



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA – CAMPUS II

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CAMPO NO DESEMPENHO
DOS SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR SULCOS

JACQUELINE HENRIQUE

CAMPINA GRANDE

1996

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CAMPO NO DESEMPENHO DOS
SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR SULCOS**

**JACQUELINE HENRIQUE
ENGENHEIRA AGRÍCOLA**

**Campina Grande
1996**

JACQUELINE HENRIQUE

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CAMPO NO DESEMPENHO DOS
SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR SULCOS**

Dissertação apresentada ao curso de mestrado em Engenharia Agrícola da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de mestre em Irrigação e Drenagem.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Alberto
Vieira de Azevedo

CO-ORIENTADOR: Aurelir Nobre
Barreto

Campina Grande
1996



H519i Henrique, Jacqueline
Influencia dos parametros de campo no desempenho dos sistemas de irrigacao por sulcos / Jacqueline Henrique. - Campina Grande, 1996.
66 f.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Agricola) - Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e Tecnologia.

1. Metodos de Irrigacao 2. Irrigacao por Sulcos 3. Dissertacao I. Azevedo, Carlos Alberto Vieira de, Dr. II. Barreto, Aurelir Nobre, Prof. III. Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB) IV. Título

CDU 631.674(043)

PARECER DE JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DA MESTRANDA

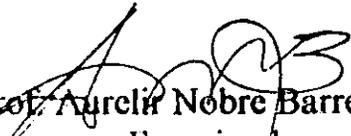
JACQUELINE HENRIQUE

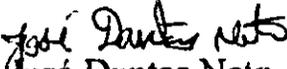
TÍTULO: "*Influência dos parâmetros de campo no desempenho dos sistemas de irrigação por sulcos*".

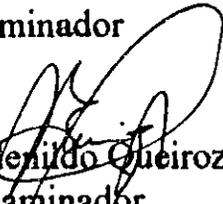
COMISSÃO EXAMINADORA

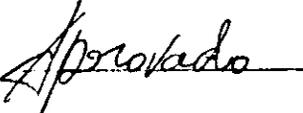
PARECER

Prof. Carlos Alberto Vieira de Azevedo *
Orientador


Prof. Aurelir Nobre Barreto
Examinador


Prof. José Dantas Neto
Examinador


Prof. José Etenildo Queiroz
Examinador

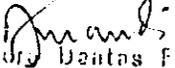


Aprovado

Aprovado

Campina Grande, 27 de Dezembro de 1996

* Obs.: Não compareceu por problemas de saúde em sua família. Foi substituído pelo Co-Orientador Dr. Aurelir NOBRE Barreto


Prof. Pedro Dantas Fernandes
COORDENADOR
WPEAG

AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte de luz em todos os momentos;

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA -CNPA;

A coordenação do curso de pós-graduação de Engenharia Agrícola da UFPB-CAMPUS II;

A Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), pela Bolsa de Estudos concedida;

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Vieira de Azevedo, pela orientação, sugestões e correção do trabalho;

Ao Pesquisador Aurelir Nobre Barreto pelas sugestões, incentivo e amizade;

Aos Professores do Departamento de Engenharia Agrícola, pelo apoio e amizade;

A todos os amigos de Engenharia Agrícola, especialmente, os que sempre estiveram presente;

E a todos que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização desse trabalho.

Aos meus queridos pais, João
Henrique Leal e Beatriz de
França Henrique (in memoriam),
DEDICO. A minha família,
especialmente minhas irmãs e
irmãos, OFEREÇO.

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CAMPO NO DESEMPENHO DOS
SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR SULCOS**

SUMÁRIO

	pag.
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Considerações Gerais	4
2.2 Irrigação por Sulco	6
2.3 Parâmetros de Campo e Operacionais	7
2.3.1 Declividade	7
2.3.2 Comprimento do Sulco	9
2.3.3 Infiltração	10
2.3.4 Seção Transversal	12
2.3.5 Rugosidade	14
2.3.6 Vazão	14
2.3.7 Tempo de Aplicação	16
2.4 Modelos Matemáticos	17

3 MATERIAL E MÉTODOS	19
3.1 Caracterização do Ambiente	19
3.2 Material Utilizado	19
3.3 Unidade Experimental	20
3.4 Caracterização Físico-Hídrica do Solo	21
3.5 Caracterização da Hidráulica do Sistema de Irrigação	21
3.6 Parâmetros de Infiltração	24
3.7 Análise de Sensibilidade	24
3.8 Parâmetros Avaliados	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
4.1 Hidrográfico de Fluxo	28
4.2 Perfilometria do Sulco	30
4.3 Efeito dos Parâmetros de Campo Sobre o Avanço e o Desempenho do Sistema	32
4.3.1 Análise para Diferentes Comprimentos de Sulcos	32
4.3.2 Análise para Diferentes Características de Infiltração	38
4.3.3 Análise para Diferentes Rugosidade	43
4.3.4 Análise para Diferentes Declividades	50
4.3.5 Análise para Diferentes Seções Transversais	58
5 CONCLUSÕES	61
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

LISTA DE FIGURAS

	pág.
FIGURA 1. Fases características da irrigação superficial	17
FIGURA 2. Ilustração da área experimental	20
FIGURA 3. Ilustração da calha Parshall utilizada na determinação da vazão	23
FIGURA 4. Determinação da fase de avanço	23
FIGURA 5. Ilustração do perfilômetro utilizado na determinação da seção de fluxo do sulco	24
FIGURA 6. Hidrográfico de fluxo para o primeiro evento de irrigação	29
FIGURA 7. Hidrográfico de fluxo para o segundo evento de irrigação	29
FIGURA 8. Variação espacial da seção transversal de fluxo para o primeiro evento de irrigação	30
FIGURA 9. Variação espacial da seção transversal de fluxo para o segundo evento de irrigação	30
FIGURA 10. Efeito do comprimento sobre tempo de avanço no final do sulco, para o conjunto de dados CNPA	33
FIGURA 11. Efeito do tempo de avanço no final do sulco sobre a taxa de percolação, para o conjunto de dados CNPA	34
FIGURA 12. Efeito do comprimento sobre tempo de avanço no final do sulco, para o conjunto de dados KNWF	35
FIGURA 13. Efeito do tempo de avanço no final do sulco sobre a taxa de percolação, para o conjunto de dados KNWF	35

FIGURA 14. Efeito do comprimento do sulco sobre o desempenho do sistema, para o conjunto de dados CNPA	36
FIGURA 15. Efeito do comprimento do sulco sobre o desempenho do sistema, para o conjunto de dados KNWF	37
FIGURA 16. Efeito das características de infiltração na fase de avanço, para o conjunto de dados CNPA	39
FIGURA 17. Efeito das características de infiltração no tempo de avanço, para o conjunto de dados CNPA	39
FIGURA 18. Efeito das características de infiltração na fase de avanço, para o conjunto de dados KNWF	40
FIGURA 19. Efeito das características de infiltração no tempo de avanço, para o conjunto de dados KNWF	41
FIGURA 20. Efeito das características de infiltração solo sobre o desempenho do sistema, para o conjunto de dados CNPA	42
FIGURA 21. Efeito das características de infiltração solo sobre o desempenho do sistema, para o conjunto de dados KNWF	42
FIGURA 22. Efeito da rugosidade na fase de avanço, para o conjunto de dados CNPA	44
FIGURA 23. Efeito da rugosidade na fase de avanço, para o conjunto de dados KNWF	44
FIGURA 24. Efeito da rugosidade sobre o desempenho do sistema, para o conjunto de dados CNPA	45
FIGURA 25. Efeito da rugosidade sobre o desempenho do sistema, para o conjunto de dados KNWF	46
FIGURA 26. Efeito da rugosidade sobre a eficiência de aplicação, para conjunto de dados CNPA	47
FIGURA 27. Efeito da rugosidade sobre a eficiência de aplicação, para conjunto de dados KNWF	47
FIGURA 28. Efeito da rugosidade sobre a taxa de percolação, para conjunto de dados CNPA	48
FIGURA 29. Efeito da rugosidade sobre a taxa de percolação, para conjunto de dados KNWF.	49

FIGURA 30. Efeito da rugosidade sobre a taxa de escoamento, para conjunto de dados CNPA	49
FIGURA 31. Efeito da rugosidade sobre a taxa de escoamento, para conjunto de dados KNWF	50
FIGURA 32. Efeito da declividade na fase de avanço, para o conjunto de dados CNPA	51
FIGURA 33. Efeito da declividade do sulco sobre o desempenho do sistema, para o conjunto de dados CNPA	51
FIGURA 34. Efeito da declividade na fase de avanço, para o conjunto de dados KNWF	52
FIGURA 35. Efeito da declividade do sulco sobre o desempenho do sistema, para o conjunto de dados KNWF	53
FIGURA 36. Efeito da declividade sobre a eficiência de aplicação, para o conjunto de dados CNPA	54
FIGURA 37. Efeito da declividade sobre a eficiência de aplicação, para o conjunto de dados KNWF	55
FIGURA 38. Efeito da declividade sobre a taxa de percolação, para o conjunto de dados CNPA	55
FIGURA 39. Efeito da declividade sobre a taxa de escoamento, para o conjunto de dados CNPA	56
FIGURA 40. Efeito da declividade sobre a taxa de percolação, para o conjunto de dados KNWF	57
FIGURA 41. Efeito da declividade sobre a taxa de escoamento, para o conjunto de dados KNWF	57
FIGURA 42. Efeito da seção transversal sobre a fase de avanço, para o conjunto de dados CNPA	58
FIGURA 43. Efeito da seção transversal sobre a fase de avanço, para o conjunto de dados KNWF	59
FIGURA 44. Efeito da seção transversal do sulco sobre o desempenho do sistema, para o conjunto de dados CNPA	59
FIGURA 45. Efeito da seção transversal do sulco sobre o desempenho do sistema, para o conjunto de dados KNWF	60

LISTA DE TABELAS

	pág.
TABELA 1. Estimativa do comprimento de sulcos	09
TABELA 2. Características físico-hídricas médias do solo, obtidas a partir de amostras coletadas na área dos testes	21
TABELA 3. Dados básicos de campo utilizadas na análise de sensibilidade	25
TABELA 4. Combinações entre os parâmetros de campo, utilizados na análise de sensibilidade	26
TABELA 5. Valores médios das dimensões da seção transversal de fluxo do sulco	31

RESUMO

Nesta pesquisa foi desenvolvida uma análise da irrigação por sulcos, com o objetivo de estudar a influência dos parâmetros de campo no desempenho desse sistema. O estudo foi realizado a partir de dados obtidos em avaliações de campo feita pelo autor, no perímetro irrigado de São Gonçalo-PB, e de dados publicados por Walker & Humpherys (1983). Realizou-se uma análise de sensibilidade do desempenho do sistema às variações nos parâmetros de campo, utilizando-se os modelos matemáticos computacionais SIRMOD (*Utah State University, 1989*) e SIRTOM (Azevedo, 1992). Para as condições de campo em questão, os resultados demonstraram que a infiltração do solo e o comprimento dos sulcos são os parâmetros que mais afetam o desempenho do sistema. Demonstra-se, então a importância de se estabelecer relações entre vazão de entrada e comprimento que forneçam condições grandezas adequadas desses parâmetros, para condições de campos específicas. Os efeitos isolados da rugosidade, da declividade e da seção transversal dos sulcos foram relativamente pequenos. Entretanto, os efeitos da rugosidade e da declividade foram melhor visualizados quando associados ao efeito do comprimento. A taxa de percolação é muito mais afetada pelos parâmetros de campo que a de escoamento superficial. Observa-se, então, a importância de se realizar um monitoramento sazonal da fase de avanço, tendo em vista ser essa fase o maior contribuinte para as perdas por percolação.

ABSTRACT

This research developed an analysis on the furrow irrigation system, purposing to verify the influence of the field parameters on the performance of these systems. The study was performed basing on data from field evaluations done by the author in the São Gonçalo irrigation district, and data published by Walker e Humpherys (1983). The influence of the field parameters on the performance of these systems was verified through a sensitivity analysis, using the SIRTOM (Azevedo,1992) and SIRMOD (Utah State University, 1989) computer mathematical models. For the field conditions in question, the results showed that the soil infiltration and furrow length are the parameters that most affect the system performance. Thus, it is obvious the importance of to establish relationships between inflow and furrow length that would provide adequate values for these parameters, for site specific conditions. The segregate effects of roughness, slope and furrow cross section were relatively small. However, the effects of roughness and slope were better visualized when associated with the furrow length effect. The deep percolation rate is much more affected by the parameters than the runoff rate. This shows the importance of performing a seasonal monitoring of the advance phase, since this phase gives the most contribution to the deep percolation losses.

1 INTRODUÇÃO

A irrigação constitui, sem dúvida, um meio de intensificação, incrementação e diversificação da produção agropecuária, bem como uma forma de regularização na oferta de produtos, evitando, em parte, os riscos e incertezas provocados pela irregularidade pluviométrica, especialmente em regiões áridas e semi-áridas.

A escolha do método de irrigação é de grande importância e deve ser uma tomada de decisão do agricultor e projetista, tendo como base a viabilidade técnica, econômica e ambiental do projeto e os seus benefícios sociais. A irrigação superficial possui acentuada predominância na maioria das regiões irrigadas do mundo. Nos Estados Unidos, segundo Shank (1992), a área irrigada por esses sistemas corresponde a 57% da área irrigada naquele país. No Brasil, segundo dados publicados em 1990, os sistemas superficiais prevaleciam com um percentual de 72% da área total irrigada (Manual, 1991). Valores iguais ou superiores podem ser encontrados em diversos países asiáticos, africanos e latino-americanos. Esta predominância se deve às inúmeras vantagens que esses sistemas apresentam em relação a outros métodos de irrigação, destacando-se como principais, o baixo custo de implantação e operação e o baixo consumo de energia. Segundo Scaloppi (1986) nos sistemas de irrigação por superfície é possível reduzir, em até 62,5%, o consumo de energia elétrica em função do aumento da eficiência de aplicação de água.

Nos sistemas de irrigação superficiais, como a aplicação da água às culturas é feita através da superfície do solo, daí a determinação de irrigação superficial, as variações espaciais e temporais nos parâmetros de campo tornam o dimensionamento e o manejo complicados, podendo contribuir para um potencial maior desses sistemas a baixas eficiências (Azevedo, 1992). Mesmo assim, é possível ter-se dimensionamento e manejo adequados, graças ao conhecimento, num tempo real, dos parâmetros que descrevem a dinâmica da hidráulica desses sistemas, resultando num desempenho comparável ao dos sistemas pressurizados.

Vários estudos foram realizados, na tentativa de solucionar o problema de ineficiência dos sistemas superficiais. Pesquisadores têm desenvolvido modelos matemáticos computacionais, os quais são aplicados para descrever e avaliar a irrigação superficial. Azevedo (1992) desenvolveu um modelo denominado SIRTOM (Surface Irrigation Real-Time Optimization Model) que determina as características de infiltração do solo a partir do ajuste do avanço simulado medido. A Utah State University desenvolveu um modelo denominado SIRMOM (Surface Irrigation Simulation Model) que simula as quatro fases da irrigação superficial e faz prognóstico do desempenho do sistema. A utilização desses modelos constitui um recurso valioso na investigação, a custo e tempo reduzidos, de inúmeras alternativas de dimensionamento e manejo do sistema.

Considerando a constatação de Santana (1996), Pereira (1991), entre outros pesquisadores, no que concerne às acentuadas variações espaciais e temporais nos parâmetros de campo da irrigação superficial, este trabalho teve como objetivo geral verificar a influência desses parâmetros no desempenho do sistema de irrigação por sulcos,

visando gerar alternativas para o dimensionamento e o manejo adequados desses sistemas.

Os objetivos específicos foram:

a) Realizar uma avaliação de um sistema de irrigação por sulcos longos a partir de dados obtidos no perímetro irrigado de São Gonçalo, no estado da Paraíba;

b) Determinar as características de infiltração do solo para os eventos avaliados nesta pesquisa utilizando-se o modelo SIRTOM;

c) Realizar análise de sensibilidade do desempenho do sistema de irrigação aos parâmetros de campo, utilizando-se o modelo SIRMOD, para os dados coletados e os dados obtidos por Walker & Humpherys (1983).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações gerais

O Nordeste brasileiro, além de está sujeito a um clima semi-árido, em grande parte de seu território, é marcado por um passado hidrogeológico que resultou num traçado de cursos d'água configurado por poucos rios perenes, muitos com regime temporário e alguns efêmeros; daí a falta de tradição da prática de irrigação (Molle & Cadier, 1992).

A prática de irrigação tem como objetivo básico a reposição ao solo do déficit de umidade, provocado pela insuficiência de precipitação, para compensar a evapotranspiração dos cultivos (Grassi, 1972).

A escolha do método de irrigação a ser usado em cada área, se baseia na viabilidade técnica e econômica do projeto e nos seus benefícios sociais. Geralmente os de menor custo são os sistemas superficiais (Bernardo, 1986).

Segundo Daker (1988), os sistemas superficiais permitem uma eficiência relativamente alta, podendo atingir 80% em condições favoráveis. No caso de condições desfavoráveis, a eficiência pode baixar facilmente para 40% ou menos. Conforme Soares (1987) essa baixa eficiência resulta das perdas de água por infiltração nos canais, percolação profunda abaixo da zona radicular, evaporação e escoamento superficial no final do sulco. Azevedo (1993) afirma que a baixa eficiência de aplicação dos projetos de irrigação

superficial se deve a um inadequado dimensionamento e um manejo inapropriado. O autor afirma, ainda, que o processo de dimensionamento e manejo dos sistemas de irrigação superficiais torna-se complicado devido as dificuldades que existem em medir ou estimar as variações espaciais e temporais nos parâmetros de campo, especialmente as variações nas características de infiltração do solo.

Leal et al. (1980), avaliando os efeitos de vazão e declividade no desempenho do projeto Bebedouro, em Petrolina, encontraram uma eficiência de aplicação média igual a 33%. Carvalho & Soares (1988) estudando a eficiência de irrigação por sulcos ao nível de parcela no projeto Bebedouro, obtiveram valores de eficiência de aplicação de 53,52% para uma declividade de 0,33%, enquanto que para as declividades de 0,9 e 1,3%, as eficiências de aplicação foram 33,10 e 25,68% respectivamente.

Pruski et al. (1994), afirmam que o problema de sistemas superficiais torna-se mais grave quando a água é fator limitante em regiões com problemas de salinidade e quando não existe um sistema de drenagem adequado para a remoção da água perdida por percolação. Nessa situação, o problema agrava-se pelo fato da água perdida por percolação contribuir para a elevação do lençol freático, o que pode provocar um aumento da quantidade de sais na camada de solo explorada pelo sistema radicular da cultura.

Em anos recentes a pesquisa científica procurou selecionar e aperfeiçoar os métodos de irrigação superficiais mais promissores. A essência dos métodos modernos consiste no controle da água para tornar mais eficiente seu uso, bem como o trabalho humano, evitando os perigos de alagamento e salinidade do solo (Withers & Vipond, 1977).

Barreto & Formiga (1986), trabalhando com sulcos de base larga em bacias em nível mediram eficiências de aplicação que variaram de 76,5 a 95,7%, na área experimental do perímetro irrigado de São Gonçalo.

