

MOVIMENTO DE ÁGUA EM SOLOS DOS TABULEIROS DO NORDESTE

ELIANE NOGUEIRA DE QUEIROZ
Engenheiro Agrônomo
Pesquisador da EMBRAPA

PROF. DR. KLAUS REICHARDT
Orientador

Dissertação apresentada à Escola Superior
de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Univer-
sidade de São Paulo, para obtenção do
título de Mestre.

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Dezembro 1975

À memória de meu pai,

*À minha mãe,
que não mediu sacrifícios
para a formação de seus filhos.*

MINHA HOMENAGEM

*Aos meus irmãos, sobrinhos e cunhados
que sempre acreditaram em mim.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Expresso meus agradecimentos a todos aqueles que irmanados em pensamento e ação, me ajudaram e contribuíram para ampliar meus conhecimentos, estimulando-me a um aprimoramento constante e, em especial, as seguintes pessoas e instituições:

- Dr. Klaus Reichardt, cuja experiência, orientação e incentivo transmitiu grande acervo de conhecimentos, sem os quais não teria sido possível a realização deste trabalho.
- Prof. Luiz Bezerra de Oliveira que me fez despertar para o estudo da Física do Solo e pelos conselhos amigos em minhas indecisões.
- Dr. Epaminondas Sansão de Barros Ferraz pela ajuda referente a metodologia empregada e constante estímulo.
- M.S. Paulo Leonel Libardi pelas críticas e sugestões durante a revisão deste trabalho.
- Eng^o Agr^o Valdemir de Melo que contribuiu na coleta dos perfis dos solos utilizados.
- Colegas Ivan Guerrini, João Antonio Siqueira Neto e Sandra Queiroz que colaboraram na parte experimental de laboratório.

- A bibliotecária Sônia Correa da Rocha, pela re
visão das citações bibliográficas.
- Funcionários Cleusval Bissi e Alfredo José
Ferraz de Melo pelos serviços de datilografia
e Benedito Herculano Davanzo e Luiz Cesar Zam-
bello, pela presteza e serviço de imprensa.
- Funcionários da Biblioteca Central da ESALQ pe-
las atenções e eficiente dedicação.
- EMBRAPA por ter concedido a oportunidade de rea
lização do curso e ajuda financeira.
- Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"
e Centro de Energia Nuclear na Agricultura pe-
las facilidades oferecidas para realização des-
te trabalho e excelente acolhida.

C O N T E Ū D O

	<u>Página</u>
LISTA DE QUADROS	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
1. INTRODUÇÃO	01
2. REVISÃO DA LITERATURA.	03
2.1. Generalidades sobre a região dos Tabulei- ros Costeiros	03
2.2. Infiltração em solos homogêneos	08
3. TEORIA	12
4. MATERIAL E MÉTODOS	19
4.1. Generalidades	19
4.2. Preparo e acondicionamento dos solos. . .	20
4.3. Determinação da umidade e densidade glo- bal dos solos	21
4.4. Procedimento experimental durante a infil- tração	22
4.5. Difusividade da água e condutividade hi- dráulica.	25
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
5.1. Infiltração horizontal e vertical	26
5.2. Relação entre a infiltração vertical e ho- rizontal	32

	<u>Página</u>
5.3. Perfis de umidade	35
5.4. Condutividade hidráulica e difusividade da água	37
6. CONCLUSÕES	43
7. RESUMO	45
8. SUMMARY	47
9. LITERATURA CITADA	49

LISTA DE QUADROS

<u>QUADRO</u>		<u>Página</u>
01	- Características dos solos Areias Quartzosas, Latosol Vermelho Amarelo Distrófico e Podzólico Vermelho Amarelo latossólico	27
02	- Equações das difusividades da água dos solos Areias Quartzosas, Latosol Vermelho Amarelo Distrófico e Podzólico Vermelho Amarelo latossólico	40
03	- Equações da condutividade hidráulica dos solos Areias Quartzosas, Latosol Vermelho Amarelo Distrófico e Podzólico Vermelho Amarelo latossólico	41

LISTA DE FIGURAS

<u>FIGURA</u>		<u>Página</u>
01	- Esquema da geometria utilizada na colimação da radiação gama	23
02	- a) Visão geral do conjunto geometria-equipamento de contagem; b) Medida em coluna horizontal e c) Medida em coluna vertical.	24
03	- Distância da fonte de água à frente de molhamento versus raiz quadrada do tempo para infiltração horizontal dos horizontes dos solos AQ, PVA1 e LVA	30
04	- Distância da fonte de água a frente de molhamento versus raiz quadrada do tempo para infiltração vertical nos horizontes dos solos AQ, PVA1 e LVA	31
05	- Relações entre as distâncias adimensionais (para X e Z = 1) do avanço da frente de molhamento da infiltração vertical e horizontal dos horizontes dos solos AQ, PVA1 e PVA	33
06	- Perfis de umidade a diferentes tempos durante a infiltração horizontal nos horizontes do solo Areias Quartzosas	36

FIGURA

Página

07	- Perfís de umidade a diferentes tempos durante a infiltração horizontal nos horizontes do solo Podzólico Vermelho Amarelo latossólico	38
08	- Perfís de umidade a diferentes tempos durante a infiltração horizontal nos horizontes do solo Latosol Vermelho Amarelo Distrófico	39

1. INTRODUÇÃO

O estudo das relações solo-água-planta é de grande relevância para a pesquisa agronômica, uma vez que a água necessária para atender aos processos fisiológicos dos vegetais chega a eles via solo.

Em uma cultura o ciclo da água tem como fase principal sua penetração no solo através do processo de infiltração, com posterior armazenamento temporário na zona do sistema radicular e subsequente remoção do solo por meio da evapotranspiração e da drenagem para camadas mais profundas.

As experiências têm demonstrado que o estado físico-hídrico de um solo não é estático. Há uma permanente variação deste estado, o qual interfere na produtividade do solo.

O estudo físico-hídrico do solo é de fundamental significância na sua caracterização e na elucidação de certos problemas vinculados à fertilidade e à produtividade.

Considerando os solos dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste do Brasil, a disponibilidade de água e a fertilidade constituem os fatores mais críticos para a determinação das práticas agrícolas e tipos de culturas adequadas à utilização racional desses solos.

Para compreensão do movimento da água nos solos e estimativas das variações dos conteúdos de umidade, influenciados pelas precipitações pluviométricas, águas de irrigações, evapotranspirações e drenagens é necessária uma descrição dos processos físicos envolvidos.

O presente trabalho tem como objetivo complementar a caracterização hídrica de perfís representativos dos solos Areias Quartzosas, Podzólico Vermelho Amarelo latossólico e Latosol Vermelho Amarelo Distrófico, os quais ocorrem nos Tabuleiros, aplicando a teoria que descreve o fluxo da água no solo, através do estudo dos processos de infiltração horizontal, vertical e relação entre ambos, como também, a determinação dos parâmetros hídricos, condutividade hidráulica e difusividade da água, fundamentais na descrição do movimento da água e da solução do solo.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Generalidades sobre a região dos "Tabuleiros Cos teiros"

A produção de gêneros alimentícios, nas zonas úmidas e sub-úmidas do Nordeste do Brasil, não é suficiente para atender à demanda de sua população.

A disponibilidade de terras agrícolas, com boas características, foi estimada por *LAROCHE (1963)* em 1.05 ha por habitante. Este fato tem levado órgãos governamentais a estabelecer intensos programas de desenvolvimento agropecuário, a fim de expandir a exploração des-

tas áreas. Dentro desta perspectiva surge, com ênfase especial, a região fisiográfica denominada "Tabuleiros Costeiros".

Os trabalhos de pesquisa sobre os atributos agromômicos da região dos Tabuleiros, segundo *LAROCHE (1967)*, tiveram início a partir de 1961, com um vasto programa técnico-experimental, com a finalidade de intensificar a oferta de terras agricultáveis.

Em princípio, os conceitos atribuídos à região dos Tabuleiros estão fundamentados, principalmente, na sua origem geológica, condições climáticas reinantes e no tipo de vegetação dominante.

MORAES (1962), *LINS & ANDRADE (1960)*, consideram os Tabuleiros, do ponto de vista geológico, constituídos do topo da formação Barreiras, a qual se exteriorizou na faixa litorânea do terciário e quaternário, desde a Bahia ao Maranhão, através de planalto com 35 a 130 m de altitude.

Segundo *QUINTAS (1970)* o Grupo Barreiras é definido geologicamente por depósitos clásticos de granulação grosseira a fina, composto de argilas, siltitos, arenitos e conglomerados, pouco consolidados, com uma coloração variando de róseo à vermelho arroxeado.

Do ponto de vista climático, para *FOURY (1966)*, os Tabuleiros constituem uma subdivisão da zona climática denominada Zona Litorânea, que se caracteriza por um clima tropical úmido, porém com uma estação seca bem definida e geralmente quente.

Baseado no sistema de classificação de Köppen, *SERRA (1960)* considera que os tipos climáticos dominantes nos Tabuleiros são: Af, Am, Ams', As' e Aw'.

TAVARES (1964), realizando estudos relativos à vegetação nativa dos Tabuleiros, sob aspectos da Botânica Econômica e Botânica Agrícola, efetuou uma pesquisa sobre os Tabuleiros baseado, simultaneamente, na Geologia da região e Ecologia Vegetal, descrevendo-os como: campos - cerrados, os quais constituem lugares planos, cobertos de vegetação herbácea com árvores esparsas, cuja ocorrência se verifica no topo da formação Barreiras. Porém, ressalta que seus estudos se acham em fase preliminar não podendo afirmar que o aspecto de campo - cerrado, seja uma característica própria dos Tabuleiros, pelo fato de poder encontrar esta vegetação na zona da caatinga e em planícies costeiras.

De acordo com *LIMA (1965)*, a cobertura vegetal desta região é caracterizada por um revestimento do tipo savana com aspectos semelhantes aos cerrados do sul e centro do país.

Os solos que ocorrem nos Tabuleiros, em um prévio reconhecimento pedológico, *RANZANI et alii (1962)* classificou-os ao nível de Grande Grupo como Litosolos, Regosolos e Latosolos. Entretanto, a Divisão de Geologia da SUDENE fez restrições, quanto à ocorrência dos Litosolos, sugerindo que estes são Regosolos e Latosolos com capeamento aluvial de areia.

Segundo *LAROCHE (1967)*, a região fisiográfica dos Tabuleiros Costeiros compreende cerca de 700.000 a 1.000.000 hectares, estendendo-se desde a fronteira da Bahia com o

Espírito Santo até a fronteira do Maranhão com o Pará. Analisando as pesquisas agrícolas realizadas no período de 1961 a 1966, este autor considera como fatores favoráveis ao uso agrícola da região compreendida entre a Foz do rio São Francisco e Natal (RN), as condições topográficas, textura e drenagem, (as quais permitem mecanização em qualquer época do ano), temperatura média anual (em torno de 26°C , com variação menor que 10°C), precipitação pluviométrica média anual (de 700 - 2.100 mm, sendo 80% no período de março-agosto e 20% no período de setembro-fevereiro. O mesmo autor ressalta ainda que com relação à evapotranspiração, segundo o método de *THORNTWAITE*, os dados médios de Goianinha (RN), Rio Tinto (PB), Goiana (PE) e Maceió (AL), revelam uma deficiência anual de água de 294 a 722 mm no período de setembro-março e um excesso de 98 - 823 mm no período de abril-agosto e também que a infra-estrutura é favorável em termos de rodovias pavimentadas e linhas de eletrificação; no entanto, enfatiza que um dos principais fatores limitantes da produção agrícola é a baixa fertilidade dos solos e regime hídrico para culturas com ciclo vegetativo superior a seis meses.

