

ÉDIO LUIZ DA COSTA

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SIMULADOR DE
CHUVAS PARA ESTUDOS DE INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO**

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

Orientador

Prof. Dr. ANTÔNIO MARCIANO DA SILVA

**LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
1996**

Ficha Catalográfica preparada pela Seção de Classificação e Catalogação da
Biblioteca Central da UFLA

Costa, Édio Luiz da

Desenvolvimento e avaliação de um simulador de chuvas
para estudos de infiltração de água no solo / Édio
Luiz da Costa. -- Lavras : UFLA, 1996.

78 p. : il.

Orientador: Antônio Marciano da Silva.

Dissertação (Mestrado) - UFLA.

Bibliografia.

1. Simulador de chuva. 2. Infiltração. 3. Capacidade de
infiltração. 4. Manejo-Solo-Água. 5. Perdas de solo e água.
I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-631.587

ÉDIO LUIZ DA COSTA

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SIMULADOR DE
CHUVAS PARA ESTUDOS DE INFILTRAÇÃO**

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

APROVADA em 14 de Novembro de 1996.

Élio Lemos da Silva
Prof. Dr. Élio Lemos da Silva

Jacinto de Assunção Carvalho
Prof. Dr. Jacinto de Assunção Carvalho

Antônio Marciano da Silva
Prof. Dr. Antônio Marciano da Silva
(Presidente/Orientador)

A Deus, fonte eterna de graça e sabedoria

À meu pai, Francisco, homem de ação forte

OFEREÇO

Cultivar a esperança e o otimismo,

são empenhos da vida de cada dia.

É do abismo de tua esperança que

emerge a busca e a expectativa

por uma vida melhor; é na esperança

que se antecipam os desejos do teu coração.

À minha esposa, Isabel

À minha filha, Mariana

À minha mãe, Mariana

A meus irmãos e sobrinhos

DEDICO

AGRADECIMENTOS

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

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

Ao professor Dr. Antônio Marciano da Silva, pela dedicação, incentivo, orientação e amizade.

Ao professor Alberto Colombo, pelo auxílio nos trabalhos, e também pela amizade.

Aos professores Manoel Alves de Faria, Luiz Antônio Lima, Élio Lemos da Silva, Jacinto de Assunção Carvalho e Hércio Andrade, pela convivência, ensinamentos e amizade.

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

Aos amigos Fátima e Geraldo, por toda ajuda prestada.

Aos amigos Rubens e Evaldo, pelas valiosas contribuições dadas na instalação e condução do experimento.

Aos colegas de curso, pela colaboração e amizade criada.

À minha esposa Isabel, pela amizade, carinho, e pelos auxílios prestados.

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

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS	xi
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xv
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Infiltração.....	4
2.2 Avaliação da infiltração.....	7
2.3 Características da chuva natural	12
2.4 Comportamento da Infiltração	13
2.5 Modelos Matemáticos.....	15
2.5.1 Desenvolvimento do modelo de Green e Ampt (1911)	16
2.5.2 Desenvolvimento do modelo de Kostiakov (1932)	19
2.5.3 Desenvolvimento do modelo de Horton (1933).....	20
2.6 Detenção Superficial e Armazenamento na Superfície	21
2.7 Processo Erosivo.....	22
2.8 Processo usado para estudo da erosão	24
3 MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1 Simulador de chuvas.....	25
3.2 Caracterização do local.....	26
3.3 Caracterização físico-hídrica do solo.....	27

3.3.1	Análise granulométrica.....	27
3.3.2	Densidade do solo e de partículas.....	28
3.3.3	Porosidade.....	28
3.3.4	Condutividade hidráulica pelo método do permeâmetro de carga constante.....	28
3.3.5	Curva de retenção.....	29
3.3.6	Capacidade de campo	29
3.4	Locação das parcelas.....	29
3.5	Fatores estudados.....	30
3.5.1	Condições de umidade.....	31
3.5.2	Comprimentos das parcelas.....	31
3.6	Aparelhos utilizados.....	32
3.6.1	Anemômetro.....	32
3.6.2	Pluviômetros.....	32
3.6.3	Dispositivo para medir h_{ae} e K_z	32
3.6.4	Anéis infiltrômetros	33
3.7	Calibração do simulador de chuvas	34
3.7.1	Avaliação dos difusores	34
3.7.2	Uniformidade de aplicação.....	34
3.7.3	Diâmetro de gotas.....	35
3.8	Determinações de campo	36
3.8.1	Determinação da infiltração com o uso do simulador de chuvas.....	36
3.8.1.1	Capacidade de infiltração	37
3.8.1.2	Determinação da detenção superficial e armazenamento na superfície.....	37
3.8.2	Determinações de Infiltração pelo método dos anéis concêntricos.....	38
3.8.3	Determinação de h_{ae} e K_z	38
3.8.4	Perdas de solo.....	39
3.9	Ajuste das equações de capacidade de infiltração	40
3.9.1	Capacidade de Infiltração determinada por Kostiakov.....	40
3.9.2	Capacidade de Infiltração determinada por Horton.....	40
3.9.3	Capacidade de Infiltração determinada por Green-Ampt.....	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
4.1	Características do simulador de chuvas utilizado.....	42

4.2 Características do solo	46
4.3 Avaliações de campo	47
4.3.1 O uso do simulador de chuvas na obtenção da capacidade de infiltração.....	47
4.3.2 O uso dos anéis infiltrômetros na obtenção da capacidade de infiltração	51
4.3.3 Comparação entre os métodos de determinação da capacidade de infiltração.....	53
4.3.4 Ajuste das equações para estimativa da capacidade de infiltração	56
4.3.5 Estudo das perdas de solo e água.....	59
5 CONCLUSÕES	63
6 SUGESTÕES.....	64
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
ANEXOS.....	72
APÊNDICES	74

LISTA DE TABELAS

TABELAS		Página
1	Valores dos diâmetros D_{50} , velocidade e energia cinética de gotas do simulador a diferentes distâncias do braço	45
2	Características físicas do LRd da área em estudo	46
3	Dados da curva média de retenção de umidade para o LRd	47
4	Valores dos parâmetros estimados para equação de Kostiakov para o tratamento 1	48
5	Valores dos parâmetros estimados para equação de Kostiakov para o tratamento 2	49
6	Valores dos parâmetros estimados para equação de Kostiakov para o tratamento 3	50
7	Valores dos parâmetros estimados para equação de Kostiakov para o tratamento 4	51
8	Parâmetros médios encontrados no teste com anéis infiltrômetros	52
9	Valores dos parâmetros da equação de Kostiakov para o simulador de chuvas e os anéis concêntricos	54
10	Parâmetros estimados para as equações estudadas e seus respectivos coeficientes de determinação, para o tratamento 4	56
11	Condutividade hidráulica determinada pelo método do permeâmetro e de Bouwer	57

LISTA DE FIGURAS

FIGURA		Página
1	Diâmetro médio das gotas (D_{50}) em função da intensidade da chuva	12
2	Relação entre a intensidade da chuva e a energia cinética	13
3	Comportamento da Velocidade de Infiltração do solo em função da relação entre a Taxa de Aplicação de Água e a Capacidade de Infiltração	13
4	Desenvolvimento da frente de umedecimento admitido por Green e Ampt	17
5	Visão geral do simulador de chuvas, seus componentes e acessórios	26
6	Detalhe dos mecanismos de variação da altura do simulador de chuvas ..	26
7	Croqui da área experimental	30
8	Detalhe da parcela e sistema de coleta do escoamento	30
9	Posição das parcelas em relação ao simulador	31
10	Esquema do aparelho idealizado por Bouwer para determinar h_{ae}	33
11	Malha de coletores mostrando a posição das parcelas em relação ao simulador.....	43
12	Valores de diâmetros de gota D_{50} nas diferentes distâncias do braço do simulador	45

13	Representação gráfica da diminuição da infiltração inicial com o aumento da umidade inicial do solo	52
14	Representação gráfica da relação entre o expoente n da equação de Kostiakov com o aumento da umidade inicial do solo	53
15	Comparação entre as curvas de capacidade de infiltração determinadas pelo simulador e pelos anéis concêntricos	55
16	Representação gráfica da relação entre a capacidade de infiltração final (f_{∞}) e a condutividade hidráulica (K_z) e o ajuste entre elas	58
17	Perdas totais de solo em função dos diferentes comprimentos de parcela para o tratamento 4	60
18	Perdas efetivas de solo em função dos diferentes comprimentos de parcela para o tratamento 4	61
19	Perdas de água em função das diferentes umidades na parcela de comprimento de 1 metro	61
20	Perdas de água em função das diferentes umidades na parcela de comprimento de 2 metros	62
21	Perdas de água em função das diferentes umidades na parcela de comprimento de 3 metros	62

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos	Significado	Fórmula Dimensional
a_1	Porcentagem da área coberta pela água durante o escoamento residual	
D_{50}	Diâmetro da gota no qual 50% do volume da chuva possui gotas de diâmetro abaixo	L
d_g	Densidade global	$M.L^{-3}$
d_p	Densidade de partículas	$M.L^{-3}$
D	Detenção superficial	L
D_1	Escoamento superficial residual	L
F	Infiltração acumulada	L
f	Capacidade de infiltração	LT^{-1}
f_0	Capacidade de infiltração inicial	LT^{-1}
f_1	Capacidade de infiltração no tempo $t=1$	$LT^{-(1+n)}$
f_{∞}	Capacidade de infiltração mínima ou final	LT^{-1}
G	Altura do vacuômetro até a superfície do solo do aparelho de Bouwer	L
H	Nível da água em relação à superfície do solo no aparelho de Bouwer	L
H_t	Nível da água no reservatório em relação à superfície do solo no tempo em que a válvula de suprimento é fechada	L
H_0	Carga hidráulica constante	L
h_f	Tensão efetiva na frente de molhamento	$F.L^{-2}$
h_{ac}	Tensão de entrada de ar determinada pelo aparelho de Bouwer	$F.L^{-2}$
K_f	Fator de proporcionalidade usado na equação de Horton	T^{-1}
K_s	Condutividade hidráulica saturada determinada pelo piezômetro	$L.T^{-1}$
K_z	Condutiv. hidráulica saturada determinada pelo aparelho de Bouwer	$L.T^{-1}$
P_{min}	Pressão mínima	
r	Intensidade de precipitação	$L.T^{-1}$
R^2	Coefficiente de determinação	
R_c	Raio do cilindro de Bouwer	L
R_r	Raio do reservatório de Bouwer	L
t	Tempo	T
t_p	Tempo de empoçamento	T

VI	Velocidade de infiltração	LT^{-1}
Vd	Armazenamento na superfície	L
z	Distância da frente de umedecimento à superfície do solo	L
Ψ_m	Potencial matricial da água no solo	L
Ψ	Potencial total da água no solo por unidade de peso	L
$\Delta\theta$	Déficit de umidade no solo	L^3/L^{-3}
θ	Umidade volumétrica	L^3/L^{-3}
θ_i	Umidade volumétrica inicial	L^3/L^{-3}
θ_s	Umidade volumétrica de saturação	L^3/L^{-3}

RESUMO

COSTA, Édio Luiz da. Desenvolvimento e avaliação de um simulador de chuvas para estudos de infiltração. Lavras: UFLA, 1996. 75p. (Dissertação - Mestrado em Irrigação e Drenagem).*

Desenvolveu-se um simulador de chuvas no Laboratório de Hidráulica, do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, MG, e conduziu-se um experimento em campo, com o objetivo de avaliar a sua performance e os efeitos da chuva sobre a capacidade de infiltração e perdas de solo e água. O estudo foi desenvolvido em um Latossolo Roxo distrófico (LRd) no qual, variou-se o teor inicial de água no solo, com umidades correspondentes a 0%, 33%, 67% e 100% da água disponível no solo, e os comprimentos das parcelas em 1, 2 e 3 metros. Comparou-se os dados obtidos com o simulador de chuvas com aqueles obtidos pelos anéis concêntricos, e avaliou-se o ajuste das equações de Green e Ampt, Horton e Kostiakov aos dados de infiltração. Os resultados mostraram que o simulador proposto se enquadra nas características apresentadas como desejáveis para um simulador de chuvas, deixando a desejar quanto ao diâmetro de gotas formadas e correspondente energia cinética.

* Orientador: Prof. Dr. Antônio Marciano da Silva (DEG/UFLA). Membros da banca: Prof. Dr. Élio Lemos da Silva (DEG/UFLA), Prof. Dr. Jacinto de Assunção Carvalho (DEG/UFLA).

A intensidade de precipitação do infiltrômetro aliada aos baixos teores de água do solo, foram limitantes na obtenção dos dados para as análises dos 3 tratamentos com menor teor de água, sendo possível analisar apenas o tratamento com maior umidade. Pelos ensaios feitos com os anéis infiltrômetros, foi possível verificar que a capacidade de infiltração inicial do solo é influenciada pela umidade inicial. Verificou-se que os anéis infiltrômetros apresentaram valores de capacidade de infiltração sempre maiores que os encontrados pelo simulador de chuvas. Das equações avaliadas, pode-se observar que a de Kostiakov se sobressaiu em relação às demais, seguindo a de Green e Ampt, e por último, a de Horton, que obteve o menor coeficiente de determinação. Para a análise das perdas de solo, utilizou-se o tratamento 4 correspondente ao tratamento de maior umidade, e neste, destacou-se o comprimento de parcela correspondente à 3 metros, apresentando valores acumulados de perda de solo 2,48 vezes maior que os demais.

ABSTRACT

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF A RAINFALL SIMULATOR FOR INFILTRATION STUDY

A rainfall simulator was developed in the "Hydraulics Laboratory" of the "Engineering Department" of the Universidade Federal de Lavras (UFLA), MG, and evaluated in an field experiment. It was studied the rainfall rate effect on the soil infiltration capacity and on soil and water loss with soil water content corresponding to 0%, 33%, 67% and 100% of soil available water in plots of 1, 2 and 3 meters long. It was compared the rainfall simulator infiltration with rings-infiltrometer, adjusting the Green and Ampt, Horton, and Kostiaikov equations to the infiltration data. The results showed the designed simulator presents the necessary characteristics of a rainfall simulator although its drop size and kinematics energy did not match technical requirements. The rainfall-simulator infiltrometer precipitation rate, associated with the very low soil moisture content and physical characteristics of Dusky Red Latosol (oxisol) soil, behaved as a restriction element for data obtainment of the three treatments with lowest soil water content, being possible only for one of the treatment, the treatment of 100% of soil available water. The rings-infiltrometer data showed that initial soil moisture content affects the initial soil infiltration capacity. It was verified that

the rings-infiltrometer over estimated the soil infiltration capacity. Among the evaluated models, the Kostiakov equation showed to be the best one, followed by Green and Ampt. The Horton equation presented the smallest determination coefficient. Treatment of 100% of soil available water was only one with good results related to soil loss evaluation. In this treatment the length of plot 3 meters accumulated loss of soil 2,48 times as much as the other ones.

1 INTRODUÇÃO

Historicamente as civilizações têm sido dependentes do desenvolvimento da agricultura para prover o seu sustento e aumentar a segurança de sua população. Observa-se nos últimos anos um rápido crescimento demográfico, com uma população estimada em 5,3 bilhões de habitantes e já se depara com a expectativa de passar a 9 bilhões nos próximos 40 anos, o que poderá tornar-se um instrumento de pressão para a produção de alimentos. Atualmente, cerca de 18% do total das terras cultivadas são irrigadas, produzindo 33% da oferta global de alimentos. A associação dessa crescente demanda de alimentos, com a limitada disponibilidade de água e de reservas de terras cultiváveis, constitui-se num desafio às gerações futuras que necessitarão até o ano 2025, produzir, através da agricultura irrigada, 50% do total de alimentos a ser consumido (Pereira et al, 1996).

O solo e a água são, sem dúvida alguma, a base da agricultura, e ao mesmo tempo, a mola mestra propulsora desta atividade.

O desenvolvimento científico possibilitou ao setor de ciências agrárias, o projeto de novas máquinas, fertilizantes eficientes, culturas mais resistentes e produtivas e um constante monitoramento das interações dentro do sistema solo-água-planta-atmosfera. Porém, em áreas agrícolas, a falta de informação e conhecimento preciso, acerca de características ou propriedades relacionadas ao sistema água-solo-planta-atmosfera, impossibilitam uma melhor exploração que permita maior produtividade, economia de água e energia e a conservação do solo.

Devido à crescente necessidade de suprir a demanda mundial de alimentos, o uso intensivo do solo e o seu manejo com práticas inadequadas de cultivo, vêm causando sua degradação acelerada, modificando suas propriedades físicas, químicas e biológicas.

Um dos fatores que mais têm contribuído para a degradação, perda de fertilidade e consequentemente perda de produtividade é, sem dúvida, a erosão. Torna-se evidente assim, que informações acerca das alterações sofridas pelo solo, em decorrência de práticas de cultivo empregadas, são importantes para a seleção das práticas que preservam suas características desejáveis, bem como para a rejeição ou redução daquelas que aceleram a sua degradação.

A grande preocupação com a erosão, é pelo fato de o solo exercer uma importante função no ciclo hidrológico, principalmente, no que diz respeito à sua camada superficial, onde ocorrem as complexas inter-relações entre a chuva, a infiltração, o escoamento superficial e a evapotranspiração. É também, nesta camada, que o manejo do solo e o da água devem ser feitos, adequadamente, pela utilização de práticas conservacionistas (Bertoni e Lombardi Neto, 1990). Associada a essas práticas, a irrigação é um importante instrumento que proporciona a consolidação de uma agricultura permanente e rentável, bem como a melhoria da qualidade de vida no meio rural.

Qualquer planejamento e operação de um projeto de irrigação em que se vise a máxima produção e boa qualidade do produto, usando de maneira eficiente a água, requer conhecimentos das inter-relações entre solo-água-planta-atmosfera e manejo de irrigação. A irrigação por envolver os elementos de solo-água-planta-clima, é considerada uma tecnologia complexa (Bernardo 1986).

Um bom programa de irrigação pode beneficiar uma cultura de muitos modos. É preciso, para isso, que no dimensionamento de um projeto de irrigação, se disponha de informações relacionadas com o clima, com o solo e com a cultura. O solo, neste sistema, normalmente é abordado de forma evidenciada, por promover grande influência no desenvolvimento das plantas e por ser um fator passivo de modificações pela ação humana. Dentre as características do solo, as propriedades físico-hídricas como: infiltração, condutividade hidráulica, densidade global, porosidade, entre outras, precisam ser estudadas. O conhecimento destas propriedades e mais especificamente da infiltração se faz necessário ao se projetar e/ou implementar um sistema de irrigação ou de conservação de solos, sendo o entendimento do processo de infiltração e de suas relações com as demais propriedades do solo, de grande importância para o manejo do solo e da água. A infiltração é definida como o movimento da água, da superfície para o interior do solo. Ela afeta as condições de umidade do perfil

(armazenamento), bem como, o escoamento superficial, o arraste de partículas e consequentemente a erosão.

É preciso que se tenha em mente que, para se interpretar bem a resposta de um solo à precipitação pluvial, à irrigação, à drenagem, que vem buscando recuperar áreas, antes inaptas e hoje potenciais de grandes produções, ou mesmo, às práticas de conservação do solo e da água, requer-se fundamentalmente um estudo da infiltração.

Para a irrigação, a infiltração é um dos parâmetros mais importantes em todas as suas fases, desde o projeto até o desempenho do sistema (Scaloppi, citado por Brito, 1994).

Existem várias maneiras de se determinar a infiltração, cada uma, no entanto, irá depender, principalmente, do método de irrigação a ser usado.

Devido a este fato, passou-se a estudar os infiltrômetros tipo simulador de chuvas, o que permitiu avaliar os efeitos de chuvas de diferentes intensidades, tendo como uma de suas principais vantagens a redução de trabalho e de tempo, necessários à obtenção de resultados, quando comparados aos estudos em condições de chuva natural.

Dada a necessidade da determinação da capacidade de infiltração através de procedimentos diretos, desejou-se com este trabalho: desenvolver um simulador de chuvas e avalia-lo sob condições que possibilite:

- Considerar o efeito da chuva na capacidade de infiltração sob situações como:
 - variação da umidade inicial do solo.
 - diferentes comprimentos de parcelas.
- Estudar o efeito da chuva na erosão superficial.
- Comparar a capacidade de infiltração obtida pelos anéis concêntricos, ou anéis infiltrômetros, e pelo simulador de chuvas.
- Avaliar o ajuste das equações propostas por Green e Ampt, Horton e Kostiakov para representar a capacidade de infiltração.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Infiltração

O processo de infiltração é definido como sendo a entrada de água no solo através da interface solo-atmosfera (Libardi, 1984). Para Skogerboe e Walker (1987), a infiltração é um processo que controla essencialmente a quantidade de água que entra no solo, como também o avanço da água sobre o solo.

A infiltração influencia no balanço de água na zona das raízes e, por isso, o conhecimento do processo e suas relações com as propriedades do solo, é de fundamental importância para o eficiente manejo do solo e da água (Reichardt, 1985).

Hillel (1970), define a velocidade de infiltração (VI), como sendo o fluxo que passa da superfície para o interior do solo, (lâmina/tempo; volume/unidade de área na unidade de tempo). Quando, porém, a taxa de entrada de água no interior do solo, sob determinadas condições, assume seu valor máximo, ela é chamada de capacidade de infiltração (f), sendo a mesma ditada pelo solo, e variável de solo para solo.