2.2 Irrigação por Sulco

O método de irrigação por sulcos, constitui, o processo de aplicação de água mais conhecido e mais usado em todo mundo, sendo inclusive, um dos poucos métodos que é tradição de irrigação no Brasil (Olitta, 1977). A irrigação por sulcos pode ser usada com sucesso em culturas cujo plantio seja em linhas, em terrenos com declividades de zero até 5%, exceto para solos de alta permeabilidade (Withers & Vipond, 1977). Segundo a Federación Nacional de Algodoneros (1990), a irrigação por sulcos, em solos adequados desde que devidamente planejada e executada, constitui-se no método ideal para todas as espécies cultivadas em fileiras.

Na irrigação por sulcos as perdas de água ocorrem por escoamento superficial no final da área e por percolação profunda. A redução dessas perdas constitui um dos maiores desafios para um bom manejo desse sistema, especialmente em solos de textura mais arenosa, haja visto que a irrigação excessiva poderá acarretar a lixiviação de nutrientes, elevação do lençol freático e possível salinização da área irrigada, além de onerar os custos de produção. O bom manejo da irrigação por sulcos consiste em minimizar essas perdas, aplicando-se a lâmina necessária no final da área (Doneen & Westcot, 1984 & Goldhamer et al. 1987) citados por (Pereira, 1991).

Santana (1996), através do monitoramento dos parâmetros operacionais (vazão de entrada e tempo de aplicação), promoveu uma melhoria substancial no

desempenho de um sistema situado no perímetro irrigado de São Gonçalo-PB, onde a eficiência de aplicação aumentou de 41 para 71% do quarto para o sétimo evento de irrigação obtendo-se uma média sazonal de 62% em 12 eventos.

2.3 Parâmetros de Campo e Operacionais

A avaliação de uma área irrigada por superfície, tem como objetivo principal identificar as alternativas que podem resultar na melhoria do desempenho do sistema (Walker & Scogerboe, 1984). Como o regime hidráulico do referido sistema não é de fácil compreensão, para obtenção de êxito com o projeto, deve-se ter conhecimento dos princípios que o regem (Israelsen & Hansen, 1965). Dentre os parâmetros a serem avaliados, destacam-se os de campo: declividade, comprimento do sulco, características de infiltração, rugosidade e seção transversal, bem como os operacionais: vazão e tempo de aplicação.

2.3.1 Declividade

Em geral, a declividade está associada com a textura do solo, com o comprimento do sulco e com a vazão a ser aplicada em cada sulco. Até certos limites, quanto mais fina for a textura do solo, mais curtos os sulcos e maior a vazão, menor deve ser a declividade (Olitta, 1977). Conforme Bernardo (1986), a erosão do solo é o principal fator a ser considerado na determinação da declividade dos sulcos.

A erosão nos sulcos está associada com a velocidade da água e com a maior ou menor erodibilidade do solo. Em solos arenosos os declives permissíveis deverão ser maiores que nos argilosos, para reduzir as perdas por percolação profunda (Withers & Vipond, 1977). De acordo com Olitta (1977), a declividade aceitável para sulcos de irrigação dependerá principalmente da força erosiva da água, que pode ser expressa por:

$$F_e = y h s \quad \textcircled{1}$$

y = peso específico da água em kg/m^3 ;

h = altura de água no sulco em m;

s = declividade do sulco em m/m.

Deste modo pode-se controlar a força excessiva da água pela forma do sulco, vazão ou declividade.

Para uma mesma vazão, a profundidade de umedecimento é inversamente proporcional a forma do sulco. Sulcos de base larga são mais adequados para declives de 0,5% ou maiores (Withers & Vipond, 1977).

Carvalho et al. (1995) realizaram análises para determinar a influência do perfil geométrico do sulco no desempenho da irrigação para três tipos de solo. Os autores concluíram que a influência do tipo de perfil do sulco nos valores de eficiência de aplicação tornou-se menos expressiva à medida que se utilizou maiores valores de lâminas requeridas e menores valores de declividade e comprimento de sulcos. Com a utilização dos perfis parabólicos, houve uma tendência de se obter maiores valores de eficiência de aplicação. As variações existentes entre os três tipos de perfis parabólicos superaram às ocorridas entre as trapezoidais e triangulares, sendo mínima para os últimos.

Segundo Zimmerman (1966), citado por Saraiva (1986), a forma ideal para uma distribuição da água ao longo do sulco seria uma declividade constante ou que aumentasse gradativamente. Para evitar erosão excessiva nos sulcos, sua declividade não deve exceder a 2% (Bernardo, 1986). Em áreas sujeitas a maiores precipitações pluviométricas, a declividade dos sulcos não deve exceder 0,5% (Bernardo, 1986).

De acordo com Israelsen & Hansen (1965), em solos nos quais os sulcos têm declividades de 10 a 15%, pode-se ainda utilizar com êxito a irrigação, no entanto, permitindo somente pequenos volumes e observando atentamente a erosão que se produz. Entretanto, declives de 0,5 a 3% são os melhores.

2.3.2 Comprimento do Sulco

As perdas por percolação profunda influenciam no comprimento do sulco a ser utilizado em cada tipo de solo. Para determinação do comprimento do sulco é feito testes de campo. A tabela apresentada abaixo, serve de base para o referido estudo.

TABELA 1 Estimativa do comprimento de sulcos (Withers & Vipond, 1977)

Declividade (%)	Vazão máxima permissível (l/s)	Comprimento dos sulcos (metros)								
		Solo text. grossa, com lâmina de água de (mm)			Solo text. média, com lâmina de água de (mm)			Solo text. fina , com lâmina de água de (mm)		
		50	100	150	50	100	150	50	100	150
0,25	2,50	150	220	265	250	350	440	320	460	535
0,50	1,25	105	145	180	170	245	300	225	310	380
0,70	0,83	80	115	145	140	190	255	175	250	305
1,00	0,63	70	100	120	115	165	200	150	230	260
1,50	0,41	60	80	100	95	130	160	120	175	215
2,00	0,23	50	70	85	80	110	140	105	145	185

Segundo Molle & Cadier (1992), sulcos em solos arenosos não podem ser nem muito longos (a água não alcança o fim do sulco) nem muito declivosos (a água pode causar erosão). Solos argilosos permitem sulcos maiores. O comprimento dos sulcos varia geralmente entre 50 e 300m, podendo atingir até 600m ou mais. É sempre desejável que o comprimento seja o maior possível, sem, entretanto, causar perdas excessivas de água por percolação profunda (Scaloppi, 1986).

Conforme Molle & Cadier (1992), a determinação do comprimento ideal do sulco é um problema bastante complicado por causa dos fatores que intervêm no avanço da água ao longo do sulco, como a rugosidade, forma do sulco, a capacidade de infiltração do solo, a vazão na cabeceira do sulco e sua declividade. Segundo Bernardo (1986), para sulcos com declividades menores que 0,3% o seu comprimento pode aumentar com o aumento da declividade. Porém, para declividades superiores a 0,3%, o seu comprimento deve diminuir com o aumento da declividade.

2.3.3 Infiltração

A infiltração é o parâmetro mais difícil de se avaliar na irrigação por superfície, particularmente sua variação temporal e espacial. Em geral, se requer um número relativamente grande de medições de infiltração para representar as condições do campo (Walker & Scogerboe, 1984). Segundo Walker (1989) citado por Rivera et al. (1995) a importância de caracterizar a infiltração do solo, reside especialmente no fato desta influenciar no valor da vazão de entrada e no tempo de aplicação. Na utilização de modelos computacionais a característica de infiltração do solo, em particular, apresenta-se como a informação que mais compromete a simulação. Para superar essas dificuldades, Azevedo (1992), desenvolveu o modelo SIRTOM, que é um sistema de checagem e controle (FCC-BACKCONTROL SYSTEMS) capaz de prever as características num tempo real e promover ajustes, em tempo hábil, na operação do evento de irrigação, atingindo-se assim, um alto nível de desempenho do sistema.

Segundo Scaloppi (1984), citado por Silva (1987), as características de infiltração em sistemas de irrigação superficial, podem ser obtidas na ausência ou na presença do fluxo superficial. Na ausência de fluxo, pode-se incluir os métodos do cilindro

infiltrômetro simples ou duplo, sulcos infiltrômetros e sulco “by pass” e sob condições de fluxo, se incluem os métodos de Criddle et al. (1956), Bouwer (1957), Finker e Nir (1960), Christiansen et al. (1966), Gilley (1968), e Singh e Chauhan (1973).

A velocidade de infiltração da água em um solo é um fator muito importante na irrigação, visto que ela determina o tempo em que se deve manter a água na superfície do solo, de modo que se aplique uma quantidade de água desejada (Bernardo, 1986).

Segundo Hillel (1971), a velocidade de infiltração da água no solo é relativamente alta no início do processo, decrescendo gradualmente com o tempo, tendendo normalmente a um regime assintótico estável, chamado “regime final” ou velocidade de infiltração básica (VIB), quando a velocidade de infiltração se mantém praticamente constante.

Segundo Bernardo (1986), a VIB é um fator de grande importância para a irrigação, pois é ela que indicará quais os métodos de irrigação possíveis de serem utilizados naquele solo, bem como determinará a intensidade de precipitação máxima permitida na irrigação por aspersão.

Hillel (1971), afirma que o regime de infiltração é afetado pelos seguintes fatores: tempo desde o início da irrigação; teor de umidade inicial; condutividade hidráulica; condições da superfície do solo; presença de camadas retardadoras dentro do perfil. Alguns fatores agem diferentemente de uma localidade para outra; outros são funções da época do ano (Vieira et al., 1978).

Azevedo (1975), constatou que a velocidade de infiltração varia acentuadamente da primeira para a segunda irrigação, porém torna-se praticamente

constante a partir da terceira irrigação. As variações são atribuídas principalmente às modificações das características hidráulicas dos sulcos e do teor de umidade inicial do solo.

Cross; Fischbach (1973), citados por Soares (1987), estudando as condições de um solo silte-argiloso com irrigação por sulcos, concluíram que a velocidade de infiltração inicial aumentou com a quantidade de esterco bovino incorporado naquele solo. Concluíram ainda, que no decorrer do tempo a partir da incorporação do esterco, houve um aumento na velocidade da infiltração básica, e que para um mesmo tipo de solo, a velocidade de infiltração básica apresentou-se menor em solo onde houve aplicação de adubos minerais, quando comparados com solos não adubados.

2.3.4 Seção Transversal

No caso da irrigação por sulcos os parâmetros geométricos do sulco são requeridos para a avaliação da irrigação (Trout, 1991). Segundo Walker & Skogerboe (1984), a geometria da seção transversal do sulco é de fundamental importância quando se vai avaliar as características de fluxo e armazenamento superficial.

Segundo Sousa (1988), citado por Pordeus (1990), a profundidade ou lâmina d'água no sulco, é influenciada pela forma, além da declividade, rugosidade e vazão de entrada. É bem conhecido que a variação da lâmina d'água com o tempo e a distância é um fator que determina a infiltração total de água no sulco durante a irrigação.

Durante a irrigação, a profundidade do fluxo e a largura da superfície de água deverão ser medidas periodicamente em certas estações. Estes dados podem ser combinados com as seções transversais para computar o armazenamento superficial em tempos distintos (Walker & Scogerboe, 1984).

Segundo Trout (1991), a forma da seção transversal do sulco é comumente usada para interpretar a variação dos parâmetros. As equações de fluxo superficial podem então relacionar a geometria dos sulcos aos parâmetros hidráulicos. A equação mais comumente utilizada é a de Manning, qual seja:

$$Q = (1/n) A R^{2/3} S^{1/2} \quad \textcircled{2}$$

Q - vazão em m³/s

A - área da seção transversal do fluxo em m²

R - raio hidráulico em m

S - declividade.

n - coeficiente de Manning

A seção transversal deve ser suficiente para conter a quantidade de água necessária, para uma distribuição uniforme ao longo do comprimento do sulco. A irrigação inicial em solo desagregado modifica a seção do sulco, já que ocorre grande movimento de material, até que se atinja um perfil de equilíbrio, tendendo a ser parabólico em solos de textura média e pesada e de forma retangular ou trapezoidal, em solos de textura fina (Oliitta, 1977).

Pereira (1991), estudando as características da seção transversal dos sulcos em um latossolo vermelho-escuro álico, aplicando uma vazão de 0,80 l/s, antes e após a primeira, segunda e terceira irrigações, observou que o escoamento da água ao longo dos sulcos altera suas características geométricas, principalmente causando uma diminuição na profundidade máxima, dotando o sulco de uma forma aproximadamente parabólica após a primeira irrigação, ao invés de permanecer a forma triangular inicial.

2.3.5 Rugosidade

A rugosidade se modifica nas irrigações. Geralmente, durante a primeira, o avanço da água é mais lento, pois, o solo está desagregado, ocasionando grande movimento de material. Durante a segunda irrigação, o solo estará mais coeso, mas, ainda, ocorre movimento de material. A partir da terceira irrigação, normalmente a rugosidade do terreno será praticamente constante (Olitta 1977).

Apesar da superfície do solo ir tornando-se mais lisa ao longo da estação de cultivo, o desenvolvimento de ervas daninhas dificultam o avanço da água no sulco (Santana, 1996). O autor constatou através de testes de avanço ao longo da estação um aumento no tempo de avanço, devido o aumento da rugosidade, principalmente pelo surgimento de ervas daninhas.

Segundo Soares (1987), o aumento da rugosidade do solo, também implica no aumento na área da seção de escoamento, e, conseqüentemente, aumento do perímetro molhado, principalmente quando da instalação das culturas ou após capinas e adubações.

Grassi et al. (1965), estudando o efeito da rugosidade da seção de escoamento do sulco sobre a infiltração, encontraram que a condição mais rugosa do sulco provocou aumento da infiltração da água nos sulcos basicamente pelo aumento da seção.

2.3.6 Vazão

Conforme Soares (1987), a vazão aplicada por sulcos é um dos fatores mais importantes para a obtenção de uma irrigação eficiente. A vazão que um sulco pode conduzir depende da seção de escoamento e suas características hidráulicas, levando-se em

consideração a velocidade de avanço, determinada pela declividade do sulco e a possibilidade de ocorrência de erosão (Olitta, 1987). Quando no sulco é aplicada uma quantidade de água inferior a necessária, pode causar perdas no rendimento, e quando se aplica uma quantidade excessiva pode-se promover desperdício de água e energia, como também carrear os nutrientes e o solo, causando erosão (Bowman et al., 1990).

De acordo com Israelsen & Hansen (1965), apenas parte da água aplicada na área é utilizada pelas culturas, sendo o restante perdida por evaporação, percolação e escoamento superficial. Para reduzir o escoamento no final do sulco, deve-se utilizar uma maior vazão durante a fase de avanço e fazer uma redução continuamente durante a fase de armazenamento superficial (Walker & Scogerboe, 1987).

Segundo Bernardo (1986), a vazão inicial deve ser a máxima não erosiva que o sulco pode conduzir e a vazão final deve ser a menor vazão capaz de manter todo o comprimento do sulco com água, durante o tempo necessário para aplicar a lâmina de irrigação no final do sulco. A menor vazão ou vazão mínima de entrada é função da perda por percolação, admitida ao longo do sulco. A equação ③, proposta por Azevedo et al. (1982), pode ser utilizada no cálculo da vazão mínima (q_{\min})

$$q_{\min} = VIB \cdot A_i / 36 \cdot pp \quad \text{③}$$

q_{\min} - vazão mínima (m^3/h)

VIB - velocidade de infiltração básica (m/h)

A_i - área da seção transversal de fluxo (m^2)

pp - perdas por percolação (%)

Conforme Withers & Vipond (1977), a vazão máxima não-erosiva, deve ser determinada através de testes de campo in loco. Walker & Skogerboe (1987), estudaram a

vazão máxima não erosiva, em função de parâmetros obtidos a partir das dimensões do sulco e propuseram a seguinte equação:

$$Q_{max} = \left[\left(\frac{V_{max} \rho_2 \cdot n^2}{3600 \cdot S_0 \cdot \rho_1} \right)^{\frac{1}{(\rho_1 - 2)}} \right] \quad (4)$$

Q_{max} - vazão máxima não erosiva em m^3/min

v_{max} - velocidade máxima não erosiva m/min

n - coeficiente de Manning

ρ_1 e ρ_2 - coeficientes que expressam a geometria do sulco

S_0 - declividade do sulco em m/m

2.3.7 Tempo de Aplicação

Segundo Walker & Scogerboe (1987), o tempo de infiltração da água na irrigação superficial ocorre durante quatro fases distintas: fase de avanço na qual a água avança ao longo do sulco até atingir seu final, momento em que, se o sulco não for fechado no final, começam as perdas por escoamento superficial. Ao término dessa fase inicia-se a fase de armazenamento, onde a altura de fluxo ao longo do sulco aumenta com o tempo. Essa fase encerra-se quando a vazão é suspensa, iniciando-se a fase de depleção, onde a altura de fluxo ao longo do sulco diminui com o tempo. Essa fase encerra-se quando em alguma seção do sulco a altura de fluxo é nula, iniciando-se, então, a fase de recessão, na qual a água desaparece da superfície do solo. As fases acima citadas estão esquematicamente mostrada na Figura 1.

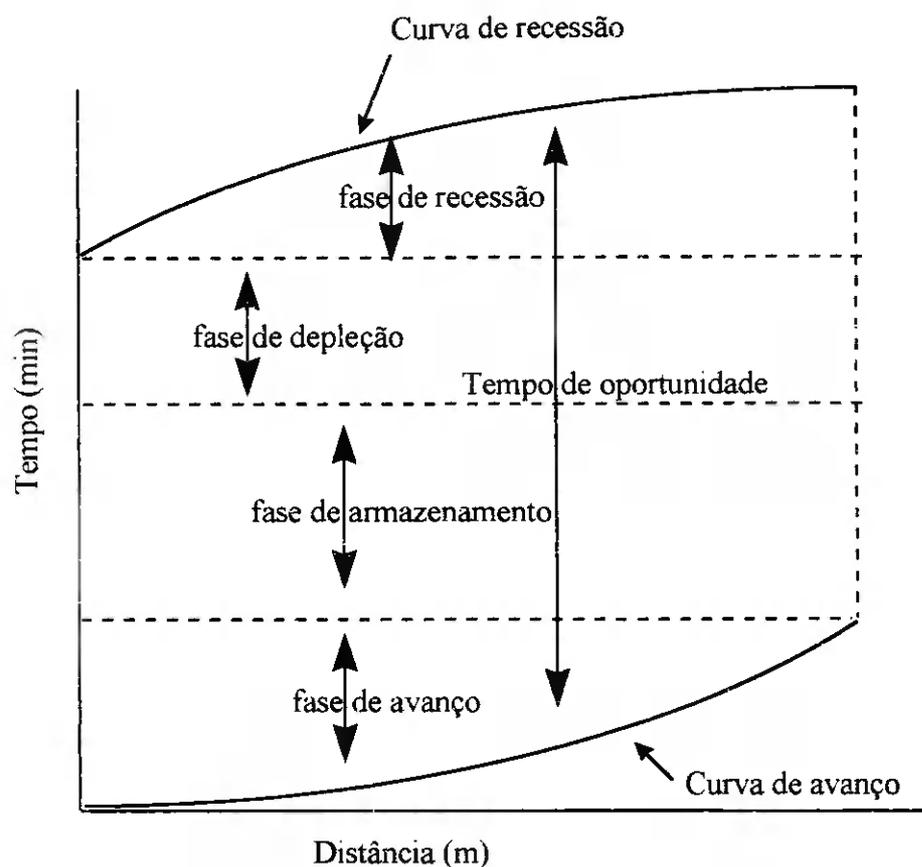


FIGURA 1. Fases características da Irrigação Superficial

Conforme Criddle et al. (1956), Bishop (1961), Grassi et al. (1965), citados por Millar (s.d.), o tempo de aplicação, quando se irriga por sulcos, é igual ao somatório do tempo de infiltração e o tempo de avanço no final do sulco.