HAYNES (1970) efetuou um levantamento sobre as pesquisas realizadas nos Tabuleiros e verificou que dentro dos problemas agrônômicos a pesquisar, a natureza dos solos constitui fator relevante na limitação da produção agrícola, em virtude da baixa capacidade de retenção de água e disponibilidade de nutrientes às culturas.

As pesquisas preliminares sobre os solos dos Tabuleiros foram voltadas principalmente para os problemas de fertilidade como os experimentos desenvolvidos por *SILVA et alii (1967)*, *SUDENE (1967b)* a fim de estudar a adubação com NPK e micronutrientes na cultura de amen-

doim, *SUDENE (1967a)*, buscando informações sobre a viabilidade do emprego de macronutrientes na cultura do inhame, *SUDENE (1967c,d)*, pesquisando sobre os efeitos da calagem, comportamento de adubos de ação rápida e lenta e escolha de sistema adequado de exploração do solo com a cultura do feijão mulatinho e algodão herbáceo, *SILVA et alii (1968, 1969)*, investigando sobre a ação de macronutrientes com a cultura de abacaxi e macronutrientes e manjericão na cultura de mandioca, *SUDENE (1971b)*, buscando informações sobre a adubação NPK na cultura de mamona e sorgo e outros estudos ligados a fertilidade.

Posteriormente, *OLIVEIRA & MELO (1970a,b)* apresentam dados morfológicos, físicos, químicos e climáticos de perfis típicos da Unidade Utinga, fornecendo uma avaliação da potencialidade agrícola destes solos, como também, estudos físico-hídricos da Unidade Itapirema, e concluem que através do emprego de práticas adequadas de motomecanização e irrigação, os solos podem ter melhor aproveitamento agrícola. Estas unidades são bastante extensas e ocorrem na região dos Tabuleiros, respectivamente, nos Estados de Pernambuco e Alagoas e município de Goiana em Pernambuco.

OLIVEIRA & QUEIROZ (1973), desenvolveram trabalho sobre curvas características de retenção de água, a fim de complementar a caracterização físico-hídrico dos solos das Unidades Itapirema, Utinga e Aliança.

OLIVEIRA & OLIVEIRA (1975) estudaram a relação entre a precipitação pluviométrica e a perda de minerais solúveis por lixiviação em solos pertencentes as Unidades Itapirema, Utinga e Areias Quartzosas.

A *SUDENE (1971a)*, prosseguindo em seus trabalhos de pesquisa sobre os Tabuleiros, firmou convênio com o Ministério da Agricultura através do Instituto de Pesquisa Agropecuária do Nordeste, designando ao Laboratório de Física do Solo a caracterização físico-hídrica das principais Unidades de solo, localizadas na região dos Tabuleiros, compreendida entre os Estados de Alagoas e Rio Grande do Norte.

Dentro da programação foram executados os seguintes planos de pesquisa: Capacidade de armazenamento d'água em solos dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste, Estudo de Adensamento das Unidades Itapirema e Utinga, Estudos preliminares sobre o controle de profundidade e penetração de raízes no solo.

Os resultados obtidos destes trabalhos de pesquisa fornecem subsídios para uma maior constatação de que os estudos físicos e hídricos destes solos são de grande importância para elucidar certos problemas vinculados à sua fertilidade e produtividade.

2.2. Infiltração em solos homogêneos

Muitos pesquisadores, ao considerarem a importância do movimento e armazenamento da água no solo, vem se dedicando ao estudo do processo de infiltração e determinação de parâmetros hídricos como a condutividade hidráulica e a difusividade da água, fundamentais na determinação do fluxo da água no solo.

Para melhor entendimento dos fenômenos envolvi-

dos na dinâmica da água no solo as pesquisas, a princípio, foram desenvolvidas em laboratório com amostras homogêneas, a fim de obter informações que auxiliassem na compreensão dos problemas que se processam em condições de campo.

Em solo saturado o movimento da água tem sido descrito pela tradicional equação de *DARCY (1856)*. Posteriormente, esta equação foi estendida por *BUCKINGHAM (1907)* para solos não saturados. *RICHARDS (1931)*, combinando a equação de Darcy com a equação da continuidade forneceu elementos para intensificar as pesquisas sobre o processo de infiltração. Teoricamente as investigações foram realizadas por *KLUTE (1952)*, *PHILIPS (1955)*; *KLUTE et alii (1965)*, *PARLANGE (1971, 1973)* em experimentos de laboratório, por *DAVIDSON et alii (1963)*, *KLUTE et alii (1965)*, etc.; e em experimentos de campo por *NIELSEN et alii (1961)*; *NIELSEN et alii (1967)*.

MILLER & MILLER (1955a, 1955b, 1956), visando uma generalização das equações que descrevem o movimento da água no solo, a fim de simplificar sua aplicação, desenvolveram suas pesquisas apoiados no princípio de que se dois meios apresentam os mesmos detalhes geométricos microscópicos, diferindo apenas de um fator constante, estes meios são considerados "meios similares".

O fator constante foi denominado comprimento característico microscópico. Baseados neste conceito mostraram, teoricamente, que seria possível descrever o movimento da água em diferentes solos com uma única equação generalizada.

KLUTE & WILKINSON (1958), WILKINSON and KLUTE (1959), ao aplicarem o conceito de meio similar em experimentos com solos reais, verificaram que os dados obtidos não comprovavam a teoria.

BRUCE & KLUTE (1956), entre outros pesquisadores, verificaram que as dificuldades de obtenção das soluções das equações diferenciais que regem o fluxo de água no solo, estão vinculadas ao teor de umidade e determinação dos parâmetros hídricos condutividade hidráulica e difusividade da água. Assim, propõem um método de laboratório para determinação de difusividade, baseados na teoria do processo de infiltração, o qual tornou-se clássico e cuja viabilidade de aplicação é enfatizada quando se dispõe de técnicas nucleares de atenuação de radiação gama na determinação de umidade e densidade do solo (*DAVIDSON et alii (1963), FERRAZ (1974) e REICHARDT (1965)*). *BRUCE & KLUTE (1956)* realizaram uma revisão completa dos diversos métodos de laboratório e campo empregados na obtenção destes parâmetros.

REICHARDT et alii (1972) a partir de conceito de meio similar de *MILLER and MILLER (1955a, 1955b e 1956)* desenvolveram uma nova técnica para obtenção do comprimento característico microscópico, o qual foi denominado de constante de generalização por *LIBARDI (1973)*.

LIBARDI & REICHARDT (1973), empregando a teoria da constante de generalização, no estudo de infiltração horizontal, em 5 solos do Estado de São Paulo constataram, mais uma vez a nova técnica. Prosseguindo em suas pesquisas, *LIBARDI & REICHARDT (1974)*, concluíram que a técnica da generalização, da descrição analítica do movimento da água no solo para o processo de infiltração ho-

rizontal, pode ser aplicada para infiltração vertical.

Posteriormente, *REICHARDT & LIBARDI (1974)* e *REICHARDT et alii (1975b)*, baseados em experimentos de infiltração horizontal da água em solo seco, apresentam equações para estimar a difusividade da água e condutividade hidráulica, respectivamente. Comprovaram experimentalmente o novo método em cinco solos de clima tropical e oito solos de clima temperado.

3. TEORIA

Os processos dinâmicos da água no solo são bastante complexos devido as diversas direções nas quais a água se movimenta e os diferentes estados termodinâmicos em que se apresenta. Para a análise e compreensão da penetração da água no solo, os estudiosos do assunto fazem uma distinção entre a infiltração horizontal e a infiltração vertical, em solo homogêneo.

Dentro de um sistema poroso a água se movimenta sempre que existir diferença em seu potencial total (Ψ) nos diversos pontos, sendo a densidade de fluxo q ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{seg}^{-1}$) dada pela equação de *DARCY (1856)*:

$$q = - K(\theta) \frac{\partial \Psi}{\partial x} \dots \dots \dots (1)$$

onde $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica da água ($\text{cm} \cdot \text{seg}^{-1}$) que é a função da umidade do solo θ (cm^3 de água/ cm^3 de solo), Ψ potencial total de água no solo (cm), x (cm) é a coordenada de posição e o sinal negativo indica que o fluxo ocorre em sentido contrário ao gradiente $\partial \Psi / \partial x$.

Além da condutividade hidráulica, existe outro parâmetro hídrico denominado difusividade da água $D(\theta)$. No caso do fluxo horizontal o potencial total (Ψ) pode ser considerado igual ao potencial matricial ζ (cm), uma vez que o potencial gravitacional z (cm) não interfere no processo, e as outras componentes podem ser desprezadas. Conseqüentemente, a equação de *DARCY* ficará:

$$q = - K(\theta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} \dots \dots \dots (2)$$

e como $\zeta = \zeta(\theta)$, que é a "característica do solo", podemos reescrever a equação (2) na seguinte forma:

$$q = - K(\theta) \frac{\partial \zeta}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \dots \dots \dots (3)$$

na qual a difusividade da água ($\text{cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$) é definida por:

$$D(\theta) = K(\theta) \frac{\partial \zeta}{\partial \theta} \dots \dots \dots (4)$$

Desta forma a equação de *DARCY* pode ser expressa em função do gradiente de umidade:

$$q = - D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \dots \dots \dots (5)$$

Combinando a equação de *DARCY*, que nos possibilita uma quantificação do movimento da água em materiais porosos, com a equação da continuidade,

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial x}, \dots \dots \dots (6)$$

que fornece subsídios para determinar a variação de umidade em função da posição e do tempo, obtemos as equações diferenciais gerais,

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(\theta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right] \dots \dots \dots (7)$$

e

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] \dots \dots \dots (8)$$

que descrevem o movimento horizontal da água em solo homogêneo, pela substituição de (2) e (5) em (6), respectivamente.

O estudo analítico do processo de infiltração envolve um problema de contorno, o qual se constitui da equação diferencial (7) ou (8) e de um número de restrições, tendo por objetivo final, a obtenção de uma solução que satisfaça à equação diferencial, sujeita as restrições.

Assim, no processo de infiltração horizontal considerando uma coluna de solo homogêneo com umidade inicial constante θ_0 , à qual é aplicada e mantida uma umidade de saturação θ_s em uma das extremidades da coluna, onde $x = 0$, a equação (8) ficará sujeita às condições inicial de contorno:

$$\theta = \theta_0, \quad x > 0, \quad t = 0 \dots \dots \dots (9)$$

$$\theta = \theta_s, \quad x = 0, \quad t > 0 \dots \dots \dots (10)$$

$$\theta = \theta_0, \quad x = \infty, \quad t \geq 0 \dots \dots \dots (11)$$

A solução que satisfaz a equação (8) e as condições (9), (10) e (11) é a seguinte:

$$x = \lambda(\theta)t^{1/2} \dots \dots \dots (12)$$

onde $\lambda(\theta)$ é chamada variável de Boltzman, podendo ser obtida experimentalmente ou através de solução numérica segundo PHILIPS (1955), a partir dos valores de difusividade.