Para Horton (1940), a capacidade de infiltração é a razão máxima com que um solo, em uma dada condição, é capaz de absorver água. Para Barth et al, citado por Brito (1994), é o volume de água que penetra no solo por unidade de área e tempo, desde que a intensidade de precipitação seja suficientemente alta para que haja escoamento na superfície do solo.

Segundo Bernardo (1986), a capacidade de infiltração é alta no início e vai diminuindo, gradativamente, até um valor quase constante. Neste ponto, em que a variação da capacidade de infiltração é muito pequena, ela é chamada de capacidade de infiltração final ou

capacidade de infiltração mínima (f_{∞}), e pode ser considerada alta para valores acima de 0,25 mm/min e baixa para valores menores que 0,08 mm/min.

A infiltração é um processo complexo, dependente de inúmeras variáveis relacionadas às características físicas, químicas e morfológicas do solo (Amin, 1985).

São vários os fatores que afetam o processo de infiltração, dentre eles destacam-se: as condições da superfície do solo, o conteúdo inicial de água no solo, o tempo de infiltração, a existência de camadas menos impermeáveis ao longo do perfil, o tipo de preparo de solo, a presença de ar aprisionado, a viscosidade e a temperatura da água e do solo, a topografia do terreno e, as propriedades físicas do solo (Bernardo, 1986; Daker, 1988; Hillel, 1970; Rezende e Scaloppi, 1985). De acordo com estes autores, o teor de água no solo seria o principal fator a afetar a taxa de infiltração inicial.

A velocidade de infiltração é afetada pela formação de uma camada compactada, superficialmente, devido ao impacto das gotas de chuva, e isto pode causar efeitos maiores sobre a infiltração, do que o tipo de solo, a declividade, a umidade ou outros fatores (Daker, 1988).

Segundo Moore e Larson (1980), o encrostamento ou selamento superficial é um complexo causado, principalmente, pelo impacto das gotas de chuva. O solo junto à superfície submetido ao selamento, apresenta alta densidade aparente e baixa porosidade, e, embora o selamento possa ser de pequena espessura, influencia significativamente a infiltração, reduzindo-a, e aumentando consequentemente o escoamento superficial.

McIntyre (1958), descreve a sequência de eventos que conduzem ao encrostamento da camada superficial do solo, como sendo a combinação dos seguintes processos:

- a) quebra dos agregados do solo úmido pelo impacto das gotas sobre a superfície do solo;
- b) movimento das partículas finas dispersas ao longo de poucos centímetros abaixo da superfície e sua deposição nos poros do solo;
- c) compactação da camada superficial do solo pelo impacto das gotas de chuva, produzindo um delgado filme de solo, significativamente compactado;
- d) deposição do material fino em suspensão, com a consequente orientação das partículas de argila, de modo a reduzir a velocidade de infiltração da água no solo.

As características da crosta podem variar em função da constituição do solo e da intensidade de preparo, da energia das gotas de chuva e do escoamento superficial.

O volume e a velocidade do escoamento superficial dependem da intensidade, duração e frequência da chuva. As chuvas totais diárias têm pouco significado em relação à erosão, uma vez que, raramente, esta se distribui uniformemente no período de um dia (Bertoni e Lombardi Neto, 1985). De acordo com Pizarro (1978), para o cálculo da máxima vazão que escoar sobre a superfície do solo, necessita-se conhecer a máxima intensidade durante um período determinado.

✧Morrison, Prunty e Guilles (1985), estudando o efeito das características da chuva e das propriedades do solo na formação da camada compactada superficialmente, usaram o simulador de chuvas e aplicaram diferentes intensidades de precipitação. Concluíram que a intensidade de precipitação teve um maior efeito na formação da crosta do que a sua duração, exceto para solos com alto teor de matéria orgânica. Mesmo assim, afirmam que não há informações suficientes a respeito das características de chuva que causam a formação da crosta superficial.

✧Durley, citado por Brito (1994), estudando os fatores que afetam a velocidade de infiltração, trabalhou com chuva simulada por um período de cinco horas sobre um solo franco-arenoso, coberto com palha, encontrando um valor de 30 mm/h para a velocidade de infiltração. Retirando a cobertura do solo e aplicando a mesma chuva por mais 30 minutos, obteve uma velocidade de infiltração de 6,3 mm/h, e associou este resultado à formação da crosta superficial. Quando a crosta foi removida, o solo coberto e a intensidade de precipitação mantida constante, observou que a velocidade de infiltração anterior foi retomada.

Lopes e Pinto (1986), estudando a influência das condições de superfície (solo preparado e não preparado), bem como as condições iniciais de umidade do solo, sobre a capacidade de infiltração de um Latossolo Vermelho Amarelo, usando anéis infiltrômetros concêntricos, observaram que as condições de umidade inicial não tiveram influência significativa na capacidade de infiltração. A única influência significativa detectada foi a das condições de superfície.

✧Brito (1994), trabalhando com um solo classificado como Podizólico Vermelho Amarelo textura predominantemente argilosa, encontrou valores de velocidade de infiltração básica menores para condições de solos sem cobertura, atribuindo este fato, provavelmente, à formação de uma camada compactada superficialmente.

Arruda (1984), montou um experimento com o objetivo de avaliar a capacidade de infiltração da água no solo, utilizando um simulador de chuvas. Foram avaliadas três percentagens,

50, 70 e 80% de cobertura vegetal. Observou-se, com as alterações provocadas pelo plantio e com a proteção da superfície do solo pela vegetação, que a capacidade mínima de infiltração se elevou de 11 mm/h para 22 mm/h e 24 mm/h, respectivamente.

Segundo Bertoni e Lombardi Neto (1990), a topografia do terreno, representada pela declividade e pelo comprimento de rampa, exerce acentuada influência sobre a erosão. O tamanho e a quantidade do material em suspensão arrastado pela água, dependem da velocidade com que ela escorre, e essa velocidade é uma resultante do comprimento do lançante e do grau de declive do terreno. Segundo os autores, quadruplicando-se o comprimento de rampa, quase que se triplicam as perdas de solo por unidade de área.

2.2 Avaliação da infiltração

A infiltração pode ser avaliada utilizando-se de um procedimento indireto ou direto. O procedimento indireto consiste na análise de hidrogramas e hietogramas correspondentes, utilizando-se modelos hidrológicos. Nestes modelos, a interceptação e o armazenamento nas depressões são frequentemente englobados com a infiltração, e geralmente a calibração do modelo é resultado da fixação de parâmetros. O procedimento direto consiste na medida da infiltração da água no solo através de infiltrômetros, determinando-se a diferença entre a água aplicada e o escoamento superficial.

✦ Uma das principais preocupações na avaliação da infiltração d'água no solo é a escolha de um infiltrômetro adequado ao tipo de estudo. A utilidade de um determinado infiltrômetro está relacionada à finalidade dos dados, à precisão desejada, à facilidade de manejo e ao custo operacional.

✦ Os infiltrômetros mais usados são: método de entrada e saída de água no sulco, anéis infiltrômetros e simuladores de chuva.

No método dos sulcos de entrada e saída, a água é aplicada por uma fonte linear e a infiltração é da forma bi-dimensional. Este método é de uso específico para o sistema de irrigação por sulcos, devido as condições em que é realizado.

✦ Segundo Vieira (1977), o infiltrômetro de anéis concêntricos é o mais usado, devido à sua facilidade de manejo e ao baixo custo. Porém, este método tem suas limitações quando se

deseja levantar dados de infiltração para fins de elaboração de projetos de irrigação por aspersão ou para trabalhos em que os dados gerados se dêem através de precipitações. Este infiltrômetro apresenta algumas particularidades que podem resultar em erros na determinação da infiltração, como por exemplo, sua operação se dá na presença de uma carga hidráulica acima do solo, simulando as condições de inundação, não representando, portanto, as condições de irrigação por aspersão. Um outro ponto a ressaltar é a perturbação do solo provocada quando da instalação dos cilindros. Estudos revelam que os valores da capacidade de infiltração do solo determinada pelos anéis infiltrômetros, são sempre maiores que os determinados pelo simulador de chuvas.

Horton (1940), comparou a velocidade de infiltração obtida pelo infiltrômetro tipo F, com dados levantados por um anel infiltrômetro de 23 cm de diâmetro, enterrando-o de 90 cm a 120 cm no solo. Verificou que, devido a distúrbios na instalação do cilindro e a carga constante na superfície, as medidas de infiltração obtidas por este método, foram sempre de três a cinco vezes maiores que as obtidas pelo infiltrômetro tipo F.

Neal, citado por Baver (1972), verificou que medidas da velocidade de infiltração obtidas por infiltrômetro de anel, em solos argilosos de "Putnan", eram duas a três vezes maiores que as obtidas pela diferença entre chuva e escoamento superficial.

Sidiras e Roth (1987), usando simulador de chuvas, obtiveram valores da capacidade de infiltração final até 10 vezes menores do que os valores encontrados com o anel infiltrômetro.

*Pruski et al. (1994), realizando testes comparativos de infiltração com anéis concêntricos e o simulador de chuvas, evidenciaram que os valores da velocidade de infiltração obtida pelo método do anel infiltrômetro, foi maior que a encontrada com o uso do simulador de chuvas, devido ao impacto direto das gotas sobre a superfície do solo.

*Portanto, estes métodos apresentados anteriormente não são adequados para representar as condições onde o fornecimento de água se dá através da chuva que, por ter suas gotas arremessadas de uma certa altura, portanto com um valor de energia cinética, provocam uma desagregação das partículas sólidas do solo, que podem ser arremessadas em diferentes direções ou então arrastadas para camadas inferiores ao longo do perfil. Daí o uso do simulador de chuvas na determinação da infiltração do solo, que tem também prestado uma efetiva ajuda na pesquisa de erosão do solo.

* Segundo Meyer, citado por Lima (1987), o simulador de chuvas apresenta várias vantagens, tais como: obtenção mais rápida dos resultados, padronização das chuvas, controle da

preparação das parcelas, duração, intensidade e repetitividade da chuva em tempo e espaço. Seguem-se, também, algumas desvantagens, tais como: alto custo de aquisição e operacionalidade, as áreas dos tratamentos são pequenas e podem não ser representativas, alguns simuladores não representam a mesma velocidade terminal das gotas da chuva natural.

✦ Os primeiros modelos de simuladores de chuva foram desenvolvidos por volta dos anos 30, e o processo de desenvolvimento continua até os dias atuais. O que difere nestes modelos é o processo de formação de gotas de chuva, a área das parcelas e a facilidade de manuseio. Os modelos buscam simular, de maneira mais próxima possível, a chuva natural. Poucas informações sobre os valores quantitativos das características da chuva natural foram avaliadas durante esses primeiros estudos, pois o efeito do impacto da gota de chuva na superfície do solo era desconsiderado. A partir dos anos 40, foram feitos estudos sobre a velocidade de queda da gota, quando influenciada pelo seu tamanho e altura de queda.

Segundo Kohl e DeBoer (1984), a identificação do tamanho de gotas é uma prática importante e necessária na agricultura quando se usa irrigação por aspersão, por duas razões: primeiro, as gotas pequenas são facilmente deslocadas pela ação do vento, alterando sua trajetória, e segundo, o aumento do diâmetro das gotas influencia no aumento da energia cinética, a qual é transferida para a superfície do solo, causando deslocamento de partículas e modificando as características de infiltração do solo.

Segundo Smith, citado por Resck (1977), para a construção de qualquer simulador, deve-se levar em conta o tamanho das gotas produzidas, a distribuição, a velocidade da queda, a influência do vento e a possibilidade de variação das intensidades das precipitações produzidas.

Meyer e McCune (1958), apresentam como principais características do simulador de chuva:

- a) distribuição de tamanho de gotas e velocidade terminal de queda semelhantes à chuva natural;
- b) variações nas intensidades de precipitação;
- c) uniformidade de aplicação da chuva nas parcelas;
- d) mínima distorção na direção das gotas da chuva causada pelo vento;
- e) portabilidade e facilidade de manuseio;
- f) capacidade de reproduzir chuvas em iguais situações.

Os simuladores de chuva têm sido usados em pesquisas sobre erosão para estudar as complexas relações entre as variáveis de chuva com as características do solo. Vários foram os modelos apresentados, a seguir estão citados alguns dos mais difundidos.

Em 1943, Wilm, citado por Resck (1977), desenvolveu o esguicho, pulverizador tipo F, que opera em área de 1,83 m por 3,66 m com bordadura molhada de 0,9 m de lado, o qual produzia uma distribuição do tamanho da gota similar à queda da chuva com alta intensidade. Gotas desse esguicho são pulverizadas por cima e caem de uma altura média de 2,44 metros aproximadamente.

Pode-se citar outros tipos como o de Ellison e Pomerene (1944), que desenvolveram um simulador de chuvas com gotas do mesmo tamanho, caindo de numerosas agulhetas de pequenos comprimentos. Ou ainda, o de Ekern, citado por Meyer e McCune (1958), que fez estudos detalhados do impacto da gota, usando um simulador que tinha tubos de vidro com tipo e tamanho controlados.

Os simuladores citados como o tipo F, o de agulhetas e outros tipos côncavos com controle do tamanho, possuem duas distintas desvantagens, segundo Meyer e McCune (1958):

- a) Requerem anteparos para o aparelho em baixas velocidades;
- b) Requerem grande altura de queda para se aproximar estreitamente da velocidade terminal da gota. Os tipos de agulhetas e côncavos também produzem somente um ou poucos tamanhos de gotas e são úteis para uso somente em áreas muito pequenas.

Meyer e McCune (1958), desenvolveram um simulador, no qual bocais Veejet modelo 80100 são periodicamente movimentados transversalmente na direção do declive. O tempo entre sucessivos movimentos é selecionado para alterar as taxas de aplicação, que são de 63,5 ou 127 mm/h. Trabalhando com uma pressão de 41 kPa, os bocais produzem gotas de 2,13 mm de diâmetro, a uma altura de funcionamento de 2,28 m.

Meyer e Harmon (1979), desenvolveram um simulador, o qual usava bocais Veejet 80100. Este simulador proporcionava chuvas de intensidade de 10 a 90 mm/h, com uma energia cinética de 200 kJ/ha-mm (20 kPa).

Foster et al, citado por Shelton (1985), usaram alguns mecanismos para fazer mover o simulador criado por Meyer e Harmon (1979). Nele são produzidas chuvas de 2 a 127 mm/h, com uma uniformidade de aplicação de 88%.

O simulador de chuvas Kentuck (Moore, Hirschi e Barfield, 1983), opera similarmente ao descrito por Foster et al., e foi criado para ser altamente portátil. Os testes demonstram que o aparelho apresentava uma boa faixa de variação de intensidade de precipitação (3,5 a 185 mm/h), e um coeficiente de uniformidade médio de 82%.

Shelton, Beernuth e Rajbhandari (1985), propuseram um simulador cujo projeto era simples para construir, fácil de operar e econômico. Ele opera sobre parcelas de tamanho de 6 x 6 m. Seu funcionamento se dá pela injeção de ar junto com água dentro dos condutos, para compensar a pressão nos bocais, mantendo-se o tamanho de gotas aceitável, e variando-se a taxa de aplicação. Eles usaram bocais Fulljet 50WSQ. Quando operado somente com água pressurizada, ele apresenta uma intensidade de 129 mm/h e um coeficiente de uniformidade de 72%. Quando porém, é injetado ar, e a pressão no bocal passa de 14 para 22 kPa, a intensidade passa para 92 mm/h e a uniformidade para 76%. Seu funcionamento se dá a uma altura de 2,44 e 2,74 m. Os diâmetros de gotas estão entre 0,5 e 4 mm.

O simulador de discos rotativos foi construído por Pall et al. (1981), citado por China, Jarrett e Hoover (1985). A distribuição da chuva deste aparelho é feita em uma área de 67 x 30 cm, através de bocais instalados a 2 m da superfície do solo. Este simulador gera chuvas com intensidades de 220 mm/h, produzindo uma energia cinética de 283 kJ/ha-mm (28,3 kPa), com um coeficiente de uniformidade de 70%.

O simulador de chuvas Palouse, segundo Bubenzer, Molnau e McCool (1985), foi criado para simular chuvas de baixa intensidade, pequenos diâmetros de gotas e de longa duração. As intensidades alcançadas por este tipo de simulador estão na faixa de 6 a 46 mm/h, que são obtidas por ranhuras presentes no disco giratório. O diâmetro médio das gotas é de 1,7 mm, e o coeficiente de uniformidade de 91%, para uma área de 2 x 2 m de teste.

Um outro tipo de simulador de chuvas, muito usado em pesquisas, é o de braços rotativos do tipo Swanson. Moreira et al. (1983), fizeram uma avaliação da distribuição da chuva deste aparelho, variando o número de bicos abertos, diferentes comprimentos de parcelas e diferentes pressões. Dos resultados obtidos, pode-se observar que o aparelho fornece uma precipitação média que vai de 56,4 a 163,6 mm/h, com um coeficiente de uniformidade de 78 a 94%.

Os simuladores de chuva, sem dúvida alguma, são instrumentos de pesquisa ainda inacabados, trazendo em seu funcionamento sérias limitações, que devem ser reconhecidas e

respeitadas, quando se está conduzindo um experimento. Segundo Roth, Henklain e Farias (1985), os simuladores apresentam dificuldades no que diz respeito à calibração do aparelho, produção de chuvas com a mesma intensidade, obtenção de chuvas uniformemente distribuídas nas parcelas, obtenção da mesma intensidade de chuva para as duas parcelas e nivelamento do aparelho no campo.

Segundo Moldenhauer, citado por Lima (1987), apesar das limitações apresentadas pelos simuladores, muitas pesquisas sobre erosão de solo têm sido feitas, comprovando-se que os simuladores ainda são uma boa ferramenta para a pesquisa, quando usados com conhecimento, entendimento e critério.

2.3 Características da chuva natural

Hudson (1971), em estudos realizados na África, mostra que há um nível crítico da intensidade da chuva para causar erosão. O valor então encontrado foi cerca de 25 mm por hora.

De acordo com trabalhos desenvolvidos por Roth, Henklain e Farias (1985), em seus ensaios com chuva natural no Norte do Paraná, as chuvas naturais, de 60 mm/h, adquirem uma energia cinética de 292,3 kJ/ha.mm (29,23 kPa) para um D_{50} de 2,93 mm (Figuras 1 e 2). Esses autores comentam que os diâmetros de gotas encontrados, são maiores que os obtidos por Wischmeier e Smith (1958), provavelmente pelo processo de formação das gotas e baixa

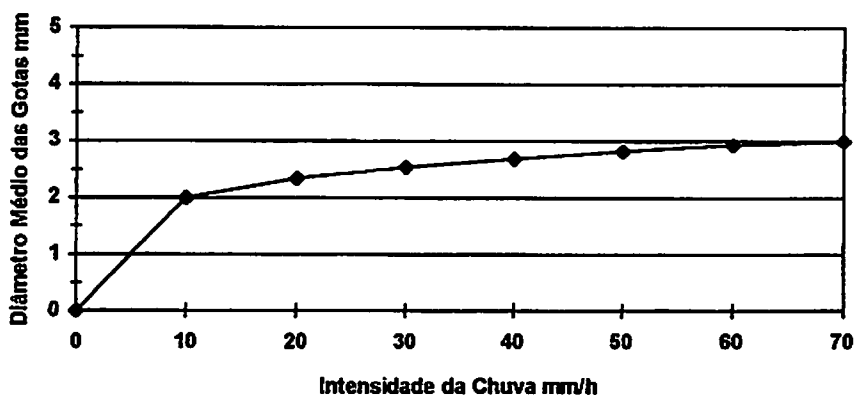


FIGURA 1. Diâmetro médio das gotas (D_{50}) em função da intensidade da chuva. (Fonte: Roth, Henklain e Farias (1985)).

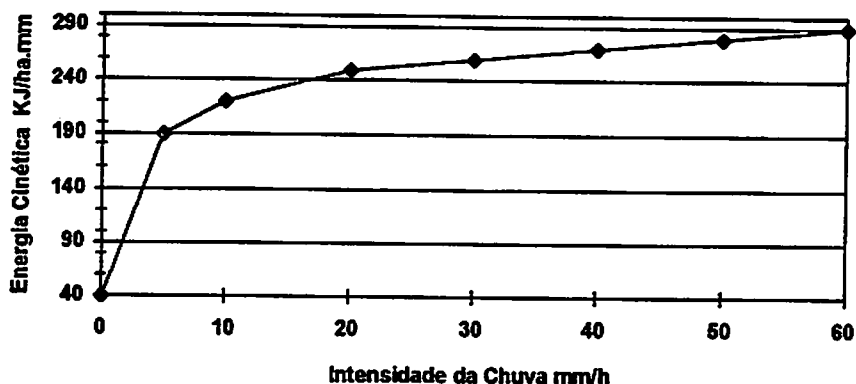


FIGURA 2. Relação entre a intensidade da chuva e a energia cinética. (Fonte: Roth, Henklain e Farias (1985)).

altitude das nuvens, e que as chuvas com gotas maiores proporcionam energia cinética maior, e concluem que a equação apresentada por Wischmeier e Smith tende a subestimar a erosividade das chuvas.