2.4 Modelos Matemáticos

O surgimento de modelos matemáticos computacionais que descrevem a hidráulica da irrigação superficial, tem contribuído grandemente para a uma melhoria no desempenho desses sistemas (Azevedo, 1992)

Os modelos matemáticos que descrevem o fenômeno da irrigação por superfície variam no nível de sofisticação, indo de modelos algébricos, baseados no

princípio de conservação da massa, a modelos mais complexos como os hidrodinâmicos, os quais consistem na solução completa das equações de Saint Venant (Rivera et al., 1995). Tais modelos são classificados em hidrodinâmico, zero-inércia, onda cinemática e balanço de volume (Pordeus & Souza, 1994).

Segundo Souza (1984), a simulação da irrigação por sulcos torna-se mais difícil que dos demais sistemas, devido a complexibilidade introduzida pela forma de sulco e suas relações com a taxa de infiltração. Levien & Souza (1987), desenvolveram um modelo algébrico que simula o processo completo da irrigação por sulcos, o qual pode ser utilizado para analisar e prever o desempenho de um sistema de irrigação por sulcos em declive com drenagem livre.

Andrade et al. (1994), desenvolveram um modelo matemático para a simulação da fase de avanço na irrigação por sulcos, utilizando células de espaço pré-fixadas e rugosidade variável. O modelo de simulação se mostrou com um baixo nível de complexibilidade, no entanto, os resultados obtidos apresentaram uma boa relação com os dados medidos em campo, qualificando o mesmo como uma ferramenta útil e eficaz de ajuda para o dimensionamento da irrigação por sulcos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização do Ambiente

Parte dos dados de campo foi coletada na parcela agrícola 12, da Estação Experimental do EMBRAPA-CNPA, situado no Perímetro Irrigado de São Gonçalo, no município de Sousa, PB. O perímetro localiza-se na ecorregião fisiográfica do Alto Sertão, na bacia hidrográfica do Rio Piranhas, com solos formados por depósitos aluviônicos no passado hidrogeológico do período Quaternário. Geograficamente, a área apresenta as seguintes coordenadas: latitude de 06° 5' S, longitude de 38° 19' W e altitude de 235 m.

A região é de clima quente, com chuvas de verão-outono. A temperatura média é de 27° C, sendo as mais baixas registradas nos meses de junho e julho, enquanto em novembro e dezembro ocorrem as mais elevadas do ano. A umidade relativa média do ar é de 64% e, a pluviometria média anual é de 865,4 mm.

3.2. material Utilizado

Para obtenção dos dados básicos, foram utilizados alguns instrumentos e materiais necessários à operacionalização das tarefas de campo e de laboratório, como

sifões, trena métrica, estacas topográficas, calha Parshall, cronômetro, perfilômetro, computador e software.

3.3. Unidade Experimental

A área mede 2,05 ha, sistematizada com declividade de 0,001 m/m nos sentidos longitudinal e transversal, mediante base de cálculo de movimento de terra fornecida ao software SISTEMAT, desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa. A execução do plano de sistematização se deu através de topografia altimétrica e utilização de motoniveladora da marca KUMATSU, modelo GD523-A, resultando em um volume de corte de 420,47 m³/ha. A parcela agrícola foi sulcada no sentido longitudinal, confeccionando-se sulcos espaçados de 1,15m com 300m de comprimento, como mostra a Figura 2, para fins de análise do desempenho da hidrodinâmica de avanço.



FIGURA 2. Ilustração da área experimental

3.4 Caracterização Físico-Hídrica do Solo

A análise granulométrica do material de solo foi feita utilizando-se o método da pipeta, conforme EMBRAPA (1979). As amostras foram coletadas no horizonte A em diferentes pontos da área e classificada texturalmente como franco-arenosa. Para a determinação da capacidade de campo e ponto de murcha permanente o solo foi submetido a tensões de 0,33 e 15 atm, respectivamente. A densidade global foi determinada pelo método do anel volumétrico (1949), citado por EMBRAPA (1979). Os resultados da análise granulométrica e a caracterização físico-hídrica do solo estão apresentados na tabela 2.

TABELA 2. Características físico-hídricas médias do solo, obtidas a partir de amostras coletadas na área dos testes

Características físico-hídricas do solo	
Areia	
Grossa (%)	33
Fina (%)	36
Silte (%)	17
Argila (%)	14
Capacidade de campo (%)	19,17
Ponto de Murcha (%)	7,4
Água disponível (%)	11,17
Densidade global (g/cm ³)	1,16
Porosidade	
Total (%)	54
Drenável (%)	34,83

3.5 Caracterização da Hidráulica do Sistema de Irrigação

A condução de água na área experimental realizou-se através do canal secundário IM-1, com capacidade de transporte de 83 //s sendo a adução de água aos

sulcos feita por meio de sifões de plástico, de 1,5 polegada de diâmetro, corrugados, para evitar o fechamento da seção de fluxo e manter a vazão constante.

A vazão unitária liberada pelos sifões foi de 2,1 l/s, medida numa calha Parshall do tipo H26-1, como mostra a Figura 3, instalada no início do sulco escolhido aleatoriamente entre uma "bateria" de 50 sulcos. Os dados obtidos geraram os hidrográficos de fluxo necessários ao dimensionamento do sistema.

Durante os testes de campo foram feitas as seguintes mensurações: vazão de entrada, fase de avanço e perfilometria da seção transversal de fluxo no sulco. Para medir a fase de avanço da água (Figura 4), foram colocadas estacas ao longo do sulco, distanciadas de 20m, cronometrando-se o tempo gasto em cada percurso.

Para determinação da seção transversal de fluxo no sulco escolhido, foram realizadas medições do perfil, em três estações equidistantes 60m, utilizando-se um perfilômetro confeccionado pelo Departamento de Engenharia Agrícola da UFPB CAMPUS-II, como mostra a figura 5. A tomada de dados foi feita após a fase de recessão dos dois eventos de irrigação considerados para a avaliação do sistema. De acordo com a recomendação de Walker & Scogerboe (1987) a rugosidade da superfície foi considerada igual a 0,04.



FIGURA 3. Ilustração da calha Parshall utilizada na determinação da vazão



FIGURA 4. Determinação da fase de avanço

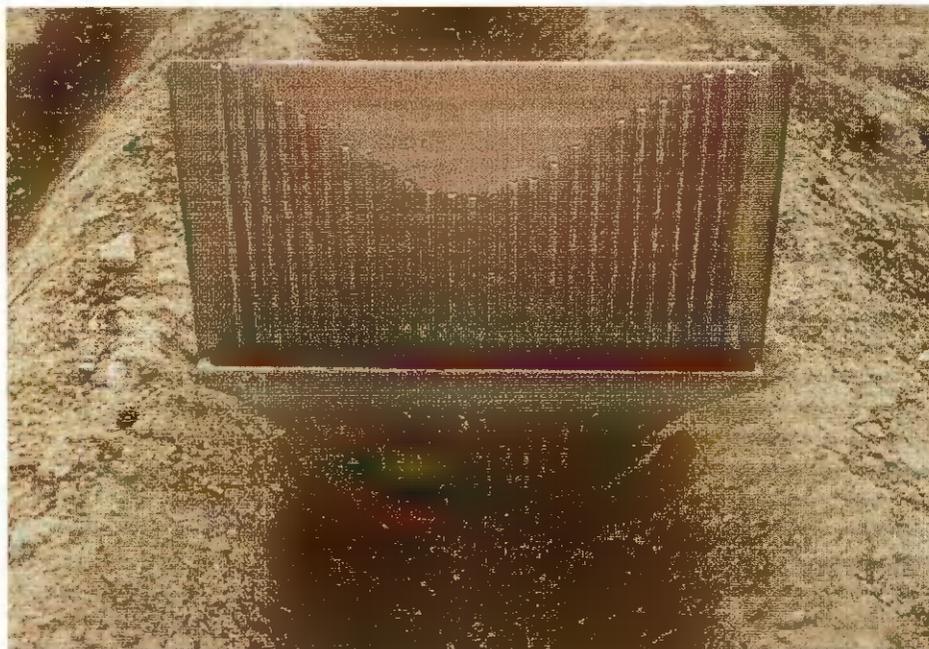


FIGURA 5. Ilustração do perfilômetro utilizado na determinação da seção de fluxo do sulco

3.6 Parâmetros de Infiltração

A partir de dados do avanço obtido, foram determinados os parâmetros de infiltração da água no solo, utilizando-se o software SIRTOM, modelo matemático computacional desenvolvido por Azevedo (1992) o qual determina os parâmetros da equação de Kostiakov-Lewis, através do ajuste do avanço simulado ao avanço medido.

3.7 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade do desempenho do sistema aos parâmetros de campo foi conduzida no laboratório de Engenharia de Irrigação e Drenagem do

Departamento de Engenharia Agrícola, Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, Campus II, Campina Grande, PB. Além dos dados coletados, utilizou-se um conjunto de dados publicados por Walker & Humpherys (1983) como indica a Tabela 3. A partir desses dados, foram geradas diferentes combinações entre os parâmetros de campo, como mostra a Tabela 4, utilizadas na análise de sensibilidade. Na Tabela 4 a primeira linha de cada conjunto de dados corresponde aos dados básicos.

TABELA 3. Dados básicos de campo utilizados na análise de sensibilidade.

Descrição dos parâmetros	Dados de Campo		
	KNWF ¹	CNPA ²	
		1º evento	6º evento
Tipo de solo	Franco argilo-siltoso	Franco-arenoso	Franco-arenoso
Regime de fluxo	contínuo	contínuo	contínuo
Vazão de entrada (l/s)	0,8	2,1	2,00
Comprimento do sulco (m)	112	300	300
Declividade (m/m)	0,0104	0,001	0,001
Coefficiente de Manning	0,013	0,04	0,04
Parâmetros de infiltração			
K (m ³ /m/min)	0,007	0,01206	0,01052
a	0,533	0,434	0,295
f ₀ (m ³ /m/min)	0,00017	0,000193	0,000193
Seção do sulco			
Largura do topo (m)	0,30	0,30	0,46
Altura máxima (m)	0,10	0,10	0,08
Largura a 50% da alt. máx (m)	0,26	0,24	0,28
Largura da base (m)	0,10	0,018	0,03
Z requerido (m ³ / m)	0,09	0,094	0,094
Tempo de avanço (min)	560	547	126

¹ Dados obtidos por Walker: & Humpherys (1983)

² Dados coletados

Para a realização desta análise utilizou-se o modelo SIRMOD (Surface Irrigation Simulation Model) desenvolvido pela Utah State University. Para o processamento, esse modelo requer, como dados de entrada, os parâmetros de campo e operacionais, quais sejam: a equação de infiltração, a geometria da seção transversal do sulco, a vazão de entrada, o comprimento do sulco, o tempo de aplicação de água, o

coeficiente de rugosidade e a declividade da área. Como resultados, o modelo determina o avanço e a recessão da água na superfície do solo, o balanço de volume e fornece uma completa avaliação do desempenho do sistema de irrigação.

A análise de sensibilidade obedeceu o seguinte procedimento: após a entrada dos dados necessários para execução do modelo, os mesmos foram fixados, alterando-se o valor de apenas um parâmetro de campo a cada simulação. Uma primeira execução do modelo foi realizada apenas para determinar o tempo de avanço no final da área. Em seguida o tempo de aplicação foi ajustado com o propósito de se obter uma irrigação adequada, ou seja, sem nenhum déficit ao longo de toda área, sendo o modelo executado novamente.

TABELA 4. Combinações entre os parâmetros de campo, utilizadas na análise de sensibilidade

sulco analisado	Parâmetros de campo											
	Rugos.	decliv. m/m	comp. m	Infiltração			Seção transversal (m) ¹				Treq ² min	Tapli. ³ min
			K	a	f _s	LT	AM	L50 %	LB			
KNWF	0,013	0,0104	112	0,0070	0,533	0,00017	0,30	0,10	0,26	0,10	87	647
	0,04	0,0052	50	0,0056	0,480	0,00017	0,24	0,08	0,21	0,08	160	720
	0,06	0,0089	80	0,0042	0,426	0,00017	0,18	0,06	0,16	0,06	265	825
	0,09	0,0015	120	0,0084	0,586	0,00017	0,36	0,12	0,31	0,12	50	610
	0,12	0,0163	150	0,0068	0,551	0,00017	0,42	0,14	0,36	0,14	30	590
	0,15	0,0200	162	0,0076	0,569	0,00017	0,48	0,16	0,42	0,16	20	580
CNPA	0,04	0,0010	300	0,0121	0,434	0,000193	0,30	0,100	0,24	0,018	77	624
	0,013	0,0052	350	0,0118	0,406	0,000193	0,23	0,110	0,21	0,020	97	644
	0,06	0,0089	250	0,0114	0,378	0,000193	0,37	0,093	0,25	0,024	124	671
	0,09	0,0126	200	0,0111	0,351	0,000193	0,44	0,086	0,27	0,027	152	699
	0,12	0,0163	150	0,0108	0,323	0,000193	0,51	0,079	0,28	0,029	185	732
	0,15	0,0200	100	0,0105	0,295	0,000193	0,58	0,072	0,29	0,033	220	767

¹ Seção transversal

LT - Largura do topo

AM - Altura máxima

L50% - Largura a 50% da altura máxima

LB - Largura da base

² T req - Tempo de oportunidade de infiltração

³ T apli - Tempo de aplicação

3.8 Parâmetros Avaliados

Os parâmetros necessários à avaliação, foram fornecidos diretamente pelo modelo SIRMOD, com exceção das taxas de percolação e escoamento. A partir do balanço de volume, fornecido pelo modelo, procedeu-se a determinação da taxa de escoamento (TE) e da taxa de percolação (TP), utilizando-se as equações ⑤ e ⑥:

$$TE = VTE / VTA \cdot 100 \quad \textcircled{5}$$

TE - taxa de escoamento (%)

VTE - volume Total Escoado (m³)

VTA - volume total Aplicado (m³)

$$TP = 100 - Ea - TE \quad \textcircled{6}$$

TP - taxa de percolação (%)

Ea - eficiência de Aplicação (%)

TE - taxa de Escoamento (%).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Hidrográfico de Fluxo

As Figuras 6 e 7 apresentam os hidrográficos de fluxo dos dois eventos de irrigação analisados nesta pesquisa. Verifica-se que a estabilidade da vazão de entrada para os dois eventos, ocorreu num tempo relativamente rápido, em torno de 8 minutos, devido a carga hidráulica constante no canal de alimentação dos sifões.

Para as vazões aplicadas, mostradas na tabela 2, observa-se que, para o primeiro evento de irrigação (primeira irrigação), quando o solo encontrava-se desagregado devido a uma movimentação de terra decorrente da sistematização da área, o tempo gasto para que o avanço atingisse o final da área foi bem maior que o observado no segundo evento de irrigação, (sexta irrigação), onde o solo já se encontrava mais coeso, devido ao rearanjo das partículas, proporcionando, por sua vez, um aumento na velocidade de fluxo, o que tornou o avanço mais rápido.

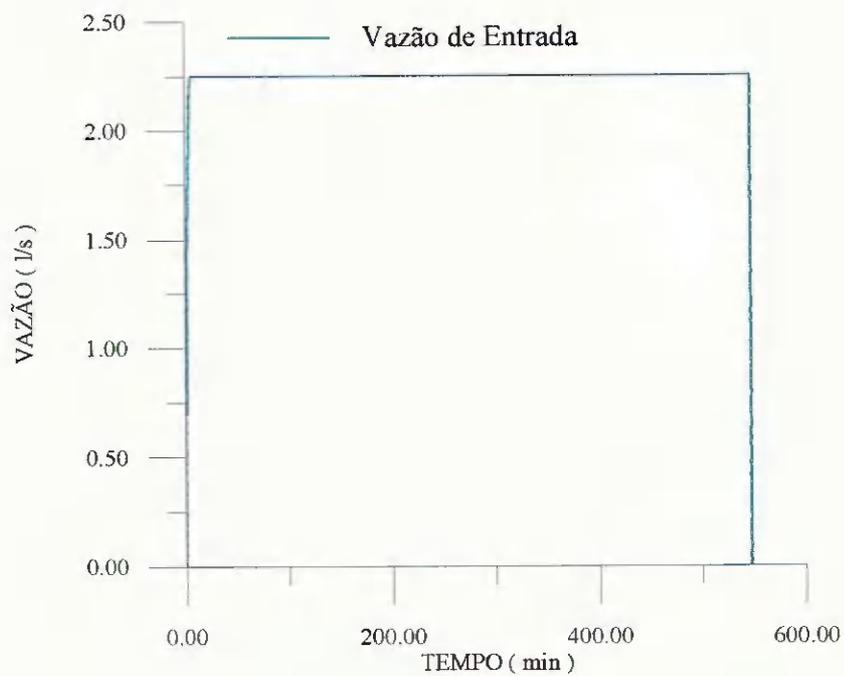


FIGURA 6. Hidrográfico de fluxo para o primeiro evento de irrigação

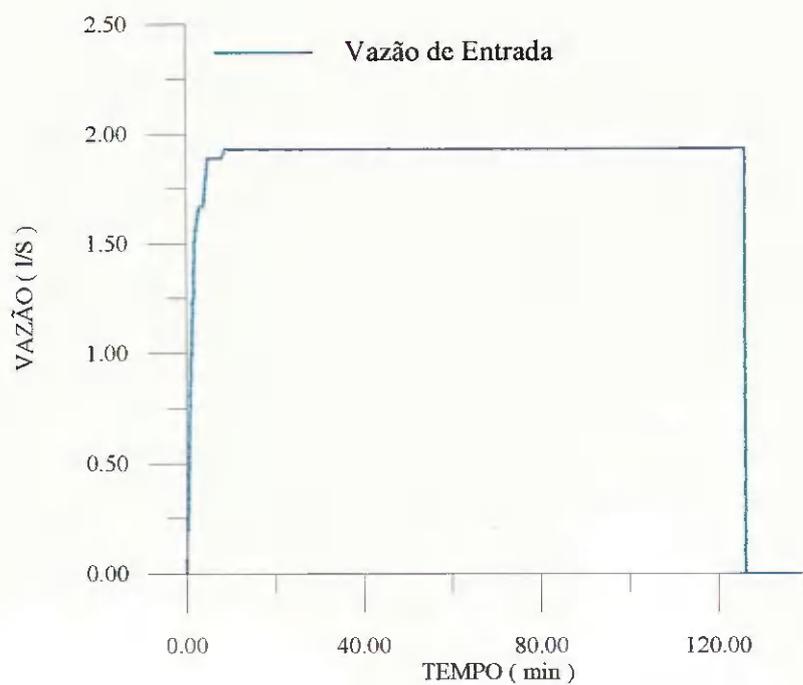
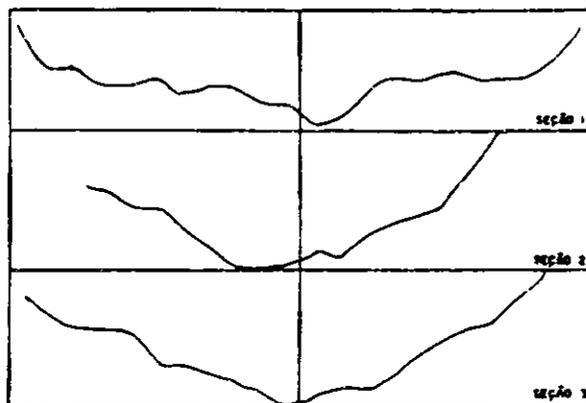


FIGURA 7. Hidrográfico de fluxo para o segundo evento de irrigação

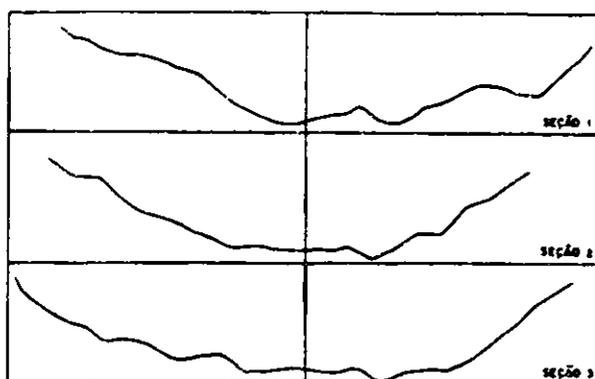
4.2 Perfilometria do Sulco

As Figuras 8 e 9, mostram a variação espacial e temporal da seção transversal de fluxo do sulco respectivamente, para o primeiro e o sexto eventos de irrigação. A partir destes perfis, foram calculados os valores médios das dimensões da seção transversal, comumente utilizadas nos modelos de simulação e nas metodologias de avaliação dos sistemas de irrigação por sulcos, conforme mostra a Tabela 5.