No estudo analítico do fluxo vertical a equação (1) pode ser escrita como:

$$q = -K(\theta) \frac{\partial \Psi}{\partial z} \dots \dots \dots (13)$$

Neste caso as componentes do potencial total relevantes no processo são: o potencial matricial (ζ) e o potencial gravitacional (z). Por conseguinte, a equação (13) ficará:

$$q = - \left[K(\theta) \frac{\partial \zeta}{\partial z} + K(\theta) \right] \dots \dots \dots (14)$$

Por outro lado, ao considerar que $\zeta = \zeta(\theta)$ e a equação (4) podemos reescrever a equação (13) da seguinte maneira:

$$q = - \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta) \right] \dots \dots \dots (15)$$

As expressões (14) e (15) substituídas na equação da continuidade (6) dão origem as equações diferenciais mais gerais que comandam o movimento vertical da água no solo:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial z}{\partial z} - K(\theta) \right] \dots \quad (16)$$

e

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta) \right] \dots \quad (17)$$

Para a infiltração vertical em solos não saturado é empregada uma coluna de solo idêntica à utilizada no estudo da infiltração horizontal, porém colocada em posição vertical. Na extremidade de coluna onde $z = 0$ a água passa a infiltrar. Deste modo a equação (16) ou (17) estará sujeita às condições inicial e de contorno:

$$\theta = \theta_0 \quad z > 0 \quad t = 0 \dots \quad (18)$$

$$\theta = \theta_s \quad z = 0 \quad t > 0 \dots \quad (19)$$

$$\theta = \theta_0 \quad z = \infty \quad t \geq 0 \dots \quad (20)$$

A solução que satisfaz a equação (17) e as restrições acima é dada por:

$$z = \lambda(\theta) t^{1/2} + \chi(\theta) t^{2/2} + \Omega(\theta) t^{3/2} + \dots \quad (21)$$

onde $\lambda(\theta)$, $\chi(\theta)$ e $\Omega(\theta)$ podem ser obtidos experimentalmente ou através de solução numérica segundo *PHILIPS (1957)*.

Partindo da equação (8), *BRUCE & KLUTE (1956)*, a-

través das variáveis separáveis, deduziram a equação que se segue para obter os valores de difusividade da água.

$$D(\theta) = - \frac{1}{2t_o} \left(\frac{dx}{d\theta} \right) \int_{\theta_o}^{\theta} x \, d\theta \dots \dots \dots (22)$$

Obtido o perfil de umidade θ versus x para um da do instante t_o calcula-se a difusividade para θ variando entre θ_o e θ_s .

No entanto, REICHARDT *et alii* (1972) baseados no conceito de comprimento característico microscópico, proposto por MILLER & MILLER (1956), introduziram uma nova técnica para determinação da difusividade. Posteriormente, REICHARDT & LIBARDI (1973), considerando esta nova metodologia apresentaram uma equação que permite calcular a difusividade da água no solo, cujas variáveis são a umidade e o coeficiente angular da reta representativa do processo de infiltração

$$D_i(\omega) = 1,462 \times 10^{-5} m_i^2 \times \exp. (8,087\omega) \dots (23)$$

onde m_i é o coeficiente angular (cm . min^{-1/2}) da reta que representa a variação do avanço da frente de molhamento em função da raiz quadrada do tempo e ω uma unidade adimensional definida por:

$$\omega = \frac{\theta - \theta_o}{\theta_s - \theta_o} \dots \dots \dots (24)$$

Em seguida baseados nesta metodologia, REICHARDT *et alii* (1975) apresentaram uma equação para o cálculo da condutividade hidráulica fundamental para o cálculo do

fluxo de água no solo:

$$K_i(\omega) = 1,942 \times 10^{-12} \text{ mi}^4 \exp(-12,235\omega^2 + 29,061\omega) \dots (25)$$

4. MATERIAL E MÉTODO

4.1. Generalidades

Em decorrência dos estudos propostos no conograma de trabalho do convênio firmado entre a Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) e Instituto de Pesquisa Agropecuária do Nordeste (IPEANE), para identificação das unidades de solo, onde seriam realizadas as pesquisas agronômicas nos solos dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste, três unidades de solos foram selecionadas: Areias Quartzosas, Itapirema e Utinga.

No presente trabalho, devido a dificuldades experi-

mentais no espaço e no tempo, foram utilizadas amostras de perfis modais dos solos que constituem estas unidades, porém com a preocupação de simular da melhor forma possível as condições de campo.

Os solos estudados com textura variando de arenosa a argilosa, conforme Quadro 1, segundo Convênio de Mapeamento de Solos MA/DNPEA-SUDENE/DRN (1971, 1972 e 1973) receberam a seguinte classificação: Areias Quartzosas (AQ), Podzólico Vermelho Amarelo latossólico (PVA1) pertencente a Unidade Itapirema e Latosol Vermelho Amarelo (LVA) pertencente a Unidade Utinga.

Considerações gerais sobre as características morfológicas, físicas e químicas dos perfis representativos destas unidades são encontrados em *OLIVEIRA e MELO (1970a,b)* e *OLIVEIRA & QUEIROZ (1973)*.

4.2. Preparação e acondicionamento dos solos

Os solos depois de secos ao ar foram passados em peneiras de 2 mm e segundo a técnica descrita por *LIBARDI & REICHARDT (1974)* foram empacotados em cilindros de plástico acrílico transparente com dimensão de 50 cm de comprimento, 5,65 cm de diâmetro e 0,3 cm a espessura da parede.

A quantidade de solo a ser acondicionada no cilindro de plástico acrílico foi calculada a partir da densidade global de cada horizonte, determinada com estrutura natural, *OLIVEIRA & QUEIROZ (1973)*.

O cilindro foi fechado em uma das extremidades

com tela de malha de nylon, permitido um livre deslocamento da água para o interior da coluna. Junto à tela colocou-se um papel de filtro com a finalidade de impedir a perda de solo, durante as operações experimentais. Na outra extremidade da coluna, colocou-se um papel de alumínio previamente perfurado, a fim de dar passagem ao ar para o exterior, quando do seu deslocamento pela água ao longo da coluna.

No acondicionamento dos solos argilosos, encheu-se o cilindro parceladamente, recebendo cada porção de solo uma compactação através de um bastão de metal, contendo em uma das extremidades uma placa circular. Após a operação de acondicionamento o solo parecia uniforme, embora algumas estratificação fossem visíveis.

Os solos arenosos foram empacotados batendo-se na coluna com um martelo de borracha até não observar-se variação de volume de solo.

4.3. Determinação da umidade e densidade global dos solos

Empregando a técnica de atenuação da radiação gama, (*DAVIDSON (1963)*, *REICHARDT (1965)* e *FERRAZ (1974)*) foram efetuadas as determinações de densidade global, ao longo das colunas de solo, para constatar sua homogeneidade, como também as determinações de umidade em diferentes pontos das colunas, para obtenção dos perfis de umidade (θ vs x) durante o processo de infiltração de água.

A fonte da radiação gama utilizada foi ^{241}Am , cuja atividade aproximada é de 100 mCi. O sistema de

detecção é constituído de um espectrometro gama monocanal acoplado a um cristal cintilador NaI(Tl) tipo plano de 2 x 2 polegadas, de fabricação "Hewlett Packard". Os orifícios de colimação tanto da fonte como do detector são circulares, com um diâmetro igual a $5/32''$ (12,37 mm² de área).

O esquema da geometria do sistema utilizado na colimação da radiação gama é mostrado na Figura 1. Uma visão do conjunto geometria-equipamento de contagem e medidas em coluna horizontal e vertical está contida na Figura 2 a, b, c.

4.4. Procedimento experimental durante a infiltração

Para infiltração da água no solo foi empregado um suporte de plástico acrílico, contendo uma câmara de água cuja tensão permaneceu constante durante o processo. Para manter o reservatório de água constante, um tubo graduado e cheio de água foi acoplado ao reservatório, de maneira a permitir a penetração da água no solo a uma tensão constante de -5,0 cm de coluna d'água. A água usada no experimento continha 0,01 N CaSO₄. As medidas das distâncias às frentes de molhamento foram efetuadas, visualmente em uma escala graduada colocada sobre o cilindro que continha o solo. A umidade do solo ao longo da coluna foi medida em tempos arbitrários (t_0) através do movimento da coluna perpendicular ao feixe de radiação gama. Com estas medidas foram determinados os perfis de umidade dos horizontes dos três solos estudados.

Durante o processo experimental a temperatura foi controlada em torno de 25°C.

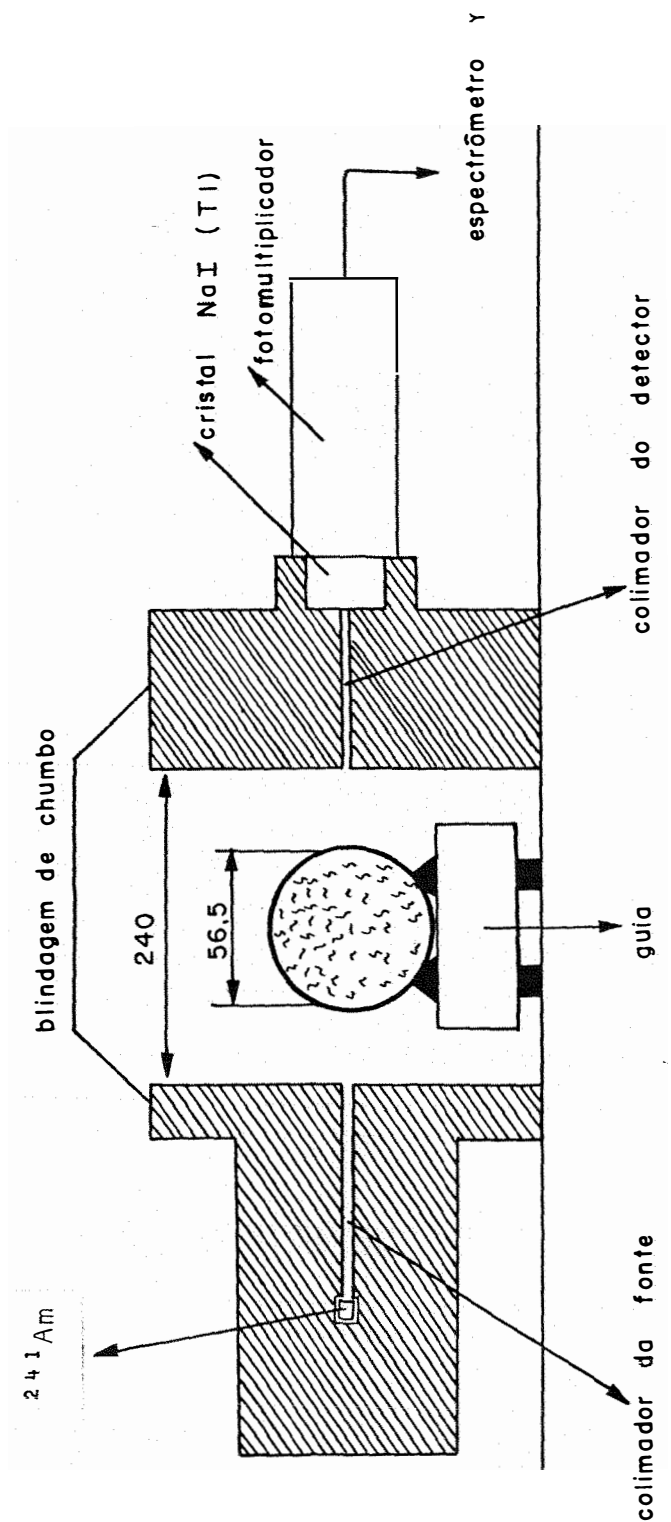
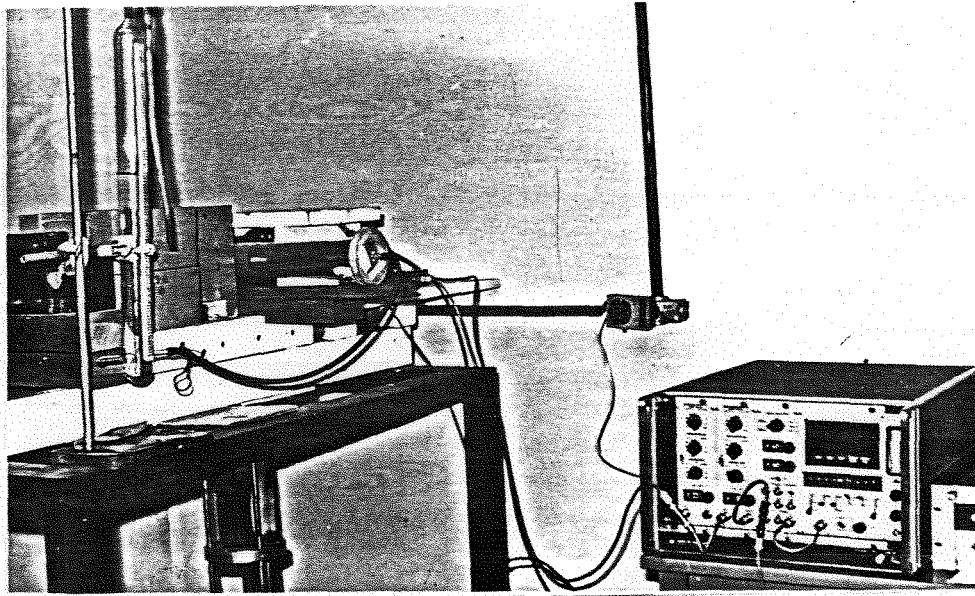
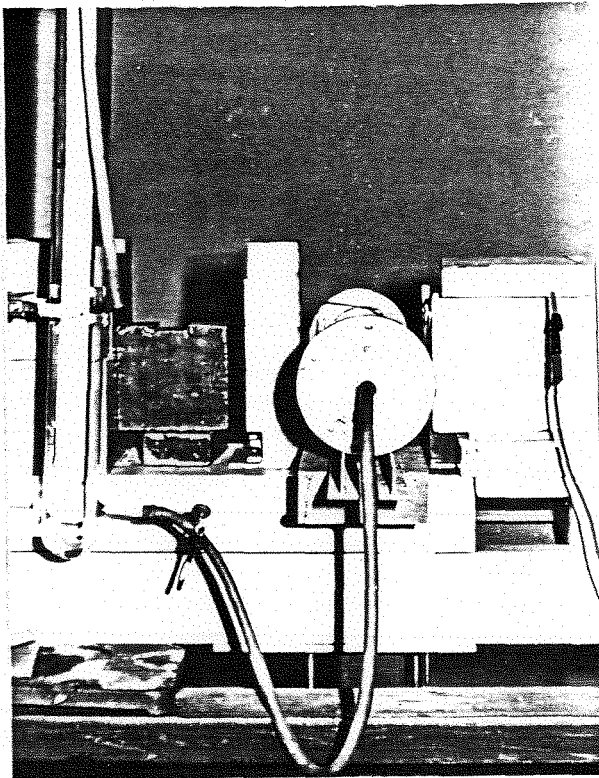


