

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
CURSO DE MESTRADO**

**RELAÇÕES FÍSICO-HÍDRICAS EM UM PERFIL DE CAMBISSOLO  
COM CACAUEIRO NÃO SOMBREADO NO SEMIÁRIDO DA BAHIA**

**BRUCE MOTA PAMPONET**

**CRUZ DAS ALMAS – BA**

**MAIO – 2013**

# RELAÇÕES FÍSICO-HÍDRICAS EM UM PERFIL DE CAMBISSOLO COM CACAUEIRO NÃO SOMBREADO NO SEMIÁRIDO DA BAHIA

**Bruce Mota Pamponet**

Engenheiro Agrônomo

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Dissertação submetida ao Colegiado de curso de Pós-Graduação em Ciências Agrárias da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências Agrárias, Área de Concentração: Agricultura Irrigada e Sustentabilidade dos Sistemas Hidroagrícolas

**Orientador: Dr. Aureo Silva de Oliveira**

**Co – Orientadora: Dra. Lígia Borges Marinho**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA  
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
CRUZ DAS ALMAS – BAHIA – 2013

## FICHA CATALOGRÁFICA

P186 Pamponet, Bruce Mota.  
Relações físico-hídricas em um perfil de cambissolo com  
cacaueiro não sombreado no Semiárido da Bahia / Bruce Mota  
Pamponet. \_ Cruz das Almas, BA, 2013.  
82f.; il.

Orientador: Aureo Silva de Oliveira.  
Coorientadora: Lígia Borges Marinho.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do  
Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais  
e Biológicas.

1.Física do solo Química do solo. 2.Solo Manejo  
Hidráulica. 3.Cacau – Análise. I.Universidade Federal do  
Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais  
e Biológicas. II.Título.

CDD: 631.4

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS-AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS**

**COMISSÃO EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DO ALUNO  
BRUCE MOTA PAMPONET**

---

Dr. Aureo Silva de Oliveira  
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB  
(Orientador)

---

Dr. Eugênio Ferreira Coelho  
Embrapa Mandioca e Fruticultura (Pesquisador)

---

Dr. José Fernandes de Melo Filho  
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB  
(Professor)

Dissertação homologada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias em.....Conferindo o Grau de Mestre em Ciências Agrárias em.....

## DEDICO

A minha esposa Adriana Luiza  
Meu amor e companheira de todas as horas

A minha mãe, Maria Aparecida Mota Soares  
Pela educação, formação moral, amor e carinho

Aos meus irmãos Breno e Bruna e a minha sobrinha Mariana.  
Pelo carinho, amizade e estímulo

*"a felicidade não é um lugar aonde se  
chega, mas sim um jeito como se vai"*

*Ed René Kivitz*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, responsável pelo meu equilíbrio emocional que com amor me ajudou a elaborar este trabalho dando-me a benção da sabedoria inclusive para lidar com momentos difíceis de incertezas e angústias.

A Universidade Federal do Recôncavo - UFRB, ao Núcleo de Engenharia de Água e Solo - NEAS e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - PPGCA pela oportunidade em realizar este curso.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Capes pela bolsa concedida.

Ao pessoal da Agropecuária Chapadão, do grupo BAGISA, na pessoa do Sr. Orlando Feiler, por ceder a área experimental e apoio local.

Aos irmãos da 1ª Igreja Batista em Senhor do Bonfim pelas constantes orações e amor fraternal.

Ao professor Aureo Silva de Oliveira pelo conhecimento, orientação, livros emprestados, e por todas as informações essenciais ao desenvolvimento desta pesquisa.

A todos os professores do programa, em especial aos professores Tales Miler, Vital Pedro, Francisco Adriano e Lucas Vellame pela importância na minha vida acadêmica.

Aos professores Eugênio Ferreira e José Fernandes por participarem da banca examinadora de defesa e pelas valiosas sugestões para melhoria da Dissertação.

Ao amigo e bolsista de iniciação científica, Neilon Duarte pela valiosa ajuda na realização deste trabalho.

Aos funcionários do NEAS, Mairi, Edilson (boi) e Lene pelo grande apoio e convivência harmoniosa.

A Lígia Marinho, Cícero Silva, Jorge Copquer, Rossini Daniele e Alysson pelo incentivo e participação neste trabalho.

Aos meus amigos e colegas de mestrado Gustavo, Arthur, Maria Augusta, Ana Carina, Jussimar, Kelly, Murilo, Jamile, Rosângela, Fredson, Lucylia entre outros, pelo apoio, companheirismo e amizade.

Ao meu amigo e cunhado Edvaldo pela convivência harmoniosa na república e ajuda neste trabalho.

Aos amigos Vitor, Fernando, Marcão e Genésio que sempre acreditaram e incentivaram nessa nova jornada.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho. A todos que me apoiaram e torceram por mim e que porventura não foram citados, meus sinceros agradecimentos e que Deus abençoe a todos.

## SUMÁRIO

	PÁGINA
RESUMO	
ABSTRACT	
INTRODUÇÃO.....	01
<b>Capítulo 1</b>	
CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DE UM PERFIL DE CAMBISSOLO NA REGIÃO SEMIÁRIDA DA BAHIA.....	07
<b>Capítulo 2</b>	
CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM UM PERFIL DE CAMBISSOLO CULTIVADO COM CACAUEIRO NÃO SOMBREADO NO SEMIÁRIDO DA BAHIA.....	36
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	72
ANEXOS.....	73

# RELAÇÕES FÍSICO-HÍDRICAS EM UM PERFIL DE CAMBISSOLO COM CACAUEIRO NÃO SOMBREADO NO SEMIÁRIDO DA BAHIA

Autor: Bruce Mota Pamponet

Orientador: Aureo Silva de Oliveira

**RESUMO:** Os atributos físico-hídricos de um solo influenciam a capacidade produtiva das culturas, uma vez que estão relacionados à aeração, capacidade de armazenamento e disponibilidade de água para as plantas. O estudo teve por objetivo a caracterização físico-hídrica do perfil de um Cambissolo Eutrófico cultivado com cacaueteiro não sombreado e o ajuste de um modelo de determinação da condutividade hidráulica em função da umidade do solo pelo método do perfil instantâneo de drenagem (PID). Para a realização do trabalho foi escolhida uma área entre dois pomares de cacaueteiros não sombreados pertencentes a Fazenda Chapadão ( $12^{\circ} 51'46''$  S e  $41^{\circ} 08'14''$ W, 350 m) localizada no município de Nova Redenção no semiárido Baiano. Foram retiradas amostras deformadas e indeformadas nas profundidades 0,10, 0,30, 0,50, 0,70, 0,90 e 1,10 m para o estudo dos atributos físico-hídricos do solo mediante a abertura de uma trincheira. Para a aplicação do PID, selecionou-se uma área circular com 4 m de diâmetro. O monitoramento da umidade do solo foi realizado por meio de sondas de TDR inseridas verticalmente nas profundidades já mencionadas. Não foram observadas grandes diferenças nos atributos físico-hídricos estudados. Houve um bom ajuste do modelo polinomial cúbico na calibração de sondas de TDR em todas as camadas do perfil do solo. A equação proposta para a determinação da condutividade hidráulica em função da umidade do solo sem considerar o gradiente de potencial total unitário, mostrou-se válida para o perfil do solo estudado.

**Palavras- chave:** atributos do solo, condutividade hidráulica, sondas de TDR.

# PHYSICAL AND WATER RELATIONS IN A PROFILE WITH INCEPTISOL COCOA SHADOWED NOT IN BAHIA SEMIARID

Author: Bruce Mota Pamponet

Adviser: Aureo Silva de Oliveira

**ABSTRACT:** The physical attributes of a soil-water influence crop production, since they are related to the aeration storage capacity and availability of water to plants. The study aimed to characterize hydro-physical profile of a Eutrophic Cambisol cultivated with cocoa unshaded and setting a model for determining the hydraulic conductivity as a function of soil moisture by the instantaneous profile method drain (PID). For completion of the work was chosen an area between two unshaded cacao orchards belonging to Chapadão Farm ( $12^{\circ} 51' 46''$  S and  $41^{\circ} 08' 14''$  W, 350 m) located in Nova Redemption in semiarid Baiano. Samples were taken and undisturbed in profundity 0.10; 0.30; 0.50; 0.70; 0.90 and 1,10 m for the study of the physical attributes of soil water through the opening of a trench. For the application of PID, we selected a circular area with a diameter of 4 m. The monitoring of soil moisture was accomplished through TDR probes inserted vertically into the depths mentioned above. There were no significant differences in the physical-hydric studied. There was a good model fit cubic polynomial calibration of TDR probes in all layers of the soil profile. The proposed equation for determining the hydraulic conductivity as a function of soil moisture without considering the total potential gradient unit, was valid for the soil profile studied.

**Key-words:** soil properties, hydraulic conductivity, TDR probes.

## INTRODUÇÃO

O solo é definido como uma camada externa e agricultável da superfície terrestre. Sua origem é a rocha que por ação de processos físicos, químicos e biológicos de desintegração, decomposição e recombinação, se transformou, no decorrer das eras geológicas, em material poroso de características peculiares (REICHARDT & TIMM, 2004).

Observando-se um solo numa visão vertical, em condições naturais, constata-se que o mesmo é constituído por uma sequência de camadas, tecnicamente chamadas de horizontes, com diferentes cores, composições e estrutura, denominadas perfil do solo (BARUQUI, 1983; SANTOS et al., 2005). O perfil do solo é uma seção vertical envolvendo a sucessão de horizontes ou camadas, desde o manto superficial de resíduos orgânicos até o material mineral subjacente pouco ou nada transformado pelos processos pedogenéticos (OLIVEIRA, 2001).

Os Cambissolos são unidades pedológicas em formação, caracterizadas com horizonte B incipiente, normalmente com elevados teores de silte, sobretudo em profundidade. Estes, por sua vez, são componentes texturais pouco desejáveis no contexto conservacionista tropical, devido à sua capacidade de se desprender pelo impacto de gotas de chuva e/ou irrigação (salpica mento), proporcionando um selamento superficial que irá diminuir a infiltração de água e aumento de escoamento superficial e erosão (RESENDE et al., 1999). Este tipo de solo é comum no Estado da Bahia, sobretudo na microrregião do município de Irecê, no extremo sul nos municípios de Malhada e Palmas de Monte Alto, além de outras distribuídas pelo estado. Outra grande extensão destes solos está localizada na chapada do Apodi, compreendendo partes do Ceará e do Rio

Grande do Norte. Nos demais estados do Nordeste ocorrem esparsamente, sendo que a área correspondente a estes solos perfazem um total de 27.500 km<sup>2</sup> e constituem 3,6 % da região semiárida (EMBRAPA, 2013).

O cultivo de cacau no Brasil (*Theobroma cacao*) por muito tempo se limitou a regiões tradicionais, na região amazônica e no sul da Bahia até no Espírito Santo, os quais apresentavam boa disponibilidade de água e condições climáticas favoráveis para o seu desenvolvimento. Sendo que a principal região produtora do país é o sul da Bahia, responsável por 72,8% da produção nacional (MANDARINO & GOMES, 2009).

A entrada do cacau no semiárido do Nordeste brasileiro pode contribuir para diminuição das importações da sua amêndoa e o aumento da cadeia produtiva dos seus derivados, tendo como consequência a geração de emprego e renda para essa região. Estudos sobre o comportamento agrônomo do cacau no semiárido brasileiro sob irrigação indicam boa adaptação da planta às condições edafoclimáticas (LEITE et al., 2012).

Para a produção de cacau em regiões não tradicionais, como o semiárido, há necessidade de irrigação. Sendo que o conhecimento dos termos relacionados as relações hídricas da planta é imprescindível avaliar o potencial agrícola da mesma.

O semiárido brasileiro abrange uma área de aproximadamente 982.563,3 km<sup>2</sup> (11% do total do território), e está inserido em uma área de intersecção compreendida entre os Estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e Norte de Minas Gerais (CIRILO, 2008). Sendo que na Bahia compreendendo uma área de 388.274 km<sup>2</sup>, ou seja, 70% da área do estado, com uma população de 6.316.846 habitantes (LOBÃO et al.; 2004).

No Nordeste brasileiro o semiárido apresenta como características edafoclimáticas; elevada evapotranspiração, regime pluviométrico marcado pela escassez e irregularidade, forte insolação, altas temperaturas, solos rasos e pouco intemperizados, pequena produção de fitomassa e elementos ambientais que dentre outros fatores, dificultam a manutenção de uma atividade agrícola sustentável e o desenvolvimento local (SILVA, 2003).

O conhecimento das inter-relações água- solo- planta é essencial para uma eficiente exploração agrícola, porque a água necessária ao crescimento vegetal

encontra-se no solo e seu comportamento depende fundamentalmente de suas propriedades físicas. As propriedades físicas do solo são importantes componentes na avaliação das condições de sua capacidade produtiva, uma vez que influencia a aeração, a capacidade de armazenamento e disponibilidade de água para as plantas (BOGNOLA et al., 2010).

Dessa forma, tornam-se importantes o conhecimento dos atributos físico-hídricos do solo, pois os processos fundamentais que acontecem no solo como movimentos de água, gases, solutos e calor, estão a elas relacionados com seus atributos, que são definidos como um conjunto de caracteres que delineiam o comportamento do solo como um todo. Entre os principais atributos estudados estão a granulometria, densidade de partícula, densidade do solo, porosidade (total, macro e micro), retenção de água, estrutura e consistência (limites de Atterberg).

A dinâmica da água no solo altera-se de acordo com o uso do solo, por ser dependente de fatores como a porosidade (quantidade, continuidade e tamanho), uma vez que a compactação e a descontinuidade dos poros reduzem a permeabilidade, implicando empobrecimento e perda de solo pela erosão hídrica (SOUZA & ALVES, 2003). Uma melhor compreensão das propriedades hidráulicas que governam o transporte de água no solo é o estudo da condutividade hidráulica que é um parâmetro que mede a facilidade com a qual o solo transmite água e a gradiente de potencial da água. A condutividade hidráulica é, portanto, um parâmetro do solo e traduz a intensidade com que este solo conduz a água, sendo tanto maior quanto mais úmido o solo, atingindo seu valor máximo na saturação (LIBARDI, 2005).

O movimento da água no solo na condição de não saturação, devido a sua importância e complexidade, tem sido um dos mais importantes tópicos pesquisados na física do solo nas últimas décadas. Apesar de avanços teóricos e práticos significativos, a zona do solo não-saturada permanece sendo um desafio para o entendimento científico e manejo tecnológico (BIASSUSI, 2011)

A condutividade hidráulica do solo não saturado é de fundamental importância no estudo do movimento de água no perfil do solo, sendo esta uma função das características físicas do solo e da umidade, que com auxílio da curva de retenção é importante na elaboração de projetos de irrigação e drenagem (CRUCIANI, 1983).

As propriedades físico-hídricas de um solo sob cultivo do cacau é de fundamental importância para sua produtividade, já que o desenvolvimento da planta depende dessas propriedades ao mesmo tempo em que as influenciam (AUGUSTO et al., 2004).

Por ser uma cultura cultivada tradicionalmente em ambientes úmidos e sem irrigação, são escassas as informações a respeito dos atributos físicos e hídricos dos solos com cacau em regiões não tradicionais, no entanto, essas informações são extremamente necessárias para o correto planejamento, dimensionamento e manejo da irrigação.

Diante disso, esse estudo teve como objetivo a caracterização físico-hídrica de um perfil de Cambissolo Eutrófico Latossólico cultivado com cacau não sombreado no semiárido da Bahia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUGUSTO, S. G.; MARTINS P. F. S.; GÓES, A. V. M. Propriedades físicas do solo sob as culturas do cacau (*Theobroma cacao L.*), da pupunha (*Bactris gaesipaes H. B.*) e do açaí (*Euterpe oleraceae Mart.*). **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 42, p. 221-223, 2004.

BARUQUI, A. M. Comentários sobre a descrição e resultados analíticos de um perfil de solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 9, n. 105, p. 3-25, 1983.

BOGNOLA, I. A.; DEDECEK, R. A.; LAVORANTI, O. J. & HIGA, A. R. Influência de propriedades físico-hídricas do solo no crescimento de *Pinus taeda*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 61, p. 37-49, 2010.

BIASSUSI, M. **Simulação do movimento da água no solo utilizando modelo numérico**. 197p. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

CIRILO, J. A. Políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido. **Estudos avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, 2008.

CRUCIANI, D. E. **A drenagem na agricultura** 2º. Ed Nobel. São Paulo, SP, 1983.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias. Cambissolos. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/bioma\\_caatinga/arvore/CONT000g98rt3o02wx5ok0wtedt3n5ubswf.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/bioma_caatinga/arvore/CONT000g98rt3o02wx5ok0wtedt3n5ubswf.html)>. Acesso em 20 de março de 2013.

LEITE, B. J.; FONSECA, E. V.; VALLE, R. R.; NASCIMENTO, M. N. & MARROCOS, P. C. L. Comportamento produtivo de cacau no semiárido do Brasil. **Agrotópica**, Ilhéus, v. 24, n. 2, 2012.

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

LOBÃO, J. S. B.; FRANCA, W. J. S. R. & FREITAS, N. B. Semiárido da Bahia, limites físicos ou sócio-político? Uma abordagem geotecnológica para a delimitação oficial In: II SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO, 2004, Aracaju, palestra 15.

MANDARINO, E. P. & GOMES, A. R. S. **Produtividade do cacauero (*Theobroma cacao* L.) cultivado em blocos monoclonais, no sul da Bahia, Brasil**. Ilhéus: CEPLAC/CEPEC, 2009. 32p. (Boletim Técnico, 197).

OLIVEIRA, J. B. **Pedologia aplicada**. Jaboticabal: FUNEP, 2001. 414p.

REICHARDT, K. & TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera (Conceitos, Processos e Aplicações)**. São Paulo: Manole, 2004. 478p.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B. & CORREA, G. F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. Viçosa: NEPUT, 1999. 338p.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. & ANJOS, L. H. C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5. ed. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 92p.

SILVA, R. M. A. Entre dois paradigmas: combate à seca e convivência com o semi-árido. **Sociedade e Estado**. Brasília, v. 18, n. 1-2, p. 361-385, 2003.