ESCALA 1:5,37

FIGURA 8. Variação espacial da seção transversal de fluxo para o 1º evento de irrigação



ESCALA 1:5,37

FIGURA 9. Variação espacial da seção transversal de fluxo para o 6º evento de irrigação

TABELA 5. Valores médios das dimensões da seção transversal de fluxo do sulco

Distância	Largura de topo	Altura máxima	Larg. a 50% da altura máxima	Largura da base
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
Primeiro evento de irrigação				
60	0,40	0,07	0,24	0,015
120	0,28	0,14	0,25	0,020
180	0,32	0,10	0,23	0,018
Média espacial	0,30	0,10	0,24	0,018
Sexto evento de irrigação				
60	0,45	0,08	0,33	0,032
120	0,49	0,08	0,27	0,033
180	0,43	0,08	0,23	0,033
Média espacial	0,46	0,08	0,28	0,033
Média temporal	0,38	0,09	0,26	0,026

Observa-se que ocorreram mudanças tanto a nível espacial como temporal nessas dimensões. No primeiro evento de irrigação, pode-se observar que a altura máxima foi a dimensão que variou, ao longo da área, em maior proporção. Aos 120 e 180m, a partir da cabeceira da área, ela aumentou, respectivamente, 100% e 43%, em relação a sua medição aos 60m. Em seguida, as dimensões que sofreram alterações razoáveis foram a largura de topo e a largura da base, que apresentaram, respectivamente, uma diminuição de 30% e 20% e um aumento de 25% e 17%, aos 120 e 180m, em relação aos valores medidos aos 60m. Ocorreu variações de apenas 4% na largura a 50% da altura máxima. Entretanto, no sexto evento de irrigação, a dimensão que mais variou foi a largura da seção a 50% de sua altura máxima, diminuindo 18% e 30%, respectivamente, nas seções correspondentes aos 120 e 180m, em relação à medição aos 60m. A largura de topo variou no máximo 9%. As demais dimensões praticamente não se alteraram. Verifica-se, então, que as variações espaciais no sexto evento de irrigação foram bem menores que as observadas no primeiro. Isto aconteceu porque, devido o solo ter sido recentemente preparado, ele encontrava-se bastante solto, tornando, conseqüentemente, a seção

transversal do sulco, ao longo da área, muito vulnerável a alterações. Temporalmente, a dimensão que mais variou foi a largura da base, que aumentou 45% no sexto evento. Isto aconteceu porque ocorreu um alargamento da seção como um todo, ao longo do tempo, criando uma deposição de partículas do solo no fundo do sulco, o que resultou, então, para o aumento de sua base. A largura de topo e a largura a 50% da altura máxima aumentaram 35% e 14%, respectivamente, enquanto que a altura máxima diminuiu 20%, em relação às medições feitas no primeiro evento de irrigação. Essas variações temporais dotaram uma geometria do sulco aproximadamente parabólica, o que está de acordo com resultados obtidos por Pereira (1991) e Olitta (1977). Acredita-se que as variações tanto espacial como temporais na seção de fluxo do sulco, ocorreram devido às variações nas características de infiltração do solo e em sua rugosidade, e na própria degradação física natural da seção transversal, como também aos tratos culturais e à acomodação das partículas do solo.

4.3 Efeito dos Parâmetros de Campo Sobre o Avanço e o Desempenho do Sistema

4.3.1 Análise para Diferentes Comprimentos de Sulcos

As Figuras de 10 a 15 mostram o avanço e o desempenho do sistema para os diferentes comprimentos de sulcos testados nos conjuntos de dados CNPA e KNWF. Para o sulco CNPA (Figura 10), quando testou-se, na simulação, o comprimento de 350 m, a vazão aplicada de 2,1 l/s, foi capaz de avançar a área no máximo até os 320 m. O tempo de avanço nesse comprimento foi de 130 min a mais que no comprimento de 300 m.

Esse incremento no tempo de avanço resultou num aumento na taxa de percolação de 3,76 % (Figura 11), em relação ao comprimento de 300m. Isto mostra ser mais racional considerar o uso de 300 m como valor máximo de comprimento para essa vazão.

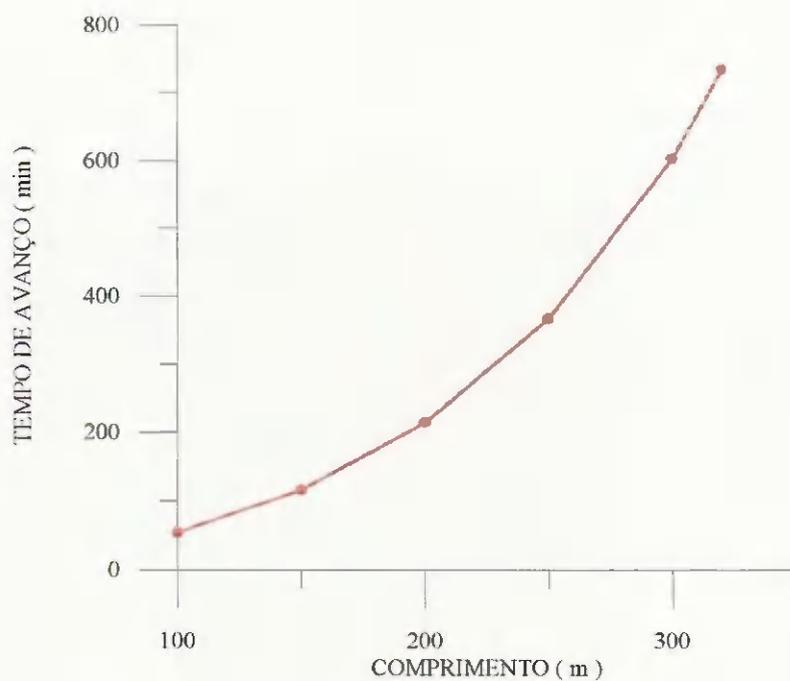


FIGURA 10. Efeito do comprimento sobre tempo de avanço no final do sulco, para o conjunto de dados CNPA

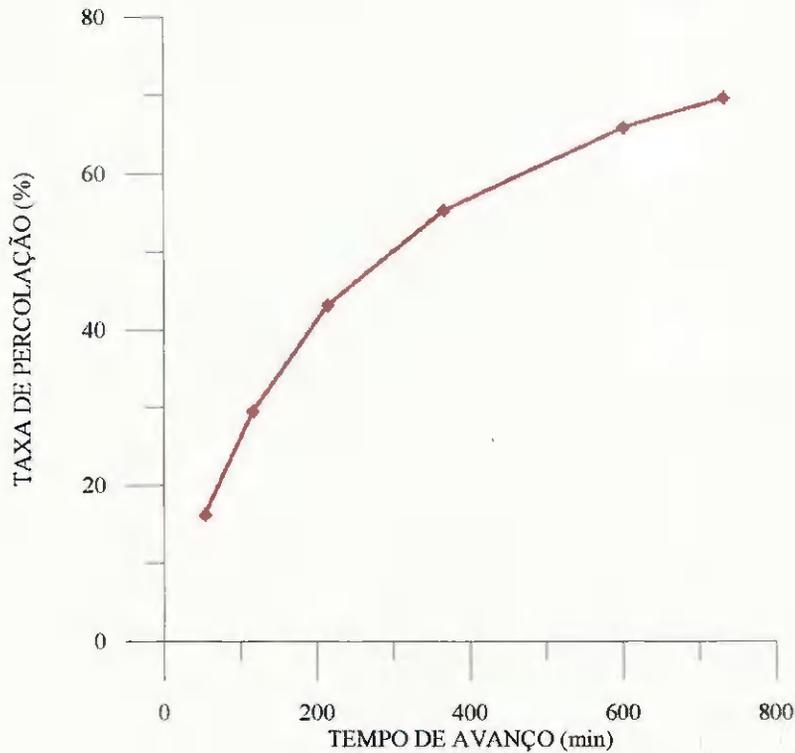


FIGURA 11. Efeito do tempo de avanço no final do sulco sobre a taxa de percolação para o conjunto de dados CNPA

Para o sulco do conjunto de dados KNWF (Figura 12) , testando-se o comprimento de 150 m, a vazão de 0,8 l/s foi suficiente para a água atingir apenas até à distância de 120 m. O tempo de avanço nesse comprimento foi de 161 min a mais que no comprimento de 112 m. Esse incremento no tempo de avanço resultou num aumento na taxa de percolação de 2,75% (Figura 13). Observa-se que o incremento na taxa de percolação para os conjuntos de dados CNPA (solo franco-arenoso) foi superior ao do conjunto de dados KNWF (solo franco-argilo-siltoso). Isto ocorre devido a diferença na textura, bem como a diferença no incremento dos valores de comprimento analisados para os mesmos, 20 e 8 m, respectivamente.

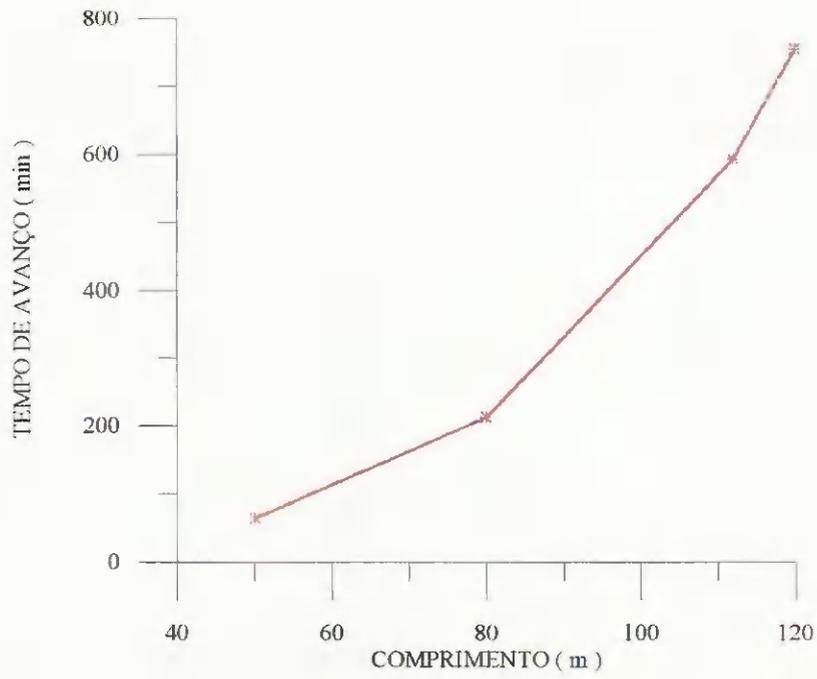


FIGURA 12. Efeito do comprimento sobre tempo de avanço no final do sulco, para o conjunto de dados KNWF

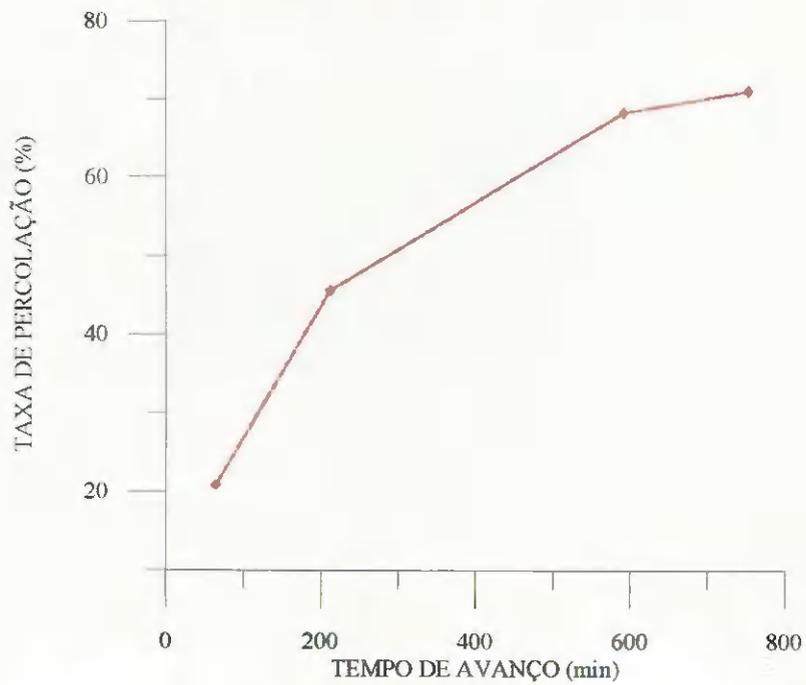


FIGURA 13. Efeito do tempo de avanço no final do sulco, sobre a taxa de percolação, para o conjunto de dados KNWF

Os resultados dessa análise mostram a importância de se estabelecer as relações entre vazão e comprimento específicos a cada condição de campo, e dão idéia de grandezas adequadas de vazão e comprimento para as condições de campo estudadas.

No que diz respeito ao desempenho do sistema (Figuras 14 e 15) observa-se nas duas condições de campo estudadas (CNPA e KNWF) que à medida que o comprimento cresce a eficiência de aplicação decresce. Para o conjunto de dados CNPA (Figura 14), quando o comprimento aumentou de 100 para 300 m a eficiência de aplicação caiu de 55,3 para 32,9%. Enquanto que, para o conjunto de dados KNWF (Figura 15), quando o comprimento aumentou de 50 para 112 m a eficiência de aplicação caiu de 60,5 para 30,9%.

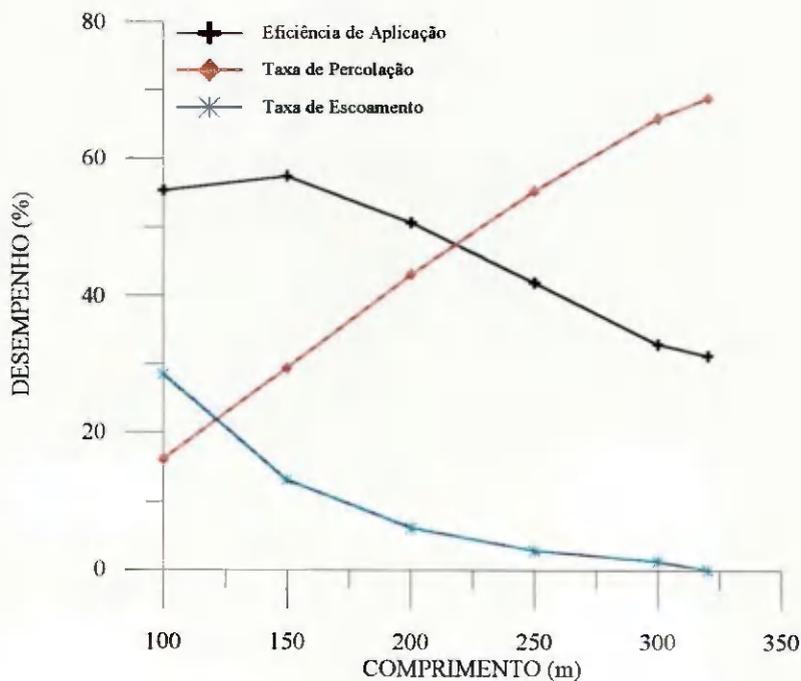


FIGURA 14. Efeito do comprimento do sulco sobre desempenho do sistema para o conjunto de dados CNPA

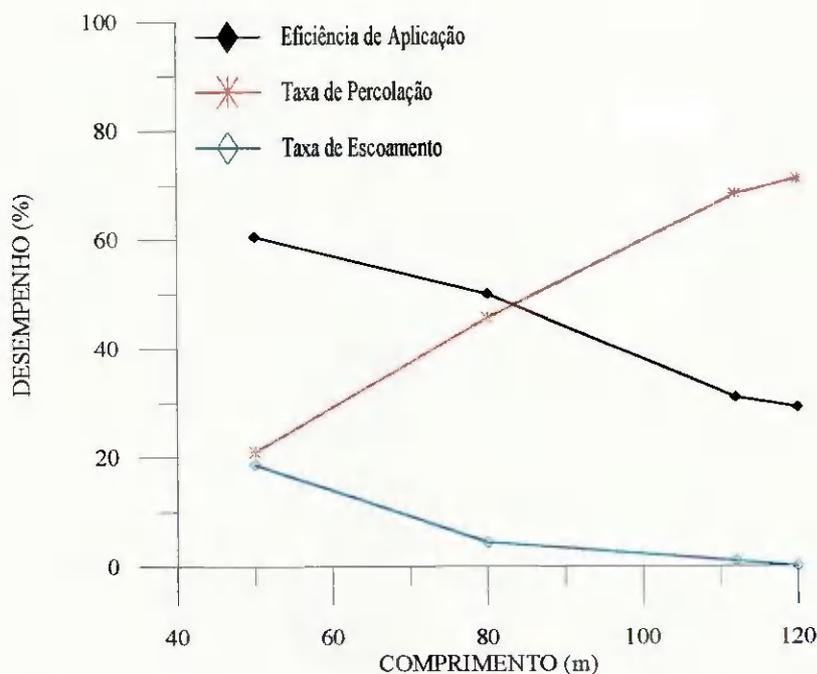


FIGURA 15. Efeito do comprimento do sulco sobre o desempenho do sistema para o conjunto de dados KNWF

Verifica-se que quando o comprimento aumenta, a taxa de percolação aumenta. Isto ocorre porque, para uma mesma declividade, infiltração, rugosidade e seção transversal, comprimentos maiores resultam numa maior variação no tempo de avanço no final da área, dando uma maior oportunidade para perdas por percolação, principalmente, quando deseja-se aplicar, ao longo de toda a área, a lâmina requerida pela cultura, que foi o propósito desta pesquisa. Apesar de que, para garantir-se a condição de irrigação adequada a duração da fase de armazenamento ter sido a mesma para todos os comprimentos testados nesta pesquisa, a taxa de escoamento superficial não manteve-se constante, diminuindo quando o comprimento aumentou. Isto explica-se pelo fato de que em comprimentos maiores uma maior parte da vazão aplicada, que foi a mesma para todos os comprimentos, se infiltra, resultando-se em velocidades da água menores à medida que se distancia da cabeceira da área onde a vazão é aplicada. Observa-se que o comprimento afeta muito mais a taxa de percolação que de escoamento. Para o sulco CNPA, quando o

comprimento aumentou de 100 para 300 m, a taxa de percolação aumentou 49,63%, enquanto que a taxa de escoamento superficial diminuiu apenas 27,23%. Para o sulco KNWF, tratando-se de um solo mais argiloso, o efeito do comprimento foi maior nas perdas por escoamento superficial, isto é, o aumento nas perdas por percolação foi menor (47,2%) e a diminuição nas perdas por escoamento foi maior (17,37%) que no sulco CNPA. As perdas por percolação variam linearmente com o comprimento, apresentando uma declividade da reta bastante acentuada. As perdas por escoamento apresentam uma variação praticamente linear, mais com uma declividade negativa bastante suave, principalmente, a partir dos 150m.

