

ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO, ESTADO NUTRICIONAL E  
DESENVOLVIMENTO RADICULAR DO COQUEIRO ANÃO VERDE  
CULTIVADO EM DUAS CLASSES DE SOLOS SOB DIFERENTES  
NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO E UMIDADE

**ROMANO ROBERTO VALICHESKI**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY  
RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ  
MARÇO – 2008

ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO, ESTADO NUTRICIONAL E  
DESENVOLVIMENTO RADICULAR DO COQUEIRO ANÃO VERDE  
CULTIVADO EM DUAS CLASSES DE SOLOS SOB DIFERENTES  
NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO E UMIDADE

**ROMANO ROBERTO VALICHESKI**

Tese apresentada ao Centro de  
Ciências e Tecnologias Agropecuárias  
da Universidade Estadual do Norte  
Fluminense Darcy Ribeiro, como parte  
das exigências para obtenção do título  
de Doutor em Produção Vegetal

Orientador: Cláudio Roberto Marciano

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
MARÇO – 2008

ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO, ESTADO NUTRICIONAL E  
DESENVOLVIMENTO RADICULAR DO COQUEIRO ANÃO VERDE  
CULTIVADO EM DUAS CLASSES DE SOLOS SOB DIFERENTES  
NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO E UMIDADE

**ROMANO ROBERTO VALICHESKI**

Tese apresentada ao Centro de  
Ciências e Tecnologias Agropecuárias  
da Universidade Estadual do Norte  
Fluminense Darcy Ribeiro, como parte  
das exigências para obtenção do título  
de Doutor em Produção Vegetal

Aprovada em 17 de março de 2008

Comissão Examinadora:

---

Prof. Pedro Henrique Monnerat (Ph.D., Nutrição Mineral de Plantas) - UENF

---

Prof. Deborah Guerra Barroso (D.Sc., Produção Vegetal) - UENF

---

Prof. Luciana Aparecida Rodrigues (D.Sc., Produção Vegetal) - ISTCA/FAETEC

---

Prof. Cláudio Roberto Marciano (D.Sc., Solos e Nutrição de Plantas) - UENF  
(Orientador)

A Deus.

Aos meus amados pais, Constante e Migüelina.

À minha querida e amada namorada Suzi.

Ao meu irmão, Roberto, e às minhas irmãs, Claudina, Elsa, Lúcia,  
Tere, Clarice e Mari Neia.

Aos meus adoráveis sobrinhos, Jullyan, Joelson, Gabriela, Mariana,  
João Marcelo e Samuel.

**DEDICO**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, que sempre me iluminou e deu forças para superar as dificuldades.

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, pela bolsa e pela oportunidade de realização do curso.

Ao professor orientador Cláudio Roberto Marciano, pela oportunidade, amizade, incentivo e ensinamentos prestados, possibilitando a realização deste sonho.

Ao professor Pedro Henrique Monnerat, pelas sugestões e disponibilização do Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas para realização das análises de tecido vegetal.

À professora Deborah Guerra Barroso e ao professor Elias Fernandes de Souza, pelas sugestões na defesa do projeto.

Aos funcionários da UENF lotados na Estação Experimental da PESAGRO-RIO, pela ajuda prestada na recuperação da casa de vegetação e na solução de diversas questões no decorrer do experimento.

Aos professores das disciplinas cursadas, que sempre procuraram fazer o melhor para transmitir os ensinamentos.

Ao Horto Municipal de Quissamã-RJ, pela doação das mudas de coqueiro.

Aos Técnicos do Laboratório de Solos da UENF, Ederaldo, Kátia e Vanilda, pela atenção e ajuda nas análises.

Ao Engenheiro Químico José Accácio da Silva, Técnico do Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas, sempre prestativo no auxílio das análises.

Ao pessoal do Laboratório de Ciências Avançadas – LAMAV, do CCT, pela disponibilização do equipamento para determinação da resistência à penetração nas amostras de solo.

Ao pessoal do Laboratório de Engenharia Civil – LECIV, do CCT, pela ajuda na realização dos testes de Proctor Normal.

Aos colegas, Rejane, Anderson, Jean, Alexandre e Kátia, pela valiosa ajuda e companheirismo durante a condução do experimento, coleta e realização das análises.

Aos colegas da república “eternos morantes”, Leandro, Eleodoro e Francisco, pela inestimável amizade, apoio, paciência e incentivo nos momentos difíceis.

Aos amigos, Edson, Ernando, Adelmo, Laélvio, Dimmy, Flávia, Monica e Silda, pela ótima convivência e amizade.

Aos amigos André e Poliana, por terem disponibilizado a máquina fotográfica para digitalização das amostras de raiz.

Aos meus cunhados Jair Alberti e Nicanor, pelo apoio e incentivo no decorrer do curso.

Às funcionárias da biblioteca do CCTA/UENF, pela paciência e atenção.

A todos que, direta ou indiretamente, participaram na realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 O coqueiro.....	4
2.1.1 Importância econômica e distribuição geográfica.....	4
2.1.2 Morfologia do coqueiro.....	5
2.1.3 Sistema radicular do coqueiro.....	7
2.1.4 Ecofisiologia do coqueiro.....	10
2.1.5 Necessidade hídrica da cultura.....	10
2.2 Qualidade física do solo.....	13
2.3 Compactação e adensamento do solo.....	14
2.3.1 Conseqüências diretas da compactação do solo.....	17
2.3.2 Conseqüências nutricionais.....	20
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3.1 Caracterização da área experimental.....	23
3.2 Delineamento experimental e tratamentos.....	23
3.3 Coleta e preparo do solo para o experimento.....	25
3.4 Caracterização inicial do dos solos.....	25
3.4.1 Atributos químicos.....	25

3.4.2 Atributos físicos.....	26
3.5 Correção química, acondicionamento nos vasos e coleta de amostras indeformadas do solo.....	28
3.6 Atributos físicos dos solos .....	30
3.7 Transplante das mudas de coqueiro e tratos culturais.....	34
3.8 Estabelecimento das condições hídricas.....	34
3.9 Coleta do experimento e características avaliadas.....	36
3.9.1 Estado nutricional da planta.....	37
3.9.2 Atributos químicos do solo.....	37
3.9.3 Quantificação do sistema radicular.....	37
3.9.3.1 Digitalização e tratamento das imagens de raiz.....	39
3.9.3.2 Massa do sistema radicular.....	39
3.9.3.3 Análise das imagens digitais de raízes.....	39
3.9.3.4 Densidade radicular.....	39
3.9.3.5 Poder relativo de penetração de raízes.....	41
3.10 Análise estatística.....	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
4.1 Análise nutricional das plantas.....	43
4.2 Atributos químicos do solo.....	51
4.3 Desenvolvimento do sistema radicular.....	63
4.3.1 Efeito da compactação do solo.....	66
4.3.2 Efeito da umidade do solo.....	76
4.3.3 Efeito do solo.....	82
5 RESUMO E CONCLUSÕES.....	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87

## RESUMO

VALICHESKI, Romano Roberto, Dr. - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; março, 2008. **Atributos químicos do solo, estado nutricional e desenvolvimento radicular do coqueiro anão verde cultivado em duas classes de solos sob diferentes níveis de compactação e umidade.** Orientador: Cláudio Roberto Marciano.

Este trabalho foi desenvolvido no Município de Campos dos Goytacazes-RJ, com o objetivo de avaliar os atributos químicos do solo, o estado nutricional e o desenvolvimento radicular do coqueiro anão verde cultivado em duas classes de solo submetidas a diferentes níveis de compactação e de umidade. O experimento foi conduzido entre os meses de março de 2006 e janeiro de 2007, em condição de casa de vegetação na Estação Experimental da PESAGRO-RIO. O delineamento foi o de blocos ao acaso em esquema fatorial 2 x 4 x 4, sendo duas classes de solo, quatro níveis de compactação do solo e quatro condições hídricas, com três repetições, totalizando 96 parcelas experimentais. Cada parcela foi composta de um vaso plástico com volume aproximado de 100 L. As classes de solos utilizadas para o enchimento dos vasos foram um Argissolo Amarelo Distrocoeso latossólico, dos Tabuleiros Costeiros, e um Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico gleico da Baixada Campista. O solo foi acondicionado nos vasos obtendo-se quatro níveis de compactação, sendo que o nível 1 correspondeu ao acondicionamento do solo sem a aplicação de carga, e os níveis 2, 3 e 4 corresponderam a incrementos de 30%, 60% e 90% da amplitude de variação da densidade de cada solo ( $\Delta ds$ ). Quanto às condições hídricas, estas

foram implementadas a partir da definição, para cada solo e nível de compactação, de uma umidade ótima de referência, que correspondeu ao nível 2. Os demais níveis foram definidos em relação a esta referência, sendo o nível 1 obtido pelo incremento de  $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  na umidade do solo, e os níveis 3 e 4 obtidos pela redução de  $0,04$  e  $0,08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  da umidade do solo, respectivamente. Para avaliação nutricional das plantas, foram coletados folíolos da parte central da folha número 2, e para avaliação dos atributos químicos do solo, bem como do sistema radicular das plantas, foram coletadas amostras nas profundidades de  $0,0 - 0,10 \text{ m}$ ;  $0,10 - 0,20 \text{ m}$  e  $0,20 - 0,30 \text{ m}$ . O desenvolvimento do sistema radicular foi avaliado mediante o processamento de imagens digitais de raízes. Os solos atuaram de forma distinta no suprimento de nutrientes para as plantas. Foram determinados teor mais elevado de K e Ca nas plantas cultivadas no Argissolo, e de Mg e Cu nas cultivadas no Cambissolo. No Argissolo, as plantas cultivadas com maior disponibilidade hídrica apresentaram teor mais elevado de nitrogênio. Para este solo, com o incremento da compactação, ocorre um aumento no teor de manganês e uma redução no teor de cloro nas plantas. Para os atributos químicos do solo após a coleta, na profundidade de  $0,0 - 0,10 \text{ m}$ , o teor de Mg, H + Al e C foi maior no Cambissolo, e o de K, Ca, Na e P foi maior no Argissolo. Para o Cambissolo, além destes elementos, na camada de  $0,10 - 0,20 \text{ m}$  de profundidade, o teor de Al foi maior que o do Argissolo. Na profundidade de  $0,20 - 0,30 \text{ m}$ , o teor de K, Al, e H + Al foi maior no Cambissolo, e o de Ca, Na e P maior no Argissolo. Em relação ao pH, níveis intermediários de compactação e de umidade foram os que propiciaram os menores valores. No Cambissolo, estes níveis também resultaram em teor mais elevado de Al. Quanto ao desenvolvimento radicular, menores níveis de compactação, associados aos maiores níveis de umidade, proporcionaram maior densidade de raízes finas. Já para raízes médias e grossas, o incremento de  $0,3$  da  $\Delta ds$ , associado a maior umidade do solo, proporcionou condição mais adequada para o desenvolvimento. Estas condições de compactação e de umidade do solo também resultaram em maior densidade total de raiz. Para o Argissolo, incrementos superiores a  $0,6$  da  $\Delta ds$  do solo tornaram-se severamente restritivos ao desenvolvimento das raízes; já para o Cambissolo, devido a seus atributos químicos e físicos, este efeito da compactação foi menos pronunciado.

## ABSTRACT

VALICHESKI, Romano Roberto, Dr. - State University of the North Fluminense; March, 2008. **Soil chemical attributes, nutritional state and root developing of green coconut tree in two class soils under different compaction levels and soil moisture.** Adviser: Claudio Roberto Marciano.

This work was developed in Campos of Goytacazes-RJ district, with the objective of evaluate soil chemical attributes, nutritional state and root developing of green coconut tree cultivated in two soil class submitted to different compaction levels and soil moisture. The experiment was carried out between March of 2006 and January of 2007, in a greenhouse of the Experimental Station of PESAGRO-RIO. The statistic design was aleatorized blocks arranged in factorial 2 x 4 x 4, with two soil class, four soil compaction levels and four hydric conditions, with 3 repetitions, totaling 96 experimental plots. Each plot was composed of a plastic pot with approximate of 100 liters. The soil class used for fill the pots were Typic Kandiodult, concerning in Tabuleiros Costeiros, and a Umbric Dystrochrept of the Baixada Campista. The soil was conditioned in the pots obtained four compaction levels, being the level 1 corresponded to the packaging of the soil without the load application, and the levels 2, 3 and 4 corresponded to increments of 30%, 60% and 90% of the range of density variation of each soil ( $\Delta d_s$ ). The hydric conditions were implemented starting from the definition, for each soil and compaction level, of a reference soil moisture, corresponded at the level 2. The other levels were defined in relation to this reference, being the level 1 obtained by the increment of

0,04 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> in the soil moisture, and the levels 3 and 4 obtained by the reduction of 0,04 and 0,08 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> of the soil moisture, respectively. For nutritional evaluation of plants, foliole were collected of the leaf central part of the leaf number two, and for evaluation of soil chemical attributes, as well as plants root system, were collected samples in of 0,0 - 0,10 m; 0,10 - 0,20 m and 0,20 - 0,30 m depths. The root development was evaluated by digital images. The soils showed different way in nutrients supply to plant nutrients. Were determinate higher levels of K and Ca in the plants cultivated in Typic Kandudult and Mg and Cu in cultivated Umbric Dystrochrept. In Typic Kandudult; plants with larger hídric disponibility presented higher levels of nitrogen. In this soil, with the compaction increment occur an increase in the plant manganese levels and a chlorine reduction. Chemical soil attributes after collect, in the depth of 0,0 - 0,10 m, the Mg, H + Al and C levels were larger in Umbric Dystrochrept and the e of K, Ca, Na and P were larger in Typic Kandudult. For Umbric Dystrochrept, besides these elements, in the layer of 0,10 - 0,20 m depth, the Al levels was larger than Typic Kandudult. In the depth of 0,20 - 0,30 m, the K, Al, H + Al were larger in Cambissolo and the Ca, Na and P larger in Typic Kandudult. In relation to the pH, intermediate levels of compaction and of humidity showed the smallest values. In Umbric Dystrochrept these levels also resulted in higher level of Al. The root development, smaller compaction levels, associated to the highest humidity levels, provided larger density of fine roots. For medium and thick roots, the increment of 0,3 of  $\Delta d_s$ , associated to higher soil humidity provided more appropriate condition for root development. These compaction and soil humidity conditions resulted in high root total density. For Typic Kandudult, superior soil increments to 0,6 of  $\Delta d_s$ , become severely restrictive to the roots development, but for Cambissolo, due chemical and physical attributes, this compaction effect was less pronounced.

## 1. INTRODUÇÃO

O coqueiro é uma planta que compõe a paisagem litorânea da Região Nordeste do Brasil. Embora predominante nesta área, esta cultura vem sendo interiorizada na própria região, estendendo-se para áreas onde seu cultivo não é tradicional, bem como levada às regiões Norte, Sudeste e Centro-Oeste.

Esta cultura, que em 1985 ocupava 166 mil hectares, apresentou um incremento na área plantada em mais de 100 mil hectares até o ano de 2001 (Embrapa, 2003). O aumento significativo da demanda por água de coco, observado nos últimos anos, gerou uma rápida expansão da cocoicultura, principalmente da variedade Anã. Atualmente a área destinada à colheita de coco no Brasil é cerca de 292.200 por hectare, e a quantidade produzida chega à marca de 2.079.291 toneladas de fruto, com um rendimento médio de 7.157 kg por hectare, gerando aproximadamente 576 milhões de reais por ano (IBGE, 2005).

Pode ser observado que o crescimento e a produtividade das plantas não dependem apenas da precipitação total, mas também da distribuição anual das chuvas. Para um bom desenvolvimento da cultura, é necessária uma precipitação anual de 1.500 mm, com pluviosidade mensal nunca inferior a 130 mm (Embrapa, 2003). Este fato faz com que a irrigação se torne uma prática fundamental para o desenvolvimento da cocoicultura na Região Norte Fluminense, pois a precipitação anual dificilmente ultrapassa os 900 mm, e é concentrada na primavera-verão.

Quanto às exigências edáficas, o coqueiro apresenta melhores condições de adaptação em solos leves e bem drenados, mas que permitam bom

suprimento de água para as plantas. A adaptação do coqueiro aos Neossolos Quartzarênicos está quase sempre associada à presença de um lençol freático pouco profundo, o que compensa a sua baixa capacidade de retenção de água (Child, 1974). Quando o lençol freático é profundo, como é o caso do solo dos Tabuleiros Costeiros e outros (onde a cocoicultura para a produção de água de coco está em franca expansão), torna-se necessário o suprimento de água para as plantas, via irrigação.

O deslocamento da cultura do coqueiro para regiões não convencionalmente cultivadas, como a dos Tabuleiros Costeiros, trouxe como consequência uma série de problemas tecnológicos, estando a maioria destes ainda em fase de estudos. Devido à gênese dos solos nesse ecossistema, ocorrem camadas coesas/adensadas em subsuperfície. Também é comum, tanto nos Tabuleiros como em outros ecossistemas, a ocorrência de camadas superficiais e subsuperficiais compactadas, resultantes do tráfego intenso de máquinas na limpeza do pomar, tratamentos fitossanitários e colheita. Essas camadas interferem na forma com que a água é retida, na aeração e na resistência à penetração, tornando-se um severo impedimento ao desenvolvimento das raízes das plantas.

O sistema radicular do coqueiro é fortemente influenciado pela natureza do solo. Nos solos profundos e sem impedimentos, as raízes atingem grandes profundidades. No entanto, a maior parte do sistema radicular do coqueiro anão em início de produção se encontra à profundidade de 0,2 - 0,6 m. Isso o torna vulnerável aos estresses hídricos e a outras condições ecológicas e edáficas desfavoráveis, principalmente quando a lavoura se encontra implantada em áreas cujos solos têm baixa capacidade de retenção de água e/ou com camadas adensadas ou compactadas que impedem o desenvolvimento do sistema radicular em profundidade, limitando assim a área explorada pelas raízes.

O plantio do coqueiro em áreas de clima e solo pouco favoráveis deve ser acompanhado de técnicas culturais adaptadas a cada situação, sob pena de se colocar em risco a exploração da cultura e de se conviver com produtividades extremamente baixas, as quais podem ser resultantes de um sistema radicular pobremente desenvolvido devido aos impedimentos físicos existentes e a déficits hídricos. Desta forma, conhecer o comportamento do sistema radicular da planta em diferentes condições, seja de solo ou hídricas, é de fundamental importância

para possibilitar condições adequadas ao seu desenvolvimento e, conseqüentemente, produtividades satisfatórias.

Diante disso, este trabalho teve por objetivo avaliar os atributos químicos do solo, o desenvolvimento do sistema radicular e o estado nutricional do coqueiro anão verde cultivado até dez meses de idade, em vasos preenchidos com material de duas classes de solos e submetidos a quatro níveis de compactação e quatro níveis de umidade.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 O coqueiro**

#### **2.1.1 Importância econômica e distribuição geográfica**

O coqueiro (*Cocos nucifera* L.) é uma planta muito conhecida nas áreas tropicais do planeta. Sua origem mais aceita é o Sudeste Asiático, entre as ilhas dos oceanos Índico e Pacífico, tendo sido depois levado para a África e, em seguida, para a América (Purseglove, 1972, citado por Siqueira et al., 1998). Segundo Gomes (1992), indícios históricos apontam que o coqueiro gigante, procedente da Ilha de Cabo Verde, foi introduzido no Brasil pelos portugueses em 1553, no litoral baiano, enquanto para o coqueiro anão isso somente entre 1925 e 1939, vindo do Norte da Malásia. É a cultura comercial mais importante nos trópicos, com mais de 11 milhões de hectares plantados em 86 países, sendo Filipinas, Indonésia, Índia e México os maiores produtores de copra e óleo de coco (Agrianual, 2001).

O Brasil é considerado o quarto maior produtor mundial, produzindo, em 2005, 6% da produção mundial. Naquele ano, a produção nacional distribuía-se regionalmente da seguinte forma: Nordeste com 73%, Sudeste e Norte com 12% cada, e 3% para o Sul e o Centro-Oeste. Os estados de maior produção no ano de 2005 foram: Bahia (35%), Pará (12,2%), Ceará (11,9%), Pernambuco (9,4%)

Espírito Santo (8,2%), Sergipe (6,2%), Rio Grande do Norte (4,1%), Paraíba e Rio de Janeiro com 3,5% cada e Alagoas com 2,7% (IBGE, 2005).

No Brasil a cocoicultura constitui-se uma das mais importantes culturas permanentes, especialmente para a Região Nordeste, onde gera empregos, renda e gêneros alimentícios, possibilitando o aproveitamento de mais de 100 produtos. Assim sendo, esta cultura tem uma importância social muito grande, pois além dos empregos que gera, a maior parte de seu cultivo é realizado em pequenas propriedades, utilizando mão-de-obra familiar. Aproximadamente 96% da produção mundial são provenientes de propriedades com 1 a 5 hectares, envolvendo em torno de 50 milhões de pessoas (Persley, 1992, citado por Cuenca e Siqueira, 2003).

Conforme IBGE (2005), o Espírito Santo é o estado com maior produtividade do Brasil (14.378 frutos por hectare), seguido do Rio de Janeiro, com 13.339 fruto ha<sup>-1</sup>. Os estados da Região Nordeste são os que apresentam menor produtividade, sendo a Bahia com 5.212 e o Ceará com 5.070 frutos por hectare. Dos 5.338 hectares ocupados pela cocoicultura no Estado do Rio de Janeiro, 1.020 são cultivados no Município de Quissamã, 380 em São Francisco de Itabapoana, 400 em Campos de Goytacazes e 400 em Carapebus.

### **2.1.2 Morfologia do coqueiro**

O coqueiro é uma planta monocotiledônea, pertencente à família *Palmae*. É constituído de uma só espécie (*Cocos nucifera* L.) e de duas variedades principais: o coqueiro gigante e o coqueiro anão, que se divide em três subvariedades: verde, vermelha e amarela (Passos, 1998).

As folhas são do tipo penada, constituídas de pecíolo e ráquis. Quando maduras, medem de 4 a 6 m de comprimento, podendo apresentar 200 a 300 folíolos de 0,9 a 1,30 m de comprimento e pesar entre 6 e 10 kg (Passos, 1998).

Em condições ambientais favoráveis, uma planta de coqueiro gigante adulta emite de 12 a 14 folhas por ano, enquanto o coqueiro anão pode emitir 18 folhas no mesmo período. Estas permanecem vivas por um período de 36 a 42 meses, resultando na presença concomitante de, aproximadamente, 25 a 30 folhas por planta (Child, 1974). Em condições desfavoráveis ao crescimento, principalmente de estiagens, ocorre diminuição do número de folhas por árvore,

devido tanto à redução no ritmo de emissão foliar, quanto à menor longevidade das folhas (Passos, 1998).

O caule do coqueiro é do tipo estipe, não ramificado, bem desenvolvido e bastante resistente. Em seu ápice, prende-se um tufo de folhas que protege sua única gema terminal. A parte terminal do tronco, de onde se formam as folhas novas, é tenra e comestível, constituindo o palmito (Passos, 1998).

O estipe não sofre crescimento secundário em espessura, por não haver formação de novos tecidos. No entanto, em situações de déficit hídrico, a falta d'água pode induzir alterações em seu diâmetro por causa das variações no tamanho de cada uma de suas células. Sua altura depende das condições ecológicas e da idade da planta, sendo observado um rápido crescimento quando jovem (Child, 1974).

A inflorescência, também conhecida como espata, se origina das axilas das folhas e apresenta tanto flores masculinas como femininas (Siqueira et al., 1998). Em plantios onde não ocorrem déficits hídricos, a cada 30 dias é lançada uma nova inflorescência, não existindo uma época de florescimento como nas outras fruteiras. Caso venha ocorrer déficit hídrico durante a formação da espata, a mesma poderá ser abortada (Monte Leite e Encarnação, 2002). O processo de diferenciação das flores femininas ocorre 11 a 12 meses antes da abertura da espata. A ocorrência de déficit hídrico nesta fase pode prejudicar a formação das flores femininas, reduzindo assim o número destas, cuja consequência direta é a queda na produtividade.

Botanicamente, o fruto do coqueiro é considerado uma drupa. Quando completamente desenvolvido apresenta epicarpo, mesocarpo, endocarpo, tegumento e albume (ou endosperma). A película fina e lisa que envolve exteriormente o fruto é o epicarpo. O mesocarpo é a camada mais grossa e fibrosa, conhecida como casca de coco, a qual possui espessura variável. O endocarpo é uma camada que possui 3 a 6 mm de espessura, sendo formada pelo material lenhoso e duro. O tegumento reveste o endosperma, caracterizando-se por uma película fina com coloração marrom quando maduro. O endosperma, amplamente conhecido como albume ou semente, constitui-se de uma parte sólida e uma líquida. A parte sólida é uma camada branca, carnosa, com espessura variável conforme a idade do fruto. A parte líquida é conhecida

como água de coco, que preenche toda a parte interna do fruto e tem como função nutrir a planta na fase de germinação (Child, 1974).

### **2.1.3 Sistema radicular do coqueiro**

O coqueiro apresenta um sistema radicular fasciculado, característico das monocotiledôneas. Não existe uma raiz principal. No entanto, raízes adventícias são constantemente formadas a partir da base do caule. As raízes primárias são mais grossas, possuindo de 8 a 10 mm de diâmetro. Sua pequena capacidade de absorção é restrita apenas à parte mais jovem, localizada logo atrás da coifa. Na presença de déficit hídrico, esta parte da raiz se suberifica, perdendo sua função de absorção. A principal função destas raízes é a forte fixação do coqueiro ao solo. Das raízes primárias partem as secundárias, e destas, as terciárias, que produzem as radículas, com 1 a 3 mm de diâmetro, sendo estas os verdadeiros órgãos de absorção, uma vez que as raízes do coqueiro não possuem pêlos radiculares (Passos, 1998). As radículas geralmente se encontram nas camadas mais superficiais do solo. No entanto, quando submetidas a déficits hídricos, podem aprofundar-se mais, dependendo da umidade e da proximidade do lençol freático. O coqueiro, quando submetido a condições de alta umidade do solo, por excesso de chuvas ou irrigação, pode emitir raízes adventícias.

A abrangência e distribuição das raízes do coqueiro dependem da variedade utilizada, bem como da natureza e drenagem do solo. Quando implantado em solo arenoso, o alcance em profundidade e expansão lateral é maior que quando cultivado em solo argiloso, pois as raízes apresentam dificuldade em penetrar nas camadas mais compactadas (Child, 1974). Quando não existem impedimentos físicos nem déficit hídrico, as raízes podem atingir até 4 m de profundidade, aumentando o volume de solo explorado, chegando muitas vezes a alcançar o lençol freático (IRHO, 1992).

Com o objetivo de identificar os materiais mais adaptados à exploração no Nordeste do Brasil, região caracterizada por má distribuição das chuvas e presença de déficit hídrico prolongado, Cintra et al. (1992) avaliaram a distribuição do sistema radicular de seis cultivares de coqueiro. Em relação à distribuição do sistema radicular no perfil do solo, foi constatado que, independentemente da

cultivar, em torno de 70% das raízes situavam-se a 0,40 m de profundidade e num raio de 1 m em torno do tronco.

O sistema radicular de duas variedades de coqueiro de diferentes idades, crescendo em um solo aluvial, em região de floresta tropical seca, foi estudado por Avilán et al. (1984). Nessa situação, observou-se que a distribuição radicular foi marcadamente influenciada pelas características físicas do solo, bem como pelas práticas agronômicas (aplicação de fertilizante e irrigação). Independentemente da idade da planta, a maior parte das raízes foi encontrada na camada de 0 - 0,3 m de profundidade e até 1,5 m de distância do tronco.

Cintra et al. (1996), estudando a distribuição do sistema radicular em um coqueiral da variedade Gigante do Brasil, implantado há 25 anos em Areia Quartzosa distrófica, conduzido por cinco anos sob diferentes formas de manejo para o controle de ervas daninhas (gradagem, roçada, gradagem no verão, roçada no inverno e enxada rotativa), constataram que, independentemente do manejo adotado, mais de 50% das raízes finas localizavam-se na camada de 0 - 0,3 m de profundidade do solo. Também concluíram que os sistemas de manejo – roçada, enxada rotativa, gradagem no início do período seco e roçada no período chuvoso – proporcionavam um ligeiro aprofundamento do sistema radicular do coqueiro, em comparação ao do manejo com grade. Quanto à expansão lateral em relação ao tronco do coqueiro, para as raízes totais, foi expressiva até 1,8 m de distância (concentrando-se a 0,2 - 0,4 m de profundidade), enquanto as raízes finas apresentaram uma expansão lateral de 2,4 m (concentrando-se a 0 - 0,2 m de profundidade).

Em estudo conduzido na Região Norte Fluminense, Araújo (2003) avaliou a distribuição do sistema radicular em plantas do coqueiro anão com 1,5, 2,5 e 3,5 anos de idade, implantado em um Neossolo Quartzarênico (irrigado) e em plantas com 10 anos, implantadas em um Cambissolo (não irrigado). O autor constatou que o crescimento em profundidade das raízes é relativamente lento, sendo que aproximadamente 80% do sistema radicular encontravam-se a 0,5 m de profundidade para as plantas com 1,5 e 2,5 anos. Já para as plantas com 3,5 e 10 anos, a profundidade efetiva foi de 0,6 m. Em relação ao crescimento horizontal das raízes, foi constatado que mais de 80% do sistema radicular das plantas estão localizados num raio de, aproximadamente, 1,3 m de distância do tronco, independentemente da idade da planta e da presença ou ausência de irrigação.