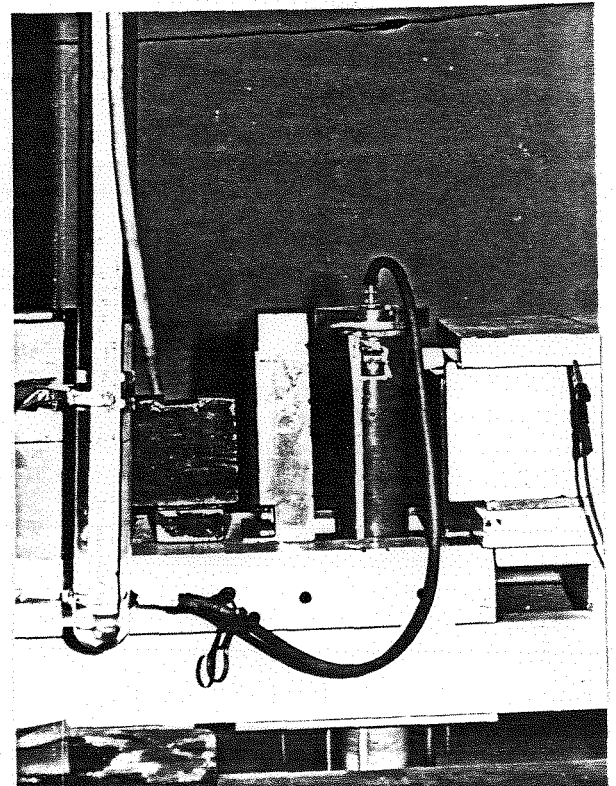
FIGURA 1 - Esquema da geometria utilizada na colimação da radiação gama



(a)



(b)



(c)

Figura 2 - a) Visão geral do conjunto geometria-equipamento de contagem; b) Medida em coluna horizontal e c) Medida em coluna vertical.

4.5. Difusividade da água e condutividade hidráulica

Conhecida a umidade do solo seco ao ar (θ_o), umidade de saturação (θ_s) e coeficiente angular das retas representativas do processo de infiltração foi promovido o cálculo da difusividade da água no solo para qualquer θ compreendido entre θ_o e θ_s , pelo uso da equação (23) e da condutividade hidráulica a partir da equação (25).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Infiltração horizontal e vertical

O Quadro 1 apresenta, para cada horizonte dos perfis típicos dos solos estudados, os dados de densidade global média, umidade de saturação, umidade do solo seco ao ar, análise granulométrica e os coeficientes angulares das retas representativas dos processos de infiltração horizontal e vertical da água no solo.

Os coeficientes de variação dos valores de densidade global, ao longo de cada coluna destes solos, foram

QUADRO 1 - Características dos solos Areias Quartzosas, Latosol Vermelho Amarelo Distrófico e Podzólico Vermelho Amarelo latossólico.

Solos	Horizontes	Profundidade cm	Análise granulométrica %			Densidade média da coluna (g . cm ⁻³)	Umidade saturação:θ _s (cm ³ . cm ⁻³)	Umidade de solo seco ao ar θ _o (cm ³ . cm ⁻³)	Coeficiente angular m ₁ -infiltração horizontal (cm . min ^{-1/2})	Coeficiente angular m ₁ -infiltração vertical (cm . min ^{-1/2})	
			Areia grossa	Silte fina	Argila						
AQ	A	0 - 52	75	20	1	4	1,55	0,345	0,002	5,13	9,90
	C	52 - 100	71	22	1	6	1,59	0,400	0,002	6,83	10,43
LVA	A	0 - 29	42	10	7	41	1,41	0,400	0,036	0,90	0,93
	B	29 - 100	32	9	2	57	1,37	0,450	0,028	0,90	0,93
PVAZ	A ₁	0 - 24	57	26	6	11	1,43	0,350	0,001	3,33	6,90
	A ₂	24 - 39	46	21	9	24	1,46	0,400	0,001	2,30	2,65
	B ₁	39 - 87	47	18	7	28	1,69	0,360	0,015	0,60	0,73
	B ₂	87 - 100	44	15	4	37	1,50	0,363	0,016	1,40	2,08

menores que 2,5%, indicando uma homogeneidade relativamente boa no acondicionamento dos solos.

Durante o processo de compactação das colunas de solo conseguiu-se obter valores de densidade global da mesma ordem de grandeza dos determinados em amostras naturais.

A equação (8) sujeita às restrições (9), (10) e (11) e a equação (17) subordinada às restrições (18), (19) e (20), as quais descrevem os processos de infiltração horizontal e vertical da água respectivamente, necessitam, para serem válidas quanto ao estudo analítico, atender a certas condições básicas além destas restrições (*REICHARDT, 1975a*): a) durante a infiltração não deve haver rearranjo das partículas do solo, conseqüentemente esta teoria se adapta melhor para solos arenosos, onde o transporte de material sólido pela água é mínimo; b) o movimento da água não deve ser influenciado pelo movimento do ar; c) as propriedades da água, principalmente, densidade e viscosidade devem permanecer constantes em qualquer tempo e posição no solo e d) as condições experimentais devem ser isotérmicas.

A comprovação destas condições pode ser efetuada determinando, durante a infiltração, o avanço da frente de molhamento (x_f) com o tempo (t) e em verificar as relações entre x_f e a raiz quadrada do tempo ($t^{-1/2}$).

No caso destas relações permanecerem constantes, durante cada processo experimental, constata-se a validade do emprego das soluções (12) e (21).

As condições básicas acima mencionadas foram em

parte atendidas em nossos experimentos, pois utilizamos solos de textura argilosa, como os horizontes A e B do Latosol Vermelho Amarelo Distrófico, e de textura argilo-arenosa no B₂ do Podzólico Vermelho Amarelo latossólico. A estrutura destes horizontes, provavelmente, deve ter sido alterada devido a expansão do material coloidal, através da adição de água.

Entretanto, em virtude da obtenção de valores constantes das relações entre x_f e $t^{-1/2}$, podemos considerar a equação (8) e sua respectiva solução (12), como sendo válida para descrever o movimento horizontal da água nos solos. No caso da infiltração vertical, o processo comportou-se de maneira análoga à infiltração horizontal, mas com maior velocidade, estando sujeito a equação e solução que regem o movimento da água na direção horizontal, porém em valores de $\lambda(\theta)$ diferentes.

LIBARDI (1973), estudando a infiltração horizontal e vertical em cinco solos do Estado de São Paulo, a fim de obter uma equação generalizada para descrever ambos os processos de infiltração, verificou também que a infiltração vertical apresentava comportamento semelhante à infiltração horizontal, mas com maior velocidade.

Nos solos estudados neste trabalho isto pode ser constatado pelas Figuras 3 e 4 onde se encontram as curvas que representam os processos de infiltração horizontal e vertical, respectivamente. Analisando estas Figuras também podemos verificar que a infiltração da água nestes solos, entre outros fatores, é fortemente influenciada pela geometria do espaço poroso. No horizonte B₁ do PVA onde ocorre um adensamento com espessura de aproximadamente 20 cm, identificado por *OLIVEIRA & QUEIROZ (1973)*,

