixo consumo de energia, operando com bocais de diâmetro de orifício variando de 1,59 a 9,92 mm, sob o controle de regulador de pressão de operação de 68,95 kPa (10 PSI), conforme apresentados na Tabela 3.

TABELA 3 Especificações técnicas dos bocais do emissor *Quad-Spray* conforme dados de catálogo do fabricante *Senninger Irrigation Inc.*

Número do bocal	Diâmetro do orifício (mm)	Vazão (L h ⁻¹)*
4	1,59	79,49
5	1,98	124,92
6	2,38	186,24
7	2,78	254,38
8	3,18	329,33
9	3,57	413,37
10	3,97	511,03
11	4,37	601,88
12	4,76	717,71
13	5,16	856,26
14	5,56	997,08
15	5,95	1146,98
16	6,35	1315,05
17	6,75	1476,31
18	7,14	1646,65
19	7,54	1814,73
20	7,94	1987,34
21	8,33	2162,23
22	8,73	2337,11
23	9,13	2539,25
24	9,53	2739,12
25	9,92	2961,71

*Valores de vazão a pressão de operação de 68,95 kPa.

Considerando a variação de vazão entre os 22 bocais utilizados, foram necessários dois modelos de regulador de pressão, os quais foram projetados

para aplicar as seguintes vazões: baixa vazão 22,68 a 1814,4 L h⁻¹ e média vazão 79,4 a 3628,8 L h⁻¹, conforme curvas de regulador de pressão e valores de vazão de bocais fornecidos pelo fabricante.

O emissor *Quad-Spray* foi fixado a uma tubulação lateral suspensa, de aço galvanizado com diâmetro interno de 57,3 mm, por meio de um tubo de descida (Tubo de PVC branco), com diâmetro interno de 19,1 mm (Figura 6).



FIGURA 6 Emissor *Quad-Spray* conectado a tubulação lateral suspensa.

Os 22 bocais foram individualmente conectados no *Quad-Spray*, permanecendo a uma altura de dois metros da superfície das amostras de solo e coletores de água, posicionados sobre uma plataforma móvel denominada Dispositivo de Movimento Linear Controlado (DMLC), conforme Figura 7. A plataforma se movimenta sobre um trilho metálico, passando sob o emissor *Quad-Spray*. Com auxílio do painel de controle de velocidade, que possui um componente de reversão de direção de movimento, foi possível simular o deslocamento de operação dos bocais de diferentes diâmetros de orifício, de modo a aplicarem a mesma lâmina de água.

A



B



C



FIGURA 7 Área experimental constituída de: A) Emissor *Quad-Spray* com regulador de pressão e estrutura de coleta de dados; B) Dispositivo de Movimento Linear Controlado (DMLC) e painel de controle de velocidade; C) Suporte para coletores de água e amostras de solo fixado sobre o DMLC. Laboratório de Irrigação, DEG/UFLA.

3.3.3 Controle da irrigação

Para a realização das avaliações de taxa média de aplicação de água e perdas de solo por erosão hídrica, provenientes de 22 bocais do emissor *Quad-*

Spray, na configuração LEPA 1, foi necessária a mensuração da vazão (q_b) e da largura do padrão molhado (W_{rs}) de cada bocal. Foi adotada uma lâmina bruta de água (L_b) a ser aplicada igual a 3,5 mm e um tempo de giro (T_g) de 8 horas. Essas informações foram necessárias para o cálculo da velocidade de deslocamento dos bocais do emissor *Quad-Spray*. Assim, o tempo de exposição dos coletores de água e das amostras de solo aos bocais do emissor *Quad-Spray* foi apenas o suficiente para que fosse aplicada a mesma lâmina de irrigação entre os diferentes bocais.

3.3.4 Vazão

A vazão dos bocais de diâmetro 1,59 a 9,92 mm acoplados ao emissor *Quad-Spray* foi medida com o auxílio de um recipiente de volume conhecido e de um cronômetro. Mediu-se o tempo necessário para a aquisição de um volume de 20 Litros de água. A vazão de cada bocal foi medida considerando-se, para o mesmo, o uso de regulador de pressão de operação de 68,95 kPa e baixa vazão de 22,68 a 1814,4 L h⁻¹ ou média vazão de 79,4 a 3628,8 L h⁻¹, conforme vazão do bocal e curvas de reguladores de pressão apresentados pelo fabricante. A pressão de operação na entrada do emissor era sempre aferida no momento do teste por meio de um manômetro de mercúrio.

3.3.5 Padrão de distribuição de água

A largura do padrão molhado (Figura 8) dos bocais de diâmetro 1,59 a 9,92 mm, acoplados ao emissor *Quad-Spray*, foi mensurada com o auxílio de uma trena, tomando-se quatro medidas de alcance de água em quatro sentidos diferente, devido à sua forma aproximadamente circular de distribuição de água. Para o cálculo da velocidade de deslocamento dos 22 bocais, foi considerado um valor médio da largura do padrão de molhamento de cada bocal.

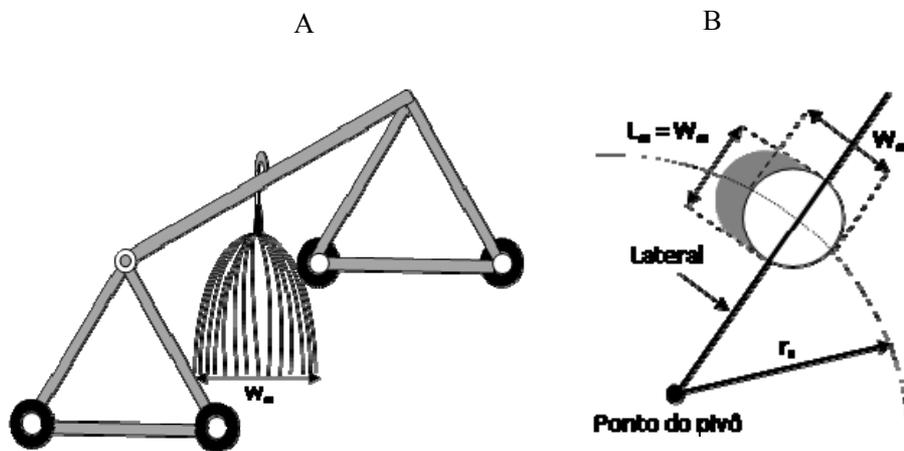


FIGURA 8 Largura do padrão molhado (W_{rs}) e da faixa molhada (L_{rs}) de um pivô central equipado com o emissor *Quad-Spray*: A) Vista transversal; B) Vista superior.

3.3.6 Estimativa da velocidade de deslocamento dos bocais

Considerando que todos os pontos ao longo da linha lateral de um pivô central completam o giro ao mesmo tempo, a velocidade tangencial (V_{rs}) em uma dada distância r_s do ponto do pivô foi calculada pela Equação 12, segundo Colombo (2003).

$$V_{rs} = \frac{2\pi r_s}{Tg} \quad (12)$$

em que

$2\pi r_s$ = perímetro correspondente ao bocal localizado à distância r_s do ponto do pivô, m;

V_{rs} = velocidade de deslocamento do bocal na distância r_s do ponto do pivô, em $m h^{-1}$.

Para a estimativa do perímetro ($2\pi r_s$) foram utilizados, além dos valores adotados de lâmina bruta e tempo de giro, valores experimentais de vazão e largura do padrão molhado mensurado para cada bocal, conforme descrito anteriormente. O cálculo do perímetro de caminhamento do bocal à distância “ r_s ” do ponto do pivô foi realizado pela Equação 13, conforme apresentada por Colombo (2003). Entretanto, considerando apenas que seja aplicada uma mesma lâmina bruta na área localizada, irrigada pelos bocais do emissor *Quad-Spray*, de perímetro $2\pi r_s$ e largura do padrão molhado W_{rs} específica de cada bocal, desconsiderando assim a porcentagem de área molhada.

$$2\pi r_s = \frac{q_b Tg}{W_{rs}} \quad (13)$$

em que

q_b = vazão média do bocal, $L h^{-1}$;

L_b = lâmina bruta adotada, mm;

W_{rs} = largura do padrão molhado do bocal na distância r_s do ponto do pivô, m.

3.3.7 Taxa média de aplicação de água

Foram utilizados coletores de água com 0,58 m de altura e 0,098 m de diâmetro, dispostos em linha perpendicular ao trilho de movimentação do DMLC e espaçados um do outro a uma distância de 0,12 m, totalizando, para o maior bocal (9,92 mm de diâmetro), 33 pontos de coleta ao longo da largura da faixa molhada (Figura 9). O volume de água coletado foi determinado por

O valor médio da taxa real de aplicação de água ($imed_{rs}$) de cada bocal do emissor *Quad-Spray*, à distância r_s do ponto do pivô, foi estimado pela Equação 14.

$$imed_{rs} = \frac{\sum_{i=1}^n (imed_{ri} W_{ri} S_c)}{\sum_{i=1}^n (W_{ri} S_c)} \quad (14)$$

em que

$imed_{rs}$ = taxa média de aplicação de água do bocal à distância r_s do ponto do pivô, mm h^{-1} ;

$imed_{ri}$ = taxa média de aplicação de água no coletor à distância r_i do bocal, mm h^{-1} ;

W_{ri} = largura do padrão molhado na distância r_i do bocal, m;

S_c = espaçamento entre coletores (0,12 m);

n = número de coletores ao longo da largura da faixa molhada do bocal (“n” variável de acordo com o diâmetro do bocal).

3.3.8 Uniformidade de distribuição de água

A uniformidade de distribuição de água na área molhada por cada bocal do emissor *Quad-Spray*, bem como do conjunto de 22 bocais deste mesmo emissor, foi determinada pelo coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD), conforme Equação 6 apresentada por Bernardo et al. (2005). O fator de ponderação utilizado para calcular o CUD de cada bocal do emissor *Quad-Spray* foi o tamanho da área correspondente à largura do padrão molhado de cada coletor ao longo do perfil de distribuição de água, enquanto o valor de CUD do conjunto de 22 bocais do emissor *Quad-Spray*, ou seja, do sistema de irrigação, foi calculado utilizando-se como fator de ponderação o número de ordem dos bocais.

3.3.9 Avaliação das perdas de solo por erosão hídrica

O material de solo foi peneirado e seco em condições ambiente (TFSA) e armazenado em sacos de aniagem até a data de início das avaliações de perdas de solo por erosão hídrica, nas três etapas do experimento.

As amostras deformadas de solo foram preparadas em latas de alumínio de 0,098 m de diâmetro e 0,05 m de altura (Figura 10), com o fundo liso, sem perfurações (sistema de drenagem). Isto só foi possível, devido à capacidade de armazenamento de água das amostras de solo, estimada a partir das características de retenção de água e volume de solo utilizado por amostra, ter sido suficiente para receber a lâmina aplicada sem, portanto, haver a saturação da amostra de solo.

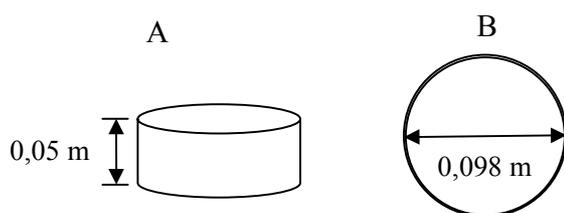


FIGURA 10 Esquema do recipiente de acondicionamento do solo: A) altura e B) diâmetro da amostra de solo.

A quantidade de solo perdido por erosão hídrica foi determinada por diferença de peso, sendo as amostras pesadas em condição de terra fina seca em estufa (TFSE), à temperatura de 105° a 110°C, antes e por um período mínimo de 24 horas após terem sido submetidas à irrigação. As amostras de solo foram espaçadas a uma distância de 1,12 m dos coletores usados para a determinação da taxa média de aplicação de água e à distância de 0,12 m entre si, totalizando, em toda a estrutura de suporte, 33 pontos de coleta, para a caracterização da perda de solo por erosão hídrica. Foram avaliadas duas amostras de solo por vez,

distantes 2,05 m uma da outra, para que não houvesse sobreposição de solo salpicado entre amostras.

Após submeter às amostras de solo com área superficial de 0,00785 m² aos bocais do emissor *Quad-Spray*, foram quantificadas as perdas de solo por erosão hídrica, em g m⁻² e, conhecendo-se o valor da lâmina média coletada para cada bocal, foi estimada, para cada ponto de coleta, a quantidade de solo perdido por erosão hídrica (ps_{ri}), em g m⁻² mm⁻¹, conforme Equação 15.

$$ps_{ri} = \frac{ps}{\frac{S_a}{L_c}} \quad (15)$$

em que

ps_{ri} = perda de solo por erosão hídrica à distância r_i do bocal, g m⁻² mm⁻¹;

ps = perda de solo por erosão hídrica à distância r_i do bocal, g;

S_a = área da amostra de solo, m²;

L_c = lâmina média de água coletada do bocal à distância r_s do ponto do pivô, mm.

Visando obter a quantidade média ponderada de solo perdido por erosão hídrica de cada bocal, foi considerada como fator de ponderação a área correspondente à largura do padrão molhado de cada ponto de coleta, ao longo da faixa molhada, conforme Equação 16.

$$ps_{rs} = \frac{\sum_{i=1}^n (ps_{ri} \cdot W_{ri} \cdot S_c)}{\sum_{i=1}^n (W_{ri} \cdot S_c)} \quad (16)$$

em que

ps_{rs} = quantidade média ponderada de perda de solo por erosão hídrica do bocal à distância r_s do ponto do pivô, $g\ m^{-2}\ mm^{-1}$;

ps_{ri} = perda de solo por erosão hídrica à distância r_i do bocal, $g\ m^{-2}\ mm^{-1}$;

W_{ri} = largura do padrão molhado na distância r_i do bocal, m;

S_c = espaçamento entre o centro das amostras de solo (0,12 m);

n = número de amostras ao longo da largura da faixa molhada do bocal (“n” variável de acordo com o diâmetro do bocal).

3.4 Condução do experimento - (Etapa II)

Nesta etapa do experimento foram redimensionados cinco pontos de emissão de água aplicada pelos bocais do emissor *Quad-Spray*, de 2,38, 3,97, 5,95, 7,94, e 9,92 mm de diâmetro, após avaliação de seus efeitos sobre as perdas de solo por erosão hídrica. No intuito de reduzir a taxa média de aplicação de água dos cinco pontos de emissão mencionados, foram selecionados dois bocais do emissor *Quad-Spray* de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56 e 6,94 mm de diâmetro, a serem utilizados nos protótipos de emissor desenvolvidos, de vazão equivalente à dos respectivos bocais individuais de 2,38, 3,97, 5,95, 7,94, e 9,92 mm acoplados ao emissor *Quad-Spray* (Tabela 4).

Esse redimensionamento foi feito por meio de uma equação ajustada, que relaciona vazão mensurada com diâmetro de bocal. Após redimensionamento de bocais, foram desenvolvidos alguns protótipos de emissor, associados aos bocais selecionados, com características de aplicação de água à baixa pressão e localizada mais próxima da superfície do solo, sob a copa de cafeeiros.

Tabela 4 Redimensionamento de cinco pontos de emissão de água aplicada por diferentes numerações de bocal (nb) e respectivos diâmetros de bocal (db) do emissor *Quad-Spray* (QS), pelo critério da vazão do bocal (qb) a pressão de operação de 68,95 kPa, a partir de dois bocais associados aos protótipos de emissor (PE): tubo corrugado e tubo liso.

nb/Emissor	db (mm)	qb (L h⁻¹)*	nb/Emissor	db (mm)	qb (L h⁻¹)*
6/QS	2,38	186,24	Dois bocais 4/PE	1,59	158,99
10/QS	3,97	511,03	Dois bocais 7/PE	2,78	508,76
15/QS	5,95	1146,98	Dois bocais 10,5/PE	4,17	1103,83
20/QS	7,94	1987,34	Dois bocais 14/PE	5,56	1994,15
25/QS	9,92	2961,71	Dois bocais 17,5/PE	6,94	3116,15

Foi necessário o desenvolvimento de uma barra metálica, à qual foram acoplados possíveis protótipos de emissor. Após testar-se a mobilidade da barra com protótipos de emissor em um plantio circular de cafeeiro, irrigado por pivô central na Fazenda Paraíso, localizada no município de Pirapora, região norte de Minas Gerais, comprovou-se bom funcionamento.

Foram realizados testes preliminares de alguns protótipos de emissor tipo LEPA elaborados a partir de tubos perfurados corrugados e lisos, com diferentes valores de diâmetro interno e área total de orifício de saída de água. Os testes foram baseados em observações visuais de distribuição de água e mensuração de perdas de solo por erosão hídrica em amostras de solo. Após testes preliminares, foram selecionados dois protótipos de emissor tipo LEPA: tubo corrugado e tubo liso, que, conectados à barra metálica desenvolvida, foram avaliados quanto ao seu impacto erosivo.

3.4.1 Características construtivas dos protótipos de emissor tipo LEPA

Após testes preliminares, foram descartados emissores indesejáveis do ponto de vista operacional, selecionando-se apenas dois tipos de protótipos de emissor, denominados no estudo de tubo corrugado e tubo liso.

O protótipo de emissor tubo corrugado, apresentado na Figura 11, tem comprimento de 0,48 m e diâmetro interno de 57 mm, com orifícios de saída de água nas dimensões 10 mm x 1 mm, espaçados um do outro de 22 mm na direção do comprimento do tubo e de 20 mm na direção da circunferência, totalizando 177 orifícios e área total de orifício de 0,00177 m².

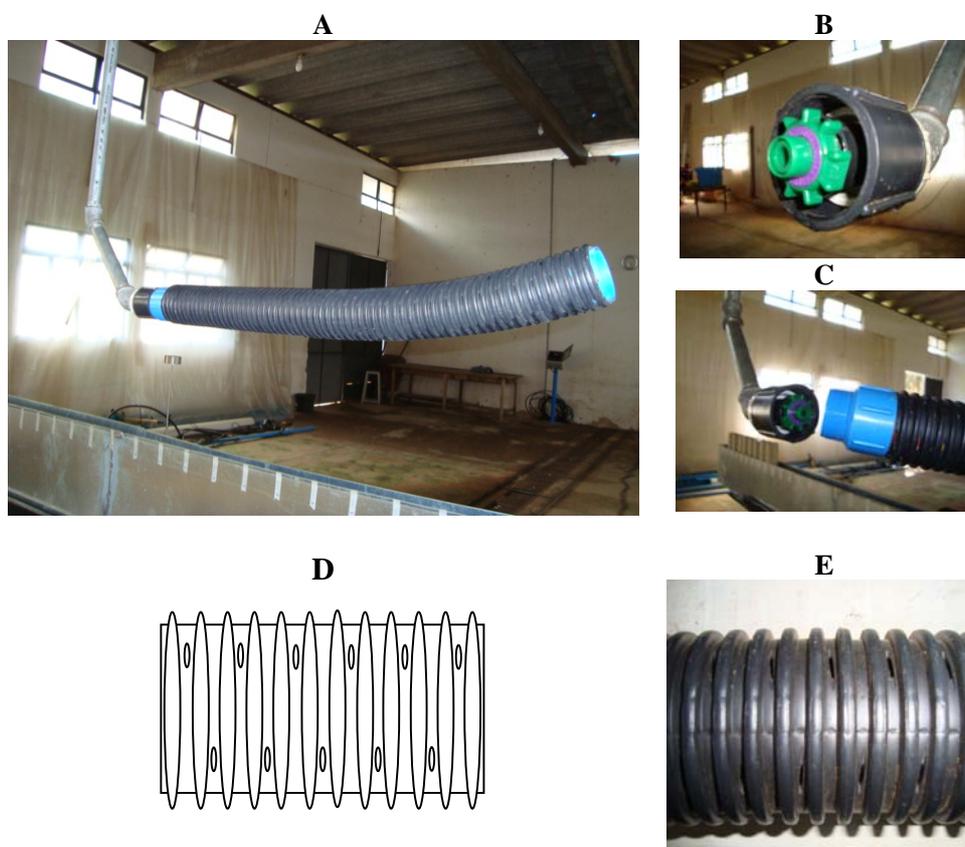


FIGURA 11 Protótipo de emissor tubo corrugado tipo LEPA: A) protótipo de emissor acoplado a barra metálica; B) conjunto bocal, constituído por bocal, adaptador de bocal, bucha de redução e luva; C) acoplamento do tubo corrugado ao conjunto bocal por meio de adaptador; D e E) disposição dos orifícios de saída de água no tubo corrugado.

O protótipo de emissor tubo liso apresentado na Figura 12 tem comprimento de 0,48 m e diâmetro interno de 19,05 mm, com orifícios feitos com a broca de 1 mm de diâmetro, espaçados a 5 mm um do outro na direção do comprimento do tubo e de 2 mm na direção da circunferência, totalizando 960 orifícios e área total de orifício de 0,000754 m² por tubo.

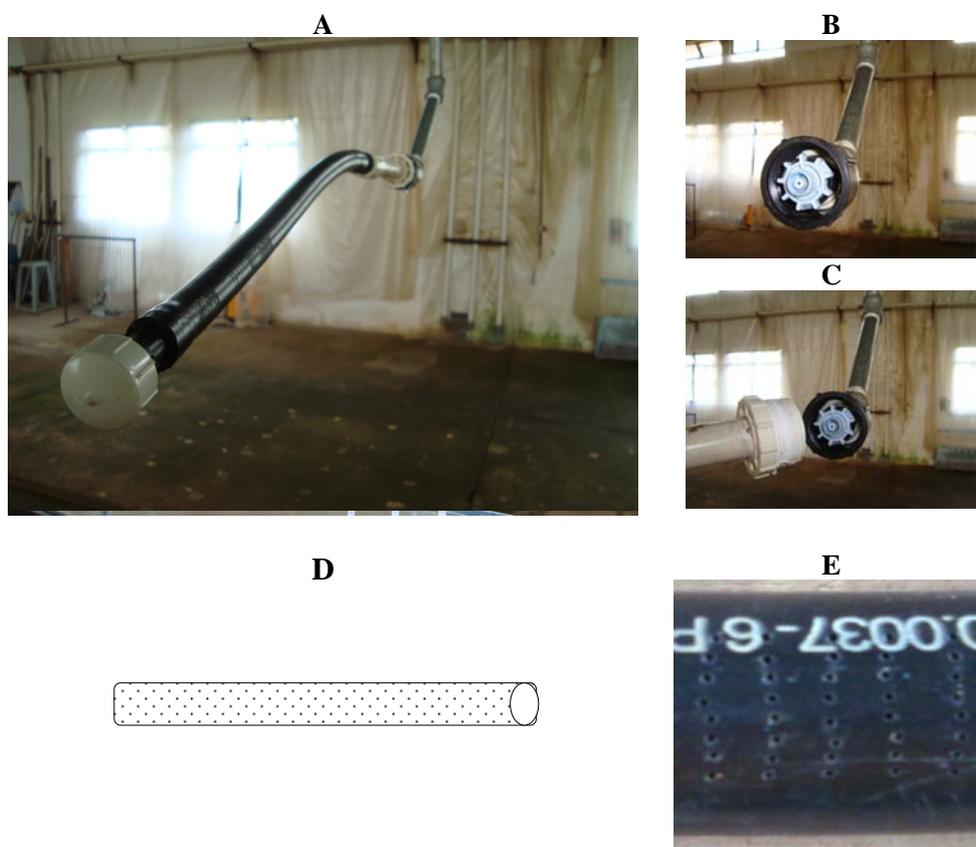


FIGURA 12 Protótipo de emissor tubo liso tipo LEPA: A) protótipo de emissor acoplado a barra metálica; B) conjunto bocal, constituído por bocal, adaptador de bocal, bucha de redução e luva; C) acoplamento do tubo corrugado ao conjunto bocal, por meio de bucha de redução; D e E) disposição dos orifícios de saída de água no tubo liso.