4.3.2 Análise para Diferentes Características de Infiltração

As curvas de avanço e o desempenho do sistema para diferentes valores de infiltração dos conjuntos de dados CNPA e KNWF, encontram-se nas Figuras de 16 a 21. Para os dados de avanço do CNPA (Figura 16) observa-se que, o grau de não linearidade torna-se mais suave à medida que a infiltração diminui. Na Figura 17, verifica-se que o tempo gasto para a frente de avanço alcançar o final da área na distância de 300m decresceu de 450 min quando a infiltração passou de 0,168 m³/m para 0,094 m³/m. Para o primeiro evento de irrigação o tempo gasto para a frente de avanço atingir o final da área foi de 602 min. Isto ocorreu devido a estrutura do solo na camada superior está favorável à infiltração, após o preparo do mesmo.

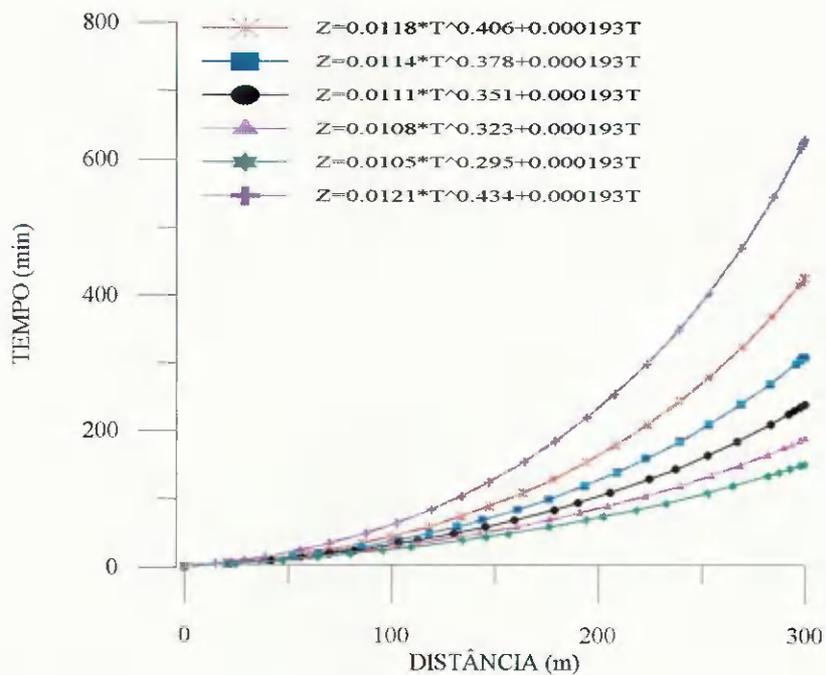


FIGURA 16. Efeito das características de infiltração sobre a fase de avanço, para o conjunto de dados CNPA

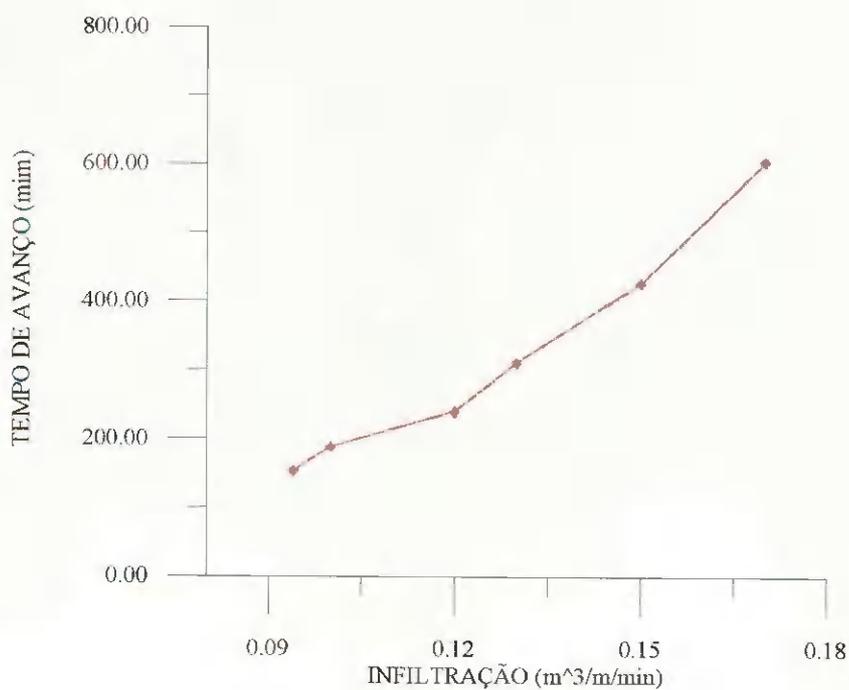


FIGURA 17. Efeito das características de infiltração sobre o tempo de avanço, para o conjunto de dados CNPA

Nesta condição física a macroporosidade está com sua máxima capacidade volumétrica, tornando mais lenta a fase de avanço devido a natureza do fluxo superficial, caracterizado como não permanente e espacialmente variado. Em consequência, a razão de avanço torna-se mais sensível ao tempo. No entanto, para o segundo evento de irrigação, obteve-se um tempo de avanço bem mais reduzido (152 min), sendo este fato atribuído as modificações nas características estruturais do solo e ao teor de umidade inicial remanescente do primeiro evento de irrigação, o que está de acordo com Azevedo (1975).

Com relação ao conjunto de dados KNWF (Figura 18), pode-se verificar que para maiores valores de infiltração, a frente de avanço não atingiu o final da área, quando o comprimento foi 112 m (campo), no entanto, para o comprimento de 78 m, com as mesmas características de infiltração, o avanço atingiu o final do sulco num tempo de 231 min, como mostra a Figura 19.

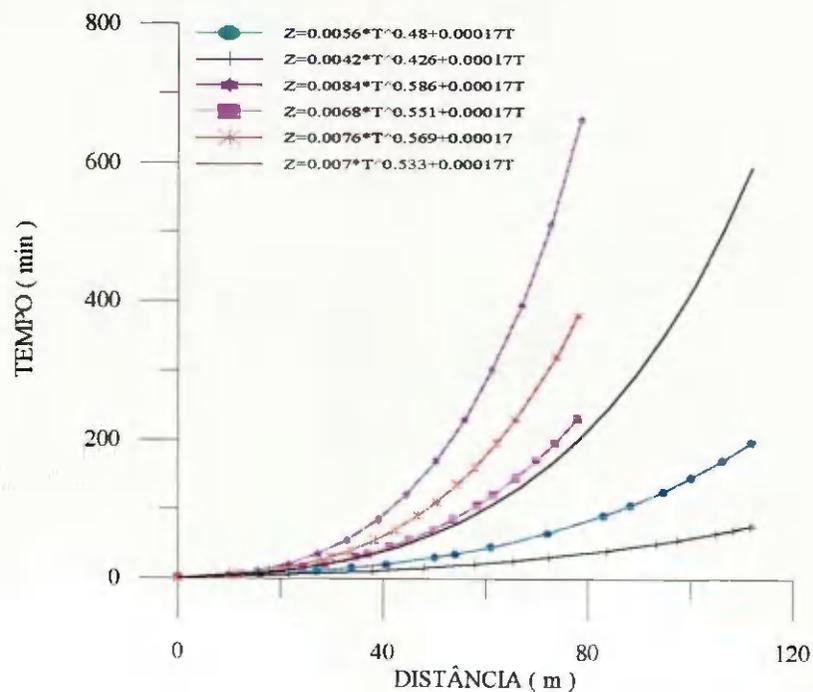


FIGURA 18. Efeito das características de infiltração sobre a fase de avanço, para o conjunto de dados KNWF

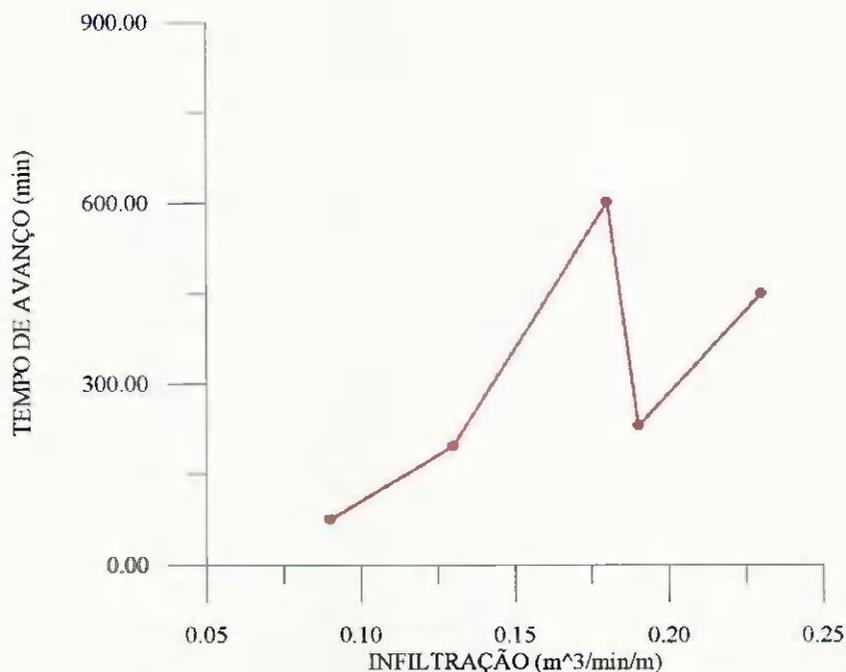


FIGURA 19. Efeito das características de infiltração sobre o tempo de avanço para o conjunto de dados KNWF

No que diz respeito ao desempenho do sistema (Figura 20 e 21), observa-se que a eficiência de aplicação aumenta de 32,9% para 60,5% para os dados de CNPA e de 30,9% para 60,9% para os dados KNWF, para os maiores e menores valores de infiltração, respectivamente. Isto proporcionou uma substancial diminuição na taxa de percolação (47,8% para os dados CNPA e 58% para os dados KNWF) e, conseqüentemente, um acréscimo de 20,2% para dados de CNPA e 28% para os dados KNWF na taxa de escoamento (Figura 20 e 21). Isto mostra a importância de realizar-se um monitoramento sazonal em tempo real da fase de avanço devido ser um fator que contribui para essas perdas.

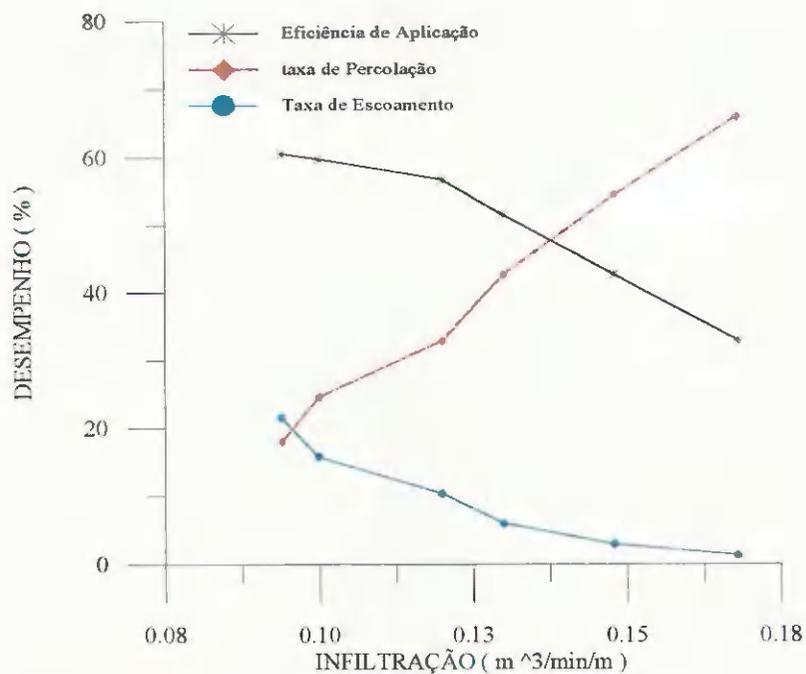


FIGURA 20. Efeito das características de infiltração do solo sobre desempenho do sistema para o conjunto de dados CNPA

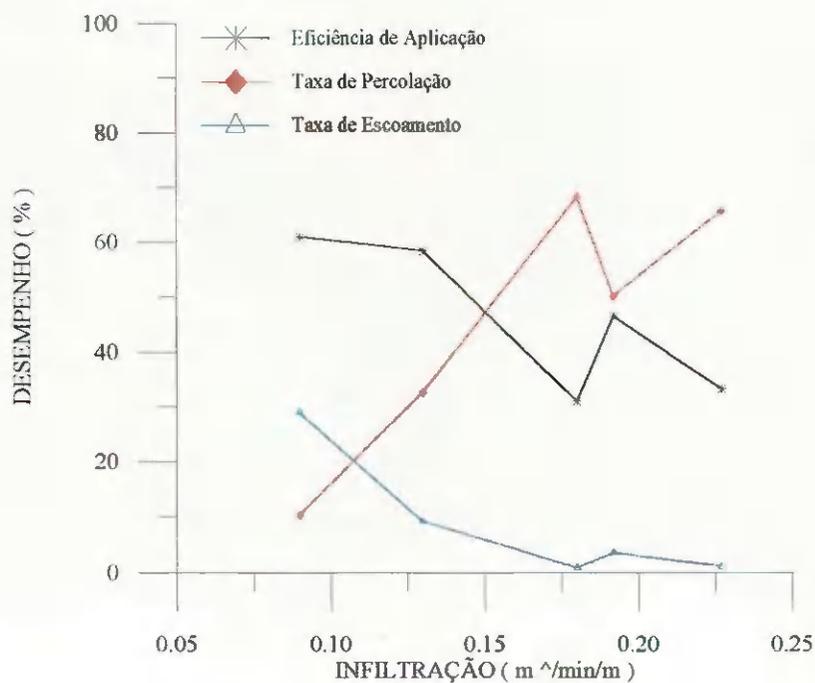


FIGURA 21. Efeito das características de infiltração do solo sobre desempenho do sistema, para o conjunto de dados KNWF

Observando-se os dados KNWF na Figura 21, verifica-se a importância do correto dimensionamento do sistema, pois, para o valor de infiltração de $Z = 0,192 \text{ m}^3/\text{m}$ e com a redução do comprimento de 112 para 78 m, ocorre significativo aumento na eficiência de aplicação de 15,5%, uma diminuição da taxa de percolação de 18,2% e um conseqüente aumento de 2,6% na taxa de escoamento.

4.3.3 Análise para Diferentes Rugosidades

Encontram-se nas Figuras de 22 a 25, as curvas de avanço e do desempenho do sistema para os valores de rugosidades dos conjuntos CNPA e KNWF. Para o sulco CNPA, mostrado na Figura 22, percebe-se que ocorreu um aumento no tempo de avanço de 47 min, quando a rugosidade variou de 0,013 para 0,15. Entretanto, para o conjunto KNWF (Figura 23), esse aumento foi de 26 min para os mesmos valores de rugosidade. Acredita-se que isto ocorreu devido a diferença na classificação textural do solo; franco-arenoso e franco-argilo-siltoso, respectivamente.

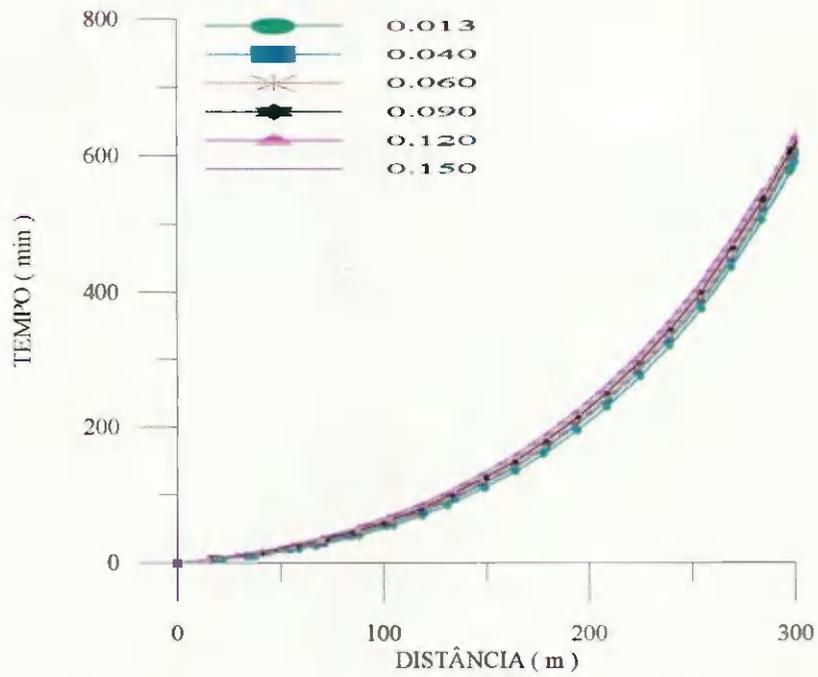


FIGURA 22. Efeito da rugosidade sobre a fase de avanço no final do sulco, para o conjunto de dados CNPA

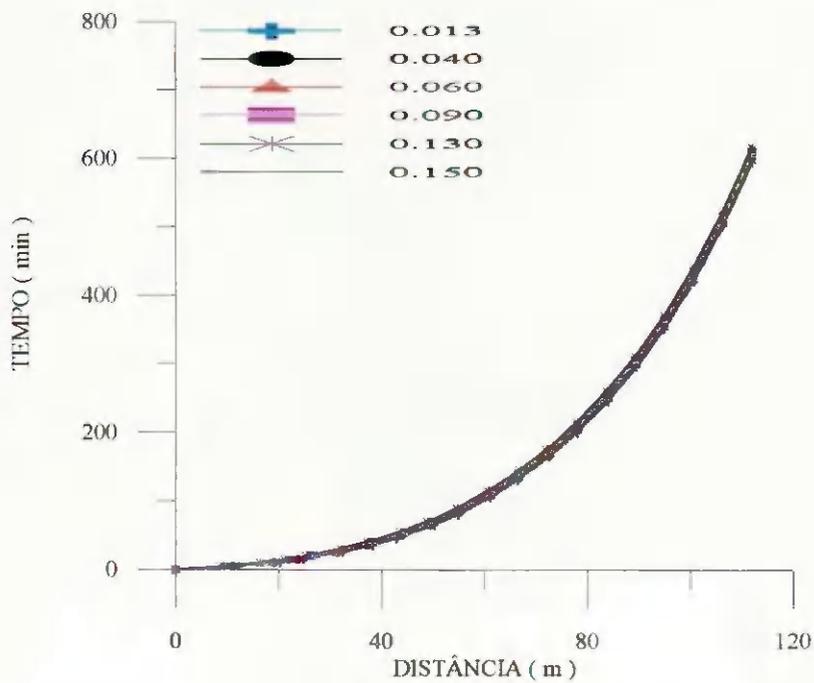


FIGURA 23. Efeito da rugosidade sobre a fase de avanço, para o conjunto de dados KNWF

Pode-se observar que a rugosidade não mostrou quase nenhum efeito sob o desempenho do sistema (Figura 24 e 25), o qual permaneceu praticamente constante quando testou-se, na simulação, os diferentes valores de rugosidades considerados, exibindo apenas uma variação de 2,1% para a eficiência de aplicação, 2,4% para a taxa percolação e 0,54% para a taxa de escoamento, para os dados referentes ao CNPA e para KNWF respectivamente 0,6%, 0,02% e 0,4%. O resultado dessa análise mostra que a rugosidade quando comparado aos outros parâmetros de campo, é o que menos afeta a taxa de escoamento.