Resultados semelhantes foram determinados por Cintra et al. (1992) em plantio não irrigado.

Arachchi (1998), avaliando a variação de umidade do solo ao longo do perfil e do raio de alcance do sistema radicular em coqueiro anão com 15 anos de idade, implantado sobre solos de cascalho, verificou que a maior extração de água pelas raízes ocorreu de 0,20 m a 1,20 m de profundidade e até 2 m do estipe. Neste trabalho, o autor também realizou amostragens de solo para a quantificação de raízes, chegando à conclusão de que entre 75 e 80% das raízes do coqueiro estavam localizados entre 0,20 a 0,80 m de profundidade.

Cintra et al. (2005), no Distrito de Platô de Neópolis-SE, avaliaram a distribuição do sistema radicular do coqueiro anão verde, conduzido sob diferentes sistemas de irrigação (microaspersão, gotejamento superficial e gotejamento enterrado), durante quatro anos após a implantação do pomar em um Argissolo Amarelo. Os resultados revelaram que, independentemente do sistema de irrigação utilizado, mais de 56% das raízes localizaram-se entre 0,2 e 0,6 m de profundidade. No entanto, comparando os resultados obtidos com os diferentes sistemas de irrigação, os mesmos observaram que a distribuição de água por gotejamento (enterrado ou superficialmente) estimulou o desenvolvimento do sistema radicular das plantas, fazendo com que as mesmas apresentassem maior aprofundamento das raízes.

Trabalhando com microaspersão e com diferentes turnos de regas (um, três e cinco dias), em plantas jovens de coqueiro anão verde implantado em um Neossolo Quartzarênico, na região de Paraipaba-CE, Miranda et al. (2004) observaram que mais de 60% do sistema radicular aos 18 e 30 meses de idade encontravam-se entre 0,20 e 0,60 m de profundidade. Em relação aos turnos de rega, ainda observaram que, quando as plantas eram irrigadas diariamente ou a cada três dias, o sistema radicular localiza-se preferencialmente de 0 a 0,4 m de profundidade. Já quando a irrigação era efetuada a cada cinco dias, havia um aprofundamento expressivo das raízes, estando a maioria destas localizadas de 0,2 a 0,6 m de profundidade.

Conforme Singh e Sainju (1998) e Wraith e Wright (1998), o sistema radicular das culturas tende a acompanhar o perfil de água no solo, ou seja, em locais sujeitos a déficit hídrico em determinadas épocas do ano, as raízes

apresentam maior crescimento em profundidade, explorando assim maior volume de solo, podendo, em alguns casos, alcançarem o lençol freático.

Os dados acima apresentados mostram, no entanto, que o coqueiro mantém a zona radicular efetiva confinada a um raio médio horizontal de 1,5 m e a uma profundidade média de 0,8 m.

#### **2.1.4 Ecofisiologia do coqueiro**

O coqueiro é uma planta que requer clima quente e que não apresente variações expressivas de temperatura. É considerado como ideal um valor médio anual em torno de 27 °C, com oscilações de 5 a 7 °C. Em presença de frio, a planta paralisa seu desenvolvimento, provocando o abortamento das flores femininas e a queda de frutos (Child, 1974).

Por ser uma planta bastante exigente em luz, o coqueiro não se desenvolve bem em locais de baixa luminosidade. Insolação de 2.000 horas por ano, com mínimo de 120 horas mensais, é considerada ideal para o pleno desenvolvimento vegetativo e para a máxima expressão do potencial produtivo da planta. A umidade atmosférica adequada situa-se entre 80 a 90%. Locais com clima quente e umidade mais elevada também não são favoráveis para o desenvolvimento do coqueiro, pois a umidade atmosférica elevada reduz a transpiração e absorção de nutrientes, favorece o desenvolvimento de pragas e doenças na cultura e provoca a queda dos frutos. O vento é um agente importante para esta cultura, pois atua na disseminação do pólen e fecundação das flores femininas. No entanto, sob déficit hídrico, os ventos fortes são prejudiciais para a cultura, pois propiciam excessiva evapotranspiração (Embrapa, 2003).

#### **2.1.5 Necessidade hídrica da cultura**

Diariamente, uma planta de coco pode transpirar cerca de 98% da água absorvida pelas raízes. A quantidade de água necessária para o bom desenvolvimento do coqueiro depende de vários fatores, dentre os quais a idade da planta, o porte (altura e área foliar), a fase de desenvolvimento (vegetativo ou produção), o clima (temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento), o

tipo de solo, o conteúdo de água presente no mesmo e o estado nutricional da planta (Nogueira et al., 1998).

Devido à sua alta taxa de transpiração, o coqueiro anão consome mais água que as outras variedades, sendo, em condições edafoclimáticas semelhantes, o primeiro a apresentar os sintomas de deficiência hídrica (IRHO, 1992). Quando submetido a déficit hídrico, o coqueiro reduz seu desenvolvimento, prorrogando o início da produção por um período de 8 a 24 meses após o fornecimento de água, e produz frutos de baixa qualidade, pois muitos elementos nutricionais deixam de ser absorvidos em quantidades adequadas (Embrapa, 2003). Um suprimento adequado de água faz com que a planta apresente crescimento contínuo, contendo folhas, flores e frutos em vários estádios de desenvolvimento e em número adequado.

Quando comparado à variedade do coqueiro anão, o coqueiro gigante apresenta baixa taxa de transpiração e maior habilidade para suportar deficiência hídrica no solo. Resultados de estudos de campo realizados por Jayasekara e Jayasekara (1993), citados por Nogueira et al. (1998), mostram que um coqueiro adulto com 35 folhas ( $150 \text{ m}^2$  de área foliar) transpira de 30 a  $120 \text{ L dia}^{-1}$  de água, dependendo da demanda evaporativa da atmosfera e do teor de umidade do solo.

A grande maioria dos estudos abordando a necessidade hídrica do coqueiro foi realizada nas condições de clima e solo da Ásia, utilizando variedades gigantes. No entanto, no Brasil, a maior parte dos plantios recentes de coqueiro foi realizada utilizando-se a variedade Anã, e os estudos a respeito de suas necessidades hídricas encontram-se em fase inicial (Nogueira et al., 1998).

Estudos realizados por Miranda et al. (1998) em Paraipaba no Estado do Ceará, indicaram, para plantas jovens de coqueiro anão irrigadas por microaspersão, um consumo de água variando de 8 a  $12 \text{ L planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  nos primeiros seis meses após o plantio (com até 10% da superfície do solo coberta pela cultura), de 12 a  $28 \text{ L planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  aos 12 meses (10 a 16% de cobertura do solo), de 30 a  $100 \text{ L planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  dos 13 aos 24 meses de idade (16 a 36% de cobertura do solo) e de 103 a  $173 \text{ L planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  dos 25 a 36 meses (36 a 64% de cobertura do solo).

Azevedo et al. (2006) avaliaram a evapotranspiração do coqueiro anão verde, cultivado em um Argissolo Amarelo, sob três níveis de irrigação ( $T_1 = 50$ ,  $T_2 = 100$  e  $T_3 = 150 \text{ L planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  de água). A evapotranspiração foi estimada

pelo método do balanço hídrico no solo e a umidade monitorada semanalmente usando a técnica TDR (Time Domain Reflectometry), no período de janeiro a dezembro de 2003. As taxas diárias médias de evapotranspiração para os tratamentos  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_3$  foram de 2,5; 2,9 e 3,2 mm dia<sup>-1</sup>, respectivamente. No entanto, nos meses de novembro e dezembro, quando ocorreu maior disponibilidade hídrica devido às chuvas intensas, foram observados os valores máximos de evapotranspiração (7,7, 7,1 e 5,2 mm dia<sup>-1</sup> para as plantas que receberam, respectivamente, 150, 100 e 50 L de água por dia). Estes valores expressivos foram atribuídos à maior velocidade do vento e à elevada temperatura. De modo geral, os autores deste trabalho observaram que a evapotranspiração do pomar de coqueiro nos três tratamentos acompanhou o curso anual da demanda atmosférica, apresentando valores máximos e mínimos nos períodos chuvosos e secos, respectivamente.

Araújo (2003), na Região Norte Fluminense, no período de outubro a dezembro de 2002, mediu o fluxo de seiva xilemática em um coqueiro anão com 3,5 anos de idade, com 22 folhas bem formadas, constatando que a transpiração média das plantas foi de 0,95 L dia<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> de área foliar, com valor mínimo de 0,09 L dia<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> e máximo de 1,52 L dia<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> de área foliar. Os resultados determinados por Posse (2005) para coqueiros em fase de produção com idade média de seis anos, também no Norte Fluminense, foram de 0,76 L dia<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> de área foliar para o fluxo de seiva médio, com valores mínimos e máximos de 0,02 e 2,29 L dia<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> de área foliar.

Souza et al. (2006), testando diferentes lâminas de irrigação (50, 100 e 150 L de água) aplicadas diariamente por planta, encontraram valores de evapotranspiração anual acumulada de 870,8 mm; 993,1 mm e 1090,6 mm para as diferentes lâminas de água aplicadas. Conforme estes pesquisadores, os valores de evapotranspiração do coqueiro anão verde tendem a aumentar à proporção que a disponibilidade de água aumenta.

De modo geral, no cálculo da quantidade de água a ser aplicada na cultura do coqueiro, no Brasil tem sido utilizado um coeficiente de cultura (kc) de 0,8 para plantas adultas, tendo sido satisfatórios os resultados obtidos. No entanto, deve-se lembrar que esses valores não foram comprovados experimentalmente para as diversas condições ambientais brasileiras, demandando ações de pesquisa específica para esse fim (Embrapa, 2003).

Miranda e Gomes (2006) recomendam, para o coqueiro em fase vegetativa, Kc de 0,65 para o primeiro ano após o plantio, Kc de 0,85 para o segundo ano, e Kc de 1,0 para o terceiro ano em diante, quando a planta entra em fase de florescimento e desenvolvimento dos frutos.

## **2.2 Qualidade física do solo**

Qualidade física do solo é a capacidade do solo promover ao sistema radicular das plantas as condições favoráveis ao crescimento e desenvolvimento. As condições favoráveis na zona radicular estão relacionadas com a estrutura do solo e são determinadas pela disponibilidade de água, aeração, temperatura e resistência à penetração (Letey, 1985). No que diz respeito à funcionalidade, a estrutura do solo ideal é aquela que permite uma grande área de contato entre as raízes e o solo, apresentando espaço poroso suficiente para a movimentação de água e difusão de gases, além da resistência à penetração não ser impeditiva ao crescimento das raízes.

A estruturação de um solo tem relação direta com o tamanho de suas partículas individualizadas, trazendo reflexos em sua porosidade, capacidade de armazenamento de água e resistência à penetração de raízes (Andrade, 1997). A estrutura do solo é um dos atributos mais importantes para a adaptação das espécies vegetais e pode ser avaliada por meio da macroporosidade, microporosidade, estabilidade de agregados, resistência à penetração e permeabilidade, dentre outros. Estes atributos podem ser utilizados como indicadores de adensamento, compactação, encrostamento e susceptibilidade do solo à erosão, subsidiando o controle de sua perda de produtividade e degradação.

A avaliação da qualidade física do solo envolve a obtenção de dados de difícil aquisição e que demandam dispêndio de tempo e recursos. Embora muitos estudos sejam baseados em análises quantitativas de propriedades isoladas, é a interação destes aspectos quantitativos que determinam a qualidade do solo. As propriedades físicas do solo são importantes para o crescimento das plantas e são frequentemente relacionadas ao conteúdo de água, oxigênio, temperatura e resistência à penetração. Estes fatores influenciam diretamente o crescimento das

plantas, pois determinam as taxas dos processos fisiológicos relacionados ao crescimento radicular, à fotossíntese e ao crescimento foliar.

### **2.3 Compactação e adensamento do solo**

Resultante do manejo inadequado do solo, da ação dos implementos agrícolas, da pressão exercida pelas rodas dos tratores e máquinas agrícolas, a compactação é reconhecida como uma das principais conseqüências do manejo inadequado do solo (Lipiec e Hatano, 2003).

Atualmente, devido ao processo de compactação, diversos tipos de solo vêm perdendo a sua qualidade física. Em nível mundial, este processo, atingindo aproximadamente 68 milhões de hectares, destaca-se como um dos principais fatores que têm limitado a obtenção de maiores índices de produtividades (Soane e Van Ouwerkerk, 1994; Alakukku et al., 2003).

O termo compactação refere-se à compressão do solo, durante a qual ocorre um aumento de sua densidade em conseqüência da redução do seu volume. Essa redução é resultante de um rearranjo mais denso do solo que leva, conseqüentemente, à redução de sua porosidade de aeração (macroporos) e da porosidade total (Dias Junior e Pierce, 1996; Tormena et al., 2002).

O adensamento é um processo similar à compactação, porém resultante de processos pedogenéticos, como, por exemplo, as camadas adensadas dos fragipans, duripans, plintitas, etc. (Dias Junior, 2000). Segundo Costa e Abrahão (1996), o adensamento é a redução natural do espaço poroso e conseqüente aumento da densidade de camadas ou horizontes do solo por dessecação, ciclos de umedecimento e secagem, iluviação e precipitação química. Além desses, outro aspecto pedogenético bastante conhecido e que tem influência direta no desenvolvimento do sistema radicular é a presença dos horizontes coesos, típico dos solos dos Tabuleiros Costeiros, que, embora friáveis quando úmidos, apresentam extrema dureza e elevada resistência à penetração quando secos, além de alta densidade, baixa porosidade total e macroporos (Souza et al., 2001).

O uso intenso de máquinas agrícolas para o preparo do solo e limpeza dos coqueirais resulta na pulverização dos agregados existentes, facilitando assim o processo de adensamento. Quando um solo encontra-se pulverizado, a acomodação de suas partículas é facilitada, uma vez que o espaço vazio entre

estas pode ser facilmente reduzido. Este processo é acentuado quando ocorre precipitação intensa sobre o solo desnudo e pulverizado, o que facilita o novo ajuste e acomodação das partículas.

A desestruturação do solo pode ser causada por modificações químicas, como a induzida pela calagem e gessagem, ou físicas, como as provocadas por ciclos de umedecimento e secagem (Oliveira, 1992). As principais causas podem ser naturais, como as chuvas, ou antrópicas, como a aplicação de dispersantes químicos que podem provocar a dispersão das partículas. Além destes fatores, pode ocorrer a desagregação mecânica, resultante do revolvimento intenso do solo com implementos como grades e enxadas rotativas.

Avaliando a formação de camadas compactadas e/ou adensadas resultantes do uso de um Latossolo Vermelho, Carvalho Júnior et al. (1998) verificaram que quanto maior o teor de argila dispersa nestes solos quando cultivados, mais susceptíveis são os mesmos à formação de camadas adensadas em subsuperfície. Além disso, esses autores observaram que, devido à calagem, ocorre um aumento de cargas negativas nos solos, as quais podem levar a um incremento no teor de argila dispersa, favorecendo a formação de camadas adensadas.

Em condição não saturada, a intensidade da redução do volume do solo, em resposta às diferentes pressões aplicadas pelo tráfego de máquinas, depende tanto das características do próprio solo quanto das características da pressão a que é submetido. As principais características intrínsecas do solo que interferem nessa compressibilidade são o teor de carbono, a densidade inicial, a textura, a estrutura e o teor de umidade. Em relação à pressão exercida sobre o solo, esta terá maior ou menor eficiência para compactar, dependendo da intensidade e frequência da carga aplicada (Dias Junior, 2000).

A resposta do solo às pressões externas exercidas pelas máquinas e implementos agrícolas depende de sua deformação, que, segundo Dias Júnior (2000), ocorre somente se as partículas forem capazes de separar-se e se movimentar umas em relação às outras, o que é altamente influenciado pela estrutura do solo, ou seja, pela presença dos agregados e pelo espaço poroso.

Para Tavares Filho et al. (1999), a estrutura do solo é modificada em função da compactação, quando os macroagregados são destruídos e o solo

apresenta uma estrutura degradada, podendo impedir o crescimento de raízes e diminuir o volume de solo explorado pelo sistema radicular.

Alguns tipos de solos possuem maior capacidade de suportar cargas e maior faixa de friabilidade, o que resulta em um maior intervalo de tempo para o seu manejo após o período de chuva (Silva et al., 2003). A diferenciação entre tipos de solo deve-se aos diferentes estados de agregação, à textura, ao teor de água, à matéria orgânica (Zhang et al., 1997; Ball et al., 2000; Braida et al., 2006) e às tensões recebidas pelo solo no passado (Horn e Lebert, 1994; Dias Júnior e Pierce, 1996; Kondo e Dias Júnior, 1999; Silva et al., 2002).

Conforme observado por muitos autores (Oliveira et al., 2003; Silva et al., 2003; Streak et al., 2004; entre outros), em condições semelhantes de solo, o fator determinante da compactação no momento de realizar as operações mecanizadas é o teor de água. Quando os solos se apresentam secos, ocorre menor deformação com o tráfego de máquinas, resultando em baixos níveis de compactação. Em geral, para uma mesma pressão aplicada, solos com teor de umidade elevada são mais susceptíveis à compactação que solos mais secos. Esse fato ocorre devido à melhor lubrificação entre suas partículas, o que reduz o atrito entre as mesmas possibilitando maior compactação. Tal comportamento ocorre até certo ponto (umidade ótima de compactação), quando se pode atingir a compactação máxima do solo. Após esse ponto, a elevação do teor de água interfere no ajuste das partículas do solo, proporcionando aumentos menos expressivos dos valores de densidade para uma mesma pressão aplicada.

Avaliando a relação entre o teor de água e a compactação do solo para diferentes Latossolos, Mantovani (1992) verificou que a compactação máxima foi obtida quando o solo se encontrava com umidade próxima à sua capacidade de campo. Além de cada solo apresentar uma curva específica de compactação, as máximas densidades tendem a decrescer com o aumento da umidade do solo acima de um valor ótimo. Já Weirich Neto et al. (2002) obtiveram, para um Latossolo Vermelho Escuro textura argilosa, valores máximos de densidade do solo com umidade gravimétrica na faixa de 14,9 - 15,5%, e, para um Cambissolo textura média, na faixa de 24,8 - 28,0%. O maior conteúdo de água para se atingir a compactação máxima no Cambissolo foi atribuída ao elevado teor de matéria orgânica e argila de maior atividade.

### 2.3.1 Conseqüências diretas da compactação do solo

Dentre as conseqüências diretas da compactação do solo, podem ser citadas o aumento da resistência do solo à penetração das raízes, a redução da porosidade, da continuidade dos poros, da permeabilidade e da aeração do solo (Xu et al., 1992, Soane e Ouwerkerk, 1994).

Como os macroporos têm importante papel na movimentação de gases no solo, são também chamados de porosidade de aeração. Os efeitos da compactação na aeração do solo podem, portanto, ser avaliados pela análise da ocorrência de macroporos, de tal forma que valores críticos para esse fator freqüentemente são estabelecidos na literatura. Em geral considera-se que  $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  representa uma boa porosidade de aeração e valor abaixo de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  mostra aeração deficiente (Da Ros et al., 1997). Considerando que as raízes podem desenvolver-se em porosidade de aeração acima de 10%, e que o conteúdo de água armazenada deve maior quantidades que o de ar, um solo ideal apresenta sua porosidade com um terço de macroporos e dois terços de microporos, garantindo, desse modo, boa aeração permeabilidade e retenção de água (Kiehl, 1979).

Em estudo realizado num Latossolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes níveis de compactação, Alvarenga et al. (1996) verificaram que, ao ocasionarem um aumento na densidade do solo de 1,0 para  $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$ , houve redução na porosidade total, de 0,62 para  $0,46 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , e na macroporosidade, de 0,31 para  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Silva et al. (1986), com níveis de compactação similares aos utilizados por Alvarenga et al. (1996), observaram uma redução na macroporosidade de  $0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  para zero, para um Latossolo Roxo sob floresta, e de 0,35 para  $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  para o mesmo solo, quando cultivado. Por outro lado, em ambos os trabalhos mencionados, ao aumentarem o nível de compactação do solo, os autores observaram um aumento na microporosidade.

A curva característica de retenção de água no solo pode ser afetada por vários fatores, os quais vão desde a distribuição relativa do tamanho, da forma e do arranjo das partículas do solo, até a composição e concentração dos solutos e a estrutura. Esta última interfere principalmente sobre a faixa mais úmida, como na capacidade de campo, mas para baixos teores de água no solo, como no ponto de murcha permanente, o potencial praticamente independe dos fatores

geométricos da amostra, sendo a porosidade e a densidade do solo de pouca importância na sua determinação (Moraes et al., 1993).

Segundo Medeiros (2004), em condições de saturação, a quantidade de água retida pelo solo diminui com a compactação, bem como a porosidade total, evidenciando que uma amostra compactada, mesmo em baixas tensões, retém menos água que uma não compactada. Para este autor, os efeitos prejudiciais da compactação excessiva dos solos consistem, principalmente, em mudanças indesejáveis das características físico-hídricas do solo, afetando negativamente os processos de armazenamento e de disponibilidade de água, nutrientes e aeração do solo, bem como o desenvolvimento do sistema radicular das plantas por impedimentos físicos.

A resistência do solo à penetração, por sua praticidade e rapidez na determinação, tem sido uma medida amplamente utilizada para avaliar o estado de compactação do solo. Esta, no entanto, é variável conforme o teor de umidade em que se encontra o solo no momento de sua avaliação. Assim, em solos semelhantes, um maior teor de água leva à menor resistência à penetração (Beutler e Centurion, 2003). Por estar diretamente relacionada ao crescimento das plantas, a resistência à penetração tem sido um dos atributos físicos priorizados em trabalhos que estudam a compactação do solo (Imhoff et al., 2000; Beutler e Centurion, 2003; Beutler e Centurion, 2004; Beutler et al., 2007). Este atributo apresenta forte relação com o crescimento radicular (Smith et al., 1997) e é muito influenciado pelo teor de umidade e pela condição estrutural do solo, o que dificulta a obtenção de valores limitantes em relação à produção e desenvolvimento das culturas (Unger e Kaspar, 1994).

Valores críticos de resistência à penetração variam de 1,5 a 4,0 MPa, conforme o tipo de solo e a espécie vegetal (Tormena et al., 1998; Imhoff et al., 2000), sendo em geral o valor de 2 MPa aceito como impeditivo ao crescimento radicular (Tormena et al., 1998).

Trabalhando em vasos, com dois Latossolos submetidos a dois níveis de tensão da água (0,01 e 0,05 MPa) e quatro níveis de resistência à penetração, Beutler e Centurion (2003) verificaram que o nível crítico de resistência do solo à penetração, para a produção tanto de matéria seca da parte aérea quanto de grãos de soja, é superior a 2 MPa com água retida na tensão de 0,01 MPa. Já para o desenvolvimento do sistema radicular, observaram que os níveis críticos

de resistência à penetração são inferiores aos tido como críticos para o desenvolvimento da parte aérea, o que resultou em maior produção de matéria seca das raízes nos menores níveis de resistência à penetração. Para estes autores, este fato demonstrou que pode ocorrer redução na produção da matéria seca do sistema radicular, mas não necessariamente da produção e da matéria seca da parte aérea e de grãos.

As plantas apresentam diferentes respostas à resistência do solo à penetração, variando entre culturas e cultivares (Silva e Rosolem, 2001). As raízes das plantas que crescem em solos com alta resistência à penetração apresentam modificações morfológicas. Assim, decréscimo na divisão celular no meristema e aumento no diâmetro da raiz, resultante do aumento na espessura do córtex, reduzem a área de solo explorado pelas raízes e a absorção de água e nutrientes (Bengough et al., 1997). Por sua vez, foi verificado que solos excessivamente porosos são prejudiciais à absorção de água e nutrientes pelas raízes, por causa do menor contato solo/raiz, provocando também menor desenvolvimento das plantas (Hakansson et al., 1998).

Resultados têm comprovado que as espécies apresentam diferentes capacidades de crescimento radicular em camadas compactadas. Assim, a resistência à penetração que ocasionou a redução de 50% no crescimento radicular foi de 0,69 MPa para a soja (Rosolem et al., 1994a) e de 1,42 MPa para o milho (Rosolem et al., 1994b). Para a cultura do feijão, Guimarães et al. (2002) observaram que o aumento da compactação do solo afetou negativamente o desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea do feijoeiro, sendo o efeito mais expressivo a partir da densidade do solo de  $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ . Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Alves et al. (2001), que obtiveram, além disso, uma redução linear do número de vagens com os crescentes graus de compactação aplicados. Bordim et al. (2005), avaliando diferentes métodos de propagação de aceroleira (estacas e sementes) em Latossolo Vermelho Distroférico, submetido a quatro níveis de compactação (densidade do solo de 1,00; 1,20; 1,40 e  $1,60 \text{ Mg m}^{-3}$ ), observaram que o aumento da densidade do solo propiciou um maior desenvolvimento da parte aérea e raízes das mudas propagadas por estacas em relação às propagadas por sementes. Neste trabalho, independentemente da forma de propagação utilizada, os níveis de densidade do solo avaliados não impediram a penetração das raízes de aceroleira.

O diâmetro radicular é uma variável diretamente relacionada com a porosidade do solo, pois a freqüência de raízes grossas aumenta com o aumento da densidade do solo, ou com o aumento da resistência à penetração. Conforme Camargo e Alleoni (1997), poucas plantas têm raízes com diâmetro inferior a 0,1 mm. Como os poros de drenagem geralmente apresentam diâmetro superior a 0,05 mm, a macroporosidade torna-se uma das principais rotas de crescimento das raízes. Para plantas de milho, Foloni et al. (2003) e Rosolem et al. (1994b) constataram que o diâmetro radicular aumentou significativamente com o aumento do grau de compactação aplicado. Resultados semelhantes a este foram obtidos por vários autores para outras espécies vegetais, dentre eles, Guimarães et al. (2002) e Alves et al. (2003), para o feijão; Beutler e Centurion (2004), para a soja; Bordin et al. (2005), para a aceroleira; e Müller et al. (2001), para a ervilhaca, o tremoço branco, a aveia preta e a aveia branca (espécies estas freqüentemente utilizadas como adubação verde).

### **2.3.2 Conseqüências nutricionais**

As plantas, para um adequado crescimento, necessitam de um solo com estrutura que possibilite uma ampla área de contato raízes/solo, assegurando assim a obtenção de água e nutrientes e um espaço poroso suficiente para um adequado fornecimento de oxigênio. A compactação, por causar modificações na estrutura do solo, pode limitar a adsorção e absorção de nutrientes, a infiltração e a distribuição de água no solo e, por sua vez, resultar em problemas no estabelecimento, na distribuição e no crescimento das raízes. Esta limitação é oriunda das alterações que a compactação causa nos atributos físicos do solo, como o aumento da densidade do solo, da resistência à penetração, da diminuição da porosidade total e, principalmente, da macroporosidade e da continuidade dos poros (Silva et al., 1986).

Para Ribeiro (1999), os fatores que mais afetam o desenvolvimento normal das raízes em solos com compactação excessiva são: a ausência de macroporos e fendas; a baixa concentração de oxigênio (principalmente a taxa de difusão de oxigênio) e de nutrientes para as raízes; o excesso de água durante o período chuvoso e a deficiência nos períodos secos; a variação na disponibilidade

de nutrientes; e a presença de substâncias e elementos tóxicos (como elevadas concentrações de manganês, alumínio e dióxido de carbono).

Quanto aos efeitos da compactação sobre a disponibilidade e a absorção de nutrientes pelas plantas, estes são variáveis conforme o tipo de solo, da cultura e do sistema adotado. Corrêa et al. (1998), testando cultivares de cana-de-açúcar em solos sob diferentes níveis de compactação, constataram que o grau de compactação reduziu a concentração de Zn, B e Fe na parte aérea e aumentou a de S, K e N, independentemente da cultivar e tipo de solo. Já para o fósforo, houve aumento na concentração no Latossolo Vermelho textura média e redução no Latossolo Vermelho textura argilosa, independentemente da variedade de cana-de-açúcar considerada.

A compactação aumenta a interação do íon de fosfato e do potássio com a superfície dos colóides do solo, ao longo de sua trajetória de difusão, fazendo com que estes elementos tenham que se difundir cada vez mais próximo de superfícies providas de cargas que os adsorvem (Novais e Smyth, 1999). Assim, Rezende et al. (2003) concluíram que a compactação em solos argilosos dificulta drasticamente a absorção de nutrientes pelas culturas, principalmente quando submetidos a baixos teores de água.

Ribeiro (1999), ao comparar o efeito da compactação sobre a produção de matéria seca da parte aérea, do sistema radicular e do acúmulo de fósforo em plantas de soja e eucalipto, observou que a compactação reduziu a produção de matéria seca da parte aérea e das raízes, bem como o acúmulo de P nas plantas de soja e de eucalipto, tanto para um Latossolo Vermelho Escuro muito argiloso quanto para um Latossolo Vermelho com textura franco arenosa. No entanto, o mesmo observou que, no solo com textura arenosa, houve maior produção de matéria seca de raízes e da parte aérea em ambas as espécies, e maior acúmulo de P nas plantas de eucalipto.