3.5 Condução do experimento - (Etapa III)

A caracterização da taxa média de aplicação de água e perda de solo por erosão hídrica de um Latossolo Vermelho-Amarelo textura média, sob efeito dos protótipos de emissor: tubo corrugado e tubo liso, foi realizada no LHI/DEG/UFLA, em Lavras, MG.

3.5.1 Instalação dos protótipos de emissor tipo LEPA

Foram utilizados bocais do emissor *Quad-Spray*, da *Senninger Irrigation*, acoplados aos protótipos de emissor: tubo corrugado e tubo liso, com o objetivo de controlar a vazão, operando sob regulador de pressão de 68,95 kPa.

A barra de emissor com os protótipos de emissor: tubo corrugado e tubo liso foi conectada à tubulação lateral suspensa, com auxílio de mangueiras de borracha, permanecendo à altura de 0,25 m da superfície das amostras de solo e coletores de água.

Foram avaliados os emissores tubo corrugado e tubo liso com dois bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56 e 6,94 mm de diâmetro. Os dois bocais foram utilizados após redimensionamento dos cinco pontos de emissão de água, como mencionado anteriormente, de modo a aplicar a vazão dos respectivos bocais de 2,38, 3,97, 5,95, 7,94 e 9,92 mm, quando associados ao emissor *Quad-Spray*, sob o controle de regulador de pressão de operação de 68,95 kPa. Os dois protótipos de emissor foram construídos com duas saídas de emissão de água, cada uma com um bocal de igual diâmetro, conectadas à barra metálica, como apresentados na Figura 13. Entretanto, foi testada apenas uma saída de emissão, ou seja, um bocal por protótipo e duplicados os valores determinados de taxa média de aplicação de água e perdas de solo por erosão hídrica. A utilização de apenas uma saída de emissão por protótipo durante os testes, sendo que estes foram formados por duas saídas de emissão, ou seja, dois bocais de igual diâmetro, foi devido a confecção dos protótipos ter sido de forma manual, o que

dificulta a padronização de fabricação, podendo gerar diferentes efeitos construtivos sobre a taxa média de aplicação de água e perda de solo por erosão hídrica.

Considerando a variação de vazão entre os cinco bocais utilizados, tanto no emissor *Quad-Spray*, quanto nos dois protótipos de emissor, foram necessários dois modelos de regulador de pressão, os quais foram projetados para aplicar as seguintes vazões: baixa vazão, 22,68 a 1814,4 L h⁻¹ e média vazão, 79,4 a 3628,8 L h⁻¹.



FIGURA 13 Barra metálica para protótipo de emissor tipo LEPA.

3.5.2 Controle da irrigação

Para a realização das avaliações de taxa média de aplicação de água e perdas de solo por erosão hídrica, sob efeito de dois bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56 e 6,94 mm de diâmetro, associados aos protótipos de emissor: tubo corrugado e tubo liso, foi adotada a velocidade de deslocamento utilizada na Etapa I, para os respectivos bocais individuais de 2,38, 3,97, 5,95, 7,94 e 9,92 mm, do emissor *Quad-Spray*.

3.5.3 Vazão

A vazão dos bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56, e 6,94 mm de diâmetro, acoplados aos protótipos de emissor: tubo corrugado e tubo liso foi medida com o auxílio de um recipiente de volume conhecido, um cronômetro e uma curva de PVC de 90°, com diâmetro interno de 73,2 mm, utilizada como guia para a coleta de água dos emissores. Mediu-se o tempo necessário para a aquisição de um volume de 20 litros de água. Cada bocal foi operado com o uso de regulador de pressão de operação de 68,95 kPa, e de baixa vazão, 22,68 a 1814,4 L h⁻¹ ou média vazão, 79,4 a 3628,8 L h⁻¹, conforme curvas de regulador de pressão e valores de vazão de bocais fornecidos pelo fabricante. No momento dos testes também foi feita a aferição da pressão de operação na entrada do emissor, por meio de um manômetro de mercúrio.

3.5.4 Padrão de distribuição de água

A largura do padrão molhado de dois bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56 e 6,94 mm de diâmetro, acoplados aos protótipos de emissor tubo corrugado e tubo liso, foi mensurada em cada ponto de amostra ao longo da largura da faixa molhada, com o auxílio de uma trena. A largura do padrão molhado e a largura da faixa molhada dos protótipos de emissor tubo corrugado e tubo liso estão representadas nas Figuras 14 e 15, respectivamente. Nestes casos, a largura do

padrão molhado W_{rs} não equivale a largura da faixa molhada L_{rs} como considerado para o emissor *Quad-Spray*.

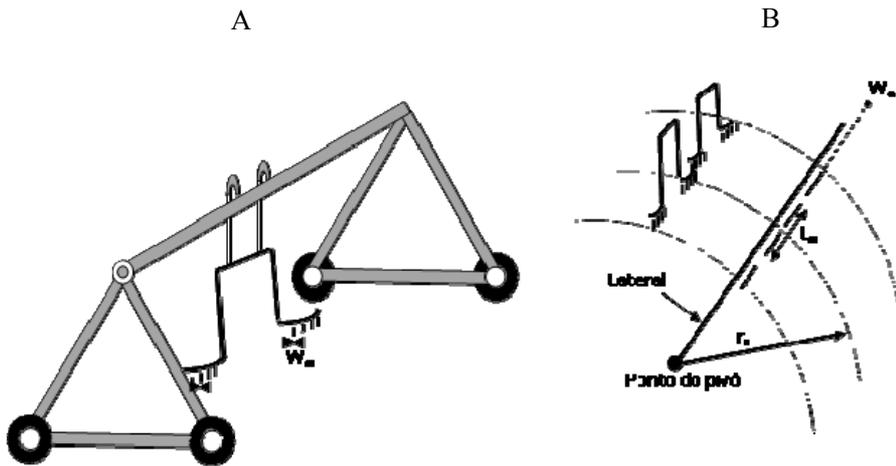


FIGURA 14 Largura do padrão molhado (W_{rs}) e da faixa molhada (L_{rs}) de um pivô central equipado com o emissor tubo corrugado: A) vista transversal; B) vista superior.

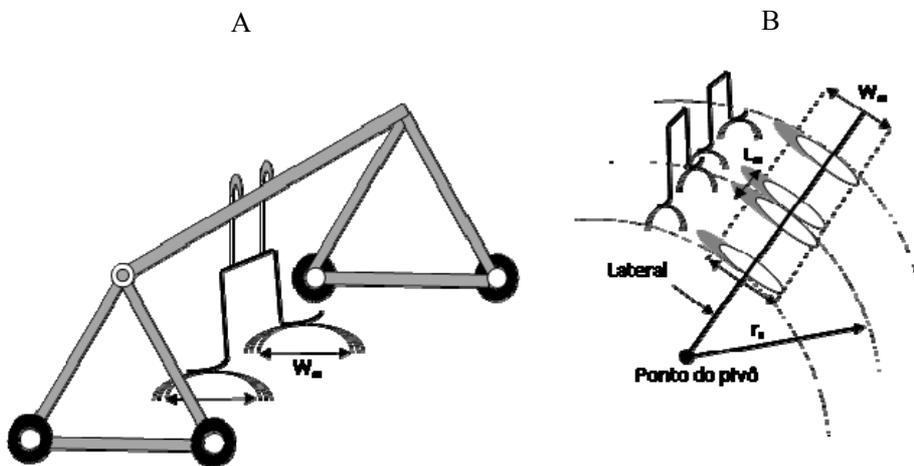


FIGURA 15 Largura do padrão molhado (W_{rs}) e da faixa molhada (L_{rs}) de um pivô central equipado com o emissor tubo liso: A) vista transversal; B) vista superior.

3.5.5 Taxa média de aplicação de água

A taxa média de aplicação de água de dois bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56 e 6,94 mm de diâmetro, acoplados ao emissor tubo corrugado e tubo liso, foi estimada assumindo um modelo elíptico, de maneira semelhante à estimativa feita para os bocais do emissor *Quad-Spray*, ou seja, pelas Equações 4 e 5 apresentadas por Smith et al. (2008). Entretanto, para o emissor tubo liso, o tempo de molhamento em cada posição de coletor de água ao longo da largura da faixa molhada (L_{rs}) foi estimado com base em valores de largura de padrão molhado (W_{ri}) mensurados para cada posição de coletor. Devido ao alcance de distribuição de água aplicada pelo emissor tubo corrugado ser inferior ao diâmetro do coletor, o valor do próprio diâmetro do coletor foi assumido como a largura do seu padrão molhado (Figura 16 A).

Assim, para o cálculo da taxa média em cada posição de coletor ao longo da largura da faixa molhada, foram considerados a lâmina coletada e sua correspondente largura do padrão molhado.

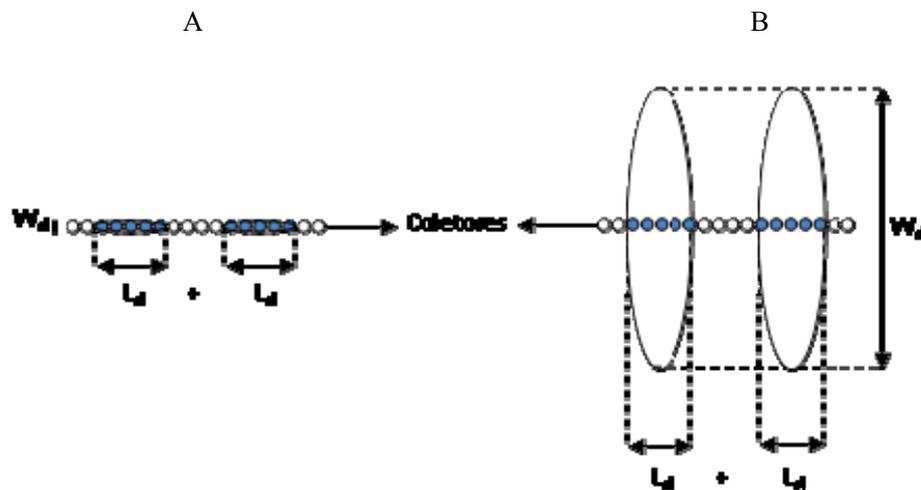


FIGURA 16 Vista superior da largura do padrão molhado (W_{ri}) e da faixa molhada (L_{ri}) dos emissores: A) Tubo corrugado e B) Tubo liso.

3.5.6 Uniformidade de distribuição de água

A uniformidade de distribuição de água dos protótipos de emissor: Tubo corrugado e Tubo liso foi determinada pelo coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD), conforme Equação 6 apresentada por Bernardo et al. (2005) e fatores de ponderação considerados para o emissor *Quad-Spray*, descrita anteriormente no subitem 3.3.8.

3.5.7 Avaliação das perdas de solo por erosão hídrica

O procedimento para a quantificação de solo perdido por erosão hídrica, depois de submetido aos bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56 e 6,94 mm de diâmetro, associado aos protótipos de emissor tipo LEPA: tubo corrugado e tubo liso, foi o mesmo utilizado na Etapa I, conforme Equações 15 e 16. Entretanto, salienta-se novamente que, por ter sido testado apenas um bocal por protótipo de emissor, e considerando que os protótipos em sua concepção são compostos de dois bocais de igual diâmetro, os valores mensurados de perdas de solo por erosão hídrica foram duplicados.

3.6 Análise de dados

O delineamento experimental estatístico utilizado para a avaliação dos 22 bocais do emissor *Quad-Spray*, bem como do esquema fatorial 3 x 5, composto por três modelos de emissor (*Quad-Spray*, tubo corrugado e tubo liso) e cinco diâmetros de bocal (2,38, 3,97, 5,95, 7,94 e 9,92 mm, usados no emissor *Quad-Spray* e dois bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56 e 6,94 mm, usados nos protótipos de emissor: Tubo corrugado e Tubo liso), foi o inteiramente casualizado, com três repetições.

A hipótese de normalidade dos dados amostrados de taxa média de aplicação de água, perda de solo por erosão hídrica e vazão foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk e a homogeneidade de variância pelo teste de Bartlett,

ambos a 5% significância. De acordo com a análise de normalidade e de homogeneidade de variância dos dados amostrados, constatou-se a necessidade de transformação dos dados de taxa média de aplicação de água e vazão de bocal dos protótipos de emissor tubo corrugado e tubo liso. Foi utilizada a transformação logaritmo neperiano dos dados originais, que proporcionou maior aderência dos dados às pressuposições básicas da análise de variância. Após a transformação dos dados, procedeu-se a análise de variância pelo teste F, a 5% de probabilidade.

A comparação de médias entre os 22 diâmetros de bocal associados ao emissor *Quad-Spray* foi realizada pelo teste de Skott-Knott, bem como feita uma análise multivariada pelo teste de Pillai, ambos a 5% de significância. A comparação de médias entre as interações de modelo de emissor e diâmetro de bocal foi realizada pelo teste de Tukey, a 5% de significância. As regressões e as correlações lineares dos dados de taxa média de aplicação de água (imed), perda de solo por erosão hídrica (ps) e vazão de bocal (qb) foram feitas pelo teste t, a 5% de probabilidade.

Todas as análises foram realizadas pelos programas estatísticos computacionais SISVAR (Ferreira, 2003) e R Development Core Team (2008), e os gráficos foram confeccionados com auxílio de planilha eletrônica (Excel).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Emissor *Quad-Spray* tipo LEPA

Os valores medidos de vazão do emissor *Quad-Spray* (*Senninger Irrigation*), operado com bocais de 1,59 a 9,92 mm de diâmetro, foram próximos dos valores de vazão apresentados em catálogo do fabricante. Esta premissa é comparada através do elevado valor de coeficiente de determinação e coeficiente angular próximo de 1, apresentados na Tabela 5, significativamente superior ($<0,01$), conforme análise de variância apresentada no Anexo A. Os valores de vazão dos bocais do emissor *Quad-Spray* (Figura 17), mensurados e relacionados aos seus respectivos diâmetro de bocal de 1,59 a 9,92 mm, foram satisfatoriamente ajustados por um modelo potencial, que tem a forma geral $f(x)=ax^b$, em que x é o diâmetro de bocal e $f(x)$ a vazão do bocal, como pode ser observado pelo elevado valor do coeficiente de determinação apresentado na Tabela 6, significativamente superior ($0,01$), conforme Anexo A.

TABELA 5 Modelo de ajuste da relação entre vazão de bocal do fabricante e vazão de bocal mensurada de bocais do emissor *Quad-Spray*.

Parâmetros estatísticos			
Modelo	a	b	R ²
Linear	0,963**	23,56*	99,97**
CV%	0,56	35,67	

Significativo, a 1%**, 5%* pelo teste t, a 5% de probabilidade.

TABELA 6 Modelo de ajuste de vazão de bocal relacionada ao diâmetro dos bocais do emissor *Quad-Spray*.

Parâmetros estatísticos			
Modelo	a	b	R ²
Potencial	35,78**	1,94**	99,97**
CV%	3,05	0,74	

Significativo, a 1%** pelo teste t, a 5% de probabilidade.

Os valores de velocidade de deslocamento dos bocais do emissor *Quad-Spray*, estimados após a obtenção dos valores de vazão e largura do padrão molhado de cada bocal, estão apresentados na Tabela 7.

TABELA 7 Diâmetro de bocal (db), largura do padrão molhado (W_{rs}), vazão de bocal (qb) e velocidade tangencial do bocal (v) do emissor *Quad-Spray*.

Nº do bocal	db (mm)	W_{rs} (m)	qb (L h ⁻¹)	v (m h ⁻¹)
4	1,59	0,57	77,44	39,16
5	1,98	1,15	123,61	30,71
6	2,38	1,51	180,27	34,16
7	2,78	1,71	241,11	40,37
8	3,18	1,73	318,54	52,71
9	3,57	1,58	412,90	74,72
10	3,97	1,46	510,12	99,98
11	4,37	1,51	616,93	116,73
12	4,76	1,52	733,50	137,50
13	5,16	1,63	863,93	151,28
14	5,56	1,83	999,82	156,46
15	5,95	2,04	1149,67	160,82
16	6,35	2,21	1290,32	166,88
17	6,75	2,28	1469,29	183,99
18	7,14	2,35	1650,99	200,66
19	7,54	2,38	1839,71	221,32
20	7,94	2,53	2018,88	227,92
21	8,33	2,69	2255,88	239,38
22	8,73	2,79	2440,13	250,11
23	9,13	2,93	2639,94	257,36
24	9,53	3,09	2842,11	262,58
25	9,92	3,24	3044,40	268,19

Foram observados valores de largura do padrão molhado variando de 0,56 a 3,24 m, de acordo com o diâmetro dos bocais do emissor *Quad-Spray* apresentado na Tabela 7 e na Figura 17. Salienta-se que, na prática, é adotado um valor médio de 2 m de largura do padrão molhado para os bocais do emissor *Quad-Spray*, o que implica em sub ou superdimensionamento de bocais ao longo da lateral de um pivô. Isso pode levar ao mal dimensionamento de bocais

e, conseqüentemente, a alterações nos seus valores de taxa média de aplicação de água, gerando problemas de degradação da superfície do solo e até mesmo de manejo de irrigação.

Normalmente, para um valor de pressão de operação constante nos emissores ao longo da lateral de um pivô ocorre um aumento da taxa média de aplicação de água e largura do padrão molhado, devido ao aumento do diâmetro de bocal e, conseqüentemente, da sua vazão. Entretanto, apesar de verificada uma função crescente da taxa média de aplicação de água e largura do padrão molhado, com relação ao aumento do diâmetro de bocal, para alguns diâmetros de bocal foram detectados valores decrescente destas duas variáveis, embora a vazão dos bocais aumente com os seus valores de diâmetro, como apresentada na Figura 17.

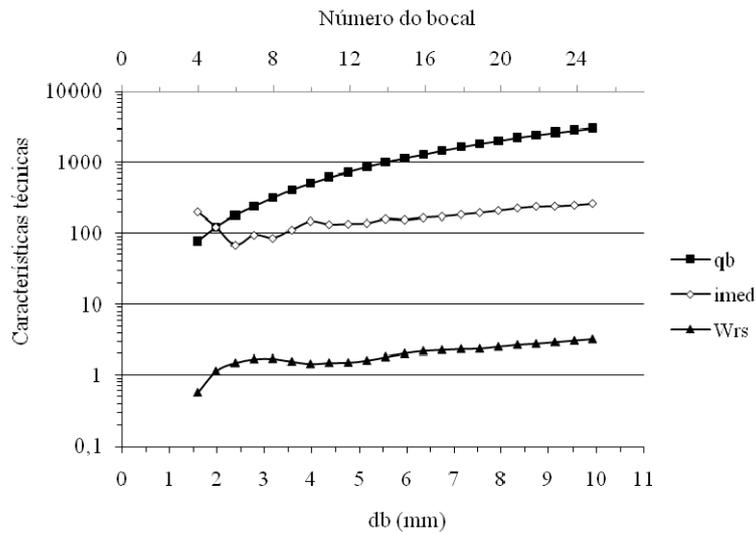


FIGURA 17 Vazão de bocal (qb), em L h⁻¹; taxa média ponderada de aplicação de água (imed), em mm h⁻¹ e largura do padrão molhado (W_{rs}), em m, relacionados aos diâmetros de bocal (db) do emissor *Quad-Spray*.

Uma relação crescente da taxa média de aplicação de água com o aumento do diâmetro de bocal foi observada apenas a partir do bocal de 5,95 mm, devido ao aumento da vazão desses bocais ocorrer em proporções maiores, quando comparado ao aumento da largura do padrão molhado, com o aumento do diâmetro de bocal. Entretanto, as pequenas taxas de aumento de vazão observadas para os bocais menores que 3,97 mm aumentaram a dependência da taxa média de aplicação de água pela largura do padrão molhado dos bocais.

4.1.1 Perdas de solo por erosão hídrica

Houve elevada intensidade de relação entre os valores de perdas de solo por salpicamento e taxa média de aplicação de água, ao longo da área molhada dos 22 bocais de diâmetros diferentes, do emissor *Quad-Spray*, como se observa nos elevados valores de coeficiente de correlação, apresentados na Tabela 8, significativamente superiores ($<0,01$), conforme Anexo B. Pelos valores positivos dos coeficientes de correlação, verificou-se que houve aumento na quantidade de solo salpicado com o aumento da taxa média de aplicação de água, ao longo da área molhada de cada bocal. Entretanto, foi observada elevada desuniformidade de distribuição de água ao longo da área molhada de cada bocal do emissor *Quad-Spray*, como apresentado pelos baixos valores de coeficiente de uniformidade de distribuição de água (CUD), apresentados na Tabela 8.

A desuniformidade de distribuição de água apresentada pelos bocais do emissor *Quad-Spray* também pode ser observada pelos seus perfis de distribuição de água, apresentados na Figura 18. Foi observada distribuição de água mais concentrada próximo à periferia da área molhada, de forma parecida ao padrão de molhamento do emissor *Quad-Spray* descrito na literatura. Entretanto, parte da água aplicada pelo bocal é distribuída em toda a área molhada. Além da concentração de água aplicada na periferia da área molhada pelos bocais do emissor *Quad-Spray*, foi observada uma aplicação localizada no

centro da área molhada pelos bocais com até 4,37 mm de diâmetro, devido a uma espécie de aplicação central (goteira) proveniente de características de fabricação do próprio emissor.

TABELA 8 Correlação linear simples de valores de perdas de solo por erosão hídrica (ps), em função de valores de taxa média de aplicação de água (imed), e coeficiente de uniformidade de distribuição de água (CUD), de 22 diâmetros de bocal (db) do emissor *Quad-Spray*.