SOUZA, Z. M. & ALVES, M. C. Movimento de água e resistência à penetração em um Latossolo Vermelho distrófico de Cerrado, sob diferentes usos e manejos.

**Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7,  
p. 18-23, 2003.

# **CAPITULO 1**

## **CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DE UM PERFIL DE CAMBISSOLO NA REGIÃO SEMIÁRIDA DA BAHIA<sup>1</sup>**

---

<sup>1</sup> Capítulo a ser ajustado para submissão ao comitê editorial Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.

## CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DE UM PERFIL DE CAMBISSOLO NA REGIÃO SEMIÁRIDA DA BAHIA

Autor: Bruce Mota Pamponet

Orientador: Aureo Silva de Oliveira

**RESUMO:** O estudo dos atributos físico-hídricos do solo sob o cultivo de cacaueteiro em regiões não tradicionais é de fundamental importância para o estabelecimento de boas práticas agrícolas, bem como de técnicas de irrigação e drenagem. Esse trabalho teve por objetivo a caracterização dos atributos físico-hídricos de um perfil de Cambissolo Eutrófico Latossólico cultivado com cacaueteiro não sombreado no semiárido da Bahia. O trabalho foi realizado em uma área cultivada com cacaueteiros não sombreados, na fazenda Agropecuária Chapadão pertencente ao grupo BAGISA Agropecuária S/A, localizada no município de Nova Redenção (12° 51'46" S e 41° 08'14" W, 350 m) no centro-sul da Bahia. Para tanto, foi necessário a abertura de uma trincheira, nas dimensões 1,5 x 1,0 x 1,2 m para a retirada de amostras de solo indeformadas e deformadas nas profundidades de 0,10; 0,30; 0,50; 0,70; 0,90 e 1,10 m. A avaliação dos atributos físico-hídricos do solo deu-se mediante a determinação da textura do solo, densidade do solo e de partículas, porosidade total, macro e microporosidade, curva característica de retenção de água no solo e disponibilidade de água. Em todas as profundidades avaliadas não foram observadas grandes diferenças para as variáveis estudadas. Houve um bom ajuste dos dados pelo modelo de van Genuchten em todo o perfil do solo ( $r^2 > 0,90$ ). Verificou-se uma tendência de diminuição da água disponível com o aumento da profundidade e da uniformidade do perfil do solo para os atributos físico-hídricos avaliados, influenciando o comportamento da curva característica de água no solo.

**Palavras-chave:** atributos do solo, retenção de água, água disponível.

## PHYSICAL AND WATER RELATIONS IN CHARACTERIZATION GROWN WITH COCOA IN NO SHADOWED SEMIARID OF BAHIA

Author: Bruce Mota Pamponet

Adviser: Aureo Silva de Oliveira

**ABSTRACT:** The study of the physical attributes-hydric soil under cocoa cultivation in non-traditional regions is of fundamental importance to the establishment of good agricultural practices and techniques of irrigation and drainage. This study aimed to characterize the physical attributes of a water-profile Eutrophic Cambisol Latosol cultivated with cocoa unshaded in the semiarid region of Bahia. The study was conducted in an area planted with cocoa unshaded, the farm belonging to the group Chapadão Agricultural Agricultural BAGISA S / A, located in Nova Redemption (12 ° 51 `46 `` S and 41 ° 08` 14 `` W, 350 m) in the center-south of Bahia. Therefore, it was necessary to open a trench in the dimensions 1.5 x 1.0 x 1.2 m for the removal of soil samples and undisturbed depths of 0.10, 0.30, 0.50; 0.70, 0.90 and 1.10 m. The assessment of the physical attributes of the soil-water was given by the determination of soil texture, bulk density and particle porosity, macro and micro, Characteristics of water retention in the soil and water availability. In all evaluated depths were not observed major differences in the variables studied. There was a good fit of the data model by van Genuchten throughout the soil profile ( $r^2 > 0.90$ ). There was a decreasing trend with increasing available water depth and consistency of the soil profile to physical attributes evaluated hydraulic influencing the behavior of the characteristic curve of water in the soil.

**Key-words:** soil properties, water retention, water available.

## INTRODUÇÃO

Os estudos relacionados às propriedades físico-hídricas do solo em regiões semiáridas têm sido cada vez frequentes a fim de obter um melhor entendimento das características físicas que influenciam o desenvolvimento das plantas nessas condições (CINTRA et al., 2004; MACHADO et al., 2008).

Os Cambissolos são solos minerais não hidromórficos, constituídos por material mineral com horizonte B incipiente subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial horizonte hístico com espessura inferior a 0,40 m. Devido à heterogeneidade do material de origem, das formas de relevo e das condições climáticas, as características destes solos variam muito de um local para outro EMBRAPA (2006).

Quanto à granulometria, pela própria natureza do material de origem, há grande variação na textura, ocorrendo solos de textura média, siltosa, arenosa, argilosa e muito argilosa (MATA et al., 2011). As propriedades químicas são também muito variáveis, em função do material de origem e do clima. De acordo com Rocha et al., (2005), os Cambissolos podem ter alta a baixa saturação por bases e atividade química da fração coloidal.

Entende-se por atributos físicos, o conjunto de caracteres que delineiam o comportamento do solo como um todo. Dentre eles, merecem maior importância, a composição granulométrica, densidade do solo, densidade de partícula, porosidade (total, macro e micro), retenção de água, estrutura e consistência (limites de Atterberg) (MOTA et al., 2008).

A composição granulométrica é uma característica inerente ao solo que possui grande importância no estudo do seu comportamento físico-hídrico. A análise granulométrica estuda a textura do solo, a qual permite classificar os

componentes do solo em classes, de acordo com seus diâmetros. A textura do solo é definida pela proporção relativa das classes de tamanho de partículas de um solo, ou seja, como as partículas se encontram distribuídas no perfil do solo, de acordo com seu tamanho, envolvendo propriedades quantitativas e qualitativas. O tamanho das partículas é de grande importância já que ele determina o número de partículas por unidade de volume ou de peso e a superfície a que estas se expõem (BRADY, 1989; KIEHL, 1979).

Vários fatores físico-hídricos do solo são influenciados pelo teor de argila do solo, tais como, o estado de energia da água no solo, o fluxo não saturado, porosidade e densidade do solo (KITAMURA, 2007).

A densidade do solo é um atributo que varia com o tempo (por processos naturais de adensamento) e, ou, com práticas de manejo, tal atributo é afetado pela estrutura do solo, grau de compactação, manejo e tipos de culturas. Reichardt & Timm (2004) salientam ainda que este é um índice do grau de compactação de um solo, pois o solo é um material poroso, por compressão a mesma massa de material sólido pode ocupar um volume menor. Isto afeta a sua estrutura, o arranjo, o volume dos poros e as características de retenção de água. Este atributo está diretamente relacionado com a porosidade, a condutividade hidráulica, a permeabilidade ao ar e à água e a resistência do solo à penetração (KIEHL, 1979; CAMARGO & ALEONI, 1997).

Outra importante propriedade relacionada à composição volumétrica do solo é a densidade de partículas, a qual expressa a relação entre a quantidade de massa de solo seco por unidade de volume de sólido do solo, sendo este pouco perceptível em períodos longos (BICALHO, 2011). Tipicamente os valores da densidade de partículas oscilam entre 2,60 e 2,75 Kg m<sup>-3</sup>, referentes à densidade do quartzo, feldspato e silicatos coloidais (BRADY, 1989), entretanto, o valor pode chegar a 1,25 Kg m<sup>-3</sup> em horizontes que apresentam alto teor de material orgânico (COSTA, 2004). Marques et al., (2007) estudando um Cambissolo encontraram valores de densidade de partículas, situados entre 2,32 e 2,44 Kg m<sup>-3</sup>.

A qualidade estrutural do solo tem sido comumente analisada por parâmetros como a densidade e a porosidade. A porosidade do solo corresponde ao volume do solo não ocupado por partículas sólidas (porosidade total), incluindo todo o espaço poroso normalmente ocupado pelo ar (macroporosidade) e pela

água (microporosidade) (BRADY, 1989; CURI et al. 1993). É inversamente proporcional à densidade do solo e de grande importância direta para o crescimento de raízes e movimento de ar, água e solutos no solo.

O fluxo de gases e o movimento de água no solo dependem não somente da quantidade de macroporos, mas também da continuidade em profundidade e da abertura à superfície. Portanto, a porosidade é um parâmetro de maior significado que a densidade para avaliar a qualidade estrutural do solo porque descreve a proporção do volume de solo disponível às raízes das plantas, à água e ao ar (MANTOVANI, 1987).

Solos com camadas compactadas apresentam redução da porosidade total e da macroporosidade e aumento da microporosidade e da densidade dos solos (KLEIN & LIBARDI, 2002). Nesses casos, o aumento da microporosidade favorece a retenção de água no solo (OLIVEIRA et al., 2004), porém compromete o transporte de ar e água (CAVENAGE et al., 1999).

A água disponível no perfil do solo é um dos fatores de grande relevância nas atividades agrícolas, pois além de manter abastecido o lençol freático, ela é fator indispensável ao desenvolvimento das culturas. No entanto, devido às variações nos tipos de solos e na diversidade de suas características físico-hídricas, faz-se necessário uma busca por informações e técnicas adequadas ao melhor manejo da água no solo (VIELMO, 2008).

A disponibilidade total de água no solo refere-se à porção de água contida no solo entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, indispensável para o correto manejo da água em projetos de irrigação (KLEIN et al., 2006; REICHARDT, 1988; COSTA et al., 2009).

A capacidade de campo é um estado hídrico específico para cada tipo de solo e observado durante o processo de redistribuição da água, sendo comumente adotado, para solos argilosos 0,33 atm (OLIVEIRA et al., 2002; REICHARDT & TIMM, 2004; JABRO et al., 2009). Já o limite inferior é representado pelo ponto de murcha permanente, que se refere ao teor de água no solo caracterizado pela forte retenção matricial, abaixo do qual a planta não consegue absorver água, referindo-se à umidade contida no solo que foi submetida a uma tensão de 13 a 15 atm (DAKER, 1988; MELLO et al., 2002; ROMANO & SANTINI, 2002).

A avaliação da curva de retenção permite uma estimativa rápida da disponibilidade de água no solo para as plantas, na profundidade de solo considerada. Assim, pode-se determinar a quantidade máxima de armazenamento de água ("capacidade de campo"), o armazenamento mínimo (ponto de murchamento) ou o armazenamento em qualquer ponto da curva (VAN GENUCHTEN, 1980; DEXTER & BIRD, 2001; MELLO, 2005).

A curva de retenção de água do solo expressa a relação entre a umidade do solo, seja ela com base em massa ou volume, e o seu potencial mátrico ( $\Psi_m$ ) correspondente. O conhecimento deste parâmetro é extremamente importante nos estudos que envolvam água no solo, sendo muito utilizada para se estimar valores de  $\Psi_m$  a partir de valores de umidade, mais fáceis de serem mensurados (DANE et al., 1992; JALBERT & DANE, 2001). A curva de retenção é regida por duas forças principais (capilares e adsorção), as quais são denominadas de forças mátricas, dando origem ao termo potencial mátrico da água no solo.

Segundo Libardi (2005) dois processos explicam a retenção da água nos solos. No primeiro deles, a retenção ocorre nos microporos dos agregados do solo e pode ser explicada pelo fenômeno da capilaridade. No segundo, o de adsorção, a retenção ocorre nas superfícies dos sólidos do solo, como filmes finos presos a elas.

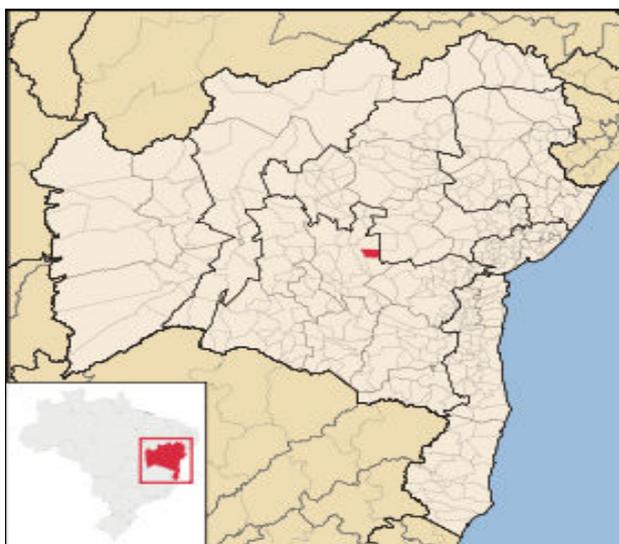
Dentre os vários fatores que podem afetar a retenção da água no solo, a textura do solo é o principal deles. Ela determina diretamente a área de contato com as partículas sólidas e as proporções de diferentes tamanhos de poros que aparecem em uma amostra de solo (GUERRA, 2000; REICHARDT & TIMM, 2004). Martinez et al. (1995) e Carvalho et al. (2000), observaram correlações estreitas em retenção de água tanto a baixa como alta tensão das frações granulométricas do silte junto com a argila, mostrando o efeito da participação ativa das frações granulométricas mais finas.

Diante disso o estudo teve como objetivo a caracterização dos atributos físico-hídricos de um perfil de Cambissolo cultivado com cacaueteiro não sombreado no semiárido da Bahia.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Caracterização da área experimental

O trabalho foi desenvolvido em área cultivada com cacaueteiro não sombreado, na Fazenda Agropecuária Chapadão pertencente ao grupo BAGISA Agropecuária S/A, localizada no município de Nova Redenção (12° 51'46'' S e 41° 08'14''W, 350 m) no centro-sul da Bahia. O clima da região é do tipo Bsw (semiárido) segundo classificação de Köppen, caracterizado por temperaturas médias anuais de 23 °C, com máxima de 27 °C e mínima de 18 °C, precipitação pluviométrica média anual de 600 mm. O solo em estudo foi um Cambissolo Eutrófico Latossólico (LEITE, 2012) cuja caracterização do perfil consta no Anexo A.



**Figura 1** - Localização do município de Nova Redenção no estado da Bahia.

Para o estudo das características físico-hídricas do solo foi necessário a abertura de uma trincheira para retirada de amostras de solo deformadas (1) e indeformadas (2). Na retirada de solo na condição 1, o material foi acondicionado em sacolas plásticas previamente identificadas. Na condição 2, utilizou-se um trado tipo Uhland (Figura 2) e após retirada dos cilindros, o mesmo foi envolvido em filme plástico para evitar a movimentação do solo. A área escolhida para a coleta de solo estava localizada entre dois pomares de cacaueteiros não sombreados cultivados sob sistema de irrigação por gotejamento composto de

três emissores por planta. A trincheira foi aberta nas dimensões 1,5 x 1,0 x 1,2 m e as amostras retiradas no perfil a 0.10; 0.30; 0.50; 0.70; 0.90 e 1,10 m de profundidade.

As amostras deformadas foram utilizadas para determinação da densidade de partículas e análise granulométrica, sendo as indeformadas para densidade do solo, microporosidade e curva de retenção de água no solo. A classificação textural foi feita no Laboratório de Física do Solo da Embrapa Mandioca e Fruticultura em Cruz das Almas, Bahia.



**Figura 2** - Trincheira aberta no campo para a retirada das amostras de solo.

### **Atributos analisados**

#### **Textura do solo**

A análise granulométrica para a classificação textural do solo foi determinada pelo método do densímetro (EMBRAPA, 2011) e a classificação definida pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solo. O procedimento baseia-se na sedimentação das partículas que compõem o solo. Após adição de um dispersante químico, fixa-se um tempo único para a determinação da densidade da suspensão que se admite ser a concentração total de argila. A fração areia (fina, média e grossa) foi separada por tamisação e então pesadas. O silte foi obtido por diferença entre os percentuais de argila e areia.

### Densidade do solo e de partículas

Utilizaram-se amostras de solo de estrutura inalterada coletadas em cilindros volumétricos, conforme Embrapa (2011). Cada amostra indeformada foi seca em estufa a 105 °C por 24 horas e pesada, sendo o peso dividido pelo volume do cilindro (100 cm<sup>3</sup>) (Figura 3). Para o cálculo da densidade do solo foi utilizada a Equação 1:

$$D_s = \frac{M_s}{V_t} \quad (1)$$

onde:

$D_s$  - densidade do solo (Kg m<sup>-3</sup>);

$M_s$  - massa de solo seco em estufa a 105 °C (Kg);

$V_t$  - volume do cilindro (m<sup>3</sup>).



**Figura 3** - Amostras indeformadas de solo para a determinação da densidade do solo.

A densidade de partículas do solo foi obtida pelo método do balão volumétrico (EMBRAPA, 2011). O princípio deste método consiste na determinação do volume de álcool necessário para completar a capacidade do balão volumétrico (50 ml) contendo 20 g de solo seco em estufa, conforme Equação 2.

$$D_p = \frac{M_s}{50 - V_{al}} \quad (2)$$

onde:

$D_p$  - densidade de partículas ( $\text{Kg m}^{-3}$ );

$M_s$  - massa de solo seco a  $105\text{ }^\circ\text{C}$ ;

$V_{al}$  - volume de álcool ( $\text{m}^3$ ).

### Porosidade do solo

A fim de se determinar a porosidade total, macroporosidade ( $M_a$ ) e microporosidade do solo ( $M_i$ ), amostras com estrutura inalterada foram coletadas em cilindros de aço de  $100\text{ cm}^3$  com o trado de Uhland. A porosidade total foi determinada seguindo a metodologia sugerida pela Embrapa (2011) de acordo com a Equação 3.

$$P_t = \frac{D_p - D_s}{D_p} \quad (3)$$

onde:

$P_t$  - porosidade total ( $\text{m}^3\text{ m}^{-3}$ );

$D_p$  - densidade de partículas ( $\text{Kg m}^{-3}$ );

$D_s$  - densidade de solo em ( $\text{Kg m}^3$ ).