Segundo Brady (1989), quando comparados com os mais argilosos, os solos arenosos geralmente favorecem a absorção de fósforo e potássio, pois apresentam menor capacidade de adsorver estes elementos, devido à maior porosidade e, conseqüentemente, maior taxa de infiltração, condutividade hidráulica e aeração.

Ao estudarem a difusão de fósforo em dois Latossolos (textura média e argilosa) submetidos a três níveis de umidade, Villani et al. (1993) constataram

que ocorreu redução na difusão de P com o decréscimo da umidade, em ambos os solos. Entretanto, a difusão de P no solo com textura média, sob umidade correspondente á tensão de 10 kPa, foi duas a três vezes maior que a observada no solo com textura argilosa. Tal fato levou-os a concluir que o efeito depressivo da menor disponibilidade de água sobre a difusão deste elemento será bem mais drástico nos solos argilosos do que nos solos arenosos.

Medeiros (2004), avaliando o efeito da compactação e da umidade do solo em um Latossolo Vermelho Amarelo e um Neossolo Flúvico, verificou que o aumento da compactação e a redução do conteúdo de água disponível resultaram em menor quantidade de nitrogênio, fósforo e potássio absorvido pelo arroz. Em relação aos tipos de solo, o Latossolo Vermelho Amarelo propiciou maior acúmulo destes nutrientes nas plantas. Para o nitrogênio, este fato foi atribuído ás características físico-hídricas deste solo, que, por possuir maior teor de areia, apresenta maior macroporosidade, taxa de infiltração de água, condutividade hidráulica e taxa de difusão de oxigênio. Estas características, possivelmente, favoreceram a absorção de N por aumentarem o contato do íon com o sistema radicular das plantas, que ocorre predominantemente por fluxo de massa. Para o P e o K, o menor acúmulo apresentado pelas plantas cultivadas no Neossolo Flúvico foi associado ao maior teor de silte e argila, os quais proporcionaram maior energia de retenção de água no solo, menor fluxo de água e maior adsorção de P no solo. Para o potássio, o autor relacionou a menor absorção pela plantas ao maior percentual de argila e aos tipos de argila predominantes no solo, como a montmorilonita e a illita, com alto poder de fixação de potássio.

Segundo Queiroz-Voltan et al. (2000), em solos compactados, as raízes das plantas não utilizam adequadamente os nutrientes disponíveis, uma vez que o desenvolvimento de novas raízes, responsáveis pela absorção de água e nutrientes, fica prejudicado. Além disso, esses autores mencionaram que a quantidade de oxigênio na rizosfera pode ser limitante nos processos metabólicos. Segundo Hakansson et al. (1998), em solos compactados, o menor desenvolvimento do sistema radicular resulta em menor volume de solo explorado pelas raízes e, conseqüentemente, menor absorção de água e nutrientes.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Caracterização da área experimental**

O presente trabalho foi desenvolvido sob condições de casa de vegetação em Campos dos Goytacazes-RJ, na Estação Experimental da PESAGRO-RIO, com coordenadas geográficas 21°44'47"S e 41°18'24"W e altitude aproximada de 10 m acima do nível do mar. A casa de vegetação possui orientação leste-oeste, 8 m de largura, 50 m de comprimento e cobertura com plástico de 150 µm de espessura. Para evitar o aquecimento excessivo no seu interior, a casa de vegetação encontrava-se aberta nas laterais, frente e fundo. O clima, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw, isto é, tropical úmido, com verão chuvoso e inverno seco, temperatura do mês mais frio superior a 18°C e temperatura média anual em torno de 24°C.

#### **3.2 Delineamento experimental e tratamentos**

No presente trabalho foram avaliados 32 tratamentos, definidos segundo um esquema fatorial 2 x 4 x 4, sendo duas classes de solos, quatro níveis de compactação e quatro condições hídricas do solo. Foi utilizado o delineamento em blocos inteiramente casualizados com três repetições, totalizando 96 parcelas. Cada parcela correspondeu a um vaso, confeccionado a partir de tambores plásticos com capacidade pouco superior a 200 L. Estes, após cuidadosa

lavagem, foram cortados ao meio, resultando em vasos com cerca de 0,4 m de altura, 0,6 m de diâmetro e volume de 0,113 m<sup>3</sup>.

Os solos utilizados foram coletados próximos a duas das áreas estudadas por Souza (2004) e Bernardes (2005), ambas em Campos dos Goytacazes-RJ, sendo estes classificados de acordo com Embrapa (2006) como Argissolo Amarelo Distrocoeso latossólico, localizado no Colégio Estadual Agrícola Antonio Sarlo, inserido no ecossistema dos Tabuleiros Costeiros, e Cambissolo Háplico Tb Distrófico gleico, localizado na Estação Experimental PESAGRO-RIO, em ambiente da Baixada Campista.

Os solos foram acondicionados nos vasos, estabelecendo-se quatro níveis de compactação, definidos dentro da faixa de variação da densidade verificada para cada solo. A amplitude dessa faixa de variação ( $\Delta ds$ ) foi obtida pela equação:

$$\Delta ds = \rho_{\text{máx}} - \rho_{\text{mín}} \quad (1)$$

onde:

$\rho_{\text{máx}}$ : densidade máxima do solo, atingida no teste de Proctor Normal.

$\rho_{\text{mín}}$ : densidade mínima do solo, obtida pelo acondicionamento do solo no vaso sem a aplicação de carga.

O nível 1 de compactação (Cp.1) correspondeu à densidade mínima. Para a definição dos demais níveis de compactação (Cp.2, Cp.3 e Cp.4), foram considerados incrementos na densidade do solo acima da densidade mínima de 30%, 60% e 90% da  $\Delta ds$ . Assim tem-se:

Nível 1 = Cp.1 =  $\rho_{\text{mín}}$

Nível 2 = Cp.2 =  $\rho_{\text{mín}} + 0,3 \Delta ds$

Nível 3 = Cp.3 =  $\rho_{\text{mín}} + 0,6 \Delta ds$

Nível 4 = Cp.4 =  $\rho_{\text{mín}} + 0,9 \Delta ds$

As condições hídricas foram implementadas a partir da definição de uma umidade ótima ou de referência, que correspondeu ao nível 2. Os demais níveis foram definidos em relação a esta referência, sendo o nível 1 obtido pela elevação de 0,04 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> na umidade do solo e os níveis 3 e 4 obtidos pela redução de 0,04 e 0,08 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> da umidade do solo, respectivamente.

### **3.3. Coleta e preparo do solo para o experimento**

Aproximadamente 7 m<sup>3</sup> de cada um dos solos utilizados no presente estudo foram coletados e passados em peneira com malha de 6 mm. Devido à grande quantidade necessária para a realização do presente trabalho, tornou-se inviável a coleta desse material exatamente no mesmo local onde foram realizados os estudos de Souza (2004) e Bernardes (2005), uma vez que poderia haver prejuízos à mecanização, à irrigação, e às próprias plantas de coqueiro dos pomares. Optou-se, portanto, por realizar a coleta em áreas próximas aos pomares de coco, sendo o material do Argissolo proveniente de um barranco até 1,2 m de profundidade, próximo à unidade de beneficiamento de sementes, e o do Cambissolo, da camada superficial (até 0,3 m de profundidade) da área localizada entre o coqueiral e o carreador que margeia o valão.

### **3.4 Caracterização inicial dos solos**

#### **3.4.1 Atributos químicos**

Após o peneiramento, três amostras compostas de cada solo foram coletadas e levadas para o Laboratório de Solos da UENF, para determinação dos atributos físicos e químicos.

O carbono orgânico foi determinado com dicromato de potássio por colorimetria, pelo método descrito por Anderson e Ingran (1996). As marchas analíticas apresentadas em Embrapa (1997) foram utilizadas para a obtenção do pH em água, determinado por potenciometria em solução solo-água, proporção 1:2,5; do fósforo disponível, extraído usando a solução extratora de Mehlich-1, determinado por espectrofotometria; do alumínio extraível, determinado por titulação com NaOH 0,025 mol L<sup>-1</sup>, usando-se azul de bromotimol como indicador; H + Al, do cálcio e magnésio trocáveis, extraídos com solução de KCl 1 mol L<sup>-1</sup> e determinados por espectrofotometria de absorção atômica; do potássio e sódio trocáveis, extraídos pelo extrator Mehlich-1 e determinados por fotometria de chama. Os resultados analíticos obtidos estão apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1:** Atributos químicos do Argissolo (PAdx) e do Cambissolo (CXbd) utilizados no experimento

Solo	pH	P	C	Al <sup>+3</sup>	H <sup>+</sup> +Al <sup>+3</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	SB	CTC	V
	água	mg kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	mmolc kg <sup>-1</sup>								
PAdx	4,9	2,30	6,44	0,33	19,2	13,5	5,8	0,6	0,4	20,3	39,4	51,4
CXbd	4,6	74,1	12,26	1,00	38,8	12,6	8,9	2,8	0,5	24,8	63,6	39,0

Obs: SB: Ca<sup>+2</sup> + Mg<sup>+2</sup> + K<sup>+</sup> + Na<sup>+</sup>; CTC: SB + (H + Al) ; V%: SB x 100 / CTC. Médias de três repetições.

### 3.4.2 Atributos físicos

Para determinação da composição granulométrica, 20 g de terra fina seca ao ar (TFSA) de cada amostra foram dispersos com 20 mL de NaOH 1 mol L<sup>-1</sup> + 250 mL de água, em frasco de 800 mL, procedendo-se à agitação mecânica em mesa agitadora com 120 ciclos por minuto, durante 16 horas. Após a agitação, a areia foi separada da suspensão por tamisamento, em peneira com malha de 0,053 mm. A suspensão contendo argila e silte foi coletada em proveta de 1 L, sendo submetida ao processo de sedimentação para determinação da fração argila pelo método da pipeta. O silte foi determinado por diferença das outras frações em relação à amostra original, segundo Embrapa (1997).

A densidade de partícula foi determinada medindo-se o volume ocupado por 20 g de terra fina seca em estufa (TFSE), com o emprego do álcool etílico como líquido penetrante e balão volumétrico aferido de 50 mL (Equação 2).

$$\rho_p = MS / (V_{\text{balão}} - V_{\text{álcool}}) = MS / VS \quad (2)$$

onde:

$\rho_p$  = densidade de partículas (Mg m<sup>-3</sup>);

MS = massa de solo (20 x 10<sup>-6</sup> Mg TFSE);

V<sub>balão</sub> = volume do balão volumétrico (m<sup>3</sup>);

V<sub>álcool</sub> = volume de álcool gasto (m<sup>3</sup>);

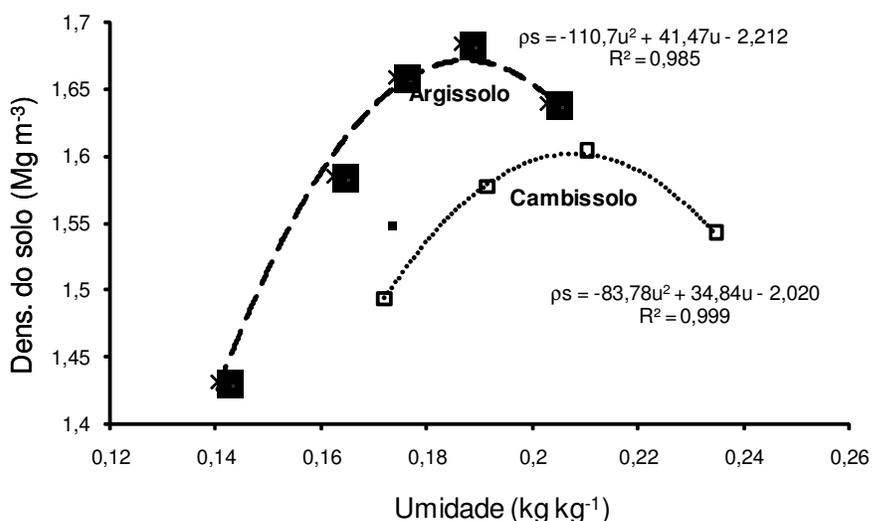
VS = volume ocupado pelas partículas do solo (m<sup>3</sup>);

Os resultados obtidos para a composição granulométrica e para a densidade de partículas para os solos utilizados no estudo estão apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2:** Composição granulométrica e densidade de partículas ( $\rho_p$ ), para o Argissolo (PAdx) e o Cambissolo (CXbd)

Solo	Areia	Silte	Argila	$\rho_p$
	g Kg <sup>-1</sup>			Mg m <sup>-3</sup>
PAdx	469	57	474	2,68
CXbd	482	120	398	2,66

A capacidade de compactação máxima dos solos foi determinada no Laboratório de Engenharia Civil da UENF, por meio do teste de Proctor Normal. Este teste consistiu basicamente em compactar um corpo de prova, constituído de três camadas, em cilindro de 1 L de volume. Cada uma das três porções de solo recebeu 26 golpes de um soquete de 2,5 kg de peso, caindo de uma altura de 30 cm. Este impacto corresponde a uma pressão de compactação de 6 kgf cm<sup>-2</sup>, que é equivalente a 15 passadas de um trator com 0,727 Mg na roda (pressão de 140 kPa) em solo franco-arenoso. Após compactado, o corpo de prova foi extraído do cilindro, coletando-se uma amostra do seu centro para a determinação da umidade gravimétrica (U, em kg kg<sup>-1</sup>) e da densidade do solo (Mg m<sup>-3</sup>). Os resultados obtidos com este teste estão apresentados na Figura 1.



**Figura 1:** Relação entre umidade e densidade obtida no teste de Proctor Normal para o Argissolo Amarelo (PAdx) e o Cambissolo Háplico (CXbd).

Igualando a zero a derivada primeira das equações da Figura 1, obteve-se, para cada solo, a umidade em que ocorre a máxima compactação. As substituições desses valores de umidade nas equações da Figura 1 resultam,

portanto, no valor da densidade máxima correspondente. Pôde-se, então, determinar a amplitude de variação da densidade e, conseqüentemente, as densidades que foram aplicadas nos quatro níveis de compactação anteriormente mencionados (Tabela 3).

**Tabela 3:** Densidade máxima ( $\rho_{\text{máx.}}$ ) e umidade (U) correspondente, obtidas no teste de Proctor Normal, amplitude da faixa de variação da densidade ( $\Delta ds$ ), e densidades correspondentes aos quatro níveis de compactação (Cp.1, Cp.2, Cp.3, Cp.4), para o Argissolo (PAdx) e Cambissolo (CXbd)

Solo	U	$\rho_{\text{máx.}}$	$\Delta ds$	Cp.1	Cp.2	Cp.3	Cp.4
	$\text{kg m}^{-3}$						
<b>PAdx</b>	0,187	1,67	0,67	1,00	1,20	1,40	1,60
<b>CXbd</b>	0,208	1,60	0,60	1,00	1,18	1,36	1,54

Obs: Cp.1 =  $\rho_{\text{mín}}$  (obtida pelo acondicionamento do solo em anel sem aplicação de carga).

### 3.5 Correção química, acondicionamento nos vasos e coleta de amostras indeformadas do solo.

Antes do acondicionamento do solo, os vasos foram pesados e forrados internamente com saco plástico, a fim de evitar que qualquer resíduo químico pudesse interferir no desenvolvimento das plantas.

O acondicionamento foi feito de forma a se obter uma coluna de solo com altura total de 0,4 m, sendo a camada de 0,3 m no fundo do vaso compactada nos níveis estipulados no item 3.2, e a camada superficial de 0,1 m de espessura colocada sem compactação.

Para o estabelecimento das densidades pretendidas para as camadas superficial (0 - 0,10 m) e profunda (0,10 - 0,40 m), compactada em um dos quatro níveis desejados (Tabela 3), tornou-se necessário a correta medição da quantidade de solo para o preenchimento do volume do vaso. Para isso, a massa de solo úmido (MSU, em kg) utilizada em cada vaso foi calculada a partir da massa de solo seco em estufa (MSSE, em kg) necessária para cada tratamento e do valor da umidade gravimétrica do solo (U, em  $\text{kg kg}^{-1}$ , determinada em amostra de solo coletada no dia anterior ao acondicionamento), pela equação:

$$\text{MSU} = \text{MSSE} + U \times \text{MSSE} \quad (3)$$

Antes de sofrer a compactação, as quantidades de solo utilizadas nas duas camadas (superficial e profunda) foram homogeneizadas e corrigidas quimicamente. A necessidade de calagem foi determinada pelo método de saturação por bases, fazendo com que esta atingisse no mínimo 70%. Também foi levado em consideração o teor de cálcio e magnésio, que deve ser superior a  $2,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ . Para os níveis de compactação 1, 2, 3 e 4, foram aplicados, respectivamente, 34,5, 41,5, 48,5 e 55,5 g por vaso de calcário (com PRNT de 85%) no Argissolo, e 93,3, 110,1, 126,9 e 143,8 g por vaso no Cambissolo. No Argissolo, além da calagem, tornou-se necessário fazer a correção da deficiência de P, sendo aplicados, nos níveis de compactação 1, 2, 3 e 4, respectivamente, 280,0, 336,4, 392,74 e 449,5 g por vaso de superfosfato simples (SFS). Estas quantidades de calcário e de SFS foram determinadas com base nos teores apresentados pelo solo (Tabela 1), e na massa de TFSE utilizada nos diferentes níveis de compactação.

Para maior eficiência no processo de compactação do solo, sua umidade foi elevada ao valor obtido no teste de Proctor em que se verificou a máxima compactação ( $0,187 \text{ kg kg}^{-1}$  para o Argissolo e  $0,208 \text{ kg kg}^{-1}$  para o Cambissolo). Também como forma de aperfeiçoar o processo de compactação e, ainda, minimizar a variação da densidade em profundidade, a quantidade de solo a ser utilizada na camada compactada foi dividida em cinco partes iguais. Assim, a prensa hidráulica atuou até que cada uma das cinco partes de solo adquirisse uma espessura aproximada de 0,06 m, resultando na altura total pretendida de 0,30 m (Figura 2A). Para o acondicionamento da camada superficial, não houve necessidade de aplicação de carga ou adequação da umidade.

Para que não houvesse deformação dos vasos, durante a compactação dos solos, foram utilizados cintas de ferro, reguláveis com parafusos e porcas para envolverem o vaso. Foi utilizada também uma chapa de compensado com um diâmetro pouco inferior ao do vaso, sendo esta colocada sobre o solo dentro do vaso. Sobre esta chapa, foram colocadas peças de madeira (caibros de 10 cm x 8 cm), cobrindo sua superfície. Transversalmente a estas, foi colocada outra peça idêntica, apoiada ao corpo do macaco hidráulico, que efetuou a compactação dos solos até atingir a densidade desejada (Figura 2B).



**Figura 2:** Prensa hidráulica utilizada na compactação durante o acondicionamento do solo nos vasos.

### 3.6 Atributos físicos dos solos após a compactação

Após o acondicionamento, um vaso de cada solo e nível de compactação foi utilizado para a coleta de cinco amostras indeformadas. Estas foram coletadas em anéis metálicos com volume aproximado de 100 mL. Além de servirem para conferir se as densidades previstas foram efetivamente alcançadas, estas amostras foram utilizadas para determinação da curva de retenção de água e cálculo de atributos físicos delas obtidos (porosidade total, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível).

Inicialmente as amostras foram utilizadas na determinação das umidades de equilíbrio em oito valores de tensão de água, sendo quatro destes considerados, no presente trabalho, de “baixa tensão” (1, 3, 6 e 10 kPa) e quatro de “alta tensão” (33, 100, 500 e 1500 kPa). Cada uma das cinco amostras foi utilizada para obtenção de um ou dois destes pontos. Os de baixa tensão foram conseguidos em funil de placa porosa e os de alta tensão em câmaras de pressão Richards, segundo o procedimento descrito em Silva et al. (1994). Os valores de umidade ( $\theta$ ,  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) foram obtidos pela equação:

$$\theta = V_a / V \quad (4)$$

em que:  $V_a$  ( $\text{m}^3$ ) é o volume de água retido na amostra e  $V$  ( $\text{m}^3$ ) é o volume da amostra, que corresponde ao volume do anel. O valor  $V_a$  foi obtido pela equação:

$$V_a = m_a / \rho_a \quad (5)$$

onde  $\rho_a$  ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) é a densidade da água, assumida como sendo  $1 \text{ Mg m}^{-3}$ ; e  $m_a$  (Mg) é a massa de água da amostra, obtida pela diferença entre o peso da amostra úmida (imediatamente após a retirada dos funis de placa porosa ou câmara de pressão) e seca em estufa a  $110^\circ\text{C}$  por 48 horas.

A densidade do solo ( $\rho$ , em  $\text{Mg m}^{-3}$ ) foi obtida também após a secagem da amostra em estufa, aplicando-se a equação:

$$\rho = MS / V \quad (6)$$

em que MS é a massa de solo seco em estufa (em Mg).

A porosidade total (PT, em  $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) foi obtida a partir dos valores de densidade do solo e densidade das partículas, aplicando-se a equação:

$$PT = 1 - \rho / \rho_p \quad (7)$$

A curva de retenção foi estimada associando os valores de conteúdo de água ( $\theta$ ) aos respectivos potenciais mátricos ( $\phi_m$ ), segundo o modelo de van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + |\alpha \phi_m|^n\right)^m} \quad (8)$$

onde:  $\theta_r$  ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ),  $\alpha$  ( $\text{kPa}^{-1}$ ),  $n$  e  $m$  (adimensionais) são os parâmetros empíricos do modelo. O valor de  $\theta_r$  representa a umidade residual, e a umidade de saturação ( $\theta_s$ ,  $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) foi tratada como variável independente, sendo assumida, para cada amostra, como correspondente à porosidade total.

A partir da curva de retenção obtida foi possível calcular a umidade na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), correspondente ao  $\Phi_m = -10 \text{ kPa}$ , a umidade no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ), correspondente ao  $\Phi_m = -1500 \text{ kPa}$ . Calculou-se, ainda, o valor da água disponível (AD) e da porosidade de aeração na capacidade de campo ( $\alpha_{AERCC}$ ), de acordo, respectivamente, com as equações:

$$AD = \theta_{CC} - \theta_{PMP} \quad (9)$$

$$\alpha_{AERcc} = PT - \theta_{CC} \quad (10)$$

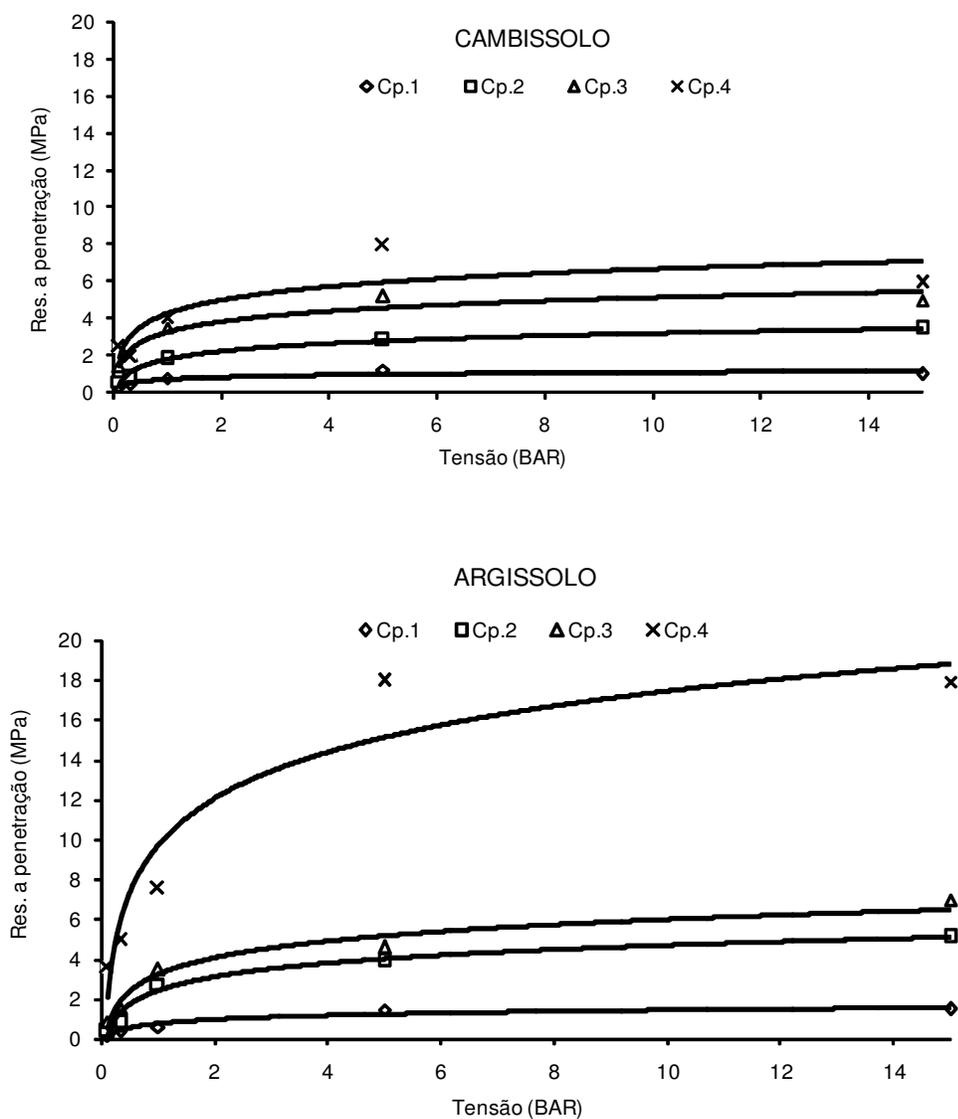
Na Tabela 4 são apresentados os valores médios de densidade e porosidade total do solo, os coeficientes de ajuste da curva de retenção para cada combinação solo-compactação e os valores de  $\theta_{CC}$ ,  $\alpha_{AERcc}$ ,  $\theta_{PMP}$  e AD.

**Tabela 4:** Densidade do solo ( $\rho$ ), porosidade total ( $PT = \theta_s$ ), parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten (1980) -  $\theta_r$ ,  $\alpha$ ,  $m$  e  $n$  - e variáveis dela resultantes ( $\theta_{CC}$ ,  $\alpha_{AERcc}$ ,  $\theta_{PMP}$  e AD), para os quatro níveis de compactação (Cp.1; Cp.2; Cp.3 e Cp.4) do Argissolo (PADx) e do Cambissolo (CXbd)

Atributos	-----Argissolo-----				-----Cambissolo-----			
	Cp.1	Cp.2	Cp.3	Cp.4	Cp.1	Cp.2	Cp.3	Cp.4
$\rho$ (Mg m <sup>-3</sup> )	1,02	1,26	1,37	1,71	1,09	1,23	1,44	1,51
$PT = \theta_s$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,62	0,53	0,49	0,36	0,59	0,54	0,46	0,43
$\theta_r$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,140	0,177	0,188	0,236	0,147	0,203	0,205	0,239
$\alpha$ (kPa <sup>-1</sup> )	0,821	1,517	1,107	0,538	26,46	2,120	2,283	1,032
$m$	0,785	0,255	0,314	0,258	0,096	0,051	0,014	0,028
$n$	1,005	2,038	1,580	1,486	2,926	10,998	23,075	15,851
$\theta_{CC}$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,223	0,263	0,278	0,300	0,240	0,263	0,299	0,308
$\alpha_{AERcc}$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,396	0,268	0,209	0,061	0,351	0,273	0,159	0,123
$\theta_{PMP}$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,142	0,184	0,195	0,245	0,169	0,207	0,225	0,247
AD (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,081	0,080	0,083	0,055	0,070	0,056	0,075	0,062

As amostras indeformadas de solo utilizadas para determinar a curva de retenção de água nos diferentes níveis de compactação foram utilizadas, assim que atingiram o equilíbrio na tensão a que estavam submetidas (10, 30, 100, 500 e 1500 kPa), para a determinação da resistência à penetração. Para isso, foi utilizado um aparelho universal para ensaios de compressão (Instron 5582), no Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) do CCT/UENF, com coleta automática de dados, permitindo ajuste para uma velocidade de penetração constante de 10 mm min<sup>-1</sup>, até a profundidade de 40 mm. Na base de uma célula de carga, de capacidade de força de 1 kN, foi afixado um cone metálico com

semi-ângulo de  $30^\circ$  e base de 6,35 mm de diâmetro e  $31,8 \text{ mm}^2$  de área. As resistências foram identificadas pelo conjunto célula de carga-cone metálico, cujos sinais foram armazenados no microcomputador com interface (uma leitura por segundo). A resistência à penetração foi obtida como uma força (em N) e transformada para pressão (em MPa), dividindo-se o valor da força aplicada pela área da base do cone. Foi calculada a média aritmética dos valores de resistência à penetração entre 10 e 35 mm, valor este considerado representativo da amostra e tensão avaliada. Na Figura 3, são apresentadas as relações entre os valores previstos pelas equações e os observados, para o Cambissolo e o Argissolo.



**Figura 3:** Resistência à penetração apresentada pelos solos utilizados nos níveis de compactação 1 (Cp.1), 2 (Cp.2), 3 (Cp.3) e 4 (Cp.4) em diferentes teores de umidade.