Média ponderada		CUD (%)	db (mm)	R
ps (g m⁻² mm⁻¹)	imed (mm h⁻¹)			
173,73	197,88	11,90	1,59	96,67**
202,03	122,22	0,68	1,98	93,76**
273,68	68,05	2,95	2,38	94,60**
292,69	94,29	21,19	2,78	98,75**
276,36	85,38	7,07	3,18	98,30**
180,11	111,29	8,29	3,57	89,73**
125,89	147,23	7,30	3,97	80,67**
171,17	133,18	6,36	4,37	93,79**
189,02	135,20	7,37	4,76	98,21**
176,08	138,36	4,49	5,16	98,30**
152,48	158,11	10,83	5,56	93,62**
158,27	154,39	3,69	5,95	93,70**
173,23	165,33	6,40	6,35	93,89**
167,31	171,35	4,75	6,75	95,52**
155,56	182,61	8,79	7,14	94,96**
177,18	193,08	23,83	7,54	91,55**
170,58	206,77	6,90	7,94	91,10**
206,17	223,97	14,83	8,33	92,70**
223,40	236,14	24,34	8,73	92,50**
186,50	237,32	24,98	9,13	93,45**
180,89	244,53	32,73	9,53	86,21**
175,58	258,15	35,73	9,92	90,73**

Significativo a 1%** pelo teste t, ao nível de significância de 5%.

Salienta-se que grande parte do solo total perdido por erosão hídrica (valores de até 71,86%) pela ação do bocal foi devido ao efeito do impacto de gotas originárias da aplicação central, como se observa pela porcentagem de solo salpicado na amostra central, conforme Anexo C.

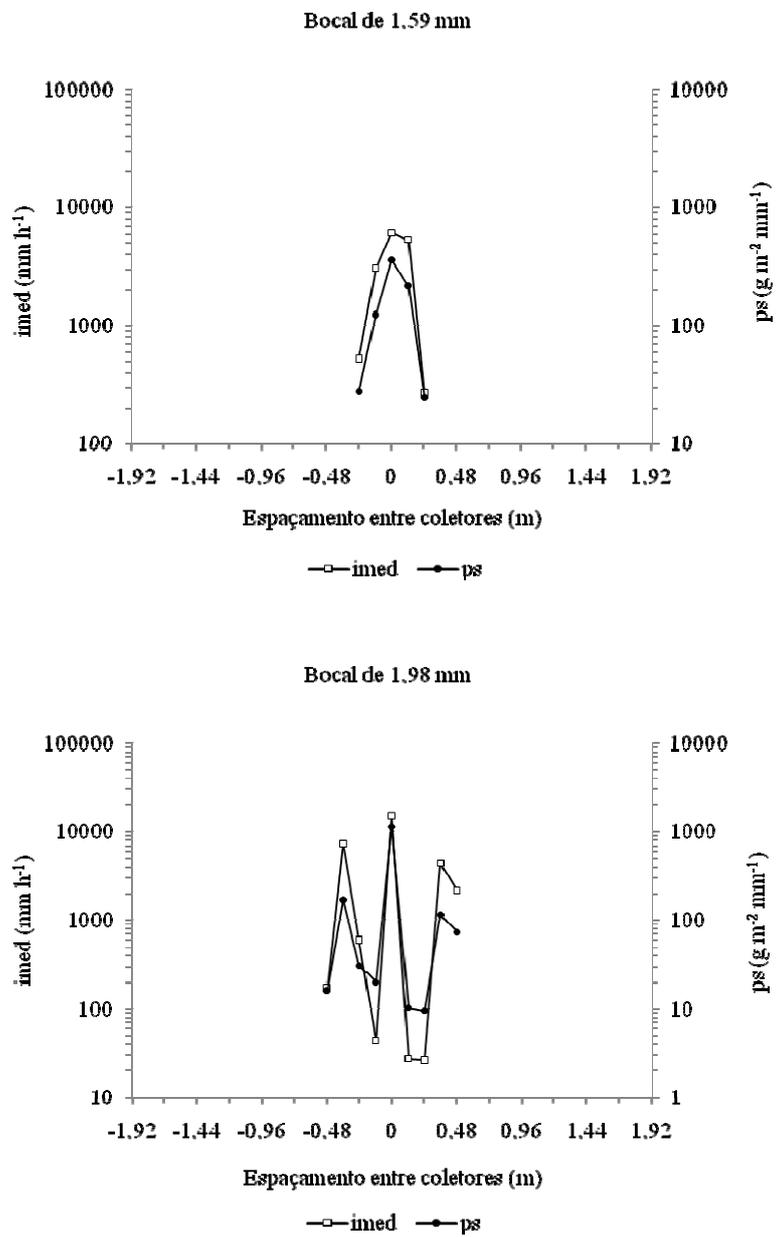
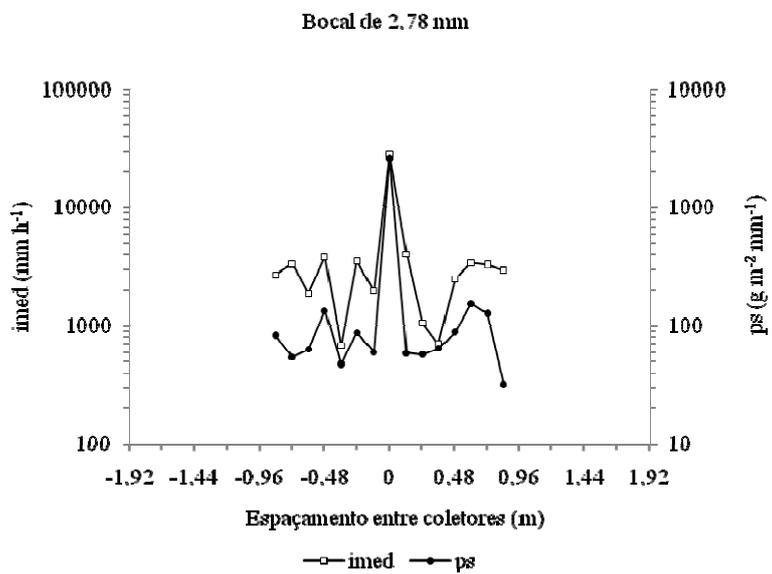
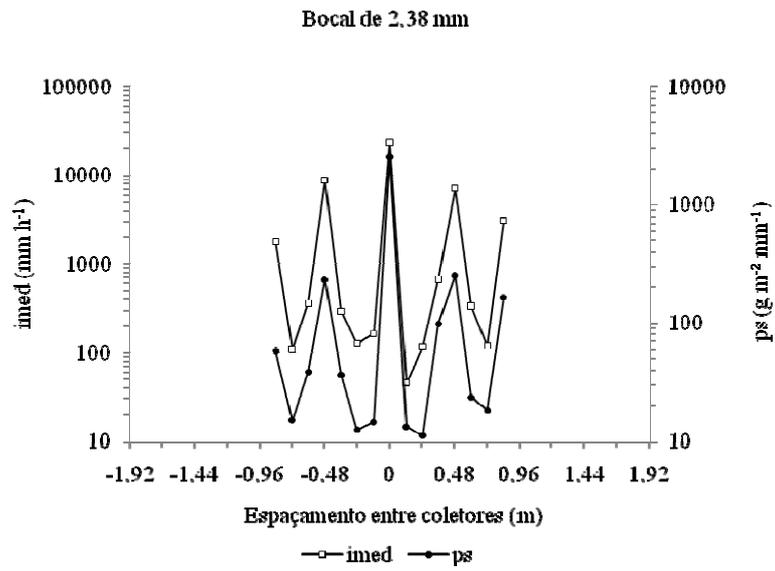


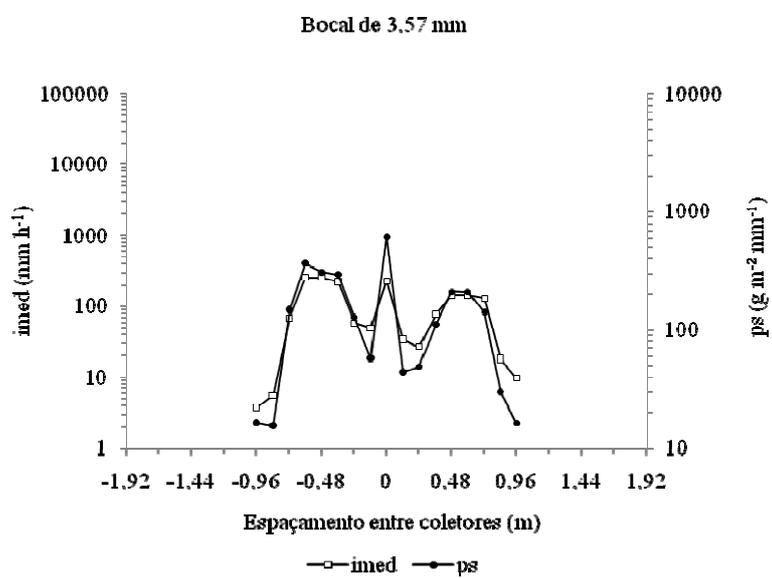
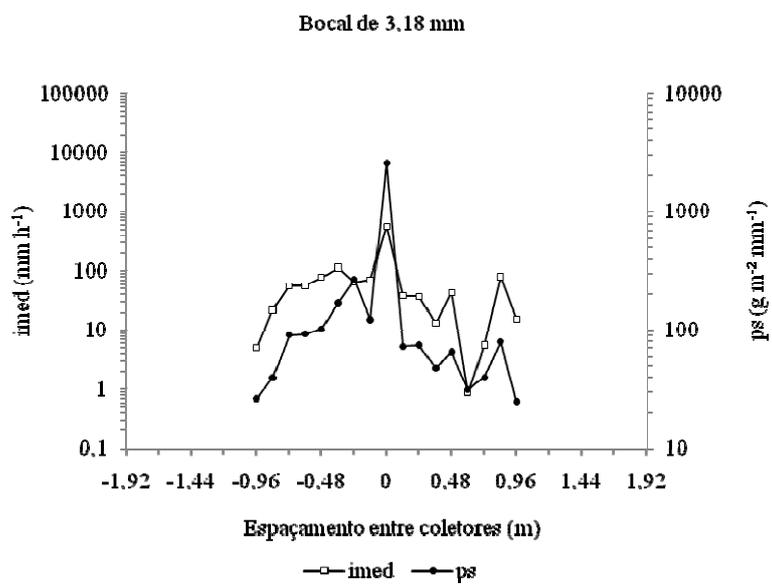
FIGURA 18 Perfil de distribuição de água de 22 diâmetros de bocal do emissor *Quad-Spray*. (“...continua...”).

“FIGURA 18, Cont.”



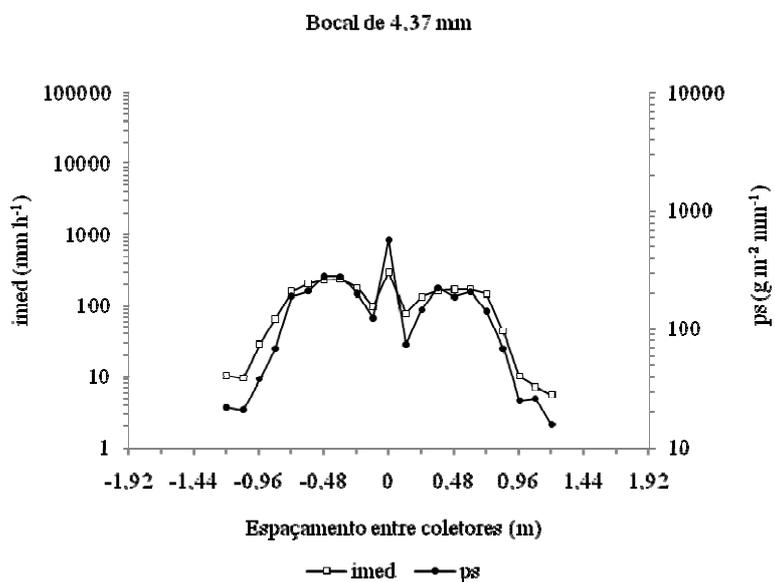
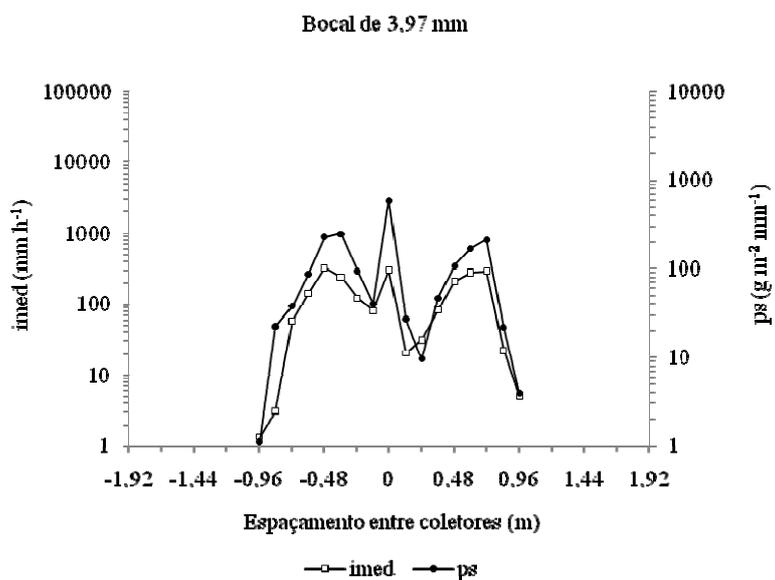
(“...continua...”)

“FIGURA 18, Cont.”



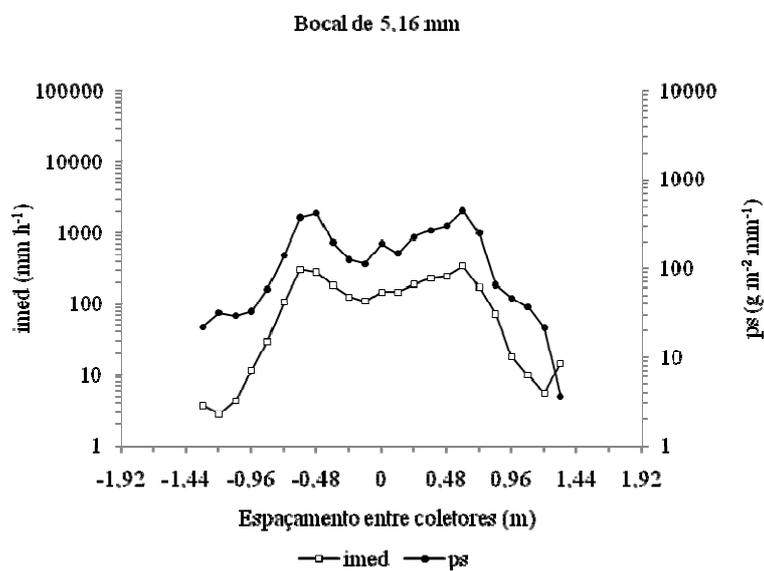
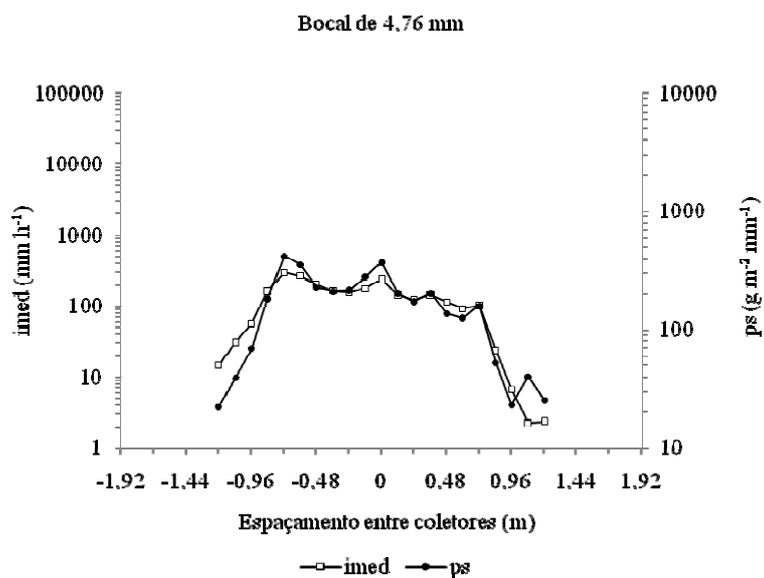
(“...continua...”)

“FIGURA 18, Cont.”



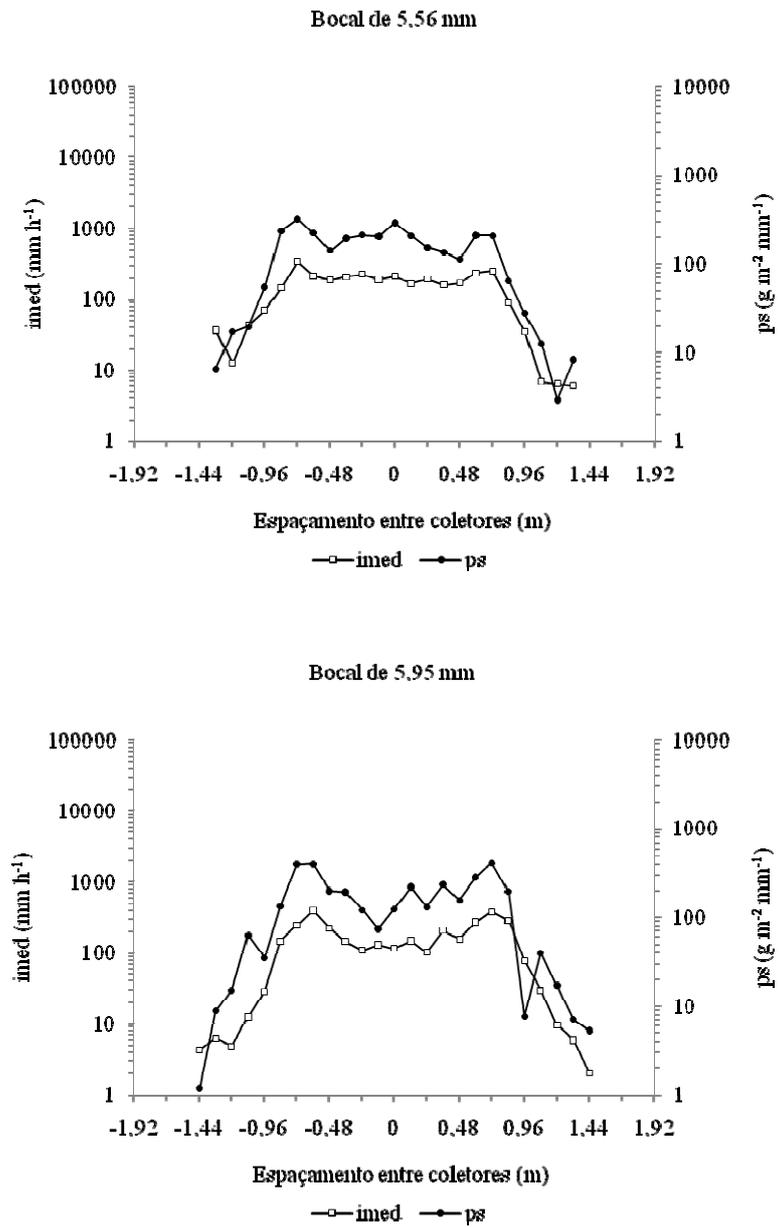
(“...continua...”)

“FIGURA 18, Cont.”



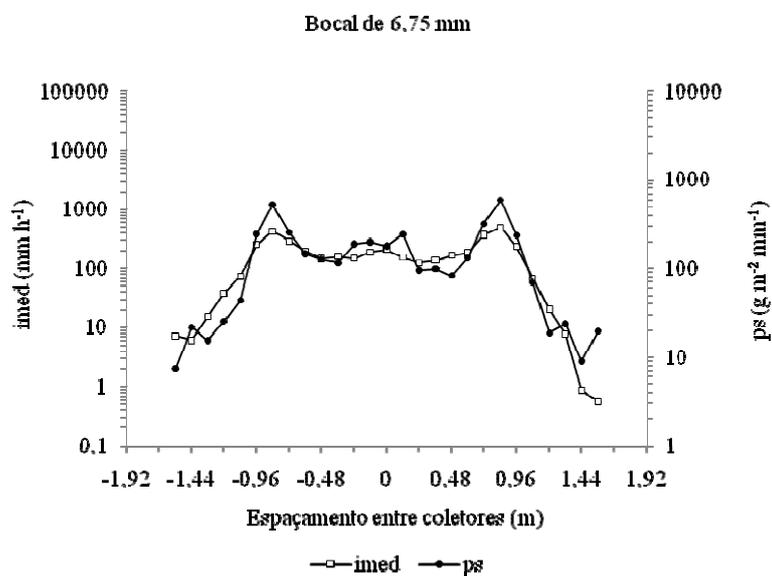
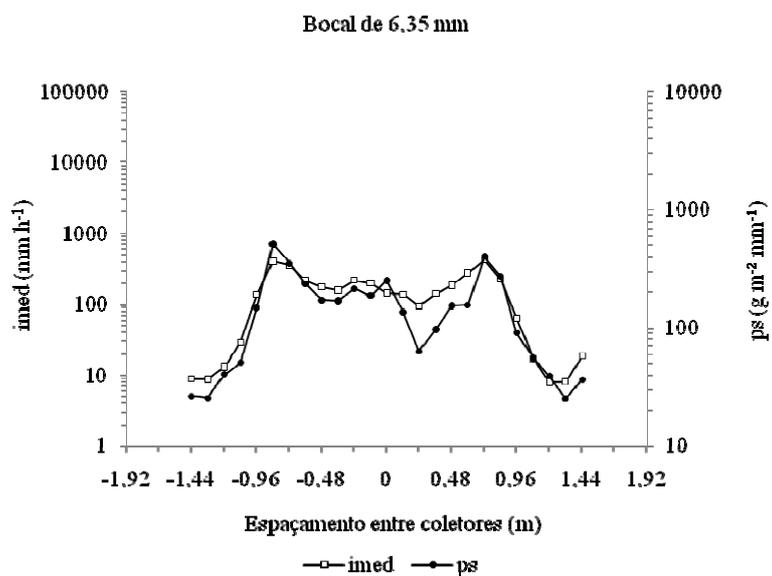
(“...continua...”)

“FIGURA 18, Cont.”