2.4 Comportamento da Infiltração

Podem ser considerados quatro situações de infiltração (Figura 3), quando uma chuva de intensidade “ r ” é aplicada em um solo com capacidade de infiltração mínima “ f_{∞} ” e capacidade de infiltração “ P ”:

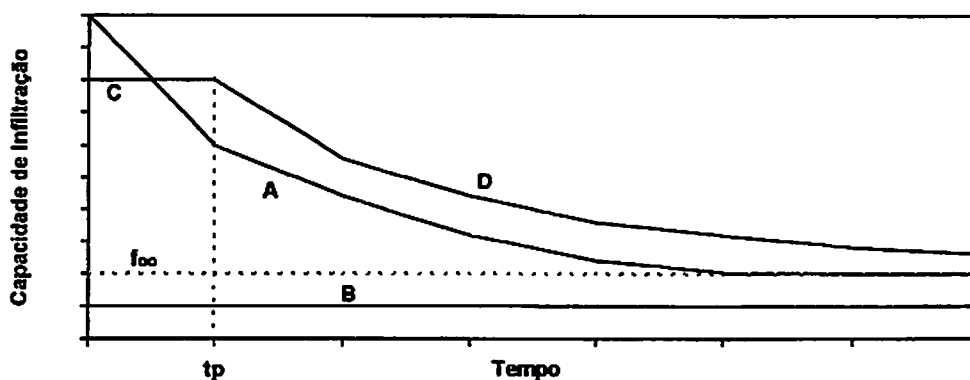


FIGURA 3 - Comportamento da velocidade de infiltração do solo em função da relação entre a taxa de aplicação de água e a capacidade de infiltração.

Situação A: em todo o intervalo de tempo t , $r \geq f \rightarrow$ Para esta condição o regime de infiltração é determinado pelo solo, portanto $VI = f$, decrescendo com o tempo, tendendo de forma assintota para um valor constante denominado capacidade de infiltração mínima (f_{∞}). Nesta situação ocorrerá escoamento superficial.

Situação B: em todo o intervalo de tempo t , $r \leq f_{\infty} \rightarrow$ Durante este estágio toda a lâmina aplicada irá se infiltrar, não acontecendo o escoamento superficial. Para esta condição o regime de infiltração é determinado pela intensidade de precipitação, portanto $VI = r$.

Situação C: quando o tempo $t < t_p \rightarrow$ neste caso $r < f$, logo $VI = r$.

Situação D: quando $t > t_p \rightarrow$ neste caso $r \geq f$, logo $VI = f$.

O tempo t_p , chamado "ponding time", ou seja, tempo de encharcamento, é o intervalo de tempo necessário para que, segundo Smith e Chery, citado por Arruda (1984), o potencial matricial do solo, Ψ_m , chegue a zero. Após este tempo, a capacidade de infiltração, partindo de um valor igual à intensidade de precipitação, decresce com o tempo como um fenômeno de exaustão.

Smith (1972), determinou uma equação empírica para t_p em função da intensidade de precipitação:

$$t_p = a_0 \cdot r^{a_2} \text{ para } r > f_{\infty} \quad (1)$$

onde : a_0 e a_2 = parâmetros que dependem do solo

r = intensidade de precipitação

Mein e Larson (1973), utilizando a lei de Darcy, determinaram:

$$t_p = \frac{(\theta - \theta_i) \Psi_m}{r \cdot \left(\frac{r}{f_{\infty}} - 1 \right)} \quad (2)$$

onde : f_{∞} = capacidade de infiltração mínima

θ_i e θ = são as umidades inicial e atual do solo em base volume

2.5 Modelos Matemáticos

Segundo Skogerboe e Walker (1987), muitos modelos matemáticos têm sido desenvolvidos para descrever o fluxo em meios porosos, particularmente a infiltração vertical. As equações de infiltração podem ser separadas em três categorias:

- a) modelos baseados em relações gerais para fluxo em meios porosos;
- b) equações fundamentadas na suposição de um modelo simplificado (equações fundamentadas fisicamente);
- c) aquelas baseadas no ajuste de dados existentes (equações empíricas).

Na primeira categoria, temos as equações baseadas em uma solução para fluxo de fase única, da equação unidimensional de Darcy, conhecida como “Equação de Richards”. Ela faz a suposição de que o potencial total é igual à soma dos potenciais gravitacional e capilar. Como resultado, temos a equação de fluxo, na forma:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta) \left[\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right] \right] \quad (3)$$

onde:

θ = umidade volumétrica

h = carga total de pressão

k = condutividade hidráulica

z = distância vertical

Não é fácil resolver equações desta primeira categoria usando métodos analíticos, tendo-se que recorrer a métodos numéricos.

As equações da segunda categoria podem ser derivadas da equação de Green e Ampt. Esta equação se fundamenta na suposição de que o solo pode ser representado por um feixe de tubos capilares.

$$f = K_z \left[1 + \frac{(\theta_s - \theta_i)h}{Z} \right] \quad (4)$$

onde:

f = capacidade de infiltração

K_z = condutividade hidráulica

h = sucção na frente de umedecimento

θ_s = umidade de saturação

θ_i = umidade inicial

z = profundidade da frente de umedecimento

A terceira categoria, equações empíricas, é o resultado do ajustamento do comportamento observado da velocidade de infiltração, como funções explícitas, dependentes do tempo. As constantes destas equações não têm significado físico. Dentre essas equações, tem-se o modelo empírico, proposto por Kostiakov, que tem a forma:

$$f = f_1 t^n \quad (5)$$

Skogerboe e Walker (1987), afirmam que a equação de Kostiakov é simples e de uso generalizado, descrevendo bem o processo de infiltração, tanto real quanto teórico, em curtos e médios períodos de tempo. Todavia, apresenta como desvantagens não se ajustar a diferentes situações de campo e, para longos períodos de tempo, a capacidade de infiltração tende a zero, o que na prática não ocorre.

São apresentadas a seguir, as equações de infiltração que serão objeto de estudos neste trabalho.

2.5.1 Desenvolvimento do modelo de Green e Ampt (1911)

Green e Ampt (1911), assumiram, para o desenvolvimento de sua equação de fluxo, que, mantendo-se uma carga hidráulica constante (H_0) na superfície do solo, durante o processo de infiltração, aparece uma frente de umedecimento bem nítida, na qual existe uma sucção capilar constante (Figura 4). Acima da frente de umidade, o solo se encontra uniformemente saturado com a condutividade hidráulica (K_z) considerada saturada, e o potencial total (Ψ) nesta frente, permanece sempre constante e pode ser dado na forma:

$$\Psi = H_0 + z + hf \quad (6)$$

onde: H_0 = carga hidráulica acima da superfície do solo, potencial de pressão;

Z = é a distância da frente de umedecimento a superfície do solo;

hf = sucção efetiva na frente de molhamento.

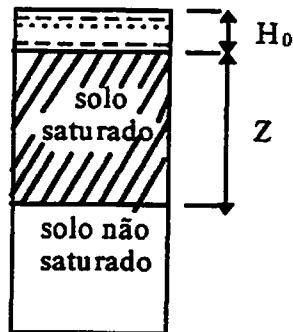


FIGURA 4 - Desenvolvimento da frente de umedecimento admitido por Green e Ampt.

O fluxo de água no solo é dado pela equação de Darcy, que pode ser escrita na forma:

$$q = -K_z \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial z} \quad (7)$$

onde: q = densidade de fluxo;

K_z = condutividade hidráulica no sentido vertical;

$\partial \Psi$ = variação do potencial da água no solo;

∂z = variação da profundidade.

Aplicando-se a equação de Darcy (7), à coluna saturada e substituindo q (fluxo) por f (capacidade de infiltração), pode-se escrevê-la, na forma:

$$f = K_z \cdot \left(\frac{H_0 + Z + h_f}{Z} \right) \quad (8)$$

onde: K_z = condutividade hidráulica na zona de transmissão;

f = taxa de infiltração (dF / dt)

A lâmina de água infiltrada (F) por unidade de área é:

$$F = \Delta\theta \cdot z \quad (9)$$

onde: $\Delta\theta$ = variação de umidade dado pela umidade final (θ_f) menos a umidade inicial (θ_i) em volume.

Expressando a capacidade de infiltração (f) em função da lâmina infiltrada, e assumindo que a lâmina de água na superfície é tão pequena que $H_0 \cong 0$, e substituindo-se a equação (9) em (8), tem-se a capacidade de infiltração (f).

$$f = K_z \cdot \left(1 + \frac{\Delta\theta \cdot h_f}{F} \right) \quad (10)$$

Existe na literatura uma discussão a respeito dos parâmetros K_z e h_f . Green e Ampt (1911), admitiram que a condutividade hidráulica (K_z) é a saturada. Bouwer (1966), argumentou que, ao longo do tempo, a condutividade pode não ser a de saturação, mas outra, na qual uma porcentagem de ar residual ainda ocupe os poros do solo, afirmando também, que a condutividade hidráulica pode ser estimada por:

$$K_z = 0,5 K_{sat} \quad (11)$$

O valor de h_f causa uma certa dificuldade em ser obtido. Várias definições de h_f foram propostas. Bouwer (1966), sugeriu que h_f fosse aproximadamente metade da tensão de entrada de ar no solo, ou seja:

$$h_f = 0,5 \cdot h_{ae} \quad (12)$$

onde: h_{ac} = tensão de entrada de ar no solo (cm de água).

h_f = sucção efetiva na frente de molhamento (cm de água).

A tensão de entrada de ar no solo (h_{ac}), é facilmente obtido no campo através de um aparelho por ele desenvolvido, que também pode ser usado na obtenção da condutividade hidráulica saturada (K_z), necessária na equação de Green e Ampt. Segundo Bouwer (1966), o valor de K_z na zona molhada pode ser calculado, usando-se a equação de Darcy, expressa na seguinte forma:

$$K_z = 2 \cdot \frac{dH}{dt} \cdot Z \cdot \left(\frac{R_r^2}{R_c^2} \right) / (H_i + Z - 0,5 \cdot h_{ac}) \quad (13)$$

onde: dH/dt = taxa de rebaixamento do nível de água no reservatório momentos antes do fechamento do registro.

H_i = altura entre a superfície do solo e o nível de água no reservatório no tempo em que a válvula de suprimento é fechada.

R_r = raio do reservatório.

R_c = raio do cilindro.

Segundo Bouwer (1966), a medida de K_z por este aparelho, é semelhante á técnica do cilindro de permeâmetro. O método, no entanto, elimina a necessidade de tensiômetro, e requer menos tempo e água por teste.

2.5.2 Desenvolvimento do modelo de Kostiakov (1932)

A equação apresentada por Kostiakov para obter a capacidade de infiltração foi,

$$f = f_1 t^n \quad (14)$$

onde: f = capacidade de infiltração, correspondendo a um certo tempo t .

f_1 = capacidade de infiltração inicial, correspondente a $t=1$.

t = tempo do estado inicial do solo.

n = constante, dependendo das características do solo.

Quando t tende a infinito, f deve ser igual a um valor constante f_{∞} . Isto pode ser encontrado como segue:

$$f_{\infty} = f_1 t_{\infty}^n \quad (15)$$

onde: f_{∞} = valor constante de infiltração.

t_{∞} = tempo necessário para atingir f_{∞} .

Segundo Libardi (1984), a equação de Kostiakov deve ser válida apenas nos estágios iniciais da infiltração para $t < t_{\infty}$. A equação de Kostiakov (14), embora empírica e de aplicabilidade limitada, é útil em aplicações de irrigação, devido à sua simplicidade e ao fato de que, para curtos intervalos de tempo se ajusta razoavelmente bem para uma grande quantidade de solos.

2.5.3 Desenvolvimento do modelo de Horton (1933)

Horton (1933), admitiu que o fenômeno da infiltração é um processo de exaustão que inclui o impacto da chuva, lavagem e quebra da estrutura do solo, inchamento de colóides e obstrução de vasos capilares. Admitiu ainda, que a capacidade de infiltração é influenciada pela composição mineral, textura, micro e macro-estrutura do solo.

A exaustão é o processo no qual a taxa de trabalho desempenhada é proporcional à quantidade de trabalho remanescente. No caso da infiltração, o trabalho remanescente em um dado tempo t , é aquele necessário para mudar a capacidade de infiltração (f) para seu valor constante (f_{∞}). A taxa de trabalho desempenhado é df/dt . Se esta taxa é proporcional ao trabalho remanescente a ser desempenhado ($f - f_{\infty}$), então, introduzindo o fator de proporcionalidade K_f , a seguinte equação pode ser escrita.

$$\frac{df}{dt} = k_f (f - f_{\infty}) \quad (16)$$

Ao integrar-se a equação (16), com a seguinte condição inicial: para $t = 0 \rightarrow f = f_0$, obtém-se:

$$f = f_{\infty} + (f_0 - f_{\infty}) e^{-k_f \cdot t} \quad (17)$$

A capacidade de infiltração final (f_{∞}), é uma característica do solo, e a capacidade de infiltração inicial (f_0), foi relacionada por Horton, para o caso em que a intensidade de aplicação fosse maior que a capacidade de infiltração inicial, com o tipo de solo e a umidade inicial.

A aplicabilidade da equação de Horton é muito variada, pois não se baseia em nenhuma teoria física adequada, apenas na intuição (Libardi, 1984).

Skaggs et al. (1969), avaliaram experimentalmente as equações de infiltração propostas por Green e Ampt, Horton, Philip e Holtan. Os estudos foram feitos para três tipos de solos. Os dados foram submetidos a análises de regressão, e mostraram que o melhor ajuste foi conseguido para a equação de Horton, seguida da de Holtan, Green e Ampt, e a de Philip.

2.6 Detenção Superficial e Armazenamento na Superfície

Quando se aplica uma determinada lâmina de água em um solo, este permite que a infiltração ocorra num valor máximo permitido pelas suas características próprias. A infiltração suprirá as condições de armazenamento e fluxo máximo permitido pela superfície do solo e, então, começará haver escoamento superficial, este instante corresponde ao tempo t_p . Antes porém que o escoamento inicie, as depressões existentes no solo devido aos micro-relevos serão preenchidas. O volume acumulado nestas depressões, chamado de armazenamento na superfície, não pode ser considerado como infiltração e, portanto, deve ser descontado do volume infiltrado.

Para o cálculo do armazenamento superficial usa-se a seguinte expressão:

$$Vd = t_p'(r-f_{\infty}) \quad (18)$$

Onde:

Vd= armazenamento na superfície

t_p' =Tempo necessário para preencher as depressões.

r = Intensidade de precipitação

f_{∞} =Capacidade final de infiltração

Iniciado o escoamento, observa-se que, uma quantidade de água remanescente sobre a área de coleta, não é computada no momento considerado na leitura do volume escoado, ou seja, uma parte do volume precipitado sobre a área não chega no ponto de coleta, ficando retido na superfície da área. Este volume é chamado de detenção superficial, e é determinado pela seguinte expressão:

$$D_1 = D - (t_1 - t_r) \cdot f_{\infty} \cdot a_1 \quad (19)$$

Onde:

D=Detenção superficial

D_1 =Volume de escoamento residual por unidade de área

$t_1 - t_r$ =Duração do escoamento residual

a_1 =Porcentagem de área coberta pela água durante o escoamento residual

O valor de D_1 é obtido do escoamento residual nas parcelas, e o tempo de escoamento residual ($t_1 - t_r$) é medido. O valor de a_1 , segundo Foster et al, citado por Arruda (1984), pode ser considerado como sendo de 25% a área coberta pela água.

2.7 Processo Erosivo

Quando é pretendido estudar a ação da erosão, faz-se necessário conhecer as fases que a acarretam. As principais fases são a desagregação, o respingamento, o transporte e a deposição.

Os dois primeiros, são os que mais ocorrem nas áreas cultivadas e os dois últimos ocorrem nas áreas de baixadas.

O processo de desagregação ocorre quando as partículas dos torrões e agregados do solo são deslocadas devido à ação do impacto das gotas de chuva sobre a superfície. As partículas desagregadas são levadas para dentro dos poros da superfície, causando gradualmente reduções na taxa de infiltração do solo até que a água começa a acumular e aí inicia-se o escoamento superficial, e as partículas então são carreadas no sentido do declive (Pruski e Ferreira, 1996).

A desagregação de partículas pela enxurrada, ocorre, segundo Foster e Meyer citado por Lima (1987), quando as forças de arrastamento horizontal da água excedem a resistência do solo, causando um cisalhamento, que aumenta com a razão do escoamento superficial e declive.

No Brasil, os problemas decorrentes da erosão são muito sérios. Em 1949, Marques, citado por Bertoni e Lombardi Neto (1990), enfatiza que o Brasil perdia, por erosão laminar, cerca de 500 milhões de m³ de terra anualmente, o que corresponde ao desgaste uniforme de uma camada de 15 cm de espessura numa área de 280.000 hectares. Estes autores porém, complementam que, em razão do uso intensivo do solo e ampliação da fronteira agrícola, as perdas de solo superam expressivamente esse valor sendo a situação, em muitos estados brasileiros, de grande gravidade. Os mesmos autores citam que no Estado do Paraná, perdem-se 15 a 20 t/ha por ano, nas áreas intensivamente mecanizadas.

Lima (1987), estudando tipos de preparo de solo, encontrou para o preparo correspondente a uma aração com discos e duas passadas com grade leve e 65 mm de chuva, uma perda de solo de 13 t/ha, para o Latossolo Vermelho Escuro na região de Lavras, MG.

Segundo Lombardi Neto e Bertoni (1975), a tolerância de perdas de solo para o Latossolo Roxo é de 12 t/ha por ano e a perda de água entorno de 9,6 % da chuva caída por ano.

Os sedimentos originários de áreas com erosão entre sulcos são erodidos de uma camada superficial muito fina, (Meyer, Foster e Nicolov, 1975), originando partículas que tendem a ser menores do que aquelas da erosão em sulcos, por causa da seletividade e maior fracionamento pelo repetido impacto da gota de chuva, após a desagregação. A média do tamanho das partículas primárias nas áreas erodidas superficialmente tende a ser menor do que aquelas da massa original do solo.

A energia do escoamento na superfície tende a se concentrar e ser mais alta nas rampas mais longas; isso faz com que a enxurrada produza grande número de sulcos e cause as

maiores perdas de solos nas partes mais baixas dos grandes lançantes. Segundo Ellison (1947), o impacto da gota é o maior produtor de sedimentos e pode facilmente desagregar mais partículas do que o fluxo da enxurrada sobre curtos declives.

2.8 Processo usado para estudo da erosão

São vários os processos usados para estudo da erosão. A escolha de cada processo depende principalmente do tipo de perdas a se determinar, do tipo de práticas a se estudar, das condições ecológicas locais e das possibilidades do pesquisador.

A avaliação do desgaste sofrido pelo solo por efeito da erosão superficial é feita diretamente por coleta, medição e análise do material erodido, ou, então, indiretamente por meio de verificação das mudanças resultantes no relevo do solo ou das alterações sofridas pela sua constituição física e química.

O estudo da erosão diretamente pela coleta, medição e análise do material erodido, se faz com o auxílio de instalações, coletores e medidores especiais que permitam a medição do volume, da intensidade e do teor de solo que é levado pela enxurrada que escorre de áreas perfeitamente delimitadas.

A determinação do material erodido é feita retirando-se amostras representativas, com as quais, por pesagem e secagem em estufa, determina-se a quantidade de terra transportada pela enxurrada.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Simulador de chuvas

Desenvolveu-se um aparelho tipo simulador de chuvas na própria Universidade, que assemelha-se a um sistema de irrigação linear móvel. O simulador é composto por uma linha lateral constituída por uma tubulação de diâmetro de 1" e comprimento de 12 metros, com aspersores do tipo difusor dispostos ao longo de sua extensão, espaçados de 0,5 metros entre si, perfazendo um total de 24 unidades em todo o conjunto. Os difusores são fabricados pela Fabrimar S/A, com orifícios de diâmetro de 1,8 mm e vazão de 210 l/h, a uma pressão de serviço de 240 kPa, sendo instalados sobre válvulas reguladoras de pressão, o que permite manter uma melhor uniformidade na distribuição de pressões ao longo da linha lateral, possibilitando seu uso em solos com diferentes declives, sem que as vazões se alterem.

A linha lateral está assentada sobre uma estrutura (carrinho) apoiada sobre rodas, que movimenta-se linearmente sobre as parcelas. A sustentação da linha lateral se dá por meio de cabos de aço e braços que funcionam como basculantes, e que permitem uma variação de altura do difusor em relação à superfície do solo de 0,5 a 3 metros, com incrementos de 0,5 m (Figuras 5 e 6).

A alimentação de todo o conjunto foi feita por uma motobomba que capta água de um reservatório de 5.000 l, o qual era abastecido por outra motobomba instalada que capta água de uma represa. A partir daí, a água foi levada até o conjunto através de tubulação de alumínio de 75 mm, com engate rápido e mangueira flexível de diâmetro de 50 mm, colocada no centro da área onde trafega o conjunto. A água passava por um sistema de filtragem composto por um filtro de areia e outro de tela.