### **3.7 Transplante das mudas de coqueiro e tratos culturais**

Utilizaram-se mudas de coqueiro anão verde, produzidas pelo Horto Municipal de Quissamã-RJ, as quais possuíam de três a quatro folhas e coleto com aproximadamente 3 cm de diâmetro. Para o transplante das mudas, foi realizada a poda do sistema radicular (deixando as raízes com aproximadamente 2 cm de comprimento), mantendo-se o fruto. As mudas foram transplantadas no centro do vaso, tendo-se o cuidado de evitar o enterrio do coleto. O transplante foi efetuado no dia 15 de março de 2006.

No 35º dia após o transplante, realizou-se a adubação de cobertura. No Argissolo, em cada vaso foram aplicados 100 g de cloreto de potássio (KCl) e 100 g de uréia. Já para o Cambissolo, estas quantidades foram de 66,6 g de KCl e 100 g de uréia. Neste mesmo dia, também foi realizada a primeira pulverização com methamidophos e abamectina para o controle de ácaros e pragas. Outras duas aplicações destes produtos foram realizadas, sendo uma sete dias após a primeira aplicação e outra em 06/12/2006. No decorrer do experimento, foi feito o arranquio manual das plantas daninhas nos vasos.

### **3.8 Estabelecimento das condições hídricas**

No período de aproximadamente sete semanas após o plantio das mudas, a irrigação foi feita sem quantificar o volume de água aplicado, mas buscando-se o estabelecimento visual de uma condição ótima de umidade (ou umidade de referência). Uma vez estabelecida esta condição hídrica, o valor médio de umidade para cada combinação solo-compactação foi assumido como correspondente ao nível 2, estabelecendo-se os demais níveis pela manutenção de uma umidade do solo superior em  $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  ou inferior em  $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  ou  $0,08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  abaixo desta umidade de referência (correspondentes, respectivamente, aos níveis 1, 3 e 4).

Cabe ressaltar que a condição de umidade ótima ou de referência não é a mesma quando se altera o solo ou o nível de compactação. Isso ocorre porque tais variações (tanto dos níveis de compactação quanto das diferenças no tamanho, forma e natureza das partículas de cada solo) impõem diferenças no volume e na geometria do espaço poroso do solo, pelas quais a fixação de um

determinado fator não impede que outro sofra variação. Por exemplo, o estabelecimento de um valor de umidade do solo condiciona uma determinada porosidade de aeração para um determinado nível de compactação, mas leva a ocorrência de um valor de porosidade de aeração absolutamente distinto se o nível de compactação considerado for outro (ou mesmo se o nível de compactação for o mesmo, mas o solo considerado for outro).

A umidade volumétrica, a porosidade de aeração e o potencial mátrico encontrados nos níveis de compactação após a implementação das lâminas de irrigação nos solos em estudo são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5:** Umidade, porosidade de aeração e potencial mátrico após implementação das quatro condições hídricas (irrigação 1, 2, 3 e 4) ao Argissolo (PAdx) e ao Cambissolo (CXbd), nos quatro níveis de compactação (Cp.1, Cp.2, Cp.3 e Cp.4)

	Irrigação 1		Irrigação 2		Irrigação 3		Irrigação 4	
	PAdx	CXbd	PAdx	CXbd	PAdx	CXbd	PAdx	CXbd
-----umidade do solo (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )-----								
<b>Cp.1</b>	0,34	0,41	0,30	0,37	0,26	0,33	0,22	0,29
<b>Cp.2</b>	0,36	0,42	0,32	0,38	0,28	0,34	0,24	0,30
<b>Cp.3</b>	0,37	0,43	0,33	0,39	0,29	0,35	0,25	0,31
<b>Cp.4</b>	0,39	0,44	0,35	0,40	0,31	0,36	0,27	0,32
-----porosidade de aeração (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )-----								
<b>Cp.1</b>	0,28	0,18	0,32	0,24	0,36	0,26	0,40	0,30
<b>Cp.2</b>	0,19	0,14	0,23	0,18	0,27	0,22	0,31	0,26
<b>Cp.3</b>	0,14	0,07	0,18	0,11	0,22	0,15	0,26	0,19
<b>Cp.4</b>	0,04	0,03	0,08	0,07	0,12	0,11	0,16	0,15
-----potencial mátrico (kPa)-----								
<b>Cp.1</b>	-2,39	-0,26	-3,54	-0,61	-5,55	-0,95	-9,85	-2,34
<b>Cp.2</b>	-2,59	-1,14	-4,26	-1,65	-8,13	-2,64	-21,37	-5,00
<b>Cp.3</b>	-2,53	-1,00	-4,40	-1,88	-8,70	-4,13	-23,14	-11,88
<b>Cp.4</b>	-2,40	-1,30	-6,92	-2,18	-23,63	-4,27	-199,28	-11,06

O controle da quantidade de água aplicada nos diferentes tratamentos foi realizado dos 90 aos 280 dias após o transplante das mudas. Neste período, a cada intervalo de tempo de 10 a 15 dias, foi efetuada a pesagem dos vasos, realizada por um conjunto balança-talha, sustentada por uma estrutura metálica móvel (Figura 4). Calculou-se então, para cada vaso, a diferença entre o peso medido e o planejado, fazendo-se a correção pela adição de água (no caso de déficit) ou a suspensão temporária da irrigação (no caso de excesso). A

quantificação da água aplicada em cada vaso foi feita com um becker, sendo efetuadas três irrigações semanais.



**Figura 4:** Conjunto balança-talha e estrutura de metal utilizada na pesagem dos vasos.

### 3.9 Coleta do experimento e características avaliadas

O experimento foi conduzido por 10 meses (até 15 de janeiro de 2007), sendo então realizada a coleta de amostras de tecido vegetal (folhas), para avaliar o estado nutricional das plantas, e de solo, com estrutura deformada, nas profundidades de 0,0 - 0,10 m; 0,10 - 0,20 m e 0,20 - 0,30 m, para avaliar tanto os atributos químicos do solo quanto o desenvolvimento radicular das plantas (massa, comprimento, área superficial, volume e diâmetro das raízes), frente aos impedimentos físicos existentes no período experimental.

As variáveis biométricas (circunferência da estipe, número de folhas, altura do coqueiro, área foliar e massa total da planta), o consumo de água pelas

plantas e os parâmetros fisiológicos também foram avaliadas, sendo os resultados apresentados e discutidos por Peçanha (2007).

### **3.9.1 Estado nutricional da planta**

Foram coletados quatro a cinco folíolos da parte central da folha número 2. Após a coleta, o material foi devidamente identificado, sendo então encaminhado para o Laboratório de Solos. Em cada folíolo, foi passado um algodão embebido com água deionizada, para remoção da poeira. Também foi removida a nervura principal dos folíolos e, após, estes foram acondicionados em sacos de papel e levados para secar em estufa com circulação forçada de ar e temperatura de 70 °C por um período de 72 horas. Depois de seco, o material foi passado em moinho tipo Wiley, provido de facas e peneiras de aço inoxidável. O material triturado foi acondicionado em recipientes plásticos até o momento da análise. O procedimento analítico e a metodologia seguida para digestão sulfúrica do tecido vegetal, bem como a determinação dos teores dos nutrientes P, K, Ca, Mg, S, Cl, Cu, Fe, Mn e Zn, foram as descritas por Malavolta et al. (1997), e o N, pelo método de Nessler, segundo Jackson (1965).

### **3.9.2 Atributos químicos do solo**

Em cada vaso, nas camadas de 0,0 - 0,10 m, 0,10 - 0,20 m e 0,20 - 0,30 m de profundidade, coletaram-se amostras de solo para determinação do pH e do teor de carbono orgânico, fósforo, cálcio, magnésio, potássio, sódio,  $Al^{3+}$  e  $H + Al$ . A metodologia utilizada nas marchas analíticas foi a mesma da caracterização inicial do solo, que se encontra citada no item 3.4.1.

### **3.9.3 Quantificação do sistema radicular**

Para a avaliação do sistema radicular, amostras de solo foram coletadas usando-se um amostrador confeccionado com flange de metal galvanizado, de formato retangular, com 0,10 m de largura e 0,50 m de comprimento. Este amostrador possui ao longo de seu comprimento, subdivisões a cada 0,10 m,

resultando em quadrículas com 0,10 m x 0,10 m cada. A altura do amostrador era de aproximadamente de 0,14 m. Antes de iniciar a coleta, as plantas de coqueiro foram cortadas rentes ao solo, deixando-se no vaso, apenas o sistema radicular. Para amostragem, cravou-se o amostrador até a profundidade de 0,10 m, sendo posicionado de modo que a quadrícula central coincidissem com o local onde se localizava a estipe, coletando-se, deste modo, uma amostra no centro do vaso e duas amostras em cada lateral, em faixas distanciadas de 0,05 - 0,15 m e 0,15 - 0,25 m da posição central (Figura 5).

Após a introdução do amostrador, o solo em sua lateral era escavado para permitir que uma faca de serra fosse passada entre sua face inferior e a camada de solo imediatamente abaixo. O volume de solo contido em cada quadrícula, correspondente a 1 L, foi acondicionado em saco plástico e, imediatamente, levado para a separação das raízes.

Para a coleta das amostras nas camadas subsuperficiais, manteve-se o mesmo posicionamento do amostrador e seguiu-se o mesmo procedimento descrito para a primeira camada, diferindo apenas pela necessidade de remover totalmente a camada imediatamente acima. O número total de amostras em cada vaso foi 15, sendo cinco amostras em cada uma das três camadas.

As raízes de cada amostra foram separadas do solo por meio de lavagem com água de torneira e peneiras de malha de 0,5 mm, sendo então congeladas em refrigeradores até o momento das análises.



**Figura 5:** Amostrador utilizado na coletada do solo para avaliação do sistema radicular das plantas.

### **3.9.3.1 Digitalização e tratamento das imagens de raiz**

Para digitalização das raízes existentes em cada subamostra, estas após serem descongeladas pela imersão em água, foram dispostas sobre um fundo preto de borracha, e então fotografadas a uma distância fixa de 0,42 m. A máquina utilizada foi uma Sony DSC-S40, com resolução de 4.1 mega pixels. Após a obtenção das imagens, utilizando-se o programa Microsoft Photo Editor, foi realizado o recorte das bordas (com padronização do tamanho das mesmas), a limpeza das impurezas, a adequação da qualidade da imagem, a conversão para preto e branco, com resolução de 300 dpi, possibilitando assim utilizar o programa Delta-Scan para a quantificação das raízes.

### **3.9.3.2 Massa do sistema radicular**

Após serem fotografadas, as raízes existentes em cada amostra coletada foram acondicionadas em sacos de papel e levadas para secar em estufa de circulação forçada de ar com temperatura de 70°C por 72 horas. A pesagem foi feita com balança de precisão de 0,001 g, separando-se as raízes grossas (primárias e secundárias) das finas (terciárias e radículas).

### **3.9.3.3 Análise das imagens digitais de raízes**

Para a análise das imagens digitalizadas de raízes foi utilizado o programa Delta-Scan. Devido à grande quantidade de raízes em boa parte das imagens, o programa foi configurado para utilizar a opção de cálculo seno-teta, que faz as estimativas considerando a existência de sobreposição. Além de fornecer o diâmetro médio das raízes e os valores totais de comprimento, área superficial e volume radicular, o programa foi configurado para dar também estas informações (comprimento, área superficial, volume) para diversas faixas de diâmetro. Para efeito de análise estatística e interpretação dos resultados, os dados foram considerados em três classes de diâmetro: classe 1 (diâmetro < 2,0 mm); classe 2 (diâmetro entre 2,0 - 4,0 mm); e classe 3 (diâmetro > 4,00 mm).

### **3.9.3.4 Densidade radicular**

Ressalta-se, inicialmente, que os valores de comprimento, área superficial, volume e massa de raízes obtidos em cada amostra já equivalem,

numericamente, a valores de densidade, uma vez que o volume das amostras era 1 L. Assim, tal qual os valores absolutos de comprimento, área superficial, volume e massa seca de raízes, estas densidades puderam ser obtidas considerando-se tanto as raízes totais quanto as diversas classes de diâmetro adotadas.

Para efeito de análise estatística e interpretação dos resultados, os valores de densidade radicular foram obtidos, inicialmente e individualmente, para cada uma das três camadas amostradas. Cada um desses valores é correspondente à média das densidades radiculares obtidas nas cinco posições de amostragem, média esta calculada considerando-se, como fatores de ponderação, a representatividade que cada amostra tem em relação ao volume total da camada. Assim, a densidade da amostra central ( $DR_3$ ) representa o volume de 1 L de solo. As densidades das amostras imediatamente à direita e à esquerda da central ( $DR_2$  e  $DR_4$ ) representam, juntas, o volume de solo contido na faixa circular entre 0,05 - 0,15 m do centro do vaso, com cerca de 6 L (cada amostra representa, portanto, 3 L). Também juntas, as densidades das amostras mais externas, à direita e à esquerda ( $DR_1$  e  $DR_5$ ), representam o volume de solo contido na faixa circular entre 0,15 - 0,25 m do centro do vaso, com cerca de 12,6 L (portanto, representatividade de 6,3 L para cada amostra). O volume total representado pelas amostras da camada é 19,6 L, e a densidade radicular (DR) foi então obtida por:

$$DR = (6,3 \cdot DR_1 + 3 \cdot DR_2 + DR_3 + 3 \cdot DR_4 + 6,3 \cdot DR_5) / 19,6 \quad (11)$$

Os valores de densidade radicular foram obtidos, também, para a camada 0,0 - 0,30 m, calculados pela média aritmética das três camadas amostradas (0,0 - 0,10 m, 0,10 - 0,20 m e 0,20 - 0,30 m de profundidade).

Com base nas quatro formas de quantificação do sistema radicular utilizadas, definem-se, então, as seguintes variáveis de interesse:

- Densidade de comprimento radicular (DCR), que expressa o comprimento de raízes por unidade de volume de solo ( $m L^{-1}$ ). Quando se consideram as diferentes classes de diâmetro radicular, pode apresentar-se como  $DCR_{Classe 1}$ ,  $DCR_{Classe 2}$  e  $DCR_{Classe 3}$ .

- Densidade de superfície radicular (DSR), que expressa superfície de raízes por unidade de volume de solo ( $m^2 L^{-1}$ ). Quando se consideram as diferentes classes

de diâmetro radicular, pode apresentar-se como  $DSR_{Classe\ 1}$ ,  $DSR_{Classe\ 2}$  e  $DSR_{Classe\ 3}$ .

- Densidade de volume radicular (DVR), que expressa o volume de raízes por unidade de volume de solo ( $mL\ L^{-1}$ ). Quando se consideram as diferentes classes de diâmetro radicular, pode apresentar-se como  $DVR_{Classe\ 1}$ ,  $DVR_{Classe\ 2}$  e  $DVR_{Classe\ 3}$ .

- Densidade de massa radicular (DMR), que expressa a massa seca de raízes por unidade de volume de solo ( $g\ L^{-1}$ ). Quando se consideram as classes de diâmetro de raízes grossas ou finas, pode apresentar-se como  $DCR_{Grossas}$  e  $DCR_{Finas}$ .

### 3.9.3.5 Poder relativo de penetração de raízes

O poder relativo de penetração de raízes (PRPR) foi convencionado como sendo a relação entre a quantidade de raízes que conseguiram ultrapassar 0,10 m da camada compactada (portanto, presentes na camada compactada de 0,20 - 0,30 m de profundidade) e a quantidade total de raízes nas três camadas. Estas quantidades são expressas em termos de massa seca de raízes, sendo obtidas pelo produto da densidade radicular (DMR) pelo volume de solo da camada considerada (19,6 L e 58,8 L, respectivamente). Assim sendo, o PRPR será determinado de acordo com a equação:

$$PRPR = (MS_{20-30} / MSTR) \times 100 \quad (12)$$

onde:

$MS_{20-30}$  = massa seca de raízes na camada de 0,20 - 0,30 m de profundidade;

MSTR = massa seca total de raízes;

PRPR = Poder relativo de penetração de raízes, expresso em %;

### 3.10 Análise estatística

Todos os dados foram submetidos à análise de variância com aplicação do Teste F a 5% (Tabela 6), utilizando-se o programa SAS. As diferenças existentes entre os solos foram identificadas pelo teste F (5%) na análise de variância. As diferenças entre os níveis de compactação ou entre os níveis de

umidade foram avaliadas pelos modelos de regressão linear ou polinomial de 2ª ordem.

**Tabela 6:** Esquema da análise de variância para as características avaliadas.

<b>Fonte de Variação</b>	<b>GL</b>
Bloco	2
Solo	1
Compactação	3
Manejo da água	3
Solo x Compactação	3
Solo x Manejo da água	3
Compactação x Manejo da água	9
Solo x Manejo da água x Compactação	9
Erro experimental	62
<b>TOTAL</b>	<b>95</b>

O modelo estatístico usado para a análise de variância foi:

$$Y_{ijkl} = \mu + S_i + C_j + M_k + SC_{ij} + SM_{ik} + CM_{jk} + SCM_{ijk} + B_l + e_{ijkl}$$

em que:

$Y_{ijkl}$ : valor observado correspondente ao nível  $i$  do fator solo, com o nível  $j$  do fator compactação, com o nível  $k$  do fator manejo de água, no bloco  $l$ ;

$\mu$ : média do experimento;

$S_i$ : efeito do nível  $i$  do solo, com  $i = 1$  e  $2$ ;

$C_j$ : efeito do nível  $j$  da compactação, com  $j = 1, 2, 3$  e  $4$ ;

$M_k$ : efeito do nível  $k$  do manejo de água, com  $k = 1, 2, 3$  e  $4$

$SC_{ij}$ : efeito da interação solos x compactação;

$SM_{ik}$ : efeito da interação solos x manejo de água;

$CM_{jk}$ : efeito da interação compactação x manejo de água;

$SCM_{ijk}$ : efeito da interação solo x compactação x manejo de água;

$B_l$ : efeito do bloco, com  $l = 1, 2$  e  $3$ ;

$e_{ijkl}$ : erro experimental associado à observação  $Y_{ijkl}$ , considerados independentes e com distribuição normal;

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Análise nutricional das plantas

Na Tabela 7 estão apresentados os valores de F obtidos na análise de variância, bem como a indicação do nível de significância e o coeficiente de variação para os teores foliares de N, P, Mg, K, Ca, S, Mn, Fe, Cu, Zn e Cl. Para as classes de solo, exceção feita ao P, S, Fe e Zn, nos demais nutrientes foi observado efeito significativo ( $P < 0,01$ ). Quanto às interações, efeitos significativos foram observados para o N, na interação solo x umidade, e para o Mn e o Cl, na interação solo x compactação.

**Tabela 7:** Valores de F e significância das diferentes fontes de variação, bem como o coeficiente de variação (CV), para os teores foliares de nitrogênio (N), fósforo (P), magnésio (Mg), potássio (K), cálcio (Ca), enxofre (S), manganês (Mn), ferro (Fe), cobre (Cu), zinco (Zn) e cloro (Cl)

Fonte de variação	N	P	Mg	K	Ca	S	Mn	Fe	Cu	Zn	Cl
Bloco	0,03 <sup>ns</sup>	0,55 <sup>ns</sup>	3,03 <sup>ns</sup>	1,94 <sup>ns</sup>	2,24 <sup>ns</sup>	0,52 <sup>ns</sup>	1,69 <sup>ns</sup>	1,59 <sup>ns</sup>	0,31 <sup>ns</sup>	6,98 <sup>**</sup>	2,98 <sup>ns</sup>
Solo (S)	10,40 <sup>**</sup>	1,87 <sup>ns</sup>	14,00 <sup>**</sup>	4,68 <sup>**</sup>	81,05 <sup>**</sup>	0,15 <sup>ns</sup>	18,99 <sup>**</sup>	0,38 <sup>ns</sup>	53,19 <sup>**</sup>	3,38 <sup>ns</sup>	14,11 <sup>**</sup>
Compactação (C)	0,52 <sup>ns</sup>	2,46 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>	1,70 <sup>ns</sup>	0,35 <sup>ns</sup>	1,47 <sup>ns</sup>	4,18 <sup>*</sup>	1,04 <sup>ns</sup>	1,20 <sup>ns</sup>	1,45 <sup>ns</sup>	2,50 <sup>ns</sup>
Umidade (U)	0,21 <sup>ns</sup>	0,33 <sup>ns</sup>	2,54 <sup>ns</sup>	0,75 <sup>ns</sup>	2,03 <sup>ns</sup>	0,57 <sup>ns</sup>	0,42 <sup>ns</sup>	1,90 <sup>ns</sup>	0,55 <sup>ns</sup>	0,65 <sup>ns</sup>	2,63 <sup>ns</sup>
S x C	0,55 <sup>ns</sup>	1,24 <sup>ns</sup>	0,11 <sup>ns</sup>	1,56 <sup>ns</sup>	1,09 <sup>ns</sup>	2,01 <sup>ns</sup>	2,78 <sup>*</sup>	0,06 <sup>ns</sup>	1,98 <sup>ns</sup>	0,33 <sup>ns</sup>	2,87 <sup>*</sup>
S x U	2,88 <sup>*</sup>	0,14 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>	0,29 <sup>ns</sup>	2,02 <sup>ns</sup>	0,42 <sup>ns</sup>	0,46 <sup>ns</sup>	0,71 <sup>ns</sup>	0,29 <sup>ns</sup>	0,70 <sup>ns</sup>	0,92 <sup>ns</sup>
C x U	0,94 <sup>ns</sup>	0,42 <sup>ns</sup>	0,53 <sup>ns</sup>	0,62 <sup>ns</sup>	0,93 <sup>ns</sup>	1,64 <sup>ns</sup>	0,87 <sup>ns</sup>	0,17 <sup>ns</sup>	1,02 <sup>ns</sup>	0,43 <sup>ns</sup>	1,92 <sup>ns</sup>
S x C x U	1,75 <sup>ns</sup>	1,52 <sup>ns</sup>	0,68 <sup>ns</sup>	0,43 <sup>ns</sup>	0,95 <sup>ns</sup>	1,32 <sup>ns</sup>	0,48 <sup>ns</sup>	1,56 <sup>ns</sup>	0,87 <sup>ns</sup>	0,55 <sup>ns</sup>	1,20 <sup>ns</sup>
CV %	9,47	8,27	13,47	22,55	17,53	17,21	28,00	35,83	16,66	19,01	18,93

Obs: \*: < 0,05; \*\*: < 0,01; ns: não significativo

Na Tabela 8 estão apresentados os teores foliares dos nutrientes para os quais foi observado efeito isolado de solo ou não houve efeito de nenhum fator. Para os nutrientes onde o efeito do solo ocorreu em interação com os fatores compactação ou umidade, os dados são apresentados separadamente (Figuras 6, 7 e 8). De modo geral, no momento da coleta, as plantas apresentaram bom estado nutricional em ambos os solos, estando os teores acima dos níveis críticos recomendados por Sobral (1998). Estes níveis referem-se à folha número 4 da variedade de coqueiro gigante, podendo ser diferenciados para a folha número 2 de coqueiro anão verde. Santos (2002) avaliou, na Região Norte Fluminense, os teores dos nutrientes na folha número 2 de coqueiro anão verde com três anos de idade, encontrando resultados similares para o N, Mg e Ca, inferiores para o P e o K, e superiores para o S. Os teores mais elevados de P e K obtidos no presente trabalho possivelmente tenham sido devidos à adubação com SFS realizada durante a montagem dos vasos e com KCl em cobertura.

O cálcio e o enxofre, por serem nutrientes relativamente pouco móveis na planta, podem ser comparados com os teores determinados nas folhas mais velhas (9 ou 14), usualmente utilizadas na análise foliar de coqueiros em produção. Em relação aos teores considerados adequados por Alves (2003), 1,29 - 1,75 g kg<sup>-1</sup> para o S e 4,51 - 4,76 g kg<sup>-1</sup> para o Ca, na folha número 14 de plantas de coqueiro com elevada produtividade (268 fruto planta<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>), observou-se que para ambos os solos, os valores encontrados no presente trabalho estão dentro, ou acima, destas faixas (Tabela 8), indicando que as plantas estavam bem nutridas com os mesmos. Para o N (Figura 6) e para o P, K, e Mg (Tabela 8), os teores determinados por Alves (2003) na folha 14 são inferiores aos encontrados neste estudo, o que se justifica por serem elementos que sofrem translocação na planta. Portanto, os teores em folhas mais velhas podem sofrer declínio. Para estes nutrientes, valores similares foram encontrados por Teixeira et al. (2003), para a folha número 4 de plantas de coqueiro anão verde com dois anos e quatro meses de idade, nas quais, possivelmente, ainda não houvera grande translocação destes para as folhas mais jovens.

Para os micronutrientes cobre, ferro e zinco (Tabela 8), e manganês e cloro (Figuras 7 e 8), pode-se observar que, para ambos os solos, os teores são considerados adequados para a cultura do coqueiro, estando de acordo com os encontrados por Santos (2002), para folha número 2 de plantas de coqueiro com

3 anos de idade, e com os teores determinados por Teixeira et al. (2003), para folha número 4 de diferentes variedades e híbridos de coqueiro com 2 anos e 4 meses de idade.

Na comparação entre as classes de solo, observa-se, ainda na Tabela 8, que as plantas cultivadas no Cambissolo apresentaram teores de Mg superiores aos das cultivadas no Argissolo. Esta superioridade do Cambissolo em disponibilizar mais Mg para as plantas está associada, possivelmente, à sua melhor fertilidade natural. Em relação ao suprimento de S, a despeito do Cambissolo possuir maior teor de matéria orgânica e, conforme Marschner (1995), do enxofre ter sua disponibilidade diretamente ligada ao teor de carbono do solo, não se verificou diferença entre os solos. Um fato que pode ter contribuído para esta ausência de diferenças no fornecimento de S foi a adubação do Argissolo com SFS, em cuja composição há enxofre.

Para os teores de potássio e cálcio, observou-se que as plantas cultivadas no Argissolo apresentam teores mais elevados em suas folhas. Para o cálcio, esta diferença possivelmente esteja relacionada com a quantidade disponível deste elemento. Para este solo, após o experimento, foram determinados teores de Ca duas a três vezes maiores do que os do Cambissolo. Já para o K, a menor absorção das plantas cultivadas no Cambissolo pode estar relacionada ao tipo de argila presente neste solo. Como o Cambissolo é menos intemperizado, sua expansibilidade indica presença de certa quantidade de argila tipo 2:1, dentre as quais algumas possuem elevado poder de fixação de K. Além disso, este resultado pode também estar relacionado à maior quantidade de KCl aplicado em cobertura no Argissolo. Outro fato que pode ter contribuído para os menores teores foliares de Ca e K no Cambissolo é o fato deste solo ter proporcionado, conforme relatado por Peçanha (2007), maior crescimento das plantas ( $1,8 \text{ kg planta}^{-1}$ ), quando comparado com o Argissolo ( $1,3 \text{ kg planta}^{-1}$ ), resultando, assim, em uma diluição do teor destes elementos nas folhas.

Para o P, a ausência de diferença significativa nos teores foliares possivelmente se deve à adubação com SFS feita no Argissolo durante a montagem dos vasos, elevando-se assim o teor de P e equiparando-o ao verificado no Cambissolo.

Para os micronutrientes apresentados na Tabela 8, observa-se que não houve diferenças entre os solos nos teores foliares de Cu e Zn, mas que as

plantas cultivadas no Cambissolo apresentaram teor de cobre superior ao das plantas do Argissolo. Esta diferença pode estar relacionada ao maior teor de matéria orgânica presente no Cambissolo. Conforme Zanão Junior et al. (2007), o teor de cobre apresenta correlação positiva e altamente significativa com os teores de matéria orgânica presente no solo.

**Tabela 8:** Teores dos nutrientes P, Mg, K, Ca, S, Fe, Cu e Zn determinados na folha número 2 de plantas jovens de coqueiro em função das diferentes classes de solo.

	P	Mg	K	Ca	S	Fe	Cu	Zn
	-----g kg <sup>-1</sup> -----				-----mg kg <sup>-1</sup> -----			
Argissolo	2,04 a	3,15 b	18,85 a	7,15 a	1,37 a	151,11 a	3,20 b	13,91 a
Cambissolo	2,10 a	3,50 a	17,18 b	5,01 b	1,38 a	141,25 a	4,18 a	14,91 a

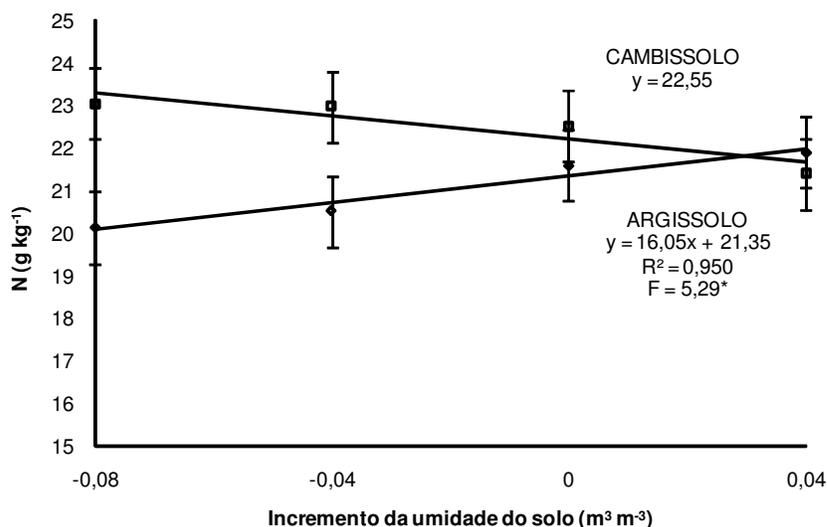
Obs: médias seguidas da mesma letra (na coluna) não diferem estatisticamente pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade.