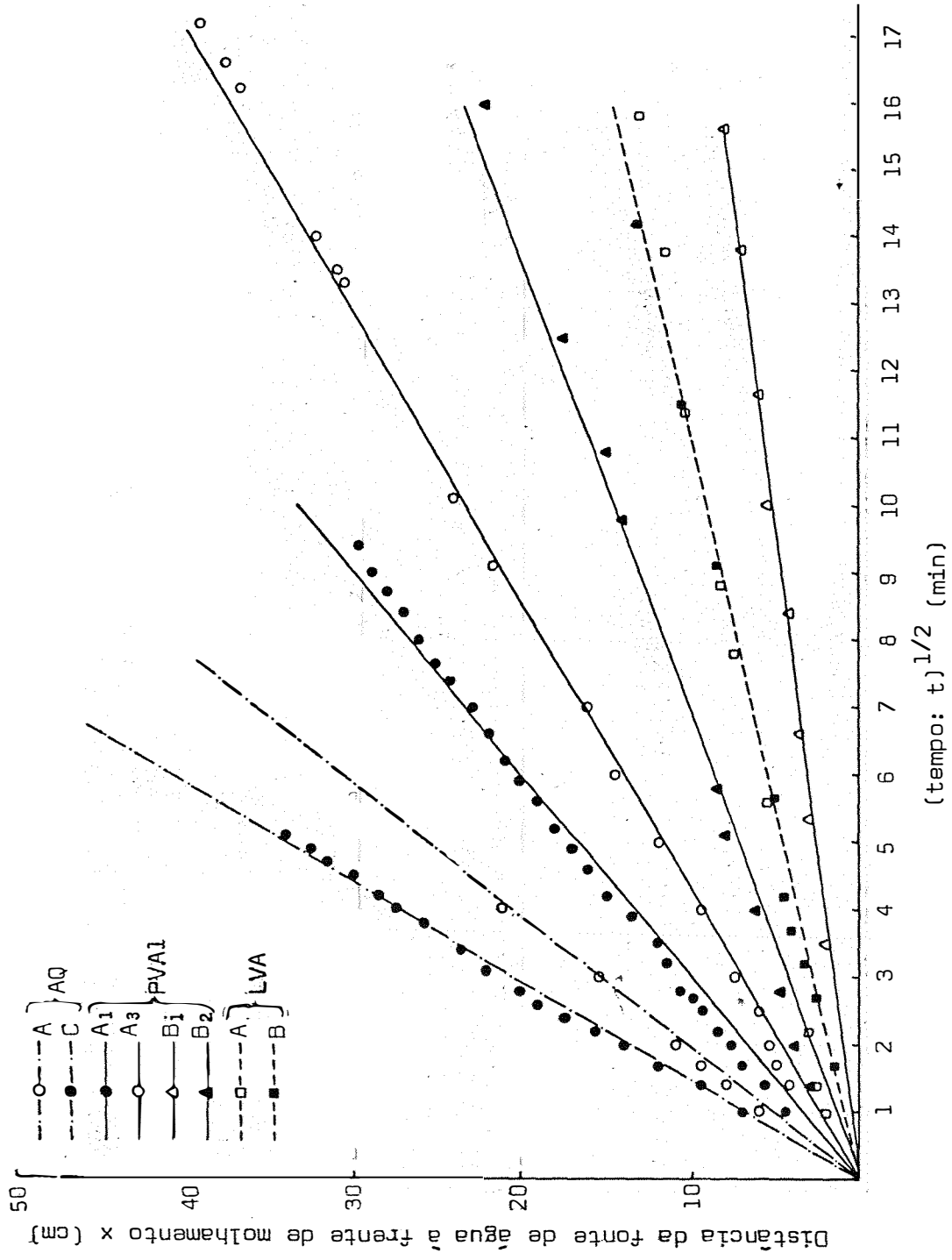


Figura 3 - Distância da fonte de água à frente de molhamento versus raiz quadrada do tempo para infiltração horizontal dos horizontes dos solos AQ, PVA1 e LVA.

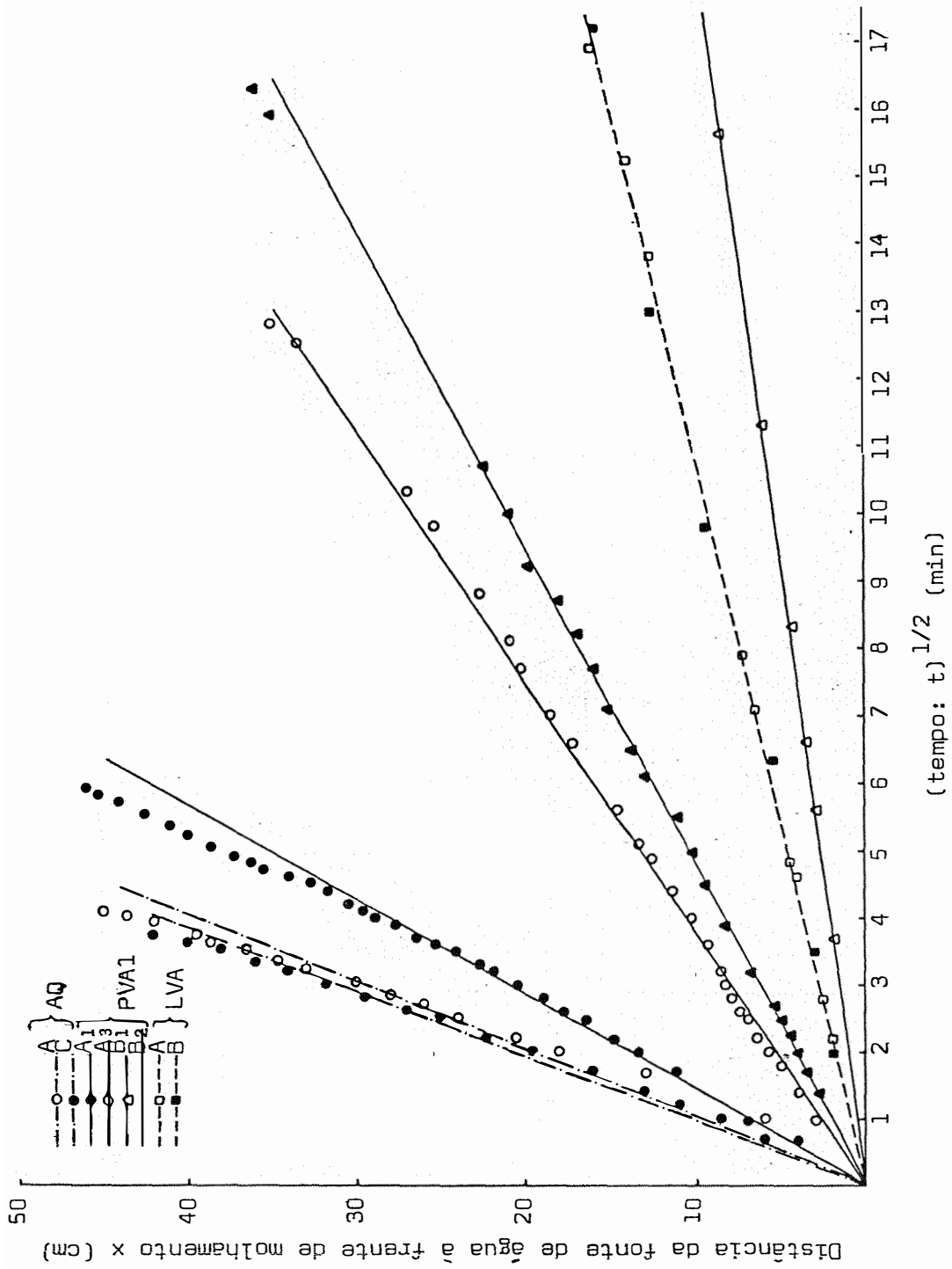


Figura 4 - Distância da fonte de água à frente de molhamento versus raiz quadrada do tempo para infiltração vertical dos horizontes dos solos AQ, PVA1 e LVA.

a infiltração é muito lenta com relação aos horizontes A_1 , A_3 e B_2 . Neste solo observa-se que a quantidade e distribuição de poros exercem uma relativa influência sobre o movimento da água, pois os horizontes com valores de densidade global mais elevados, apresentam infiltração mais lenta. No entanto, isto não foi verificado para os horizontes A e C das Areias Quartzosas, pois o horizonte A, de densidade global menor que o horizonte C, apresentou infiltração mais lenta. Este fato de o movimento ser mais rápido no horizonte C pode ser explicado por uma melhor uniformidade na sua distribuição de poros e um teor mais alto em argila.

Nos horizontes A e B do Latosol Vermelho Amarelo Distrófico o movimento foi desenvolvido com a mesma intensidade, indicando uma boa geometria do espaço poroso. A diferença nos valores de densidade global não são significantes para promoverem alterações no movimento da água.

5.2. Relação entre infiltração vertical e horizontal

Após adimensionalizar o avanço da frente de molhamento nas direções vertical ($Z = \frac{z}{L}$) e horizontal ($X = \frac{x}{L}$), onde L, são os valores máximos de z e x para cada coluna, determinamos as relações entre ambos os processos, como mostra a Figura 5. Analisando esta Figura constata-se que a distância à frente de molhamento na direção vertical é sempre maior ou igual à distância alcançada na direção horizontal, fato que se explica pela ação do potencial gravitacional sobre o fluxo de água na direção vertical, conforme equações (14) e (15).

Para os horizontes A e B do Latosol Vermelho Ama

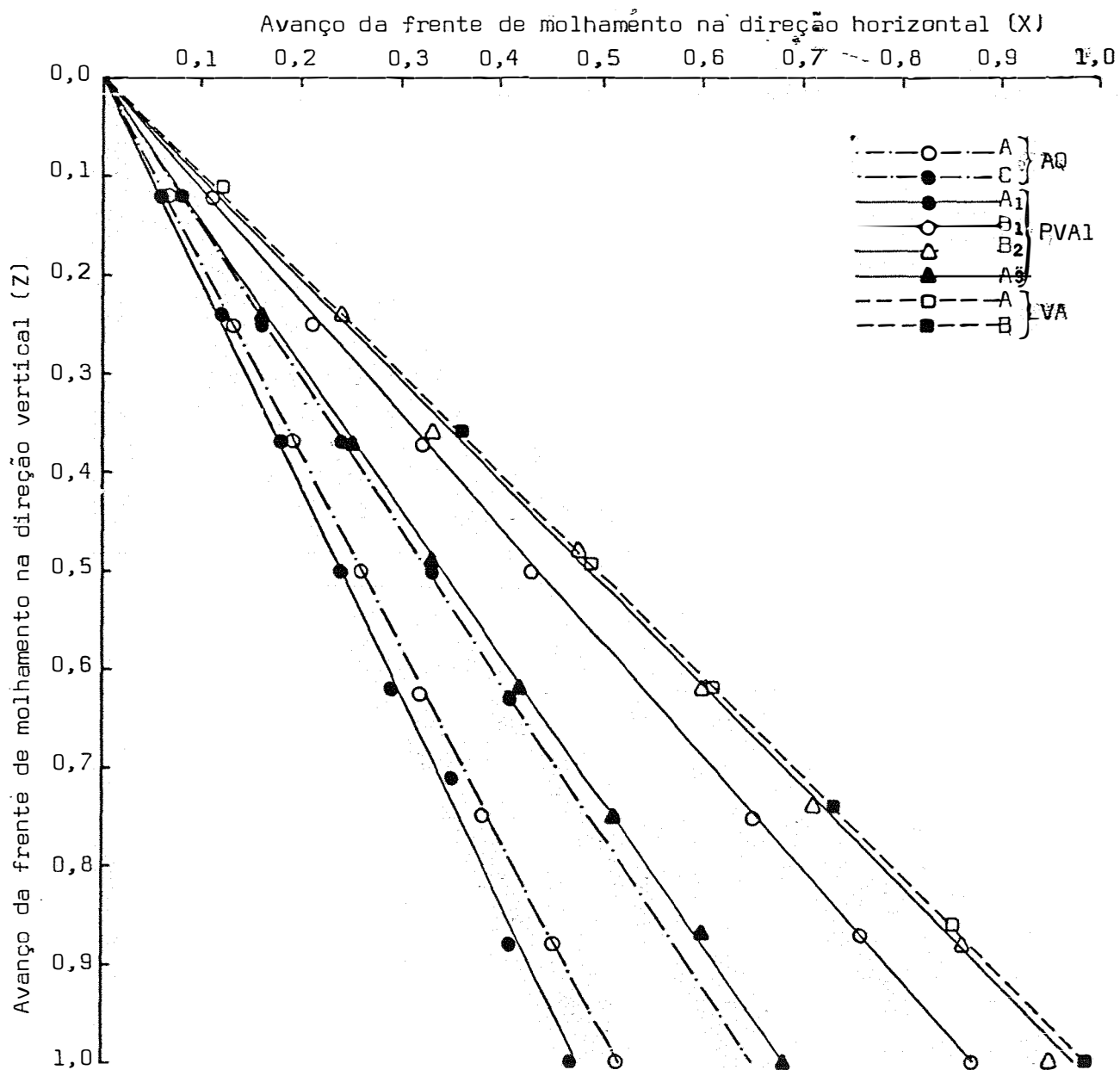


Figura 5 - Relações entre as distâncias adimensionais (para X e Z = 1) do avanço de frente de molhamento da infiltração vertical e horizontal dos solos AQ, PVA1 e LVA.

relo Distrófico, os avanços das frentes de molhamento nas direções horizontal e vertical são iguais, uma vez que, a relação entre ambos é igual a 1. Uma maneira de verificar esta ocorrência é através do exame da equação (17). Segundo descreve REICHARDT (1975a) a ordem de grandeza da variação da umidade com a profundidade $\frac{\partial \theta}{\partial z}$ é relativamente grande, sendo teoricamente considerada infinita para $t = 0$. Assim, a difusividade da água multiplicada pela variação da umidade com a profundidade $(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z})$ é consideravelmente maior do que a condutividade hidráulica K , a qual se torna desprezível na equação (17). Desta maneira, a equação (17) fica igual a equação (8). Consequentemente a solução será idêntica à equação (12), apenas substituindo x por z :

$$z = \lambda(\theta) t^{1/2} \dots \dots \dots (26)$$

Por conseguinte para tempos relativamente curtos o processo de infiltração vertical nos horizontes A e B do Latosol Vermelho Amarelo Distrófico é idêntico ao horizontal. Como a gravidade torna-se relevante somente depois de um certo tempo a água avança com a mesma velocidade em todas as direções.