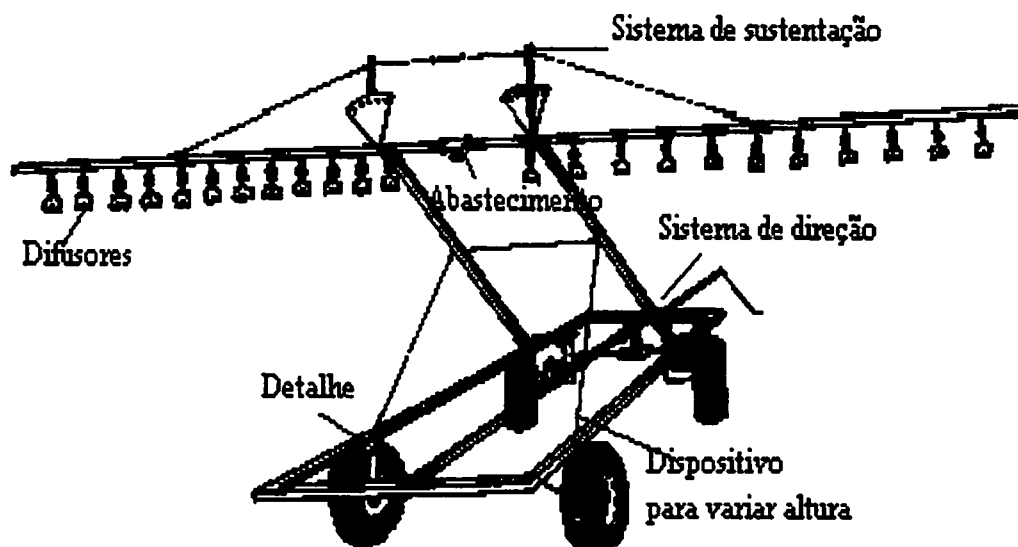


FIGURA 5. Visão geral do simulador de chuvas, seus componentes e acessórios.

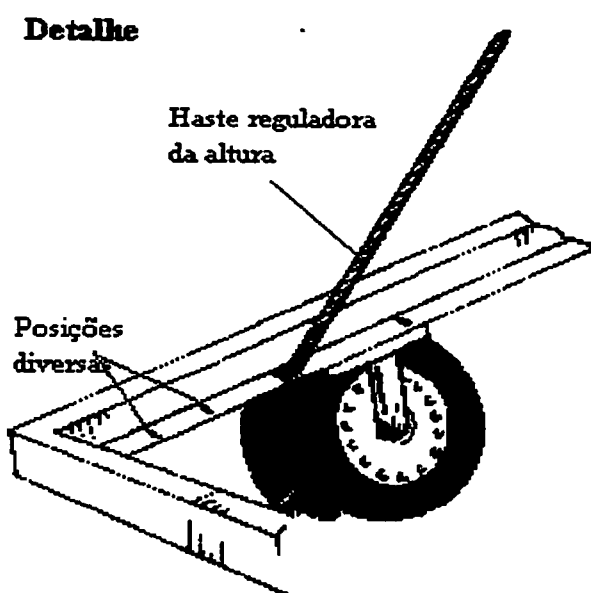


FIGURA 6. Detalhe dos mecanismos de variação da altura do simulador de chuvas.

3.2 Caracterização do local

O ensaio foi realizado na área de campo, do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, cujas coordenadas geográficas, são: 21° 14' de

latitude sul e 45° 00' de longitude oeste (GrW). O clima da região é temperado suave (mesotérmico), tipo Cwb, pela classificação climática de Köppen, e, com base em registros pluviométricos, verifica-se que a região apresenta uma precipitação média anual de 1.493,2 mm, ocorrendo a maior concentração no período de novembro a fevereiro; uma temperatura média anual de 19,3°C (mínima de 15,8°C e máxima de 21,6°C); e umidade relativa do ar de 80% , de acordo com Castro Neto e Silveira (1981).

O solo da área, foi classificado como Latossolo Roxo Distrófico (LRd), horizonte A profundo, textura argilosa, relevo suave com declividade 10%. O material originário é rocha eruptiva básica. Este solo tem como característica marcante uma alta capacidade de infiltração, devido a sua estrutura , apesar de ser um solo com alto teor de argila (Rocha, 1982).

3.3 Caracterização físico-hídrica do solo

A caracterização do solo foi feita por:

- a) análise granulométrica através de peneiramento e sedimentação;
- b) determinação da densidade de partículas e densidade global do solo;
- c) condutividade hidráulica saturada pelo método do permeâmetro de carga constante;
- d) condutividade hidráulica saturada pelo método de Bouwer;
- e) curva de retenção de água no solo;
- f) porosidade total.

3.3.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica do solo foi realizada segundo o método da pipeta (Day 1965), usando o NaOH 0,1 N como dispersante químico, e agitação rápida a 12.000 rpm durante 10 minutos. As frações da terra fina que englobam partículas maiores que 0,1 mm são separadas por peneiramento, e as frações de tamanho menor, por sedimentação, segundo a lei de Stokes. Os valores de argila dispersa em água (ADA) e de argila total (AT), são obtidos no processo de análise granulométrica, segundo a metodologia proposta pela EMBRAPA (1979).

3.3.2 Densidade do solo e de partículas

A densidade do solo ou densidade global (d_s), foi determinada pelo método descrito por Reichardt (1985), com o uso de um cilindro amostrador de Uhland, que possui um volume conhecido. Depois de retirada a amostra indeformada, levou-se o conjunto a uma estufa a 105°C , até obtenção de peso constante, o qual relacionado com o volume permite a obtenção da densidade (g/cm^3). A densidade de partículas (D_p) foi determinada pelo método do balão volumétrico onde uma amostra é envolvida por parafina e mergulhada em um recipiente com água de volume conhecido. Ao mergulhar a amostra o volume no recipiente será alterado devido ao acréscimo do volume do solo. A amostra então é secada em estufa e a densidade é calculada da mesma forma que a anterior.

3.3.3 Porosidade

O volume total de poros (VTP), segundo Danielson e Sutherland (1986), foi determinado pela expressão:

$$\text{VTP (\%)} = (1 - (d_g / d_p)) \times 100 \quad (20)$$

A macroporosidade e a microporosidade, foram determinadas em amostras com estrutura indeformada, submetendo-as a uma tensão de 6 kPa de altura de coluna de água, utilizando-se de uma unidade de sucção. A porcentagem de água retida na amostra, após o equilíbrio, determinada pelo método gravimétrico, foi assumida como correspondendo à microporosidade, sendo a macroporosidade determinada por diferença com o volume total de poros (Grohmann, 1960).

3.3.4 Condutividade hidráulica pelo método do permeâmetro de carga constante

A condutividade hidráulica saturada (K_s) foi determinada partindo-se de amostras indeformadas, coletadas com o amostrador de Uhland, e utilizando-se o permeâmetro de carga constante.

3.3.5 Curva de retenção

Para a determinação do potencial matricial da água, em função da umidade do solo, foi usado o método da membrana de pressão citado por Reichardt (1985). Foram utilizadas amostras com estrutura deformada e submetidas à tensões de 2; 4; 6; 10; 33; 100; 500 e 1500 (kPa), possibilitando, com isso, obter as curvas de retenção de umidade.

3.3.6 Capacidade de campo

Foi estimada através da curva característica do solo, como correspondente à tensão de 10 kPa.

3.4 Locação das parcelas

O delineamento experimental usado foi em Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC) com parcelas subdivididas, constando dos tratamentos correspondentes aos diferentes valores de água disponível (AD) (100% , 67%, 33% e 0%) e os diferentes comprimentos de parcela 1, 2 e 3 metros, respectivamente. Os tratamentos constaram de três repetições.

Para facilitar a identificação dos tratamentos, chamou-se de 1, 2, 3 e 4, os tratamentos correspondentes às parcelas de 0, 33, 67 e 100% de água disponível, e pelas letras A, B e C, as subparcelas correspondentes aos comprimentos de 1, 2 e 3 metros.

Verifica-se na literatura, uma grande variedade nos tamanhos das parcelas, como nos descritos por Wilm, citado por Arruda (1984), tipo F com 1,83 x 3,66 m, o de Rockey Mountain, citado por Arruda (1984), com 0,61 x 1,22 m, Swatzenruber e Hillel (1975), com 1 m², Jeppson (1975), com 3,45 m² e o de Pilgrim, citado por Arruda (1984), com 900 m².

As dimensões adotadas para atender aos objetivos do trabalho foram de 3 x 1, 2 x 1, 1 x 1 metros, onde todo o experimento ocupava uma área de 1440 m². A disposição das parcelas em campo pode ser vista na Figura 7.

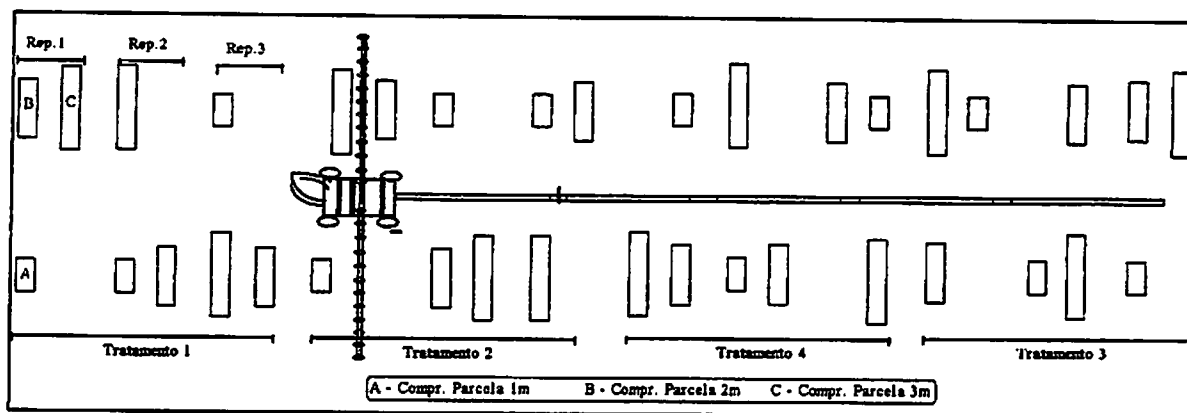


FIGURA 7. Croqui da área experimental.

As parcelas foram devidamente delimitadas por divisórias feitas de chapas de aço nº 18 de 25 cm de altura, dos quais 15 cm foram cravados no solo. Para permitir a coleta do escoamento superficial gerado dentro destes limites, foi feito na parte frontal das divisórias, um corte de 10 cm e uma dobra, de modo que ao ser cravada, a superfície do solo coincida com esta dobra, permitindo que a enxurrada passe e seja coletada por um sistema de calha (Figura 8).

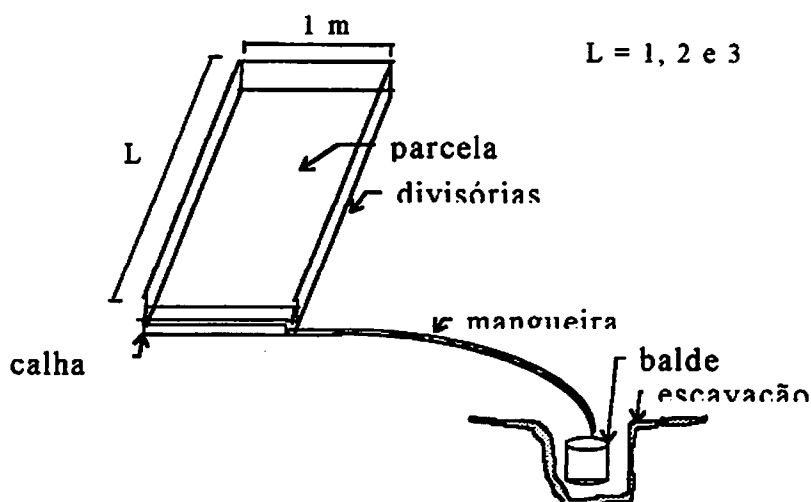


FIGURA 8- Detalhe da parcela e sistema de coleta do escoamento.

3.5 Fatores estudados

Para que se realizassem os testes, fez-se um preparo do solo, que consistiu de uma aração a 30 cm e duas gradagens leves. Após definição das parcelas, a superfície do solo foi acertada com uma enxada, devido às deformações causadas pelo tráfego das máquinas e para

retirada dos torrões que causaram uma certa desuniformidade entre as parcelas. Os testes foram realizados no momento em que a umidade inicial desejada, na camada de 0 a 40 cm, foi atingida. Para que se chegasse aos valores mais elevados de umidade, aplicou-se um volume de água suficiente, até que o valor requerido para o teste fosse atingido.

3.5.1 Condições de umidade

Para estudar a influência da umidade inicial no processo de infiltração, estabeleceu-se 4 situações distintas. Estas situações são quando o teor de água inicial for correspondente à capacidade de campo, ou seja, 100% de água disponível, 67%, 33% e 0% da água disponível entre capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. O acompanhamento da variação da umidade do solo foi feito por gravimetria.

3.5.2 Comprimentos das parcelas

Os comprimentos das parcelas adotados foram 1, 2 e 3 metros, ao longo do declive. As parcelas eram limitadas por chapas de aço nº 18, cravadas no solo e distantes do aparelho conforme mostra a Figura 9.

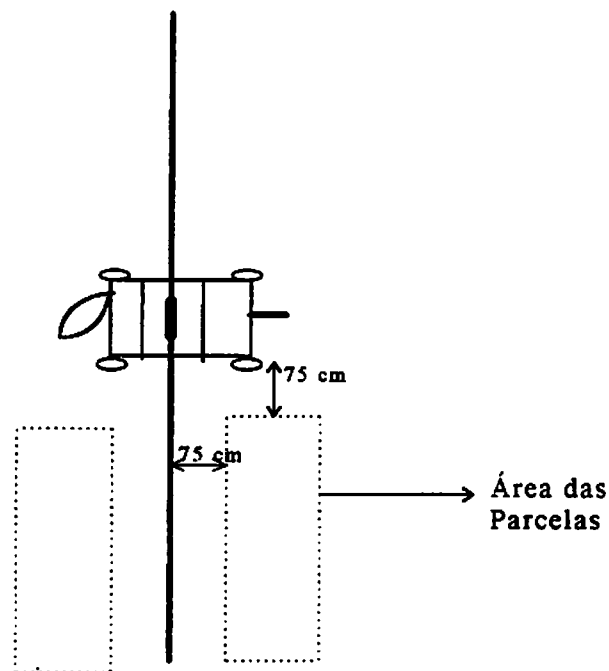


FIGURA 9 - Posição das parcelas em relação ao simulador.

3.6 Aparelhos utilizados

Juntamente com o simulador de chuvas, fez-se o uso de outros aparelhos que serão descritos a seguir.

3.6.1 Anemômetro

Devido à incidência de ventos nesta área, instalou-se um anemômetro de concha, a uma altura de 1,8 metros do solo, para determinar a velocidade do vento durante os ensaios de calibração. No campo, o simulador e o anemômetro foram instalados no interior de uma proteção de lona plástica, para que o jato dos difusores não sofresse distorções devido à ação do vento.

3.6.2 Pluviômetros

Em campo, quatro coletores foram dispostos na área, a fim de quantificar a evaporação da água, ocorrida durante os testes.

Em volta de cada uma das parcelas experimentais, colocou-se coletores de 0,080 m de diâmetro, espaçados de 1 metro, para medir o total precipitado, que foi obtido a intervalos de 30 minutos. Tal procedimento possibilita determinar a intensidade de precipitação, e prováveis variações nas intensidades no decorrer do teste.

3.6.3 Dispositivo para medir h_{ac} e K_z .

Para que fosse determinada a pressão de entrada de ar no solo (h_{ac}), usada para calcular a sucção efetiva na frente de molhamento, valor este usado na equação de Green-Ampt, construiu-se na própria instituição, um aparelho semelhante ao proposto por Bouwer (1966), mostrado na Figura 10.

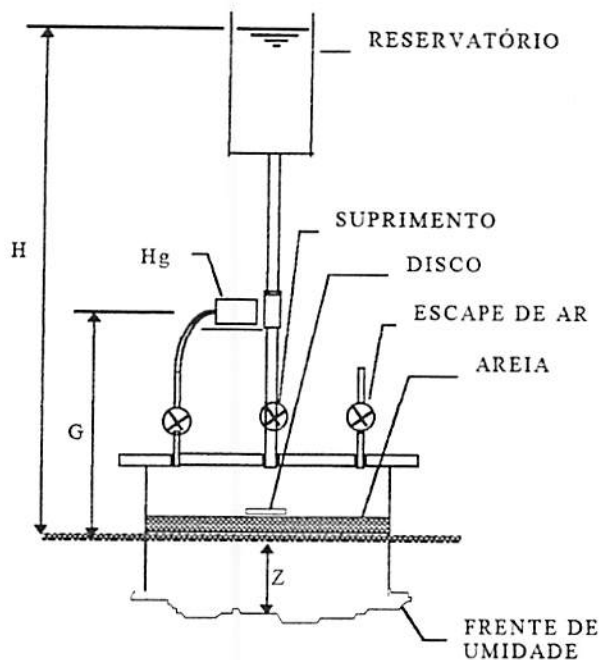


FIGURA 10 - Esquema do aparelho idealizado por Bouwer para determinar h_{ac} .

O aparelho consiste em um cilindro metálico de 30 cm de altura e 20 cm de diâmetro. Sua parte superior consiste de uma tampa feita a partir de um flange onde estão ligados um reservatório, com altura regulável, feito de material plástico transparente de 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro, que alimenta o cilindro através de mangueira flexível de 19 mm, uma saída para um vacuômetro de mercúrio e uma outra usada para escape de ar. Esta tampa é fixada ao cilindro através de parafusos, garantindo uma perfeita vedação com a ajuda de um anel de borracha.

3.6.4 Anéis infiltrômetros

Foram usados dois anéis metálicos concêntricos, com diâmetro de 30 e 60 cm, ambos com 30 cm de altura cravados 15 cm no solo. O sistema de medição da variação da altura d'água consistia de uma régua graduada em centímetros colocada no anel interno.

3.7 Calibração do simulador de chuvas

O simulador foi montado em uma área plana para se proceder a sua calibração. Os testes a que foi submetido, foram:

3.7.1 Avaliação dos difusores

Para que fosse conseguida uma uniformidade de vazão nos braços do simulador, fez-se testes de vazão em todos os difusores, individualmente. Instalou-se os difusores em uma linha de alimentação, onde o suprimento de água era garantido por um conjunto motobomba instalada num reservatório de 1000 l. A pressão foi controlada através de um registro e medida em um manômetro de bourbon, mantendo-se constante em 240 kPa, pressão de serviço. Coletou-se o volume em um balde durante um tempo de 2 minutos, e pesou-se em seguida em balança eletrônica, obtendo-se assim a vazão de cada um deles.

Os difusores foram distribuídos ao longo dos braços do simulador, de acordo com a vazão dos mesmos, de modo a conseguir um bom balanceamento das vazões.

A fim de verificar se a válvula reguladora de pressão estava atuando significativamente, variou-se de 207 kPa a 275 kPa, e procedeu-se à coleta do volume, conforme descrito anteriormente. Os valores obtidos foram próximos ao valor médio à pressão de 240 kPa.

3.7.2 Uniformidade de aplicação

Para que se fizesse o teste de uniformidade de aplicação de água do simulador, adotou-se os seguintes passos:

- montou-se uma rede de abastecimento de água, composta de um reservatório de 5.000 l, uma motobomba e tubulação de 50 mm de diâmetro.
- na tubulação foram colocados um registro, um filtro de tela e um manômetro de bourbon, situação semelhante a do campo.
- um outro manômetro foi posto na extremidade de um dos braços do simulador.

- no intuito de localizar a melhor posição para as parcelas, confeccionou-se uma malha na extensão de um dos lados do simulador de 0,50 por 0,50 m, com coletores de diâmetro de 0,08 m, instalados de tal forma que a distância entre o difusor e o coletor fosse igual a 1,80 m.
- para se fazer o teste, os difusores foram cobertos por uma lona plástica até estabilizar a pressão em 240 kPa (pressão de serviço). Em seguida os difusores eram descobertos e o cronômetro acionado. O teste teve duração de 30 minutos, e durante este tempo, foram feitas leituras no anemômetro para quantificar a velocidade do vento, que se manteve abaixo dos valores aceitáveis. Ao término de 30 minutos, fez-se a coleta do volume precipitado e análise dos valores, determinando-se a uniformidade pela fórmula de Christiansen.
- de posse desta malha, analisou-se em qual posição se obteria uma melhor uniformidade. Com isso, locou-se a posição das parcelas em relação ao aparelho, e fez-se novos testes de uniformidade, agora nos quatro quadrantes formados pelos braços do simulador.

3.7.3 Diâmetro de gotas

Durante os testes, fez-se uma avaliação do diâmetro de gotas, segundo o método da farinha, introduzido por Beutley, citado por Carter et al (1974). Com o aparelho funcionando, colocou-se, perpendicularmente aos braços do aparelho, quatro bandejas em linha, cheias com farinha peneirada, nas distâncias de 0,5, 1, 2 e 3 metros, inicialmente tampadas. Após verificadas as condições normais de funcionamento do aparelho, destampou-se as bandejas uma a uma e estas ficaram expostas à chuva por um tempo médio (\cong 2 segundos). As bandejas permaneceram em repouso por 40 minutos, e após, foram levadas para estufa a 105^o C por 12 horas. Com a farinha já seca, ela foi coada em jogo de peneiras e contados os peletes nelas retidos.