Para a determinação da  $M_i$  as amostras de solo após serem saturadas foram submetidas à tensão de  $0,06\text{ MPa}$ . As amostras foram colocadas em uma mesa de tensão e o “frasco de nível” foi descido para o nível de sucção correspondente a  $0,60\text{ m}$  de altura de coluna d’água. Após  $24\text{ horas}$ , os cilindros foram pesados e em seguida secos em estufa a  $105^\circ\text{C}$  por um mesmo período de tempo para a determinação da massa de solo seco. O valor da  $M_i$  para cada amostra foi calculada utilizando-se a Equação 4.

$$M_i = \frac{a - b}{c} \quad (4)$$

onde:

$M_i$  - microporosidade ( $\text{m}^3\text{ m}^{-3}$ );

$a$  - massa da amostra após ser submetida a uma tensão de  $0,60\text{ m}$  de coluna de água ( $\text{Kg}$ );

b - massa da amostra seca a 105°C (Kg);

c - volume do cilindro (m<sup>3</sup>).

A macroporosidade foi determinada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade de acordo com a equação 5:

$$M_a = P_T - M_i \quad (5)$$

### Retenção de água no solo

As curvas de retenção de água são comumente elaboradas com coleção de pares de umidade do solo e potencial matricial, segundo a metodologia proposta por Richards (1965).

Para a obtenção da curva característica de água no solo utilizando a câmara de pressão de Richards, as amostras de solo em anéis volumétricos de 50 cm<sup>3</sup> foram colocadas em uma membrana porosa dentro de uma bandeja com água, até 2/3 da altura do anel cilíndrico, para que ocorresse a saturação do meio (amostra + membrana) (Figura 4). Alcançada a saturação após 24 horas, foram levadas sobre a membrana porosa para o interior da câmara de pressão. Foram aplicadas as tensões de 1; 33; 100; 500; e 1500 kPa.

Para a aplicação da primeira tensão, as amostras de cada profundidade foram colocadas dentro da câmara de pressão de Richards até que a pressão aplicada não retirasse mais água da amostra, quando então as amostras eram pesadas.



**Figura 4** - Extrator de RICHARDS e amostras dentro da panela de pressão.

Os mesmos procedimentos foram adotados para todas as tensões até que não se verificasse mais a saída de água. Após a aplicação de cada tensão foram obtidas as umidades (por diferença de peso) correspondentes ao potencial mátrico. As amostras foram levadas para estufa a 105 °C, após a aplicação da última tensão, por cerca de 48 horas para a determinação do peso seco do solo.

A umidade volumétrica foi obtida multiplicando-se a umidade à base em massa ( $\text{Kg Kg}^{-1}$ ) pela densidade do solo ( $\text{Kg m}^{-3}$ ). Os valores da umidade volumétrica do solo e do potencial matricial foram utilizados para ajustar a equação de van Genuchten (1980), como se segue:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (6)$$

onde:

$\theta$  - umidade atual do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );

$\theta_r$  - umidade residual do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );

$\theta_s$  - umidade do solo saturado de água ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );

$\alpha$ ,  $m$  e  $n$  - parâmetros de ajuste do modelo;

$h$  - módulo do potencial matricial da água do solo (m).

### Água Disponível

A água disponível foi considerada como a água armazenada no solo entre as tensões de 33 e 1500 kPa, tensões essas usadas para representar, respectivamente, a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (KLAR, 1988; BERNARDO, 1989). A determinação da disponibilidade total de água foi de acordo com a Equação 7.

$$AD = (\theta_{CC} - \theta_{PM}) Z \quad (7)$$

onde:

$AD$  - água disponível ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );

$\theta_{CC}$  - umidade do solo na capacidade de campo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );

$\theta_{PM}$  - umidade do solo no ponto de murcha ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );

$Z$  - camada do solo (m)

## RESULTADO E DISCUSSÃO

A partir da análise granulométrica do solo foi possível classificá-lo como franco-argiloso (Tabela 1), com base no triângulo de classificação textural (EMBRAPA, 2006). Resultado semelhante foi observado por Dalben & Osaki (2008) que estudando os atributos físicos de um Cambissolo háplico em floresta nativa e de *Pinus taeda* não constataram variações significativas quanto a classe textural até a profundidade 0,40 m.

Analisando-se os teores de argila nas diferentes profundidades no perfil do solo, percebeu-se que o teor de areia tende a diminuir com a profundidade o mesmo não se verificando para os teores de argila, incrementando assim as frações de menores tamanhos (silte/argila) no perfil. Teores semelhantes de argila foram encontrados em Cambissolo háplico distrófico com texturas franco-argila-arenosa a argila por Mata et al. (2011). A textura dos Cambissolos varia muito, de acordo com o material de origem e as características do relevo e condições climáticas (EMBRAPA, 2006; ROCHA et al., 2005). O principal fator que influencia nas diferentes frações granulométricas é a gênese do solo, sendo que a vegetação não exerce influência direta (BRADY, 1989; EGUCHI et al., 2002).

**Tabela 1** - Distribuição granulométrica do solo com a respectiva classificação textural de um perfil de Cambissolo Eutrófico Latossólico. Nova Redenção, BA, 2012.

Profundidade	Areia Total	Silte	Argila	Classificação textural
(m)	----- (Kg t <sup>-1</sup> ) -----			
0,10	459	203	338	Franco-argiloso
0,30	436	224	340	Franco-argiloso
0,50	415	253	332	Franco-argiloso
0,70	411	265	324	Franco-argiloso
0,90	392	309	299	Franco-argiloso
1,10	378	272	350	Franco-argiloso
Média	415	254	330	

Na Tabela 2 são apresentados os resultados: densidade do solo ( $D_s$ ), densidade de partículas ( $D_p$ ), porosidade total ( $P_t$ ), macroporosidade ( $M_a$ ) e microporosidade ( $M_i$ ) em todas as profundidades estudadas.

Observa-se na Tabela 2 que quanto a  $D_s$  não houve grandes diferenças entre as profundidades, sendo que o valor médio foi de  $1,41 \text{ (Kg m}^{-3}\text{)}$ . Resultado semelhante foi obtido por Bicalho (2011) que não encontrou diferenças significativas da  $D_s$  em Cambissolo de textura média até a profundidade de 0,40 m.

A não diferenciação da  $D_s$  na direção vertical do solo é reforçada por Andrade et al. (2005) que estudando variabilidade espacial da  $D_s$  em vários perfis de solo, concluíram uma baixa variação espacial da densidade do solo com aumento da profundidade. O valor médio da  $D_s$  para o perfil do solo foi de  $1,41 \text{ Kg m}^{-3}$ , sendo que esse valor se aproximou com níveis considerados críticos para o crescimento radicular e o desenvolvimento das culturas, que varia entre 1,4 a  $1,5 \text{ Kg m}^{-3}$  para solos de textura franco-argiloso (REICHERT et al., 2009).

**Tabela 1** - Valores de densidade do solo ( $D_s$ ), densidade de partículas ( $D_p$ ), porosidade total ( $P_t$ ), macroporosidade ( $M_a$ ) e microporosidade ( $M_i$ ), em um perfil de Cambissolo Eutrófico Latossólico. Nova Redenção, BA, 2012.

Profundidade	$D_s$	$D_p$	$P_t$	$M_i$	$M_a$
(m)	---- ( $\text{Kg m}^{-3}$ ) ----			----- ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) -----	
0,10	1,43	2,59	0,446	0,376	0,070
0,30	1,41	2,62	0,460	0,352	0,109
0,50	1,41	2,65	0,466	0,346	0,120
0,70	1,37	2,65	0,483	0,373	0,110
0,90	1,40	2,61	0,464	0,361	0,103
1,10	1,44	2,64	0,455	0,348	0,106
Média	1,41	2,62	0,462	0,359	0,103
CV (%)	0,017	0,009	0,027	0,036	0,167

O valor médio da densidade de partículas foi de  $2,62 \text{ Kg m}^{-3}$  no perfil do solo, estando de acordo para solos com material mineral proveniente de quartzito

que varia de 2,60 a 2,75 Kg m<sup>-3</sup> (KIEHL, 1979). Os valores de Dp não diferiram entre si nas profundidades avaliadas. A pouca variabilidade espacial da Dp é citado em diversos estudos que avaliam a dependência espacial dos atributos físico do solo (EGUCHI et al., 2002; SIMÕES et al., 2006; AMARO FILHO et al., 2007). Essa constatação é confirmada por BRADY (1989), o qual afirma que é comum ocorrer baixa variabilidade, pois a densidade de partículas depende diretamente do material de origem e, portanto, apresenta pouca ou nenhuma diferença para uma mesma classe de solo avaliada, justificando a homogeneidade dessa propriedade nas profundidades estudadas.

Os valores de porosidade total não diferiram estatisticamente entre as profundidades. Essa não diferenciação está relacionada à densidade do solo, que também não apresentou diferenças significativas, uma vez que existe uma relação inversa da densidade do solo com a porosidade total (HILLEL, 1982; LIMA et al., 2005). Cortez et al. (2011) avaliando os atributos físicos de um Argissolo sob sistemas de preparo de solo, verificaram que a porosidade total tem relação estreita e inversa com a densidade do solo.

Este resultado pode estar relacionado ainda à conformidade da proporção de argila nas profundidades avaliadas, pois o volume e o tamanho dos poros do solo são altamente dependentes da sua textura (DEDECEK, 2008). A relação inversa da porosidade total com relação à densidade do solo ocorre devido à forma laminar das argilas e ao aumento do seu teor, apresentando uma tendência a se ajustarem face a face, diminuindo os espaços vazios (REICHERT et al., 2007).

Em relação à macroporosidade percebe-se que não houve diferenças significativas em todo o perfil, seguindo a mesma tendência da Pt, uma vez que qualquer aumento na Ds irá provocar uma diminuição no seu espaço poroso, sendo os de diâmetros maiores, os primeiros a serem afetados (DEXTER et al., 2004). O valor médio da macroporosidade ficou em torno de 0,106 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, sendo considerado crítico para o movimento de água no solo, pois os mesmos são a rota primária no fluxo de água e nutrientes até a zona radicular (REICHERT et al. 2007, 2009). De acordo com Watanabe et al. (2002), valores de Ma abaixo de 0,10 - 0,15 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> são, em geral, considerados restritivos para o crescimento e produtividade da maioria das culturas. Deve-se ressaltar que os fluxos de gases bem como o movimento de água no solo estão intimamente relacionados ao

volume de macroporos, ou seja, a garantia da oxigenação radicular bem como a capacidade de infiltração e redistribuição de água no perfil depende dessa propriedade.

O mesmo comportamento foi observado para a microporosidade, a qual não apresentou diferenças significativas com a profundidade. A microporosidade está relacionada com a retenção de água no solo, influenciando o desenvolvimento das plantas especialmente nas épocas críticas de suprimento hídrico (DALMAGO et al., 2009). Pela Tabela 1, verifica-se, ainda, que há um predomínio de microporos no solo em relação aos macroporos com um valor médio para todo o perfil do solo de  $0,359 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . A ocorrência de microporos em grandes proporções poderá dificultar o movimento de água ao longo do perfil, diminuindo a drenagem interna do solo comandada pela estrutura (CAVENAGE et al., 1999).

Os valores de umidade correspondentes às tensões (0; 1; 33; 100; 500 e 1500 kPa) no ajuste do modelo de van Genuchten para todas as profundidades são mostradas na Tabela 3. O número de tensões escolhidas (6) para o ajuste da curva de retenção de água (CRA) no solo é sugerida por Jorge et al. (2010) em um estudo em que avaliou o número mínimo de pontos na determinação da CRA em um Latossolo Vermelho Eutrófico com textura média.

**Tabela 3** - Valores de umidade volumétrica correspondente as tensões submetidas no ajuste do modelo de van Genuchten em todo o perfil de Cambissolo Eutrófico Latossólico. Nova Redenção, BA, 2012.

Potencial matricial (kPa)	Umidade do solo ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )					
	0,10 m	0,30 m	0,50 m	0,70 m	0,90 m	1,10 m
0	0,480	0,471	0,476	0,466	0,476	0,456
1	0,313	0,308	0,294	0,307	0,308	0,288
33	0,256	0,254	0,237	0,256	0,259	0,253
100	0,222	0,220	0,204	0,223	0,228	0,229
500	0,192	0,187	0,176	0,193	0,200	0,206
1500	0,179	0,173	0,165	0,180	0,188	0,195

Os coeficientes do modelo de van Genuchten com a umidade do solo na capacidade de campo e ponto de murcha permanente no perfil do solo estão apresentados na Tabela 4.

Estabeleceu-se no processo de otimização do modelo que os valores de  $\theta_r$ ,  $n$  e  $\alpha$  fossem maiores do que zero, sendo necessário impor a restrição para  $\theta_r$  ser no máximo o valor ao teor de água em equilíbrio com a tensão no ponto de murcha. No processo de ajuste do modelo, os resultados de  $\theta_r$  ficaram relativamente próximos do conteúdo de água no ponto de murcha, os quais, analisados em termos da relação  $\theta_{PM}/\theta_r$ , resultaram nos seguintes valores em ordem crescente de profundidade do solo: 1,15; 1,22; 1,12; 1,19; 1,15 e 1,17.

Dentre os coeficientes do modelo de van Genuchten ajustado no perfil do solo, o parâmetro  $\alpha$  obteve maior coeficiente de variação, apresentando maiores valores (0,194) na profundidade de 1,10 m.

O parâmetro  $n$  assumiu um valor médio no perfil do solo de 1,35. Uma variação entre 0,80 a 1,44 é proposta por Hartmann (2001) para solos de textura franco-argiloso. Valores de  $n$  próximo a 1 refletem uma menor inclinação no ponto de inflexão da curva de retenção, indicando uma maior uniformidade na distribuição do tamanho dos poros (ENGLER, 2007). Observou-se uma pequena variação (CV = 3,22%) do parâmetro  $n$  que está relacionado com a declividade da curva de retenção ajustada (MARTINEZ et al., 1995), uma vez que o comportamento da curva foi semelhante para todas as profundidades.

**Tabela 4** - Valores dos limites críticos ( $\theta_{cc}$  e  $\theta_{PMP}$ ) de água disponível (AD) e parâmetros do modelo de van Genutchen em um perfil de Cambissolo Eutrófico Latossólico. Nova Redenção, BA, 2012.

Prof. (m)	$\theta_s$	$\theta_{CC}$	$\theta_{PM}$	$\theta_r$	AD (m)	$\alpha$ (kPa <sup>-1</sup> )	n	m	R <sup>2</sup>
0,10	0,480	0,256	0,179	0,156	0,015	0,063	1,384	0,277	0,978
0,30	0,471	0,254	0,173	0,142	0,016	0,071	1,338	0,253	0,978
0,50	0,476	0,237	0,165	0,147	0,014	0,065	1,420	0,296	0,980
0,70	0,466	0,256	0,180	0,152	0,015	0,075	1,343	0,255	0,972
0,90	0,476	0,259	0,188	0,164	0,014	0,081	1,360	0,265	0,973
1,10	0,456	0,253	0,195	0,167	0,011	0,194	1,292	0,226	0,978
Média	0,471	0,252	0,180	0,155	14,44	0,092	1,355	0,262	0,975
D. Padrão	0,009	0,0080	0,011	0,010	1,646	0,051	0,044	0,024	0,005
C.V(%)	1,85	3,11	5,90	6,25	11,39	55,23	3,22	9,06	0,47

$\theta_s$  é a umidade do solo saturado de água (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>);  $\theta_{cc}$  é o conteúdo volumétrico na capacidade de campo (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>);  $\theta_{PMP}$  é o conteúdo volumétrico no ponto de murcha permanente (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>);  $\theta_r$  é o conteúdo volumétrico residual da água no solo (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>); AD água disponível ( $\theta_{cc} - \theta_{PMP}$ );  $\alpha$  é o fator de ajuste (kPa<sup>-1</sup>); m e n parâmetros de ajustes adimensionais.

O ajuste dos valores de umidade para o modelo de van Genutchen em todas as camadas estudadas apresentou R<sup>2</sup> entre 0,972 e 0,980, que é um indicador da adequação de um modelo de regressão, tanto melhor quanto mais próximo de 100% (HINES et al., 2006). Essa mesma constatação foi observado por Grigolon (2013) que avaliando um solo de textura argilosa com 6 pontos de tensão achou R<sup>2</sup> de 0,98. Mello et al. (2005) estudando o ajuste de modelos para predição dos parâmetros da equação de van Genuchten em um Cambissolo de textura média encontrou R<sup>2</sup> maiores que 0,91.

O solo na condição da capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ), sob tensão de 33 kPa, a umidade variou de 0,237 (0,50 m) a 0,259 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> (0,90 m) (Tabela 4). Assume-se que quando o solo encontra-se na  $\theta_{cc}$ , os macroporos estão livres de água e os microporos cheios (KLEIN et al., 2006), representando a quantidade de água presente no solo após a drenagem do excesso, pela ação da gravidade.

Bouma et al. (1977), afirmaram que nos microporos a água circula lentamente, por ação de forças capilares, em função do diâmetro reduzido dos poros, sendo, portanto, os responsáveis pela retenção e redistribuição da água no solo.

Quanto à água disponível (AD) verificou-se tendência de valores mais elevados nas camadas superficiais, em geral, entre 0,10 e 0,30 m de

profundidade. Valores semelhantes de AD na camada de 0-0,20 m foram encontrados por Lima et al. (2006) em um Cambissolo háplico cultivado com mamão. Barreto et al. (2011) encontraram valores de AD de 0,0197 mm na camada superficial (0-0,20 m) em um Cambissolo de textura média.