No Podzólico Vermelho Amarelo latossólico as relações entre os avanços nas direções horizontal e vertical são da ordem de 2,11, 1,47, 1,03 e 1,15 para os horizontes A_1 , A_3 , B_1 e B_2 , respectivamente. No horizonte B_1 onde ocorre o adensamento a relação entre a infiltração horizontal e vertical é igual a ≈ 1 , tendo o avanço em ambas as direções praticamente a mesma intensidade. Nos horizontes A_1 e A_3 devido sua textura arenosa o potencial gravitacional, para curto espaço de tempo se manifestou de maneira pronunciada.

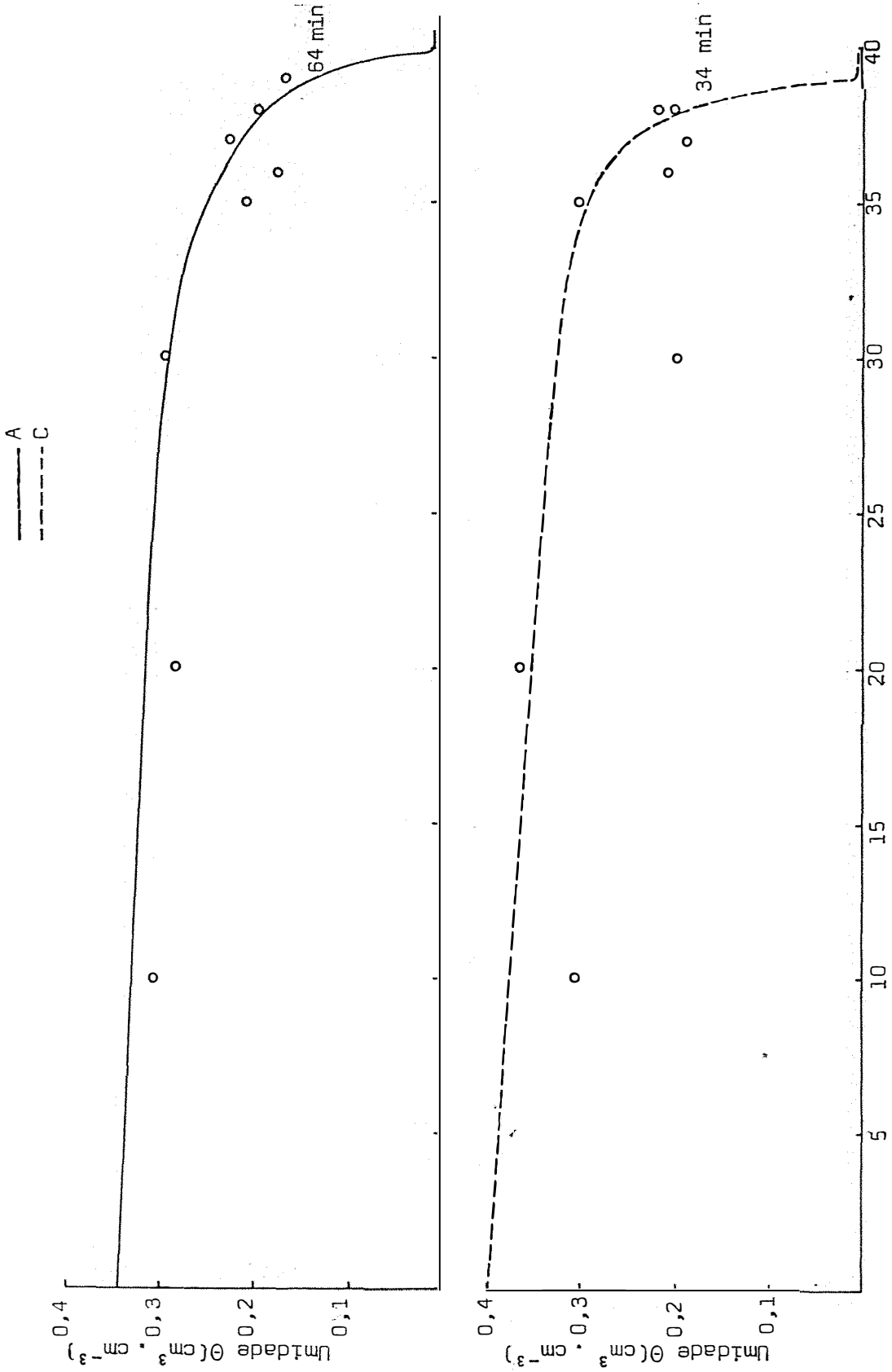
Ação do potencial gravitacional e predominância de poros de maiores diâmetros se manifestou com significância nos horizontes A e C do solo Areias Quartzosas sendo a relação entre a infiltração vertical e horizontal para o horizonte A de 1,94 e para o horizonte C, de 1,54.

QUEIROZ et alii (1975), estudando a caracterização da infiltração dos Vertissolos do Sub-Médio São Francisco, constataram que a infiltração lateral é cerca de 1,8 vezes o avanço da infiltração vertical em sulcos de irrigação. Concluíram que de acordo com a profundidade do sistema radicular das culturas, os espaçamentos de sulcos de irrigação podem ser determinados a partir das características de infiltração lateral destes solos e que considerando o efeito na produção das culturas, na prática, poderia ser obtido o máximo, utilizando esta propriedade do solo.

5.3. Perfis de Umidade

A Figura 6 mostra os perfis de umidade para os horizontes A e C do solo Areias Quartzosas, durante o processo de infiltração horizontal. O tempo de infiltração até a profundidade de aproximadamente 40 cm para o horizonte A foi de 64 minutos e para o horizonte C, 34 minutos.

Como já foi dito anteriormente, uma das explicações deste movimento mais rápido no horizonte C com relação ao A neste solo seria uma melhor uniformidade na distribuição dos poros da coluna compactada com o horizonte C e ao fato deste horizonte ter praticamente o do-



Distância da fonte de água à frente de molhamento x (cm)
 Perfis de umidade a diferentes tempos durante a infiltração horizontal nos horizontes do solo.
 Areias Quartzosas.

bro do teor de argila do horizonte A.

A Figura 7 apresenta os perfis de umidade para os horizontes A₁, A₃, B₁ e B₂ do Podzólico Vermelho Amarelo latossólico. Para o horizonte A₁ foi determinado perfis de umidade para os tempos de 48, 88 e 133 minutos para o A₃ os tempos de 64, 183 e 276 minutos para o B₁, os tempos de 428 e 1089 minutos e finalmente o B₂ para os tempos de 102 e 256 minutos.

A Figura 8 mostra os perfis de umidade para os horizontes A e B do Latosol Vermelho Amarelo Distrófico. No horizonte A foram determinados perfis para os tempos de 370 e 390 minutos e no horizonte B para o período de 220 minutos.

5.4. Condutividade hidráulica e difusividade da água

Os Quadros 2 e 3 mostram as equações da difusividade da água e condutividade hidráulica dos horizontes dos solos em estudo, determinadas a partir das equações (23) e (25), respectivamente e dos dados contidos no Quadro 1.

Pelo exame das equações de difusividade e condutividade hidráulica dos horizontes podemos verificar que estes parâmetros também dependem das condições intrínsecas do solo, sendo fortemente influenciados pela compactação.

Os dados apresentados são fundamentais para o estudo da dinâmica da água nestes solos. É oportuno porém chamar a atenção sobre as limitações de seu uso, por

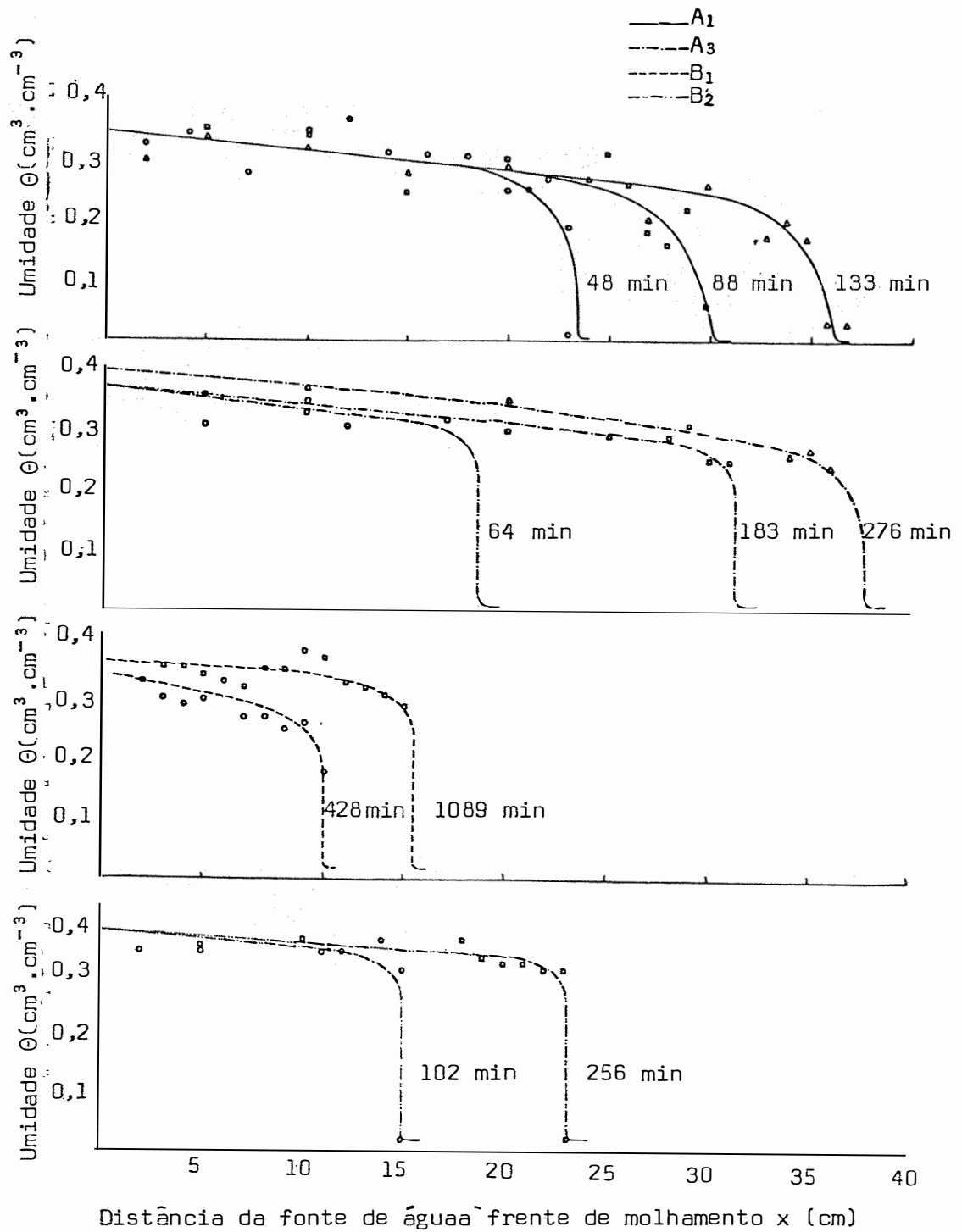


Figura 7 - Perfis de umidade a diferentes tempos durante a infiltração horizontal nos horizontes do solo Podzólico Vermelho Amarelo latossólico.