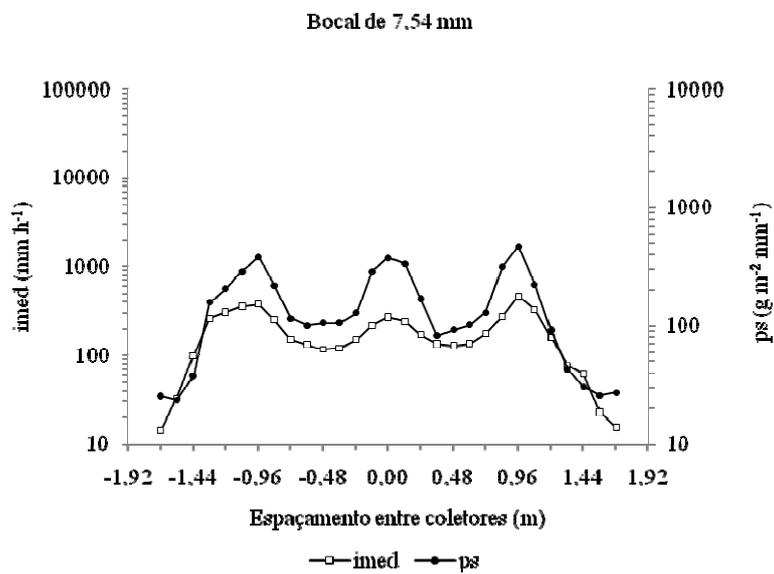
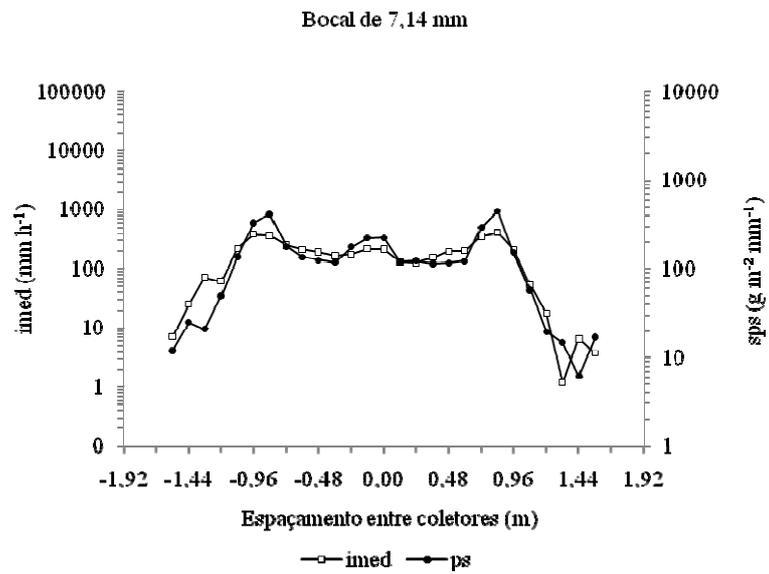
(“...continua...”)

“FIGURA 18, Cont.”



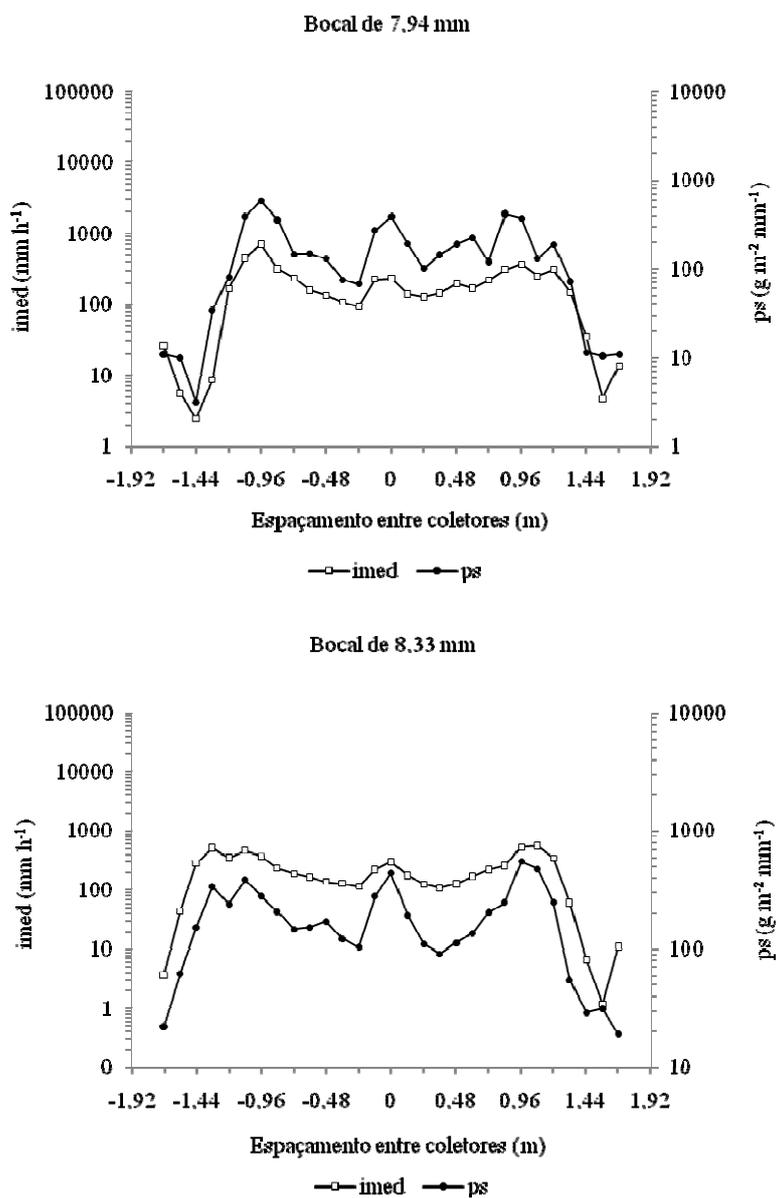
(“...continua...”)

“FIGURA 18, Cont.”



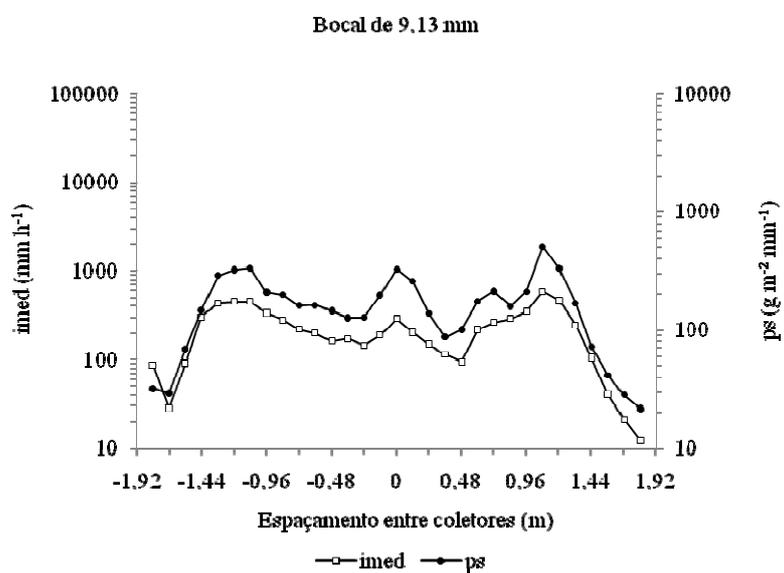
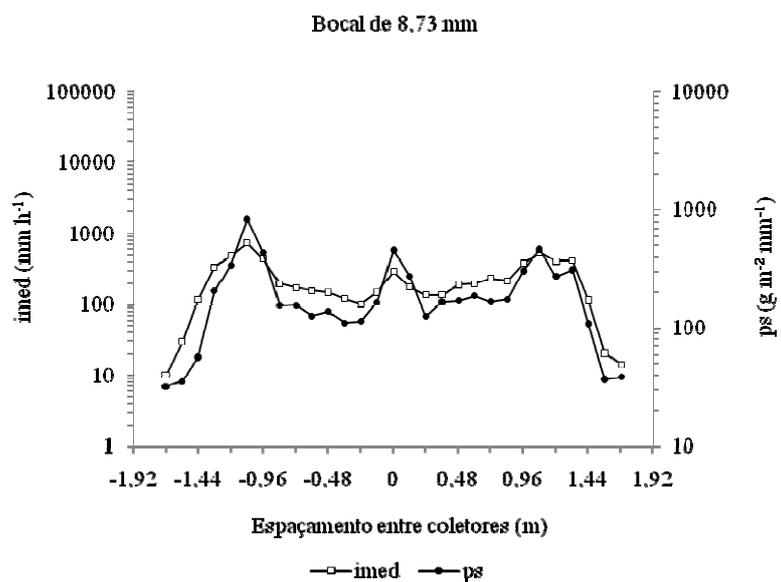
(“...continua...”)

“FIGURA 18, Cont.”



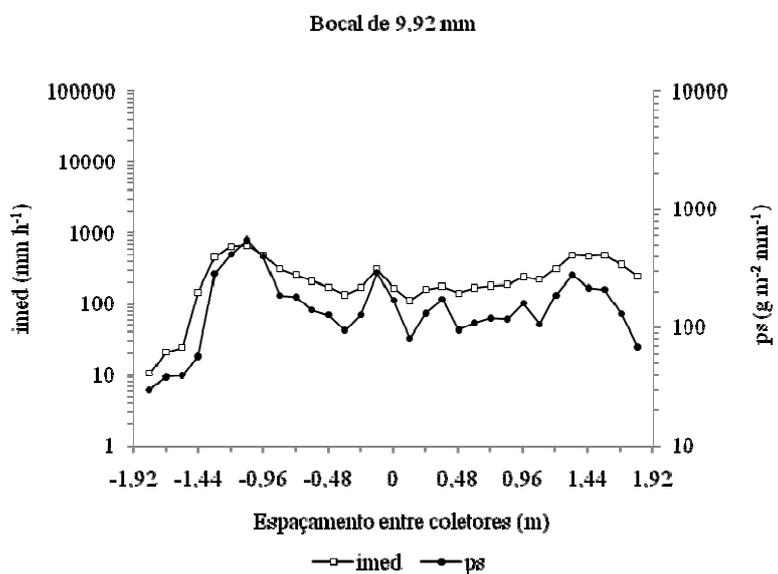
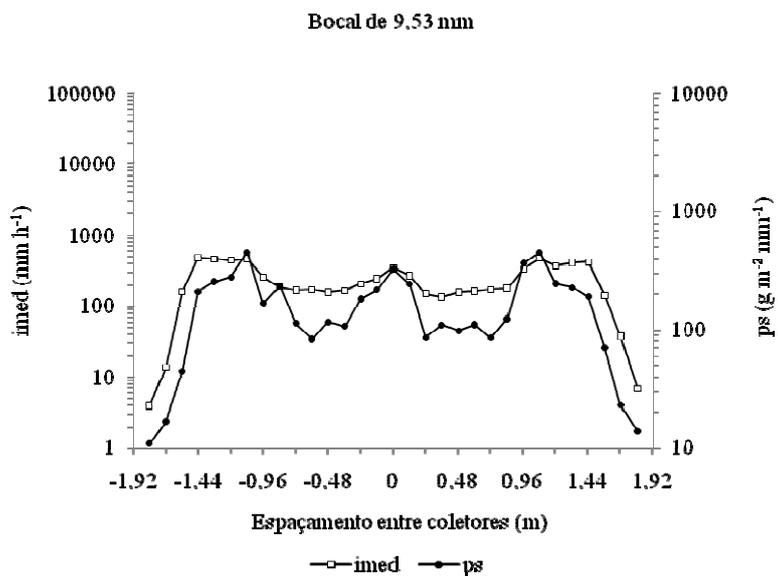
(“...continua...”)

“FIGURA 18, Cont.”



(“...continua...”)

“FIGURA 18, Cont.”



Apesar da elevada correlação das perdas de solo por erosão hídrica com a taxa média de aplicação de água, ao longo da área molhada de cada bocal do emissor *Quad-Spray*, analisando-se os dados de perda de solo por erosão hídrica gerado por todos os bocais em conjunto, constata-se que essas duas variáveis não apresentaram uma boa correlação com o aumento do diâmetro de bocal, como se observado pelo baixo valor de coeficiente de correlação apresentado na Tabela 9, significativamente superior, conforme Anexo C. Observa-se que, além da baixa correlação, trata-se de uma correlação negativa, o que implica haver um aumento de perda de solo por erosão hídrica com a diminuição da taxa média de aplicação de água. Tal fato mostra que os valores médios de taxa média de aplicação de água e perda de solo por erosão hídrica em função de diâmetros de bocal do emissor *Quad-Spray* não são confiáveis para serem utilizados em relações funcionais determinísticas. O baixo valor do coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) apresentado na Tabela 9 mostra a desuniformidade de aplicação de água pelos bocais do emissor *Quad-Spray*, ao longo da lateral de um pivô central.

TABELA 9 Correlação linear simples dos valores médios ponderados de perda de solo por erosão hídrica em função de valores médios ponderados de taxa média de aplicação de água (Fonte de variação) e coeficiente de uniformidade de distribuição de água (CUD), de 22 diâmetros de bocal do emissor *Quad-Spray*.

Fonte de variação	CUD (%)	R
Modelo	51,71	-44,18*

Significativo, a 1% ** pelo teste t, a 5% de significância.

Houve efeito do diâmetro de bocal sobre os valores médios ponderados de taxa média de aplicação de água e perda de solo por erosão hídrica, constatado pelos valores de quadrado médio significativamente superiores ($P < 0,01$), conforme Anexo D. Pela análise univariada, verificou-se que o bocal de 2,38 mm apresentou o menor valor de taxa média de aplicação de água,

enquanto o maior valor foi observado para o bocal de 9,92 mm, como apresentado na Tabela 10. No entanto, as menores quantidades de perda de solo por erosão hídrica foram observadas nos bocais de 1,98, 3,97, 5,56, 5,95, 6,35, 7,14 e 9,92 mm, enquanto as maiores foram observadas para os bocais com 2,38, 2,78 e 3,18 mm. Assim, o aumento na quantidade média ponderada de perda de solo por erosão hídrica não está relacionado com o aumento dos valores médios ponderados de taxa média de aplicação de água, como apresentado na Figura 19.

TABELA 10 Efeito do diâmetro de bocais (db) do emissor *Quad-Spray* sobre a taxa média ponderada de aplicação de água (imed) e média ponderada de perda de solo por erosão hídrica (ps).

Variáveis avaliadas			
Nº do bocal	db	imed (mm h⁻¹)	ps (g m⁻² mm⁻¹)
4	1,59	197,7 J	173,7 B
5	1,98	122,3 E	146,7 A
6	2,38	68,3 A	274,0 D
7	2,78	94,3 C	302,3 D
8	3,18	85,3 B	276,0 D
9	3,57	111,0 D	180,3 B
10	3,97	147,0 F	126,3 A
11	4,37	133,0 F	171,0 B
12	4,76	135,3 F	189,0 B
13	5,16	138,3 F	176,3 B
14	5,56	158,0 G	152,3 A
15	5,95	154,3 G	155,7 A
16	6,35	165,0 H	161,3 A
17	6,75	171,7 H	174,3 B
18	7,14	182,3 I	155,3 A
19	7,54	193,0 J	183,3 B
20	7,94	206,7 J	171,3 B
21	8,33	224,0 K	206,3 B
22	8,73	236,0 K	224,0 C
23	9,13	237,3 K	186,7 B
24	9,53	244,3 L	181,0 B
25	9,92	258,0 M	164,3 A
CV%		4,81	10,19

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Skott-Knott, a 5% de significância.

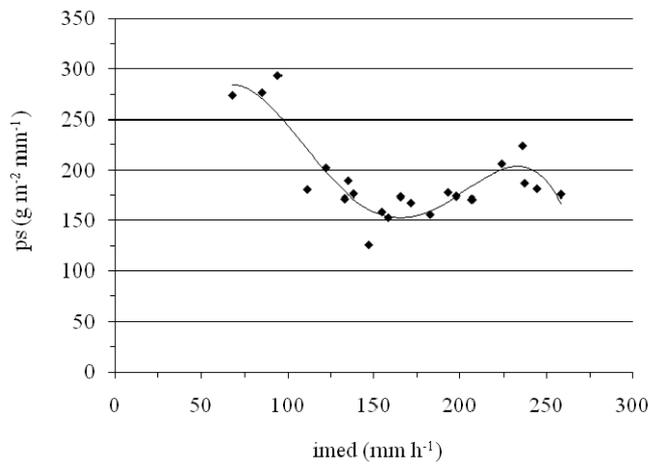
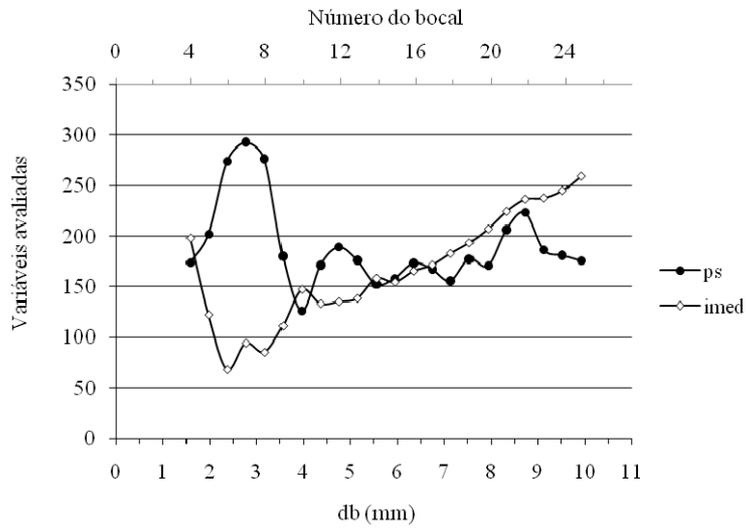


FIGURA 19 Valores médios ponderados de perda de solo por erosão hídrica (ps), em $\text{g m}^2 \text{mm}^{-1}$ e taxa média de aplicação de água (imed), em mm h^{-1} , observados para os bocais do emissor *Quad-Spray*.

Os dados de taxa média de aplicação de água, quando comparados aos dados de perda de solo por erosão hídrica, se ajustaram melhor aos diâmetros de bocal, como pode ser observado pelos maiores valores de coeficiente de determinação dos modelos lineares apresentados na Tabela 11, significativamente superiores (<0,01), conforme Anexo D.

TABELA 11 Modelos reduzidos sequenciais de valores médios ponderados de taxa média de aplicação de água (imed) e perda de solo por erosão hídrica (ps), relacionados aos diâmetros de bocal do emissor *Quad-Spray* (QS).

Parâmetros estatísticos							
Emissor		b0	b1	b2	b3	b4	R ²
QS	imed	64,526**	17,722**				71,68
QS	imed	140,353**	-14,867**	2,831**			80,91
QS	imed	258,247**	-97,781**	19,103**	-0,942**		85,83
QS	imed	495,189**	-328,655**	92,254**	-10,168**	0,401**	89,97
QS	ps	211,693**	-4,151**				5,83
QS	ps	258,441**	-24,243**	1,746**			11,03
QS	ps	209,418**	10,235 ^{ns}	-5,020 ^{ns}	0,392*		12,28
QS	ps	-346,449**	551,868**	-176,633**	22,035**	-0,940**	46,05

Significativo, a 1%**, 5%* e não significativo^{ns}, pelo teste t, a 5% de significância.

O bom ajuste da taxa média ponderada de aplicação de água ao diâmetro de bocal foi devido aos valores superiores de vazão em relação aos valores de largura do padrão molhado, como era de se esperar. Entretanto, a perda média ponderada de solo por erosão hídrica não foi dependente da taxa média ponderada de aplicação de água, o que indica, mais uma vez, que a taxa média ponderada de aplicação de água não representa bem a característica erosiva da chuva artificial proveniente dos bocais do emissor *Quad-Spray*.

O melhor ajuste da quantidade média ponderada de perda de solo por erosão hídrica em função da taxa média ponderada de aplicação de água obtido pelo modelo de quarta ordem apresentado na Tabela 12, significativamente superior (<0,01), conforme Anexo E, evidencia justamente a pouca dependência

que a perda de solo por erosão hídrica tem em relação à taxa média ponderada de aplicação de água.

TABELA 12 Valores médios ponderados de perda de solo por erosão hídrica (ps), em função dos valores médios ponderados de taxa média de aplicação de água (imed), sob efeito de diâmetros de bocal do emissor *Quad-Spray*.

Modelo	Parâmetros estatísticos					R ²
	b0	b1	b2	b3	b4	
Linear	247,409**	-0,342*				19,52
Quadrático	493,232**	-3,620**	0,001**			67,23
Cúbico	691,697**	-7,956*	0,039*	-0,59e ^{-4ns}		71,28
Quarta ordem	-258,386 ^{ns}	20,147*	-0,251*	0,001**	-0,19e ^{-5**}	82,08

Significativo, a 1% **, 5% * e não significativo^{ns} pelo teste t, a 5% de significância .

Visando entender melhor a relação da perda de solo por erosão hídrica com a taxa média de aplicação de água, sob efeito dos diâmetros de bocal do emissor *Quad-Spray*, buscou-se agrupar os bocais avaliados em grau similar de impacto, como apresentado na Figura 20.

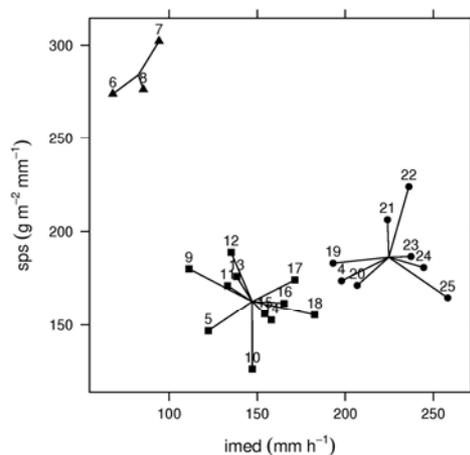


FIGURA 20 Agrupamento de bocais formados pela aplicação do algoritmo k-médias sobre as variáveis taxa média de aplicação de água (imed) e perda de solo por erosão hídrica (ps).

Pela análise multivariada, foi verificado o agrupamento de três grupos de bocais com diferentes graus de impacto, significativamente superiores ($<0,01$), conforme Anexo E.

Os bocais de 2,38, 2,78 e 3,18 mm de diâmetro foram agrupados como os mais impactantes, ou seja, aqueles que proporcionaram as maiores quantidades de solo salpicado, mesmo sob menores taxas média de aplicação de água; os bocais de 1,59, 7,54, 7,97, 8,33, 8,73, 9,13, 9,53 e 9,92 mm foram agrupados como aqueles com um grau intermediário de impacto, ou seja, com quantidades intermediárias de solo perdido por erosão hídrica, apesar de terem apresentado as maiores taxas média de aplicação de água; por fim, os bocais de 1,98, 3,57, 3,97, 4,37, 4,76, 5,16, 5,56, 5,95, 6,35, 6,75 e 7,14 mm, com maiores taxas média de aplicação de água, proporcionaram as menores quantidades de solo perdido por erosão hídrica, sendo agrupados como os menos impactantes. Desse modo, a análise multivariada reforça a evidência de que os bocais com maiores valores de taxa média de aplicação de água não foram os mais impactantes, enquanto os bocais menos impactantes não foram aqueles com as menores taxas médias de aplicação de água.