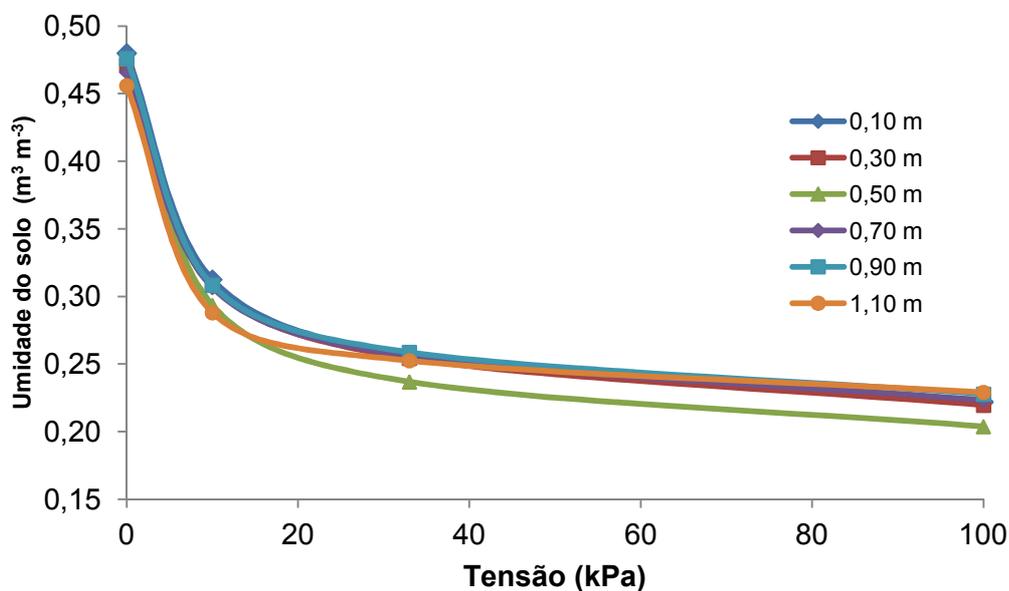
Observando os valores de umidade no potencial mátrico zero (Tabela 3) ou de umidade de saturação (Tabela 4) nota-se que esses valores estiveram bem próximos aos de porosidade total (Tabela 1) em todas as profundidades, demonstrando coerência nas estimativas dos parâmetros de ajuste do modelo de van Genuchten para a curva característica de água no solo.

O ajuste da potencial mátrico em todo o perfil do solo em função da sua umidade pelo modelo de van Genuchten, mostrou-se bastante similar para todas as profundidades. Ao se analisar a curva de retenção no perfil do solo (Figura 5), é possível constatar uma maior retenção de água em profundidade, fato este atribuído a forte influencia exercida pelas frações mais finas do solo (argila + silte) sobre a retenção de água (Angelotti Netto, 2007).

Centurion & Andrioli (2000), ao caracterizarem as propriedades hídricas de alguns perfis de solos com texturas franco-argilosas a argilosas observaram que a retenção de água no solo correlacionou-se melhor com a soma dos teores de silte e argila. Righes et al. (1983) ao analisarem a curva de retenção de água em diferentes profundidades, observou que o comportamento da curva de retenção de água quando submetida a potenciais inferiores a 33 kPa obedece, particularmente, a variação da composição granulométrica das diferentes camadas. Severiano et al. (2009) estudando a qualidade estrutural de um Cambissolo com textura média, observou uma maior retenção de água na faixa de água disponível, entre a  $\theta_{cc}$  e  $\theta_{PMP}$ . Porém, quando as amostras de solo foram submetidas a potenciais igual ou superior a 33 kPa, tal fato não ocorreu.

As curvas de retenção para todas as profundidades tiveram comportamentos semelhantes, sugerindo homogeneidade do solo perfil do solo. Curvas de retenção da água no solo elaboradas para a faixa de tensão de 0 - 100 kPa são fortemente influenciadas pela estrutura do solo e distribuição de tamanho dos poros (HILLEL, 2004), indicando que as curvas características entre os pontos amostrais podem ser devidos à uniformidade quanto a aspectos estruturais do solo. Tais resultados são reforçados pela não diferenciação dos atributos físicos já mencionados anteriormente que influenciam a curva

característica de água no solo. Alguns estudos têm focado na análise da influência das características do solo sobre a curva de retenção de água, dentre elas a textura (MARTINEZ et al., 1995; CARVALHO et al., 2000), considerada uma das mais importantes.



**Figura 5** - Curva de retenção de água no solo para todas as profundidades no perfil de Cambissolo Eutrófico Latossólico. Nova Redenção, BA, 2012.

## CONCLUSÕES

O perfil de Cambissolo Eutrófico Latossólico apresentou uniformidade nos atributos físico-hídricos ( $D_s$ ,  $D_p$ ,  $M_a$ ,  $M_i$  e  $P_t$ ). As curvas características de água no solo em todas as profundidades apresentaram comportamento bastante similar para todas as profundidades.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARO FILHO, J.; NEGREIROS, R. F. D.; ASSIS JÚNIOR, R. N. & MOTA, J. C. A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos físicos de um latossolo vermelho em Mossoró, RN. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 415-422, 2013.

ANGELOTTI NETTO, A. **Estimativa da Retenção de Água no Solo a partir do Uso de Equipamentos Não Convencionais, Redes Neurais Artificiais e Funções de Pedotransferência**. 2007. 176p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental)- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2007.

ANDRADE, A. R. S.; GUERRINI, I. A.; GARCIA, C. J. B.; KATEZ, I. & GUERRA, H. O. C. Variabilidade espacial da densidade do solo sob manejo da irrigação. **Revista Ciência e Agrotecnologia**. Lavras, v. 29, n. 2, 2005.

BARRETO, H. B. F.; MAIA, P. M. E.; AMARAL JUNIOR, V. P. & SILVA NETO, S. J. Água disponível e parâmetros de ajuste do modelo de van GENUCHTEN em cinco solos do agropolo Assu-Mossoró. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 6, p. 6-9, 2011.

BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. Viçosa: UFV, 1989. 596 p.

BICALHO, I. M. Um estudo da densidade do solo em diferentes sistemas de uso e Manejo. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v. 7, n. 12, p. 2-9, 2011.

BOUMA J.; JONGERIUS A.; BOERSMA O. H.; JAGER, A. & SCHOONDERBEEK D. The function of different types of macropores during saturated flow through four swelling soil horizons. **Soil Science Society of America Journal**, v. 41, p. 945-950, 1977.

BRADY, N. C. **Natureza e Propriedades dos Solos**. 7.ed. São Paulo: Freitas Bastos, 1989. 878p.

CAMARGO, O. A. & ALLEONI, L. R. F. **Compactação do Solo e o Desenvolvimento de Plantas**. Piracicaba, ESALQ, 1997. 132p.

CARVALHO, J. M. & LIMA, L. A. Influência da adição de hidróxido de sódio na retenção de água de um Latossolo Vermelho-Escuro. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 24, n. 2, p. 450-457, 2000.

CAVENAGE, A.; MORAES, M. L. T.; ALVES, M. C.; CARVALHO, M. A. C.; REITAS, M. L. M. & BUZETTI, S. Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 4, p. 997-1003, 1999.

CENTURION, J. F. & ANDRIOLI, I. Regime hídrico de alguns solos de Jaboticabal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 4, p. 701-709, 2000.

CINTRA, F. L. D.; PORTELA, J. C. & NOGUEIRA, L. C. Caracterização física e hídrica em solos dos Tabuleiros Costeiros no Distrito de Irrigação Platô de Neópolis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p.45-50, 2004.

CORTEZ, J. W.; SILVA ALVES, A. D.; MOURA, M. R. D.; OLSZEWSKI, N. & NAGAHAMA, H. J. Atributos físicos do argissolo amarelo do semiárido nordestino sob sistemas de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 4, 2011.

COSTA, J. B. **Caracterização e constituição do solo**. 7ª ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2004. 527p.

COSTA, C. S.; RODRIGUES, J. J. V.; CAVALCANTIA, C.; MARINHO L. B.; NETO, L. A. A. & SILVA, T. J. A. Água disponível em um Neossolo Quartzarênico após adição de um condicionador mineral do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 5, 2009.

CURI, N.; LARACH, J. O. I.; KAMPF, N.; MONIZ, A. C. & FONTES, L. E. F. **Vocabulário de Ciência do Solo**. Campinas: SBCS, 1993. 90p.

DAKER, A. **Irrigação e Drenagem**. 7ª ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1988. 543p.

DANE, J. H.; OOSTROM, M. & MISSILDINE, B. C. An Improved Method for the Determination of Capillary Pressure-Saturation Curves Involving TCE, Water and Air. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 11, p. 69-81, 1992.

DEDECEK, R. A. Meio físico para o crescimento de Pinus: limitações e manejo. In: SHIMIZU, J. Y. Pínus na silvicultura brasileira. Colombo: **Embrapa Florestas**, 2008, p. 75-109.

DALBEN, A. D. & OSAKI, F. Atributos físicos do solo de um Cambissolo Háplico em floresta nativa e de *Pinus taeda*. **Revista Acadêmica Ciências Agrárias e Ambientais**, Curitiba, v. 6, n. 1, p. 29-37. 2008.

DALMAGO, G. A.; BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I.; KRÜGER, C. A. M. B.; COMIRAN, F. & HECKLER, B. M. M. Retenção e disponibilidade de água às plantas, em solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 855-864, 2009.

DEXTER, A. R. & BIRD, N. R. A. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. **Soil and Tillage Research**., v. 57 p. 203-212, 2001.

DEXTER, A. R.; CZYZ, E. A. & GATE, O. P. Soil structure and the saturated hydraulic conductivity of sub soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, p.185-189, 2004.

EGUCHI, E. S.; SILVA, E. L. & OLIVEIRA, M. S. Variabilidade espacial da textura e da densidade de partículas em um solo aluvial no Município de Lavras, MG **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, p. 242-246, 2002.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, Brasília, Sistema de Produção de Informação, 2006. 306p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro. 2011. 230 p.

ENGLER, M. P. C. **Desenvolvimento de metodologia para a determinação da mobilidade de água no solo**. 2007. 70p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

FERREIRA, D. F. **Programa Sisvar**. versão 5.0. Lavras, UFLA. 2007.

GUERRA, H. C. **Física dos Solos**, 1ª ed. Campina Grande: UFPB, 2000. 173 p.

GRIGOLON, G. B. **Curva de retenção de água no solo determinada a partir de um número mínimo de pares de umidade e tensão na câmara de Richards**. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 82p. 2013.

HARTMANN, R. Lecture Notes: Soil Physics. Faculty of Agriculture & Applied **Biological Sciences**, Ghent – Belgium, 2001.

HILLEL, D. **Introduction to Soil Physics**. San Diego: Academic Press, 1982. 264p.

HILLEL, D. **Introduction to Environmental Soil Physics**. San Diego: Elsevier Academic Press, 2004. 494p.

JABRO, J. D.; EVANS, R. G.; KIM, Y. & IVERSEN, W. M. Estimating in situ soil-water retention and field water capacity in two contrasting soil textures. **Irrigation Science**, v. 27, p. 223-229, 2009.

JALBERT, M. & DANE, J. H. Correcting Laboratory Retention Curves for Hydrostatic Fluid Distributions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p. 648-654, 2001.

JORGE, R. F.; CORA, J. E. & BARBOSA, J. C. Número mínimo de tensões para determinação da curva característica de retenção de água de um latossolo vermelho eutrófico sob sistema de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 6, p. 1831-1840, 2010.

KIEHL, E. J. **Manual de Edafologia**. São Paulo, Agronômica “Ceres”, 1979. 262p.

KLAR, A. E. **A Água no Sistema Solo-Planta-Atmosfera**. São Paulo: Nobel, 1988. 408 p.

KLEIN, V. A. & LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 857-867, 2002.

KLEIN, V. A.; REICHERT, J. M. & REINERT, D. J. Água disponível em um Latossolo Vermelho argiloso e murcha fisiológica de culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 646-650, 2006.

KITAMURA, A. E.; CARVALHO, M. P. & LIMA, C. G. R. Relação entre a variabilidade espacial das frações granulométricas do solo e a produtividade do feijoeiro sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, 2007.

LEITE, B. J.; FONSECA, E. V.; VALLE, R. R.; NASCIMENTO, M. N. & MARROCOS, P. C. L.; Comportamento produtivo de cacau no semiárido do Brasil. **Agrotópica**, Ilhéus, v. 24, n.2, 2012.

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

LIMA, J. A. G.; MENDES, A. M. S.; DUDA, G. P. & FERREIRA, C. V. Variabilidade espacial de características físico-hídricas de um Cambissolo cultivado com mamão no semiárido do RN. **Revista Caatinga**, v. 19, n. 2, p. 192-199, 2006.

LIMA, H. V. & SILVA, A. P. Mesa de tensão com areia: Procedimentos para montagem e validação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2209-2214, 2008.

MACHADO, J. L.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J. & SCAPIM, C. A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 495-502, 2008.

MANTOVANI, E. C. Compactação do solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 13, n. 17, p. 52-55, 1987.

MARQUES, F. A.; MATEUS, R. B.; SHEILA, M. B.; LIMA N.; JOSÉ A. & LIMA, J. F. W. F. Caracterização e classificação de Cambissolos do arquipélago de Fernando de Noronha, Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5 p. 1023-1034, 2007.

MATA, J. F.; SILVA, R. R.; FONTES, M. P. F.; ERASMO, E. A. L. & FARIAS, V. L. S. Análise mineralógica, granulométrica e química, em solos de ecótonos do sudoeste do Tocantins. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava, v.4, n. 2, p. 152–175, 2011.

MARTINEZ, M. A.; TIMM, L. C.; MARTINS, J. H. & FERREIRA, P. A. Efeito da textura do solo sobre os parâmetros de alguns modelos matemáticos usados para estimar a curva de retenção de água no solo. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 4, n. 48, p. 1-9, 1995.

MELLO, J. M.; BATISTA, J. L. F.; JÚNIOR, P. J. R. & OLIVEIRA, M. S. Ajuste e seleção de modelos espaciais de semivariogramas visando a estimativa volumétrica de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 69, n. 1, p. 25-37, 2005.

MELLO, C. R.; OLIVEIRA, G. C.; RESCK, D. V. S.; LIMA, J. M. & JÚNIOR, M. S. D. Estimativa da capacidade de campo baseada no ponto de inflexão da curva característica. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, v. 26, n. 4, p. 836-841, 2002

MOTA, J. C. A.; ASSIS J. R. N.; AMARO F. J. & LIBARDI, P. L. Algumas propriedades físicas e hídricas de três solos na Chapada do Apodi, RN, cultivados com melão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, 2008.

OLIVEIRA, L. B.; RIBEIRO, M. R.; JACOMINE, P. K. T.; RODRIGUES, J. J. V. & MARQUES, F. A. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 315-323, 2002.

OLIVEIRA, G. C. DIAS JUNIOR, M. S.; RESCK, D. V. S. & CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 327-336, 2004.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, p. 211-216, 1988.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S. & REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: SBCS, 2007, v. 5, p. 49-134.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R.& HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 2, p. 242-254, 2009.

REICHARDT, K. & TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004, 478p.

RICHARDS, L. A. Physical conditions of water in soil. In: BLACK, C. A. et al. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. P. 128-152.

RIGHES, A.; LOVATO, T & SOARES, E. Caracterização física, química e microbiológica de planossolo da unidade de mapeamento Vacacai, RS, **Ciência Rural**, v. 13, n. 1, p. 25-45, 1983.

ROCHA, H. O.; CARDOSO, A.; SCHIMIDLIN, D. & ROCHA, A. J. Levantamento De Solos da Reserva Rio Cachoeira In: SPVS (Sociedade de Pesquisa em Vida Selvagem e Educação Ambiental). **Plano de Manejo da Reserva Natural**. Rio Cachoeira, SC, v. 1, Encartes I, II e III. Curitiba, 2005.

ROMANO, I. & SANTINI, A. Water retention and storage: Field. In: Dane, J. H.; Topp, C. (Eds.) *Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods*. Madison, **Soil Science Society of America**, p. 721-38, 2002.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; CURI, N. & DIAS JÚNIOR, M. S. Potencial de uso e qualidade estrutural de dois solos cultivados com cana-de-açúcar em Goianésia (GO). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 159-168, 2009.

SIMÕES, W. L.; SILVA, E. L.; LIMA, D. M. & OLIVEIRA, M. S. Variabilidade espacial de atributos físicos de um latossolo vermelho distroférrico, submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 6, p. 1061-1068, 2006.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p. 892-898, 1980.

VIELMO, A. L. **Limite superior da retenção da água no solo: método de campo e método de estimativa**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 81p. 2008.

WATANABE S. H.; TORMENA C. A.; ARAÚJO M. A.; FILHO, O. F.; PINTRO J. C.; COSTA, A. C. S. & MUNIZ, A. S. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico influenciadas por sistemas de preparo do solo utilizados para implantação da cultura da mandioca. **Acta Scientiarum**, v. 24, p. 1255-1264, 2002.

## **CAPITULO 2**

### **CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM UM PERFIL DE CAMBISSOLO CULTIVADO COM CACAUEIRO NÃO SOMBREADO NO SEMIÁRIDO DA BAHIA<sup>2</sup>**

---

<sup>2</sup> <sup>2</sup> Capítulo a ser ajustado para submissão ao comitê editorial da Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.

## CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE UM PERFIL DE CAMBISSOLO CULTIVADO COM CACAUEIRO NÃO SOMBREADO NO SEMIÁRIDO DA BAHIA

Autor: Bruce Mota Pamponet

Orientador: Aureo Silva de Oliveira

**RESUMO:** A condutividade hidráulica do solo é uma propriedade que expressa a facilidade com que a água se movimenta no solo. O estudo teve por objetivo determinar a curva de calibração das sondas de TDR para o perfil de Cambissolo Eutrófico Latossólico e o ajuste de um modelo de determinação da condutividade hidráulica em função da umidade do solo  $K(\theta)$  pelo método do perfil instantâneo de drenagem em todo o perfil do solo. O estudo foi desenvolvido num solo de textura franco-argiloso, em uma área cultivada com cacaueteiro (*Theobroma cacao*) não sombreado na Fazenda Agropecuária Chapadão no município de Nova Redenção (12° 51'46" S e 41° 08'14" W) na região centro-sul da Bahia. Para a aplicação do método do PID, foi selecionada uma fração da área para determinação da  $K(\theta)$ , sendo necessário a utilização de uma chapa galvanizada de 2 mm de espessura com 0,40 m de altura e 4,0 m de diâmetro que foi introduzida no solo até 0,30 m de profundidade para evitar o fluxo de água lateral após iniciado o experimento. Foram instaladas sondas de TDR para o monitoramento da umidade do solo nas profundidades de 0,10; 0,30; 0,50; 0,70; 0,90 e 1,10 m. Percebeu-se que houve um bom ajuste ( $R^2 \geq 0,98$ ) do modelo polinomial cúbico com coeficientes empíricos nas calibrações de sondas de TDR para todas as profundidades. A equação teórica proposta da  $K(\theta)$  no método do perfil instantâneo de drenagem sem a consideração de gradiente de potencial total unitário mostrou-se válida par um perfil de Cambissolo no semiárido baiano.