Na Figura 6 é apresentado o desdobramento da interação solo x umidade para o teor foliar de nitrogênio. Para o Cambissolo não se observou diferença significativa entre os níveis de umidade, sendo os teores observados equiparáveis ao máximo que se verificou no Argissolo. Para o Argissolo, entretanto, o comportamento observado foi de aumento linear no teor de N com o incremento da umidade do solo. Essa disponibilidade de nitrogênio deve estar relacionada às propriedades físicas que determinam a dinâmica da água no solo. No Argissolo, que possui mais macroporos, a redução da condutividade hidráulica com a diminuição da umidade é mais expressiva que a do Cambissolo (Bernardes, 2005), restringindo o transporte de N, por fluxo de massa, até as raízes. Medeiros (2004) encontrou resultados similares para plantas de arroz, cultivadas em um Latossolo submetido a diferentes níveis de compactação e umidade. Quando o cultivo foi em um Neossolo, pelo contrário, o mesmo autor observou uma redução no teor foliar de N com o aumento da umidade, o que pode estar associado à maior lixiviação deste nutriente.

Conforme Rocha et al. (2008), com a redução de água no solo em umidades abaixo da capacidade de campo, a mineralização do nitrogênio diminui devido à redução do teor de água. No entanto, em teores de água acima da capacidade de campo, também ocorre redução devido à baixa concentração de oxigênio, necessário às reações de mineralização. Segundo Strong e Fillery

(2002), a taxa de decomposição por bactérias aeróbias é muito maior do que a de bactérias anaeróbias, uma vez que aquelas são mais eficientes energeticamente.

A comparação entre solos, ainda na Figura 6, revela que, nas menores umidades (níveis 3 e 4), os teores foliares de N nas plantas do Argissolo foram inferiores aos das do Cambissolo, mas isso não ocorreu nas maiores umidades (níveis 1 e 2). Esta diferença possivelmente seja devida ao teor mais elevado de matéria orgânica no Cambissolo, pois conforme Siqueira e Moreira (2001), solos mais ricos em carbono possuem maior quantidade disponível de N para as plantas. Além disso, segundo Kondo e Dias Júnior (1999), Dias Junior (2000) e Silva et al. (2002), solos que apresentam teor mais elevado de matéria orgânica possuem maior capacidade de reter água. Como a mobilidade do nitrogênio no solo ocorre preferencialmente por fluxo de massa, a característica do Cambissolo manter maior conteúdo de água na faixa em que esta é disponível (Souza, 2004) foi, certamente, fator decisivo para a maior transpiração das plantas (Peçanha, 2007), resultando assim em uma maior absorção deste elemento.



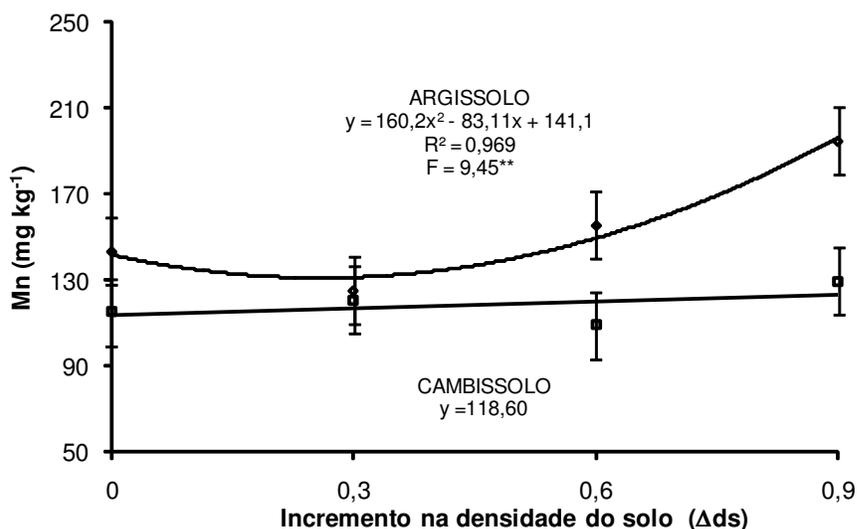
**Figura 6:** Teor de N na folha número 2 de plantas de coqueiro anão verde cultivadas no Cambissolo e no Argissolo em função do incremento da umidade do solo. Obs: Barras verticais representam o desvio mínimo significativo pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Também para o presente experimento, comportamento semelhante a este foi determinado por Peçanha (2007) para o valor de clorofila, sendo este mais elevado para o Cambissolo nos níveis 3 e 4 de umidade (redução de 0,04 e

0,08 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>), enquanto que para os níveis de umidade mais elevados, não houve diferença entre os solos.

Para Novais e Smyth (1999), um maior conteúdo de água no solo, além de proporcionar maior disponibilidade de água às plantas, faz com que o filme de água que recobre as partículas fique mais espesso e, conseqüentemente, diminua a interação íon-colóide e aumente a quantidade de nutrientes na solução do solo, facilitando, assim, que os mesmos sejam absorvidos pelo sistema radicular.

O efeito da interação solo x compactação para o manganês está apresentado na Figura 7. A comparação entre os solos revela que os teores foliares de Mn nas plantas do Argissolo não diferiram dos do Cambissolo nas menores densidades, mas foram superiores nos maiores níveis de compactação. Enquanto nas plantas cultivadas no Cambissolo não houve diferença significativa no teor deste elemento em função das densidades utilizadas, para o Argissolo observou-se efeito quadrático altamente significativo, sendo determinados teores médios de manganês de 143; 124; 154 e 194 mg kg<sup>-1</sup>, para as plantas cultivadas nos vasos onde foi realizada a compactação adicional de, respectivamente, 0, 0,3, 0,6 e 0,9 da  $\Delta ds$  do solo.



**Figura 7:** Teor de manganês na folha número 2 de plantas de coqueiro anão verde cultivadas no Cambissolo e no Argissolo em função do incremento da densidade do solo. Obs: Barras verticais representam o desvio mínimo significativo pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

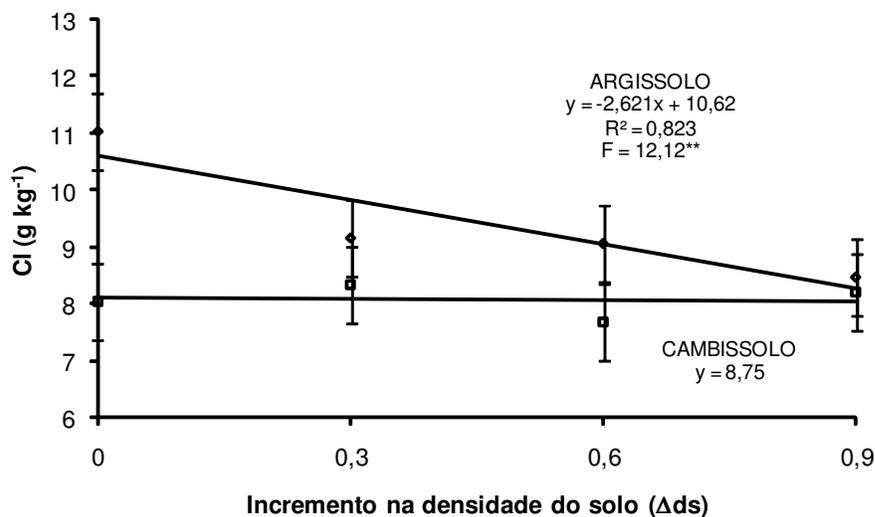
A maior absorção de manganês pelas plantas cultivadas no Argissolo quando submetido aos níveis mais elevados de compactação, pode estar associada à maior oscilação da temperatura e da umidade deste solo. Como níveis de compactação excessivos geralmente reduzem a porosidade total do solo (Alvarenga et al., 1996; Medeiros, 2004), isso resulta em menor quantidade de água retida, que, associada ao baixo teor de matéria orgânica e à baixa estabilidade dos agregados do Argissolo, faz com que o mesmo se aqueça mais facilmente. Segundo Borkert et al. (2001), alterações bruscas da temperatura e da umidade do solo favorecem a disponibilidade de manganês.

Além disso, a reduzida porosidade de aeração nos níveis mais elevados de compactação possivelmente resultou em menor atividade biológica no Argissolo, o que também contribuiu para um maior suprimento de manganês para as plantas. Conforme Miyazawa et al. (1993), o aumento da atividade biológica do solo favorece a formação de Mn-complexo orgânico, diminuindo assim a disponibilidade deste elemento para as plantas. Para Pavan e Miyazawa (1984), fatores como teor de matéria orgânica, luz solar, temperatura e umidade do solo, influenciam de forma expressiva o teor de manganês no solo. Conforme estes pesquisadores, solos expostos à luz solar, a elevadas temperaturas, ou que sofrem maior alternância de umedecimento e secagem (fatores que reduzem a atividade biológica) apresentam teores mais elevados de manganês. Outro aspecto a considerar é que a maior compactação do solo também aumenta a disponibilidade de Mn, por diminuir a oxigenação e favorecer a redução de  $MnO_2$  para MnO, que é a forma absorvida pelas plantas.

A ausência do efeito da compactação no teor de manganês nas plantas cultivadas no Cambissolo possivelmente se deve aos atributos químicos e físicos deste solo. Isso porque este possui teor mais elevado de matéria orgânica mais elevado e agregados mais estáveis e, por isso, torna-se menos sensível aos níveis de compactação utilizados, bem como às oscilações de temperatura e umidade.

Na Figura 8 está apresentado o comportamento do teor de cloro nas plantas cultivadas no Argissolo e no Cambissolo em função do incremento da densidade do solo. Quanto à diferença entre solos, observa-se que as plantas cultivadas no Argissolo apresentaram teor foliar de cloro mais elevado que o do Cambissolo apenas na ausência de compactação, não havendo diferença quando

ambos os solos sofrem compactação adicional. Quanto ao comportamento em função dos níveis de compactação, enquanto para o Cambissolo, não houve diferença significativa, determinando-se teor foliar médio de  $8,75 \text{ g kg}^{-1}$ , para o Argissolo, entretanto, houve redução linear no teor de Cl com o aumento da compactação.



**Figura 8:** Teor de cloro na folha número 2 de plantas de coqueiro anão verde cultivadas no Cambissolo e no Argissolo em função do incremento da densidade do solo. Obs: Barras verticais representam o desvio mínimo significativo pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Como a mobilidade do cloro no solo se dá predominantemente por fluxo de massa (Marschner, 1995), provavelmente nos níveis elevados de compactação, a menor absorção de água pelas plantas (devido à restrição ao desenvolvimento radicular), associada ao tamanho reduzido dos microporos, proporcionou uma menor absorção deste elemento pelas plantas no Argissolo. Para o Cambissolo, por ser um solo com maior teor de matéria orgânica e agregados mais estáveis, este efeito da compactação para o teor de cloro nas plantas praticamente não existiu.

Diferenças no desenvolvimento radicular das plantas em função da compactação podem justificar este comportamento. Enquanto nas maiores densidades ocorrem restrições a esse desenvolvimento, nas menores densidades essas não ocorrem, permitindo uma melhor exploração do solo e, conseqüentemente, maior absorção de água pelas plantas. Como a mobilidade do cloro no solo se dá predominantemente por fluxo de massa (Marschner, 1995),

resulta em um teor de cloro mais elevado em suas folhas. Como estas restrições parecem ser mais intensas no Argissolo que no Cambissolo (ver, na Figura 3, os valores de resistência à penetração), justifica-se a diferença de comportamento entre os dois solos.

## 4.2 Atributos químicos do solo

Na Tabela 9 estão apresentados os valores de F, coeficiente de variação, bem como o nível de significância, obtidos na análise de variância para o pH e os teores de magnésio, cálcio, potássio,  $Al^{3+}$ , H+Al, sódio, carbono e fósforo, nas três profundidades estudadas.

**Tabela 9:** Valores de F e nível de significância para as diversas fontes de variação, bem como o coeficiente de variação (CV), para os atributos químicos do solo (pH, teor de Mg, K, Ca, Al, H+Al, Na, C e P) após a coleta do experimento, nas camadas de 0,0 - 0,10 m, 0,10 - 0,20 m e 0,20 - 0,30 m de profundidade.

Fonte de variação	pH	Mg	K	Ca	Al	H+Al	Na	C	P
<b>Profundidade: 0,0 - 0,10 m</b>									
Bloco	0,08 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>	5,44**	2,45 <sup>ns</sup>	3,17*	0,57 <sup>ns</sup>	6,81**	1,13 <sup>ns</sup>	0,83 <sup>ns</sup>
Solo (S)	36,81**	25,85**	5,96*	33,79**	56,67**	143,9**	7,88**	3330,7**	346,36**
Compactação (C)	3,84*	0,56 <sup>ns</sup>	1,08 <sup>ns</sup>	0,52 <sup>ns</sup>	0,99 <sup>ns</sup>	1,76 <sup>ns</sup>	0,61 <sup>ns</sup>	3,69*	1,36 <sup>ns</sup>
Umidade (U)	2,29 <sup>ns</sup>	1,27 <sup>ns</sup>	1,20 <sup>ns</sup>	1,44 <sup>ns</sup>	5,25**	2,74*	0,33 <sup>ns</sup>	1,02 <sup>ns</sup>	0,88 <sup>ns</sup>
S x C	0,12 <sup>ns</sup>	0,15 <sup>ns</sup>	0,19 <sup>ns</sup>	0,66 <sup>ns</sup>	0,85 <sup>ns</sup>	1,37 <sup>ns</sup>	0,49 <sup>ns</sup>	0,82 <sup>ns</sup>	0,85 <sup>ns</sup>
S x U	1,14 <sup>ns</sup>	1,39 <sup>ns</sup>	1,18 <sup>ns</sup>	0,45 <sup>ns</sup>	4,40**	1,89 <sup>ns</sup>	1,73 <sup>ns</sup>	0,84 <sup>ns</sup>	0,99 <sup>ns</sup>
C x U	0,52 <sup>ns</sup>	1,05 <sup>ns</sup>	0,70 <sup>ns</sup>	0,77 <sup>ns</sup>	0,68	0,85 <sup>ns</sup>	0,65 <sup>ns</sup>	0,59 <sup>ns</sup>	1,22 <sup>ns</sup>
S x C x U	1,02 <sup>ns</sup>	1,19 <sup>ns</sup>	0,77 <sup>ns</sup>	0,80 <sup>ns</sup>	0,79	1,20 <sup>ns</sup>	0,69 <sup>ns</sup>	0,75 <sup>ns</sup>	0,73 <sup>ns</sup>
CV %	9,05	112,5	56,35	52,31	65,22	18,45	75,04	5,84	21,85
<b>Profundidade: 0,10 - 0,20 m</b>									
Bloco	1,81 <sup>ns</sup>	0,53 <sup>ns</sup>	0,71 <sup>ns</sup>	0,45 <sup>ns</sup>	1,65 <sup>ns</sup>	2,06 <sup>ns</sup>	2,46 <sup>ns</sup>	1,08 <sup>ns</sup>	3,36*
Solo (S)	2,38 <sup>ns</sup>	16,96**	0,10 <sup>ns</sup>	45,45**	60,55**	291,7**	16,4**	2563,8**	292,53**
Compactação (C)	0,78 <sup>ns</sup>	0,94 <sup>ns</sup>	0,58 <sup>ns</sup>	1,16 <sup>ns</sup>	1,64 <sup>ns</sup>	1,51 <sup>ns</sup>	2,44 <sup>ns</sup>	1,64 <sup>ns</sup>	5,53*
Umidade (U)	2,03 <sup>ns</sup>	1,43 <sup>ns</sup>	1,36 <sup>ns</sup>	1,53 <sup>ns</sup>	1,13 <sup>ns</sup>	1,76 <sup>ns</sup>	1,43 <sup>ns</sup>	0,58 <sup>ns</sup>	1,11 <sup>ns</sup>
S x C	1,13 <sup>ns</sup>	1,85 <sup>ns</sup>	0,25 <sup>ns</sup>	1,45 <sup>ns</sup>	2,00 <sup>ns</sup>	1,16 <sup>ns</sup>	2,69 <sup>ns</sup>	0,62 <sup>ns</sup>	1,78 <sup>ns</sup>
S x U	0,69 <sup>ns</sup>	1,30 <sup>ns</sup>	0,39 <sup>ns</sup>	1,09 <sup>ns</sup>	1,10 <sup>ns</sup>	1,05 <sup>ns</sup>	2,67 <sup>ns</sup>	0,21 <sup>ns</sup>	1,16 <sup>ns</sup>
C x U	0,66 <sup>ns</sup>	0,80 <sup>ns</sup>	0,55 <sup>ns</sup>	0,52 <sup>ns</sup>	0,54 <sup>ns</sup>	1,41 <sup>ns</sup>	1,25 <sup>ns</sup>	0,44 <sup>ns</sup>	1,53 <sup>ns</sup>
S x C x U	0,39 <sup>ns</sup>	0,59 <sup>ns</sup>	1,40 <sup>ns</sup>	0,55 <sup>ns</sup>	0,17 <sup>ns</sup>	0,31 <sup>ns</sup>	0,81 <sup>ns</sup>	0,27 <sup>ns</sup>	0,34 <sup>ns</sup>
CV %	6,40	76,13	29,72	63,64	38,28	10,74	23,21	7,49	16,39
<b>Profundidade: 0,20 - 0,30 m</b>									
Bloco	5,50**	2,01 <sup>ns</sup>	0,49 <sup>ns</sup>	2,64 <sup>ns</sup>	4,58*	5,44**	0,54 <sup>ns</sup>	0,30 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>
Solo (S)	2,58 <sup>ns</sup>	38,88**	10,19**	97,45**	44,38**	35,30**	6,74*	3652,6**	281,34**
Compactação (C)	3,54*	1,46 <sup>ns</sup>	2,84*	1,18 <sup>ns</sup>	1,89 <sup>ns</sup>	0,64 <sup>ns</sup>	4,85**	0,55 <sup>ns</sup>	1,33 <sup>ns</sup>
Umidade (U)	3,02*	1,94 <sup>ns</sup>	0,29 <sup>ns</sup>	0,94 <sup>ns</sup>	2,85*	0,13 <sup>ns</sup>	2,93*	2,32 <sup>ns</sup>	1,44 <sup>ns</sup>
S x C	1,04 <sup>ns</sup>	2,95*	0,70 <sup>ns</sup>	0,83 <sup>ns</sup>	1,25 <sup>ns</sup>	0,58 <sup>ns</sup>	1,11 <sup>ns</sup>	2,60 <sup>ns</sup>	0,65 <sup>ns</sup>
S x U	1,24 <sup>ns</sup>	1,30 <sup>ns</sup>	0,15 <sup>ns</sup>	2,04 <sup>ns</sup>	1,81 <sup>ns</sup>	1,01 <sup>ns</sup>	0,64 <sup>ns</sup>	7,00*	0,43 <sup>ns</sup>
C x U	0,33 <sup>ns</sup>	0,90 <sup>ns</sup>	0,97 <sup>ns</sup>	0,87 <sup>ns</sup>	0,30 <sup>ns</sup>	1,64 <sup>ns</sup>	0,84 <sup>ns</sup>	1,07 <sup>ns</sup>	0,94 <sup>ns</sup>
S x C x U	0,79 <sup>ns</sup>	1,47 <sup>ns</sup>	1,76 <sup>ns</sup>	1,66 <sup>ns</sup>	0,34 <sup>ns</sup>	1,02 <sup>ns</sup>	1,74 <sup>ns</sup>	1,07 <sup>ns</sup>	1,12 <sup>ns</sup>
CV %	5,76	33,08	51,87	35,27	45,16	37,37	54,02	6,64	25,16

Obs: \*: < 0,05; \*\*: < 0,01; ns: não significativo

Na camada superficial (0,0 - 0,10 m), para as classes de solo, foi observado efeito significativo ( $P < 0,05$ ) para o teor de potássio e altamente significativo ( $P < 0,01$ ) para as demais variáveis avaliadas. Para os níveis de compactação, observou-se efeito significativo apenas para o pH e o carbono. Já para o fator umidade do solo, foi observado efeito altamente significativo para o Al, e significativo para o H+Al. Em relação às interações, nesta camada, apenas observou-se efeito significativo para o Al na interação solo x umidade.

Para a camada 0,10 - 0,20 m de profundidade, exceção feita ao pH e ao K, nas demais variáveis observou-se efeito altamente significativo para as classes de solos. Nesta profundidade, para as outras fontes de variação (compactação, umidade e interações) apenas foi observado efeito significativo para o fósforo em função dos diferentes níveis de compactação.

Para solo, na camada de 0,20 - 0,30 m de profundidade, observou-se efeito significativo para o Na, e altamente significativo para o Mg, K, Ca, Al, H+Al, C e P. Nesta camada, também houve efeito de compactação para o pH e K ( $P < 0,05$ ) e para o Na ( $P < 0,01$ ). Quanto às interações, efeito significativo foi observado para o Mg, na interação solo x compactação, e para o C, na interação solo x umidade.

Os valores médios dos atributos químicos nas diferentes classes de solo após a coleta do experimento, nas três profundidades estudadas, estão apresentados na Tabela 10. Para o pH, pode-se observar que de 0,0 - 0,10 m de profundidade, o Argissolo (PAdx) apresentou valor superior quando comparado ao do Cambissolo (CXbd). Tal diferença, possivelmente, está relacionada ao maior teor de matéria orgânica presente no Cambissolo. Segundo Ciotta et al. (2002), solos com maior teor de carbono, devido maior mineralização da matéria orgânica geralmente apresentam maior quantidade de ácidos orgânicos e íons  $H^+$  na solução, o que reduz o seu pH, como freqüentemente é relatado na camada superficial de solos cultivados sob plantio direto. Além disso, no presente estudo, outro fato que possibilitou este menor valor de pH para o Cambissolo, é o teor mais elevado de alumínio e H+Al existente no mesmo. Nas camadas mais profundas (0,10 - 0,20 m e 0,20 - 0,30 m), as quais sofreram compactação e permaneceram mais úmidas ao longo do tempo, não houve diferença nonível de pH.

Em relação aos teores de Ca, Na e P, na Tabela 10, observam-se que, nas três profundidades, estes foram mais elevados no Argissolo. O teor mais elevado de cálcio e fósforo no PAdx está relacionado, certamente, à aplicação de SFS neste solo durante a montagem dos vasos, em cuja composição estão presentes, aproximadamente, 41% de  $P_2O_5$  e 14% de Ca.

Para o potássio, na camada de 0,0 - 0,10 m de profundidade, o teor foi superior no Argissolo. Este resultado, possivelmente, está relacionado à maior quantidade de KCl aplicado em cobertura nas plantas cultivadas neste solo. Além disso, outro fato que pode ter também contribuído para isso é a composição mineralógica do CXbd, que, por possuir argila de maior atividade, pode ter fixado certa quantidade deste elemento. Já para a camada de 0,20 - 0,30 m, o comportamento é oposto, sendo observado teor mais elevado para o Cambissolo. Este resultado, possivelmente, se deve ao teor inicial mais elevado de K presente no CXbd (Tabela 1).

**Tabela 10:** Valores médios de pH e dos teores de Mg, K, Ca, Al, H+Al, Na, C e P, após a coleta do experimento para o Argissolo (PAdx) e o Cambissolo (CXbd), nas profundidades de 0,0 - 0,10 m; 0,10 - 0,20 m e 0,20 - 0,30 m.

	pH	Mg	K	Ca	Al	H + Al	Na	C	P
Solo	água	-----mmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> -----					(g kg <sup>-1</sup> )	(mg kg <sup>-1</sup> )	
<b>Profundidade 0,0 - 0,10 m</b>									
<b>PAdx</b>	4,83 a	4,6 b	23,0 a	37,4 a	2,3	24,5 b	2,8 a	9,6 b	49,86 a
<b>CXbd</b>	4,32 b	17,6 a	17,3 b	19,7 b	7,0	38,8 a	1,8 b	19,7 a	20,61 b
<b>Profundidade 0,10 - 0,20 m</b>									
<b>PAdx</b>	4,42 a	4,5 b	4,1 a	36,2 a	3,8 b	30,8 b	2,1 a	9,0 b	43,02 a
<b>CXbd</b>	4,33 a	8,8 a	4,0 a	14,2 b	7,1 a	45,0 a	1,7 b	20,3 a	23,88 b
<b>Profundidade 0,20 - 0,30 m</b>									
<b>PAdx</b>	4,73 a	7,3	2,0 b	43,5 a	2,8 b	15,5 b	1,1 a	8,2	69,89 a
<b>CXbd</b>	4,64 a	11,2	2,9 a	20,7 b	5,2 a	24,6 a	0,8 b	19,4	27,81 b

**Obs:** valores seguidos da mesma letra em cada coluna, dentro de cada profundidade, não apresentam diferença significativa pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade.

No Cambissolo, o teor de H + Al nas três profundidades foi superior ao do Argissolo, e o teor de Al foi superior nas camadas 0,10 - 0,20 m e 0,20 - 0,30 m. Para a camada de 0,0 - 0,10 m, houve efeito da interação solo x umidade no teor de Al, de modo que, para esta profundidade, tal variável será discutida separadamente. Para o H + Al, os teores mais elevados do Cambissolo podem estar relacionados ao teor mais expressivo de matéria orgânica, que, segundo Almeida et al. (2005), contribui para o aumento de H<sup>+</sup> do solo. Já para o Al, este

resultado possivelmente se deve ao teor mais elevado deste elemento no Cambissolo, e também, à quantidade mais expressiva de íons  $H^+$  na solução do solo.

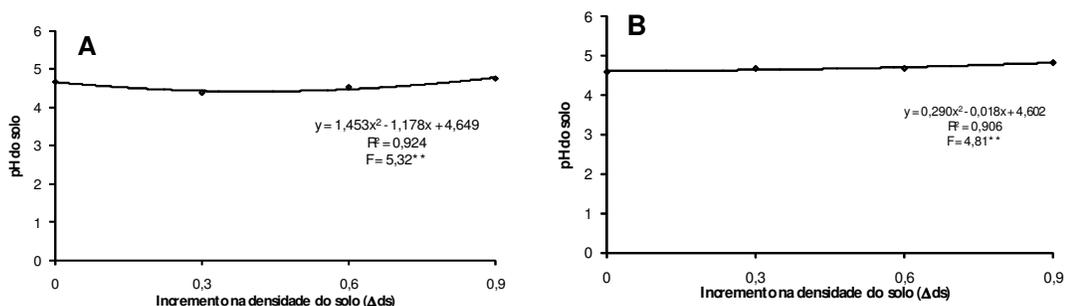
Quanto ao teor de carbono, o Cambissolo foi superior ao Argissolo nas profundidades de 0,0 - 0,10 m e 0,10 - 0,20 m. Este teor mais elevado, provavelmente, se deve à menor profundidade de coleta do material para o enchimento dos vasos, sendo coletado no CXbd apenas até 0,30 m, enquanto para o PAdx esta profundidade foi de 1,2 m, ocasionando, assim, maior diluição do horizonte superficial.

Quando se compara o teor de sódio, após a coleta do experimento, com o determinado no material utilizado na confecção dos vasos (Tabela 1), observa-se que houve incremento em ambos os solos, sendo este mais expressivo no Argissolo. Este aumento possivelmente está relacionado ao fornecimento de fertilizantes, ou à própria água utilizada na irrigação, os quais podem estar contaminados com este elemento. Como os vasos eram vedados no fundo, não foi possível sua lixiviação durante a irrigação das plantas, ocorrendo maior concentração nas camadas superficiais (0,0 - 0,10 m e 0,10 - 0,20 m de profundidade) devido à evaporação da água aplicada nos vasos.

A Figura 9 representa o efeito que o incremento da compactação ocasionou no pH do solo nas profundidades de 0,0 - 0,10 m (Figura 9A) e 0,20 - 0,30 m (Figura 9B). Para a camada de 0,0 - 0,10 m, pode-se observar que ocorre uma redução no valor do pH com certo incremento da densidade do solo, sendo o menor valor (4,43), determinado com o incremento de 0,5 da  $\Delta ds$  do solo. Para níveis mais elevados de compactação, os valores de pH sofrem incremento, determinando-se valor médio de 4,75, com compactação adicional de 0,9 da  $\Delta ds$  do solo. Para essa profundidade, a despeito de não ter sido realizada a compactação adicional, o resultado, possivelmente, está relacionado à atividade e ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas. (estimulado pela irrigação em superfície e pela adubação nitrogenada e potássica em cobertura), o que resultou em maior extrusão de prótons para a solução do solo, reduzindo assim o pH do solo. O maior crescimento das plantas com incrementos próximos a 0,30 da  $\Delta ds$  do solo, determinado por Peçanha (2007) neste mesmo experimento, contribuiu para explicar essa redução do pH do solo, pois, como as plantas apresentaram maior desenvolvimento, possivelmente houve maior extração de

nutrientes do solo, resultando assim em alterações mais expressivas em seus atributos químicos.