Em outras palavras, ficou evidente que o aumento na quantidade de solo perdido por erosão hídrica não está relacionado apenas a um aumento da taxa média de aplicação de água, bem como o aumento no diâmetro de bocal. Se assim fosse, os bocais de 1,59 e 1,98 mm de diâmetro, por terem apresentado um valor intermediário de taxa média de aplicação de água, estariam, no mínimo, no grupo com grau intermediário de impacto, o que não aconteceu. Os elevados valores de taxa média de aplicação de água dos bocais de 1,59 e 1,98 mm foram proporcionados por uma concentração de água aplicada, uma espécie de goteira no centro da área molhada por estes bocais, característica de fabricação, aliada ao elevado tempo de molhamento destes bocais (44 a 100 s). Mesmo tendo apresentado elevadas taxas média de aplicação de água, a quantidade de solo

perdido por erosão hídrica não foi maior nesses bocais, provavelmente pela formação de uma lâmina de água sobre a superfície das amostras de solo, devido ao excesso aplicado nestes pontos de elevada concentração amortecer o impacto das gotas de água.

4.2 Protótipos de emissor tipo LEPA: tubo corrugado e tubo liso

Após testes preliminares de protótipos de emissor em campo, com características de aplicação de água localizada, instalados próximo ao solo e sob a copa de cafeeiros, foram selecionados e avaliados dois protótipos de emissor: Tubo corrugado e Tubo liso. Em seguida, os dois protótipos foram comparados ao emissor *Quad-Spray*, em cinco distintos diâmetros de bocal. Foram avaliados os bocais de 2,38, 3,97, 5,95, 7,94 e 9,92 mm de diâmetro, acoplados ao emissor *Quad-Spray* e comparados a dois bocais de 1,59, 2,78, 4,37, 5,56 e 6,94 mm, acoplados aos protótipos de emissor tubo corrugado e tubo liso.

Os valores de vazão mensurados dos cinco bocais associados aos emissores tubo corrugado e tubo liso foram satisfatoriamente ajustados pelo modelo potencial, como pode ser observado pelos elevados valores de coeficiente de determinação apresentados nas Tabelas 13 e 14, significativamente superiores ($<0,01$), conforme Anexo F.

TABELA 13 Modelo de ajuste de vazão de bocal (qb) relacionada aos diâmetros de bocal (db) do emissor tubo corrugado.

Modelo	Parâmetros estatísticos		
	a	b	R ²
Potencial	70,42**	1,98**	99,99
CV%	4,36	1,20	

Significativo, a 1%** pelo teste t, a 5% de probabilidade.

TABELA 14 Modelo de ajuste de vazão de bocal (qb) relacionada aos diâmetros de bocal (db) do emissor tubo liso.

Modelo	Parâmetros estatísticos		
	a	b	R ²
Potencial	88,30**	1,78**	99,97
CV%	7,20	2,22	

Significativo a 1%** pelo teste t, a 5% de probabilidade.

Foram observados valores constantes de largura do padrão molhado de 0,098 m, para os cinco bocais utilizados com o emissor tubo corrugado. O baixo valor de padrão molhado verificado para o emissor tubo corrugado (Tabela 15) se deve, obviamente, à ausência de mecanismos capazes de fracionar o jato de água que sai do bocal, bem como ao fato de sua área total de orifício (0,00177 m²) ter possibilitado maior passagem de água, não favorecendo uma pulverização da água aplicada à pressão de operação de 68,95 kPa (Figura 21). Os valores de largura do padrão molhado do emissor tubo liso variaram de 0,098 a 2,27 m, de acordo com o diâmetro dos bocais (Tabela 15). A maior pulverização do jato d'água (Figura 21) e, conseqüentemente, maiores valores de largura do padrão molhado do emissor tubo liso, associado aos três maiores bocais, em relação ao emissor tubo corrugado, foram devido à sua menor área total de orifício (0,000754 m²), já que o mesmo também não possuía um mecanismo de fracionamento do jato de água que sai do bocal.

Os valores de velocidade de deslocamento de dois bocais de 1,59, 2,78, 4,37, 5,56 e 6,94 mm, acoplados ao emissor tubo corrugado e tubo liso foram os mesmos aplicados, respectivamente, aos bocais de 2,38, 3,97, 5,95, 7,94 e 9,92 mm, acoplados ao emissor *Quad-Spray*, como apresentado na Tabela 15.

TABELA 15 Diâmetro de bocal (db), largura do padrão molhado (W_{rs}), vazão de bocal (qb) e velocidade tangencial do bocal (v), relacionados aos diâmetros de bocal (db): 2,38, 3,97, 5,95, 7,94 e 9,92 mm associados ao emissor *Quad-Spray* (QS) e de dois bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56 e 6,94 mm associados aos emissores tubo corrugado (Tc) e tubo liso (Tl).

Emissor	Nº do bocal	db (mm)	W_{rs} (m)	qb (L h⁻¹)	v (m h⁻¹)
QS*	6	2,38	1,51	180,27	34,16
QS*	10	3,97	1,46	510,12	99,98
QS*	15	5,95	2,04	1149,67	160,82
QS*	20	7,94	2,53	2018,88	227,92
QS*	25	9,92	3,24	3044,40	268,19
Tc	Dois bocais 4	Dois bocais 1,59	0,098	175,97	34,16
Tc	Dois bocais 7	Dois bocais 2,78	0,098	526,19	99,98
Tc	Dois bocais 10,5	Dois bocais 4,17	0,098	1173,91	160,82
Tc	Dois bocais 14	Dois bocais 5,56	0,098	2128,08	227,92
Tc	Dois bocais 17,5	Dois bocais 6,94	0,098	3248,12	268,19
Tl	Dois bocais 4	Dois bocais 1,59	0,098	165,52	34,16
Tl	Dois bocais 7	Dois bocais 2,78	0,098	530,71	99,98
Tl	Dois bocais 10,5	Dois bocais 4,17	0,65	1161,34	160,82
Tl	Dois bocais 14	Dois bocais 5,56	1,40	1878,54	227,92
Tl	Dois bocais 17,5	Dois bocais 6,94	2,27	2787,33	268,19

*Características técnicas dos bocais do emissor LEPA utilizados na Etapa I.

Com exceção do emissor tubo corrugado, os demais modelos de emissor apresentaram valores crescentes de largura do padrão molhado, com o aumento do diâmetro de bocal (Figura 21). Todos os modelos de emissor tiveram taxas de vazão crescente com o aumento do diâmetro de bocal e seus valores de taxa média ponderada de aplicação de água dependente da sua largura de padrão molhado. Entretanto, o emissor tubo liso apresentou valores decrescentes de taxa média ponderada de aplicação de água com o aumento do diâmetro de bocal, mesmo com o aumento de vazão dos bocais e largura do padrão molhado nas mesmas proporções. Isso indicou maior grau de pulverização do jato de água proveniente do emissor tubo liso, quando comparado ao emissor *Quad-Spray* e, obviamente, ao emissor tubo corrugado, que apresentou largura de padrão molhado constante, de 0,098 m, como mostrado na Figura 21.

Quad-Spray

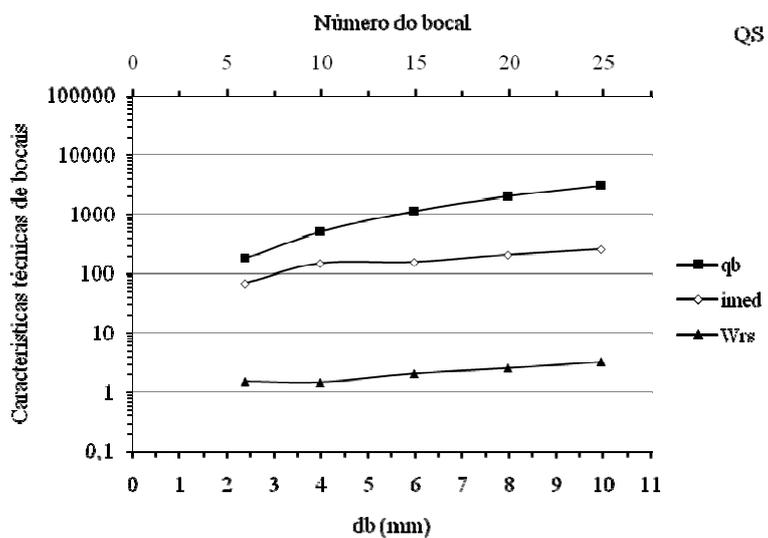
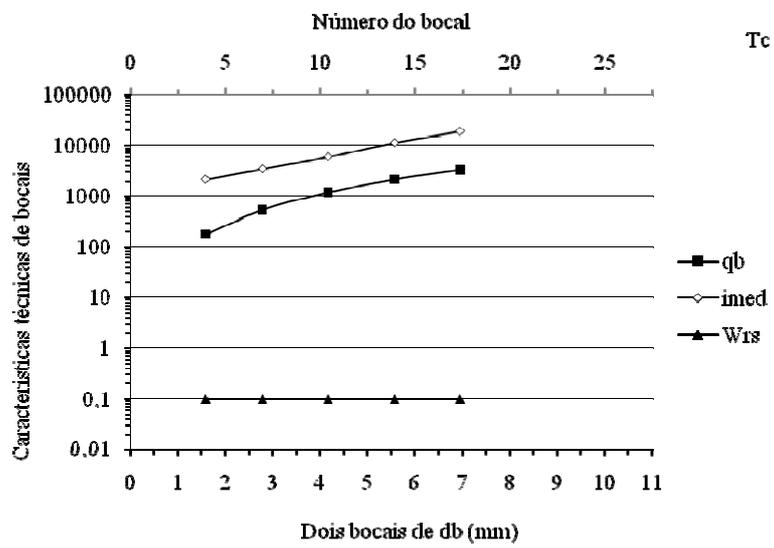


FIGURA 21 Taxa média de aplicação de água (imed), em mm h⁻¹; largura do padrão molhado (W_{rs}), em m e vazão de bocal (qb), em L h⁻¹, relacionados aos diâmetros de bocal (db) associados aos emissores: *Quad-Spray* (QS), Tubo corrugado (Tc) e Tubo liso (Tl). (“...continua...”).

“FIGURA 21, Cont.”

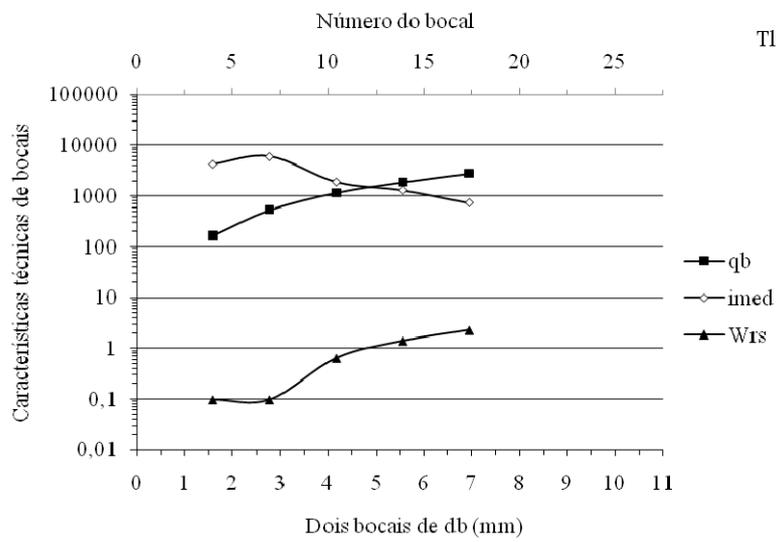
Tubo corrugado



(“...continua...”)

“FIGURA 21, Cont.”

Tubo liso



4.2.1 Perdas de solo por erosão hídrica

Houve elevada intensidade de relação entre os valores de perda de solo por erosão hídrica e taxa média de aplicação de água, ao longo da área molhada dos três modelos de emissor tipo LEPA, como se observa nos elevados valores de coeficiente de correlação apresentados na Tabela 16, significativamente superiores ($<0,01$), conforme Anexo G. Entretanto, aqueles elevados valores de coeficiente de correlação que não se mostraram significativos devido à pequena quantidade de amostras atingidas pelos bocais e utilizadas no ajuste dos dados indicaram, ainda assim, boa correlação. Pelos valores positivos dos coeficientes de correlação, verifica-se que há um aumento na quantidade de solo perdido por erosão hídrica com o aumento da taxa média de aplicação de água, ao longo da área molhada de cada bocal, independente do modelo de emissor. Foi observada elevada desuniformidade de distribuição de água ao longo da área molhada de cada bocal, nos três modelos de emissor, como apresentado pelos baixos valores de coeficiente de uniformidade de distribuição de água (CUD) apresentados na Tabela 16.

O emissor tubo liso apresentou-se mais desuniforme quando associado ao bocal de 1,59 mm (menor bocal), enquanto o emissor tubo corrugado apresentou-se com maior uniformidade, quando associado a esse mesmo bocal. Este fato foi atribuído a características construtivas dos próprios protótipos que, associadas aos diâmetros de bocal, apresentaram distribuição de água peculiar. Os três modelos de emissor tipo LEPA, independente do diâmetro do bocal, não apresentaram boa uniformidade de distribuição de água.

TABELA 16 Correlação linear simples de valores de perda de solo por erosão hídrica, em função de valores de taxa média de aplicação de água, de diâmetros de bocal (db): 2,38, 3,97, 5,95, 7,94 e 9,92 mm associados ao emissor *Quad-Spray* (QS) e de dois bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56 e 6,94 mm associados ao emissor tubo corrugado (Tc) e tubo liso (Tl).

Emissor	db (mm)	Média ponderada		CUD (%)	R
		imed (mm h ⁻¹)	ps (g m ⁻² mm ⁻¹)		
QS	2,38	68,1	273,9	2,95	94,60 ^{**}
QS	3,97	147,2	126,1	7,30	80,67 ^{**}
QS	5,95	154,4	158,3	3,69	93,70 ^{**}
QS	7,94	206,8	171,3	6,90	91,10 ^{**}
QS	9,92	258,2	164,6	35,73	90,73 ^{**}
Tc	Dois bocais 1,59	2135,3	72,7	61,14	80,72 ^{ns}
Tc	Dois bocais 2,78	3412,3	55,4	22,71	97,24 ^{**}
Tc	Dois bocais 4,17	5910,3	89,9	5,23	95,03 ^{**}
Tc	Dois bocais 5,56	11229,0	151,5	2,81	94,06 ^{**}
Tc	Dois bocais 6,94	18585,0	227,9	3,63	97,47 ^{**}
Tl	Dois bocais 1,59	4274,7	117,7	5,17	99,99 ^{ns}
Tl	Dois bocais 2,78	6040,7	82,0	9,62	92,14 ^{ns}
Tl	Dois bocais 4,17	1890,8	131,9	10,03	69,42 ^{ns}
Tl	Dois bocais 5,56	1292,2	58,8	15,52	80,51 ^{ns}
Tl	Dois bocais 6,94	729,2	61,9	7,93	94,87 ^{**}

Significativo a 1%^{**} pelo teste t, ao nível de significância de 5%.

Além das características peculiares de aplicação de água de cada um dos modelos de emissor, a baixa uniformidade de distribuição de água de bocais de emissores tipo LEPA ao longo de sua área molhada, ocorre devido à sua aplicação de água localizada, não existindo, portanto, o efeito da sobreposição de lâmina aplicada, como observado em uma irrigação em área total.

A desuniformidade de distribuição verificada nos três modelos de emissores também pode ser observada pelos perfis de distribuição de água apresentados nas Figuras 22 e 23.

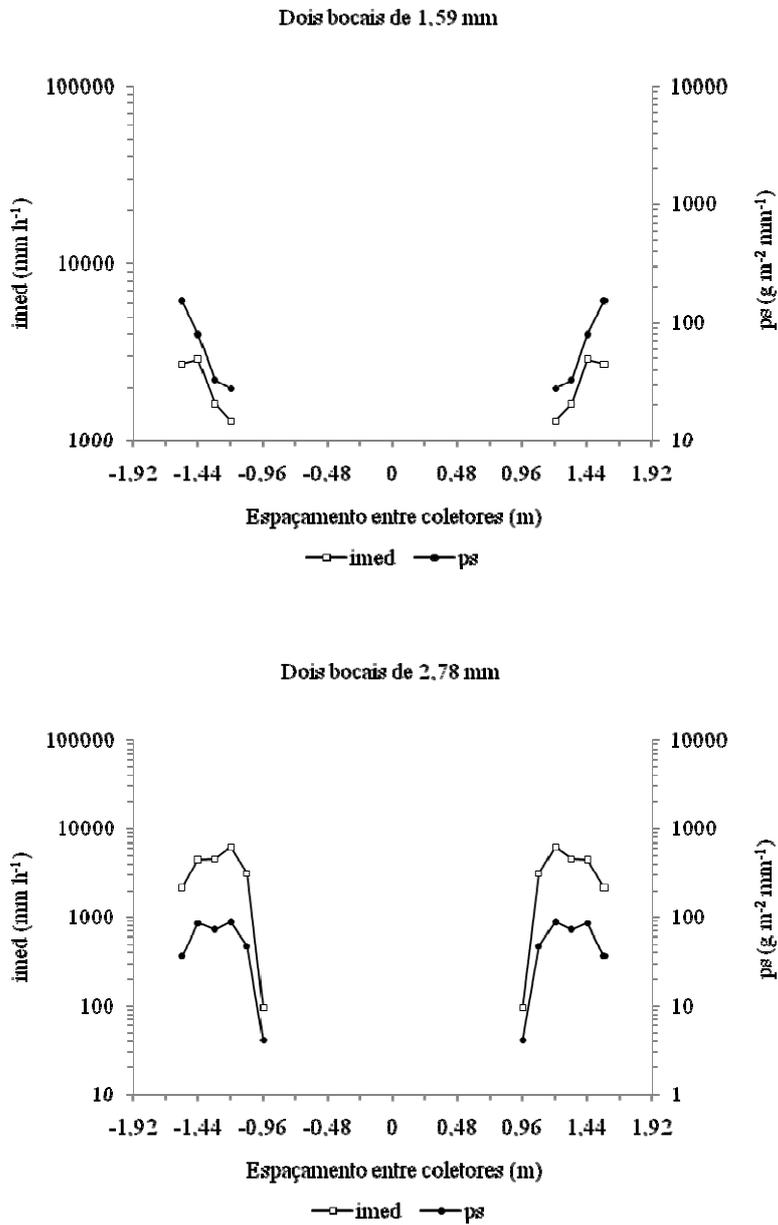
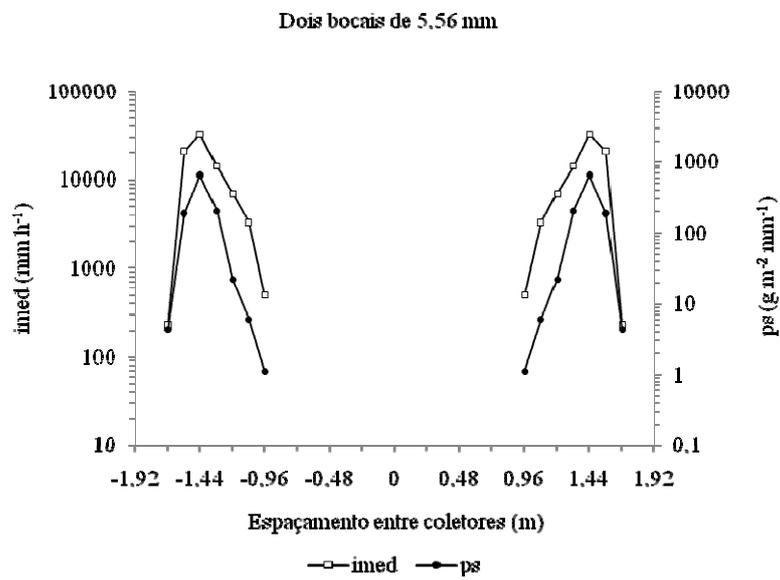
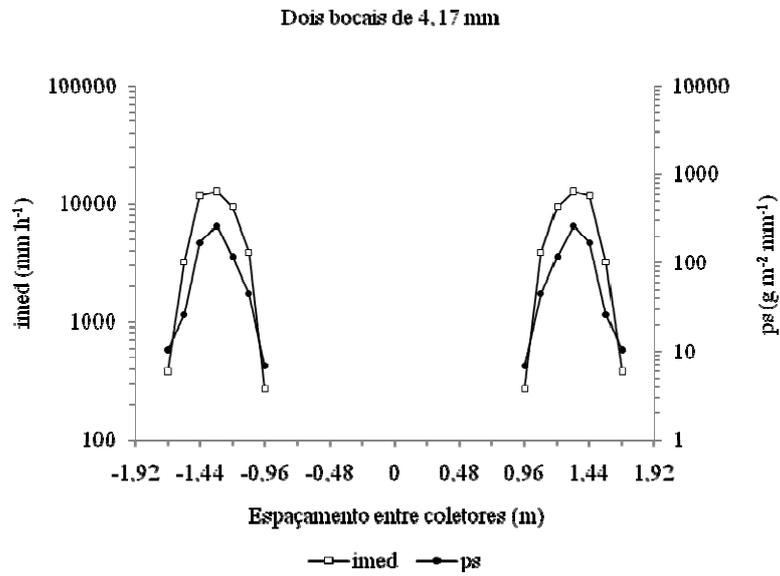


FIGURA 22 Perfil de distribuição de água de dois bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56 e 6,94 mm associados ao emissor tubo corrugado (Tc). (“...continua...”).

“FIGURA 22, Cont.”



(“...continua...”)

“FIGURA 22, Cont.”