**Palavras- chave:** movimento de água, condutividade hidráulica não saturada, sondas de TDR.

## HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF A PROFILE INCEPTISOL GROWN WITH NO COCOA SHADOWED SEMIARID IN BAHIA

Author: Bruce Mota Pamponet

Adviser: Aureo Silva de Oliveira

**ABSTRACT:** The hydraulic conductivity is a property that expresses the ease with which the water moves through the soil. The study aimed to determine the calibration curve of TDR probes to profile Eutrophic Cambisol Latosol and setting a model for determining the hydraulic conductivity as a function of soil moisture  $K(\theta)$  by the instantaneous profile method of drainage around the profile solo. O study was conducted in French-textured soil clay, in an area planted with cacao (*Theobroma cacao*) in unshaded Chapadão Agricultural Farm in Nova Redemtion (12 ° 51 '46 '' and 41 ° S 08 '14 '' W) in the central-southern Bahia. Para applying the method of PID, we selected a fraction of the area for the determination of  $K(\theta)$ , necessitating the use of galvanized sheet, 2 mm thick with 0.40 m high and 4.0 m diameter which was introduced in the soil to a depth of 0.30 m to prevent lateral flow of water after the experiment started. TDR probes were installed to monitor soil moisture at depths of 0.10; 0.30; 0.50; 0.70; 0.90 e 1,10 m. It was noticed that there was a good fit ( $R^2 \geq 0.98$ ) model with cubic polynomial coefficients in empirical calibrations of TDR probes for all depths. The proposed theoretical equation of  $K(\theta)$  in the instantaneous profile method drainage without consideration of potential gradient total unit proved valid pair a profile Cambisol in semiarid region of Bahia.

**Key-words:** movement of water, unsaturated hydraulic conductivity, TDR probes.

## INTRODUÇÃO

O conhecimento das propriedades hidráulicas do solo é imprescindível em qualquer estudo agrícola e ambiental relacionado ao fluxo de água no solo, como por exemplo, planejamento de sistemas de irrigação, transporte de nutrientes e poluição de águas subterrâneas. (LIER & LIBARDI, 1999; LIBARDI, 2005).

O estudo do uso de água no solo pelas plantas e de como respondem aos níveis de armazenagem é parte do estabelecimento de estratégias eficazes de manejo visando melhor aproveitamento das reservas de água no solo pelas culturas. O movimento da água no solo na agricultura começa com a sua infiltração, continua com sua armazenagem temporária na zona do sistema radicular e termina com sua remoção do solo por meio da drenagem, da evaporação e da absorção pelas raízes (HILLEL, 1970).

O movimento da água no solo na condição de não saturação, devido a sua importância e complexidade tem sido um dos tópicos mais investigados na física do solo nas últimas décadas. Apesar de avanços teóricos e práticos significativos, a zona do solo não-saturada permanece sendo um desafio para o entendimento científico e manejo tecnológico (BIASSUSI, 2001).

A primeira equação experimental utilizada para quantificar o movimento da água no solo foi proposta por Darcy (1856) que trabalhou com colunas de areia saturada de água. A equação de Darcy estabelece que a quantidade de água que passa por unidade de tempo e de área através de um meio poroso saturado de água é proporcional ao gradiente de potencial total da água neste meio (HILLEL, 2004). A constante de proporcionalidade foi denominada por Darcy de condutividade hidráulica.

Em 1928 Richards adicionou o conceito de potencial total ( $\Psi_t$ ) como a soma do potencial matricial ( $\Psi_m$ ) com o potencial gravitacional ( $\Psi_g$ ) na equação desenvolvida por Buckingham em 1907, tornando-a assim, válida para as condições de saturação e não saturação e com a consideração da gravidade. Com isso, a equação de Darcy passou a se chamar equação de Darcy-Buckingham (LIBARDI, 2005)

O movimento da água em condições saturadas ou não é altamente influenciado pela condutividade hidráulica, que ao mesmo tempo é dependente das propriedades físicas do solo, como geometria do espaço poroso, porosidade, tortuosidade, superfície específica, distribuição, forma e tamanho das partículas.

Existem vários métodos para determinação da condutividade hidráulica, que podem ser feitos no campo ou em laboratório. Na maioria dos casos, os métodos variam apenas quanto às técnicas de medida do fluxo e dos gradientes de potencial da água no solo, podendo em alguns casos serem estimados por modelos que levam em conta as propriedades físicas do solo (distribuição do tamanho de poros, textura, porosidade drenável, densidade do solo etc) (VAN GENUCHTEN, 1980; GREEN et al., 1986, FARES et al., 2000).

Os métodos de campo possuem como principal vantagem a menor possibilidade de erro gerado pela perturbação do solo na coleta da amostra. A escolha do método a ser utilizado irá depender de alguns fatores; como objetivos do estudo, tipo de solo, experiência do pesquisador e principalmente de disponibilidade de material (GONÇALVES, 2011). Os principais métodos de campo são: infiltrômetro de Guelph, permeâmetro de furo de trado, infiltrômetro de disco, infiltrômetro de carga constante, infiltrômetro de anel e disco, infiltrômetro de duplo anel, permeâmetro de disco e o método do perfil instantâneo de drenagem (PID) (STEPHENS et al., 1987; DIRKSEN, 1991; LIBARDI, 2005).

O método de campo mais utilizado para determinação da condutividade hidráulica do solo não saturado é o método do Perfil Instantâneo de Drenagem (PID), sendo que este método foi inicialmente usado por Richards et al. (1956) e por Watson (1966) em laboratório com colunas homogêneas de solo, adaptado em condição de campo por Hillel et al. (1972) e posteriormente simplificado por Libardi et al. (1980).

O método do perfil instantâneo de drenagem (PID) é utilizado para a determinação da condutividade hidráulica em meios não saturados, não

necessitando de equipamentos sofisticados para sua execução. Sua fundamentação teórica está na equação de Richards que possibilita a quantificação direta de cada componente, ou seja, para um conteúdo de água e potencial total de água no solo em regime transiente, não necessitando atingir o equilíbrio dinâmico, normalmente demorado, durante a drenagem vertical que ocorre após um evento de chuva ou irrigação (PAULETTO et al., 1986; TIMM et al., 2002).

Para perfis de solo heterogêneo o PID apresenta limitações, devido à desuniformidade na redistribuição de água, uma vez que a presença de camada menos permeável pode interferir a drenagem interna, favorecendo o fluxo lateral (FALLEIROS et al., 1998; GHIBERTO & MORAIS, 2011). Havendo a presença de água subterrânea muito próxima a superfície (lençol freático raso), esta pode influenciar os resultados (PAIGE & HILLEL, 1993).

Uma alternativa que pode ser utilizada no método do PID é considerar o gradiente de potencial total unitário. Tal adaptação foi feita por Libardi et al. (1980) que simplificaram o procedimento para determinação da função  $K(\theta)$ . Com o objetivo de avaliar a magnitude dos erros envolvidos na obtenção da condutividade hidráulica considerando o gradiente de potencial unitário, Prevedello et al. (1994) constataram que essa consideração chegou a subestimar em até 73% os valores de condutividade hidráulica. Netto et al. (2000) afirmam que erros em torno de 50% no gradiente de potencial, podem provocar um valor de condutividade hidráulica final multiplicado ou dividido por dois. A vantagem da utilização do gradiente unitário diminuiu com a atual disponibilidade de recursos computacionais.

O monitoramento do conteúdo de água no solo para a aplicação do PID pode ser feitas de diversas formas, sendo que as técnicas normalmente utilizadas para este fim são TDR (reflectometria no domínio de tempo), sondas FDR (time domain reflectometry), sonda de nêutrons, tensiometria e gravimétrica (NETO et al., 2000; TEIXEIRA et al., 2005).

A adaptação da técnica de TDR para medição da umidade foi apresentada por Topp et al. (1980). Essa técnica relaciona a medida do tempo de percurso de uma onda eletromagnética com a umidade do solo. A velocidade de propagação do pulso eletromagnético no meio é função de uma propriedade, denominada constante dielétrica aparente.

Para a aplicação da técnica de TDR na obtenção de dados de umidade do solo faz-se necessária uma curva de calibração para cada tipo de solo, sendo considerada uma desvantagem normalmente aceitável comparado com as vantagens que apresenta em relação a outras técnicas. Muitos estudos referentes a calibração de sondas de TDR são encontrados na literatura (VILLWOCK et al., 2004; COELHO et al., 2006, MEDEIROS et. al., 2007SANTOS et al., 2010).

Desta forma, o estudo teve por objetivo o ajuste do modelo de Libardi (1980) para a estimativa da condutividade hidráulica em função da umidade do solo pelo método do perfil instantâneo de drenagem.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

O estudo foi realizado em uma área cultivada com cacaueteiro (*Theobroma cacao*) não sombreado na Fazenda Agropecuária Chapadão no município de Nova Redenção (12° 51'46`` S e 41° 08'14``W) na região centro-sul da Bahia. O clima é do tipo BswH (semiárido) segundo Koppen, caracterizado por temperaturas médias anuais de 23 °C, com máxima de 27 °C e mínima de 18 °C, precipitação pluviométrica média anual de 600 mm, altitude de 350 m. O solo em estudo é um Cambissolo Eutrófico Latossólico (LEITE, 2012) com a descrição morfológica no anexo A.

Para a aplicação do método do perfil instantâneo de drenagem (PID), foi selecionada uma fração da área para determinação da condutividade hidráulica em campo. Utilizou-se uma chapa galvanizada de 2 mm de espessura com 0,40 m de altura e 4,0 m de diâmetro que foi introduzida no solo até 0,30 m de profundidade visando evitar o fluxo de água lateral após iniciado o processo de saturação (Figura 1). Para o monitoramento da umidade do solo durante o período de avaliação foram inseridas duas repetições de sondas de TDR ao longo do perfil, nas profundidades de 0,10; 0,30; 0,50; 0,70; 0,90 e 1,10 m.



**Figura 1** - Instalação do perfil instantâneo em campo.

A saturação do perfil do solo (Figura 2) foi iniciada com a inundação da área de estudo por meio das mangueiras do próprio sistema de irrigação do cacau em quantidade suficiente para que o umedecimento atingisse a camada de 0 – 1,20 m do perfil do solo. Esse processo de umedecimento do solo durou aproximadamente 40 dias em intervalos que coincidiram com o manejo de irrigação do cacau, para que pudesse garantir o máximo de saturação em todas as camadas e ao mesmo tempo a acomodação do solo e consequentemente evitasse caminhos preferenciais de água no processo de instalação das sondas de TDR. Terminada o processo de saturação, a parcela foi coberta com uma capa plástica para evitar qualquer fluxo de água através da superfície e serrapilheira do próprio cacau para diminuir o aquecimento.



**Figura 2** - Processo de saturação do perfil do solo.

A umidade do solo no perfil com o tempo de redistribuição foi obtida com as sondas de TDR (Figura 3) calibradas para todas as profundidades monitoradas. A verificação de leituras de umidade do solo se deu 15 dias após a instalação no perfil do solo. O início do experimento de perfil instantâneo de drenagem foi no momento em que se verificou que as umidades estavam próximas aos valores de umidades de saturação.



**Figura 3** - Esquema de instalação das guias de onda (TDR) para o monitoramento da umidade ao longo do período.

As medidas de umidade necessárias ao cálculo da condutividade hidráulica foram iniciadas a partir da cobertura do solo ( $t = 0$  h) por um período de 30 dias em que se constatou que as variações de umidade foram extremamente reduzidas. A obtenção de valores de potencial matricial (Equação 1) deu-se a partir da curva de retenção de água no solo, com valores de umidade fornecidos pela TDR. Para a obtenção desta relação foi necessário a calibração de guias de onda (sondas) acopladas à TDR, que permitiram a realização das leituras em todas as camadas do perfil estudado e o ajuste do modelo de van Genuchten com os respectivos coeficientes para cada profundidade.

$$\Psi_m = \frac{\left[ \left( \frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right)^{1/m} - 1 \right]^{1/n}}{\alpha} \quad (1)$$

onde:

$\theta$  - umidade atual do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );

$\theta_r$  - umidade residual do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );

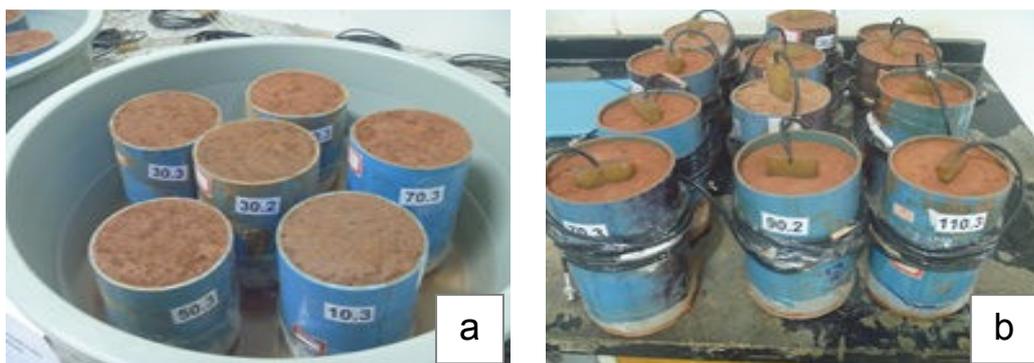
$\theta_s$  - umidade no ponto de saturação do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );

$\alpha$ ,  $m$  e  $n$  - parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten.

Os dados das sondas de TDR foram obtidos da média de duas repetições para cada profundidade estudada. Para as profundidades de 0,50 e 0,70 m os dados foram oriundos de uma das repetições. Tal escolha deu-se por problemas envolvidos com as sondas. A partir das leituras das sondas de TDR em cada profundidade durante o processo de redistribuição da água e das respectivas leituras de umidade aparente (Ledieu), foram determinadas as umidades reais, com equações de calibrações relativas para cada profundidade.

A calibração das sondas de TDR seguiu metodologia proposta por Coelho et al. (2006) e Cecílio & Santos (2009). Tal metodologia consistiu na obtenção da relação entre as leituras de constante dielétrica aparente ( $K_a$ ) fornecida pelo aparelho TDR 1000 e a umidade volumétrica do solo a cada leitura de constante dielétrica.

A calibração da TDR para conversão das leituras de constante dielétrica em valores de umidade real foi realizada mediante a retirada da área estudada de amostras indeformadas nas camadas de 0-0,20; 0,20-0,40; 0,40-0,60; 0,60-0,80; 0,80-1,0 e 1,0-1,20 m. A coleta das amostras (Figura 4) para a calibração com estrutura indeformada foi feita com cilindros de PVC com diâmetro interno de 0,11 m e altura de 0,15 m. No laboratório essas amostras foram envolvidas por uma tela fina de nylon na parte inferior a fim de permitir somente a passagem da água no processo de saturação e secamento do solo. O processo de saturação foi feito em uma bacia com água, sendo imersas até 2/3 da altura por 24 horas (Figura 4a), sendo que ao final do processo de saturação as sondas de TDR foram então inseridas no solo (figura 4b).



**Figura 4** - Processo de saturação das amostras (a) e sondas de TDR inseridas para a obtenção da umidade do solo (b).

Após a saturação, iniciou-se o processo de determinação da umidade fornecida pela TDR e no mesmo instante a pesagem do conjunto cilindro-sonda-solo-tela em balança analítica. As determinações de umidade foram inicialmente em intervalos de tempo de 10 minutos e na medida em que a umidade do solo diminuía, aumentava-se gradativamente esse intervalo. Quando se atingiu o mínimo de variação nos valores de umidade, o conjunto foi levado para estufa a 105°C e o intervalo entre leituras foi aumentado para 30 minutos até que o solo atingisse umidade e peso constantes. O valor de umidade volumétrica referentes a cada uma das pesagens do conjunto foi calculado através da equação 2.

$$\theta = \left( \frac{P_1 - P_2}{P_2 - P_3} \right) \times ds \quad (2)$$

onde:

$\theta$  - umidade volumétrica do solo ( $m^3 m^{-3}$ );

$P_1$  - peso do conjunto cilindro – solo – sonda – tela (Kg);

$P_2$  - peso seco do solo no conjunto cilindro – solo – sonda – tela (Kg);

$P_3$  - peso do cilindro, sonda e tela (Kg);

$ds$  - densidade do solo ( $Kg m^{-3}$ ).

Com os dados de umidade aparente (sem calibração) obtidos com as sondas de TDR e a partir da equação de Ledieu et al. (1986) (Equação 3), determinou-se a  $K_a$  que correlacionadas com os valores de umidade volumétrica

obtidos por gravimetria, gera-se a equação de calibração. De posse da equação de calibração para todas as camadas, os valores de  $K_a$  do solo em campo com a TDR foram ajustados para valores de umidade volumétrica.

$$K_a = \left( \frac{\theta + 0,1758}{0,1138} \right)^2 \quad (3)$$

onde:

$K_a$  - constante dielétrica aparente do solo (adimensional);

$\theta$  - umidade volumétrica do solo ( $m^3 m^{-3}$ ).

No cálculo da condutividade hidráulica na área do experimento, foi utilizado o procedimento proposto por Hillel et al. (1972). Nesse método procura-se uma solução para a equação de Richards (Equação 4) na direção vertical, após a saturação de um perfil de solo e estimativa da prevenção do fluxo de água (precipitação e irrigação) através de sua superfície, obtendo-se o seguinte problema de valor de contorno, durante o processo de redistribuição da água;

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\theta) \frac{\partial \Phi_t}{\partial z} \right] \quad (4)$$

$$\theta = \theta(z), \quad t = 0, \quad L = 0$$

$$\theta = \theta(z), \quad t > 0, \quad L \rightarrow \infty$$

$$q = 0, \quad t > 0, \quad L = 0$$

onde:

$\theta$  - umidade volumétrica do solo ( $m^3 m^{-3}$ );

$t$  - tempo de redistribuição (h);

$z$  - coordenada vertical da posição (m);

$\Phi_t$  - potencial total de água no solo (m c a);

$L$  - profundidade do solo (m);

$q$  - densidade do fluxo da água ( $m h^{-1}$ )

$K(\theta)$  - condutividade hidráulica em função da umidade ( $m h^{-1}$ ).