Com os dados de diâmetros de gota, calculou-se os valores de velocidade de queda, através de um programa feito em linguagem Pascal, utilizando o método de Runge-Kutta de 4^a ordem, e energia cinética das mesmas.

3.8 Determinações de campo

3.8.1 Determinação da infiltração com o uso do simulador de chuvas

O procedimento estabelecido para cada ensaio foi:

- O Simulador era posicionado sobre as parcelas, mantendo sempre uma altura de 1,8 m da superfície do solo, a fim de obtermos a mesma energia incidindo sobre as parcelas. Em cada posição o aparelho atinge uma parcela de 3x1, 2x1 e 1x1, que corresponde à repetição de um tratamento.
- Antes de iniciar os testes, era retirada uma amostra a fim de determinar a umidade inicial.
- Em cada uma das parcelas posicionava-se os baldes para coleta do deflúvio.
- O registro que controla a alimentação de água para o simulador era aberto lentamente, para que a água expulsasse o ar contido no mangote e na tubulação de alimentação dos braços do aparelho.
- Satisfeito o item anterior, abria-se o registro bruscamente até que a pressão chegasse a 240 kPa e simultaneamente, acionava-se os cronômetros e posicionava-se os baldes debaixo das mangueiras coletoras.
- Começado o escoamento, anotava-se o tempo e após fazia-se leituras de volume do deflúvio a cada intervalo preestabelecido, durante um tempo igual ou superior a 2 horas.
- Durante o teste, a cada 15 minutos era feito leituras no anemômetro, e a cada 30 minutos lia-se os pluviômetros.
- Ao final de cada teste a detenção superficial e o armazenamento na superfície eram medidos.
- Após terminados estes testes, fazia-se uma compensação do tempo de caminhamento da água nas calhas, medindo-se o tempo gasto para que um volume de 100 ml percorresse a distância do centro da calha até o ponto da coleta.
- Terminado todos os testes, retirava-se outra amostra para determinação da umidade final. O aparelho era então deslocado para a repetição seguinte, e os procedimentos descritos acima retomados.

3.8.1.1 Capacidade de infiltração

Uma calha foi instalada à jusante das parcelas na direção transversal à área e abaixo da superfície do terreno, para que o volume escoado fosse coletado. Para captar a vazão efluente desta calha, uma mangueira “cristal” com comprimento de 4 m e 32 mm de diâmetro foi conectada na saída da calha a fim de que ficasse fora do alcance do aparelho. Esta mangueira foi levada até um local, de cota mais baixa, onde foi feita uma escavação, para permitir a colocação de um recipiente de 20 l em sua parte inferior, onde coletou-se o escoamento (Figura 8). Este procedimento ocorreu por um tempo igual ou maior que 2 horas dividido em quatro intervalos de 5 minutos, 2 intervalos de 10 minutos e o restante em intervalos de 20 minutos. As medidas do escoamento superficial foram feitas de forma direta, pela leitura de volume e tempo correspondente. Subtraindo-se da chuva aplicada o volume obtido nestes coletores em determinado tempo, e o volume armazenado nas depressões, obteve-se o volume infiltrado, o qual foi transformado em lâmina, dividindo-o pela área da parcela.

3.8.1.2 Determinação da detenção superficial e armazenamento na superfície

A detenção superficial e o armazenamento na superfície foram determinados ao final de cada teste, usando-se das equações 18 e 19, adotando-se o seguinte procedimento:

- o suprimento de água destinado ao simulador era interrompido até que a água nas depressões infiltrasse e em seguida reiniciava-se o ensaio.
- transcorridos aproximadamente dez minutos, tempo suficiente para que o escoamento superficial chegasse ao equilíbrio, o sistema era desligado novamente e, simultaneamente, acionava-se os cronômetros e posicionava-se os baldes sob as mangueiras coletoras. Terminado o escoamento, marcava-se o tempo gasto do início ao fim do escoamento e o volume escoado.

3.8.2 Determinações de Infiltração pelo método dos anéis concêntricos.

Simultaneamente aos testes realizados com o simulador de chuvas foram realizados testes com os anéis infiltrômetros, a fim de se fazer uma comparação entre a capacidade de infiltração obtida por um método dinâmico e outro método estático, que são os casos do simulador de chuvas e dos anéis infiltrômetros, respectivamente. Os ensaios com os anéis infiltrômetros foram feitos nas mesmas condições de umidade e repetições dos testes realizados com o simulador de chuvas. Os anéis infiltrômetros foram instalados concêntricamente e cravados 15 cm no solo, tendo sido nivelados de acordo com recomendações de Bernardo (1986). Em todos os testes, em ambos os cilindros que compõe o infiltrômetro circular, o nível de água foi mantido o mesmo e igual a 8 centímetros. A infiltração foi medida pela determinação da variação de leitura obtida na régua instalada no anel menor e o tempo necessário para que ocorresse tal variação. A variação permitida era de no máximo igual a 2 cm.

3.8.3 Determinação de h_{se} e K_z

O procedimento do ensaio consiste em:

- cravar o cilindro de ferro, aproximadamente 15 cm de profundidade no solo,
- cobrir a superfície do solo com uma camada de areia e, debaixo da saída da alimentação, por um disco de metal para dissipar a energia da água evitando o choque direto com o solo,
- colocar a tampa do cilindro com sistema de vedação para impedir a entrada de ar,
- abrir a válvula de escape de ar e em seguida a válvula de suprimento de água deixando que a água expulse todo o ar do cilindro. Não havendo mais ar presente no cilindro fechar a válvula de escape. Deixar infiltrar um volume de água suficiente para que uma abrupta frente de umidade chegue até o final do cilindro (Figura 10). O tempo necessário para a frente atingir o final do cilindro é determinado experimentalmente.
- estando o cilindro, no espaço acima da superfície, totalmente cheio e atendido o item anterior, fechar a válvula de alimentação,
- a partir daí, proceder a leitura da coluna de mercúrio do vacuômetro que sobe até um valor crítico P_{min} . Neste ponto ocorre a entrada de ar pelo fundo do cilindro, a chamada pressão de

entrada de ar (h_{ae}), fazendo com que a coluna de mercúrio caia repentinamente. A pressão h_{ae} é dada pela seguinte equação:

$$h_{ae} = P_{min} + G + Z \quad (21)$$

onde: h_{ae} = valor da tensão de entrada de ar no solo (cm c. a.).

P_{min} = pressão mínima, em cm de água, determinada pela leitura máxima no vacuômetro de mercúrio (cm).

G = altura da cuba de mercúrio até a superfície do solo (cm).

Z = distância da superfície do solo até a frente de molhamento (cm).

A técnica para medir h_{ae} em campo, mostra resultados que são independentes da altura do reservatório de água (H), da profundidade da frente de umedecimento (z), e da umidade inicial do solo. No entanto, se um solo se apresentar com estrutura diferenciada, o desenvolvimento da frente de molhamento não será uma zona bem definida, interferindo na obtenção de h_{ae} (Bouwer, 1966).

Para obtenção de K_z , utilizou-se do mesmo aparelho idealizado por Bouwer (Figura 10).

O início da metodologia do teste é a mesma para a obtenção de h_{ae} . Aberta a válvula de suprimento de água e expulso todo o ar presente dentro do cilindro, espera-se um tempo próximo ao do fechamento da válvula. Nesse tempo, faz-se a leitura do nível de água do reservatório e uma outra leitura no tempo de fechamento (dH/dt). A última leitura feita corresponde à altura (H_i) do reservatório à superfície do solo.

3.8.4 Perdas de solo

A cada intervalo de tempo estabelecido, coletava-se o volume escoado, e após a homogeneização da solução (água + solo), retirou-se uma amostra cujo volume era desconhecido. Em laboratório, a amostra foi pesada. Após 24 horas de repouso, foi submetida a uma sucção para retirada do excesso de água e levada para estufa por 48 horas, e então, pesada. Do peso inicial, peso total, retirou-se o peso do solo e do recipiente, e assim obteve-se o volume coletado. A

perda de solo foi calculada para aquele volume coletado e extrapolada para o volume total coletado nas parcelas.

3.9 Ajuste das equações de capacidade de infiltração

3.9.1 Capacidade de Infiltração determinada por Kostiakov

A equação de Kostiakov (equação 14), usada na estimativa dos valores de capacidade de infiltração, não é adequada para tempo $t = 0$. A capacidade de infiltração inicial foi determinada para um tempo $t = 1$, ou seja, f_1 ($t = 1$).

Utilizou-se dos parâmetros da equação de Kostiakov para estimar analiticamente os valores de f_{∞} , pela seguinte equação:

$$f_{\infty} = f_1 \cdot \left(\frac{\tan \alpha}{-n \cdot f_1} \right)^{\frac{-n}{-n-1}} \quad (22)$$

onde: $\tan \alpha$ = ângulo da tangente à curva de $f=f(t)$, quando $f \rightarrow f_{\infty}$ (valor usado -0,01) .

f_1 e n = parâmetros característicos do solo.

3.9.2 Capacidade de Infiltração determinada por Horton

A capacidade de infiltração inicial (f_0), ou seja, capacidade de infiltração quando o tempo for zero ($t=0$), foi determinada pelo método de regressão linear através da linearização da equação 17, que resultou na equação 23.

$$\ln (f - f_{\infty}) = \ln (f_0 - f_{\infty}) - k_f \cdot t \quad (23)$$

O valor de f_{∞} foi obtido por regressão, utilizando-se os dados gerados de f e t , como o correspondente ao melhor coeficiente de correlação. Da equação ajustada resultante, obteve-se os valores de k_f e f_0 .

3.9.3 Capacidade de Infiltração determinada por Green-Ampt

A capacidade de infiltração calculada por Green-Ampt pela equação 10, após linearizada, pode ser escrita da seguinte forma:

$$f = k_s + \frac{k_s \cdot h_f}{z} \quad (24)$$

onde : $z = F/\Delta\theta_1$;

F = lâmina total infiltrada até o instante t ;

$\Delta\theta_1$ = diferença entre a umidade final e inicial na profundidade z ;

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos, bem como suas discussões, serão apresentados a seguir a partir das características do infiltrômetro utilizado, das características do solo e das avaliações de campo que constarão das análises a serem promovidas para obtenção da capacidade de infiltração.

Devido os tratamentos 1, 2 e 3 não terem apresentado escoamento superficial significativo, as análises estatísticas não foram feitas.

4.1 Características do simulador de chuvas utilizado

Os testes feitos com os difusores, apresentaram uma vazão média de 210 l/h, com um coeficiente de variação de 4,13%, à pressão de serviço de 240 kPa, assim a vazão necessária para o funcionamento do simulador é de 5040 l/h. Esta vazão é significante, mas, quando comparada com a vazão do simulador de chuvas de braços rotativos, ela representa apenas 30%. Verifica-se assim que há uma economia de água representativa, cerca de 70%.

Dos testes a que foram submetidos os difusores, constatou-se que variando a pressão dentro do intervalo de 207 a 275 kPa, não houve alteração nos valores de vazão, devido à ação das válvulas. Isto possibilita que o aparelho trabalhe em terrenos com desnível de até 6,9 metros, sem que haja distorções nos valores das vazões.

Nos ensaios para calibração realizados com o simulador de chuvas, verificou-se que havia variações espaciais na chuva simulada, assim, instalou-se uma malha de pluviômetros, em um dos lados do simulador, dispostos conforme mostra a Figura 11, a fim de avaliar esta variação. Os ensaios foram conduzidos mantendo a pressão constante, e igual a 240 kPa.

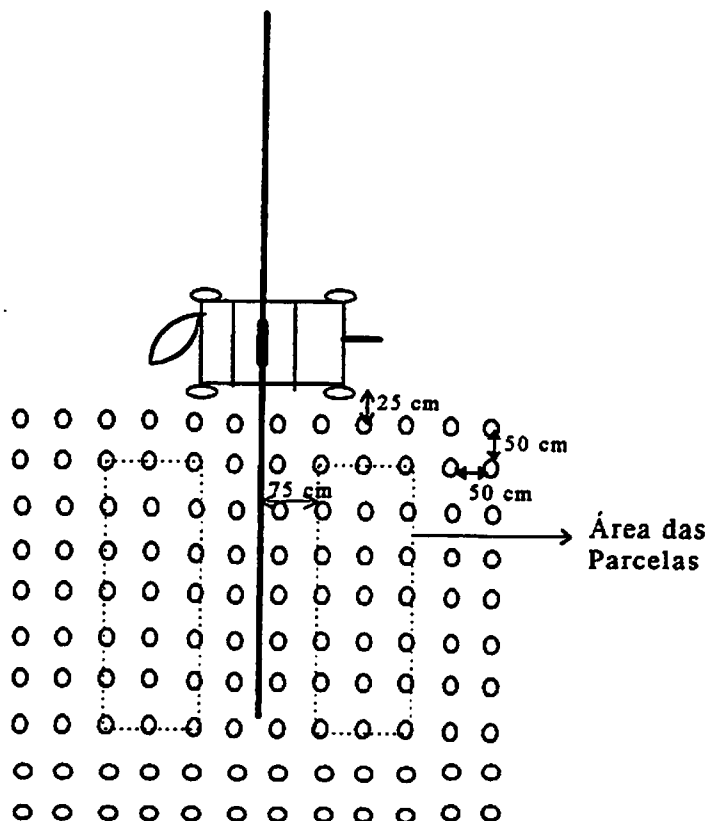


FIGURA 11 - Malha de coletores mostrando a posição das parcelas em relação ao simulador.

A uniformidade de aplicação do simulador proposto é de 80%. Comparativamente, este valor de uniformidade é maior que o apresentado por Shelton et al (1985) e o de discos rotativos apresentado por Pall et al. (1981) citado por China, Jarrett e Hoover (1985). Comparando com os simuladores de Foster et al (1982), Kentuck descrito por Moore et al (1983) e Swanson (1965), verifica-se que seus valores são muito próximos.

Com os dados coletados definiu-se as intensidades de precipitação em cada quadrante e demarcou-se as parcelas em pontos de mesma intensidade e uniformidade. O simulador apresentou uma faixa de intensidade de precipitação de 53,52 a 76,89 mm/h com uma média de 61,62 mm/h para as parcelas de 1 x 1 m. Para a parcela de 2 x 1 m, a faixa foi de 55,36 a 80,82 mm/h com uma média de 64,21 mm/h. A parcela de 3 x 1m teve uma faixa de variação de 59,19 a 83,92 mm/h com média de 67,16 mm/h. Segundo Hudson(1971), em estudos realizados na África, uma intensidade de 25 mm/h é o bastante para provocar erosão. Os simuladores de chuva

de Meyer e McCune (1958), Meyer e Harmon (1979), Foster et al (1982), Kentuck descrito por Moore et al (1983) e Swanson (1965), apresentam faixas de intensidades semelhantes às do simulador proposto.

O simulador de chuvas proposto permite que a intensidade de aplicação seja alterada de várias formas. Pode-se trocar os bocais por outros de diâmetro diferente, fechar alguns dos bocais, e, trocar as válvulas reguladoras de pressão, satisfazendo uma das características do simulador de chuvas apresentado por Meyer e MacCune (1958).

Há a possibilidade de se fazer até 3 repetições de 2 horas de duração em posições diferentes em um só dia. A mudança de posição do aparelho pode ser feita por 2 pessoas. O transporte pode ser feito por qualquer veículo automotor desde que tenha um engate para carreta onde é conectado o simulador, demonstrando a facilidade de manuseio, operacionalidade e transporte do aparelho.

Em todos os testes realizados em campo (12 testes), foram determinadas as intensidades de precipitação no decorrer do tempo do ensaio. Os valores obtidos apresentaram diferenças em relação àqueles encontrados na calibração do aparelho, no entanto os valores obtidos em campo apresentaram uma média de 72,57 mm/h para a parcela de 1x1m, 67,56 mm/h para a de 2x1m e 73,28 para as parcelas de 3x1m, sendo os mesmos valores bem próximos, podendo-se dizer que a reprodução de chuvas em iguais condições foi conseguida.

Verifica-se que, em questão de uniformidade, intensidade de precipitação, variações na intensidade, portabilidade, facilidade de manuseio e capacidade de reproduzir chuvas em iguais condições o simulador apresentado comporta-se à semelhança dos outros aparelhos, como visto na revisão bibliográfica, satisfazendo assim as características do simulador de chuvas apresentado por Meyer e MacCune (1958).

Outra possibilidade deste simulador é que, por ser um aparelho que pode ser deslocado linearmente, permite trabalhar com uma faixa ampla de comprimentos de parcelas.

Este aparelho, por retratar as condições de fornecimento de água semelhantes às do pivô central, constitui-se num importante instrumento para a realização de pesquisas nesta área, que vem se destacando no meio agrícola.

As características de gotas do simulador, no entanto, deixaram a desejar quando o simulador proposto foi comparado com outros. A maioria dos simuladores apresentam uma energia cinética em torno de 200 KJ/ha.mm (20 kPa) e gotas de diâmetro da ordem de 2 mm. As

características das gotas do simulador proposto no que diz respeito ao diâmetro e a energia cinética, foram inferiores aos demais apresentados na revisão bibliográfica. Na Tabela 1 são apresentados os dados obtidos considerando o D_{50} como referência. Como as parcelas estão localizadas a uma mesma distância do braço do aparelho, o diâmetro de gotas, D_{50} , que incide sobre a superfície do solo no centro de todas as parcelas, é de 0,84 mm, com um tempo de queda de 0,732 s, uma velocidade de chegada de 3,648 m/s e uma energia cinética de 66,43 KJ/ha.mm (6,643 kPa). A Figura 12, mostra os valores de D_{50} para as diferentes distâncias do braço do simulador, onde pode-se observar também a posição da parcela e o diâmetro de gotas que nela incide.

TABELA 1 - Valores dos diâmetros D_{50} , velocidade e energia cinética de gotas do simulador a diferentes distâncias do braço.

Distân. (m)	D_{50} (mm)	Veloc. (m/s)	Ec (KJ/ha.mm)	Ec (kPa)
0,5	0,726	3,399	77,345	7,7345
1	0,786	3,533	62,291	6,2291
2	0,897	3,756	70,649	7,0649
3	1,216	4,252	93,511	9,3511

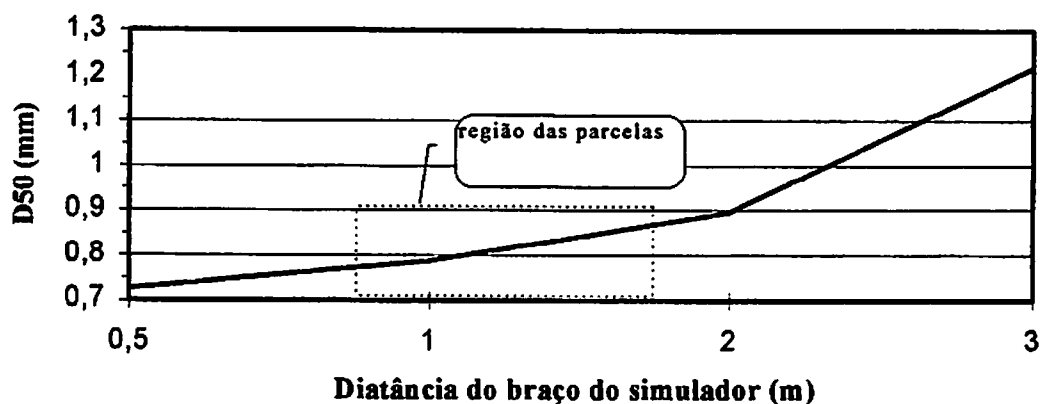


FIGURA 12 - Valores de diâmetros de gota D_{50} nas diferentes distâncias do braço do simulador.

As características das gotas fogem do desejável para um simulador de chuvas, pois não se assemelham à chuva natural que, de acordo com os trabalhos de Roth, Henklain e Farias

(1985), apresentam, para uma intensidade de 60 mm/h, um D_{50} de 2,93 mm e uma energia cinética de 292,3 KJ/ha.mm (29,23 kPa).

Estas características são específicas para o diâmetro do bocal usado no aparelho. No entanto, estas características podem ser modificadas com a simples troca dos bocais, tendo para isso uma faixa de variação de 1,8 a 9,6 mm. Outra alternativa seria variar a altura dos difusores em relação à superfície do solo, variando-se a altura do braço basculante.

4.2 Características do solo

O solo foi identificado e classificado como sendo um Latossolo Roxo distrófico (LRd), horizonte A profundo, textura argilosa, relevo suave com declividade 10%. Este solo é rico em óxidos de ferro e alumínio. A fração argila deste solo, segundo Rocha (1982), é caracterizada pela predominância de gbsita, seguida de goethita e hematita. Estes constituintes mineralógicos promovem a formação de uma estrutura granular muito evidente. Os resultados das análises físicas estão apresentadas na Tabela 2.

TABELA 2. Características físicas do LRd da área em estudo ⁽¹⁾.