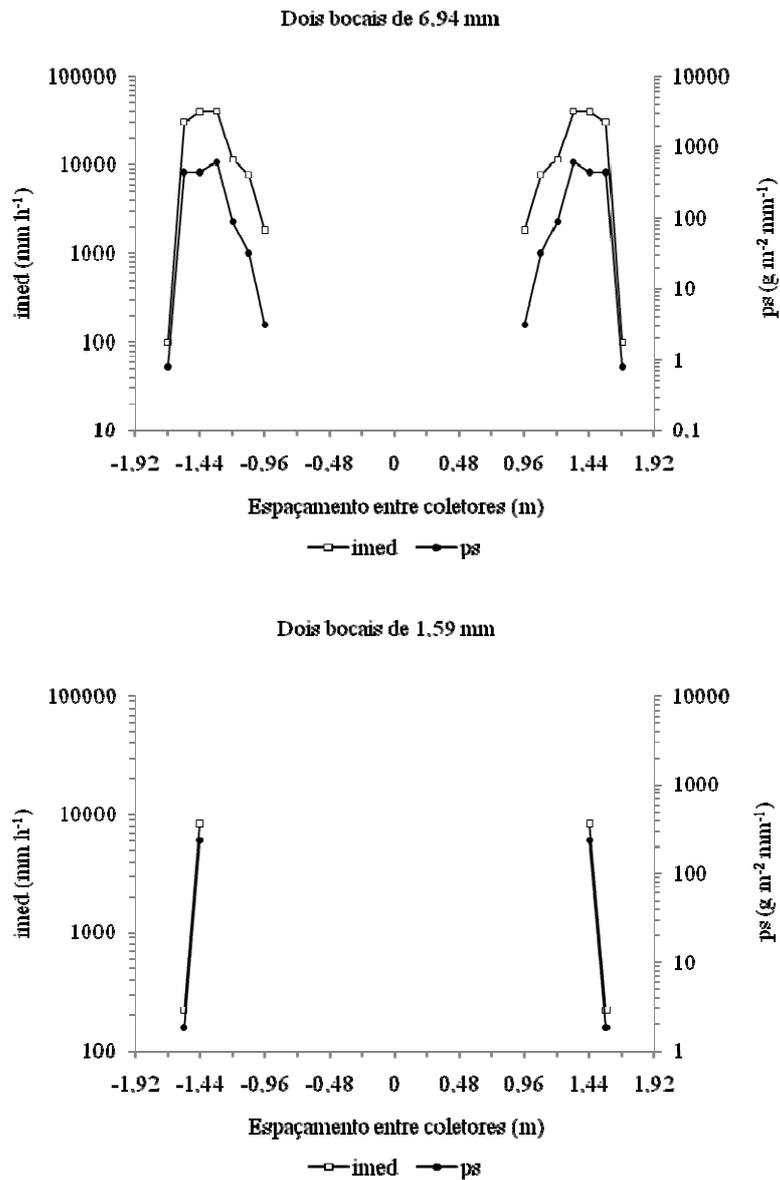
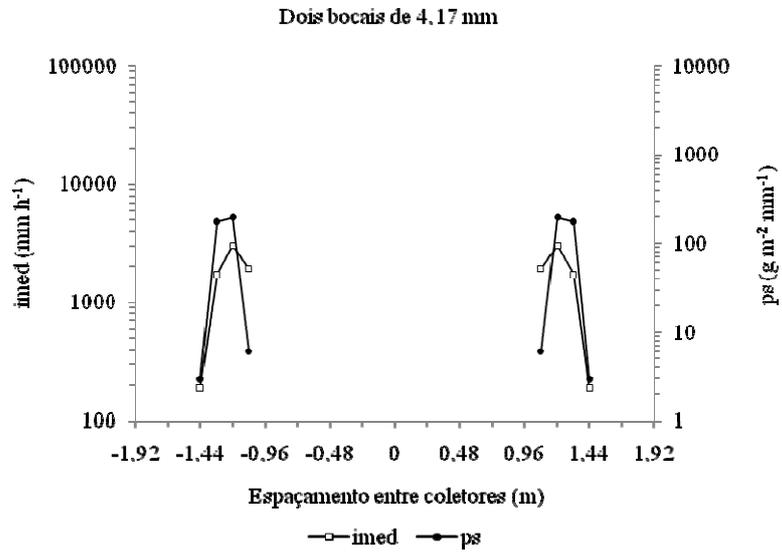
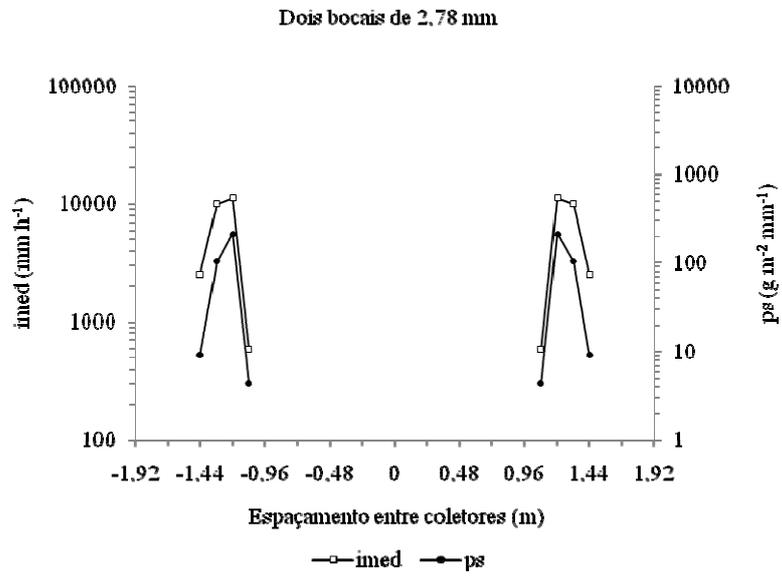


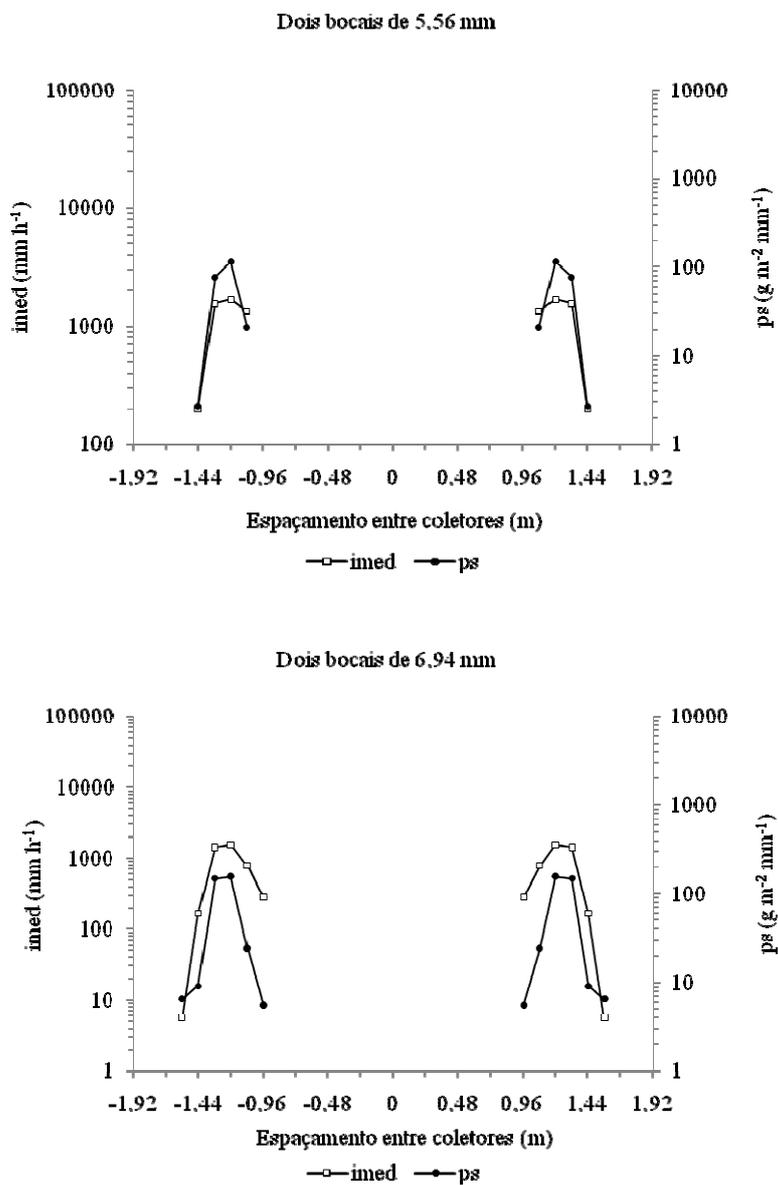
FIGURA 23 Perfil de distribuição de água de dois bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56 e 6,94 mm associados ao emissor tubo liso (TI). (“...continua...”).

“FIGURA 23, Cont.”



(“...continua...”)

“FIGURA 23, Cont.”



O emissor *Quad-Spray* e o tubo liso, quando analisados os cinco bocais em conjunto, não apresentaram boa correlação de seus valores médios

ponderados de perdas de solo por erosão hídrica com os valores médios ponderados de taxa média de aplicação de água, com o aumento do diâmetro de bocal, como pode ser observado pelos baixos valores de coeficiente de correlação apresentados na Tabela 17, não significativos, conforme Anexo G. Observa-se que os emissores tubo corrugado e tubo liso apresentaram valores de coeficiente de correlação positivo, o que, provavelmente, está relacionada com a baixa altura de instalação dos protótipos de emissor, estando o solo menos sujeito à energia de impacto das gotas e, sim, das taxas médias de aplicação de água. O valor negativo de coeficiente de correlação referente ao emissor *Quad-Spray* reforça, mais uma vez, a suposição de que esteja prevalecendo o efeito da altura de instalação do emissor e, conseqüentemente, de sua energia de impacto, sobre as perdas de solo por erosão hídrica.

TABELA 17 Correlação linear simples dos valores médios ponderados de perda de solo por erosão hídrica em função dos valores médios ponderados de taxa média de aplicação de água, de diâmetros de bocal (db): 2,38, 3,97, 5,95, 7,94 e 9,92 mm associados ao emissor *Quad-Spray* e de dois bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56 e 6,94 mm associados aos emissores tubo corrugado (Tc) e tubo liso (Tl).

Fonte de variação	CUD (%)	R
<i>Quad-Spray</i>	34,99	-60,97 ^{ns}
Tubo Corrugado	19,62	98,78 ^{**}
Tubo Liso	35,10	27,75 ^{ns}

Significativo a 1%^{**} pelo teste t, ao nível de significância de 5%.

Pelos valores de quadrado médio significativamente superiores ($P < 0,01$), conforme Anexo H, foi verificado efeito de diâmetro de bocal, modelo de emissor e interação de diâmetro de bocal com o modelo de emissor, sobre os valores médios ponderados de taxa média ponderada de aplicação de água e perda de solo por erosão hídrica e vazão média do bocal apresentados na Tabela 18.

TABELA 18 Valores médios ponderados de taxa média de aplicação de água (imed) e perda de solo por erosão hídrica (ps) e vazão média de bocal (qb) em função de diâmetro de bocal (db): 2,38, 3,97, 5,95, 7,94 e 9,92 mm associado ao emissor *Quad-Spray* (QS) e de dois bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56 e 6,94 mm associados aos emissores tubo corrugado (Tc) e tubo liso (Tl).

Interações		Variáveis avaliadas		
db (mm)	Emissor	imed (mm h ⁻¹)	ps (g m ⁻² mm ⁻¹)	qb (L h ⁻¹)
2,38	QS	68,1 A	273,9 A	180,3 A
Dois bocais de 1,59	Tc	2135,3 B	72,7 B	176,0 A
Dois bocais de 1,59	Tl	4274,7 C	117,7 C	165,5 A
3,97	QS	147,2 A	126,1 A	510,1 A
Dois bocais de 2,78	Tc	3412,3 B	55,4 B	526,2 A
Dois bocais de 2,78	Tl	6040,7 C	82,0 C	530,7 A
5,95	QS	154,4 A	158,3 A	1149,7 A
Dois bocais de 4,17	Tc	5910,3 B	89,9 B	1173,9 A
Dois bocais de 4,17	Tl	1890,8 C	131,9 B	1161,3 A
7,94	QS	206,8 A	171,3 A	2018,9 A
Dois bocais de 5,56	Tc	11229,0 B	151,5 A	2128,2 B
Dois bocais de 5,56	Tl	1292,2 C	58,8 B	1878,5 C
9,92	QS	258,2 A	164,6 A	3044,6 A
Dois bocais de 6,94	Tc	18585,0 B	227,9 B	3273,9 B
Dois bocais de 6,94	Tl	729,2 C	61,9 C	2787,3 C
CV%		0,68	10,12	0,14

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

O emissor *Quad-Spray* associado aos bocais de 2,38, 3,97 e 5,95 mm e, respectivamente, o emissor tubo corrugado e tubo liso associado a dois bocais de 1,59, 2,78 e 4,17 mm apresentaram valores de vazão de bocal estatisticamente iguais. Entretanto, foi observada diferença nos valores de bocal entre os três modelos de emissor tipo LEPA, quando operados com os dois maiores diâmetros de bocal. O emissor tubo liso, quando utilizado com os dois maiores diâmetros de bocal, apresentou os menores valores de vazão de bocal, provavelmente pela menor área total de orifício (0,000754 m²), enquanto o tubo corrugado, por ter uma área total de orifício maior (0,00177 m²), permitiu maior passagem de água e, conseqüentemente, maiores valores de vazão. Apesar de os três modelos de

emissor terem sido operados com a mesma pressão (68,95 kPa), os diferentes valores de vazão nos dois maiores bocais foi atribuído ao diferenciado mecanismo de distribuição de água entre o emissor *Quad-Spray* e os dois protótipos de emissor, uma vez que a área total de orifício dos protótipos de emissor foi dimensionada para atender à vazão de bocal apresentadas pelo fabricante.

O emissor *Quad-Spray* apresentou os menores valores médios ponderados de taxa média de aplicação de água, quando comparado aos dois protótipos de emissor, independente do diâmetro de bocal. O emissor *Quad-Spray*, por apresentar uma distribuição de água mais ampla, evidenciada por sua maior largura de padrão molhado, em comparação aos dois protótipos de emissor, proporcionou os menores valores médios ponderados de taxa média de aplicação de água. O emissor tubo corrugado, quando associado a dois bocais de 4,17, 5,56 e 6,94 mm, proporcionou os maiores valores médios ponderados de taxa média de aplicação de água, devido à sua aplicação de água ser muito localizada, refletindo em menores tempos de molhamento (entre 1,31 e 2,21 s). Entretanto, quando foi utilizado o emissor tubo liso associado aos bocais de 1,59 e 2,78 mm (menores bocais), foram observados os maiores valores médios ponderados de taxa média de aplicação de água, devido ao fato de sua aplicação ter sido mais localizada, quando comparada à aplicação do emissor tubo corrugado e, conseqüentemente, pelo seu baixo tempo de molhamento (entre 3,53 e 10,27 s). Aparentemente, a relação da taxa média ponderada de aplicação de água com o modelo de emissor e diâmetro de bocal não foi afetada pela diferença de vazão entre o emissor *Quad-Spray* e os emissores tubo corrugado e tubo liso, quando associados aos dois maiores bocais, mas, sim, afetada pelas características de distribuição de água, peculiar de cada modelo de emissor.

O emissor *Quad-Spray*, quando associado aos bocais de 2,38, 3,97, 5,95 e 7,94 mm, apresentou os maiores valores de perda de solo por erosão hídrica,

provavelmente devido à sua suposta elevada energia de impacto de gotas, uma vez que o emissor *Quad-Spray* foi instalado a dois metros de altura em relação à superfície das amostras. Entretanto, quando utilizados dois bocais de 6,94 mm acoplados ao emissor tubo corrugado, foram observados maiores valores de perda de solo por erosão hídrica, em comparação ao bocal de 9,92 mm acoplado ao emissor *Quad-Spray*, o que foi atribuído ao fato de sua excessiva aplicação de água localizada ter provocado, em grande parte, uma perda de solo por escoamento superficial.

De modo geral, o emissor tubo liso associado a dois bocais de 5,56 e 6,94 mm proporcionou as menores quantidades de solo perdido por erosão hídrica. Entretanto, o tubo corrugado mostrou-se menos impactante, quando associado a dois bocais de 1,59, 2,78 e 5,95 mm, por ter uma distribuição de água menos concentrada em comparação ao emissor tubo liso e devido à sua menor altura de instalação, quando comparado ao emissor *Quad-Spray*. A pequena quantidade de solo perdido por erosão hídrica, com o uso dos dois protótipos de emissor, foi atribuída à baixa altura (0,25 m) de instalação dos mesmos em relação à superfície das amostras, uma vez que esses emissores apresentaram as maiores taxas médias de aplicação de água. No entanto, apesar da baixa altura de instalação, a forma de distribuição de água é o diferencial entre os emissores tubo corrugado e tubo liso. Tendo em vista que os bocais com maiores diâmetros são os mais problemáticos em relação aos seus efeitos danosos sobre a superfície do solo, com conseqüente erosão, o emissor tubo liso mostrou-se mais promissor quando comparado ao emissor tubo corrugado, na minimização do poder de impacto erosivo de emissores tipo LEPA.

A baixa correlação entre os valores médios ponderados de taxa média de aplicação de água (imed) e perda de solo por erosão hídrica (ps), com o aumento do diâmetro do bocal, do emissor *Quad-Spray* e tubo liso, está representada graficamente na Figura 24.

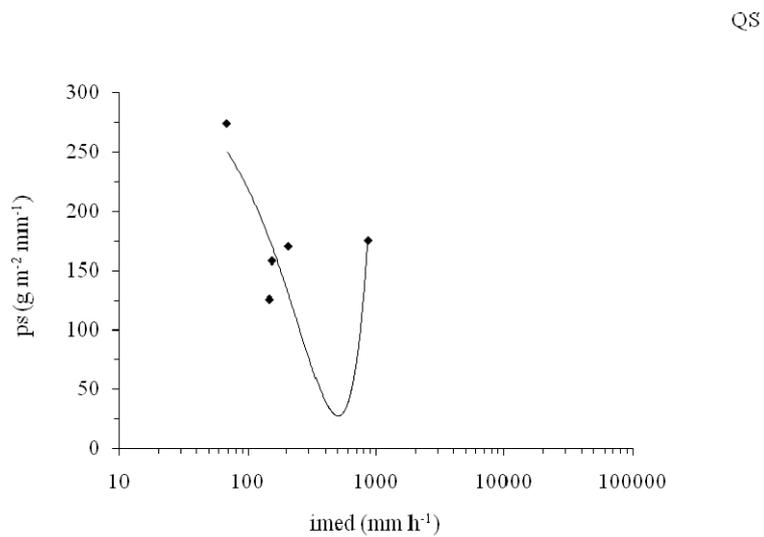
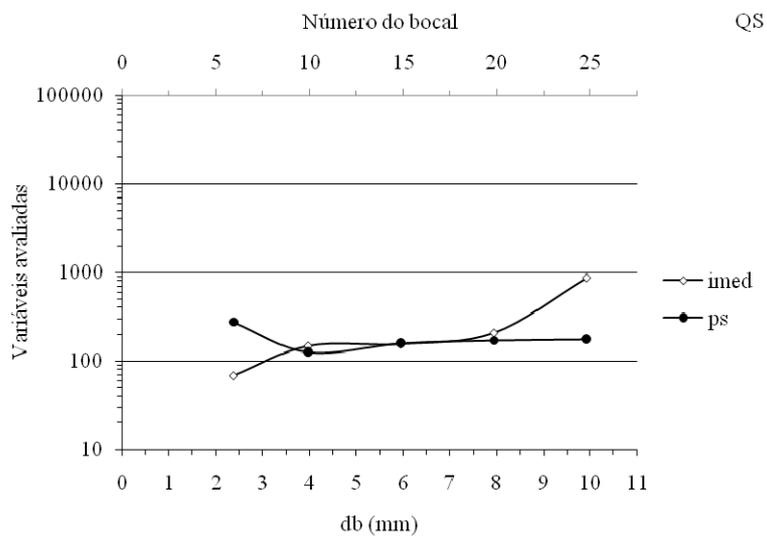
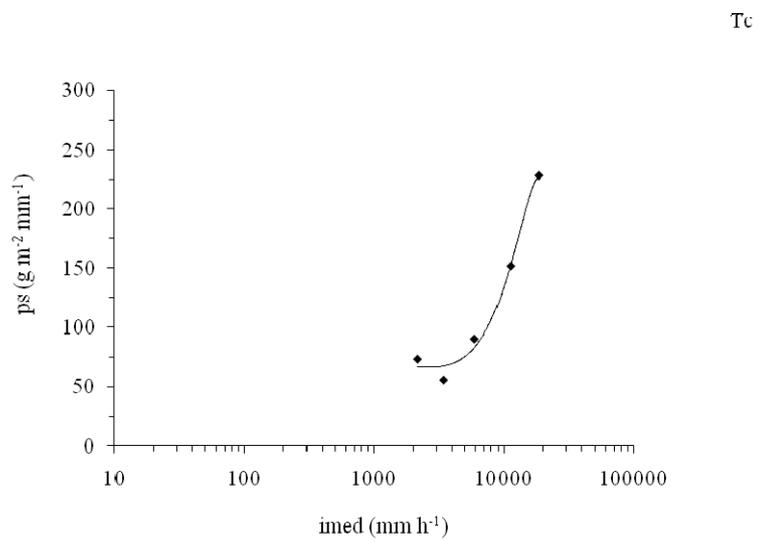
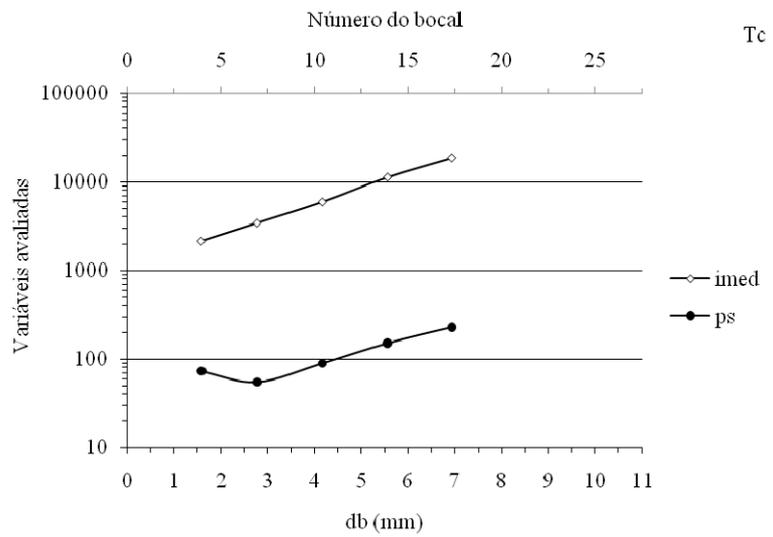


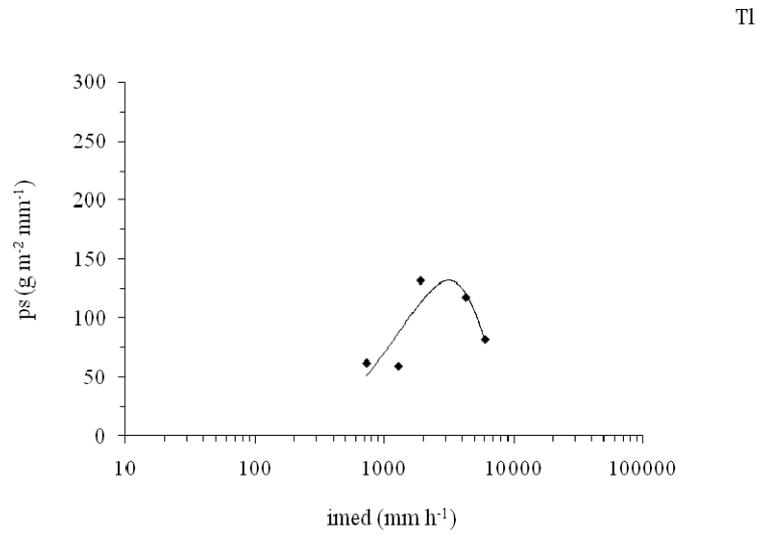
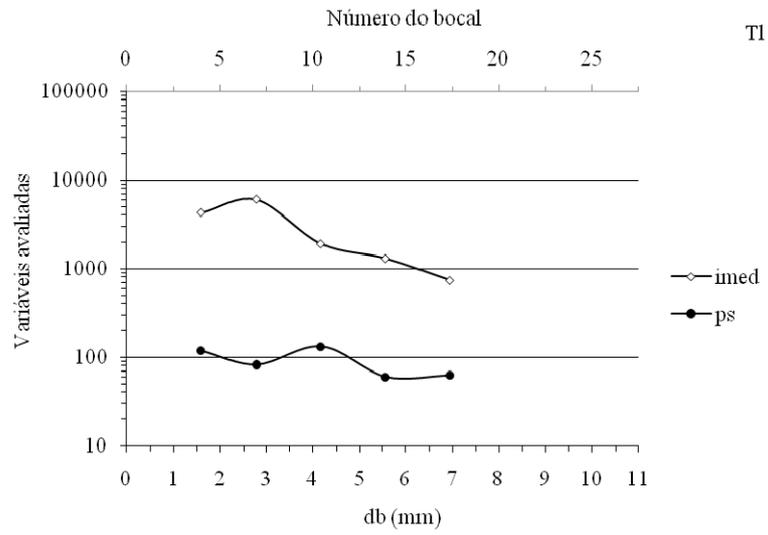
FIGURA 24 Valores médios ponderados de taxa média de aplicação de água (imed), em mm h^{-1} e perda de solo por erosão hídrica (ps), em $\text{g m}^{-2} \text{mm}^{-1}$, relacionados entre si e aos diâmetros de bocal (db) dos emissores tipo LEPA: *Quad-Spray* (QS), tubo corrugado (Tc) e tubo liso (Tl). (“...continua...”).