Integrando-se a equação de Richards com relação à profundidade L, obtém-se;

$$\int_0^L \frac{\partial \theta}{\partial t} dL = \int_0^L \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\theta) \frac{\partial \Phi_t}{\partial z} \right] dL \quad (5)$$

como  $dL = dz$ , então,

$$\int_0^L \frac{\partial \theta}{\partial t} dL = - \int_0^L \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\theta) \frac{\partial \Phi_t}{\partial z} \right] dL \quad (6)$$

como a densidade do fluxo em  $L = 0$  é nula,

$$\int_0^L \frac{\partial \theta}{\partial t} dL = K(\theta) \frac{\partial \Phi_t}{\partial z} \Big|_L \quad (7)$$

portanto:

$$K(\theta) \Big|_L = \frac{- \int_0^L \frac{\partial \theta}{\partial t} dL}{\frac{\partial \Phi_t}{\partial z} \Big|_L} = \frac{\frac{\partial h_z}{\partial t}}{\frac{\partial \Phi_t}{\partial z}} \Big|_z \quad (8)$$

Com medidas simultâneas da umidade e do potencial total da água no perfil do solo, durante o período de redistribuição da água, determina-se a integral da equação 8, que corresponde à densidade de fluxo de água na profundidade Z e o gradiente de potencial total na mesma profundidade, respectivamente. Os dados correspondentes ao potencial matricial para a obtenção do potencial total foram oriundos de valores de umidade com a equação de van Genuchten, conforme mencionado anteriormente (Equação 1).

A obtenção da condutividade hidráulica foi feita ajustando-se os valores de  $\theta$  em função do tempo (t, h) para cada profundidade (Equação 9):

$$\theta = n_z t^{m_z} \quad (9)$$

sendo que  $m_z$  e  $n_z$  são coeficientes de ajustes da Equação 9. Derivando-se  $\theta$  em função do t, tem-se:

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial t} \right|_z = n_z m_z t^{m_z - 1} \quad (10)$$

Diante da equação acima, estima-se o termo  $\partial h_z / \partial t$  da equação 8, expressada da seguinte forma:

$$\frac{\partial h_z}{\partial t} = \sum_{i=1}^z z_i = \left. \frac{\partial \theta}{\partial t} \right|_i = \sum_{i=1}^z z_i n_i m_i t^{m_i - 1} \quad (11)$$

onde:

$z_i$  - espessura da camada  $i$  (m);

Com a soma dos valores dos potenciais mátrico e gravitacional obtém-se o potencial total de água no solo em cada tempo e profundidade. A variação do do potencial total de água para cada tempo nas profundidades monitoradas é expressado pelo gradiente de potencial total, conforme a equação seguinte:

$$\Delta \Psi_T = \frac{\Psi_{Ta} - \Psi_{Tb}}{L} \quad (12)$$

sendo:

$\Psi_{Ta}$  - potencial total no ponto acima (m);

$\Psi_{Tb}$  - potencial total no ponto abaixo (m);

$L$  - distância entre os pontos (m);

$\Delta \Psi_T$  - gradiente de potencial total no centro do comprimento  $L$ .

Nos resultados da Equação 11 e dos valores de potencial total, calculam-se, para cada  $t$  e  $z$  (Equação 12), os dois elementos do membro direito da equação (7) obtendo o valor de  $K(\theta)$  para a umidade correspondente. Dessa maneira, por meio de medidas simultâneas de umidade do solo e do potencial total da água durante o período de redistribuição, é possível calcular a densidade de fluxo e o gradiente de potencial total na mesma profundidade e, então, a função  $K(\theta)$  na profundidade  $L$ .

Geralmente, os valores de  $K(\theta)$  se apresentam relacionados exponencialmente, pelo menos em um domínio limitado de umidades, de maneira que essa função  $K(\theta)$  pode ser representada pela Equação 13 (LIBARDI, 1980).

$$K(\theta) = K_0 e^{\gamma(\theta-\theta_0)} \quad (13)$$

onde:

$K_0$  - condutividade hidráulica quando no tempo inicial de redistribuição ( $m\ h^{-1}$ );

$\gamma$  - coeficiente angular da reta  $\ln K$  versus  $\theta$ ;

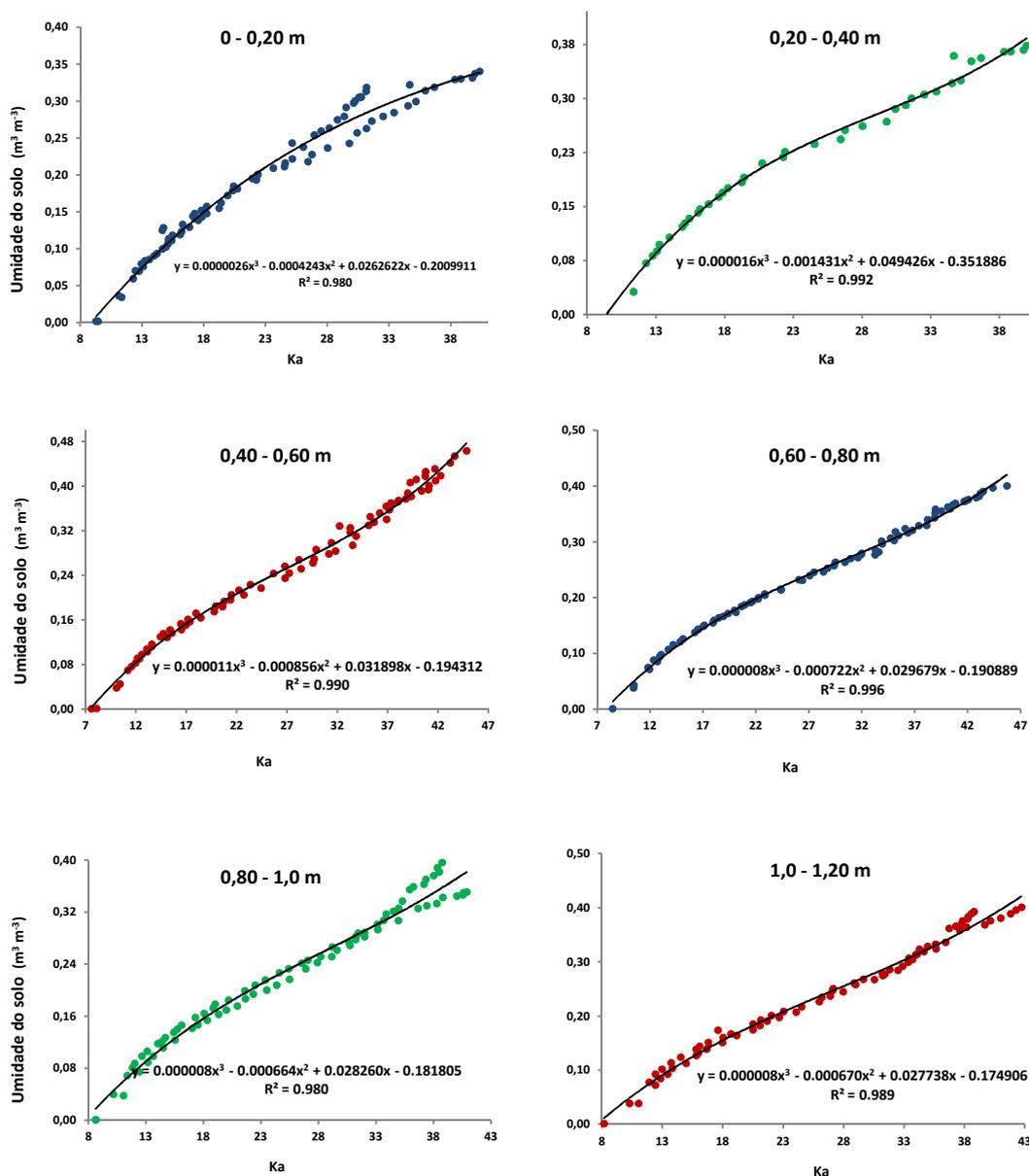
$\theta_0$  - umidade no tempo inicial ( $m^3\ m^{-3}$ ).

## RESULTADO E DISCUSSÃO

### Curvas de Calibração da TDR

As curvas de calibração das sondas de TDR com as respectivas equações para as camadas de 0-0,20; 0,20-0,40; 0,40-0,60; 0,60-0,80; 0,80-1,0 e 1,0-1,20 m utilizadas na determinação da umidade do solo da área experimental são apresentadas na Figura 5. Para transformar as leituras de constante dielétrica aparente ( $K_a$ ), fornecida pelo TDR, em umidade volumétrica ( $m^3\ m^{-3}$ ) foi utilizado um modelo polinomial cúbico com coeficientes empíricos em todas as camadas.

A utilização de um modelo com coeficientes empíricos é recomendado em relação o uso com coeficientes pré-definidos, como é o caso do de Topp et al. (1980) e o de Ledieu et al. (1986). O uso de modelos sem os ajustes dos coeficientes podem resultar em erros na estimativa de umidade do solo (COELHO et al., 2006).



**Figura 5** - Curvas de calibração das sondas de TDR em um perfil de Cambissolo Eutrófico Latossólico. Nova Redenção, BA, 2012.

A constante dielétrica do solo medida pelas sondas de TDR no processo de calibração, para todas as camadas estudadas, teve alta relação com os valores de umidade volumétrica do solo. Os coeficientes de determinação para todas as equações obtidas nas camadas estudadas foram altos, com  $R^2 \geq 0,98$ , indicando que o modelo polinomial cúbico ajustou-se adequadamente para os intervalos de umidade observados. Essa mesma constatação foi feita por Coelho et al. (2006) que encontrou coeficientes de determinação acima de 0,98 com modelos polinomiais cúbicos. Santos et al. (2010) estudando um mesmo tipo de solo

(Cambissolo) de textura argilosa observou que funções do tipo polinomial cúbica apresentaram bons ajustes aos dados de umidade determinados por gravimetria.

A faixa de umidade alcançada no processo de calibração compreendeu valores superiores ao de capacidade de campo para todas as amostras, sendo que o maior valor de umidade encontrado foi de  $0,493 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  para a camada de m. De acordo Jones et al. (2002) umidades volumétricas inferiores a 0,50 é adequada para correlacionar a  $K_a$  do solo com o teor de umidade volumétrica.

### **Umidade do solo no campo**

Observa-se na Tabela 1 que os valores de umidade do solo no instante inicial ( $\theta_0$ ) do perfil instantâneo de drenagem (PID) nas diversas profundidades estiveram muito próximos entre si, demonstrando que o processo de saturação do perfil do solo foi satisfatório, tal requisito de uniformidade inicial é desejado para experimentos dessa natureza (MELO FILHO et al., 2005). As  $\theta_0$  ficaram entre  $0,296$  a  $0,336 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , correspondendo uma variação de 12% nas profundidades estudadas, demonstrando que a umidade do solo inicial estiveram muito próximos durante o período de avaliação.

Os dados de umidade do solo (Tabela 1) representam a média de 4 valores com intervalos de 15 minutos.

**Tabela 1** - Umidade volumétrica do solo para os diversos tempos (t) e profundidades para um perfil de Cambissolo Eutrófico Latossólico. Nova Redenção, BA, 2012.

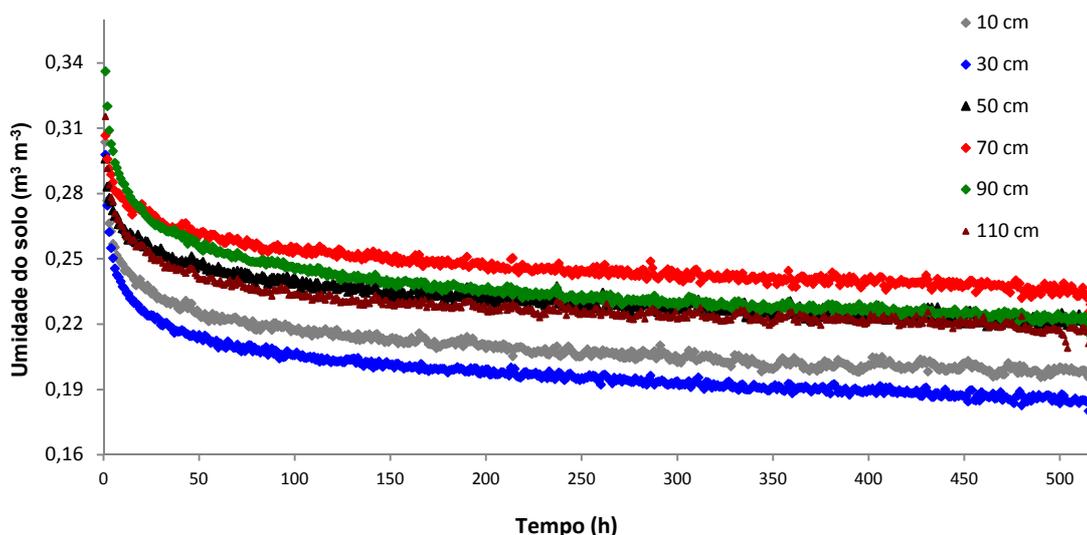
Tempo (horas)	Umidade do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )					
	0,10 m	0,30 m	0,50 m	0,70 m	0,90 m	1,10 m
1	0,304	0,298	0,312	0,296	0,336	0,315
20	0,238	0,226	0,242	0,258	0,273	0,257
40	0,227	0,217	0,233	0,249	0,261	0,245
60	0,222	0,209	0,228	0,246	0,253	0,239
80	0,218	0,208	0,224	0,241	0,249	0,235
100	0,217	0,206	0,221	0,241	0,245	0,234
120	0,214	0,204	0,219	0,239	0,242	0,231
140	0,213	0,203	0,217	0,240	0,240	0,231
160	0,211	0,201	0,217	0,233	0,239	0,231
180	0,211	0,198	0,215	0,232	0,238	0,228
200	0,209	0,199	0,214	0,232	0,236	0,227
220	0,208	0,198	0,213	0,232	0,235	0,227
240	0,208	0,196	0,211	0,228	0,233	0,229
260	0,206	0,192	0,211	0,231	0,232	0,224
280	0,207	0,194	0,213	0,228	0,231	0,224
300	0,202	0,194	0,211	0,228	0,228	0,222
320	0,205	0,191	0,213	0,226	0,228	0,222
340	0,202	0,192	0,210	0,227	0,229	0,222
360	0,203	0,188	0,211	0,226	0,228	0,225
380	0,201	0,188	0,211	0,228	0,228	0,222
400	0,201	0,190	0,211	0,223	0,225	0,222
420	0,200	0,189	0,210	0,222	0,227	0,222
440	0,199	0,190	0,208	0,222	0,225	0,220
460	0,199	0,187	0,208	0,223	0,223	0,224
480	0,198	0,183	0,206	0,222	0,225	0,224
500	0,200	0,184	0,206	0,222	0,223	0,218
518	0,195	0,181	0,194	0,214	0,218	0,214

No processo de redistribuição da água no perfil, constatou-se um decréscimo uniforme da umidade em todos os tempos observados (Figura 7). A umidade de saturação de água no solo ( $\theta_s$ ), umidade na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) e umidade no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PM}$ ) média no perfil do solo foi de 0,471, 0,252 e 0,155  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  respectivamente. Os valores de umidade no tempo inicial (Tabela 1) foram abaixo dos valores de  $\theta_s$  oriundo do ajuste da curva de retenção de água no solo. Em condições de campo é provável que o processo de saturação não seja tão eficiente como em condições controladas em

laboratório e com amostras pequenas para a determinação dos parâmetros da equação de van Genuchten, pois a influência de alguns fatores pode prejudicar o processo de saturação, como aprisionamento do ar presente no espaço poroso do solo e a não uniformidade das leituras no início do experimento por partes dos equipamentos envolvidos nas determinações de umidade (ARYA et al., 1998).

Todos os valores de umidades no tempo inicial para todas as profundidades variaram entre 63 a 70% à umidade de saturação (Tabela 1). Ghiberto & Morais (2011) avaliando os diferentes métodos na determinação da condutividade hidráulica em um Latossolo Vermelho-Amarelo encontrou valores de  $\theta_0$  entre 70 e 90% da porosidade total.

Com os dados de umidade volumétrica ( $\theta$ ) para as profundidades estudadas procedeu-se a elaboração dos gráficos (Figura 6) de umidade em função do tempo. Com as curvas de  $\theta = f(t)$  e seus respectivos coeficientes da equação de ajuste, procederam-se o cálculo da variação da umidade em função do tempo (Equação 10) para todas as profundidades monitoradas, obtendo assim o numerador da Equação 11 que é a densidade de fluxo de água. Este fato mostra que os dados experimentais seguem a equação da  $\theta$  versus tempo proposta pelo método de umidade desenvolvido por Libardi et al. (1980) de determinação da condutividade hidráulica em função da umidade do solo.