Na profundidade de 0,20 - 0,30 m, a despeito de ser significativo o efeito da compactação no pH do solo, a variação do valor entre o menor e o maior nível de compactação foi de apenas 0,24 unidades de pH, sendo de pouca importância para o desenvolvimento das plantas. Para esta profundidade, o menor valor foi determinado quando não foi realizada compactação adicional do solo. Este fato, similar ao ocorrido na profundidade de 0,0 - 0,10 m, deve-se, também provavelmente, ao desenvolvimento mais expressivo do sistema radicular das plantas. A baixa capacidade de retenção de água do solo, associada ao fato dos vasos serem vedados no fundo, pode ter possibilitado maior umidade nesta camada, estimulando maior desenvolvimento das raízes, quando comparado aos níveis mais elevados de compactação, resultando em alteração mais expressiva no valor de pH.

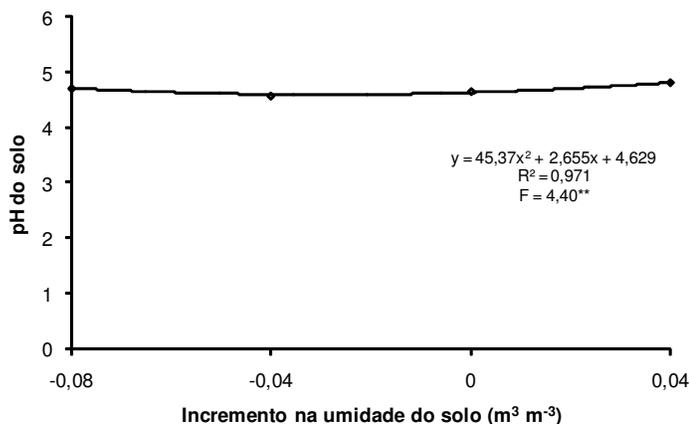


**Figura 9:** Efeito do incremento na densidade do solo no valor de pH após a coleta do experimento nas profundidades de 0,0 - 0,10 m (A) e 0,20 - 0,30 m (B).

Com o incremento da densidade do solo, aumenta-se a capacidade de retenção de água (Medeiros, 2004) e também a resistência à penetração (Tormena et al., 1998; Imhoff et al., 2000; Beutler e Centurion, 2003), dificultando, ou mesmo impossibilitado, que as raízes alcançassem esta camada nos níveis mais elevados de compactação. Este fato, de modo geral, além de reduzir a atividade biológica do solo, ocasiona menor absorção de nutrientes pelas plantas, tendo, como consequência, menor alteração dos seus atributos químicos.

Na Figura 10 é apresentado o efeito da umidade do solo sobre o pH na profundidade de 0,20 - 0,30 m. Pode-se observar que, com o incremento da umidade, ocorre redução do pH do solo até o valor estimado de  $-0,03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ,

voltando o mesmo a aumentar nos níveis mais elevados. Esta alteração, possivelmente, seja devida à exploração do solo pelo sistema radicular, às reações internas do solo e à maior atividade biológica, fatores mais acentuados quando o solo se encontra próximo à capacidade de campo. Conforme Marschner (1995), solos com adequado teor de umidade e boa aeração possibilitam que as plantas absorvam maior quantidade de nutrientes, alterando, assim, de forma mais expressiva, o seu pH. Outro fator que, possivelmente, tenha contribuído para esta redução do pH nos níveis intermediários de umidade é a maior mineralização da matéria orgânica do solo, que, ao ser decomposta pela microbiota, leva à formação de  $\text{CO}_2$ , o qual, ao reagir com água, libera íons de  $\text{H}^+$  para a solução do solo (Siqueira e Moreira, 2001).

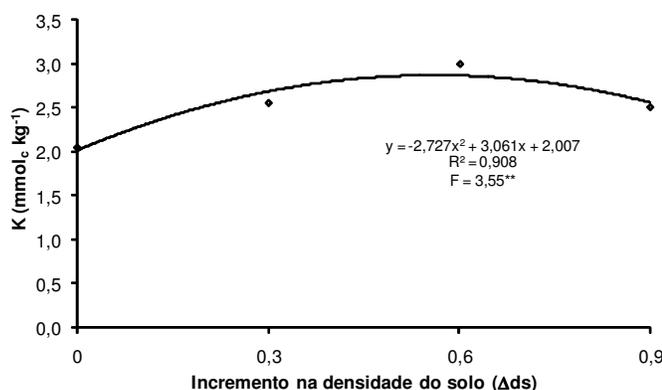


**Figura 10:** Efeito do incremento na umidade do solo no valor de pH após a coleta do experimento na profundidade de 0,20 - 0,30 m.

Além disso, para o pH do solo, os resultados do presente trabalho podem também estar relacionados ao fornecimento de N em cobertura, pois há liberação de íons de  $\text{H}^+$  como subproduto da conversão bacteriana do nitrogênio amoniacal em nitrogênio nítrico, no processo de nitrificação pelas bactérias *Nitrossomonas* e *Nitrobacter*, sendo estes microrganismos mais ativos nos níveis intermediários de compactação e umidade do solo (Rocha et al., 2008).

Para o potássio, na profundidade de 0,20 - 0,30 m, o modelo de regressão quadrático foi o que proporcionou melhor ajuste, sendo estimado teor mais elevado de K ( $3,03 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) com o incremento de 0,6 da  $\Delta\text{ds}$ . Como o potássio é um elemento facilmente lixiviado (Malavolta, 1997), esta maior disponibilidade nos níveis intermediários de compactação do solo pode estar

relacionada à redução do diâmetro dos poros, proporcionando assim um melhor contato deste elemento com os colóides, o que facilita sua retenção quando o solo se encontra com certo nível de compactação. Para o incremento de 0,9 da  $\Delta ds$  do solo, o tamanho reduzido e a tortuosidade dos poros, nestas condições, podem não permitir que o potássio lixiviado das camadas superiores (0,0 - 0,10 e 0,10 - 0,20 m) chegue até a profundidade de 0,20 - 0,30 m. Já para baixas densidades, próximo ao nível 1 de compactação, o maior desenvolvimento das raízes nesta profundidade pode ter proporcionado maior absorção deste elemento.



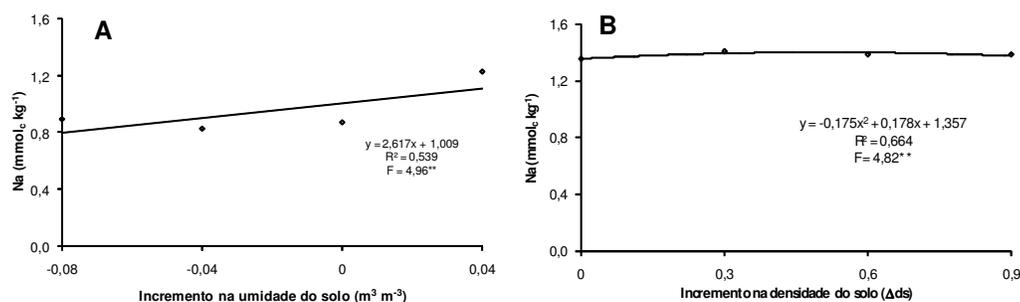
**Figura 11:** Efeito do incremento na densidade do solo no teor de potássio após a coleta do experimento na profundidade de 0,20 - 0,30 m.

Para o teor de sódio na profundidade 0,20 - 0,30 m, efeito significativo foi observado para umidade (Figura 12A), bem como para compactação (Figura 12B). Nesta profundidade, ao se aumentar a umidade do solo, ocorre um incremento linear no teor de sódio (Figura 12A). Este incremento de Na com a maior disponibilidade de água, provavelmente seja devido à presença de sódio na água utilizada para irrigação.

Quanto ao efeito da compactação (Figura 12B), o modelo polinomial de segunda ordem foi o que proporcionou melhor ajuste, sendo estimado teor máximo de  $1,4 \text{ mmol}_c \text{kg}^{-1}$  de sódio com o incremento de 0,5 da  $\Delta ds$  do solo. Como com o incremento da compactação ocorre a redução do diâmetro dos poros, este teor mais elevado de sódio com incremento de 0,5 na  $\Delta ds$  do solo, pode estar associado à maior capacidade do solo reter cátions nestas condições, e também, pelo fato deste elemento atuar como dispersante dos agregados,

reduzindo a macroporosidade total devido ao entupimento dos poros, contribuindo, assim, para este resultado.

Segundo Silva et al. (1986) e Alvarenga et al. (1996), a compactação adicional do solo (até certo nível), aumenta sua quantidade de microporos e reduz a de macroporos, resultando em maior retenção de água. Esta redução no diâmetro dos poros induz que a mobilidade dos íons ocorra mais próxima dos colóides ativos do solo, facilitando a retenção dos mesmos.



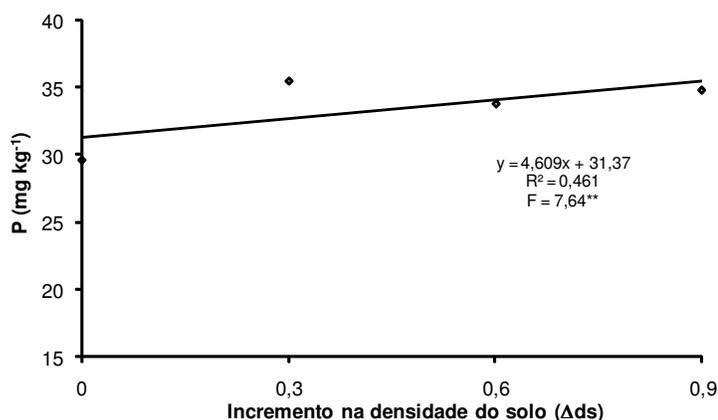
**Figura 12:** Teor de sódio na profundidade de 0,20 - 0,30 m em função do incremento na umidade (A) e na densidade do solo (B).

Para o fósforo, a despeito deste elemento apresentar forte interação com as partículas do solo (Novais e Smyth, 1999), observa-se que na camada intermediária (0,10 - 0,20 m de profundidade), ocorrem um incrementos no teor de P com a compactação do solo (Figura 13). Este resultado pode estar relacionado ao menor desenvolvimento do sistema radicular das plantas e à conseqüente menor exploração do solo, já que, com o aumento compactação do solo, ocorre uma maior resistência à penetração (Tormena et al., 1998; Imhoff et al., 2000; Beutler e Centurion, 2003; Beutler et al., 2007), dificultando o desenvolvimento do sistema radicular das plantas e também a absorção de água e nutrientes, em particular do P.

A difusão é o principal mecanismo de transporte do fósforo no solo, sendo influenciada por vários fatores, tais como as interações com colóides da fração argila, o conteúdo volumétrico de água e a distância a ser percorrida até as raízes (Novais e Smyth, 1999). Como, nos níveis mais elevados de compactação, ocorre redução da porosidade total, resultando em um menor conteúdo de água armazenada no solo, menor diâmetro e maior tortuosidade dos poros existentes,

possivelmente as plantas absorveram menos P, resultando, assim, em um teor mais elevado desse nutriente no solo.

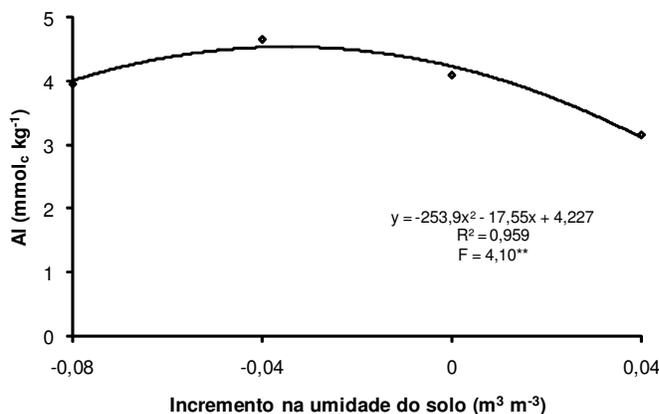
Para um adequado crescimento, as plantas necessitam de uma ampla área de contato raízes/solo, assegurando a obtenção de água e nutrientes e um espaço poroso suficiente para que ocorram as trocas gasosas. A compactação, por ocasionar modificações na estrutura do solo, resulta em sérias limitações para o desenvolvimento das plantas. Estas limitações são oriundas do aumento da densidade do solo, da resistência à penetração, da diminuição da porosidade total e, principalmente, da macroporosidade e da continuidade dos poros (Silva et al., 1986).



**Figura 13:** Teor de fósforo na profundidade 0,10 - 0,20 m em função do incremento na densidade do solo.

Na Figura 14 está sendo mostrado o efeito da umidade do solo no teor de alumínio na profundidade de 0,20 - 0,30 m. Nesta profundidade, pode-se observar que a tendência é de um incremento de Al nos níveis intermediários de umidade.

Nesta camada, para esta mesma faixa de umidade, verificaram-se os menores valores de pH. Como o teor de Al está diretamente ligado ao pH do solo, possivelmente este fato tenha proporcionado condições mais favoráveis para este elemento voltar para a solução do solo.



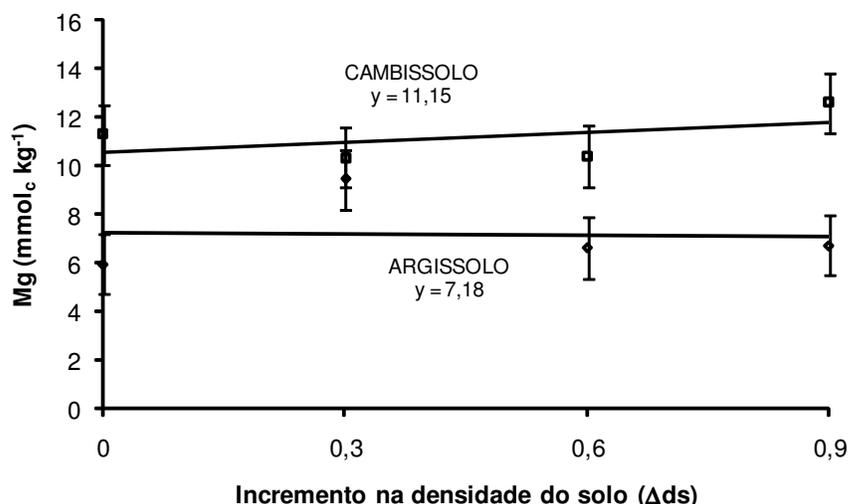
**Figura 14:** Efeito do incremento na umidade do solo no teor de alumínio na camada de 0,20 - 0,30 m de profundidade.

Para o magnésio na profundidade de 0,20 - 0,30 m, a despeito de ser observado efeito significativo na interação solo x compactação, os modelos linear (para o Cambissolo) e polinomial de segunda ordem (para o Argissolo) não foram significativos (Figura 15). Em relação ao teor de magnésio, para o Cambissolo não houve alteração na disponibilidade deste elemento com o incremento na densidade do solo. Já para o Argissolo, foi observado um incremento no teor de Mg até a compactação adicional de 0,4 da  $\Delta ds$  do solo, voltando a reduzir com incrementos maiores. Conforme Dias Junior (2000) e Medeiros et al. (2005); devido à redução no tamanho dos macroporos, uma leve compactação do solo possibilita uma maior retenção de água sem prejudicar as trocas gasosas. Este fato pode ter contribuído para maior reatividade do calcário, liberando, assim, maior quantidade de Mg para a solução do solo.

No Cambissolo, a ausência de efeito dos níveis de compactação pode estar relacionada aos atributos químicos e físicos deste solo, tais como o maior conteúdo de matéria orgânica, maiores agregação e estabilidade dos agregados, maiores expansibilidade e atividade da fração argila, entre outros. Estes fatores, conjuntamente, minimizaram os efeitos danosos da compactação.

Quanto à diferença entre solos, exceção feita ao incremento de 0,3 da  $\Delta ds$  do solo, para os demais níveis de compactação, o Cambissolo apresentou teor de Mg superior ao do Argissolo. A despeito de ter sido efetuada a aplicação de calcário dolomítico em ambas as classe de solo, esta superioridade do CXbd para o teor de magnésio pode estar relacionada à sua melhor fertilidade natural (Tabela 1). Outro fato que pode ter contribuído para este resultado, é que, ao se

coletar o material do CXbd em área cultivada, o solo poderia já ter recebido algum tipo corretivo.

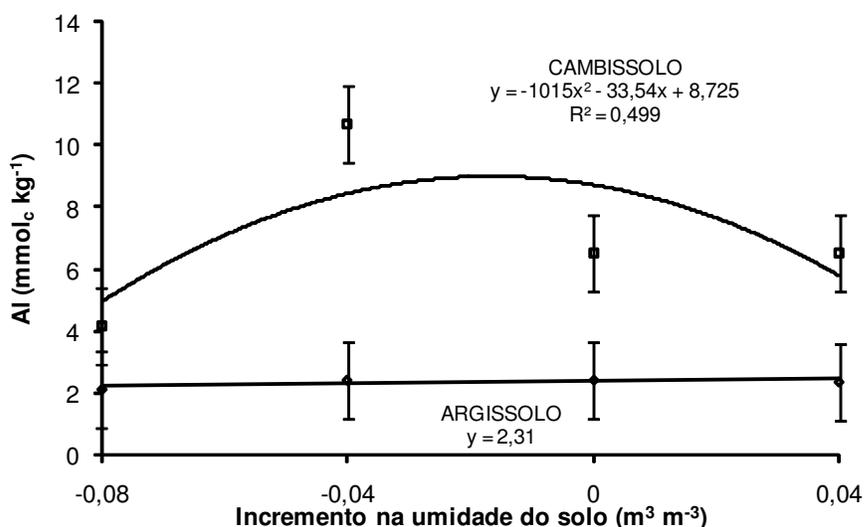


**Figura 15:** Teor de magnésio em função do incremento na densidade do solo na profundidade de 0,20 - 0,30 m para o Cambissolo e para o Argissolo. Obs: Barras verticais representam o desvio mínimo significativo pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na Figura 16, é apresentado o teor de alumínio presente no solo para a camada de 0,0 - 0,10 m de profundidade em função da interação solo x umidade. Para o Argissolo, o incremento na umidade do solo não alterou o teor deste elemento. Já para o Cambissolo, os níveis intermediários de umidade foram os que proporcionaram condição mais favorável para que maior quantidade de alumínio se encontrasse na solução do solo, cujo teor estimado máximo de  $8,9 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de Al, com redução de  $-0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  de umidade. Este comportamento do alumínio no Cambissolo, possivelmente, esteja relacionado à redução do pH, devido à maior atividade do sistema radicular das plantas nestas condições hídricas. Conforme Braccini et al. (2000), a maior disponibilidade de prótons na solução do solo é condição primordial para que este elemento volte para a solução do solo.

Quanto à diferença entre solos, pode-se observar que, exceto na menor umidade do solo ( $-0,08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), nas demais, o teor de Al determinado para o Cambissolo foi superior ao do Argissolo. Este teor mais elevado para o CXbd, que é de um solo de sedimento e menos intemperizado que o Argissolo, pode ser devido à sua composição mineralógica que, por propiciar maior CTC, pode

resultar, numa mesma faixa de pH, em maior quantidade de Al trocável. Outro fato que também deve ter contribuído para este resultado, é o teor inicial de  $\text{Al}^{3+}$  presente no Cambissolo, três vezes maior que o do Argissolo (Tabela 1), que associado ao seu menor valor de pH, resultou em quantidade mais expressiva de  $\text{Al}^{3+}$  na solução do solo.

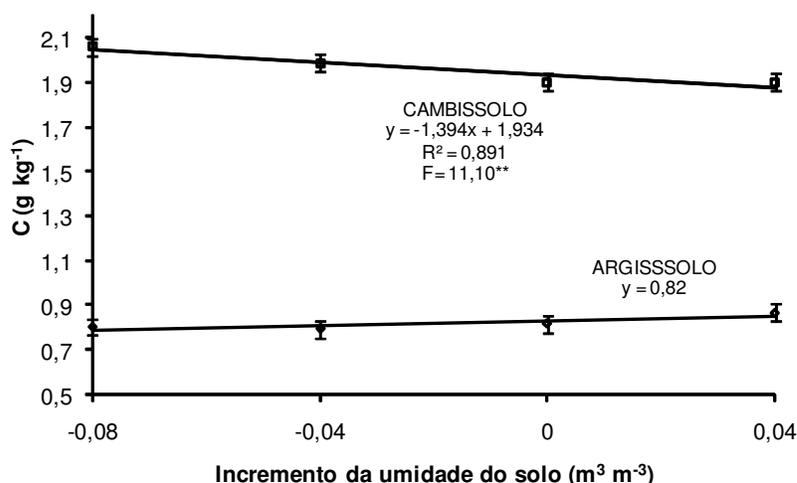


**Figura 16:** Teor de alumínio em função do incremento na umidade do solo na profundidade de 0,0 - 0,10 m para o Cambissolo e para o Argissolo. Obs: Barras verticais representam o desvio mínimo significativo pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na profundidade 0,20 - 0,30 m, o efeito da interação solo x umidade para o teor de C é apresentado na Figura 17. Para o Argissolo, este se manteve praticamente estável nos quatro níveis de umidade. Já para o Cambissolo, ocorreu uma redução no conteúdo de carbono com o aumento da umidade. Esta redução no teor de C, ao ocorrer maior disponibilidade hídrica, pode estar relacionada à maior atividade da microbiota do solo nestas condições. Segundo Siqueira e Moreira (2001), ao se aumentar a disponibilidade de água no solo (mantendo-se adequada as trocas gasosas), ocorre uma maior atividade dos organismos do solo e, conseqüentemente, maior mineralização do carbono orgânico.

Para o Argissolo, a ausência de efeito da umidade pode ser devido ao reduzido teor de carbono deste solo, tal que, o incremento na disponibilidade hídrica possivelmente não afetou de forma expressiva a população microbiológica, e também, ao fato da matéria orgânica ali presente, ser bem mais

estável que a do Cambissolo, dificultando sua degradação pelos microrganismos. Em relação à diferença entre solos, o teor de C do Cambissolo foi superior ao do Argissolo apenas no menor nível de umidade ( $-0,08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ).



**Figura 17:** Teor de carbono em função do incremento na umidade do solo na profundidade de 0,20 - 0,30 m para o Cambissolo e para o Argissolo. Obs: Barras verticais representam o desvio mínimo significativo pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

### 4.3 Desenvolvimento do sistema radicular

Na Tabela 11 são apresentados, para os diversos atributos relacionados ao desenvolvimento do sistema radicular do coqueiro, os valores de F e o nível de significância para as diversas fontes de variação, bem como o coeficiente de variação experimental. Para melhor apresentação dos dados, e também por não terem apresentado efeito significativo, foram omitidas, na Tabela 11, as fontes de variação “bloco” e “solo x compactação x umidade” (interação tripla).

Entre os atributos apresentados, destacam-se a densidade radicular com base no comprimento (DCR), na superfície (DSR) e no volume (DVR), para as diversas faixas de diâmetro (classe 1,  $<2,00 \text{ mm}$ ; classe 2,  $2,01 - 4,0 \text{ mm}$ ; classe 3,  $>4,00 \text{ mm}$ ; e raízes totais), e a densidade radicular com base na massa, para raízes grossas (DRG), finas (DRF) e totais (DRT). Estes atributos, juntamente com diâmetro médio das raízes (D.M.), são apresentados para cada camada estudada e na média das três camadas. O poder relativo de penetração radicular (PRPR), que relaciona a massa radicular existente na camada

0,20 - 0,30 m com a massa radicular total (0 - 0,30 m), é também apresentado na Tabela 11.

De modo geral, o desenvolvimento radicular das plantas de coqueiro, nas profundidades de 0,0 - 0,10 m; 0,10 - 0,20 m; 0,20 - 0,30 m, e, também, na média geral das três profundidades (0,0 - 0,30 m), foi influenciado de forma expressiva pela compactação e/ou umidade (com efeitos isolados).

Na profundidade 0,0 - 0,10 m, foi verificado efeito significativo do solo apenas sobre o D.M., e efeito altamente significativo da umidade sobre todas as variáveis analisadas. Quanto à compactação, o fato de, em todos os vasos, o solo desta camada ter sido acondicionado sem aplicação de pressão adicional (sendo, portanto, uma camada não compactada) justifica a ausência de significância para este fator.

Na profundidade 0,10 - 0,20 m, efeito significativo de solo foi verificado apenas sobre a densidade de raízes da classe 2. Para a compactação, exceção feita ao diâmetro médio, todas as demais variáveis foram afetadas de modo altamente significativo. Em relação à umidade, não foram observadas diferenças significativas apenas para o diâmetro médio, para a densidades de raiz da classe 3 (DCR, DSR e DVR) e para a DRG com base na massa de raiz.

Na profundidade 0,20 - 0,30 m, foi observado, para todas as variáveis avaliadas, efeito altamente significativo da compactação, mas nenhum efeito da umidade do solo. Para o D.M, além do efeito isolado da compactação, houve efeito significativo do fator solo e da interação solo x compactação.

Para a média geral do vaso (profundidade de 0,0 - 0,30 m), houve efeito do solo significativo ( $P < 0,05$ ) sobre a DRF e altamente significativo ( $P < 0,01$ ) sobre o D.M. e PRPR. Quanto à compactação e à umidade, houve efeito significativo ou altamente significativo sobre quase todas as variáveis. As exceções foram o PRPR, para o fator umidade, e o D.M. e a densidade radicular com base no comprimento (DCR) da classe 3, para o fator compactação.

**Tabela 11:** Valores de F e nível de significância para as diversas fontes de variação, bem como o coeficiente de variação para a densidade radicular por comprimento (DCR), superfície (DSR) e volume (DVR) de raiz das classes 1, 2, 3 e por profundidade estudada; para a densidade de raízes finas (DRF), grossas (DRG), e total (DRT) com base na matéria seca em cada profundidade e para o poder relativo de penetração radicular (PRPR) e o diâmetro médio das raízes nas profundidades de 0,0 - 0,30 m, 0,0 - 0,10 m, 0,10 - 0,20 m e 0,20 - 0,30 m.