Tratamentos	Granulometria			Densidades		Porosidade		
	Argila %	Areia %	Silte %	dp(g/cm ³)	dg(g/cm ³)	VTP %	Micro %	Macro %
1 0 - 20	59,67	17,00	23,33	2,86	1,12	60,84	40,38	20,5
20 - 40	59,00	16,33	25,00	2,86	1,06	62,95	42,6	20,09
2 0 - 20	64,00	12,67	23,33	2,86	0,97	66,08	39,8	26,28
20 - 40	64,00	11,33	24,67	2,86	1,04	63,51	41,91	21,61
3 0 - 20	65,00	12,00	22,67	2,86	1,09	61,85	39,75	22,1
20 - 40	67,00	12,00	20,67	2,86	0,86	70,00	39,83	30,17
4 0 - 20	62,67	15,33	21,67	2,86	1,12	60,76	39,94	20,82
20 - 40	64,00	12,67	23,00	2,86	1,11	61,1	40,82	20,49

⁽¹⁾ Análises realizadas no Laboratório de Solos do Departamento de Ciências do Solo/UFLA-Lavras-MG.

Apesar deste solo ter um alto teor de argila (em torno de 60%) ao longo do perfil, o que seria um fator limitante à capacidade de infiltração, isto não acontece devido à estrutura granular apresentada, favorecendo o processo de infiltração.

A elevada porosidade, acima de 60%, com uma adequada proporção de macroporos, cerca de 1/3, confere ao solo um elevado valor de permeabilidade e condutividade hidráulica.

A curva de retenção de água no solo, obtida da média entre os pontos amostrados, está apresentada na Tabela 3. Os valores estimados para a capacidade de campo e ponto de murcha permanente, são de 38,45% e 27,27% de umidade, que correspondem às tensões de 10 e 1500 kPa respectivamente.

TABELA 3. Dados da curva média de retenção de umidade para o LRd.

Tensão (kPa)	1500	500	100	33	10	6	4	2
Umidade volumétrica (%)	27,27	30,02	31,89	35,16	38,45	46,79	53,75	66,48

Verifica-se que este solo tem uma alta capacidade de armazenamento de água disponível (44,72 mm até a profundidade de 0,40 m), correspondente a umidade mais baixa estudada, o que resulta num tempo de infiltração muito alto, até que o armazenamento seja satisfeito, para ter início o escoamento.

4.3 Avaliações de campo

4.3.1 O uso do simulador de chuvas na obtenção da capacidade de infiltração

Dos testes realizados com o simulador, obteve-se dados de precipitação, escoamento e volume armazenado na superfície. Destes dados foram obtidos os parâmetros necessários na quantificação da lâmina infiltrada e pela derivação desta, a capacidade de infiltração.

Dos tratamentos estudados 1, 2, 3 e 4, os dois primeiros não mostraram o comportamento esperado para a capacidade de infiltração. Observou-se que nestes tratamentos, onde o teor de água era menor, não houve um escoamento superficial significativo. O tratamento 3 também teve o mesmo comportamento dos anteriores, porém, nota-se que é um ponto a partir do qual o escoamento ocorreu com maior intensidade.

O comportamento da infiltração, apresentado pelos tratamentos 1, 2 e 3, foi o visto na Figura 3, e representado pela situação B, onde, em todo o intervalo de tempo t , $r \leq f$, sendo o regime de infiltração comandado pela intensidade de aplicação onde, $VI = r$ pois $f > VI$. Nestas condições, toda a precipitação se infiltra, não acontecendo o escoamento superficial.

O tratamento 4, de comportamento semelhante à situação D indicado na Figura 3, quando $t > t_p$ e, neste caso, $r \geq f$, foi o que permitiu fazer as análises devido à possibilidade de se conhecer o regime de infiltração a partir do início do teste até o início do escoamento, através dos dados acumulados, e, a partir deste, até os 120 minutos de teste.

Assim sendo, para permitir uma análise e discussão dos resultados dos tratamentos 1, 2 e 3, utilizou-se apenas a equação de Kostiakov. Já no tratamento 4, utilizou-se também as equações de Horton e Green-Ampt.

O escoamento superficial obtido nos tratamentos 1 e 2, tratamentos de menor teor inicial de água, e suas combinações, foi bastante reduzido, resultando no comportamento linear da capacidade de infiltração, ou seja, $VI = r$ ($VI < f$). Isto pode ser verificado pelos valores próximos de zero do parâmetro n da equação de Kostiakov, que descreve o decaimento da capacidade de infiltração com o tempo, mostrados na Tabela 4 e 5.

TABELA 4. Valores dos parâmetros estimados para equação de Kostiakov para o tratamento 1.

Tratamentos		Kostiakov			R^2
		f_1	n	r (mm/min)	
A	R1	0,967	-0,0115	0,946	0,99
	R2	1,153	-0,009	1,127	0,99
	R3	1,114	-0,0029	1,105	1
B	R1	1,260	-0,0375	1,111	0,99
	R2	1,128	-0,0008	1,129	1
	R3	1,206	-0,0005	1,206	1
C	R1	1,278	-0,0049	1,265	1
	R2	0,836	-0,0006	0,836	1
	R3	1,402	-0,0005	1,401	1

TABELA 5. Valores dos parâmetros estimados para equação de Kostiakov para o tratamento 2.

Tratamentos		Kostiakov			
		f_i	n	r (mm/min)	R^2
A	R1	1,227	-0,027	1,331	0,99
	R2	1,200	-0,0145	1,174	0,99
	R3	1,127	-0,0794	0,982	0,99
B	R1	1,034	-0,0034	1,028	1
	R2	1,170	-0,0046	1,160	1
	R3	1,293	-0,0302	1,233	0,99
C	R1	1,227	-0,0027	1,220	1
	R2	1,433	-0,0005	1,433	1
	R3	1,237	-0,0064	1,226	0,99

Os ensaios, apesar de terem sido realizados em locais distintos, apresentam características semelhantes mostrando uma homogeneidade nos resultados, evidenciando o mesmo comportamento dentro do tratamento.

O fato do escoamento superficial ter-se apresentado bastante reduzido, contribuindo para o comportamento linear da infiltração, e não gerar dados adequados para análises, pode ser atribuído a alguns fatores. Um desses fatores é o valor da intensidade média de precipitação (70 mm/h), fornecida pelo simulador de chuvas proposto, que apesar de ser da mesma ordem e até mesmo maior que de outros simuladores, como já foi visto na revisão bibliográfica, foi limitante para o solo estudado (LRd). Aliado a este fator, temos a baixa umidade inicial do solo, fazendo com que haja um avanço muito evidenciado da frente de umidade, devido à forte sucção das camadas mais secas abaixo da superfície, gerada pela diferença de potenciais existente. Isto pode ser verificado na Tabela 1A dos Anexos. Apesar de ter sido aplicada uma lâmina de aproximadamente 145 mm, não houve escoamento, pois toda a água precipitada foi redistribuída para as camadas mais profundas do perfil. Este fato é interessante, pois alerta quanto a não existência de camada de impedimento neste LRd até a profundidade imediatamente abaixo de 40 cm. Um outro fator a ser considerado são as características físicas e hídricas do LRd, que possui uma estrutura granular muito evidente, responsável por altos valores de condutividade hidráulica,

muitos macroporos, e com isso, baixa densidade do solo, além de ser um solo muito profundo. Estas características favorecem a uma alta capacidade de infiltração, fazendo com que o valor da intensidade de precipitação obtida com o simulador fosse insuficiente para o estudo proposto.

O tratamento 3, mostrado na Tabela 6, comportou-se de maneira semelhante aos anteriores já mencionados.

TABELA 6. Valores dos parâmetros estimados para equação de Kostiakov para o tratamento 3.

Tratamentos		Kostiakov			
		f_1	n	r (mm/min)	R^2
	R1	1,371	-0,09	1,226	0,99
A	R2	1,125	-0,09	1,126	1
	R3	1,395	-0,09	1,394	1
	R1	1,427	-0,1	1,314	0,99
B	R2	1,097	-0,05	1,016	0,99
	R3	1,073	-0,01	1,072	1
	R1	1,359	-0,06	1,190	0,99
C	R2	1,156	-0,07	1,033	0,99
	R3	1,443	-0,01	1,443	1

Os valores do parâmetro n continuam baixos, mas apresentando uma tendência para uma função diferente da linear, ou seja, a intensidade de precipitação passa a ter valor um pouco maior do que a capacidade de infiltração que decai com o tempo, mostrado pelo expoente $n \neq 0$. No entanto, o escoamento obtido ainda foi muito reduzido, não sendo o bastante para proporcionar maiores discussões.

No tratamento 4, mostrado na Tabela 7, pode-se verificar os parâmetros da equação de Kostiakov, entre eles o expoente n , que apresenta valores bem diferentes de zero, indicando que a capacidade de infiltração está decaindo à medida em que o tempo aumenta, como fato comprovante de que o solo está determinando o regime. Verifica-se que os valores de f_{∞} , r e $f_1(t=1)$ estão condizentes com o estágio D (Figura 3) onde $r > f > f_{\infty}$ e $t > t_p$.

TABELA 7. Valores dos parâmetros estimados para equação de Kostiakov para o tratamento 4.

Tratamentos		Kostiakov				R ²
		f ₁	n	f _∞ (mm/min)	r (mm/min)	
A	R1	1,12	-0,13	0,517	1,364	0,99
	R2	1,247	-0,21	0,356	1,364	0,99
	R3	1,945	-0,20	0,525	1,377	0,99
B	R1	1,026	-0,46	0,085	1,412	0,88
	R2	1,03	-0,19	0,336	1,021	0,99
	R3	1,585	-0,19	0,492	1,271	0,99
C	R1	0,965	-0,28	0,193	1,268	0,98
	R2	1,091	-0,37	0,135	1,268	0,99
	R3	1,485	-0,22	0,376	1,071	0,99

Neste caso, verifica-se que a intensidade gerada pelo aparelho foi suficiente para promover o escoamento superficial gerando dados possíveis de serem analisados. Isto mostra que o simulador de chuvas proposto foi adequado ao estudo do regime de infiltração deste solo para a umidade correspondente a 100% de água disponível.

Com os valores de f_1 e n obtidos nos ensaios, fez-se uma análise de variância (Tabela 3A dos anexos), e verificou-se que os comprimentos de parcela estudados não influenciaram significativamente estes parâmetros.

4.3.2 O uso dos anéis infiltrômetros na obtenção da capacidade de infiltração

Com os dados obtidos dos testes com os anéis infiltrômetros, fez-se uma média dos valores obtidos nas repetições e, estimou-se os parâmetros necessários para equação de Kostiakov, os quais estão apresentados na Tabela 8.

TABELA 8. Parâmetros médios encontrados no teste com anéis infiltrômetros.

Tratam.	f_1	n	R^2	f_{∞} mm/min	$t_{f_{\infty}}$ min
1	10,44	-0,474	0,98	0,893	320,94
2	7,01	-0,193	0,99	2,524	421,41
3	5,30	-0,185	0,98	2,100	334,52
4	2,31	-0,294	0,99	0,786	154,36

Os valores de f_{∞} foram determinados pela equação (22) e, de acordo com os valores apresentados por Bernardo (1986), mostram que o solo estudado tem uma capacidade de infiltração final muito alta, que é característica do LRd.

Avaliando-se o efeito do conteúdo inicial de água no solo, sobre os parâmetros da equação de infiltração de Kostiakov, verifica-se que o valor de f_1 (capacidade de infiltração para $t = 1$), tende a diminuir quando o teor de água no solo aumenta concordando com Bertoni e Lombardi Neto (1985). Isto vem confirmar que f_1 é função não somente do tipo de solo mas também do teor inicial de água no solo (Figura 13).

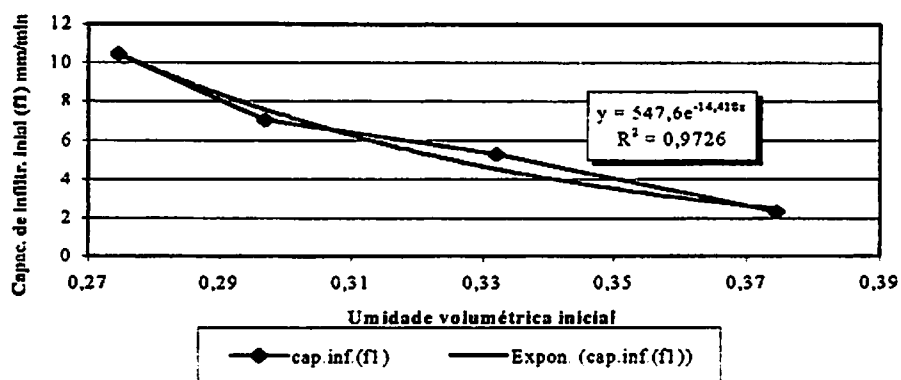


FIGURA 13 . Representação gráfica da diminuição da infiltração inicial com o aumento da umidade inicial do solo.

Para se identificar a relação existente entre os parâmetros das equações com os valores das umidades iniciais, fez-se análise de regressão, onde pode-se observar, pelos coeficientes de determinação, que f_1 varia exponencialmente com a umidade inicial do solo ($R^2 = 0,97$), o que não ocorreu para n (Figura 14), indicando que a umidade não influenciou, de forma significativa, os valores de n ($R^2 = 0,19$), que é um parâmetro típico para cada solo.

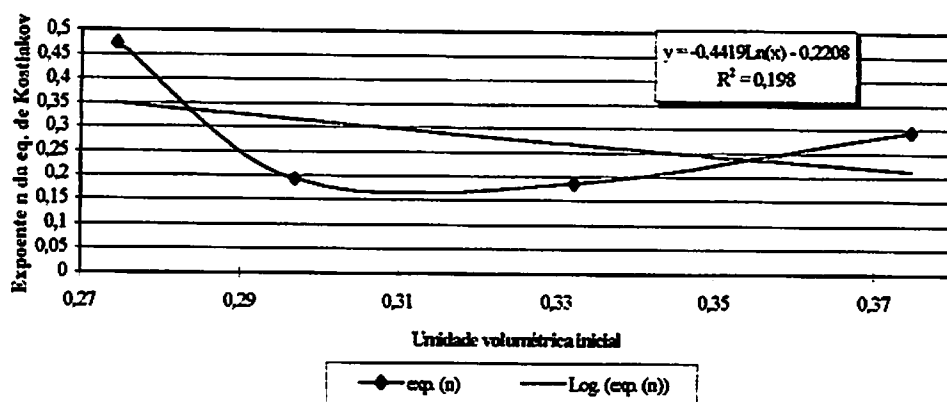


FIGURA 14 . Representação gráfica da relação entre o expoente n da equação de Kostiakov com a umidade inicial do solo.

A relação existente entre a capacidade de infiltração inicial e a umidade inicial do solo, pode ser expressa como:

$$f_i = 547,6 e^{-14,418.6i} \quad (25)$$

Substituindo a equação (25) na equação (14), e tomando-se um valor médio de n para cada solo, pode-se representar a capacidade de infiltração do solo, pela seguinte expressão proposta:

$$f = 547,6 e^{-14,418.6i} \cdot t^n \quad ; \text{ para } n = -0,286 \quad (26)$$

Esta equação em muito simplifica a determinação de f_i , pois a dependência está na quantificação do teor de água no solo, que é simples de ser obtido. No entanto sua validade se restringe às características deste solo.

4.3.3 Comparação entre os métodos de determinação da capacidade de infiltração

A comparação entre os dois métodos de determinação da capacidade de infiltração, se deu apenas para o tratamento 4, por ter sido o que apresentou resultados possíveis de serem comparados.

Pelo fato do método do simulador de chuvas apresentar resultados para diferentes comprimentos das parcelas e o dos anéis concêntricos não permitir o mesmo, os dados foram reunidos e deles extraiu-se a média. Os resultados estão mostrados na Tabela 9.

TABELA 9. Valores dos parâmetros da equação de Kostiakov para o simulador de chuvas e os anéis concêntricos.

Repet.	Simulador de chuvas				Anéis concêntricos			
	f_1	n	f_{∞} mm/min	R^2	f_1	n	f_{∞} mm/min	R^2
R1	1,037	-0,29	0,355	0,95	1,288	-0,48	0,187	0,98
R2	1,123	-0,26	0,276	0,99	2,335	-0,19	0,958	0,99
R3	1,672	-0,20	0,464	0,99	3,323	-0,20	1,215	0,99
Média	1,277	-0,25	0,365	—	2,315	-0,29	0,787	—
$T_{f_{\infty}}$ (min)	97,59			155,39				

Comparando os parâmetros das equações geradas pelo teste com simulador e as geradas pelos anéis concêntricos, é interessante notar que o expoente n das equações apresentadas tanto para o simulador quanto para os anéis concêntricos, são muito próximos, indicando uma mesma tendência das curvas. No entanto, quando compara-se o coeficiente f_1 , verifica-se um contraste entre os valores. Com os anéis concêntricos, os valores dos coeficientes encontram-se na faixa de 1,28 a 3,32, e para o simulador, a faixa varia de 1,04 a 1,67.

A mesma observação pode ser feita quanto aos valores de capacidade mínima de infiltração apresentados pelos anéis infiltrômetros. Os dados de capacidade mínima de infiltração encontrados, apresentaram uma relação entre o simulador e os anéis concêntricos na proporção de 1:2,15 vezes. Esta relação é semelhante às encontradas por Neal, citado por Baver (1972), que foi de duas a três vezes maior, concordando também com os trabalhos de Horton (1940), Arruda (1984) e Pruski et al (1994). A capacidade de infiltração mínima não se manteve constante em todos os ensaios, tanto para o simulador quanto para os cilindros, certamente devido à variabilidade espacial existente entre as áreas amostradas.

As diferenças encontradas nos resultados, mostram que os valores de infiltração encontrados para os anéis infiltrômetros, não devem ser empregados para projetos de irrigação por aspersão. As curvas de capacidade de infiltração determinadas pelos dois métodos estão representadas na Figura 15.

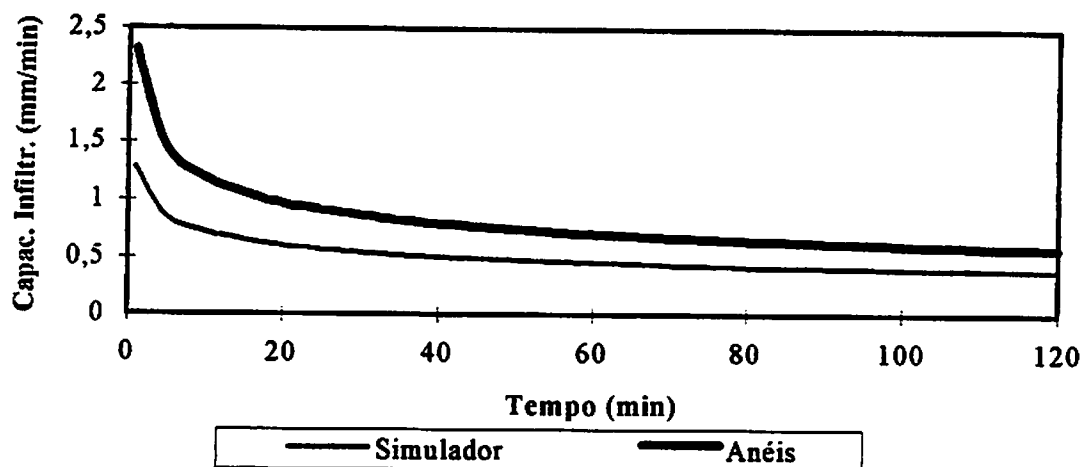


FIGURA 15. Comparação entre as curvas de capacidade de infiltração determinadas pelo simulador e pelos anéis concêntricos.

Verifica-se que, para os mesmos valores de tempo, a capacidade de infiltração determinada pelos anéis concêntricos se sobressai em relação à determinada pelo simulador. A explicação deve-se à forma de aplicação da água sobre a superfície. Nos anéis concêntricos, por manter uma carga hidráulica sobre a superfície, a infiltração ocorre na taxa máxima que o solo permite, sendo restringida apenas pelas características do próprio solo, que não sofre nenhuma modificação em sua superfície, favorecendo a altas infiltrações. Já no simulador de chuvas, ao contrário do que ocorre com o infiltrômetro circular, não há o fenômeno de inundação, ou seja, não existe uma lâmina de água sobre a superfície do solo, ficando o solo sempre exposto diretamente à ação do impacto das gotas da chuva. Um outro fator é que, no simulador, há o efeito do escoamento superficial. Estes fatores levam à desagregação de partículas sólidas do solo, que são carregadas pela enxurrada, arremessadas pelo salpico ou ainda deslocadas para o interior do solo, provocando um tamponamento.

Na Tabela 9, estão mostrados os tempos necessários para que a capacidade mínima de infiltração seja alcançada. Nota-se que, para atingir a capacidade de infiltração final (f_{∞}), usando-se anéis concêntricos, é necessário um tempo muito longo, em média 155,39 minutos, devido ao método utilizado e à alta capacidade de infiltração dos Latossolos Roxos e, em particular, do LRD estudado. Quando analisa-se os tempos encontrados para atingir f_{∞} pelo método do simulador de chuvas, verifica-se que são bem menores que os encontrados pelos anéis concêntricos, em média 97,59 minutos. A diferença é também explicada pelos mesmos motivos já apresentados.

Pode-se explicar também porque nos demais tratamentos (1, 2 e 3) não ocorreu escoamento superficial. Observa-se que, mesmo o solo estando com a umidade inicial na capacidade de campo, a infiltração continuou alta, sendo necessário um tempo de teste longo para obter o regime de infiltração final do solo. Para as condições de umidade mais baixas, o tempo certamente é bem mais longo que os 97,59 minutos encontrados no tratamento 4, o que, juntamente com os demais fatores já mencionados, fez com que o escoamento superficial fosse tão pouco a ponto de ser desprezível.