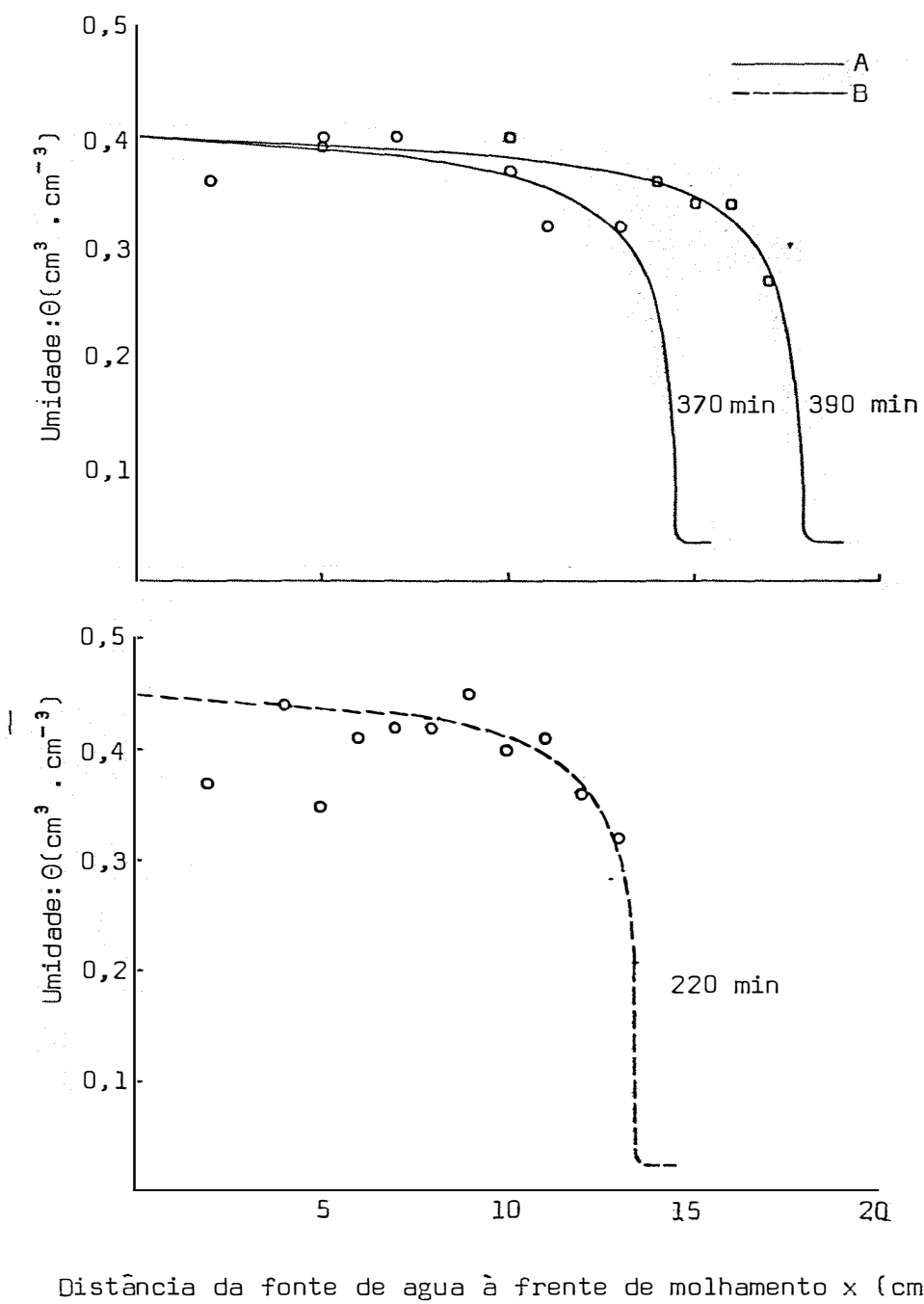


Figura 8 - Perfís de umidade a diferentes tempos durante a infiltração horizontal nos horizontes do solo Latosol Vermelho Amarelo Distrófico.

QUADRO 2 - Equações das difusividades da água dos solos Areias Quartzosas, Latosol Vermelho Amarelo Distrófico e Podzólico Vermelho Amarelo Latossólico.

Solos	Horizontes	Equações das difusividades $D(\theta)$ ($\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$)
AQ	A	$D(\theta) = 3,636 \times 10^{-4} \exp (23,605\theta)$
	C	$D(\theta) = 6,495 \times 10^{-4} \exp (20,3395\theta)$
LVA	A	$D(\theta) = 5,297 \times 10^{-6} \exp (22,2292\theta)$
	B	$D(\theta) = 6,953 \times 10^{-6} \exp (19,1544\theta)$
PVA1	A1	$D(\theta) = 1,5806 \times 10^{-4} \exp (23,1754\theta)$
	A3	$D(\theta) = 5,7225 \times 10^{-5} \exp (20,9834\theta)$
	B1	$D(\theta) = 2,559 \times 10^{-6} \exp (23,4542\theta)$
	B2	$D(\theta) = 1,998 \times 10^{-5} \exp (23,2719\theta)$

QUADRO 3 - Equações das condutividades hidráulicas da água dos solos
 Areias Quartzosas, Latossol Vermelho Amarelo Distrófico e
 Podzólico Vermelho Amarelo latossólico.

Solo	Horizonte	Equações de condutividade hidráulica do solo K(cm . seg ⁻¹)
AQ	A	$K(\theta) = 10,8661 \times 10^{-10} \exp (-104,2338\theta^2 + 85,3252\theta)$
	C	$K(\theta) = 3,5446 \times 10^{-10} \exp (-77,3947\theta^2 + 73,4625\theta)$
LVA	A	$K(\theta) = 6,2644 \times 10^{-17} \exp (-92,444\theta^2 + 86,5747\theta)$
	B	$K(\theta) = 1,7822 \times 10^{-13} \exp (-68,6497\theta^2 + 72,6492\theta)$
PVAL	A ₁	$K(\theta) = 2,1783 \times 10^{-10} \exp (-100,5883\theta^2 + 83,5143\theta)$
	A ₃	$K(\theta) = 1,7758 \times 10^{-11} \exp (-82,3722\theta^2 + 77,8101\theta)$
	B ₁	$K(\theta) = 3,2921 \times 10^{-14} \exp (-102,912\theta^2 + 87,4121\theta)$
	B ₂	$K(\theta) = 1,9922 \times 10^{-12} \exp (-101,3198\theta^2 + 86,7697\theta)$

se tratar de dados obtidos em laboratório, com amostras deformadas quanto a sua estrutura natural. Nos experimentos procurou-se porém obter amostras que representam da melhor forma possível as condições dos perfis em campo.

Como discutem *REICHARDT et alii (1975)*, as equações aqui apresentadas para a determinação de $K(\theta)$ e $D(\theta)$ podem ser utilizadas como uma primeira aproximação. Dados da condutividade hidráulica obtidos em condições de campo, tais como os apresentados por *ROSE et alii (1965)*, *NIELSEN et alii (1969)*, *HILLEL et alii (1972)* e *NIELSEN et alii (1973)*, mostram que a variabilidade deste parâmetro pode ser de um fator da ordem de 100 vezes. Assim sendo, as limitações do uso dos dados aqui apresentados não fogem das limitações dos dados apresentados por outros pesquisadores, por outros métodos. *NIELSEN et alii (1973)* discute com detalhe a variabilidade espacial destes parâmetros dentro de uma área extensa de um solo razoavelmente homogêneo quanto às características de textura, morfologia e densidade global. Os parâmetros $K(\theta)$ e $D(\theta)$ são muito sensíveis a pequenas variações no arranjo geométrico do material poroso, podendo variar de um fator de 100 vezes dentro de um perfil de solo para uma distância não maior que 1 metro.

6. CONCLUSÕES

1. As retas representativas do processo de infiltração horizontal, dos horizontes dos solos estudados, mostram que a equação (8) e sua solução (12) descrevem o movimento horizontal da água nos solos utilizados.
2. As retas representativas do processo de infiltração vertical, dos horizontes dos solos, apresentam um comportamento semelhante a infiltração horizontal, porém com maior velocidade. Conseqüentemente, a equação e solução

que regem o movimento horizontal, com valores de $\lambda(\theta)$ diferentes, sse aplicam ao estudo analítico da infiltração vertical nas condições em que os solos foram estudados.

3. A relação do avanço da frente de molhamento na direção vertical e horizontal durante a infiltração foi linear para qualquer tempo em todos os horizontes dos solos.

4. As equações contidas nos Quadros 2 e 3 obtidas a partir da teoria proposta para infiltração horizontal, descrevem a variação da condutividade hidráulica e difusividade da água em função da umidade do solo.

Como estes parâmetros hídricos são fundamentais na descrição do movimento da água no solo, as equações obtidas fornecem subsídios para complementar a caracterização hídrica dos solos estudados e posteriores pesquisas sobre colunas de solos estratificados e de correlação entre a estimativa destes parâmetros através da presente metodologia de laboratório e métodos de campo.

7. RESUMO

O movimento da água nos solos Areias Quartzosas, Podzólico Vermelho Amarelo latossólico e Latosol Vermelho Amarelo Distrófico, que ocorrem na região dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste, foi estudado com a finalidade de: a) aplicar a teoria que descreve o fluxo da água no solo, através dos processos de infiltração horizontal e vertical e b) determinar os parâmetros hídricos difusividade da água e condutividade hidráulica.

A técnica de atenuação da radiação gama foi empregada para a determinação da umidade e densidade glo-

bal dos solos pacotados homogeneamente em colunas de plástico acrílico.

Como resultados são apresentadas retas representativas do processo de infiltração horizontal, vertical, a relação entre ambas e equações que permitem estimar a condutividade hidráulica e difusividade da água em função da umidade do solo. Estes resultados contribuem para uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos na dinâmica da água nestes solos e oferecem condições para elucidar problemas vinculados a sua fertilidade e produtividade.

8. SUMMARY

The movement of water in the soils, Areias Quartzosas, Podzólíco Vermelho Amarelo latossólíco and Latosol Vermelho Amarelo Distrófíco, which are found in the Tabuleiros Costeiros region of Northeast Brazil, was studied with the objectives of a) applying soil water flux theory to the horizontal and vertical infiltration processes, and b) determination of the hydraulic parameters, soil-water diffusivity and hydraulic conductivity of the system.

The gamma ray attenuation technique was used to

determine the soil water content and the bulk density of soils homogeneously packed in columns of acrylic plastic.