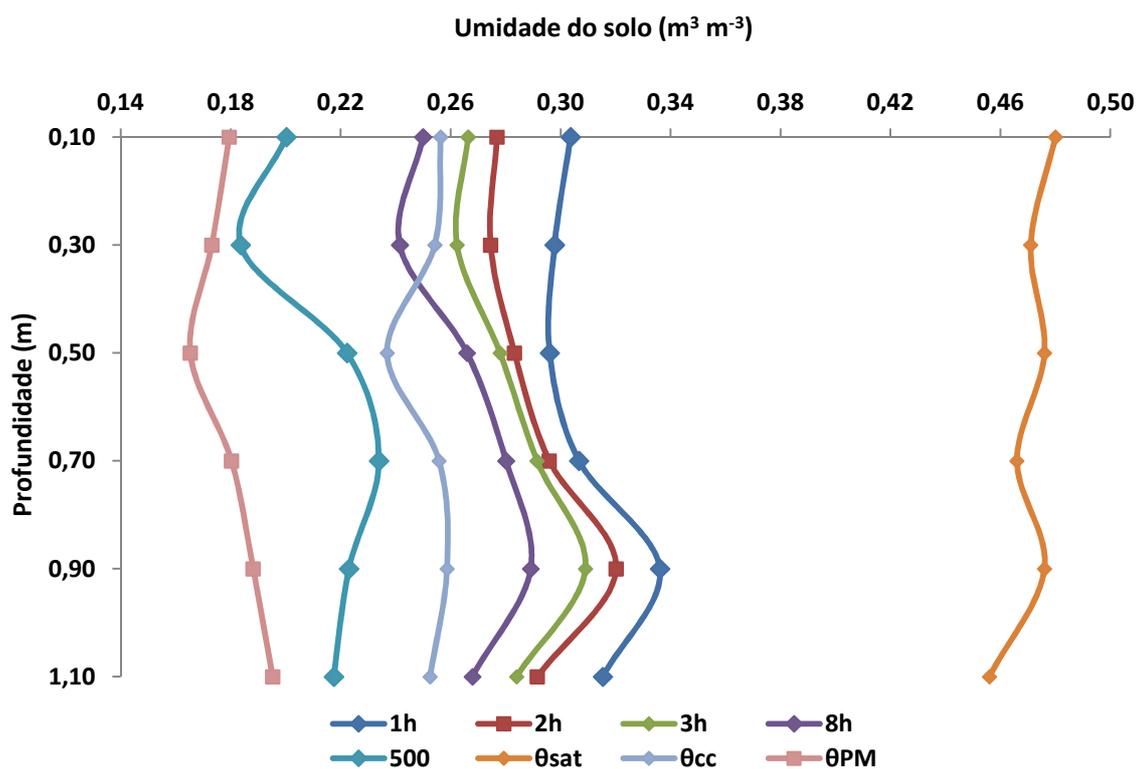


**Figura 6** - Umidade do solo ao longo do tempo para todas as profundidades em um perfil de Cambissolo Eutrófico Latossólico. Nova Redenção, BA, 2012.

Para todas as profundidades, os ajustes das curvas de  $\theta$  versus o tempo foram com  $R^2 > 0,96$ . Muitos fatores influenciam a retenção da água num solo, mas os mais relevantes são a textura e a estrutura do solo (KLEIN, 2010). A capacidade de reter água geralmente está associada com a composição granulométrica do solo, aumentando à medida que a textura se torna mais fina.

Os valores de umidade na capacidade de campo nas profundidades 0,10; 0,30; 0,50; 0,70; 0,90 e 1,10 m foram 0,256; 0,254; 0,237; 0,256; 0,259 e 0,253  $m^3 m^{-3}$  respectivamente. Após aproximadamente 8 horas depois de redistribuição (Figura 7), verificou-se que a  $\theta_{CC}$  foi alcançada nas profundidades de 0,10; 0,30 e 0,50 m, sendo que para as profundidades inferiores esse tempo foi em torno de 80h após o início do monitoramento. Essa tendência das profundidades próximas a superfície apresentarem umidades inferiores as demais se deve ao fato da ausência de drenagem de água das camadas superiores em relação às demais.

Durante todo o período de redistribuição, as umidades no perfil não alcançaram o valor correspondente ao ponto de murcha permanente em nenhuma das profundidades. Tal observação é atribuída à própria limitação do método de PID que permite a medição da condutividade hidráulica entre a saturação e a capacidade de campo, sendo que para conteúdos de água inferiores o movimento é muito lento e não é detectado (HURTADO et al., 2005)



**Figura 7** - Variação da umidade em um perfil de Cambissolo Eutrófico Latossólico com seus limites de disponibilidade de água para a planta.

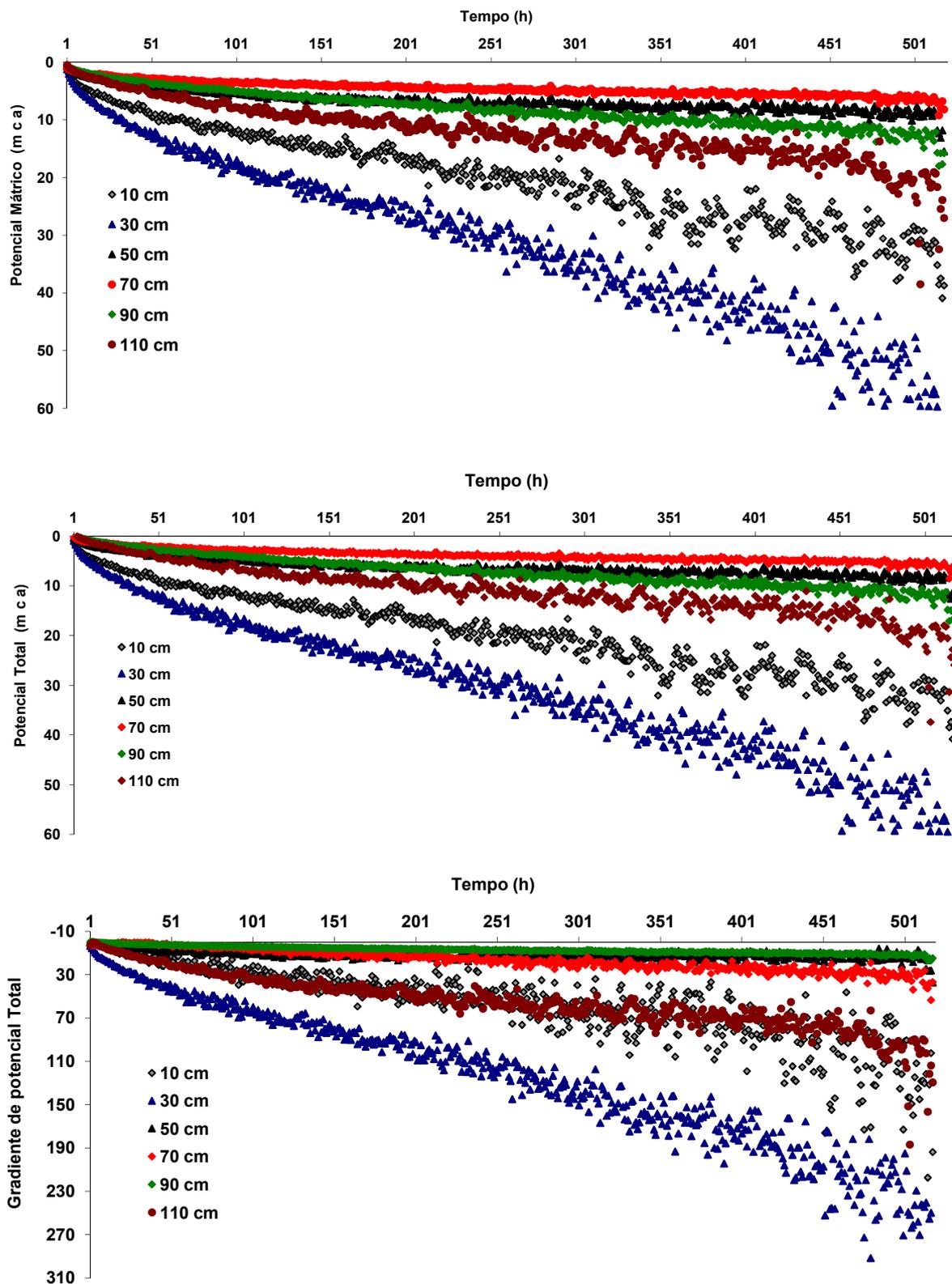
### Potencial total da água no solo

A partir dos dados de umidade volumétrica obtidas com as sondas de TDR e as curvas de retenção ajustadas pela equação de van Genuchten para as respectivas profundidades, foram obtidos os potenciais matriciais (Equação 15) em todo o perfil do solo para todos os tempos. Considerando a referência gravitacional na superfície do solo, foram calculados os valores de potencial total.

Percebe-se na Figura 8 que houve um decréscimo do potencial mátrico ao longo do tempo, apresentando valores no final da redistribuição de água no perfil do solo (518 horas) em torno de -2,9 a 5,8 metros de coluna de água para as profundidades de 0,70, 0,90 e 1,10 m, mostrando uma maior dificuldade de se obter valores de tensão abaixo da capacidade de campo. Os menores valores obtidos para o potencial mátrico no final do experimento foram com as profundidades de 0,30 e 0,10 m com tensões de -40,88 e 88,23 metros respectivamente.

A variação do potencial total no perfil do solo (Figura 8) em relação ao tempo seguiu um comportamento semelhante ao do potencial matricial, evidenciando que o componente gravitacional teve pouca influência no seu cálculo. Quando o solo se encontra saturado ou próximo à saturação, o potencial gravitacional tem grande importância, mas, à medida que o solo seca, o potencial mátrico passa a ser o mais importante (REICHARDT, 1996).

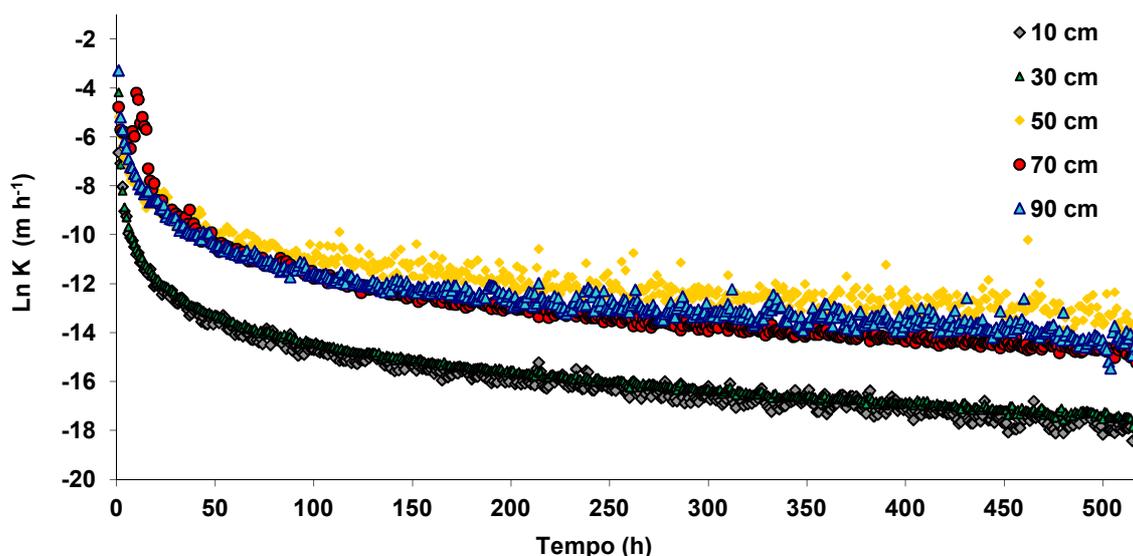
Possíveis erros nos valores de potencial total podem ocorrer quando a utilização de uma estrutura (chapa) circular não é utilizada até as camadas inferiores monitoradas para a aplicação da metodologia do perfil instantâneo, pois o movimento vertical da água exigido pelo método nem sempre é garantido (CARVALHO, 2002; FONSECA et al., 2007). Regalado & Carpena (2004) relatam o problema da não garantia do movimento vertical na drenagem da água com a presença de fluxo horizontal na parcela experimental e conseqüentemente a obtenção de valores incertos dos parâmetros da equação de condutividade hidráulica.



**Figura 8** - Variação do potencial matricial, total e do gradiente de potencial total em função do tempo em um perfil de Cambissolo Eutrófico Latossólico. Nova Redenção, BA, 2012.

## Condutividade hidráulica

A partir das equações das curvas de ajuste da umidade volumétrica em função do tempo (Figuras 6) e dos potenciais totais em função da coordenada vertical de posição, determinou-se a condutividade hidráulica ( $K$ ) pela Equação 8 para as profundidades 0,10; 0,30; 0,50; 0,70 e 0,90 m, as quais podem ser vistas na Figura 9.

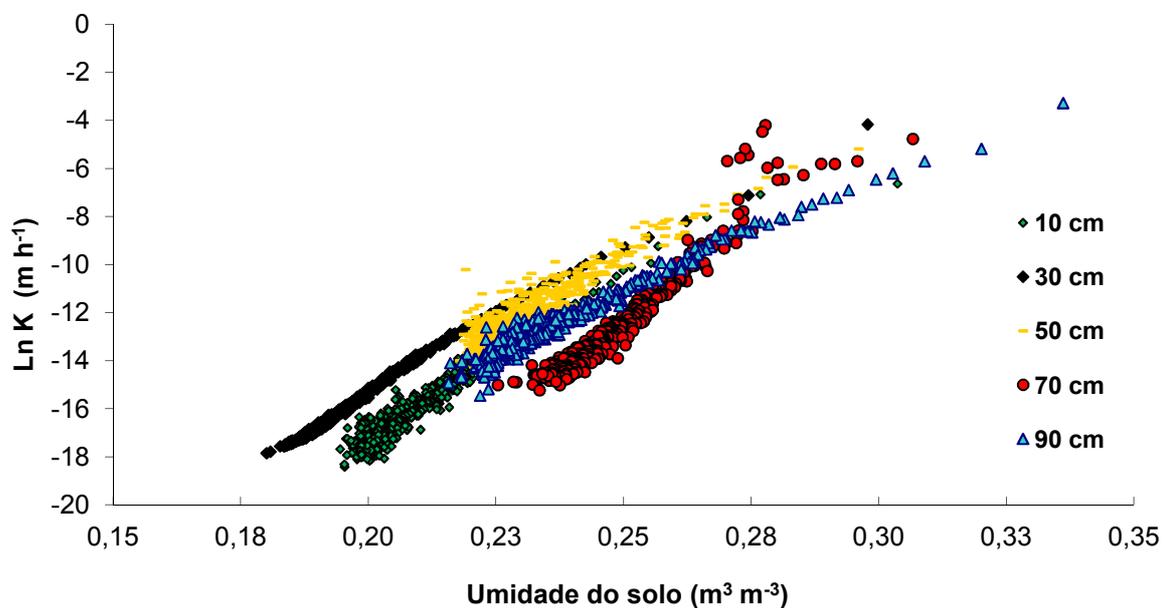


**Figura 9** - Condutividade hidráulica durante todo período monitorado no perfil do solo.

A condutividade hidráulica foi ajustada em função do conteúdo de água para o perfil do solo utilizando os valores de  $K$  e  $\theta$  (Figura 10). Todas as curvas de condutividade hidráulica versus umidade do solo possuem um comportamento exponencial, demonstrando que a relação  $\text{Ln}K$  versus  $\theta$  é uma equação linear para todas as profundidades com  $R^2$  variando de 0,85 a 0,98 (Tabela 2). Os resultados de condutividade hidráulica em função da umidade do solo representam, portanto, as funções  $K(\theta)$  considerando em seu cálculo os gradientes de potencial total, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 3 juntamente com os coeficientes de determinação.

A relação exponencial para a condutividade hidráulica em função do conteúdo de água no solo se adapta muito bem para a maioria dos solos. Tal relação foi estudada e acrescentada nos principais métodos de determinação da condutividade hidráulica (HILLEL et al., 1972; LIBARDI, et al., 1980; SISSON et al., 1980). Maciel Netto et al. (2000) observaram que a função  $K(\theta)$  para um

Podzólico Amarelo é próxima a uma exponencial e que isso é muito comum na literatura.



**Figura 10** - Condutividade hidráulica ( $\text{LnK}$ ) em função do conteúdo de água volumétrico em um perfil de Cambissolo Eutrófico Latossólico. Nova Redenção, BA, 2012.

**Tabela 2** - Equações de  $\text{LnK}$  ( $\text{m h}^{-1}$ ) em função da umidade do solo em um perfil de Cambissolo Eutrófico Latossólico. Nova Redenção, BA, 2012.

Prof. (m)	$\text{Ln K} = a \cdot \theta + b$	$R^2$
	Equação	
0,10	$y = 135,360x - 44,293$	0,940
0,30	$y = 131,342x - 41,520$	0,985
0,50	$y = 118,048x - 39,227$	0,956
0,70	$y = 177,341x - 56,674$	0,934
0,90	$y = 101,209x - 36,454$	0,962

Os parâmetros de ajustes das equações de condutividade hidráulica em função da umidade para o perfil de solo são apresentados na Tabela 3. Há uma tendência da condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ) na umidade inicial ( $\theta_0$ ) aumentar até a profundidade de 0,50 m. Resultado semelhante foi obtido por Carvalho et al. (2007) num Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico com textura

média e por Aragão Júnior et al. (1983) num Podzólico Vermelho-Amarelo. Já Cadima et al. (1980) em seu estudo num Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média, concluíram que a variabilidade do parâmetro condutividade hidráulica no sentido vertical foi muito pronunciada e salientam que o uso de valores médios pode trazer erros consideráveis na estimativa de fluxo de água nesse solo. Scherpinski et al. (2010) atribui que a variabilidade do  $K_0$  em profundidades maiores é devido a maior homogeneidade das camadas mais profundas.

Os coeficientes de determinação foram considerados satisfatórios e entre os parâmetros de ajuste da função  $K(\theta)$ , o parâmetro  $K_0$  foi a que apresentou maior variabilidade, quando comparada com os demais parâmetros de ajuste, com uma média de  $0,0674 \text{ m h}^{-1}$  e um coeficiente de variação (CV) de 52,27%. Segundo a classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980), na qual coeficientes de variação menores que 12% são considerados baixos, entre 12 e 60% médios e acima de 60% altos, tem-se que o valor encontrado é médio. É relatado na literatura valores oscilando de 40 a 420% (JURY et al., 1991). Sisson e Wierenga (1981) obtiveram um coeficiente de variação de 71 % para variável  $K_0$  e Vieira et al., (1981) encontraram em seu trabalho um valor de 40% para mesma variável. Esses resultados confirmam a hipótese de que a  $K_0$  é um parâmetro que apresenta uma grande variabilidade independentemente do solo estudado ou do método aplicado à semelhança de Mesquita (2004) que obteve um coeficiente de variação de 70 % para esta variável.

**Tabela 3** - Parâmetros de ajustes da equação de condutividade hidráulica em função da umidade em um perfil de Cambissolo Eutrófico Latossólico. Nova Redenção, BA, 2012.