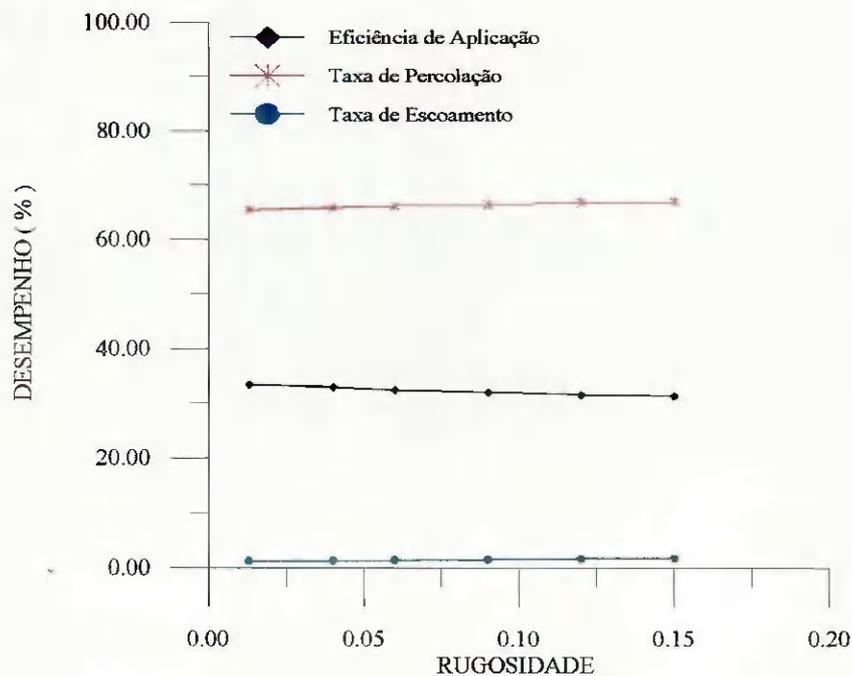


FIGURA 24. Efeito da rugosidade sobre o desempenho do sistema para o conjunto de dados CNPA

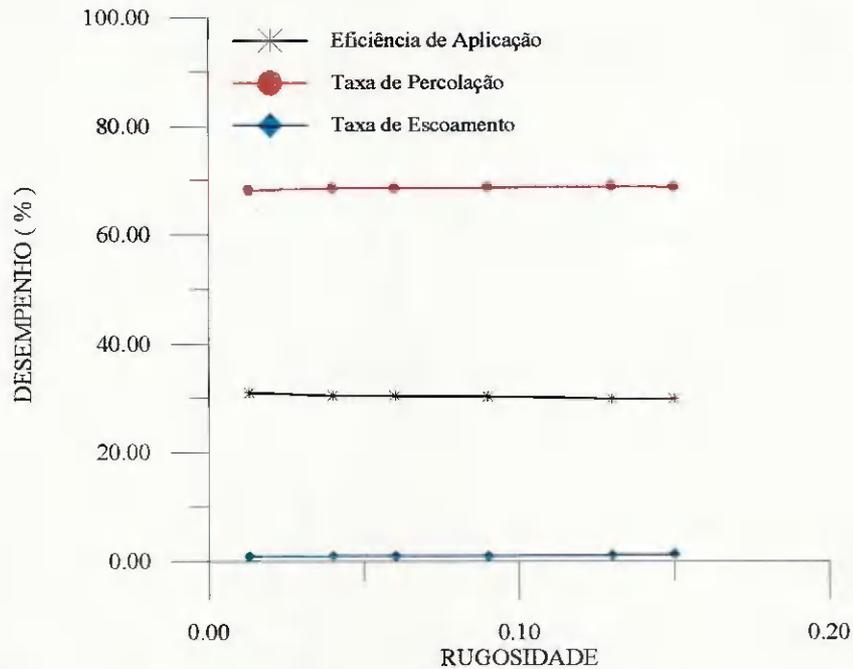


FIGURA 25. Efeito da rugosidade sobre o desempenho do sistema para o conjunto de dados KNWF

Testando-se os mesmos valores de rugosidades para os conjuntos de dados estudados, quando associados a aos diferentes comprimentos, verificou-se um aumento na eficiência de aplicação que variou de 5,9% a 1,7% para os dados do CNPA, onde o maior efeito foi observado para o menor valor de comprimento testado, enquanto que para o menor valor de comprimento o efeito verificado foi menor (Figura 26). Para os dados KNWF mostrados na Figura 27, a variação observada foi apenas entre 3,7% e 1,2%, sendo que a maior variação correspondeu a análise feita aos valores de rugosidades associados ao menor valor de comprimento e a menor variação ao maior valor de comprimento, quando associado as diferentes rugosidades.

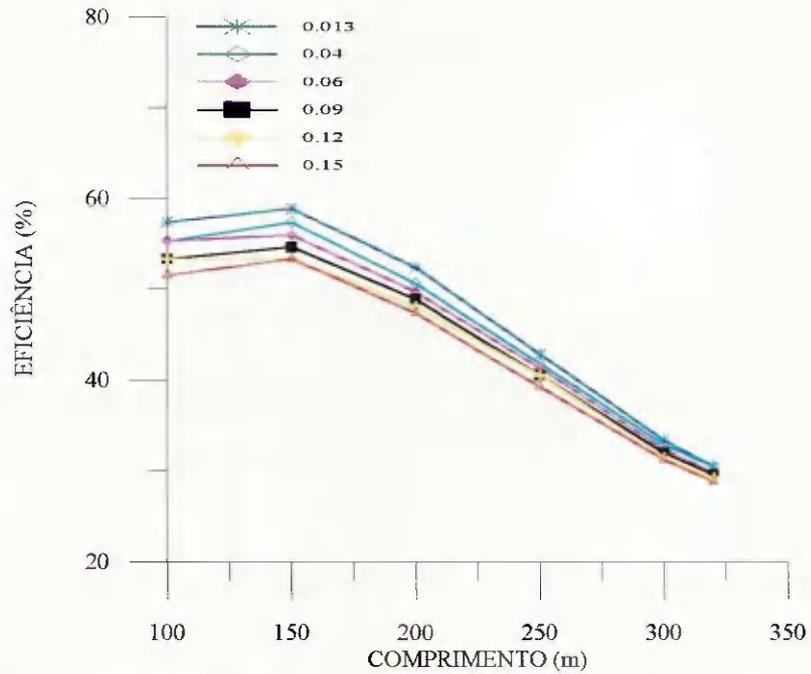


FIGURA 26. Efeito da rugosidade sobre a eficiência de aplicação, para o conjunto de dados CNPA

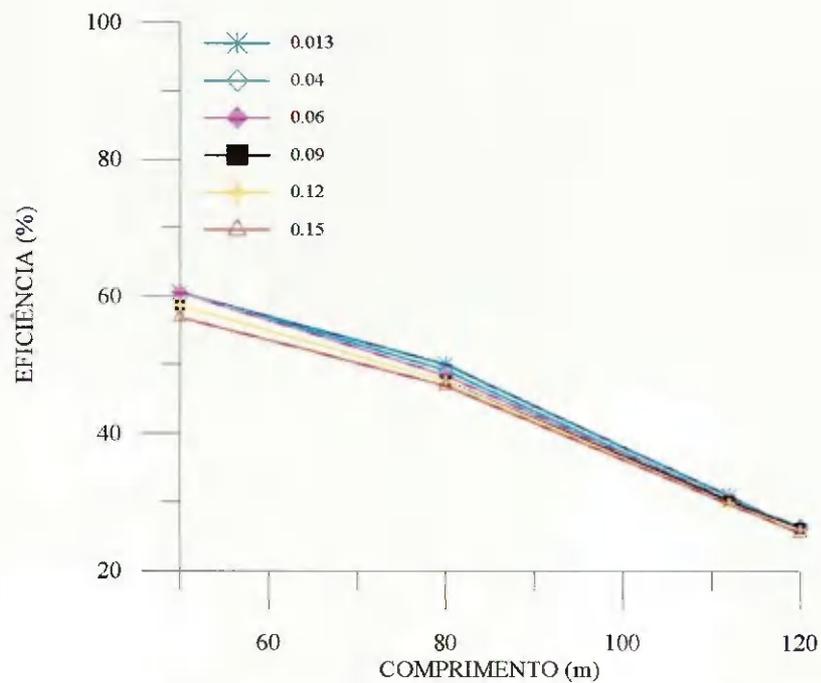


FIGURA 27. Efeito da rugosidade sobre a eficiência de aplicação, para o conjunto de dados do KNWF

Apesar da diferença existente no incremento com relação aos dois tipos de solos estudados pode-se perceber, que à medida em que aumenta a rugosidade ocorre uma redução na eficiência de aplicação proveniente do aumento nas taxas de percolação e taxa de escoamento. Para os dados do CNPA apresentados nas Figuras 28 e 30, verifica-se que as taxas de percolação mostram uma maior predominância, enquanto que para os dados do KNWF, (Figuras 29 e 31) ocorre o inverso, ou seja, a taxa de escoamento exibe maiores valores do que as taxas de percolação.

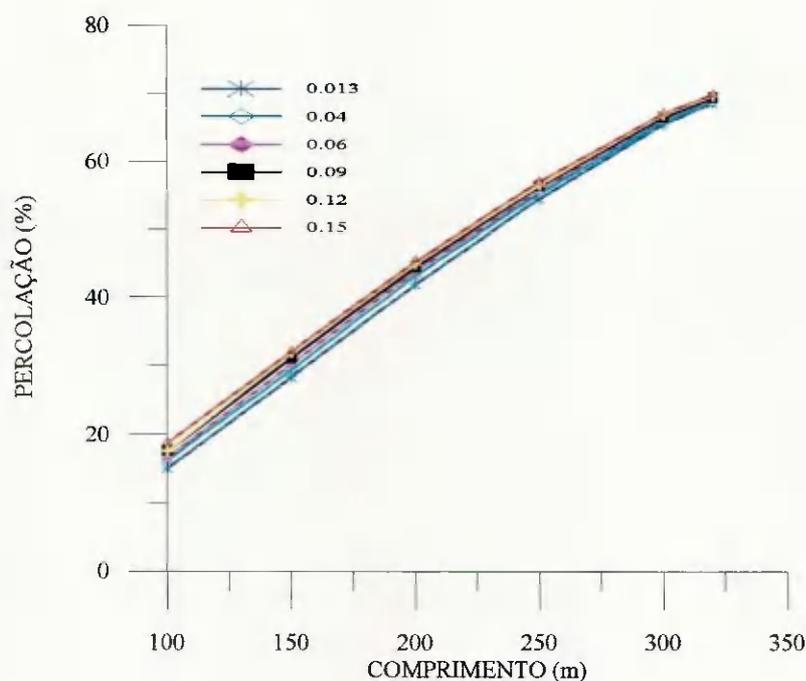


FIGURA 28. Efeito da rugosidade sobre a taxa de percolação, para o conjunto de dados CNPA

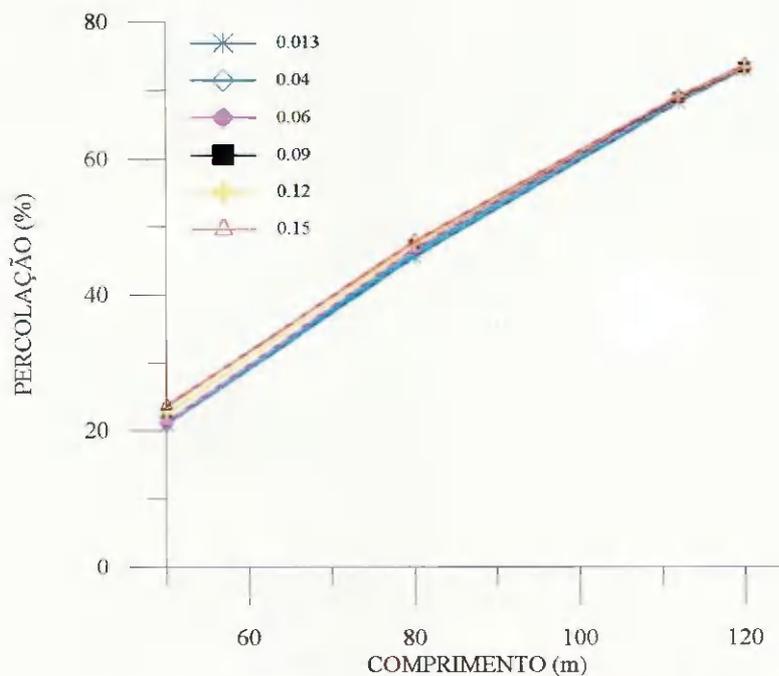


FIGURA 29. Efeito da rugosidade sobre a taxa de percolação, para o conjunto de dados KNWF

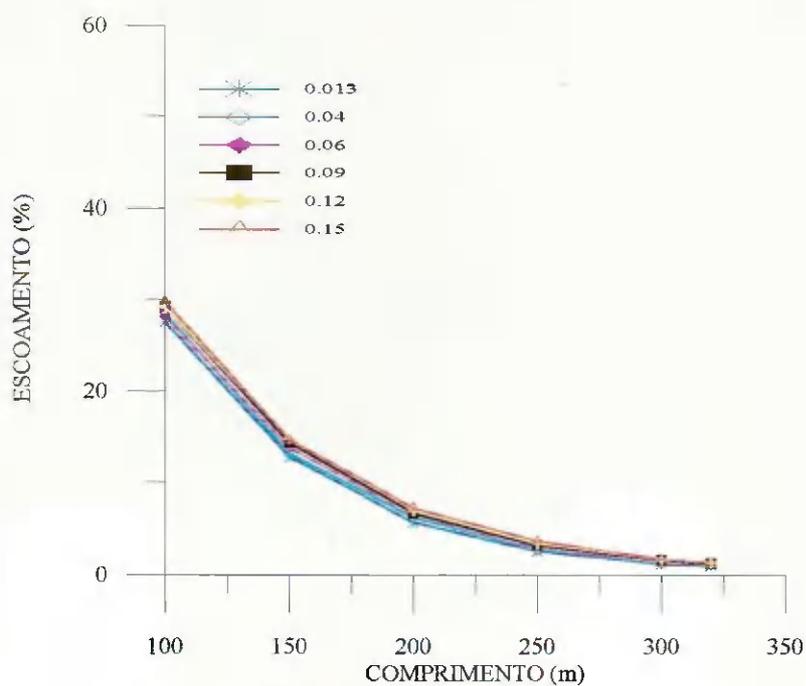


FIGURA 30. Efeito da rugosidade sobre a taxa de escoamento, para o conjunto de dados CNPA

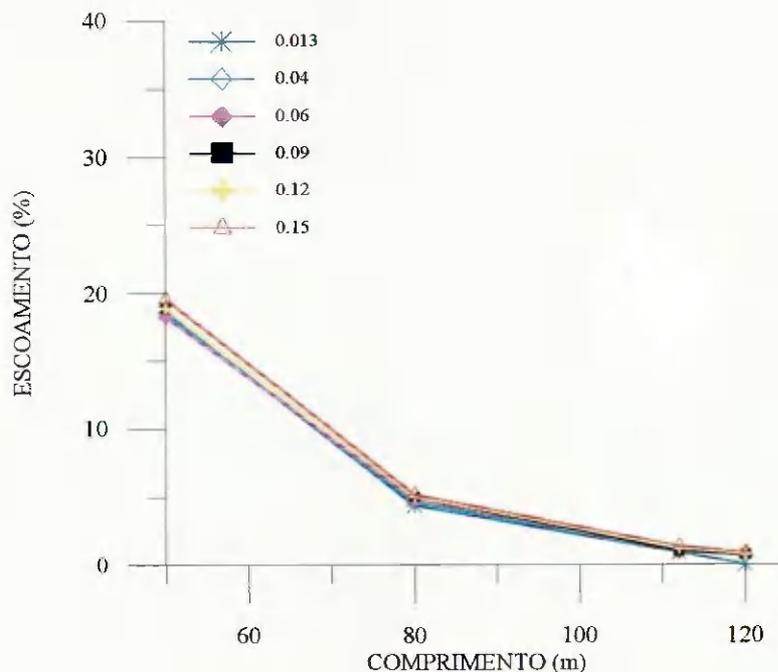


FIGURA 31. Efeito da rugosidade sobre a taxa de escoamento, para o conjunto de dados KNWF

4.3.4 Análise para Diferentes Declividades

As Figuras de 32 a 35 mostram as curvas de avanço e do desempenho do sistema para diferentes valores de declividade dos conjuntos CNPA e KNWF. As Figuras 32 e 34 mostram o comportamento espacial e temporal na fase de avanço, em função da variação do parâmetro de campo declividade e do parâmetro operacional tempo de aplicação.

Para o sulco CNPA (Figura 32), quando testou-se, na simulação, a variação da declividade 0,0015 m/m para 0,02 m/m, a vazão aplicada de 2,1 l/s, foi capaz de avançar na área até o final do sulco (300 m). O tempo de avanço nessa variação de declividade foi de 29 min. Esse incremento no tempo de avanço não resultou em variação na taxa de percolação, taxa de escoamento e eficiência de aplicação (Figura 33). O que não

é comum, haja visto que o gradiente altimétrico é um fator determinante no processo da fase de avanço, assim como o comprimento do sulco e a vazão a ser aplicada.