“FIGURA 24, Cont.”



(“...continua...”)

“FIGURA 24, Cont.”



A relação funcional dos valores médios ponderados de taxa média de aplicação de água e salpico de partículas de solo com os diâmetros de bocal e modelos de emissor pode ser mais bem esclarecida pelo desdobramento de diâmetro de bocal dentro de modelo de emissor, por efeitos lineares, quadráticos e cúbicos significativamente superiores ($<0,01$), como apresentado no Anexo H. Observa-se pelos elevados valores de coeficiente de determinação apresentados na Tabela 19 que, os dados médios ponderados de taxa média de aplicação de água se ajustaram bem aos dados de diâmetro de bocal, quando utilizados os três modelos de emissor tipo LEPA. Enquanto os dados médios ponderados de solo

TABELA 19 Modelos reduzidos sequenciais de valores médios ponderados de taxa média de aplicação de água (imed) e perda de solo por erosão hídrica (ps) sob efeito de diâmetros de bocal (db): 2,38, 3,97, 5,95, 7,94 e 9,92 mm associados ao emissor *Quad-Spray* e dois bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56, e 6,94 mm associados aos emissores tubo corrugado (Tc) e tubo liso (Tl).

Emissor		Parâmetros				R ²
		b0	b1	b2	b3	
QS	imed	28,621**	22,927**			94,45
QS	imed	16,687**	27,739**	-0,391**		94,58
QS	imed	-138,053**	126,034**	-18,217**	0,964	97,53
Tc	imed	-4748,645**	2155,672**			92,84
Tc	imed	3603,999**	-1212,186**	274,015 ^{ns}		99,92
Tc	imed	2049,926**	-225,005 ^{ns}	94,992 ^{ns}	9,682 ^{ns}	99,95
Tl	imed	6647,331**	-629,809**			72,05
Tl	imed	6671,315**	-639,479**	0,787**		72,06
Tl	imed	-4071,619**	6184,666**	-1236,759**	66,930**	86,40
QS	ps	229,664**	-8,420**			20,61
QS	ps	384,440**	-70,827**	5,078**		55,98
QS	ps	812,621**	-342,817**	54,402**	-2,668**	92,46
Tc	ps	-11,274 ^{ns}	21,674**			85,62
Tc	ps	109,585**	-27,058**	3,965**		99,14
Tc	ps	190,525**	-78,473*	13,289*	-0,504 ^{ns}	99,96
Tl	ps	133,065**	-7,059**			41,67
Tl	ps	104,570**	4,431 ^{ns}	-0,934 ^{ns}		45,12
Tl	ps	103,388 ^{ns}	5,182 ^{ns}	-1,071 ^{ns}	0,007 ^{ns}	45,12

Significativo, a 1%**, 5%* e não significativo^{ns}, pelo teste t, a 5% de significância.

perdido por erosão hídrica tiveram um bom ajuste aos dados de diâmetro de bocal apenas sob efeito do emissor tubo corrugado.

Os maiores valores de coeficiente de determinação do ajuste dos dados médios ponderados de taxa média de aplicação de água em função dos dados médios ponderados de solo salpicado, com o aumento do diâmetro dos bocais, como apresentado na Tabela 20, evidenciam, mais uma vez que, a perda de solo das amostras submetidas ao emissor tubo corrugado pode ter sido causada, em grande parte, pelo escoamento de água e não propriamente pelo salpicamento. Mais uma vez, o valor médio ponderado de taxa média de aplicação de água não se mostrou uma medida representante da característica erosiva da chuva produzida pelos três modelos de emissor associados aos diferentes bocais, como observado nos elevados valores de coeficiente de determinação das funções quadrática e cúbica, apresentados na Tabela 20, significativamente superiores ($<0,01$), conforme Anexo H.

TABELA 20 Modelos reduzidos sequenciais de valores médios ponderados de perda de solo por erosão hídrica (ps), em função de valores médios ponderados de taxa média de aplicação de água (imed), sob efeito de diâmetro de bocal (db): 2,38, 3,97, 5,95, 7,94, e 9,92 mm associado ao emissor *Quad-Spray* (QS) e dois bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56 e 6,94 mm associados aos emissores tubo corrugado (Tc) e tubo liso (Tl).

Emissor	Modelo	Parâmetros estatísticos				R ²
		b0	b1	b2	b3	
QS	Linear	252,602*	-0,429 ^{ns}			30,20
QS	Quadrático	455,639*	-3,366 ^{ns}	0,009 ^{ns}		85,76
QS	Cúbico	775,958 ^{ns}	-11,108 ^{ns}	0,062 ^{ns}	-0,11e ^{-3ns}	96,15
Tc	Linear	34,135*	0,010 ^{**}			97,45
Tc	Quadrático	42,457 ^{ns}	0,008 ^{ns}	0,12e ^{-6ns}		97,75
Tc	Cúbico	80,090 ^{ns}	-0,011 ^{ns}	0,24e ^{-5ns}	-0,74e ^{-10ns}	98,86
Tl	Linear	79,19 ^{ns}	0,004 ^{ns}			7,53
Tl	Quadrático	15,23*	0,065*	-0,89e ^{-5*}		66,96
Tl	Cúbico	-15,22*	0,108*	-0,24e ^{-4*}	0,15e ^{-8ns}	70,73

Significativo, a 1%^{**}, 5%* e não significativo^{ns}, pelo teste t, a 5% de significância.

5 CONCLUSÕES

As perdas de solo por erosão hídrica são extremamente dependentes das taxas médias de aplicação de água, ao longo da área molhada pelos emissores tipo LEPA: *Quad-Spray*, tubo corrugado e tubo liso. Entretanto, valores médios ponderados de perdas de solo por erosão hídrica não apresentam boa relação com valores médios ponderados de taxa média de aplicação de água, com o aumento de diâmetro de bocal.

O emissor tubo corrugado mostrou-se menos impactante que o emissor tubo liso, apenas quando associados aos menores diâmetros de bocal. As características construtivas do emissor tubo corrugado quando associado aos maiores diâmetro de bocal não favorece no aprimoramento de um emissor de baixo impacto erosivo.

O padrão de distribuição de água dos protótipos de emissor tipo LEPA instalados próximos ao solo foi extremamente importante na redução de seu poder de impacto erosivo e o emissor tubo liso foi o de menor impacto erosivo, comprovando que outros tipos de emissores podem superar o emissor *Quad-Spray* disponível no mercado na minimização da quantidade de solo perdido por erosão hídrica.

Características operacionais, como altura de instalação, largura do padrão de molhamento e energia cinética, devem ser estudadas, para maiores esclarecimentos sobre o poder de impacto erosivo de bocais de emissores tipo LEPA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, A. W.; LOMBARDI NETO, F.; CATANEO, A.; SRINIVASAN, V. S.; SANTOS, J. R. Parâmetros erosividade da chuva, da enxurrada e da chuva-enxurrada correlacionados com as perdas de solo de um Luvissole. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 26, p. 695-703, 2002.
- AMORIM, R. S. S. **Desprendimento e arraste de partículas de solo decorrentes de chuvas simuladas**. 1999. 75 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- AMORIM, R. S. S.; SILVA, D. D. da; PRUSKI, F. F.; MATOS, A. T. de. 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.
- ASSOCIAÇÃO DOS AGRICULTORES E IRRIGANTES DO OESTE DA BAHIA. **4º Anuário de pesquisas da cafeicultura irrigada do oeste da Bahia**. Barreiras, 2004. 70 p.
- ASSOULINE, S.; BEN-HUR, M. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing. **Catena**, Amsterdam, v. 66, p. 211-220, 2006.
- BAHIA, V. G.; CURI, N.; CARMO, D.; MARQUES, J. J. G. M. M. Fundamentos de erosão do solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 16, n. 176, p. 25-31, 1992.
- BERGERON, V.; MARTINS, J. Y.; VOVELLE, L. Interaction of droplets with a surface: impact and adhesion. **Agro Food Industry Hi-Tech**, Milano, v. 10, n. 5, p. 21-23, 1999.
- 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. **Transaction of the ASAE**, Saint Joseph, v. 28, n. 6, p. 1940-1946, 1985.

BERTOL, I. Avaliação da erosividade da chuva na localidade de Campos Novos (SC) no período de 1981–1990. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 29, p. 1453-1458, 1994.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; BATISTELA, O.; LEITE, D.; AMARAL, A. J. Erodibilidade de um cambissolo húmico alumínico léptico determinada sob chuva natural entre 1989 e 1998 em Lages (SC). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 26, p. 465-471, 2002.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 1990. 355 p.

BOLLINE, A. Study of the importance of splash and wash on cultivated loamy soils of Hesbaye (Belgium). **Earth Surface Processes**, Sussex, v. 3, n. 1, p. 71-84, 1978.

BRANDÃO, V. dos S.; SILVA, D. D. da; RUIZ, H. A.; PRUSK, F. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; MARTINEZ, M. A.; SILVA, E. O. Perdas de solo e caracterização física e micromorfológica de crostas formadas em solo sob chuva simulada. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 129-138, 2007.

BRONER, I. **Irrigation**: center-pivot irrigation systems. Colorado: [s.n.], 2005. (Crop Series, n. 4704).

CANTALICE, J. R. B.; MARGOLIS, E. Características das chuvas e correlação de índices de erosividade com as perdas de solo do agreste de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, p. 275-281, 1993.

CARVALHO, D. A.; SILVA, L. D. B. A evolução dos pivôs. **A Granja**, Porto Alegre, p. 44-47, set. 2007.

CARVALHO, D. F. de; MONTEBELLER, C. A.; CRUZ, E. S. da; CEDDIA, M. B.; LANA, A. M. Q. Perdas de solo e água em um argissolo vermelho amarelo, submetido a diferentes intensidades de chuva simulada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 3, p. 385-389, 2002.

CHRISTOFIDIS, D. Água na produção de alimentos: o papel da academia e da indústria no alcance do desenvolvimento sustentável. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE COOPERAÇÃO UNIVERSIDADE, 1., 2005, Ubatuba. **Anais...** São Paulo: UNINDU, 2005.

COLOMBO, A. Pivô central. In: MIRANDA, J. H. de; PIRES, R. C. de M. **Irrigação**: série engenharia agrícola. Jaboticabal: FUNEP, 2003. p. 209-258.

CONCEIÇÃO, M. A. F.; COELHO, R. D. Ballistic model to estimate microsprinkler droplet distribution. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 60, n. 4, p. 775-778, Oct./Dec. 2003.

CRUSE, R. M.; BERGHOFER, B. E.; MIZE, C. W.; GHAFARZADEH, M. Water drop impact angle and Soybean protein amendment effects on soil detachment. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, p. 1474-1478, 2000.

DEBOER, D. W. Sprinkler application pattern shape and surface runoff. **Transactions of ASAE**, Saint Joseph, v. 44, n. 5, p. 1217-1220, 2001.

DEBOER, D. W.; MONNENS, M. J. Estimation of drop size and kinetic energy from a rotating *spray*-plate sprinkler. **Transactions of ASAE**, Saint Joseph, v. 44, n. 6, p. 1571-1580, 2001.

DEBOER, D. W.; MONNES, M. J.; KINCAID, D. C. Measurement of sprinkler droplet size. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 17, n. 1, p. 11-15, 2001.

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

DILLON, R. C.; HILER, E. A. J.; VITTEROE, G. Center-pivot sprinkler design based on intake characteristics. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 15, n. 5, p. 996-1001, 1972.

DOURADO NETO, D.; LIER, Q. J. V.; FRIZZONE, J. A. Determinação da lâmina média de irrigação em pivô central. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 51, n. 1, p. 188-190, jan./abr. 1994.

DUFRANC, G.; DECHEN, S. C. F.; FREITAS, S. S.; CAMARGO, O. A. Atributos físicos, químicos e biológicos relacionados com a estabilidade de agregados de dois latossolos em plantio direto no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 3, p. 505-517, maio/jun. 2004.

EIGEL, J. D.; MOORE, I. D. A simple technique for measuring raindrop size and distribution. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 26, n. 4, p. 1079-1084, July/Aug. 1983.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Relatório de gestão**: consócio brasileiro de pesquisa e desenvolvimento do café. Brasília, 2004. 131 p.

FARIA, L. C.; COLOMBO, A.; OLIVEIRA, H. F. E.; PRADO, G. do. Simulação da uniformidade da irrigação de sistemas convencionais de aspersão operando sob diferentes condições de vento. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 1, p. 19-27, jan./mar. 2009

FERNANDES, A. L. T. O que a irrigação tem feito pela cafeicultura brasileira? **ITEM: Irrigação & Tecnologia Moderna**, Brasília, n. 79, p. 50-53, jul./ago. 2008.

FERNANDES, A. L. T.; SANTINATO, R. Plantio circular do cafeeiro com pivô central utilizando emissores LEPA. **Bahia Agrícola**, Salvador, v. 5, n. 3, p. 19-22, 2003.

FERREIRA, D. F. **Programa de análises estatísticas (statistical analysis software) e planejamento de experimentos - SISVAR 5.0 (Build 67)**. Lavras: DEX/UFLA, 2003.

FOLEGATTI, M. V.; PESSOA, P. C. S.; PAZ, V. P. S. Avaliação do desempenho de um pivô central de grande porte e baixa pressão. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 55, n.1, p. 119-127, jan./abr. 1998

GALDINO, S.; RISSO, A.; SORIANO, B. M. A.; VIEIRA, L. M.; PADOVANI, C. R.; POTT, A.; MELO, E. C.; ALMEIDA JUNIOR, N. **Perdas de solo na bacia do Alto Taquari**. Brasília: EMBRAPA, 2003. (Boletim de Pesquisa & Desenvolvimento, 44).

GILLEY, J. R. Suitability of reduced pressure center-pivot. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 110, n. 1, p. 22-34, 1984.

GOMES, G. L. M. **Diagnósticos de áreas degradadas por voçorocas no município de alterosa/MG**. 2006. 59 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto.

GRANIER, J.; MOLLE, B.; DEUMIER, J. M. IRRIPARC-Part 1: Modeling spatial water distribution under a sprinkler in windy conditions. In: EUROPEAN REGIONAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL COMMISSION ON IRRIGATION AND DRAINAGE, 20., 2003, Montpellier. **Proceedings...** Montpellier: AFEID, 2003. p.14-19.

GUERRA, A. J. T. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Org.). **Erosão e conservação dos solos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 17-55.

GUZEL, H.; BARROS, A. P. Using acoustic emission testing to monitor kinetic energy of raindrop and rainsplash erosion. **ASABE**, Saint Joseph, p. 525-528, jan. 2001.

HILLS, D. **Advanced sprinkler irrigation**. Davis: University of California, 1988.

KELLER, J. **Sprinkler irrigation**. Logan: Utah State University, 1984. 621 p.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: AnaviBook/Va Nestrland Reinhold, 1990. 652 p.

KINCAID, D. C. Application rates from center pivot irrigation with current sprinkler types. **Transaction of the ASAE**, Saint Joseph, v. 21, n. 4, p. 605-610, 2005.

KINCAID, D. C.; HEERMANN, D. F.; KRUSE, E. G. Application rates and runoff in center-pivot sprinkler irrigation under low-energy. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 12, n. 6, p. 790-794, 1969.

KING, B. A.; KINCAID, D. C. **Optimal performance from center pivot sprinkler systems**. [S. l.]: University of Idaho College of Agriculture, 1997. 20 p. (Bulletin, 797).

KINNELL, P. I. A.; CUMMINGS, D. Soil slope gradient interactions in erosion by rain-impacted flow. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 36, n. 2, p. 381-387, 1993.

- KOHL, R. A.; BERNUTH, R. D. von; HUEBNER, G. Drop size distribution measurement problems using a laser unit. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 28, n. 1, p. 190-192, 1985.
- LAL, R. Drop size distribution and energy load of rain storms at Ibadan, western Nigeria. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 48, p. 103-114, 1998.
- LAWS, J. O. Measurements on the fall-velocity of water drops and raindrops. **Transactions American Geophysical Union**, Washington, v. 22, p. 709-721, 1941.
- LAWS, J. O.; PARSONS, D. A. The relation of rain drop size to intensity. **Transactions American Geophysical Union**, Washington, v. 24, p. 452-459, 1943.
- LEGOUT, C.; LEGUÉDOIS, S.; LE BISSONNAIS, Y.; MALAM, I. S. S. A. Sprash distance and size distributions for various soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 124, p. 279-292, 2005.
- 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. 425-447, jun. 2006.
- LIMA, L. A.; SILVA, M. L. N.; MARQUES, J. J. G. S. M. O salpicamento de latossolos provocado por gotas de chuva. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 24., 1993, Goiânia. **Anais...** Goiânia: SBPC, 1993. p. 163-164.
- LIMA, P. M. P.; ANDRADE, H. Erodibilidade entressulcos e atributos de solos com B textural e B latossólico do sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, p. 463-474, 2001.
- LUZ, P. B.; HEERMANN, D. A statistical approach to estimating runoff in center pivot irrigation with crust conditions. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 72, n. 11, p. 33-46, 2005.
- MARTIN, D. L.; KINCAID, D. C.; LYLE, W. M. Design and operation of sprinkler systems. In: HOFFMAN, G. J.; EVANS, R. G.; JENSEN, M. E.; MARTIN, D. L.; ELLIOTT, R. L. **Design and operation of farm irrigation systems**. Saint Joseph: ASABE, 2007. p. 557-631.

MARTINS, S. G.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; FONSECA, S.; MARQUES, J. J. G. S. M. Perdas de solo e água por erosão em sistemas florestais na região de Aracruz (ES). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 3, p. 395-403, maio/jun. 2003.

MOHAMMED, D.; KOHL, R. A. Infiltration response of kinetic energy. **Transaction of the ASAE**, Saint Joseph, v. 30, n. 1, p. 101-111, 1987.

MONTERO, J.; TARJUELO, J. M.; CARRIÓN, P. Sprinkler droplet size distribution measured with an optical spectropuviometer. **Irrigation Science**, New York, v. 22, p. 46-56, 2003.

MOREIRA, J. A. A.; STONE, L. F.; TRINDADE, M. da G.; CÁNOVAS, A. D. **Manejo da irrigação para o trigo no sistema plantio direto**. Santo Antônio do Goiás: EMPRAPA, 2004. 8 p. (Comunicado Técnico, 91).

NASCIMENTO, C. W. A. do; CHAVES, I. de B. Erosividade e características da chuva correlacionadas com perdas de solo em Alagoinhas-PB. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 26, n. 3, p. 407-412, 1996.

NIU, S.; JIA, X.; SANG, J.; LIU, X.; LU, C.; LIU, Y. **Distributions of raindrop sizes and fall velocities in a semi-arid plateau climate**: convective vs. stratiform rains. Upton: Brookhaven National Laboratory, 2009. Disponível em: <www.bnl.gov>. Acesso em: 15 jul. 2009.

OLIVEIRA, A. S.; PEREIRA, F. A. C.; PAZ, V. P. S.; SANTOS, C. A. Avaliação de desempenho de sistemas pivô central na região oeste da Bahia. **Irriga**, Botucatu, v. 9, n. 2, p. 126-135, maio/ago. 2004.

OLIVEIRA, H. F. E. de; COLOMBO, A.; FARIA, L. C. Modelagem dos efeitos do vento sobre as dimensões do alcance do jato de um canhão hidráulico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 6, 2009. No prelo.

PRADO, G. **Modelagem da aplicação de água com canhões hidráulicos sob diferentes condições de vento**. 2008. 121 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Água e Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

PRUSKI, F. F. **Conservação de água e solos**. Brasília: ABEAS; Viçosa, MG: UFV, 1996. 88 p. (Curso de Gestão de Recursos Hídricos para o Desenvolvimento Sustentados de Projetos Hidroagrícolas, 7).

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna: R foundation for Statistical Computing, 2008. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 12 ago. 2009.

REICHERT, J. M.; CABEDA, M. S. V. Salpico de partículas e selamento superficial em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 16, p. 389-396, 1992.

REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; CABEDA, M. S. V. Índices de estabilidade de agregados e suas relações com características e parâmetros de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, p. 283-290, 1993.

RIBEIRO, B. T. **Energia cinética de gotas de chuva simulada e energia ultrassônica na desagregação de um Cambissolo**. 2006. 65 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

RICHARDS, P. J.; WEATHERHEAD, E. K. Prediction of raingun application patterns in windy conditions. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Amsterdam, v. 54, n. 4, p. 281-291, 1993.

RODRIGUES, L. N.; PRUSKI, F. F.; MARTINEZ, M. A.; SILVA, D. D. Metodologia para estimativa da taxa de precipitação máxima admissível em pivô central. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 19, n. 2, p. 151-162, dez. 1999.