4.3.4 Ajuste das equações para estimativa da capacidade de infiltração

Dos resultados obtidos para o tratamento 4 e suas combinações, obteve-se os parâmetros para o ajuste dos valores observados ao longo do tempo para capacidade de infiltração às equações de Kostiakov, Horton e Green-Ampt, os quais estão apresentados na Tabela 10.

TABELA 10. Parâmetros estimados para as equações estudadas e seus respectivos coeficientes de determinação, para o tratamento 4.

Tratamento	Kostiakov	R ²	Horton	R ²	Green-Ampt	R ²	
	$f_i \cdot t^n$		$f_{\infty} + (f_0 - f_{\infty})e^{-K_f T}$		$f = K_z + (K_z \cdot h_t)/F$		
4-A	R1	1,121.T ^{-0,13}	0,99	0,712+(1,580-0,712)e ^{-0,0459.T}	0,60	0,5383+(0,5383*12,35)/F	0,95
	R2	1,247.T ^{-0,21}	0,99	0,709+(0,81-0,709)e ^{-0,0317.T}	0,22	0,4283+(0,4283*9,83)/F	0,93
	R3	1,945.T ^{-0,20}	0,99	0,447+(1,525-0,447)e ^{-0,0196.T}	0,92	0,5683+(0,5683*16,13)/F	0,98
4-B	R1	1,026.T ^{-0,46}	0,88	0,712+(1,640-0,712)e ^{-0,001.T}	0,12	0,5383+(0,5383*12,35)/F	0,95
	R2	1,03.T ^{-0,19}	0,99	0,406+(0,81-0,406)e ^{-0,0317.T}	0,92	0,4283+(0,4283*9,83)/F	0,93
	R3	1,585.T ^{-0,19}	0,99	0,54+(1,632-0,54)e ^{-0,0292.T}	0,88	0,5683+(0,5683*16,13)/F	0,97
4-C	R1	0,965.T ^{-0,28}	0,98	0,148+(0,905-0,148)e ^{-0,0447.T}	0,76	0,5383+(0,5383*12,35)/F	0,99
	R2	1,091.T ^{-0,37}	0,99	0,285+(0,766-0,285)e ^{-0,0232.T}	0,34	0,4283+(0,4283*9,83)/F	0,90
	R3	1,485.T ^{-0,22}	0,99	0,241+(1,125-0,241)e ^{-0,0175.T}	0,93	0,5683+(0,5683*16,13)/F	0,92

A equação de Horton apresentou os menores coeficientes de determinação em todas as combinações estudadas para o tratamento 4, quando comparada com as demais.

A equação de Kostiakov, de acordo com o exposto na revisão bibliográfica, é de determinação simples, e para tempos não muito longos, ela representa bem o regime de infiltração. Tal afirmação se caracterizou no presente estudo, onde pode-se observar que para o tempo usado nos testes, os coeficientes de determinação foram altos, apresentando-se como a equação que melhor estima os dados de capacidade de infiltração dentre as estudadas.

A equação de Green e Ampt, apresentou os coeficientes de determinação da ordem de 0,96, sendo superada apenas pela equação de Kostiakov, mostrando ser uma equação adequada para estimar os dados de capacidade de infiltração. Os dados usados para obtenção desta equação estão mostrados na Tabela 2A dos Anexos.

Os valores encontrados pelo aparelho idealizado por Bouwer, de tensão de entrada de ar no solo e condutividade hidráulica saturada para a equação de Green e Ampt, simplificam muito a determinação dos parâmetros do solo e produzem resultados satisfatórios para a capacidade de infiltração.

A condutividade hidráulica saturada K_s e a tensão de entrada de ar no solo, determinados com o aparelho de Bouwer, variaram de local para local. Estes parâmetros, por serem dependentes do tipo de solo, estão sujeitos à variabilidade espacial e às condições de uso em que se encontram a superfície e o perfil do mesmo.

A Tabela 11 mostra os valores de condutividade hidráulica saturada determinada pelos métodos do permeâmetro de carga constante (K_s) e de Bouwer (K_r), além dos valores encontrados para capacidade de infiltração final determinada com o simulador e com os anéis concêntricos.

Verificou-se que os valores das condutividades hidráulicas determinadas pelo permeâmetro e pelo aparelho de Bouwer, foram próximos, mostrando que o aparelho funcionou adequadamente na determinação da condutividade hidráulica. No entanto, observou-se não haver uma mesma tendência entre os valores, necessitando-se de mais estudos com uma criteriosa amostragem, de forma a amenizar o efeito da variabilidade espacial que certamente ocorreu.

TABELA 11. Condutividade hidráulica determinada pelo método do permeâmetro e de Bouwer.

Repetições	K_s (mm/min)	K_r (mm/min)	f_{∞} (mm/min)	f_{∞} (mm/min)
		Tratam. 4	simulador	anéis
R1	0,2561	0,5383	0,355	0,187
R2	0,563	0,4283	0,276	0,958
R3	0,5833	0,5683	0,464	1,215

Nota-se que os valores encontrados para K_z , estão mais próximos dos valores de capacidade de infiltração final determinados a partir dos dados do simulador, do que pelos anéis concêntricos, que foram sempre maiores. O fato dos anéis concêntricos apresentarem a capacidade de infiltração maior já foi discutido anteriormente, e, neste caso, vieram a se repetir quando comparados com K_z , concordando com os trabalhos citados na revisão, e com os dados obtidos em campo, indicando que os anéis concêntricos apresentam valores maiores para a capacidade de infiltração.

Pelos valores encontrados de K_z e f_{∞} , determinados pelo simulador, observa-se uma tendência entre os valores, onde um aumento de K_z corresponde a um aumento em f_{∞} . Fez-se uma análise de regressão onde encontrou-se uma relação linear entre as duas propriedades, e obteve-se um alto valor do coeficiente de correlação (Figura 16), concordando com os trabalhos de Sales (1992), que obteve altas correlações entre a condutividade hidráulica saturada e a velocidade de infiltração final.

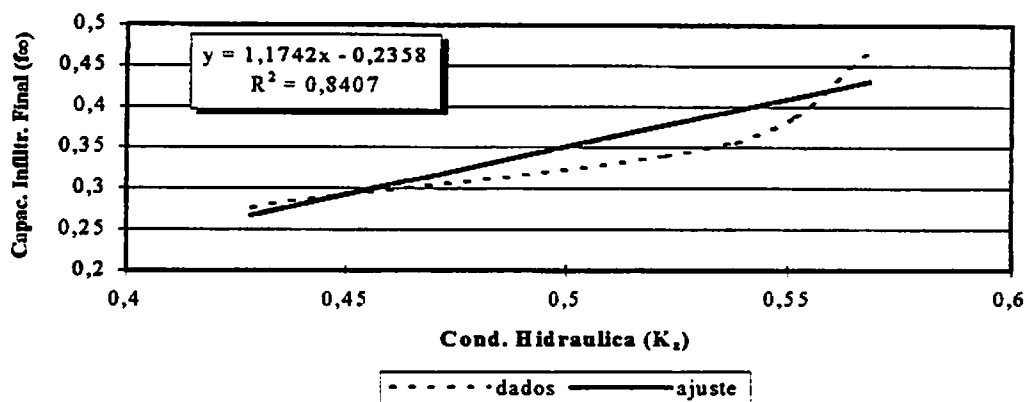


FIGURA 16. Representação gráfica da relação entre a capacidade de infiltração final (f_{∞}) e a condutividade hidráulica (K_z) e o ajuste entre elas.

Os valores encontrados para a condutividade hidráulica ($> 0,25$ mm/min), confirmam as altas taxas de infiltração obtidas anteriormente, mostrando que este solo possui uma alta capacidade de infiltração final.

4.3.5 Estudo das perdas de solo e água

Do volume escoado, foram quantificadas as perdas de solo e as perdas de água em intervalos regulares de tempo, ao longo do ensaio.

Dos resultados obtidos, observou-se não haver uma tendência explícita das perdas de solo em todos os tratamentos. Uma possível explicação para as perdas de solo não terem sido de maior magnitude ou de não terem seguido uma tendência expressiva, pode residir no fato de que, no estágio de formação de lama em diante, cria-se um filme de água sobre toda a superfície do solo, e o aparelho, por promover chuva com gotas de pequeno diâmetro, conseqüentemente baixa energia cinética comparada com a da chuva natural, não foi suficiente para romper este filme d'água, que de certa forma cria uma camada protetora da superfície oferecendo resistência à passagem da gota por ele. Não havendo energia suficiente para romper este filme d'água e haver o choque das gotas com as partículas do solo, não há desestruturação das mesmas, acarretando num transporte mínimo de solo. Estes resultados concordam com Ellison (1947), que diz que o impacto da gota é o maior produtor de sedimentos, e pode facilmente desagregar mais partículas do que o fluxo da enxurrada sobre curtos declives, que foi o caso ocorrido, mostrando que a energia cinética foi o fator limitante das perdas de solo.

Quando analisa-se o tratamento 4 (Figura 17), o efeito do comprimento das parcelas foi significativo, onde as maiores perdas de solo ocorreram no maior comprimento (C), cerca de 8,7 ton/ha, valor próximo ao encontrado por Lima (1987) e próximo ao valor tolerável para o LRd segundo Lombardi Neto e Bertoni (1975), e, os demais resultados para comprimentos, se mantiveram bem próximos, 3,5 ton/ha. Nos comprimentos menores A e B, a ação da enxurrada não teve ação significativa, e sim, a ação das gotas sobre as partículas do solo, que, por serem reduzidas, as perdas de solo se mantiveram próximas, e, na parcela C, além do mesmo efeito das gotas sobre as partículas do solo, houve um efeito do fluxo da enxurrada dado pelo comprimento da parcela, novamente concordando com Ellison (1947). O pequeno efeito da energia das gotas combinado com o maior comprimento, resultou nas maiores perdas de solo.

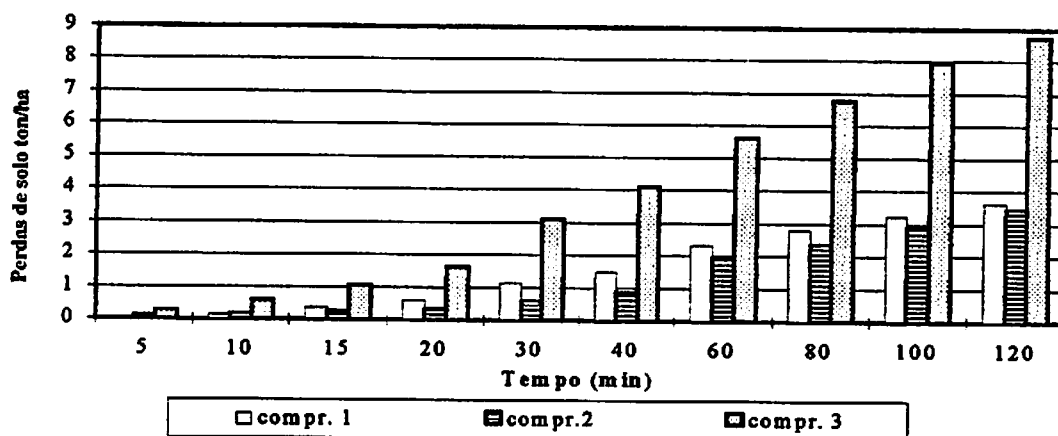


FIGURA 17. Perdas totais de solo em função dos diferentes comprimentos de parcela para o tratamento 4.

Verificou-se também que as perdas acumuladas de solo, quando analisadas em função da umidade, são de maior significância nos tratamentos onde a umidade é maior, decrescendo no sentido dos tratamentos de menor umidade, numa proporção de 1:390 entre os tratamentos 4 e 1, 1:29 para os tratamentos 4 e 2 e de 1:11 entre os tratamentos 4 e 3. Isto indica que as partículas de solo, quanto mais úmidas estiverem, menor é a sua resistência ao cisalhamento, provocado pelas gotas e pela enxurrada, e assim, mais susceptíveis à erosão elas se tornam.

Quando analisou-se as perdas ocorridas nos intervalos de tempo (Figura 18), notou-se que ocorreram perdas mais acentuadas e crescentes nos primeiros 30 minutos, decrescendo após este tempo. Pressupõe-se que até os 30 minutos, o deflúvio tenha retirado as partículas mais finas que vão se desprendendo com o aumento da umidade conseguida no decorrer do teste, até que começam a surgir as partículas maiores, dificultando o transporte pela enxurrada e a desagregação, devido a resistência oferecida por elas aos baixos valores de energia incidente. Observou-se que os agregados arrastados foram menores que os agregados da massa original do solo, mostrando que houve um arrastamento de partículas da camada superficial, provavelmente devido à seletividade e maior fracionamento pelo repetido impacto da gota de chuva, após a desagregação, sendo também encontrado por Meyer, Foster e Nicolov (1975).

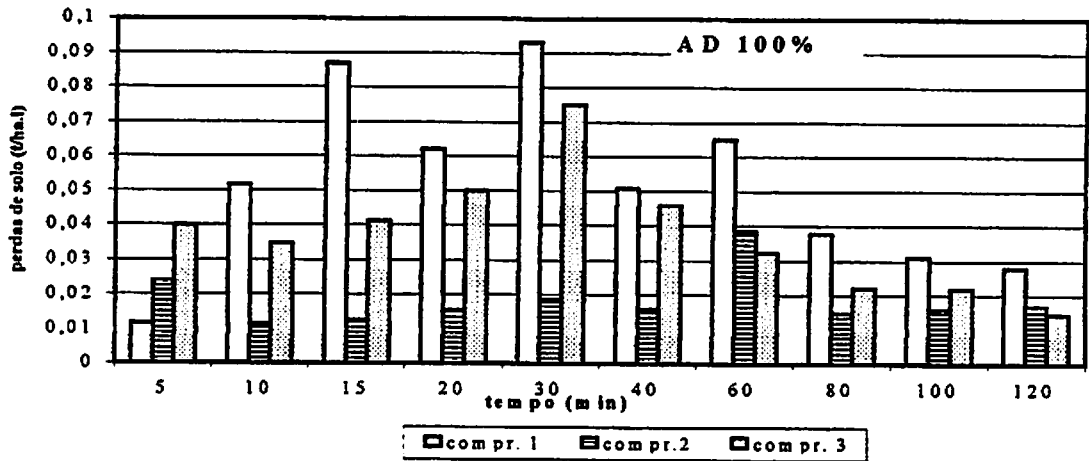


FIGURA 18. Perdas efetivas de solo em função dos diferentes comprimentos de parcela para o tratamento 4.

Quanto às perdas de água, pode-se verificar pelas Figuras 19, 20 e 21, que as umidades mais altas favorecem a maiores perdas de água destacando-se sempre o tratamento com umidade correspondente à 100% da água disponível no solo. Isto deve-se à velocidade de infiltração do solo, que diminui com o tempo, conseqüentemente com o aumento da umidade, fazendo com que o deflúvio superficial seja cada vez maior. Segundo Lombardi Neto e Bertoni (1975), a tolerância de perdas de água é de 9,6 % do total precipitado, que no caso deste trabalho, corresponderia a 14,6 mm. Isto ocorreu apenas para as umidades de 0%, 33% e, em alguns casos a de 67% de água disponível. O tratamento correspondente à umidade de 100% de água disponível teve perdas de água sempre acima do tolerável, mostrando que a umidade inicial do solo influenciou para que as perdas fossem mais acentuadas.

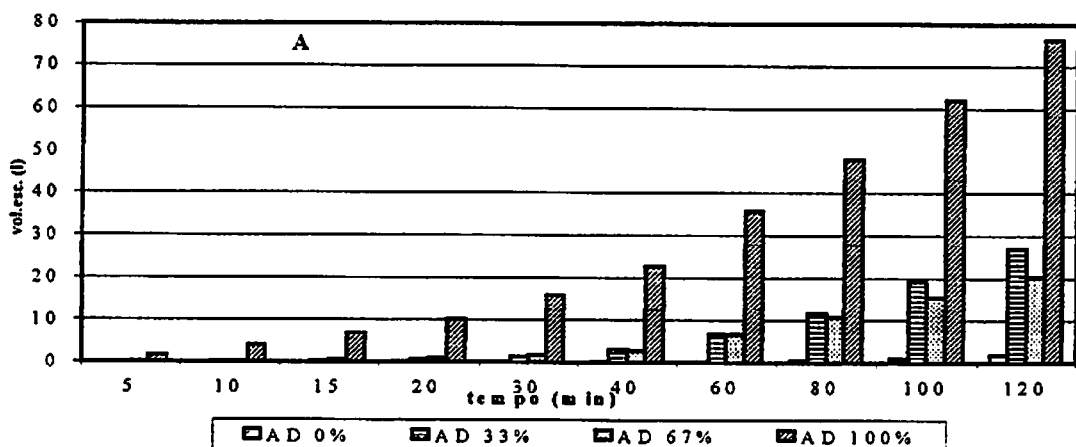


FIGURA 19. Perdas de água em função das diferentes umidades na parcela de comprimento de 1 metro.

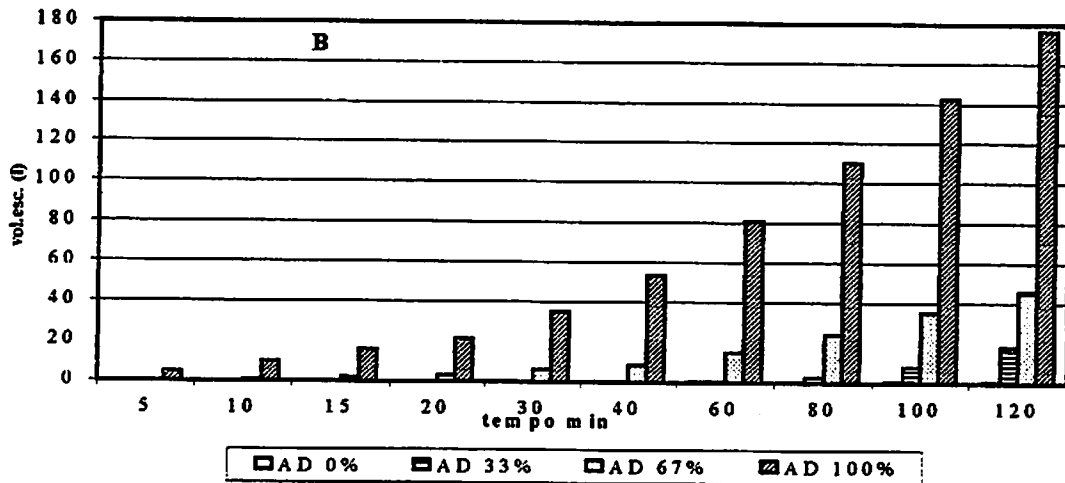


FIGURA 20. Perdas de água em função das diferentes umidades na parcela de comprimento de 2 metros.

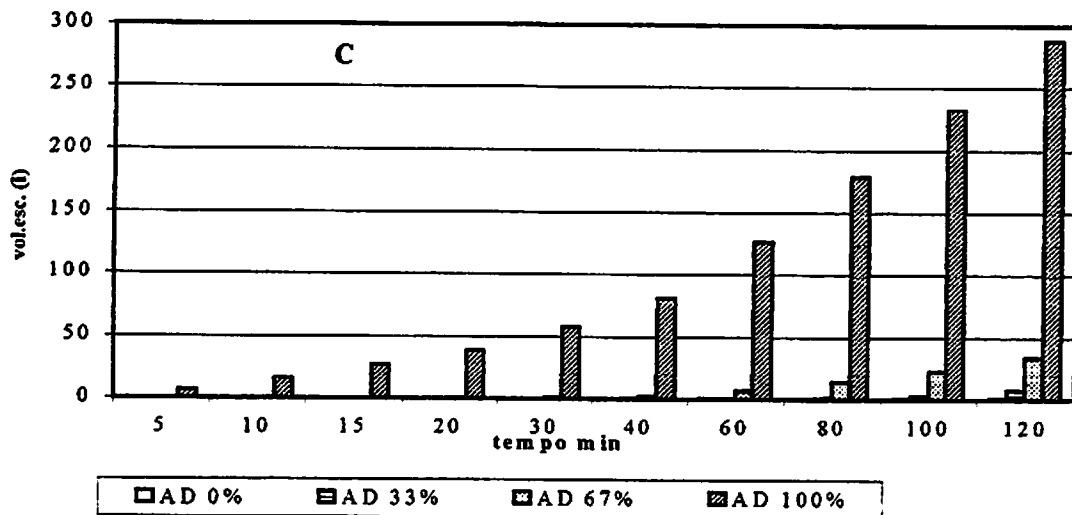


FIGURA 21. Perdas de água em função das diferentes umidades na parcela de comprimento de 3 metros.

5 CONCLUSÕES

A partir dos dados encontrados e das análises realizadas, chegou-se às seguintes conclusões:

- As características do Latossolo Roxo distrófico (LRd) estudado, foram significativas no estudo da infiltração

- O equipamento proposto, atendeu a várias características desejáveis de um simulador de chuvas, deixando a desejar, entretanto, com relação às características de diâmetro de gota e energia cinética.