Fonte de variação	DCR <sup>1</sup>	DSR <sup>1</sup>	DVR <sup>1</sup>	DCR <sup>2</sup>	DSR <sup>2</sup>	DVR <sup>2</sup>	DCR <sup>3</sup>	DSR <sup>3</sup>	DVR <sup>3</sup>	D.M.	DCR	DSR	DVR	DRG	DRF	DRT	PRPR	
	-----Classe 1-----			-----Classe 2-----			-----Classe 3-----			-----por profundidade-----								
	Profundidade de 00 - 0,10 m																	
Solo (S)	0,09 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	0,10 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	0,03 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	0,18 <sup>ns</sup>	0,29 <sup>ns</sup>	5,33*	0,02 <sup>ns</sup>	0,04 <sup>ns</sup>	0,18 <sup>ns</sup>	1,62 <sup>ns</sup>	1,33 <sup>ns</sup>	1,77 <sup>ns</sup>	-	
Compactação (C)	0,15 <sup>ns</sup>	0,13 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>	0,41 <sup>ns</sup>	0,24 <sup>ns</sup>	0,17 <sup>ns</sup>	0,34 <sup>ns</sup>	1,15 <sup>ns</sup>	1,48 <sup>ns</sup>	1,17 <sup>ns</sup>	0,24 <sup>ns</sup>	0,26 <sup>ns</sup>	0,64 <sup>ns</sup>	0,90 <sup>ns</sup>	1,85 <sup>ns</sup>	0,52 <sup>ns</sup>	-	
Umidade (U)	7,85**	8,84**	9,55**	8,11**	11,6**	13,5**	3,40*	7,94**	8,08**	4,71**	8,71**	10,7**	10,6**	5,20**	12,3**	9,38**	-	
S x C	1,41 <sup>ns</sup>	1,56 <sup>ns</sup>	1,77 <sup>ns</sup>	0,97 <sup>ns</sup>	1,52 <sup>ns</sup>	2,09 <sup>ns</sup>	0,60 <sup>ns</sup>	0,85 <sup>ns</sup>	1,08 <sup>ns</sup>	1,87 <sup>ns</sup>	1,11 <sup>ns</sup>	1,42 <sup>ns</sup>	1,49 <sup>ns</sup>	0,61 <sup>ns</sup>	174 <sup>ns</sup>	1,25 <sup>ns</sup>	-	
S x U	0,03 <sup>ns</sup>	0,05 <sup>ns</sup>	0,08 <sup>ns</sup>	0,45 <sup>ns</sup>	0,40 <sup>ns</sup>	0,37 <sup>ns</sup>	0,42 <sup>ns</sup>	0,74 <sup>ns</sup>	0,75 <sup>ns</sup>	0,93 <sup>ns</sup>	0,13 <sup>ns</sup>	0,24 <sup>ns</sup>	0,49 <sup>ns</sup>	0,55 <sup>ns</sup>	1,26 <sup>ns</sup>	0,71 <sup>ns</sup>	-	
C x U	1,40 <sup>ns</sup>	1,42 <sup>ns</sup>	1,41 <sup>ns</sup>	0,45 <sup>ns</sup>	0,63 <sup>ns</sup>	0,82 <sup>ns</sup>	0,53 <sup>ns</sup>	0,72 <sup>ns</sup>	0,99 <sup>ns</sup>	1,08 <sup>ns</sup>	0,88 <sup>ns</sup>	0,93 <sup>ns</sup>	1,01 <sup>ns</sup>	0,93 <sup>ns</sup>	1,15 <sup>ns</sup>	1,15 <sup>ns</sup>	-	
CV%	52,53	54,01	55,23	84,58	73,86	71,72	146,6	83,61	87,04	17,15	57,27	60,53	70,95	75,26	61,81	62,59	-	
	Profundidade de 0,10 - 0,20 m																	
Solo (S)	1,88 <sup>ns</sup>	3,15 <sup>ns</sup>	4,28 <sup>ns</sup>	5,26*	5,14*	5,01*	1,71 <sup>ns</sup>	1,82 <sup>ns</sup>	1,89 <sup>ns</sup>	0,19 <sup>ns</sup>	2,44 <sup>ns</sup>	3,69 <sup>ns</sup>	3,54 <sup>ns</sup>	0,10 <sup>ns</sup>	2,68 <sup>ns</sup>	0,86 <sup>ns</sup>	-	
Compactação (C)	16,0**	14,3**	12,9**	4,99**	4,73**	4,47**	7,09**	7,16**	7,08**	1,92 <sup>ns</sup>	13,6**	9,90**	7,41**	4,63**	7,32**	5,86**	-	
Umidade (U)	3,00*	3,02*	3,04*	5,30**	5,65**	6,00**	1,91 <sup>ns</sup>	2,08 <sup>ns</sup>	2,39 <sup>ns</sup>	1,20 <sup>ns</sup>	3,25*	3,55*	3,60*	2,39 <sup>ns</sup>	3,59*	3,10*	-	
S x C	1,33 <sup>ns</sup>	1,07 <sup>ns</sup>	0,91 <sup>ns</sup>	0,45 <sup>ns</sup>	0,44 <sup>ns</sup>	0,43 <sup>ns</sup>	0,12 <sup>ns</sup>	0,08 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>	0,32 <sup>ns</sup>	1,07 <sup>ns</sup>	0,64 <sup>ns</sup>	0,31 <sup>ns</sup>	0,24 <sup>ns</sup>	0,54 <sup>ns</sup>	0,31 <sup>ns</sup>	-	
S x U	0,39 <sup>ns</sup>	0,40 <sup>ns</sup>	0,48 <sup>ns</sup>	1,70 <sup>ns</sup>	1,85 <sup>ns</sup>	2,00 <sup>ns</sup>	1,35 <sup>ns</sup>	1,19 <sup>ns</sup>	1,07 <sup>ns</sup>	0,52 <sup>ns</sup>	0,57 <sup>ns</sup>	0,85 <sup>ns</sup>	1,15 <sup>ns</sup>	0,28 <sup>ns</sup>	0,51 <sup>ns</sup>	0,35 <sup>ns</sup>	-	
C x U	0,24 <sup>ns</sup>	0,22 <sup>ns</sup>	0,25 <sup>ns</sup>	1,16 <sup>ns</sup>	1,17 <sup>ns</sup>	1,17 <sup>ns</sup>	1,11 <sup>ns</sup>	1,06 <sup>ns</sup>	1,04 <sup>ns</sup>	0,43 <sup>ns</sup>	0,37 <sup>ns</sup>	0,54 <sup>ns</sup>	0,83 <sup>ns</sup>	1,15 <sup>ns</sup>	0,40 <sup>ns</sup>	0,76 <sup>ns</sup>	-	
CV%	55,67	56,05	56,02	61,50	62,27	63,17	68,08	71,71	76,25	21,21	55,50	57,22	62,93	69,83	54,68	59,51	-	
	Profundidade de 0,20 - 0,30 m																	
Solo (S)	0,54 <sup>ns</sup>	0,78 <sup>ns</sup>	0,99 <sup>ns</sup>	0,51 <sup>ns</sup>	0,77 <sup>ns</sup>	0,91 <sup>ns</sup>	0,19 <sup>ns</sup>	0,05 <sup>ns</sup>	0,25 <sup>ns</sup>	17,8**	0,50 <sup>ns</sup>	0,70 <sup>ns</sup>	0,67 <sup>ns</sup>	0,08 <sup>ns</sup>	5,41 <sup>ns</sup>	1,98 <sup>ns</sup>	-	
Compactação (C)	14,6**	14,5**	14,1**	9,12**	8,81**	8,34**	4,78**	9,23**	9,18**	23,6**	13,7**	12,6**	11,1**	7,93**	14,8**	12,2**	-	
Umidade (U)	1,11 <sup>ns</sup>	1,01 <sup>ns</sup>	0,92 <sup>ns</sup>	0,64 <sup>ns</sup>	0,88 <sup>ns</sup>	1,04 <sup>ns</sup>	0,19 <sup>ns</sup>	0,43 <sup>ns</sup>	0,62 <sup>ns</sup>	2,33 <sup>ns</sup>	0,96 <sup>ns</sup>	0,91 <sup>ns</sup>	0,87 <sup>ns</sup>	0,84 <sup>ns</sup>	0,70 <sup>ns</sup>	0,81 <sup>ns</sup>	-	
S x C	1,15 <sup>ns</sup>	1,21 <sup>ns</sup>	1,21 <sup>ns</sup>	0,36 <sup>ns</sup>	0,42 <sup>ns</sup>	0,45 <sup>ns</sup>	0,49 <sup>ns</sup>	0,22 <sup>ns</sup>	0,32 <sup>ns</sup>	1,38 <sup>ns</sup>	0,88 <sup>ns</sup>	0,79 <sup>ns</sup>	0,60 <sup>ns</sup>	0,22 <sup>ns</sup>	1,36 <sup>ns</sup>	0,75 <sup>ns</sup>	-	
S x U	1,12 <sup>ns</sup>	0,95 <sup>ns</sup>	0,82 <sup>ns</sup>	0,47 <sup>ns</sup>	0,32 <sup>ns</sup>	0,26 <sup>ns</sup>	0,93 <sup>ns</sup>	0,48 <sup>ns</sup>	0,30 <sup>ns</sup>	5,55*	0,90 <sup>ns</sup>	0,56 <sup>ns</sup>	0,31 <sup>ns</sup>	0,36 <sup>ns</sup>	0,28 <sup>ns</sup>	0,13 <sup>ns</sup>	-	
C x U	0,60 <sup>ns</sup>	0,53 <sup>ns</sup>	0,48 <sup>ns</sup>	0,39 <sup>ns</sup>	0,53 <sup>ns</sup>	0,58 <sup>ns</sup>	0,36 <sup>ns</sup>	0,40 <sup>ns</sup>	0,57 <sup>ns</sup>	1,42 <sup>ns</sup>	0,51 <sup>ns</sup>	0,42 <sup>ns</sup>	0,41 <sup>ns</sup>	0,55 <sup>ns</sup>	0,23 <sup>ns</sup>	0,31 <sup>ns</sup>	-	
CV%	77,02	77,40	78,09	98,66	98,53	100,2	184,0	115,3	114,6	34,47	79,3	82,54	90,0	113,0	70,06	81,60	-	
	Profundidade total avaliada (0,0 - 0,30 m)																	
Solo (S)	0,54 <sup>ns</sup>	1,30 <sup>ns</sup>	2,00 <sup>ns</sup>	1,35 <sup>ns</sup>	1,65 <sup>ns</sup>	1,82 <sup>ns</sup>	0,13 <sup>ns</sup>	0,90 <sup>ns</sup>	1,20 <sup>ns</sup>	7,23**	0,69 <sup>ns</sup>	1,45 <sup>ns</sup>	1,71 <sup>ns</sup>	0,70 <sup>ns</sup>	4,23*	2,19 <sup>ns</sup>	6,38*	
Compactação (C)	9,58**	9,39**	9,03**	2,80*	3,43*	3,62*	2,09 <sup>ns</sup>	5,99**	6,52**	2,55 <sup>ns</sup>	7,77**	6,98**	6,31**	5,26**	6,38**	6,24**	22,30**	
Umidade (U)	4,19**	4,52**	4,83**	8,09**	9,77**	10,8**	3,77*	7,23**	7,82**	6,11**	5,17**	6,72**	8,32**	4,16**	6,09**	5,46**	1,24 <sup>ns</sup>	
S x C	0,68 <sup>ns</sup>	0,55 <sup>ns</sup>	0,47 <sup>ns</sup>	0,17 <sup>ns</sup>	0,13 <sup>ns</sup>	0,19 <sup>ns</sup>	0,46 <sup>ns</sup>	0,22 <sup>ns</sup>	0,30 <sup>ns</sup>	0,24 <sup>ns</sup>	0,47 <sup>ns</sup>	0,33 <sup>ns</sup>	0,30 <sup>ns</sup>	0,08 <sup>ns</sup>	0,19 <sup>ns</sup>	0,12 <sup>ns</sup>	1,35 <sup>ns</sup>	
S x U	0,35 <sup>ns</sup>	0,35 <sup>ns</sup>	0,40 <sup>ns</sup>	1,08 <sup>ns</sup>	1,18 <sup>ns</sup>	1,26 <sup>ns</sup>	0,72 <sup>ns</sup>	1,20 <sup>ns</sup>	1,26 <sup>ns</sup>	0,62 <sup>ns</sup>	0,45 <sup>ns</sup>	0,62 <sup>ns</sup>	0,97 <sup>ns</sup>	0,21 <sup>ns</sup>	0,58 <sup>ns</sup>	0,39 <sup>ns</sup>	2,22 <sup>ns</sup>	
C x U	0,57 <sup>ns</sup>	0,54 <sup>ns</sup>	0,56 <sup>ns</sup>	0,78 <sup>ns</sup>	1,04 <sup>ns</sup>	1,20 <sup>ns</sup>	0,49 <sup>ns</sup>	0,92 <sup>ns</sup>	1,32 <sup>ns</sup>	0,97 <sup>ns</sup>	0,60 <sup>ns</sup>	0,74 <sup>ns</sup>	1,06 <sup>ns</sup>	1,02 <sup>ns</sup>	0,64 <sup>ns</sup>	0,83 <sup>ns</sup>	0,68 <sup>ns</sup>	
CV%	48,95	49,56	49,72	61,22	58,04	57,71	94,6	61,14	62,88	10,16	49,89	51,05	54,86	61,17	49,18	52,33	9,42	

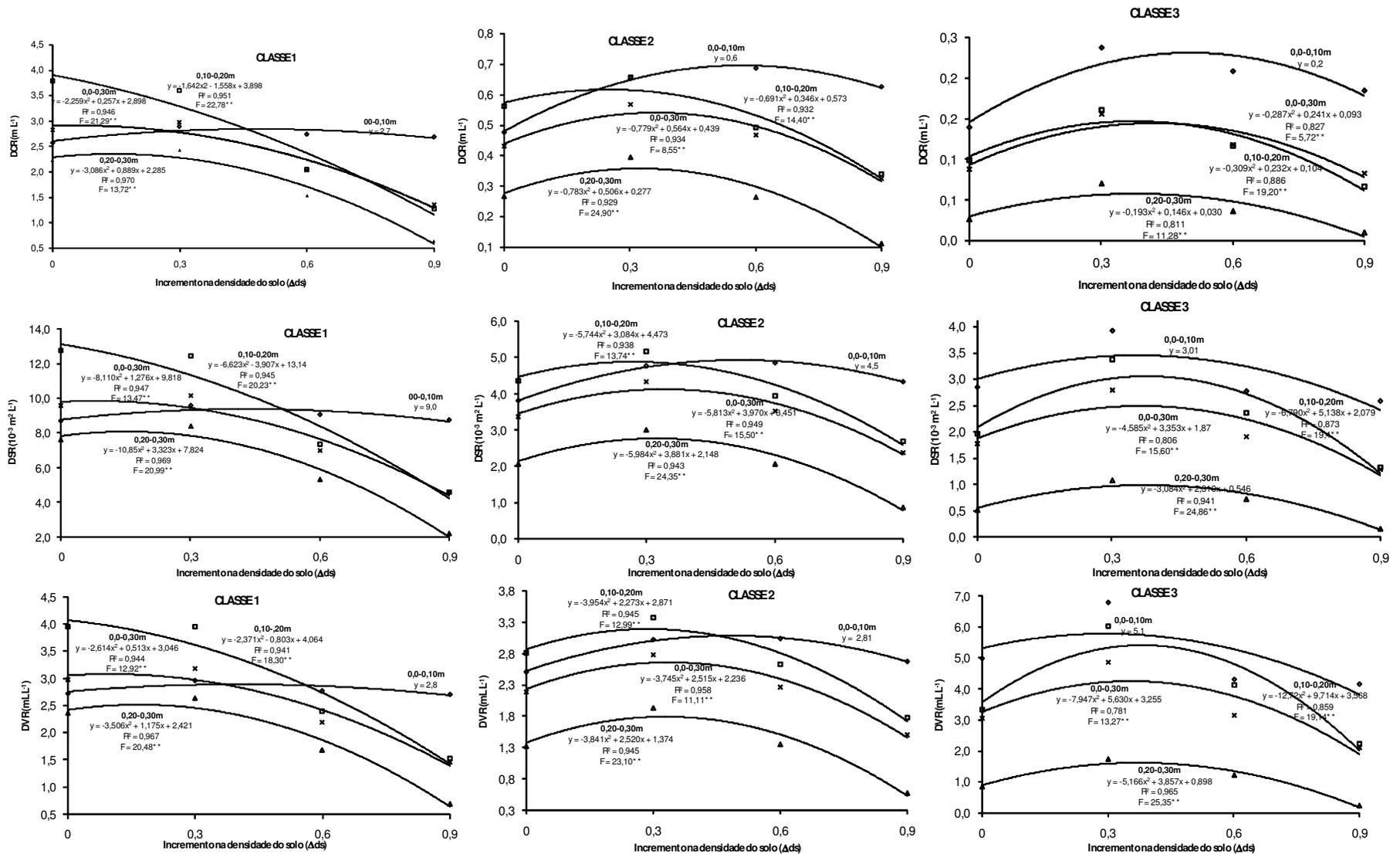
**Obs:** DCR: densidade pelo comprimento das raízes; DSR: densidade pela superfície das raízes; DRV: densidade pelo volume das raízes; <sup>1</sup>: Classe 1 (raízes com diâmetro <2,00mm); <sup>2</sup>: Classe 2 (raízes com 2,01 - 4,0mm de diâmetro); <sup>3</sup>: Classe 3 (raízes com diâmetro >4mm); D.M: diâmetro médio radicular; DRG: densidade de raízes grossas; DRF: densidade de raízes finas; DRT: densidade de raízes totais; PRPR: poder relativo de penetração radicular, \* = P < 0,05; \*\* = P < 0,01; ns = não significativo.

### 4.3.1 Efeito da compactação do solo

A densidade radicular por comprimento, superfície e volume, bem como a matéria seca das raízes, são medidas que nos fornecem informação sobre o crescimento do sistema radicular das plantas e, se forem avaliadas em função da profundidade e da distância da planta, podem dar informações de como este se encontra distribuído no perfil do solo. Esta distribuição e as quantidades de raízes finas, médias e grossas, podem sofrer variações conforme os impedimentos físicos existentes no solo, sendo a sua compactação um dos impedimentos mais freqüentemente observados.

No presente trabalho, verifica-se, na Figura 18, que de modo geral, a compactação afetou de forma expressiva o sistema radicular do coqueiro, ocasionando alterações nos valores de densidade radicular por comprimento (DCR), superfície (DSR) e volume (DVR) das raízes nas camadas de 0,10 - 0,20 m, 0,20 - 0,30 m. E, embora não tenha afetado a camada superficial não compactada (0,0 - 0,10m), também afetou a média das três camadas (0,0 - 0,30 m).

Para as raízes com diâmetro <2,00 mm (classe 1), a ausência ou uma leve compactação favoreceu o seu desenvolvimento nas duas camadas subsuperficiais (0,10 - 0,20 m e 0,20 - 0,30 m) e na profundidade total (0,0 - 0,30 m). Para esta classe de raiz, na profundidade 0,10 - 0,20 m, o nível zero de compactação proporcionou condições mais favoráveis, obtendo-se valores máximos de  $4,08 \text{ m L}^{-1}$  para DCR,  $13,38 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ L}^{-1}$  para DSR e  $4,08 \text{ mL L}^{-1}$  para DVR. Já para a profundidade 0,20 - 0,30 m, o incremento de 0,17 da  $\Delta ds$  foi o mais promissor, obtendo-se densidade radicular máxima de  $2,30 \text{ m L}^{-1}$ ,  $7,93 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ L}^{-1}$  e  $0,18 \text{ mL L}^{-1}$  para, respectivamente, DCR, DSR e DVR. Para a profundidade total (0,0 - 0,30 m), foram determinadas para estas densidades de raiz, valores máximos de  $2,91 \text{ m L}^{-1}$ ,  $9,89 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ L}^{-1}$  e  $3,08 \text{ mL L}^{-1}$ , com incrementos respectivos de 0,07, 0,09 e 0,11 da  $\Delta ds$  (Figura 18).



**Figura 18:** Densidade radicular com base no comprimento (DCR), na superfície (DSR) e no volume (DVR) para raízes com diâmetro <2,00 mm (Classe1), de 2,01 - 4,00mm (Classe 2) e >4,00 mm (Classe 3) em função da compactação do solo, nas profundidades de 0,0 - 0,30 m; 0,0 - 0,10 m; 0,10 - 0,20 m e 0,20 - 0,30 m.

Vários pesquisadores têm encontrado maior desenvolvimento radicular em solo com baixa densidade, dentre estes Rosolem et al. (1994a) e Beutler e Centurion (2004), para a soja; Guimarães et al. (2002), para o feijão; e Vega et al. (2005), para pupunha. Este maior desenvolvimento em solos levemente compactados tem sido atribuído à menor retenção de água pelo solo nestas condições. Este fato induz as plantas a emitirem maior número de raízes com menor diâmetro para explorar um maior volume de solo. Estas raízes são mais eficientes na absorção de água e nutrientes (Taiz e Zeiger, 2004), suprimindo assim suas necessidades hídricas e nutricionais. Outro fato, mais relacionado aos resultados do presente trabalho, é que a ausência de impedimentos físicos faz com que o solo apresente grande número de macroporos, permitindo que as raízes finas se desenvolvam normalmente.

Segundo Camargo e Alleoni (1997), ao se avaliar um sistema radicular, é importante considerar o diâmetro dos poros, uma vez que poucas plantas têm diâmetro de raiz inferior a 0,1 mm e os poros de drenagem da água no solo apresentam diâmetro igual ou superior a 0,05 mm, ou seja, espaço onde as raízes não conseguiriam penetrar. Por isso é importante considerar a macroporosidade como rota principal das raízes.

A despeito do desenvolvimento do sistema radicular ter sido afetado pela compactação na profundidade 0,0 - 0,30 m, pode-se observar que o efeito nesta espessura total fica bastante diluído quando comparado ao efeito verificado nas camadas subsuperficiais. Nesta camada, ao serem comparados os valores de densidade radicular nos pontos de máxima com os valores médios obtidos no maior nível de compactação ( $1,37 \text{ m L}^{-1}$  para DCR;  $4,62 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ L}^{-1}$  para DSR e  $1,46 \text{ mL L}^{-1}$  para DVR), observa-se que a superioridade das primeiras em relação às últimas é de aproximadamente 110%. Já para as camadas de 0,10 - 0,20 m e 0,20 - 0,30 m, foram obtidos, no maior nível de compactação, valores médios para DCR, DSR e DVR de  $1,15 \text{ m L}^{-1}$ ;  $4,20 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ L}^{-1}$ ,  $1,39 \text{ mL L}^{-1}$ , para a profundidade de 0,10 - 0,20 m, e de  $0,26 \text{ m L}^{-1}$ ,  $0,91 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ L}^{-1}$ ,  $0,29 \text{ mL L}^{-1}$ , na profundidade de 0,20 - 0,30 m, resultando em diferenças mais marcantes (210% e 730%) em relação ao ponto de máximo.

Fato similar a este foi constatado também por Moraes et al. (1995) e Beutler e Centurion (2004) na cultura da soja, cultivada em solos com diferentes densidades. Estes autores não observaram diferença significativa na densidade e

superfície radicular para a profundidade de 0,0 - 0,20 m, porém quando o sistema radicular foi avaliado em camadas menores (0,05 m de espessura), houve efeito altamente significativo dos tratamentos. Os resultados obtidos no presente trabalho, bem como os apresentados por estes autores, indicam que o desenvolvimento de raízes em solos compactados deve ser estudado por camadas, método que possibilita uma melhor avaliação de sua distribuição no perfil do solo.

Para as raízes pertencentes às classes 2 e 3, tanto na profundidade de 0,0 - 0,30 m quanto nas de 0,10 - 0,20 m e 0,20 - 0,30 m, o desenvolvimento máximo ocorreu com o incrementos situados entre 0,30 - 0,40 da  $\Delta ds$  (Figura 18). Para as raízes da classe 2, os valores máximos obtidos para DCR, DSR e DVR foram, respectivamente, de  $0,54 \text{ m L}^{-1}$ ,  $4,15 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ L}^{-1}$  e  $2,67 \text{ mL L}^{-1}$ , na profundidade 0,0 - 0,30 m; de  $0,26 \text{ m L}^{-1}$ ,  $4,95 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ L}^{-1}$  e  $3,24 \text{ mL L}^{-1}$ , na profundidade 0,10 - 0,20 m; e de  $0,35 \text{ m L}^{-1}$ ,  $2,73 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ L}^{-1}$  e  $1,75 \text{ mL L}^{-1}$ , na profundidade 0,20 - 0,30 m. Para as raízes da classe 3, respectivamente para as mesmas variáveis (DCR, DSR e DVR), os valores máximos foram de  $0,15 \text{ m L}^{-1}$ ,  $2,51 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ L}^{-1}$  e  $4,31 \text{ mL L}^{-1}$ , na profundidade de 0,0 - 0,30 m; de  $0,16 \text{ m L}^{-1}$ ,  $3,10 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ L}^{-1}$ , e  $5,51 \text{ mL L}^{-1}$ , na profundidade de 0,10 - 0,20 m; e de  $0,05 \text{ m L}^{-1}$ ,  $0,95 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ L}^{-1}$ ,  $1,56 \text{ mL L}^{-1}$ , na profundidade de 0,20 - 0,30 m.

Este maior desenvolvimento das raízes grossas em solo mais compactado, quando comparado com o das raízes finas, pode estar relacionado às propriedades físicas do mesmo, nestas condições. Para os solos utilizados no presente estudo, o incremento de 0,3 - 0,4 da  $\Delta ds$  resultou em uma densidade do solo de, aproximadamente,  $1,20 - 1,25 \text{ Mg m}^{-3}$  (Tabela 3). Esta densidade, certamente, não representa um impedimento físico para o crescimento das raízes, no entanto, aumenta a capacidade de retenção de água no solo.

Como com o incremento da compactação do solo, ocorre um aumento de sua resistência à penetração (Tormena et al., 1998; Beutler e Centurion, 2004); dificultando, ou mesmo impedindo, o desenvolvimento das raízes. No presente trabalho, incrementos superiores a 0,4 da  $\Delta ds$  ocasionaram uma redução gradativa na quantidade de raízes em todas as classes avaliadas. Esta redução possivelmente está associada à elevada resistência do solo à penetração radicular, bem como ao reduzido tamanho dos poros. Segundo Suarez, 2004, a

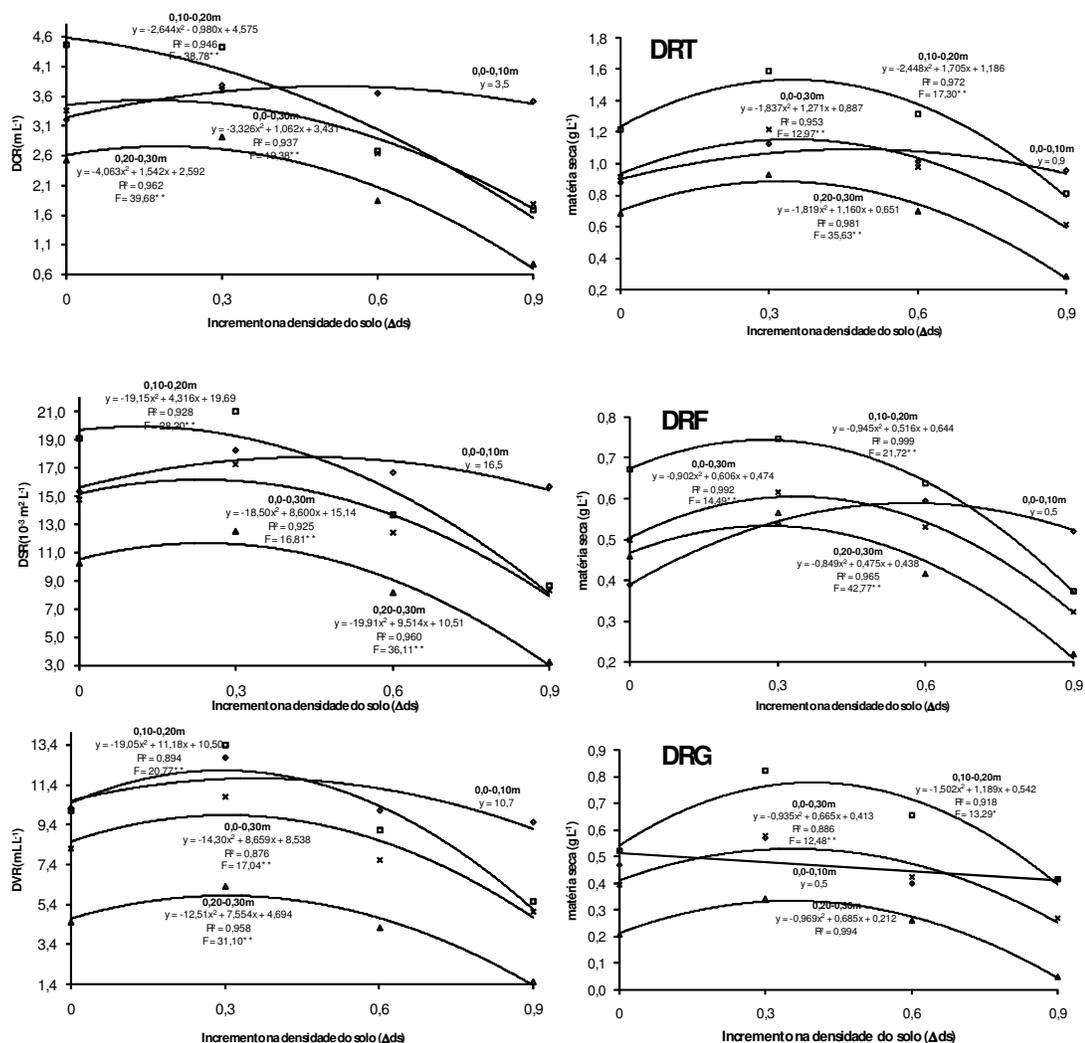
maior rigidez dos poros de menor diâmetro influencia o crescimento das raízes mais grossas, já que estas, para continuarem a crescer, precisam dilatar os poros.

Para o coqueiro, nas condições em que foi conduzido o experimento, incrementos de até 0,3 da  $\Delta ds$  foram os que proporcionaram condições ideais para o desenvolvimento do sistema radicular. Conforme constatado por Peçanha (2007), valores de compactação similares a estes foram os que proporcionaram, nas plantas, maior número de folhas (9), altura (1,44 m), circunferência do estipe (0,22 m), e área foliar (1,17 m<sup>2</sup>). Já para o incremento de 0,9 da  $\Delta ds$ , este autor obteve valores médios de 7,5 folhas, 1,22 m para altura das plantas, 0,16 m para circunferência do estipe e 0,61 m<sup>2</sup> para área foliar.

O efeito da compactação alterou, de forma expressiva, a densidade radicular total (soma das densidades radiculares obtidas para a classe 1, 2 e 3 de raízes), e também a densidade radicular obtida pela massa seca de raízes (g L<sup>-1</sup>), nas profundidades de 0,0 - 0,30 m; 0,10 - 0,20 m e 0,20 - 0,30 m (Figura 19).

Para camada de 0,0 - 0,30 m, o valor máximo para DCR foi de 3,53 m L<sup>-1</sup>, obtido com o incremento de 0,17 da  $\Delta ds$  do solo. Já para DSR e DVR, os incrementos de 0,23 e 0,26 da  $\Delta ds$  do solo foram os que proporcionaram os maiores valores, sendo estes, respectivamente, 16,24 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup> L<sup>-1</sup> e 9,70 mL L<sup>-1</sup>. Para a densidade com base na matéria seca de raízes, compactações adicionais de 0,31, 0,32 e 0,34 da  $\Delta ds$  foram as que resultaram nos valores máximos, obtendo-se, respectivamente, 1,07 g L<sup>-1</sup> para DRT, 0,57 g L<sup>-1</sup> para DRF e 0,53 g L<sup>-1</sup> para DRG.