RODRIGUES, T. R. I.; BATISTA, H. S.; CARVALHO, J. M. de; GONÇALVES, A. O.; MATSURA, E. E. Uniformidade de distribuição de água em pivô central, com a utilização da técnica TDR na superfície e no interior do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 2, p. 187-191, 2001.

SALLES, C.; POESEN, J.; SEMPERE-TORRES, D. Kinetic energy of rain and its functional relationship with intensity. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 257, p. 256-270, 2002.

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

SENNINGER IRRIGATION INC. **LEPA & the Quad-Spray**. Disponível em: <<http://www.senninger.com/literature/QuadSheet.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2008a.

SENNINGER IRRIGATION INC. **Pivot-master**: irrigation products.
Disponível em: <<http://www.senninger.com/literature/Pivot%20Catalog.pdf>>.
Acesso em: 20 fev. 2008b.

SILVA, J. R. C.; CARVALHO, R. J. T. Métodos de determinação do salpico e influência da cobertura do solo em condições de chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 26, p. 473-481, 2002.

SILVA, M. L. N.; CURI, N.; MARQUES, J. J. G. de S. e M.; LIMA, L. A.; FERREIRA, M. M.; LIMA, J. M. Resistência ao salpico provocado por impacto de gotas de chuva simulada em latossolos e sua relação com as características químicas e mineralógicas. **Ciência e Prática**, Lavras, v. 19, n. 2, p. 176-182, abr./jun. 1995.

SILVA, M. L. N.; FREITAS, P. L.; BLANCANEUX, P.; CURI, N.; LIMA, J. M. Relação entre parâmetros da chuva e perdas de solo e determinação da erodibilidade de um latossolo vermelho-escuro em Goiânia, GO. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, p. 131-137, 1997.

SMITH, R. J.; GILLIES, M. H.; NEWELL, G.; FOLEY, J. P. A decision support model for travelling gun irrigation machines. **Biosystems Engineering**, London, v. 100, n. 1, p. 126-136, 2008.

SOLOMON, H. K.; ZOLDOSKE, D. F.; OLIPHANT, J. C. Laser optical measurement of sprinkler drops sizes. In: ASAE WINTER MEETING, Chicago, 1991. **Proceedings...**Chicago: ASAE, 1991. p. 87-96.

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

SUTHERLAND, R. A.; WAN, Y.; ZIEGLER, A. D.; LEE, C. T.; EL-SWAIFY, S. A. Splash and wash dynamics: an experimental investigation using an Oxisol. **Geoderma**, Amsterdam, v. 69, p. 85-103, 1996.

THOMPSON, A. L.; GILLEY, J. R.; NORMAN, J. M. A sprinkler water droplet evaporation and plant canopy model: I. model development. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 36, n. 3, p. 735-741, 1993.

TOMAZELA, C.; MANTOVANI, E. C.; FERNANDES, A. L. T. Irrigação localizada com sistema pivô central e linear: a nova fronteira da irrigação no Brasil. **ITEM: Irrigação & Tecnologia Moderna**, Brasília, n. 60, p.70-79, jun. 2003.

TRUMAN, C. C.; BRADFORD, J. M. Effects of antecedent soil moisture on splash detachment under simulated rainfall. **Soil Science**, Baltimore, v. 150, n. 5, p. 787-798, nov. 1990.

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 Agronomia) - Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Botucatu.

VILELLA, W. M. C.; FARIA, M. A. Qualidade dos grãos do cafeeiro (*Coffea arábica* L.) produzidos sob diferentes lâminas de irrigação e parcelamento de adubação. **Irriga**, Botucatu, v. 7, n. 3, p. 168-175, 2002.

VORIES, E. D.; BERNUTH, R. D. von. Single nozzle sprinkle performance in the wind. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 29, n. 5, p. 1325-1330, Jul./Aug. 1986.

WANG, Q.; HORTON, R.; SHAO, M. Effective raindrop kinetic energy influence on soil potassium transport into runoff. **Soil Science**, Baltimore, v. 167, n. 6, p. 369-376, jun. 2002.

WATSON, D. A.; LAFLEN, J. M. Soil strength, slope, and rainfall intensity effects on interrill erosion. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 29, n. 1, p. 98-102, Jan./Feb. 1986.

YANG, X.; MADDEN, L. V.; REICHARD, D. L.; FOX, R. D.; ELLIS, M. A. Motion analysis of drop impaction on a strawberry surface. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 56, p. 67-92, 1991.

ANEXOS

ANEXO A Página

TABELA 1A Análise de variância da regressão dos dados de vazão mensurada, relacionados com os dados de vazão de catálogo do fabricante de 22 diâmetros de bocal do emissor *Quad-Spray*..... 111

TABELA 2A Análise de variância da regressão dos dados de vazão relacionados aos 22 diâmetros de bocal do emissor *Quad-Spray*..... 111

TABELA 1A Análise de variância da regressão dos dados de vazão mensurada, relacionados com os dados de vazão de catálogo do fabricante de 22 diâmetros de bocal do emissor *Quad-Spray*.

FV	GL	QM
Modelo linear	1	17669231,5007**
Resíduo	20	548,5686

Significativo, a 1%** pelo teste F.

TABELA 2A Análise de variância da regressão dos dados de vazão relacionados aos 22 diâmetros de bocal do emissor *Quad-Spray*.

FV	GL	QM
Modelo potencial	1	19063585,1201**
Resíduo	20	465,5738

Significativo, a 1%** pelo teste F.

TABELA 1B Análise de variância da correlação linear simples de valores de perda de solo por erosão, em função de valores de taxa média de aplicação de água, de cada diâmetro de bocal (db) do emissor *Quad-Spray*..... 112

TABELA 1B Análise de variância da correlação linear simples de valores de perda de solo por erosão hídrica, em função de valores de taxa média de aplicação de água, de cada diâmetro de bocal (db) do emissor *Quad-Spray*.

db (mm)	GL	QM	GL residual	Resíduo
1,59	1	90178,0080**	4	1578,0287
1,98	1	941471,4761**	8	16169,8331
2,38	1	515324,8805**	14	42829,4690
2,78	1	5901639,1399**	14	10733,0072
3,18	1	5672775,0894**	16	12342,5814
3,57	1	343473,5120**	16	5194,7326
3,97	1	227785,4508**	16	7641,7203
4,37	1	313438,5759**	20	2140,3225
4,76	1	290224,1915**	20	530,8982
5,16	1	401299,8926**	22	634,2590
5,56	1	203745,8348**	22	1303,3668
5,95	1	363538,7934**	24	2102,4222
6,35	1	353687,5534**	24	1977,1936
6,75	1	536157,7405**	26	1977,8160
7,14	1	340266,3239**	26	1427,4916
7,54	1	376510,5273**	28	2598,1382
7,94	1	541585,2079**	28	3962,3800
8,33	1	490078,5302**	28	2864,1168
8,73	1	722442,9450**	28	4350,9691
9,13	1	344157,3045**	30	1664,7191
9,53	1	330668,0415**	30	3806,9840
9,92	1	373973,76**	30	2676,7771

Significativo, a 1%** pelo teste F, a 5% de significância.

FIGURA 1C Porcentagem de perda de solo por erosão hídrica (ps) verificada na amostra central, em relação ao total de solo perdido por erosão associado aos 22 diâmetros de bocal (db) do emissor *Quad-Spray* 113

TABELA 1C Análise de variância da correlação linear simples dos valores médios ponderados de perda de solo por erosão hídrica, em função dos valores médios ponderados de taxa média de aplicação de água, relacionados aos 22 diâmetros de bocal do emissor *Quad-Spray*..... 114

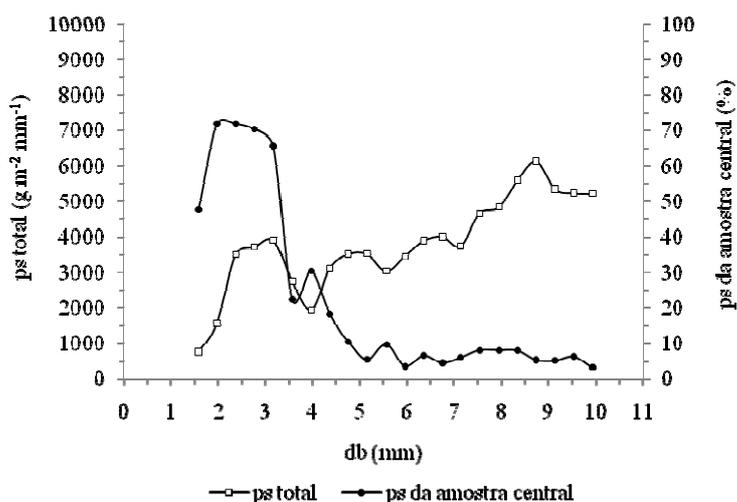


FIGURA 1C Porcentagem de perda de solo por erosão hídrica (ps) verificada na amostra central, em relação ao total de solo perdido por erosão associado aos 22 diâmetros de bocal (db) do emissor *Quad-Spray*.

TABELA 1C Análise de variância da correlação linear simples dos valores médios ponderados de perda de solo por erosão hídrica, em função dos valores médios ponderados de taxa média de aplicação de água, relacionados aos 22 diâmetros de bocal do emissor *Quad-Spray*.

FV	GL	QM
Modelo	1	7179,9398**
Resíduo	20	1480,3878

Significativo, a 1%** pelo teste F, a 5% de significância.

TABELA 1D Análise de variância do teste de Skott-Knott, a 5% de probabilidade, sobre os valores médios ponderados de taxa média de aplicação de água (imed) e perda de solo por erosão hídrica (ps), relacionados aos 22 diâmetros de bocal do emissor *Quad-Spray*..... 115

TABELA 2D Análise de variância da regressão dos valores médios ponderados de taxa média de aplicação de água (imed) e perda de solo por erosão hídrica (ps), relacionados aos 22 diâmetros de bocais do emissor *Quad-Spray* (QS)..... 115

TABELA 1D Análise de variância do teste de Skott-Knott, a 5% de probabilidade, sobre os valores médios ponderados de taxa média de aplicação de água (imed) e perda de solo por erosão hídrica (ps), relacionados aos 22 diâmetros de bocal do emissor *Quad-Spray*.

FV	GL	QM	
		imed	ps
db	21	8728,9**	5891,1**
Resíduo	42	64,2	366,5
CV%		4,8	10,2

**significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste F.

TABELA 2D Análise de variância da regressão dos valores médios ponderados de taxa média de aplicação de água (imed) e perda de solo por erosão hídrica (ps), relacionados aos 22 diâmetros de bocais do emissor *Quad-Spray* (QS).

FV		QM	
		imed	ps
Emissor		8728,85**	5891,13**
Resíduo		74,29	378,65
Emissor	Efeito	imed	ps
QS	Linear	131399,39**	7209,88**
QS	Quadrática	16919,47**	6430,66**
QS	Cúbica	9007,07**	1557,40*
QS	Quarta ordem	7589,429**	41770,26**
CV%		5,18	10,36

Significativo, a 1% ** e 5% *, pelo teste F.

TABELA 1E Análise de variância da regressão dos valores médios ponderados de perda de solo por erosão hídrica (ps), em função dos dados de taxa média de aplicação de água (imed), relacionados aos diâmetros de bocal: 2,38, 3,97, 5,95, 7,94 e 9,92 mm do emissor *Quad-Spray*..... 116

TABELA 2E Análise de variância do agrupamento de bocais formado pela aplicação do algoritmo k-médias sobre dados de taxa média de aplicação de água (imed) e perda de solo por erosão hídrica (ps), relacionados aos diâmetros de bocal: 2,38, 3,97, 5,95, 7,94 e 9,92 mm do emissor *Quad-Spray*..... 117

TABELA 1E Análise de variância da regressão dos valores médios ponderados de perda de solo por erosão hídrica (ps), em função dos dados de taxa média de aplicação de água (imed), relacionados aos diâmetros de bocal: 2,38, 3,97, 5,95, 7,94 e 9,92 mm do emissor *Quad-Spray*.

FV	GL	QM
Modelo linear	1	7180,118**
Resíduo	20	1480,386
CV%	20,21	
Modelo quadrático	2	12366,484**
Resíduo	19	634,467
CV%	13,23	
Modelo cúbico	3	8740,629**
Resíduo	18	586,997
CV%	12,72	
Modelo quarta ordem	4	7548,586**
Resíduo	17	387,853
CV%	10,34	

Significativo, a 1% ** pelo teste F.

TABELA 2E Análise de variância do agrupamento de bocais formado pela aplicação do algoritmo k-médias sobre dados de taxa média de aplicação de água (imed) e perda de solo por erosão hídrica (ps), relacionados aos diâmetros de bocal: 2,38, 3,97, 5,95, 7,94 e 9,92 mm do emissor *Quad-Spray*.

	Pillai	F aproximado	num Df	den Df	F
Grupos	1,651	44,872	4	38	6,711e ^{-14**}

**Significativo, a 1% de probabilidade.

TABELA 1F	Análise de variância da regressão dos dados de vazão relacionados aos dados de diâmetro de bocal: dois bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56 e 6,94 mm associados ao emissor tubo corrugado.....	118
-----------	---	-----

TABELA 2F	Análise de variância da regressão dos dados de vazão relacionados aos dados de diâmetro de bocal: dois bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56 e 6,94 mm associados ao emissor tubo liso.....	118
-----------	--	-----

TABELA 1F	Análise de variância da regressão dos dados de vazão relacionados aos dados de diâmetro de bocal: dois bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56 e 6,94 mm associados ao emissor tubo corrugado.	
-----------	---	--

FV	GL	QM
Modelo potencial	1	6244732,4040**
Resíduo	20	368,8341

Significativo a 1%** pelo teste F.

TABELA 2F	Análise de variância da regressão dos dados de vazão relacionados aos dados de diâmetro de bocal: dois bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56 e 6,94 mm associados ao emissor tubo liso.	
-----------	--	--

FV	GL	QM
Modelo potencial	1	4441986,2779**
Resíduo	20	947,1553

Significativo a 1%** pelo teste F.

ANEXO G

Página

TABELA 1G	Análise de variância da correlação linear simples de valores de perda de solo por erosão hídrica, em função de valores de taxa média de aplicação de água, associados aos diâmetros de bocal (db): 2,38, 3,97, 5,95, 7,94 e 9,92 mm associados ao emissor <i>Quad-Spray</i> (QS) e de dois bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56 e 6,94 mm associados ao emissor tubo corrugado (Tc) e tubo liso (Tl).....	120
TABELA 2G	Análise de variância da correlação linear simples dos valores médios ponderados de perda de solo por erosão hídrica, em função dos valores médios ponderados de taxa média de aplicação de água, relacionados aos diâmetros de bocal (db): 2,38, 3,97, 5,95, 7,94 e 9,92 mm associados ao emissor <i>Quad-Spray</i> (QS) e de dois bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56 e 6,94 mm associados ao emissor tubo corrugado (Tc) e tubo liso (Tl).....	120

TABELA 1G Análise de variância da correlação linear simples de valores de perda de solo por erosão hídrica, em função de valores de taxa média de aplicação de água, associados aos diâmetros de bocal (db): 2,38, 3,97, 5,95, 7,94 e 9,92 mm associados ao emissor *Quad-Spray* (QS) e de dois bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56 e 6,94 mm associados ao emissor tubo corrugado (Tc) e tubo liso (Tl).

Emissor	db (mm)	GL	QM	GL residual	Resíduo
QS	2,38	1	515324,8805**	14	42829,4690
QS	3,97	1	227785,4508**	16	7641,7203
QS	5,95	1	363538,7934**	24	2102,4222
QS	7,94	1	541585,2079**	28	3962,3800
QS	9,92	1	373973,76**	30	2676,7771
Tc	Dois bocais 1,59	1	6371,0321 ^{ns}	2	1703,9233
Tc	Dois bocais 2,78	1	4955,3625**	4	71,2683
Tc	Dois bocais 4,17	1	49681,3635**	5	1067,4438
Tc	Dois bocais 5,56	1	286660,5677**	5	7462,5327
Tc	Dois bocais 6,94	1	366216,1859**	5	3851,3021
Tl	Dois bocais 1,59	1	26805,4378 ^{ns}	0	+(inf)
Tl	Dois bocais 2,78	1	24304,2972 ^{ns}	2	2159,8657
Tl	Dois bocais 4,17	1	15532,9398 ^{ns}	2	8345,5902
Tl	Dois bocais 5,56	1	5085,0133 ^{ns}	2	1379,4379
Tl	Dois bocais 6,94	1	23321,2993**	4	647,1374

Significativo a 1% **, pelo teste F, a 5% de significância.

TABELA 2G Análise de variância da correlação linear simples dos valores médios ponderados de perda de solo por erosão hídrica, em função dos valores médios ponderados de taxa média de aplicação de água, relacionados aos diâmetros de bocal (db): 2,38, 3,97, 5,95, 7,94 e 9,92 mm associados ao emissor *Quad-Spray* (QS) e de dois bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56 e 6,94 mm associados ao emissor tubo corrugado (Tc) e tubo liso (Tl).

Emissor	GL	QM	GL residual	Resíduo
QS	1	4647,4907 ^{ns}	3	2617,3138
Tc	1	19448,7472**	3	167,4547
Tl	1	334,9231	3	1337,9896

Significativo a 1% **, pelo teste F, a 5% de significância.

TABELA 1H	Análise de variância do teste de Tukey, a 5% de probabilidade, sobre os dados de taxa média de aplicação de água (imed), perda de solo por erosão hídrica (ps) e vazão de bocal (qb), relacionados ao diâmetro de bocal (db): 2,38, 3,97, 5,95, 7,94, e 9,92 mm associado ao emissor <i>Quad-Spray</i> e dois bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56 e 6,94 mm associados ao emissor Tubo corrugado e Tubo liso.....	122
TABELA 2H	Análise de variância da regressão dos valores médios ponderados de taxa média de aplicação de água (imed) e perda de solo por erosão hídrica (ps), relacionados ao diâmetro de bocal (db): 2,38, 3,97, 5,95, 7,94, e 9,92 mm associado ao emissor <i>Quad-Spray</i> e dois bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56 e 6,94 mm associados ao emissor Tubo corrugado (Tc) e Tubo liso (Tl).....	123
TABELA 3H	Análise de variância dos modelos reduzidos sequenciais de perda de solo por erosão hídrica (ps) em função dos dados de taxa média de aplicação de água (imed), relacionados ao diâmetro de bocal (db): 2,38, 3,97, 5,95, 7,94, e 9,92 mm associado ao emissor <i>Quad-Spray</i> e dois bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56 e 6,94 mm associados ao emissor Tubo corrugado (Tc) e Tubo liso (Tl).....	124

TABELA 1H Análise de variância do teste de Tukey, a 5% de probabilidade, sobre os dados de taxa média de aplicação de água (imed), perda de solo por erosão hídrica (ps) e vazão de bocal (qb), relacionados ao diâmetro de bocal (db): 2,38, 3,97, 5,95, 7,94, e 9,92 mm associado ao emissor *Quad-Spray* e dois bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56 e 6,94 mm associados ao emissor Tubo corrugado e Tubo liso.

FV	GL	qb	QM	
			imed	ps
Emissor	2	0,018**	54,55**	30455,4**
db	4	11,65**	0,51**	6472,7**
Emissor x db	8	0,005**	2,39**	10561,9**
Emissor/ db 2,38	2	0,0058**	14,76**	33457,1**
Emissor/ db 3,97	2	0,0013**	12,00**	3827,9**
Emissor/ db 5,95	2	0,0003**	10,43**	3575,0**
Emissor/ db 7,94	2	0,0118**	11,99**	10817,3**
Emissor/ db 9,92	2	0,0195**	14,93**	21025,9**
Resíduo	30	0,000089	0,0024	172,1
CV%		0,14	0,68	10,12

**significativo, a 1% de probabilidade, pelo teste F.

TABELA 2H Análise de variância da regressão dos valores médios ponderados de taxa média de aplicação de água (imed) e perda de solo por erosão hídrica (ps), relacionados ao diâmetro de bocal (db): 2,38, 3,97, 5,95, 7,94, e 9,92 mm associado ao emissor *Quad-Spray* (QS) e dois bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56 e 6,94 mm associados ao emissor Tubo corrugado (Tc) e Tubo liso (Tl).

FV	QM		
	imed	ps	
Emissor	54,55**	30455,38**	
Emissor x db	2,39**	10561,94**	
Emissor QS/db	0,768**	9377,85**	
Emissor Tc/db	2,290**	14958,67**	
Emissor Tl/db	2,228**	3260,09**	
Resíduo	0,002	172,06	
Emissor	Efeito	imed	ps
QS	Linear	2,716**	7731,329**
QS	Quadrática	0,157**	13268,053**
QS	Cúbica	0,129**	13683,737**
Tc	Linear	9,152**	51229,943**
Tc	Quadrática	0,001 ^{ns}	8090,179**
Tc	Cúbica	0,003 ^{ns}	488,970 ^{ns}
Tl	Linear	7,898**	5433,627**
Tl	Quadrática	0,106**	449,739 ^{ns}
Tl	Cúbica	0,396**	0,104 ^{ns}
CV%		0,68	10,12

Significativo, a 1% **, 5% * e não significativo ^{ns}, pelo teste F.

TABELA 3H Análise de variância dos modelos reduzidos sequenciais de perda de solo por erosão hídrica (ps) em função dos dados de taxa média de aplicação de água (imed), relacionados ao diâmetro de bocal (db): 2,38, 3,97, 5,95, 7,94, e 9,92 mm associado ao emissor *Quad-Spray* (QS) e dois bocais de 1,59, 2,78, 4,17, 5,56 e 6,94 mm associados ao emissor Tubo corrugado (Tc) e Tubo liso (Tl).

	FV	GL	QM	CV%
QS	Modelo linear	1	3722,767 ^{ns}	29,59
	Resíduo	3	2868,411	
QS	Modelo quadrático	2	5286,645 ^{ns}	16,36
	Resíduo	2	877,355	
QS	Modelo cúbico	3	3951,291 ^{ns}	12,03
	Resíduo	1	474,127	
Tc	Modelo linear	1	19442,913 ^{**}	10,84
	Resíduo	3	167,573	
Tc	Modelo quadrático	2	9748,920 [*]	12,53
	Resíduo	2	223,897	
Tc	Modelo cúbico	3	6572,529 ^{ns}	12,64
	Resíduo	1	228,047	
Tl	Modelo linear	1	324,0228 ^{ns}	40,18
	Resíduo	3	1325,98	
Tl	Modelo quadrático	2	1440,34 [*]	29,41
	Resíduo	2	710,64	
Tl	Modelo cúbico	3	1014,20 [*]	39,15
	Resíduo	1	1259,38	

Significativo, a 1% **, 5% * e não significativo ^{ns}, pelo teste F.