Representative curves of the horizontal and vertical infiltration and the relationship between them, are presented. Equations for estimation of hydraulic conductivity and soil-water diffusivity as functions of soil water content are also presented.

These results contribute to a better comprehension of the phenomena involved in the dynamic of the water in these soils and offer means for elucidation of problems related to their fertility and potential productivity.

9. LITERATURA CITADA

BRUCE, R.R. & KLUTE, A. Measurement of soil moisture diffusivity. Proc. Soil Sci. Soc. Am., 20:458-62, 1956.

BUCKINGHAM, E. Studies on the movement of soil moisture. Bul. Bur. Soils U.S. Dept. Agr., 38, 1907.

CONVÊNIO DE MAPEAMENTO DE SOLOS MA/DNPEA-SUDENE/DRN. Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado do Rio Grande do Norte. Recife, 1971. 531 p. (DNPEA. Divisão de Pesquisa Pedológica. Boletim técnico, 21).

CONVÊNIO DE MAPEAMENTO DE SOLOS MA/DNPEA-SUDENE/DRN. Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco. Recife, 1973. 359p. (DNPEA. Divisão de Pesquisa Pedológica. Boletim técnico, 26).

_____. Mapa exploratório - reconhecimento dos solos do Estado de Alagoas. Recife, 1972, escala 1:400.000.

DARCY, H. Les fontaines publiques de la Ville de Dijon. Paris, Victor Dalmont. 1856. 592p.

DAVIDSON, J.M.; BIGGAR, J.W.; NIELSEN, D.R. Gamma radiation attenuation for measuring bulk density and transient water flow in porous materials. J. Geophys. Res., 68:4777-83, 1963a.

_____; *NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. The measurement and description of water flow through Columbia silt loam and Hesperia sand loam. Hilgardia, 34:601-17, 1963b.*

FERRAZ, E.S.B. Determinação simultânea da densidade e umidade de solos por atenuação de raios gama do ^{137}Cs e ^{241}Am . Piracicaba, 1974. 120p. Tese [(Livre Docente)- ESALQ/USP].

FOURY, A.P. As matas do Nordeste brasileiro e sua importância econômica. SUDENE - B. Rec. nat., 4(2):123-24, abr./jun. 1966.

HAYNES, J.L. Uso agrícola dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste do Brasil; um exame das pesquisas. Recife. SUDENE/AID, 1970. 153p.

HILLEL, D.; KRENTOS, V.D.; STYLIANOU, Y. Procedure and test of an interval drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. Soil Sci., 114:395-400, 1972.

KLUTE, A. Some theoretical aspects of the flow of water in unsaturated soils. Proc. Soil Sci. Soc. Am., 16:144-7, 1952.

_____ ; WHISLER, F.D.; SCOTT, E.J. Numerical solution of the non linear diffusion for water flow in a horizontal soil column of finite length. Proc. Soil Sci. Soc. Am., 29:353-8, 1965.

_____ & WILKINSON, G.E. Some tests of the similar media concept of capillary flow: I. Reduced capillary conductivity and moisture characteristics data. Proc. Soil Sci. Soc. Am., 22:278-81, 1958.

LAROCHE, F.A. Atividades da SUDENE em Tabuleiros Costeiros (ano 1962). Recife, SUDENE - Divisão de Documentação, 1963. 9p.

_____. Estudo dos trabalhos de pesquisas agrícolas realizados pela SUDENE em Tabuleiros Costeiros do Nordeste (período 1961/1965). SUDENE, B. Rec. Nat., 5(2/4):121-38, abr./dez. 1967.

LIBARDI, P.L. Infiltração da água no solo; uma generalização. Piracicaba, 1973. 46p. [Dissertação (Mestre) ESALQ/USP].

LIBARDI, P.L. & REICHARDT, K. Características hídricas de cinco solos do Estado de São Paulo. I- Difusividade da água no solo. O Solo, (1):7-13, 1973.

_____ & _____. Generalização do movimento da água no solo. II. Infiltração vertical. Piracicaba, CENA, 1974. 16p. (Boletim Científico, 17).

LIMA, D.A. Estudos fitogeográficos de Pernambuco. Arq. Inst. Pesq. Agron., (5):305-41, 1965.

LINS, R.C. & ANDRADE, C.O. de. Os rios da Carnauba: Parte I. O rio Mossoró (Apodi). Recife, Inst. Pesq. Soc. 1960. 148p.

MILLER, E.E. & MILLER, R.D. Physical theory for capillary flow phenomena. J. Appl. Phys., 27:324-32. 1956.

_____ & _____. Theory of capillary flow: I. Practical implications. Proc. Soil Sci. Soc. Am., 19:267-71, 1955a.

_____ & _____. Theory of capillary flow: II. Experimental information. Proc. Soil Sci. Soc. Am., 19:271-5, 1955b.

MORAES, J.M. Aspectos litorâneos do Nordeste Brasileiro. Rio de Janeiro, Cons. Nac. Geog., 1962. 9p.

NIELSEN, D.R.; KIRKHAM, D.; WIJK, W.R. Diffusion equation calculations of field soil water infiltration profiles. Proc. Soil Sci. Soc. Am., 25:165-8. 1961.

_____ ; BIGGAR, J.W.; MILLER, R.J. Field observations of infiltration and soil water redistribution. Trans. Am. Soc. Agric. Engrs., 10:382-7. 1967.

_____ ; DAVIDSON, J.M.; STONE, L.R.; LARVE, M.E. Field measurement and use of soil water properties. Water Resours. Res., 5:1312-21, 1969.

_____ ; BIGGAR, J.W.; ERB, K.T. Spatial variability of field-measured soil-water properties. Hilgardia, 42(7):215-59, 1973.

OLIVEIRA, L.B. de & MELO, V. de. Caracterização físico-hídrica do solo. Unidade Itapirema. Pesq. Agropec. bras., 5:35-48. 1970a.

_____ & QUEIROZ, E.N. de. Considerações sobre as características morfológicas, físicas e químicas dos solos dos campos experimentais (do Convênio DAA/30/71-SUDENE - MA - IPEANE). Aproveitamento dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste. Recife, 1973. 18p.

_____ & QUEIROZ, E.N. de. Curvas características de retenção de umidade de solos do Nordeste do Brasil (Apresentada ao 14º Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Santa Maria, 1973).

OLIVEIRA, L.B. & OLIVEIRA, H.F. de. Relação entre a precipitação pluviométrica e a perda de minerais solúveis por lixiviação. I. Lixiviação do potássio em laboratório. [Apresentado ao 15º Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Campinas, 1975].

_____ & MELO, V. de. Potencialidade agrícola dos solos da Unidade Utinga - Latosol Vermelho Amarelo Distrófico. Recife, SUDENE - Div. Documentação, 1970b. 52p.

PARLANGE, J.Y. Horizontal infiltration of water in soils, a theoretical interpretation of recent experiments. Proc. Soil Sci. Soc. Am., 37:329-330, 1973.

_____. Theory of water-movement in soils: I. One dimensional absorption. Soil Sci., 111:134-7, 1971.

PHILIPS, J.R. Numerical solution of equations of the diffusion type with diffusivity concentration dependent. Trans. Faraday Soc., 51:885-92, 1955.

_____. Numerical solution of equation of the diffusion type with diffusivity concentration-dependent II. Aust. J. Phys., 10:29-42, 1957.

QUEIROZ, S.C. de; MILLAR, A.A.; BOERS, M. Características da infiltração dos Vertissolos do Sub-Médio São Francisco. 13p. [Apresentado ao 15º Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Campinas, 1975].

QUINTAS, G.G.S. Aspectos geológicos e condições hidrogeológicas dos Tabuleiros Nordestinos - Zona Costeira. Recife, SUDENE - Div. Hidrogeologia, 1970. 8p.

RANZANI, G.F.; FREIRE, O.; KINJO, T.; CESAR, C.M. Considerações gerais sobre os solos de Tabuleiros do Nordeste. Piracicaba, ESALQ, 1962. 27p.

REICHARDT, K. Processos de transferência no sistema solo-água-planta-atmosfera. Piracicaba, CENA. 1975a. 285p.

_____. Uso das radiações gama na determinação da umidade e da densidade do solo. Piracicaba, 1965. 34p. [Tese (Doutor) ESALQ/USP].

_____ & LIBARDI, P.L. A new equation to estimate soil-water diffusivity. In: _____. SYMPOSIUM ON ISOTOPE AND RADIATION TECHNIQUES IN SOIL PHYSICS AND IRRIGATION STUDIES, Vienna, 1973. Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies; proceedings. Vienna, IAEA, 1974. p.45-51.

_____; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Scaling of horizontal infiltration into homogeneous soils. Proc. Soil Sci. Am., 36:241-5, 1972.

_____; LIBARDI, P.L.; NIELSEN, D.R. Unsaturated hydraulic conductivity determination by a scaling technique. Soil Sci., 120(3):165-8. 1975.

RICHARDS, L.A. Capillary conduction of liquids through porous media. Physics, 1:318-33; 1931.

ROSE, C.W.; STERN, W.R.; DRUMMOND, J.E. Determination of hydraulic conductivity as a function of depth and water content in situ. Aust. J. Soil Res., 3:1-9, 1965.

SERRA, A. Atlas climatológico do Brasil. Rio de Janeiro, Conselho Nacional de Geografia e Serviço de Meteorologia, 1960.

SILVA, L.G.; SOUZA, I.B. de; SILVA, I.C. da; LUCAS, A.F. Ação de macronutrientes e manganês na cultura da mandioca (*Manihot utilissima*) em solos de Tabuleiros Costeiros do Nordeste. Recife, SUDENE - Div. Documentação, 1969. 29p.

_____; _____; LUCAS, A.F. Ensaio de adubação NPK em amendoim nos Tabuleiros Costeiros do Nordeste. SUDENE - B. Rec. nat., 5(1):17-27, jan./mar. 1967.

_____; SILVA I.C. da; LUCAS, A.F. de; SOUZA, I.B. Ensaio de adubação NPK em abacaxi nos Tabuleiros Costeiros do Nordeste. SUDENE - B. Rec. nat., 6(114): 29-42, 1968.

SUDENE. CONVÊNIO DAA 030/71 - SUDENE - MA-IPEANE. Aproveitamento dos Tabuleiros Costeiros. Recife, 1971a.

_____. Divisão de Pesquisa e Experimentação Agropecuária. Ensaio de adubação em solos de Tabuleiros, com a cultura de inhame (*Dioscorea caynnensis*). Recife, 1967a. 36p.

SUDENE. Divisão de Pesquisa e Experimentação Agropecuária. Ensaio de adubação em solos de Tabuleiros, com a cultura do amendoim (*Arachis hipogaea*). Recife, 1967b. 48p.

_____. Divisão de Pesquisa e Experimentação Agropecuária. Experimentos de feijão mulatinho (*Phaseolus vulgaris*) em tabuleiros. Recife, 1967c. 16p.

_____. Divisão de Pesquisa e Experimentação Agropecuária. Experimentos de algodão herbáceo (*Gossypium hirsutum*) em Tabuleiros. Recife, 1967d. 16p.

_____. Departamento de Agricultura e Abastecimento. Setor de aproveitamento dos Tabuleiros Costeiros. Relatório anual, 1971b. Recife, 1971b. 53p.

TAVARES, S. Contribuição para o estudo da cobertura vegetal dos Tabuleiros do Nordeste. SUDENE - B. Rec. nat., 2(1/4):11-25, 1964.

WILKINSON, G.E. & KLUTE, A. Some tests of the similar media concept of capillary flow: II. Flow systems data. Proc. Soil Sci. Soc. Am., 23:434-7, 1959.