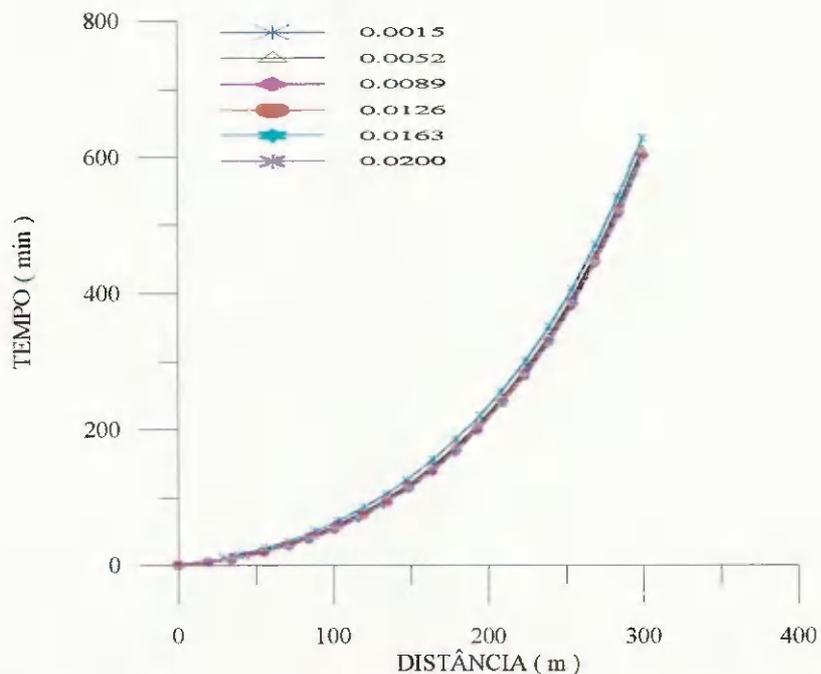


FIGURA 32. Efeito da declividades sobre a fase de avanço para o conjunto de dados CNPA

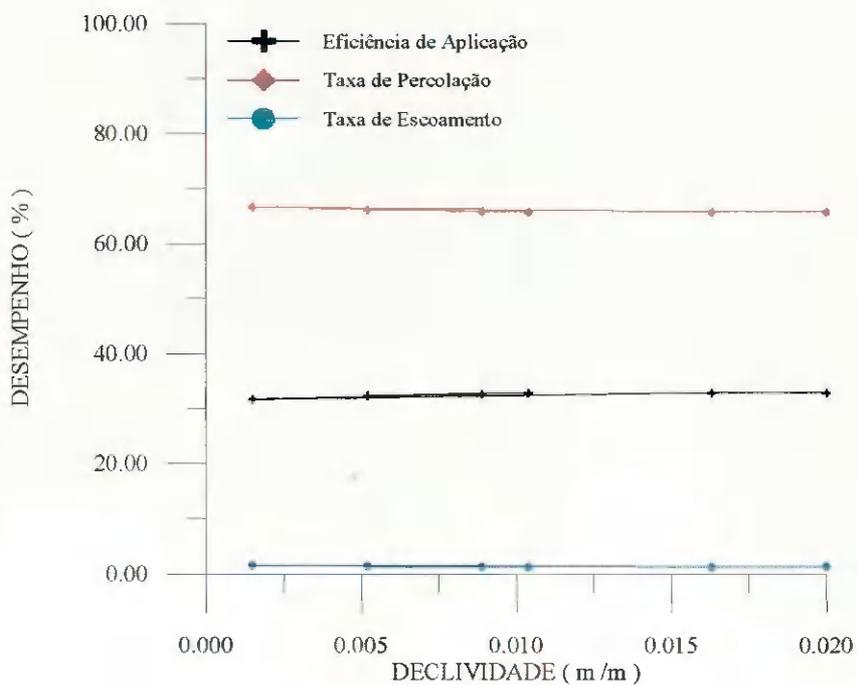


FIGURA 33. Efeito da declividade do sulco sobre o desempenho do sistema para o conjunto de dados CNPA

Para o sulco do conjunto de dados KNWF (Figura 34) , simulando-se a mesma variação de declividade dos dados CNPA, a vazão de 0,8 l/s foi suficiente para a água atingir o final da área. O tempo de avanço nessa variação de declividade foi de 6 min. Esse incremento no tempo de avanço não resultou em nenhum efeito na taxa de percolação, taxa de escoamento e eficiência de aplicação (Figura 35). Observa-se uma grande variação no tempo de avanço quando comparados os dados CNPA e KNWF (23 min). Isto ocorreu, provavelmente devido a diferença na textura, comprimento de sulco e vazão aplicada.

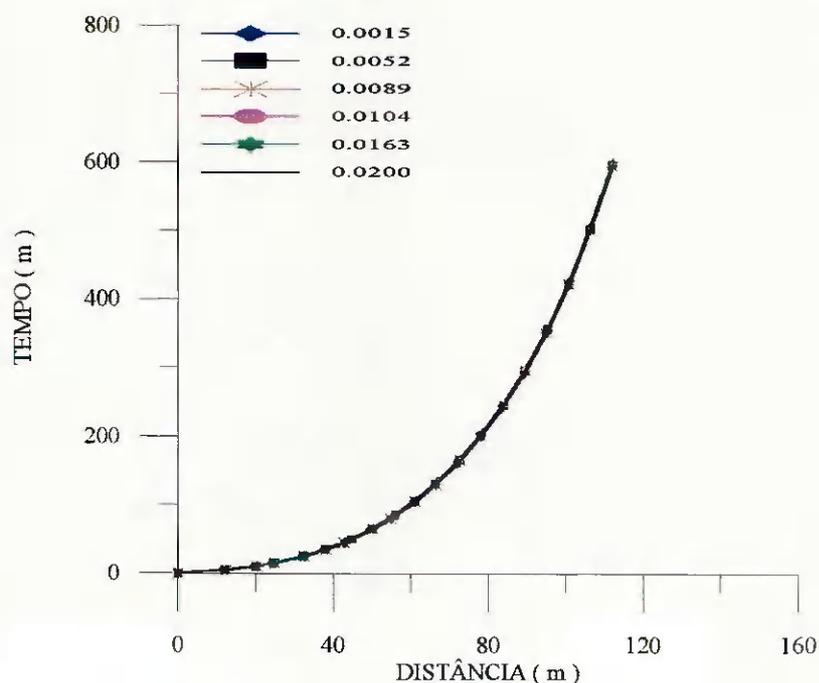


FIGURA 34. Efeito da declividade sobre a fase de avanço para o conjunto de dados KNWF

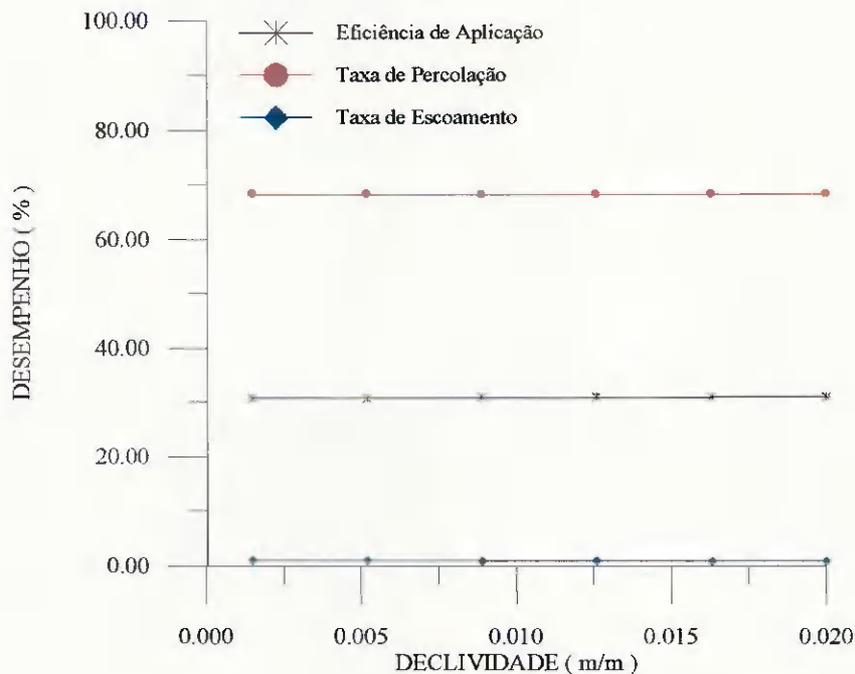


FIGURA 35. Efeito da declividade do sulco sobre o desempenho do sistema para o conjunto de dados KNWF

Carvalho & Soares (1988), estudando a eficiência de irrigação por sulcos ao nível de parcela no projeto Bebedouro, para diferentes declividades, obtiveram valores de eficiência de 53,52% para menor declividade e 33,10% para maior declividade, o que não foi observado no presente trabalho quando simulou-se os valores de declividades isoladamente. No entanto, quando testou-se na simulação, os mesmos valores de declividades associados aos diferentes comprimentos pôde-se verificar que a declividade mostrou um efeito na eficiência de aplicação, que variou de 4,1% com relação ao menor valor de comprimento testado e 1,1% para o menor valor para os dados do CNPA (Figura 36). Enquanto que, para os dados do KNWF esta variação foi entre 2,0 e 0,1% respectivamente (Figura 37). Isto ocorreu porque como a velocidade de infiltração depende diretamente da textura e estrutura do solo, e como os solos arenosos, devido a sua maior percentagem de poros grandes possuem maiores velocidades de infiltração isto favoreceu para que a água alcançasse o final da área em um período de tempo menor no

solo do CNPA (Franco-arenoso), o que contribuiu para que as perdas por percolação fossem menores (Figura 38), refletindo um maior incremento na eficiência de aplicação e consequentemente maiores perdas por escoamento (Figura 39).

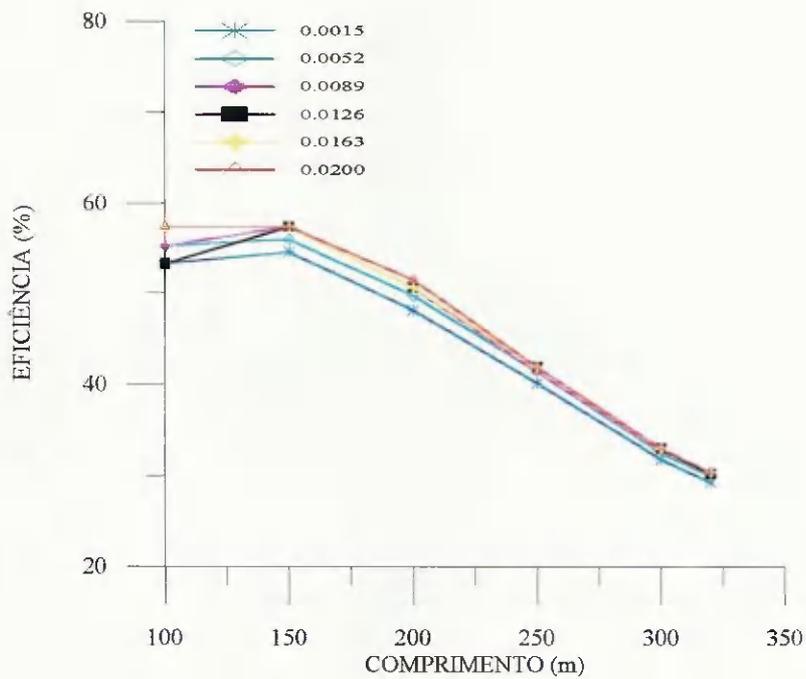


FIGURA 36. Efeito da declividade sobre a eficiência de aplicação, para o conjunto de dados CNPA

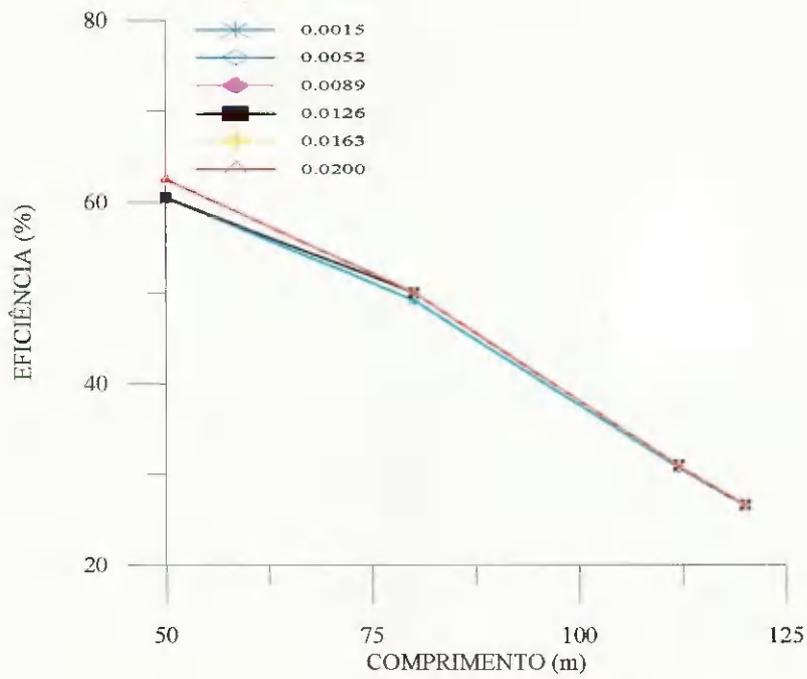


FIGURA 37. Efeito da declividade sobre a eficiência de aplicação, para o conjunto de dados KNWF

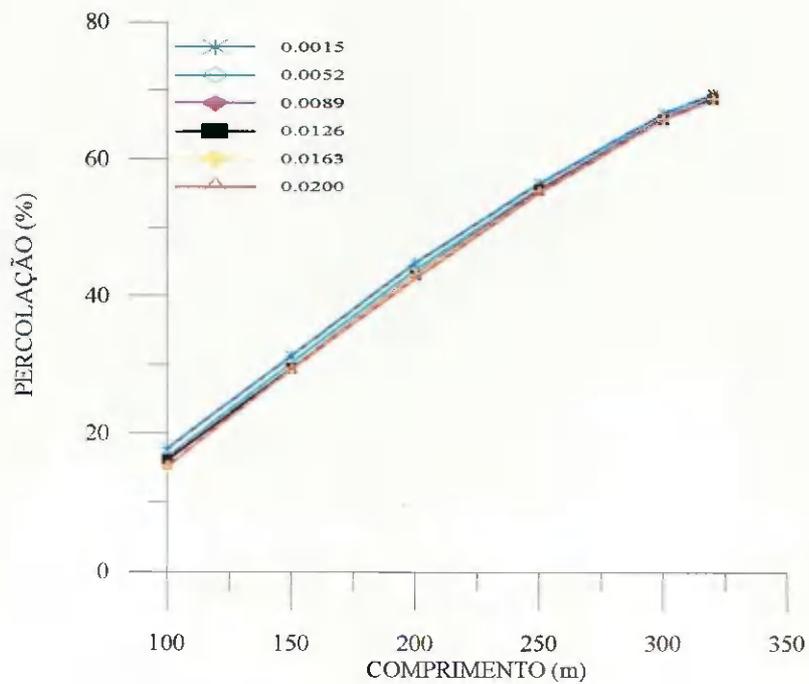


FIGURA 38. Efeito da declividade sobre a taxa de percolação, para o conjunto de dados CNPA

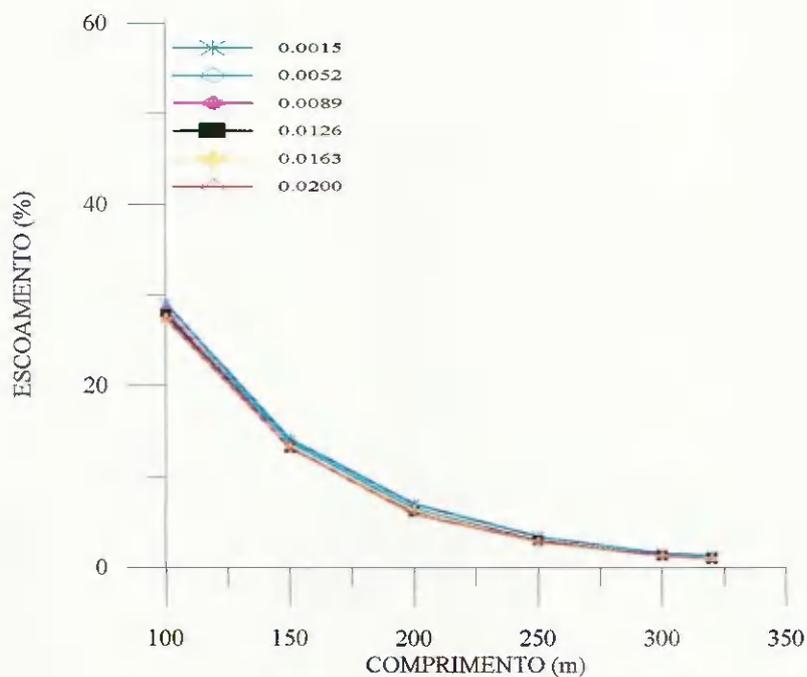


FIGURA 39. Efeito da declividade sobre a taxa de escoamento, para o conjunto de dados CNPA

No entanto para o solo KNWF (Franco-argilo-siltoso), devido a percentagem de microporos ser maior a velocidade de infiltração torna-se menor. Nesse caso, ao final do avanço, grande parte do comprimento da área revelará perdas significativas de água por percolação (Figura 40) reduzindo assim a eficiência de aplicação e as perdas por escoamento superficial (Figura 41).

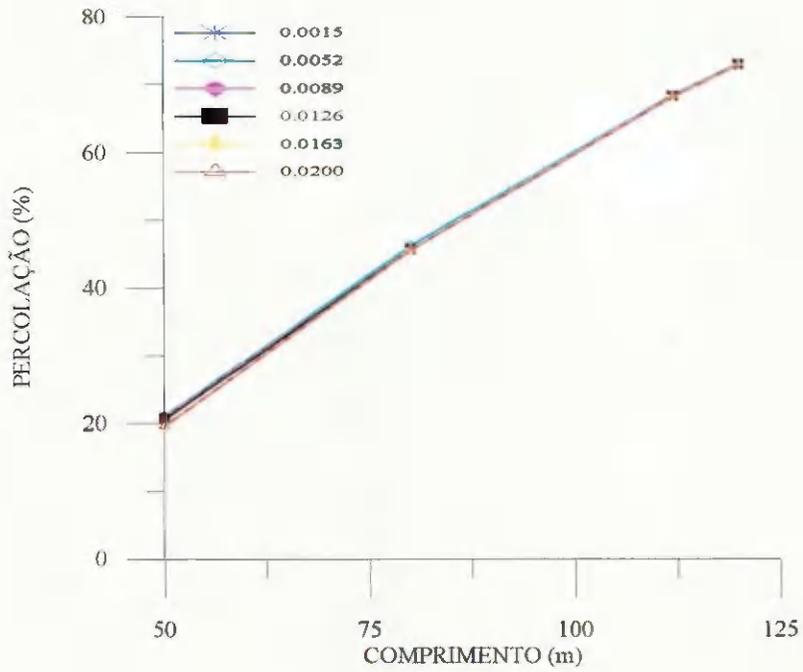


FIGURA 40. Efeito da declividade sobre a taxa de percolação, para o conjunto de dados KNWF

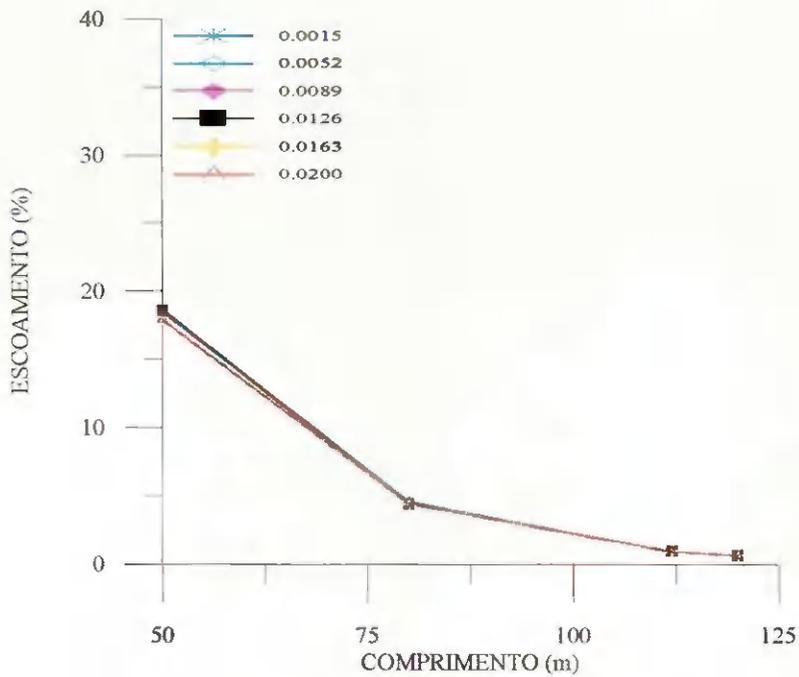


FIGURA 41. Efeito da declividade sobre a taxa de escoamento, para o conjunto de dados KNWF

4.3.5 Análise para Diferentes Seções Transversais

As Figuras de 42 a 45, representam as curvas de avanço e o desempenho do sistema para diferentes valores de seção transversal dos conjuntos CNPA e KNWF. Observa-se que o avanço (Figuras 42 e 43), não sofreu nenhum efeito com a variação nas dimensões da seção transversal, onde o tempo foi o mesmo para todos os valores testados; sendo de 605 min para os dados CNPA e 595 min para os dados KNWF.