- A capacidade de infiltração determinada pelo método dos anéis concêntricos foi sempre maior que a encontrada pelo simulador de chuvas.

- A capacidade de infiltração f_1 , da equação de Kostiakov, tem uma alta correlação com o teor inicial de água no solo, e que o expoente da equação (n) não apresenta.

- A parcela de maior comprimento, no tratamento analisado, foi a que propiciou maiores perdas de solo.

- Houve uma tendência dos tratamentos da maior umidade, propiciar maiores perdas de solo e de água.

- As equações estudadas apresentaram um bom ajuste, sendo a equação que melhor se ajustou aos dados, a de Kostiakov, seguida de Green-Ampt e de Horton.

6 SUGESTÕES

•As características de chuva apresentadas por este equipamento, possivelmente podem ser modificadas pela simples troca de bocais, pela troca das válvulas reguladoras de pressão, pela variação da velocidade de deslocamento, dada a possibilidade de ser movido, ou pela variação da altura do braço basculante.

•Dar continuidade nestes estudos, promovendo-se alterações nas características das chuvas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMIM, L. A. **Análise comparativa das técnicas de determinação das características de infiltração na irrigação por sulcos.** Fortaleza: UFC, 1985. 136p. (Tese- Mestrado em solos)
- ARRUDA, L. B. **Estudo experimental da infiltração através do balanço hídrico em um infiltrômetro com aspersores.** São Carlos: USP, 1984. 155p. (Tese - Mestrado em Hidráulica e Saneamento).
- BAVER, L. B. **Soil physics.** 4 ed. New York: J. Willey, 1972. 498p.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação.** Viçosa: UFV, 1986. 596p.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo.** Piracicaba:Livro-ceres, 1985. 392p.
- BERTONI, J. LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo.** São Paulo:Ícone, 1990. 355p.
- BOUWER, H. Rapid field measurement of air entry value and hydraulic conductivity of soil as significant parameters in flow system analysis. **Water Resources Research**, Washington, v.2, n.4, p.729-738, 1966.
- BRITO, L. T. L. **Velocidade de infiltração determinadas por simulador de chuvas por infiltrômetro de anel.** Viçosa: UFV, 1994. 43p. (Tese - Mestrado em Engenharia Agrícola).

- BUBENZER, G.D.; MOLNAU, M.; McCOOL, D.K. Low intensity rainfall with a rotating disk simulator. *American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, v.28, n.4, p.1230-1232, July/Aug.1985.
- CARTER, C.E.; GREER, J.D.; BRAND, H.J.; FLOYD, J.M. Raindrop characteristics in south central United States. *Transactions of ASAE*, St. Joseph, v.17, n.6, p.1033-1037, Nov/Dec.1974.
- CASTRO NETO, P; SILVEIRA, S.V. Precipitação provável para Lavras, Região Sul de Minas Gerais, baseada na função de distribuição de probabilidade gama. I períodos mensais. *Ciência e Prática*, Lavras, v.5, n.2, p.144-51, jul/dez. 1981
- CHINA, S.S.; JARRETT, A.R.; HOOVER, J.R. The effect of soil air entrapment on soil erosion during simulated rainfall. *American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, v.28, n.5, p.1598-1601, 1985.
- DAKER, A. *Irrigação e Drenagem; a água na agricultura*. 7 ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1988. v.3. 543p.
- DANIELSON, R. E.; SUTHERLAND, P. L. Porosity. In: KLUTE, A. *Methods of soil analysis*. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. v.1, p. 443-461.
- DAY, P. R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C. A. *Methods of soil analysis*. Madison, American Society of Agronomy, 1965. v.1, p.545-566.
- ELLISON, W.D. Soil erosion studies. *Agriculture Engineering*, St. Joseph, v.28, n.4, p. 145-351, 1947.
- ELLISON, W.D. POMERENE, W. A Rainfall applicator. *Agriculture Engineering*, St. Joseph, v.25, n.6, p. 220, June 1944.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - SNLCS. *Manual de métodos de solo*. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1979. s.p.
- FOSTER, G. R. Modeling the erosion process. In: Hann, C. T.; JOHNSON, H. P.; BRAKENSIEK, O. L. *Hidrologic, modeling of small watersheds*. St. Joseph: American society of Agriculture Engineers, 1982. p.297-380

- GREEN, W.H.; AMPT, G.A. Studies on soil physics. **Journal of Agricultural Science**, London, v.4, p.1-24, May 1911.
- GROHMANN, F. Distribuição do tamanho de poros em três tipos de solos do Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v.21, n.19, p.319-328, abr. 1960.
- HILLEL, D. **Solo e Água; fenômeno e princípios físicos**. Porto Alegre: UFRGS, 1970. 231p.
- HORTON, R.E. The role of infiltration in the hidrologic cycle. **Transactions American Geophysical Union**, New York, p. 446-460, June 1933.
- HORTON, R.E. An approach toward a physical interpretation - capacity. **Soil Science Society of Américam Proceeding**, Madison, v.5, p.399-417, 1940.
- HUDSON, N. W. **Soil conservation**. 2. ed. Ithaca: Cornell University, 1971. 320p.
- JEPPSON, R. W. Use of assimetric infiltration model and field data to determine hydraulic properties of soils. **Water Resources Research**, Washington, v.11, n.1, p. 127-138, Feb. 1975.
- KOHL, R. A.; DEBOER, D. W. Drop size distributions for a low pressure spray type agricultural sprinkler. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.6, n.27, p. 1836-1840 July. 1984.
- KOSTIAKOV, A.N. On the dynamics of the coeficient of water percolation soils and on the necessity of studying it from a dinamic point of view for purposes of amelioration. **Transactions of the Sixth Comission of the International Society of Soil Science**, Moscou. Russia, 1932. part A, p.17-21.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera**. Piracicaba: CENA/USP, 1984. 232p.
- LIMA, P.M.P. **Perdas de solo e água em dois Latossolos sob cerrado, com diferentes preparos e chuva simulada**. Lavras: ESAL, 1987. 87p. (Tese - Mestrado em solos e nutrição de plantas).

- LOMBARDI NETO, F.; BERTONI, J. **Tolerância de perdas de terra para solos do Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1975. 12p. (Boletim Técnico, 28).
- LOPES, D. P.; PINTO, J. A. C. **Influência das condições de superfície e do teor inicial de água na capacidade de infiltração do solo**. LAVRAS: ESAL, 1986. 27p. (Monografia).
- McINTYRE, D.S. Permeability measurements of soil crusts formed by raindrop impact. *Soil science*, Baltimore, v.4, n.85, p. 185-89, Apr. 1958.
- MEIN, R. G.; LARSON, C. L. Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resources Research*, Washington, v.9, n.2, p. 384-394, April. 1973.
- MEYER, L. D. Simulation of rainfall for soil erosion research. *Transaction of the ASAE*, St. Joseph, v.8, n.1, p. 63-65, Jan/Fev. 1965.
- MEYER, L. D.; FOSTER, G.R.; NIKOLOV, S. Effect of flow rate and canopy on rill erosion. *Transaction of ASAE*, St. Joseph, v.18, n.5, p.905-911, Sept./Oct. 1975.
- MEYER, L.D.; HARMON, W.C. Multiple intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes. *American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, v.22, n.1, p.100-103, Apr. 1979.
- MEYER, L.D. ; McCUNE, D.L. Rainfall simulator for runoff plots. *Agricultural Engineering*, St. Joseph, v.10, n.39, p.644-48, Oct. 1958.
- MOORE, I.D.; HIRSCHI, M.C.; BARFIELD, B.J. Kentuck rainfall simulator. *American Society of Agricultural Engineers*, Lexington, v.26, n.4, p.1085-1089, July/Aug.1983.
- MOORE, I.D.; LARSON, C. L. An infiltration - runoff model for cultivate soils. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.23, n.6, p. 1460-1467, 1980.
- MOREIRA, E.F.; VIZEU, L.A.S.; REZENDE, F.C.; FREIRE, O. Análise da distribuição da chuva de um simulador do tipo rotativo. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**, 13, Rio de Janeiro, 1983. **Resumos...** Rio de Janeiro: UFRRJ, 1983. p.80.

- MORRISON, M. W; PRUNTY, L; GILLES, J. F. Characterizing strength of soil crusts formed by simulated rainfall. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v.49, n.2, p. 427-431, Mar./Apr. 1985.
- PEREIRA, B.L.S; GILLEY, J.R.; JENSEN, M.E. Research agenda on sustainability of irrigated agriculture, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.3, n.3, p.172 - 177, May/June. 1996.
- PEREIRA, G. M. **Simulação das perdas de água por evaporação e da uniformidade de distribuição na irrigação por aspersão.** Viçosa: UFV, 1985. 109p. (Tese - Doutorado em Engenharia Agrícola).
- PIZZARRO, F.; **Drenage Agrícola y Recuperacion de Suelos Salinos.** Madrid: Editorial Agrícola Espanõl, 1985. 542 p.
- PRUSKI, F. F. **Análises de precipitações extremas e de escoamento superficial, para áreas agrícolas, da região Oeste do Paraná.** Viçosa: UFV, 1990. 109p. (Tese - Mestrado em Engenharia Agrícola).
- PRUSKI, F.F.; FERREIRA, P.A. Dimensionamento de sistemas de terraceamento em nível. In: *Tecnologia Para Elaboração De Projetos Hidroagrícolas Em Bacias Hidrográficas Para O Estado De Minas Gerais: Bacia Do Rio Doce.* Viçosa: Convênio UFV/ RUALMINAS, 1996. p.173 - 213. (Boletim Técnico, 3).
- PRUSKI, F.F.; VENDRADE, V.; OLIVEIRA, E.F. de; BALBINO, L.C.; FERREIRA, P.A.; WERLANG, L.; CARVALHO, L.T. de. Velocidades de infiltração da água em um latossolo roxo determinadas com o simulador de chuvas e o infiltrômetro de anel, em ensaios sucessivos. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 23,* Campinas, 1994. *Resumos...* Campinas: Unicamp, 1994. p.189.
- REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera.** 4. ed. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 445p.
- RESCK, D. V. S. **Determinação da erodibilidade de um Podzólico Vermelho Amarelo câmbico distrófico fase terraço, localizado na Zona da Mata (MG), utilizando o simulador de chuva.** Viçosa: UFV, 1977. 88p. (Tese - Mestrado em Fitotecnia)

- REZENDE, F. C.; SCALLOPI, J. E. Avaliação de métodos para a determinação das características de infiltração por sulcos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.20, n.2, p.227-33, 1985.
- ROCHA, G.C. **Geologia, geomorfologia e pedologia de uma catena de solos situada no Campus da Escola Superior de Lavras, MG**. Lavras: ESAL, 1982. 109p. (Tese - Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).
- ROTH, C.H.; HENKLAIN, J.C.; FARIAS, G.S. Avaliação do tamanho de gotas de chuva natural e simulada para o norte do paraná. **Revista brasileira de ciência do solo**, Campinas, v.9, n.2, p.171-174, 1985.
- SALES, L. E. de O. **Variabilidade espacial da velocidade de infiltra o básica associada a propriedades físicas das camadas superficial e subsuperficial de dois solos da região de Lavras (MG)**. Lavras:ESAL, 1992. 104p. (Disserta o- Mestrado em Solos e Nutri o de Plantas)
- SHELTON, C.H.; BEERNUTH, R.D.; RAJBHANDARI, S.P. A continuous application rainfall simulator. **American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v.28, n.4, p.1115-1119, July/Aug.1985.
- SIDIRAS, N.; ROTH, C.H. Infiltration measurements with double-ring infiltrometers and a simulator under different surface conditions on an Oxisol. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.9, p.161-168, 1987.
- SILVA, C. L. Escolha da velocidade de deslocamento dos equipamentos de irriga o tipo "pivô-central". **Irriga o e Tecnologia Moderna**, Brasília, n.33, 1988.
- SKAGGS, R.W.; HUGGINS, L.E.; MONKE, E.J.; FOSTER, G.R. experimental evaluation of equations. **Transactions of the ASAE**. v.12, n.6, p. 822-828, nov./dez. 1969.
- SKOGERBOE, G. V.; WALKER, W. R. **Teoria y practica del riego por superficie**. Logan: International Irrigation Center, 1987. 459p.
- SMITH, R. E. The infiltration envelope: Results from a theoretical infiltrometer. **Journal of hidrology**, Amsterdam, n.17, pg. 1-21, 1972.

SWANSON, N. P. Rotating-boom rainfall simulator. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.1, n.8, 1965, p.71-72.

SWARTZENDRUBER, D. Revised attribution of the power form infiltration equation. **Water research**, Washington, v.29, n.7, p.2455-456, jul. 1993.

SWARTZENDRUBER, D.; HILLEL, D. Infiltration and runoff for small field plots under constant intensity rainfall. **Water Resources Research**, Washington, v.11, n.3, p. 445-451, june. 1975.

VIEIRA, H.A. **Comportamento de quatro infiltrômetros na determinação da velocidade de infiltração básica d'água no solo**. Viçosa:UFV, 1977. 52p. (Tese - Mestrado em Engenharia Agrícola).

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

ANEXOS

TABELA 1A. Valores das umidades e variação de armazenamento nos tratamentos para a profundidade de 0 a 40 cm.

Tratamento	θ_i (%)	θ_f (%)	$\Delta\theta$ (%)	Δ Armaz. (mm)	Precipitação (mm)
1	27,27	44,32	17,05	68,20	139,00
2	29,68	44,64	14,96	59,84	154,88
3	33,21	49,03	15,82	63,28	145,67
4	37,45	45,45	8,00	32,00	151,44

TABELA 2A. Valores dos parâmetros usados na equação de Green-Ampt determinados com o uso do aparelho de Bouwer.

AD	P_{\min}	G + L	h_{ac}	h_f	K_z mm/min
100%	mm/água	mm	mm	mm	
R1	-974,7	950	-24,70	-12,35	0,538
R2	-969,66	950	-19,66	-9,83	0,428
R3	-982,26	950	-32,26	-16,13	0,568

TABELA 3A. Análise de Variância dos parâmetros da equação de Kostiakov em função dos diferentes comprimentos das parcelas.

Fator de variação (F_1)	Graus de Liberdade	Quadrado Médio		
Comprimentos de parcelas	2	0,0585	-	NS
Erro	6	0,1248		
Média		1,277		
CV		9,772		

Fator de variação (n)	Graus de Liberdade	Quadrado Médio		
Comprimentos de parcelas	2	0,022	-	NS
Erro	6	0,0106		
Média		0,25		
CV		0,0424		

APÉNDICES

APÊNDICE A. Equações usadas no programa para cálculo da velocidade de impacto da gota

Com base no Princípio Fundamental da Dinâmica, e baseado na figura 1, é possível escrever as seguintes equações diferenciais, que caracterizam a trajetória de uma gota que deixa o bocal de um difusor (Pereira, 1995):

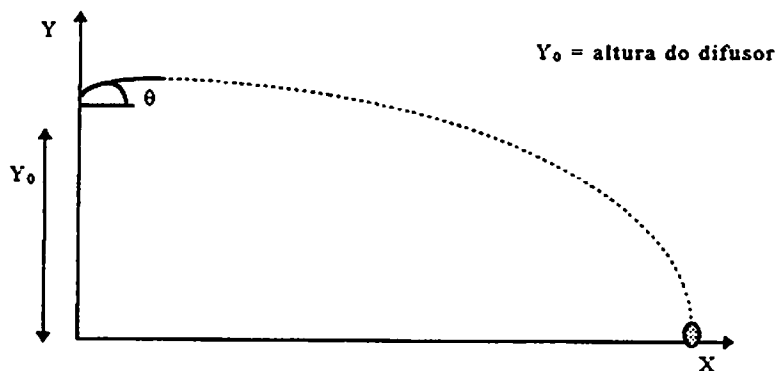


FIGURA 1. Trajetória de uma gota que deixa o bocal do difusor com um ângulo de trajetória θ .

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -R \cos \theta \quad (1)$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -mg - R \sin \theta \quad (2)$$

$$R = m \cdot f \quad (3)$$

onde:

x e y = coordenadas cartesianas de posição da gota, m;

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

f = aceleração de arrastamento, $m \cdot s^{-2}$,

m = massa da gota, kg,

R = força de arrastamento aerodinâmica, N,

θ = ângulo de trajetória da gota com a horizontal, radiano.

A relação entre a aceleração de arrastamento e a velocidade da gota pode ser aproximada por:

$$f = C_2 V^2 \quad (4)$$

onde:

V = Velocidade da gota, m/s,

C_2 = Coeficiente de Seginer ou de arrastamento, m^{-1} .

Substituindo as Equações 3 e 4 nas Equações 1 e 2 e resolvendo os senos e os cossenos em função dos componentes da velocidade, tem-se que:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -C_2 \cdot V_x (V_x^2 + V_y^2)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -C_2 \cdot V_y (V_x^2 + V_y^2)^{\frac{1}{2}} - g \quad (6)$$

onde:

V_x e V_y = componentes da velocidade da gota em relação ao solo, nas direções x e y, respectivamente, $m.s^{-1}$,

A velocidade da água ao sair do bocal do difusor é função da pressão de operação do difusor e pode ser descrita por:

$$V_i = C \cdot \left(2g \frac{P}{\gamma_w} \right)^{1/2} \quad (7)$$

onde:

V_i = velocidade inicial da gota, $m.s^{-1}$,

C = coeficiente de descarga, adimensional,

P = pressão de serviço do aspersor, Pa,

γ_w = peso específico da água, $N.m^{-3}$.

APÊNDICE B. Exemplo de cálculo para determinação do D_{50} para a distância de 1 m do braço do simulador.

# Peneira	N.Peletes	Peso (mg)	Peso Méd. (mg)	Diâmetro (mm)	Volume acum. (%)
0,425	1530	121	0,079	0,51	6,75
0,500	1414	191	0,135	0,62	17,75
0,600	2059	559	0,271	0,79	51,31
0,850	909	475	0,523	1,00	80,95
1,000	205	172	0,839	1,18	91,98
1,180	79	103	1,304	1,38	98,77
1,700	2	8	4,000	2,05	99,33
2,000	1	9	9,000	2,73	100

1. O número de peletes é obtido por contagem direta dos que ficam retidos na peneira.
2. O diâmetro de gotas foi obtido a partir da equação apresentada pelo fabricante: $1,257.P^{0,353}$, onde P = peso médio do pelete.
3. O volume foi calculado, acumulando-se o produto do volume da gota pelo número de gotas, e representando-o em relação ao total.
4. Determinou-se o D_{50} diâmetro em que se tem 50% do volume aplicado abaixo e acima, que é conseguido por interpolação.

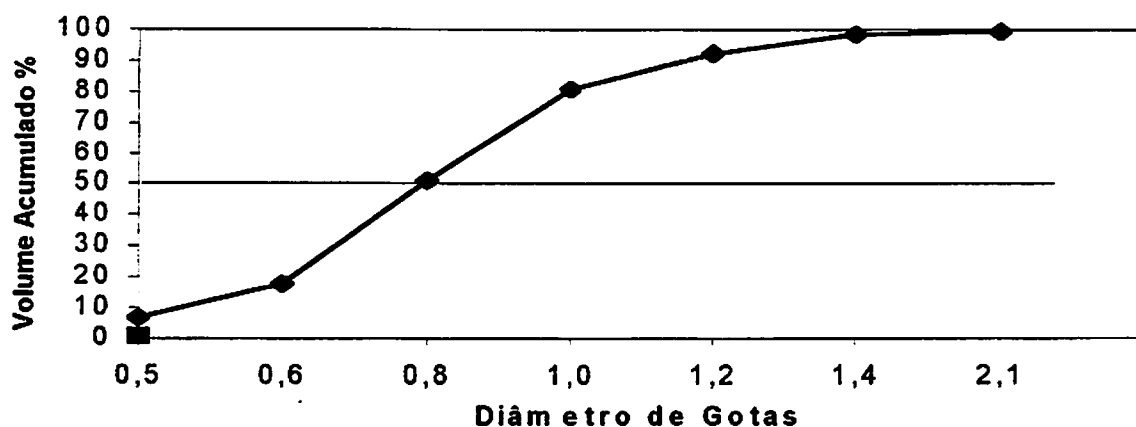


FIGURA 1A. Determinação gráfica do D_{50} para a distância de 1 m do braço do simulador.

APÊNDICE C. Exemplo de cálculo para determinação da energia cinética para a distância de 1 m do braço do simulador.

Distân. (m)	D ₅₀ (mm)	Massa Kg	Veloc. (m/s)	Ec (KJ/ha.mm)
0,5	0,726	2,00E-07	3,399	77,345
1	0,786	2,54E-07	3,533	62,291
2	0,897	3,78E-07	3,756	70,649
3	1,216	9,41E-07	4,252	93,511

A partir do D₅₀, fez-se os cálculos necessários para se obter a energia cinética, como segue:

1. A massa do pelete foi obtida pela equação: $vol = 4/3(\pi.r^3)$, onde r = raio da gota.
2. A velocidade de impacto (V) das gotas foi determinada através de um programa desenvolvido em Pascal, onde as variáveis usadas são diâmetro de gota, pressão de serviço, altura do bocal.
3. A energia cinética foi calculada pela seguinte equação: $Ec = 1/2(M.V^2)$