Profundidade (m)	Parâmetros		
	$\theta_0$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	$K_0$ (m h <sup>-1</sup> )	$Y$
0,10	0,304	0,0412	135,36
0,30	0,298	0,0924	131,34
0,50	0,296	0,0139	118,05
0,70	0,307	0,1018	177,34
0,90	0,336	0,0877	101,21
Média	0,308	0,0674	132,66
Desvio Padrão	0,0161	0,0379	28,32
C. Variação (%)	5,24	56,35	21,35

Segundo Dexter et al. (2004) os mesoporos podem contribuir significativamente para a condutividade hidráulica saturada no subsolo. Segundo os autores em alguns solos, a existência de túneis favorece o aumento de  $K_0$  sendo mais comum em solos franco argilosos.

A variabilidade em suas propriedades e características física do solo está implícita no seu processo natural de formação, variabilidade esta que se reflete nos resultados obtidos na determinação da condutividade hidráulica não-saturada do solo. Muitos estudos reconhecem o significativo efeito da textura e estrutura do solo de alterações da amostra e do local de estimativa da condutividade hidráulica não-saturada no campo influenciando sua variabilidade e implicando em altos coeficientes de variação (KUTILEK & NIELSEN, 1994; ARYA et al., 1998).

Condutividade hidráulica saturada do solo é uma das características físicas do solo que apresenta um dos maiores coeficientes de variação, chegando a 400 % (WARRICK & NIELSON, 1980). Com relação ainda ao problema da variabilidade espacial da condutividade hidráulica determinada sob condições de campo, Lier & Libardi (1999), constataram que as grandes diferenças ocorridas entre as repetições de determinações de  $K(\theta)$ , pelo método do perfil instantâneo devem-se, em menor grau às diferenças entre  $Y$  encontrados e em maior grau aos valores de  $K_0$  e  $\theta_0$  estimados pelos seus respectivos ajustes.

O conteúdo de água do solo inicial apresentou uma média no perfil de 0,308 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> e um CV de 5,24%, considerado baixo (WARRICK & NIELSON,

1980), sendo que o parâmetro  $\gamma$  apresentou variação média (CV = 21,35%) com um valor médio de 132,66 para o perfil. Pequenas diferenças nos perfis de conteúdo de água podem gerar grandes variações de  $K_0$  e no  $\gamma$ , como observado por Falleiros et al. (1998), demonstrando a sensibilidade da medida do umidade no solo e da forma da curva de  $\theta$  em função do tempo, na estimativa das relações da função  $K(\theta)$ .

A precisão na determinação de  $\theta$  é crítica, pois sendo a mesma expoente da equação  $K=K_0 e^{\gamma(\theta-\theta_0)}$ , pequenas variações vão influenciar grandemente a determinação da condutividade hidráulica (REICHARDT et al., 1998). Em um estudo com objetivo de avaliar a variabilidade dos parâmetros da equação de condutividade hidráulica Libardi & Melo Filho (2006) verificaram que pequenas variações na umidade foram suficientes para gerar variações significativas na estimativa dos parâmetros da função  $K(\theta)$ , o que sugere uma alta sensibilidade da inclinação da curva  $\theta$  vs  $t$  na estimativa da variação da condutividade hidráulica com o conteúdo de água volumétrico.

As equações de condutividade hidráulica de solo não saturada em função da umidade para cada profundidade em um perfil de Cambissolo Eutrófico Latossólico podem ser observadas na Tabela 4.

**Tabela 4** - Equações de condutividade hidráulica ( $m\ h^{-1}$ ) em função da umidade do solo em um perfil de Cambissolo Eutrófico Latossólico. Nova Redenção, BA, 2012.

Profundidade (m)	$K(\theta) = K_0 e^{\gamma(\theta - \theta_0)}$	$R^2$
0,10	$K(\theta) = 0,0413 e^{135,36(\theta - 0,304)}$	0,940
0,30	$K(\theta) = 0,0924 e^{131,34(\theta - 0,298)}$	0,985
0,50	$K(\theta) = 0,0139 e^{118,05(\theta - 0,296)}$	0,857
0,70	$K(\theta) = 0,1018 e^{177,34(\theta - 0,307)}$	0,934
0,90	$K(\theta) = 0,0877 e^{101,21(\theta - 0,336)}$	0,962

Albuquerque et al. (2001) observaram que a  $K_0$  de um Nitossolo Vermelho sob plantio direto foi extremamente reduzida em relação a um solo sob mata nativa. Essa diminuição foi atribuída à redução da macroporosidade do solo, a qual é promovida por esse sistema de plantio. Essa mesma constatação

foi observada por Marques et al. (2008) em um Latossolo Amarelo com textura média em que sensíveis variações na macroporosidade promoveram mudanças em  $K_0$ , havendo uma tendência para maiores valores de  $K_0$  na superfície, relacionando-se com maiores valores de macroporos.

## CONCLUSÕES

As equações teóricas propostas entre a condutividade hidráulica não saturada e a umidade do solo, desconsiderando o gradiente de potencial total unitário mostraram-se válidas para o perfil de solo avaliado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, J. A.; SANGOI, L. & ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 71-723, 2001.

ARAGÃO JÚNIOR, T. C. A.; MAGALHÃES, C. A. & CASTRO, P. T. Determinação da condutividade hidráulica em um solo podzólico-Vermelho-Amarelo em condições de campo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 18, n. 7, p. 805-810, 1983.

ARYA, L. M.; DIEROLF, T. S.; SOFYAN, A.; WIDJAJA-ADHI, I. P. G. & VAN GENUCHTEN, M. T. Field measurement of the saturated hydraulic conductivity of a macroporous soil with unstable subsoil structure. **Soil Science**, v. 163 p. 841-852, 1998.

BIASSUSI, M. **Simulação do movimento da água no solo utilizando modelo numérico**. 2001. 84 p. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

BUCKINGHAM, E. **Studies on the movement of soil moisture**. Washington: USDA, 1907 (Bureau Soils Bulletin, 38).

CARVALHO, L. A.; LIBARDI, P. L.; ROCHA, G. C. & CRUZ, A. C. R. Caracterização hidráulica de um Latossolo vermelho associada à caracterização

pedológica do perfil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 4, p. 1008-1013, 2007.

CADIMA, Z. A.; LIBARDI, P. L. & REICHARDT, K. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica em um Latossolo Vermelho-Amarelo textura média no campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 4, p. 63-66, 1980.

CARVALHO, L. A. **Condutividade hidráulica do solo no campo: as simplificações do método do perfil instantâneo**. 2002. 86p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

CECÍLIO, R. A. & SANTOS, D. B.; Metodologia de calibração de equipamento de TDR para determinação da umidade do solo. **Revista Engenharia Ambiental**, Espírito Santos do Pinhal, v. 6, n. 3, p. 524-533, 2009.

COELHO, E. F.; VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A. & LEDO, C. A. S. Desempenho de modelos de calibração de guias de onda acopladas a TDR e a multiplexadores em três tipos de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Brasília, v. 30, p. 23-30, 2006.

DARCY, H. **Les fontaines publique de la Ville de Dijon**. Paris, Victor Dalmont, 1856.

DEXTER, A. R.; CZYZ, E. A. & GATE, O. P. Soil structure and the saturated hydraulic conductivity of sub soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, p.185-189, 2004.

DIRKSEN, C. Unsaturated Hydraulic Conductivity. In: Smith, K.A.; Mullins, C.E. (ed.), **Soil Analysis: Physical Methods**. Modern Instrumental Techniques, 2nd. ed. Debber, New York, USA. Cap. 5, p. 209-269, 1991.

FALLEIROS, M. C.; PORTEZAN, O.; OLIVEIRA, J. C. M.; BACCHI, O. O. S. & REICHARDT, K. Spatial and temporal variability of soil hydraulic conductivity in relation to soil water distribution, using an exponential model. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 45, p. 279-285, 1998.

FARES, A.; ALVA, A. K.; NKEDIKIZZA, P. & ELRASHIDI, M. A. Estimation of soil hydraulic properties of a sandy soil using capacitance probes and Guelph permeameter. **Soil Science**, Baltimore, v. 165, p. 768-777, 2000.

FONSECA, M. H. P.; GUERRA, H. O. C.; LACERDA, R. D. & BARRETO, A. N. Uso de propriedades físico-hídricas do solo na identificação de camadas adensadas nos Tabuleiros Costeiros, Sergipe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 4, p. 368-373, 2007.

GHIBERTO, P. J. & MORAES, S. O. Comparação de métodos de determinação da condutividade hidráulica em um latossolo vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 4, p. 1177-1188, 2011.

GONÇALVES, A. D. M. A. **Uma análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo**. 2011. 123p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

GREEN, R. E.; AHUJA, L. R. & CHONG, S. K. Hydraulic conductivity, diffusivity and sorptivity of unsaturated soils: field methods. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 1986. Pt. 1: Physical and mineralogical methods, cap. 30, p. 771-798.

HILLEL, D. **Solo e água, fenômenos e princípios físicos**. Porto Alegre: UFRGS. 1970. 231p.

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. Sandiego. CA: Enselvior Academic Press, 2004. 494p.

HILLEL, D.; KRENTOS, V. D. & STYLIANOU, Y. Procedure and test o fan internal method for measuring soil hydraulic condutivity characteristics in situ. **Soil Science**, Baltimore, v. 114, p. 395-400, 1972.

HURTADO, A. L. B.; CICHOTA, R. & JONG van LIER, Q. Parametrização do método do perfil instantâneo para a determinação da condutividade hidráulica do solo em experimentos com evaporação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 301-307, 2005.

LEITE, B. J.; FONSECA, E. V.; VALLE, R. R.; NASCIMENTO, M. N. & MARROCOS, P. C. L.; Comportamento produtivo de cacau no semiárido do Brasil. **Agrotópica**, Ilhéus, v. 24, n. 2, 2012.

JONES, S. B.; WRAITH, J. M.; OR. D. Time domain reflectometry (TDR) measurements principles and applications. HP Today Scientific Briefing. **Hydrology Process**, v. 16, p. 141-153, 2002.

JONG, V. L. & LIBARDI, P. L.; Variabilidade dos parâmetros da equação que relaciona a condutividade hidráulica com a umidade do solo no método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 1005-1014, 1999.

JURY, W.; GARDNER, W. R. & GARDNER, W. H **Soil physics**. New York, 5.ed. John Wiley & Sons, 328p. 1991.

KLEIN, V. A; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T. & MARCOLIN, C. D. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com Psicrômetro, **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 7, p. 1550-1556, 2010.

KUTÍLEK, M. & NIELSEN, D. R. **Soil hydrology**. Cremlingen-Destedt: Catena-Verl, 1994. 370 p.

LEDIEU, J.; DE RIDDER, P.; DE CLERCK, P. & DAUTREBANDE, S. A method for measuring soil water moisture by time-domain reflectometry. **Journal of Hydrology**, v. 88, p. 319-328, 1986.

LIBARDI, P. L. & MELO FILHO, J. F. Análise exploratória e variabilidade dos parâmetros da equação da condutividade hidráulica em um experimento de perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 2, p. 197-206, 2006.

LIBARDI, P. L.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D. R. & BIGGAR, J. W.; Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 3-7, 1980.

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

LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D. R. & BIGGAR, J. W. Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, n. 1, p. 3-7, 1980.

MARQUES, J. D. O.; TEIXEIRA, W. G.; REIS, A. M.; CRUZ JÚNIOR, J. O. F. & MARTINS, G. C. Avaliação da condutividade hidráulica do solo saturada utilizando dois métodos de laboratório numa topossequência com diferentes coberturas vegetais no Baixo Amazonas. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 38, n. 2, p. 193-206, 2008.

MACIEL NETTO, A.; ANTONINO, A. C. D.; AUDRY, P.; CARNEIRO, C. J. G. & DALL'OLIO, A. Condutividade hidráulica não saturada de um podzólico amarelo da zona da mata norte de Pernambuco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 6, p. 1221-1228, 2000.

MELO FILHO, J. F. & LIBARDI, P. L. Estabilidade temporal de medidas do teor e do potencial mátrico da água no solo em uma transeção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 497-506, 2005.

MEDEIROS, J. D. F.; CASTRO, N. & GOLDENFUM, J. A. Calibração de Sondas do TDR em um Latossolo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, p. 19-25, 2007.

MESQUITA, M. G. B. F. & MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 963-969, 2004.

NETTO, A. M.; ANTONINO, A. C. D.; AUDRY, P.; CARNEIRO, C. J. G. & DALL'OLIO, A. Condutividade hidráulica não saturada de um Podzólico Amarelo da zona da mata Norte de Pernambuco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 1221-1228, 2000.

PAIGE, G. B. & HILLEL, D. Comparison of three methods for assessing soil hydraulic properties. **Soil Science**, Baltimore, v. 155, p.175-189, 1993.

PAULETTO, E. A. **Determinação da condutividade hidráulica a partir da curva de retenção**. 1986. 133p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) –

Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1986.

PEREIRA, T. I.; UHDE, L. T.; GUBIANI, P. I.; REICHERT, MIGUEL, J. REINERT, D. J. & VOGELMANN, E. S. Condutividade Hidráulica Saturada e propriedades físicas do solo em área de pastagem degradada em Argissolo na Depressão Central do RS. In: VII Reunião Sul-Brasileira de Ciência do Solo, Santa Maria. **VII Reunião Sul-Brasileira de Ciência do Solo**. Santa Maria: SBCS: 2008.

PREVEDELLO, C. L.; REICHARDT, K.; CORDEIRO, D. G.; MELO, E. F. R. Q. & SCHEFFER, M. Gradiente unitário do potencial hidráulico como fonte de erro na obtenção da condutividade hidráulica em solo não saturado, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 29, n. 2, p. 275-280, 1994.

REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. Piracicaba: USP/ESALQ, Depto. Física e Meteorologia, 1996. 513p.

RICHARDS, L. A.; GARDNER, M. W. R. & OGATA, G. Physical processes determining water loss from soil. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 20, p. 310-314, 1956.

REICHARDT, K.; PORTEZAN, O.; LIBARDI, P. L.; BACCHI, O. O. S.; MORAES, S. O.; OLIVEIRA, J. C. M. & FALLEIROS, M. C. Critical analysis of the field determination of soil hydraulic conductivity functions using the flux-gradient approach. **Soil Tillage Res**, v. 48, p. 81-89, 1998.

REGALADO, C. M. & CARPENA-MUNOZ, R. Estimating the saturated hydraulic conductivity in a spatially variable soil with different permeameters: a stochastic Kozeny-Carmam relation. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 77, p.189-202, 2004.

SANTOS, M. R.; ZONTA, J. H. & MARTINEZ, M. A. Influência do tipo de amostragem na constante dielétrica do solo e na calibração de sondas de TDR. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 299-308, 2010.

SCHERPINSKI, C.; URIBE-OPAZO, M. A.; BOAS, M. A. V.; SAMPAIO, S. C. & JOHANN, J. A. Spatial variability of hydraulic conductivity and water infiltration in the soil. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 32, n. 1, p. 7-13, 2010.

STEPHENS, D. B.; LAMBERT, K. & WATSON, D. Regression models for hydraulic conductivity and field test of the borehole permeameter. **Water Resources Research**. v. 23, p. 2207-2214, 1987.

SISSON, J. B.; FERGUSON, A. H. & VAN GENUCHTEN, M. T. Simple method for predicting drainage from field plots. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 1147-1152, 1980.

SISSON, J. B. & WIERENGA, P.J. Spatial variability of steady-state infiltration rates as a stochastic process. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, p. 699-704, 1981.

TEIXEIRA, C. F. A.; MORAES, S. O. & SIMONETE, M. A. Desempenho do tensiômetro, TDR e sonda de nêutrons na determinação da umidade e condutividade hidráulica do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 2, 2005

TIMM, L. C.; OLIVEIRA, J. C. M.; TOMINAGA, T. T.; CÁSSARO, F. A. M.; REICHARDT, K. & BACCHI, O. O. S. Water balance of a sugarcane crop: quantitative and qualitative aspects of its measurement. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, p. 57-62, 2002.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L. & ANNAN, A. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, Washington, v. 16, n. 3, p. 574-582. 1980.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R. & BIGGAR, J. W. Geoestatistical theory and applications to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v. 51, n. 3, p. 1-75, 1983.

VILLWOCK, R.; TAVARES, M. H. F. & VILAS BOAS, M. A. Calibração de um equipamento TDR em condições de campo. **Irriga**, Botucatu, v. 9, n. 1, p. 82-88, 2004.

WARRICK, A. W. & NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (ed.) **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p. 319-344.

WATSON, K. K. An instantaneous profile methods for determining the hydraulic conductivity of the unsaturated porous materials. **Water Resources Research**. Elsevier, v. 2, p. 709-715, 1966.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 892-898, 1980.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A implementação de novas áreas para o cultivo do cacaueteiro em regiões não tradicionais, como o semiárido, requer o maior conhecimento das inter-relações entre a água, solo e a planta para uma eficiente exploração agrícola. Os resultados desse estudo direcionam para uma investigação da variabilidade dos atributos físico-hídricos em Cambissolos Eutróficos em regiões do semiárido com cacaueteiro.

## ANEXO

### Anexo A - Características morfológicas do perfil de Cambissolo Eutrófico Latossólico no local do experimento

**Ap10-0,25m;** vermelho (2.5 YR 4/8); franco; forte a moderado médio a grande blocos sub angulares; poros pequenos e médios abundantes; muitas raízes comuns e finas; ligeiramente duro a duro, friável, ligeiramente plástico, ligeiramente pegajoso; transição difusa e plana.

**Ap2 0,25-0,55m;** vermelho (2.5 YR 4/8); franco argiloso; forte a moderado médio blocos sub angulares; poros pequenos e médios abundantes; muitas raízes comuns e finas; ligeiramente duro, friável, plástico e pegajoso; transição difusa a plana.

**(B1) 0,55-0,85m;** vermelho (2.5 YR 4/8); franco moderado; médio blocos subangulares; poros pequenos e médios abundantes; muitas raízes comuns e finas; ligeiramente duro, friável, ligeiramente plástico, ligeiramente pegajoso; transição difusa e plana.

**(B2) 0,85-1,30m;** vermelho (2.5 YR 4/8); franco argiloso; moderado médio blocos subangulares; poros pequenos e médios abundantes; ligeiramente duro, muito friável, plástico e pegajoso difusa e plana.

Obs.: Presença de muitas raízes finas ao longo do perfil.