Para o desempenho do sistema (Figuras 44 e 45), observa-se que este não sofreu influência com a variação da seção transversal, permanecendo com valores de eficiência de aplicação, taxa de percolação e taxa de escoamento, constante ao longo de toda a simulação.

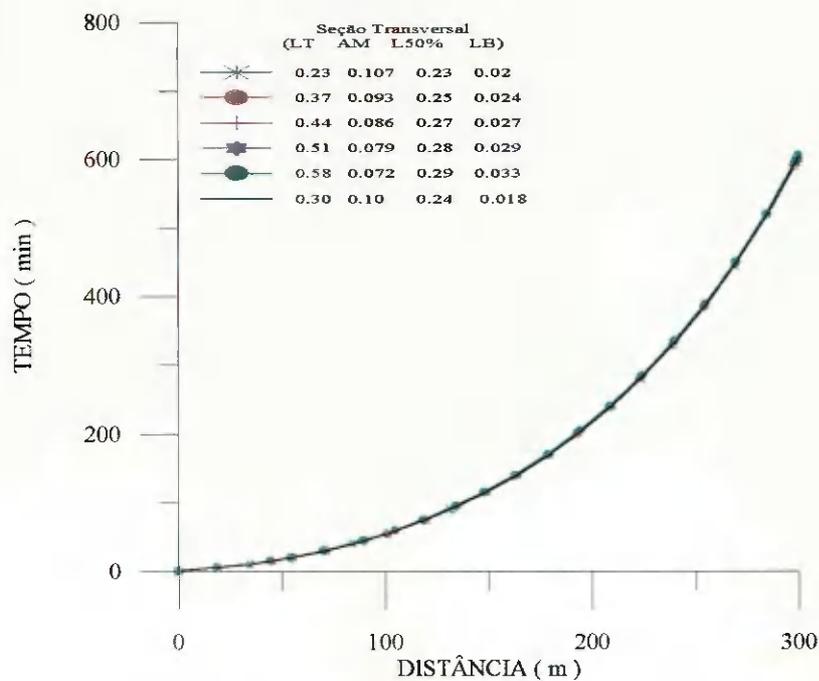


FIGURA 42. Efeito da seção transversal sobre a fase de avanço para o conjunto de dados CNPA

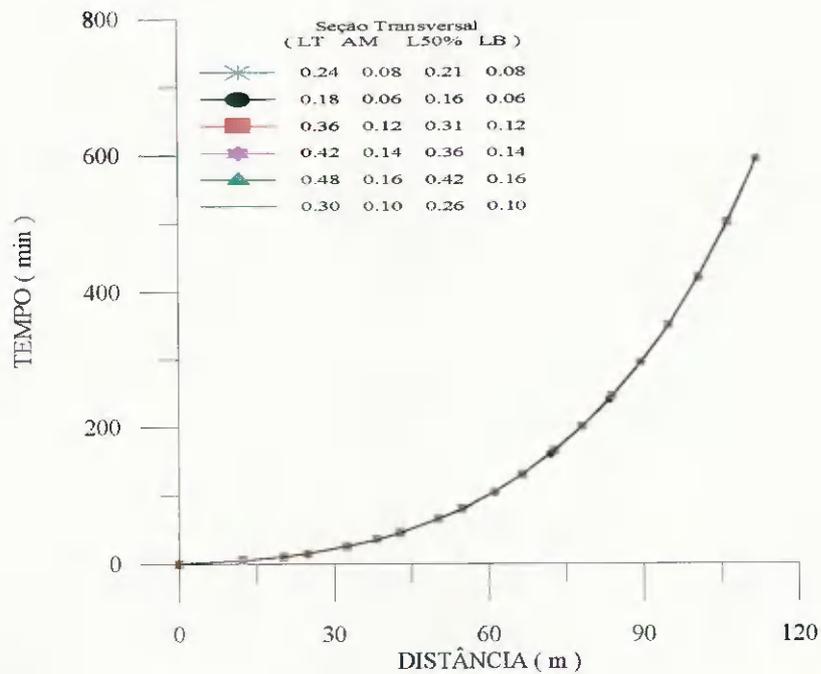


FIGURA 43. Efeito da seção transversais sobre a fase de avanço para o conjunto de dados KNWF

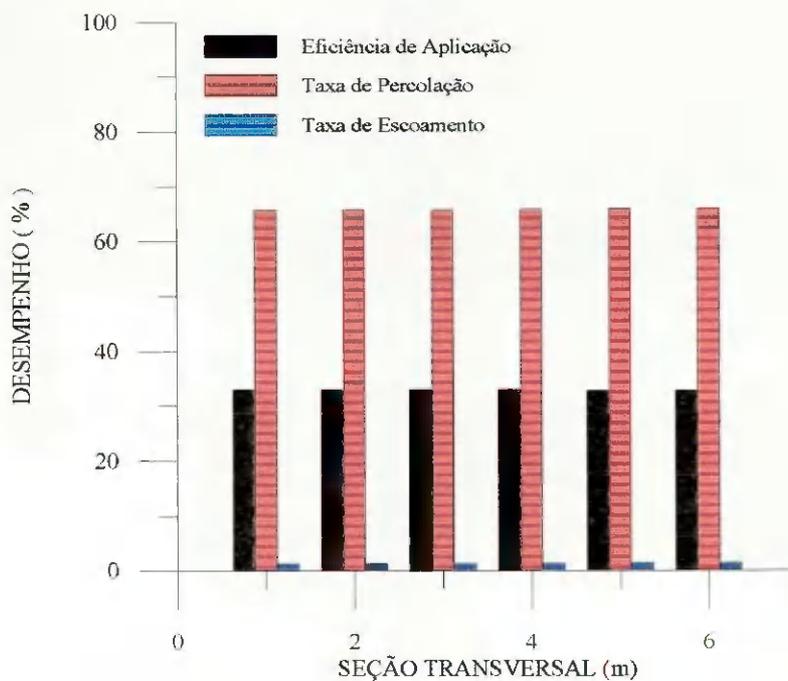


FIGURA 44. Efeito da seção transversal do sulco sobre o desempenho do sistema para o conjunto de dados CNPA

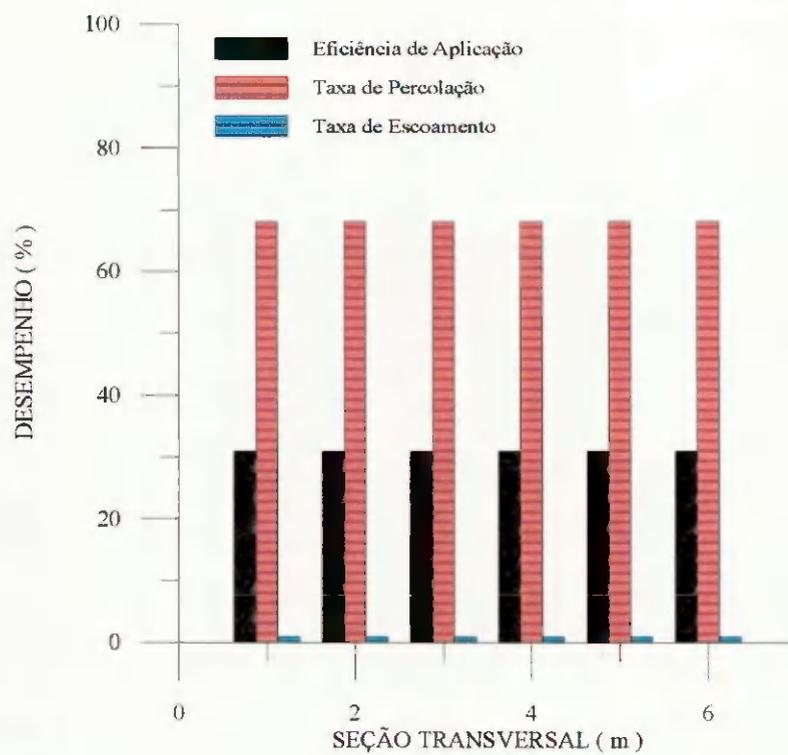


FIGURA 45. Efeito da seção transversal do sulco sobre o desempenho do sistema para o conjunto de dados KNWF

5 CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho permitiram as seguintes conclusões

- As características de infiltração do solo e o comprimento dos sulcos foram os parâmetros que mais afetaram o desempenho do sistema. Quando a infiltração acumulada diminuiu de 0,168 m³/m para 0,094 m³/m a eficiência de aplicação aumentou de 32,9 para 60,5%, e de 30,9 para 60,9%, respectivamente, nos solos CNPA e KNWF. Para o solo de textura franco-arenosa, quando o comprimento aumentou de 100 para 300 m, a eficiência de aplicação diminuiu de 55,3 para 32,9%, enquanto que para o solo franco-argilo-siltoso com um aumento no comprimento de 50 para 112 m, a eficiência caiu de 60,5 para 30,9%.
- Para as condições de campo em questão, os efeitos isolados da rugosidade, da declividade e da seção transversal, no desempenho do sistema, foram muito pequenos. Entretanto, os efeitos da rugosidade e da declividade foram melhor visualizados quando associou-se a eles o efeito do comprimento.

- Os parâmetros de campo afetam muito mais a taxa de percolação que a de escoamento superficial. Isto mostra a importância de exercer um controle sistemático na fase de avanço, considerando que essa fase é o fator que mais contribui para as perdas por percolação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, D. V. ; BOTREL, T.A.; FRIZZONE, J.A. **Modelo matemático para simulação da fase de avanço na irrigação por sulcos.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 23, 1994, Campinas. SBEA 1994.
- AZEVEDO, H. M. **Características da infiltração em sulcos abertos e fechados.** Campina Grande, 1975. 62p (Mestrado em Irrigação e Drenagem). Universidade Federal da Paraíba.
- AZEVEDO, H. M. ; SAMPAIO, F. M. A. S. & AZEVEDO, N. C. **Metodologia para dimensionamento de sulco fechado no final.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 12, 1982, Anais Ilheus SBEA, 1982.
- AZEVEDO, C. A. V **Real - time solution of the inverse furrow advance problem.** Utah: S. Ed. 1992 263p. Tese (Doutorado) - Universidade de Utah.
- AZEVEDO, C. A. V. **Modelagem em sistemas de checagem e controle de irrigação por sulcos.** In: XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22, 1993, Anais Bahia: SBEA, 1993.
- BARRETO, A. N. & FORMIGA, L. A. **Introdução e Avaliação Técnico-econômico do Manejo de Irrigação por Bacias em Nível.** In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGROPECUÁRIA INOVADORA PARA O NORDESTE, Fortaleza, 1986. Anais Fortaleza: BNB, 1986. p. 43-45.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação.** 4. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1986. 488p.
- BOWMAN, J. A. Irrigation in Midwest: Lessons from Illinois. **Irrigation Journal and Drainage Engineering, ASCE** 1991. v.117, n. 5, p. 700-715.
- CARVALHO, D. F. de; OLIVEIRA, L. F. C. de; PRUSKI, F. F.; SOARES, A. A. & MANTOVANI, E. C. **Influência do perfil geométrico do sulco no desempenho da irrigação.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA 24, 1995, Viçosa, SBEA, 1995.

- CARVALHO, D. F.; SOARES, A. A.; RAMOS, M. M. & MARTINS, J. H. **Simulação das fases de avanço e recessão nas irrigações contínuas e intermitente, utilizando o modelo zero-inércia.** Engenharia na Agricultura, Série Irrig. e Drenagem / Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais. v. 3, n. 37, 1994.
- CARVALLO, H. O. G. & SOARES, M. **Eficiência de irrigação por sulcos ao nível de parcela no sistema irrigado de Bebedouro.** Petrolina, Pernambuco. EMBRAPA - CPATSA, 1988. Circular técnica 18.
- DAKER, A. **Irrigação e Drenagem; A água na agricultura.** 7.ed. Rio de Janeiro: Livraria Freitas Bastos, 1988. v.3.
- EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de solo. Rio de Janeiro.** SNLCS, 1979. 235p.
- FEDERACION NACIONAL DE ALGODONEROS. Bogotá, D. E. Bases técnicas para el cultivo del algodón en colombia. Bogotá, 1990. 714p.
- GRASSI, C. J.; FERNANDEZ, P. C. & PONCE, I. **Velocidade de avance del frente de agua en los surcos de riego.** Revista de investigaciones Agropecuarias, Buenos Aires, 1965. v. 2 n. 2 p.11-34.
- GRASSI, C.J. **Métodos de riego.** CIDIAT. Documento 72. Mérida, Venezuela: 1972. 270p.
- GRASSI, C.J. **Diseño y Operación del Riego por Superficie.** CIDIAT Série RD,36, Mérida, Venezuela, 1988. 415p.
- HILLEL, D. **Soil and water: Physical principles and processes.** New York: Acadêmic Press, 1971. 288p.
- ISRAELSEN, O.W.; HANSEN, V.E. **Princípio Y Aplicaciones Del Riego.** Barcelona: 2ª ed., Recerté, 1965. 396p.
- LEAL, M.V.P.; BERNARDO, S.; COELHO, M.B. & F, P.A. **Determinação da eficiência de irrigação, ao nível de parcela, no projeto de irrigação Bebedouro-Petrolina, Pe.** Rev. Ceres, Petrolina, v.27 n.149, p.66-82, 1980.
- LEVIEN, S.L.A. & SOUZA, F. Algebraic computation of flow in furrow irrigation. **Journal of the Irrigation. and Drainage Engineering, ASCE,** v.113, n.3, p.367-378. 1987.
- MANUAL de Irrigação. São Paulo, Abril, 1991. 170p.
- MILLAR, A. A. Efecto del Deficit de Água en Diversos Periodos do Ciclo de Crescimento sobre os Rendimentos de Alguns Cultivos. S. L., MINTER/ICA, S.d.-SP.
- MOLLE, F.; CADIER, E. **Manual do pequeno açude,** Recife 1992.

- OLITTA, A. F. L. **Os métodos de irrigação.** São Paulo: Ed. Nobel, 1977, 267p.
- PEREIRA, G. M. **Estudo das características de avanço e infiltração da água contínua e intermitente.** Viçosa, 1991. 79p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e drenagem) - Universidade Federal de Viçosa.
- PRUSKI, F.F.; CARVALHO, D.F.de; SOARES, A.A.; CECON, P.R.; STAFFEN, G.J. **Influência da área adequadamente irrigada por sulco nas eficiências de aplicação e armazenamento, para um latossolo vermelho-escuro.** Engenharia na Agricultura Série Irrigação e Drenagem. v.3, n.38, Dezembro, 1994.
- PORDEUS, R. V. **Estudo de parâmetros para a avaliação de irrigação por sulcos abertos em declive utilizando um modelo algébrico.** Fortaleza, 1990. 151p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal do Ceará.
- PORDEUS, R. V. & SOUZA, F. **Application of an algebraic model of furrow irrigation.** Proceedings of the IV International Conference on Desert Development. "Sustainable development for our common future". Ed.by. Montecillo, Edo. de México: Colegio de post graduados en Ciências Agrícolas. Instituto de Recursos Naturais, 1994. 576p.
- RIVERA, R.C.;CASTRO, L.C. A. de & SOUZA, F. de **Variação dos parâmetros de infiltração na irrigação por sulco ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura do feijão (*Vigna unguiculata L. walp*).** In:CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA 24, 1995, Viçosa, SBEA, 1995.
- RIVERA, R.C.; SOUZA, F. de & TEIXEIRA, A. dos S. **Simulação da Irrigação por Sulco Utilizando o método de Balanço de volume** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24, 1995, Viçosa: SBEA 1995.
- SANTANA, E. F. **Monitoramento Sazonal do Desempenho de um Sistema de Irrigação por Sulco no Perímetro Irrigado de São Gonçalo-PB.** Campina Grande, 1996. 96p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal da Paraíba.
- SARAIVA, J.O.C. **Parametrização do método de irrigação por sulcos no vale do Açúcar-RN.** Campina Grande, 1986. 82p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) Universidade Federal da Paraíba.
- SCALOPPI, E. J. **Solução temporal do avanço da água em sistemas de irrigação por superfície.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA,24, 1995,Viçosa: SBEA 1995.
- SCALOPPI, E. J. **Sistema de irrigação por superfície.** Informe Agropecário. Belo Horizonte. v. 12, n. 139, p. 12-26. 1986.

- SCALOPPI, E.J. **Potencial para Redução do Consumo Energético em Irrigação** In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 7. Brasília, 1986. Anais Brasília: ABID, 1986, p. 844-850.
- SHANK, B. F. Irrigation Survey. **Irrigation Journal**, 1991. v 1, n 42, p. 19-26.
- SILVA, M. A. **Caracterização de um sistema de irrigação com sulcos fechados no final num regossolo**. Campina Grande, 1987. 90p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal da Paraíba.
- SOARES, J. M. **Avaliação de sistemas de Irrigação por Sulcos**. 1987. Mimeografado.
- SOUZA, F. **Modelo matemático da irrigação por sulcos**. Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.19, n.9, p. 1135-1143. 1984.
- TROUT, T. J. Furrow geometric parameters *Journal of irrigation and drainage engineering*, New york, 1991. v.117, n.5, p. 613-634.
- VIEIRA, H. A.; BERNARDO, S.; THIEBAUT, J. T. L.; VALENTE, O. F.; Comportamento de quatro infiltrômetro na determinação da velocidade básica da água no solo.
- WALKER, W. R.; & HUMPHERYS, A. S. Kinematic-wave Furrow Irrigation Model. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, v.109, n 4 1983.
- WALKER, W. R.; SKOGERBOE, G. V.. **The theory and practice of surface irrigation engineering**. Longan, Utah: 1984. 470p.
- WINTERS, B. & VIPOND, **Irrigação: Projeto e prática**. Tradução de Francisco da Costa Verdade. São Paulo: EPU, 1977. 339p. Tradução de : Irrigation: Desining and practice