Na profundidade de 0,20 - 0,30 m, os valores máximos foram de 2,69 m L<sup>-1</sup> para DCR, 11,46 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup> L<sup>-1</sup> para DSR, 5,71 mL L<sup>-1</sup> para DVR, 0,81 g L<sup>-1</sup> para DRT, 0,50 g L<sup>-1</sup> para DRF e 0,32 g L<sup>-1</sup> para DRG, obtidos com incrementos de, respectivamente, 0,20; 0,24, 0,29, 0,30, 0,26 e 0,34 da  $\Delta ds$  (Figura 19). Na profundidade de 0,10 - 0,20 m, para estas variáveis, os valores máximos são mais elevados, obtendo-se 4,61 m L<sup>-1</sup> para DCR, 20,10 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup> L<sup>-1</sup> para DSR, 12,32 mL L<sup>-1</sup> para DVR, 1,51 g L<sup>-1</sup> para DRT, 0,72 g L<sup>-1</sup> para DRF e 0,79 g L<sup>-1</sup> para DRG, com incrementos, respectivamente, de 0, 0,14, 0,30, 0,34, 0,27 e 0,38 da  $\Delta ds$  do solo.



**Figura 19:** Densidade radicular total com base no comprimento (DCR), na superfície (DSR), no volume (DVR) de raízes, e também com base na matéria seca para raízes totais (DRT), raízes finas (DRF) e raízes grossas (DRG) em função da compactação do solo, nas profundidades de 0,0 - 0,30 m; 0,0 - 0,10 m; 0,10 - 0,20 m e 0,20 - 0,30 m.

De modo geral, pelos valores máximos apresentados para as densidades radiculares das camadas nas quais ocorreu o efeito da compactação do solo, pode-se observar que incrementos de até 0,38 da  $\Delta ds$  do solo foram os que proporcionaram condições mais propícias para o desenvolvimento do sistema radicular do coqueiro. Este fato certamente foi decisivo para o maior crescimento das plantas, conforme verificado por Peçanha, 2007. Para incrementos superiores (0,6 e 0,9 da  $\Delta ds$  do solo), pode-se observar na Figura 19, que ocorre uma redução acentuada das densidades radiculares nas três profundidades abordadas.

Resultados semelhantes a estes, em que as plantas apresentaram maior desenvolvimento radicular em densidade do solo intermediária são relatados por Rosolem et al. (1994a) para a soja, Foloni et al. (2006), para o guandu, guandu anão, mucuna preta, labe-labe, crotalária juncea e soja, e Guimarães, et al. (2002), para o feijão.

O efeito da compactação pode ser melhor visualizado ao ser feito a comparação do valor médio para DCR (mais freqüentemente utilizada em estudos de raízes), obtido no incremento de 0,3 da  $\Delta ds$ , com o valor médio determinado para os níveis mais elevados de compactação. Em termos percentuais, este valor de densidade radicular na compactação adicional de 0,3 da  $\Delta ds$  do solo, quando comparado com o obtido nos incrementos de 0,6 e 0,9 de da  $\Delta ds$ , foi superior em 99% e 193%, na profundidade de 0,0 - 0,30 m; 65% e 190% na profundidade de 0,10 - 0,20 m; e 85 e 835%, na profundidade de 0,20 - 0,30 m.

Em trabalho realizado na cultura do milho em solo com 18% de argila, Tardieu (1988) implementou tratamento com diversas passadas com trator pesado em solo bem úmido, e comparou-o com um tratamento testemunha que recebeu apenas uma passada com trator leve em solo pouco úmido. Onde houve uma passada de trator leve, a densidade entre 20 - 40 cm atingiu  $1,3 \text{ Mg m}^{-3}$ , ocorrendo redução de 16 a 35% do crescimento radicular. No tratamento com trator pesado em solo úmido, a densidade chegou a  $1,69 \text{ Mg m}^{-3}$  sob a faixa trafegada, ocorrendo redução drástica do crescimento radicular (de 85 a 91%).

Conforme Dias Junior (2000), com o incremento da compactação aumenta-se a resistência do solo à penetração das raízes, ocorrendo também a redução do diâmetro e da continuidade dos poros. Este fato dificulta, ou mesmo em condições mais severas, impede o desenvolvimento do sistema radicular das plantas. Além disso, com o incremento da compactação, as partículas constituintes do solo ficam mais próximas umas às outras, o que torna mais difícil o deslocamento das mesmas. Este fato, muitas vezes, resulta no confinamento do sistema radicular, caso as raízes não exerçam uma pressão maior do que as partículas de solo nas suas proximidades.

Em solos soltos, ou menos densos, o contato entre as raízes e as partículas constituintes do solo pode ser menor, dificultando assim o transporte de água e nutrientes. Em elevadas densidades, devido ao aumento na resistência à penetração das raízes, o consumo de água e nutrientes pode ser limitado. Uma

mudança na densidade do solo altera a umidade volumétrica do solo, o movimento da água em resposta a um potencial hídrico, o contato solo-raiz e a resistência mecânica do solo para o desenvolvimento das raízes (Stirzaker, et al., 1996).

Na profundidade de 0,0 - 0,30 m, o diâmetro médio das raízes apresentou comportamento quadrático, pois sofre um incremento gradual até a compactação adicional 0,6 da  $\Delta ds$  do solo (Figura 20), voltando a reduzir nos níveis mais elevados de compactação. Para esta camada de solo, foi obtido diâmetro radicular máximo de 1,451 mm.

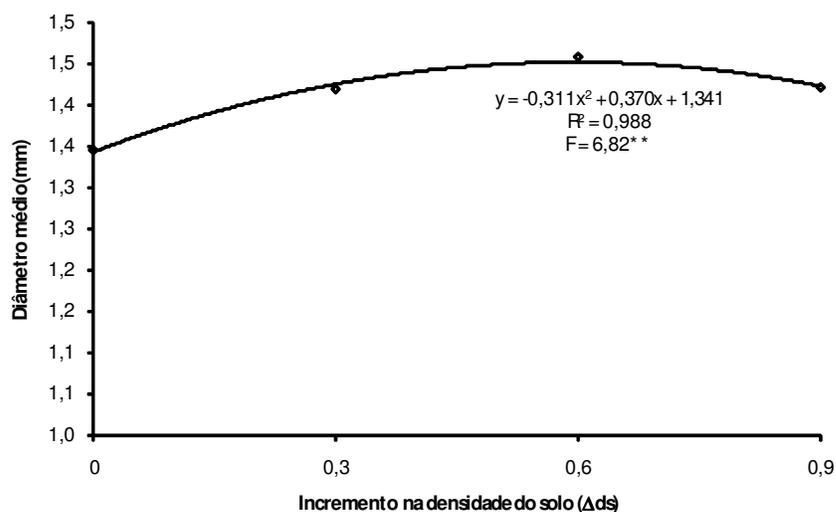
De acordo com Materechera et al. (1992), a resistência mecânica do solo causa aumento do diâmetro das raízes na camada compactada, por provocar modificações morfológicas e fisiológicas específicas a cada espécie ou cultivar, a fim de se adaptarem à esta condição. Rosolem et al. (1994a) e Foloni et al. (2003) para plantas de milho, Guimarães et al, (2002) para o feijão, Bordin et al, (2005) para aceroleira; verificaram que o diâmetro médio radicular de plantas aumentou na camada de solo compactado com o incremento da resistência mecânica à penetração.

Para o efeito da interação solo x densidade na profundidade de 0,20 - 0,30 m, verifica-se, na Figura 21, que para o Cambissolo, o incremento na densidade não altera de forma significativa o diâmetro médio das raízes. Já para o Argissolo, observa-se que ocorre um aumento expressivo no diâmetro radicular até o incremento de 0,7 da  $\Delta ds$  do solo, voltando o mesmo a sofrer redução nos níveis mais elevados de compactação.

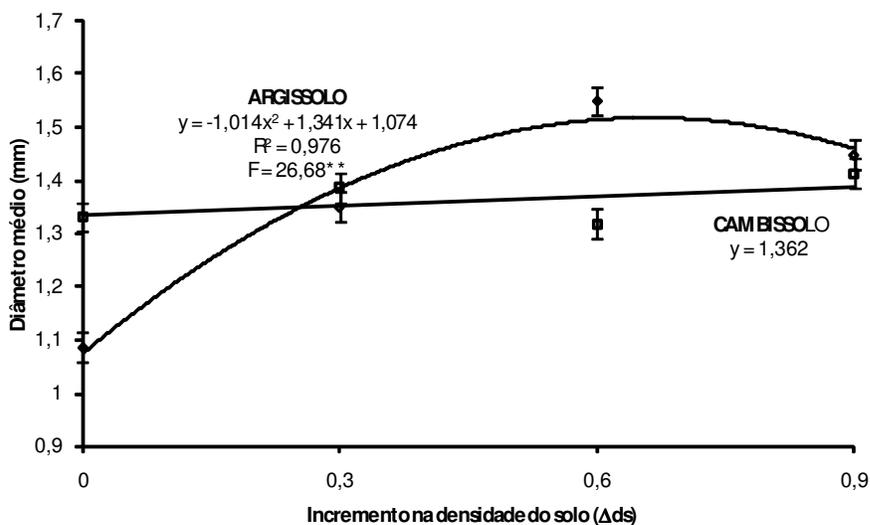
O incremento no diâmetro médio das raízes observado no Argissolo, possivelmente, é resultante da elevada resistência à penetração do solo, não permitindo que as raízes se desenvolvessem normalmente. Além disso, para este solo, o efeito mais pronunciado da compactação também pode estar relacionado às suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas. Por ser um solo pertencente aos Tabuleiros Costeiros, que, devido sua natureza geológica, apresenta um adensamento natural (possui agregados menos estáveis e menor teor de matéria orgânica), torna-se severamente restritivo ao desenvolvimento radicular. Para tais solos, vários autores relatam o impedimento físico que esta camada natural de adensamento representa para o desenvolvimento do sistema

radicular, dentre eles Campostrini (1997), para mamão; Suarez (2004), para cana-de-açúcar; e Santana et al. (2006), para citros.

Para o Cambissolo, a menor restrição ao desenvolvimento das raízes possivelmente está relacionado ao fato do mesmo possuir maior teor de matéria orgânica e agregados mais estáveis, resultando, assim, em poros de maior tamanho e continuidade, amenizando, desta forma, os efeitos nocivos da compactação nos níveis mais elevados de densidade.

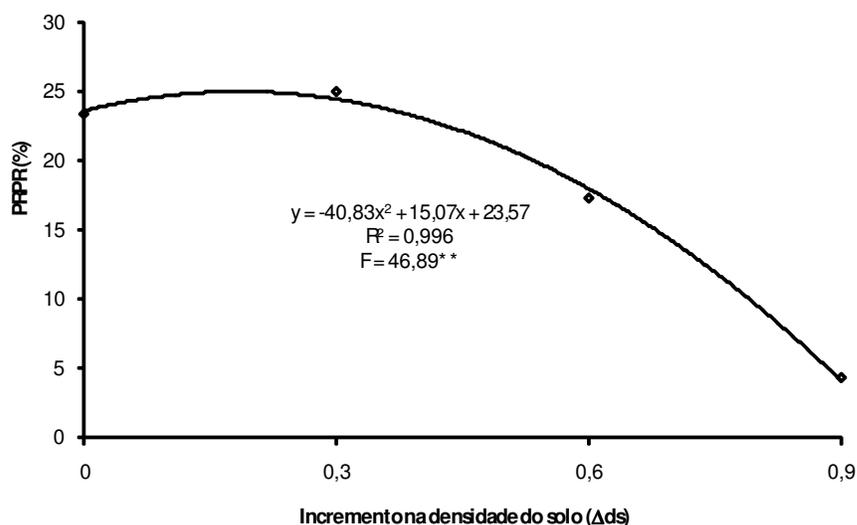


**Figura 20:** Diâmetro médio radicular na profundidade de 0,0 - 0,30 m em função do incremento na densidade do solo



**Figura 21:** Diâmetro médio radicular na profundidade 0,20 - 0,30 m em função da compactação, para o Argissolo e o Cambissolo. Obs: Barras verticais representam o desvio mínimo significativo pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O poder relativo de penetração radicular (PRPR) indica a capacidade das raízes superarem certo impedimento físico ou camada compactada existente no solo. Como a profundidade efetiva do sistema radicular do coqueiro é de aproximadamente de 0,5 - 0,8 m (Avilán et al., 1984; Cintra et al., 1992; Araújo, 2003), no presente estudo considerou-se como obstáculo a camada de 0,10 - 0,20 m de profundidade, a qual, em condições de campo, certamente a maior parte das raízes terão que ultrapassar. Para esta variável, o incremento de 0,19 da  $\Delta ds$  do solo proporcionou maior PRPR (25,0%), sendo 45,4% e 489% superior aos obtidos nos incrementos de 0,6 e 0,9 da  $\Delta ds$  do solo (Figura 22). Isso demonstra que o sistema radicular do coqueiro é sensível à compactação ou adensamento do solo.



**Figura 22:** Poder relativo de penetração radicular (PRPR) para o coqueiro anão verde em função da compactação do solo na profundidade de 0,0 - 0,30 m.

Carvalho et al. (2002) avaliaram o PRPR de sete leguminosas (*Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis*, feijão caupi, guandu, mucuna-preta, fedegoso e calopogônio) e duas gramíneas (braquiaria humidícola e cameroon), em um Latossolo Amarelo álico coeso em condição de campo, na região de Cruz das Almas-BA. Estes pesquisadores, ao final do estudo, observaram que, das espécies testadas, a *Crotalaria juncea*, o calopogônio e a braquiária humidícola apresentaram os melhores resultados de PRPR (18,1%, 16,0% e 14,1%),

demonstrando mais habilidade em explorar um maior volume de solo em profundidade.

No presente trabalho, os incrementos de 0,6 e 0,9 da  $\Delta ds$  resultaram em densidades do solo de aproximadamente 1,38 e 1,57  $Mg\ m^{-3}$ . Como nos coqueirais utilizam-se, com freqüência, máquinas agrícolas para os tratamentos fitossanitários, as roçadas, bem como a colheita, estes valores de densidade são facilmente observados nas entrelinhas, particularmente quando estas operações são realizadas com o solo apresentando elevada umidade, tornando-se, assim, um impedimento para o desenvolvimento das raízes.

Como o coqueiro é uma planta que necessita de um sistema radicular bem desenvolvido para suprir sua necessidade hídrica, a superficialidade do sistema radicular ajuda a explicar a baixa produtividade de determinados coqueirais implantados em solos pertencentes aos Tabuleiros Costeiros. Estes solos, quando se encontram com baixa umidade, devido a seus processos pedogenéticos, apresentam camadas adensadas ou coesas, as quais são altamente restritivas ao desenvolvimento das raízes.

#### **4.3.2 Efeito da umidade do solo**

De modo geral, a umidade do solo afetou o desenvolvimento radicular do coqueiro em todas as classes de raízes analisadas, sendo observado, no maior nível de umidade (incremento de  $0,04\ m^3\ m^{-3}$ ), valor máximo para as densidades radiculares.

Em relação às densidades radiculares com base no comprimento (DCR), na superfície (DSR) e no volume (DVR), os valores máximos obtidos na profundidade de 0,0 - 0,30 m foram de, respectivamente,  $1,76\ m\ L^{-1}$ ,  $6,32\ 10^{-3}\ m^2\ L^{-1}$  e  $1,99\ mL\ L^{-1}$ , para raízes da classe 1;  $0,33\ m\ L^{-1}$ ,  $2,47\ 10^{-3}\ m^2\ L^{-1}$  e  $1,55\ mL\ L^{-1}$ , para raízes da classe 2; e  $0,08\ m\ L^{-1}$ ,  $1,44\ 10^{-3}\ m^2\ L^{-1}$  e  $2,39\ mL\ L^{-1}$ , para raízes da classe 3 (Figura 23). Ao se comparar, para raízes da classe 1, os valores máximos dessas variáveis na profundidade de 0,0 - 0,10 m ( $2,01\ m\ L^{-1}$ ,  $6,52\ 10^{-3}\ m^2\ L^{-1}$  e  $1,96\ mL\ L^{-1}$ , respectivamente) com os observados na profundidade 0,0 - 0,30 m, observa-se superioridade de 14% para DCR, 3% para DSR e 26% para DVR. Para raízes mais grossas, na profundidade de 0,0 - 0,10 m, os valores máximos para DCR, DSR e DVR foram similares aos

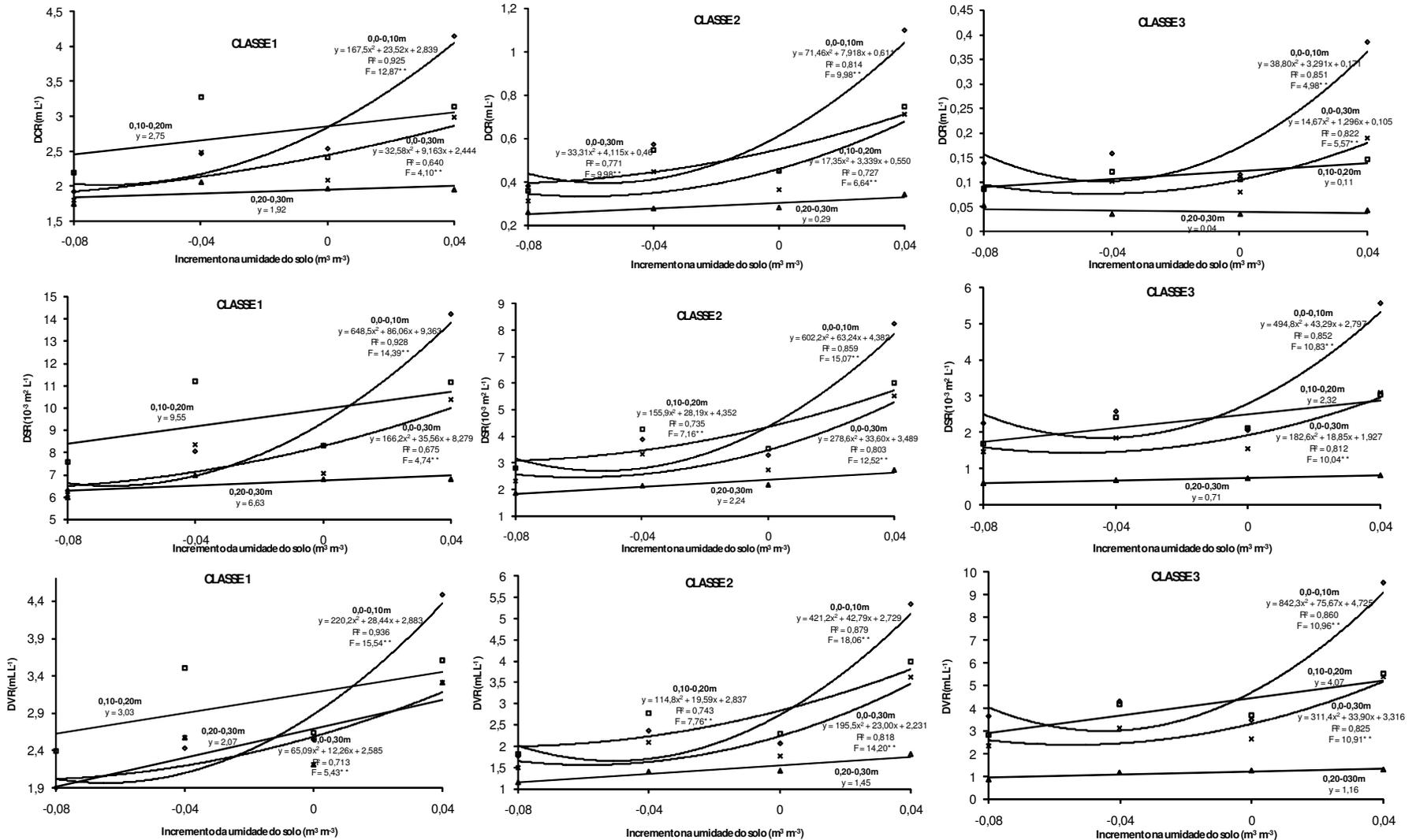
obtidos na profundidade de 0,0 - 0,30 m (respectivamente,  $0,39 \text{ m L}^{-1}$ ,  $2,72 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ L}^{-1}$ ,  $1,64 \text{ mL L}^{-1}$ , para raízes da classe 2; e  $0,10 \text{ m L}^{-1}$ ,  $1,85 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ L}^{-1}$  e  $2,29 \text{ mL L}^{-1}$ , para raízes da classe 3).

Como o coqueiro é uma planta que não possui pêlos radiculares (Child, 1974; Passos, 1998), as raízes finas, quando comparadas com as raízes de diâmetro médio e grosso, são mais eficientes na absorção de água e nutrientes por serem menos suberizada. Devido a este fato, para as plantas apresentarem níveis satisfatórios de produtividade, torna-se de fundamental importância que possuam um grande número de raízes finas.

Na profundidade de 0,0 - 0,30 m, comparando-se o valor máximo da DCR para as raízes finas (<2,00 mm) com o das demais classes, observa-se que o valor para as raízes finas é, aproximadamente, 4,3 vezes superior ao da classe 2, e 21 vezes ao da classe 3. Já para a umidade do solo, no nível mais elevado (incremento de  $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), foi observado que, para as raízes finas, o valor máximo para DCR é 42,6% superior ao do nível 2 (incremento de  $0,0 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), e 21,0% e 65,0% superior ao dos obtidos para os níveis 3 e 4 de umidade (redução de  $0,04$  e  $0,08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), respectivamente. Tal resultado demonstra a importância de se manter um nível adequado de umidade no solo para o desenvolvimento das raízes com menor diâmetro.

Na profundidade de 0,10 - 0,20 m, ocorre um incremento expressivo na quantidade de raízes da classe 1 (Figura 23), sendo obtidos valores máximos para DCR, DSR e DVR de, respectivamente,  $3,19 \text{ m L}^{-1}$ ,  $10,92 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ L}^{-1}$  e  $3,42 \text{ mL L}^{-1}$ . Para as demais classes, os valores dessas variáveis não sofreram grandes alterações, obtendo-se densidades máximas de  $0,39 \text{ m L}^{-1}$ ,  $3,07 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ L}^{-1}$ ,  $1,98 \text{ mL L}^{-1}$ , para a classe 2, e de  $0,09 \text{ m L}^{-1}$ ,  $1,75 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ L}^{-1}$ ,  $2,97 \text{ mL L}^{-1}$ , para a classe 3.

O incremento de raízes finas, na profundidade de 0,10 - 0,20 m, associado à maior umidade do solo (incremento de  $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), possivelmente se deve ao fato de que nesta profundidade, a oscilação da temperatura do solo, bem como os ciclos de umedecimento e secagem do solo, entre uma irrigação e outra foram menos intensos. Desse modo, mantiveram-se as condições mais adequadas para o desenvolvimento das raízes por um maior tempo, quando comparadas com as da camada de 0,0 - 0,10 m.



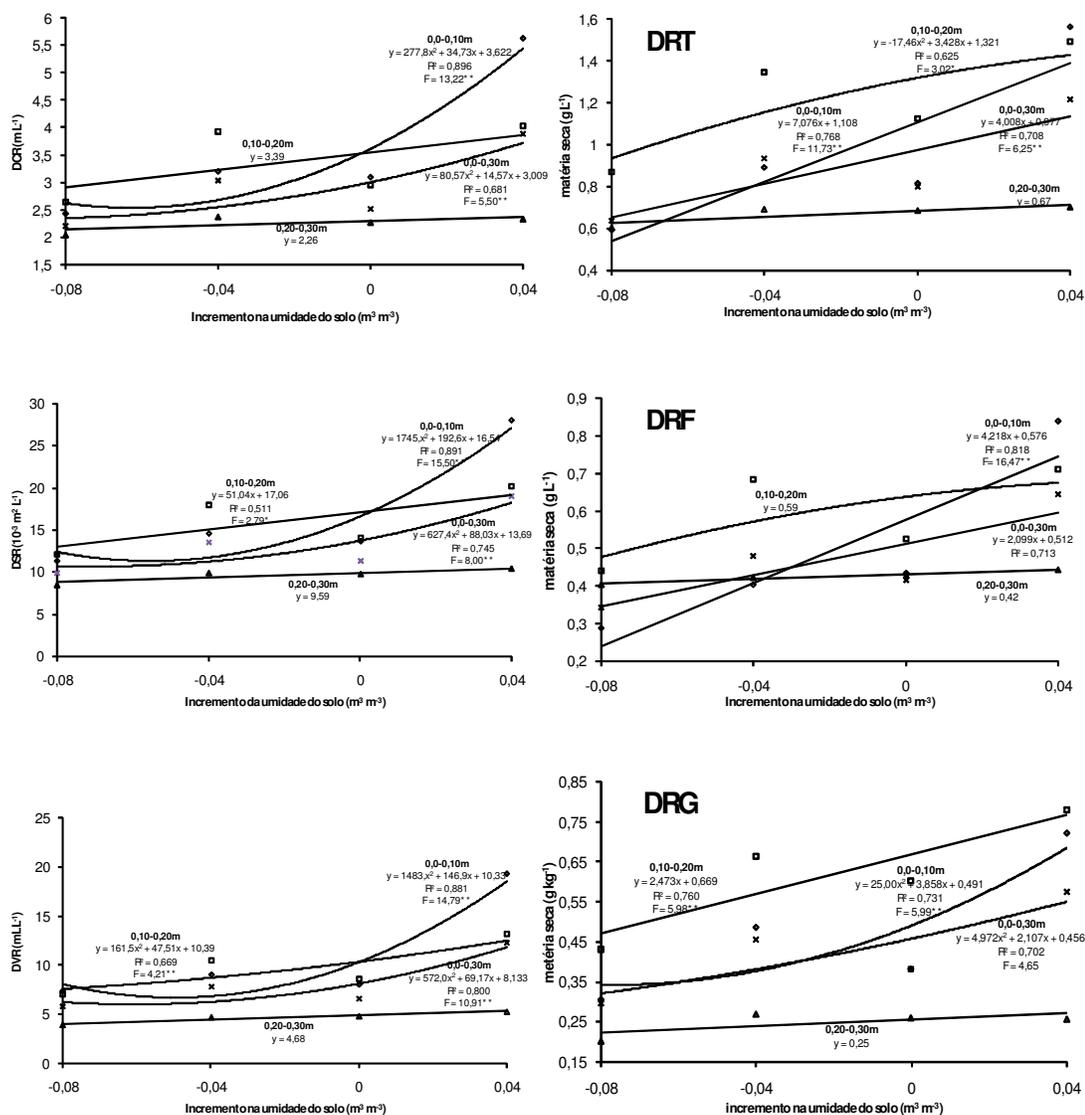
**Figura 23:** Densidade radicular do coqueiro com base no comprimento (DCR), na superfície (DSR) e no volume (DVR), para raízes com diâmetro <2,00 mm (classe 1), de 2,01 - 4,00 mm (classe 2) e >4,00 mm (classe 3), nas profundidades de 0,0 - 0,10 m, 0,10 - 0,20 m, 0,20 - 0,30 m e 0,0 - 0,30 m, em função da umidade do solo.

Engels et al. (1994), constataram que plantas de milho podem responder rapidamente ao ressecamento e reumedecimento das camadas superficiais do solo por meio do aumento do crescimento de raízes nas camadas com condições mais favoráveis. Os autores concluem que esta plasticidade no crescimento de raízes é um fator que contribui para a manutenção de um adequado estado nutricional. Segundo Stasovskl e Peterson (1993), as alterações estruturais nas raízes em resposta à seca são permanentes e o restabelecimento do crescimento, após a reidratação, envolve, usualmente, a formação de novas raízes laterais.

Como as plantas, além de raízes finas, necessitam também de raízes médias e grossas para sua sustentação, em solo úmido (incremento de  $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  na umidade), o maior desenvolvimento para as raízes das classes 2 e 3, provavelmente, esteja associado à menor resistência do solo em tais condições hídricas. Conforme Unger e Kaspar, (1994), Smith et al. (1997) e Beutler e Centurion (2003), ao se aumentar a umidade do solo, possibilitando maior facilidade das partículas do solo se movimentarem em relação às outras, reduz-se sua resistência à penetração das raízes.

Para Vasconcelos et al. (2004), a distribuição do sistema radicular no perfil do solo depende da umidade e dos ciclos hídricos, pois, como o solo seca de cima para baixo, as camadas superficiais tornam-se mais resistentes à penetração de raízes, antes das camadas mais profundas. Enquanto o sistema radicular na superfície tem seu crescimento paralisado ou até reduzido pela morte de raízes, nas camadas mais profundas, o crescimento se mantém por mais tempo, resultando em um “aprofundamento” das raízes. Além disso, os metabólitos, que seriam utilizados para a formação de raízes superficiais, podem ser utilizados na formação de raízes mais profundas.

Similarmente aos resultados obtidos para DCR, DSR e DVR nas classes 1, 2 e 3 de raízes, para densidade geral (média aritmética de cada profundidade), o incremento de  $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  na umidade do solo proporcionou condições mais favoráveis ao desenvolvimento das raízes (Figura 24).



**Figura 24:** Densidade radicular geral, nas profundidades de 0,0 - 0,10 m, 0,10 - 0,20 m 0,20 - 0,30 m e 0,0 - 0,30 m com base no comprimento (DCR), na superfície (DSR), no volume (DVR) de raízes, e também com base na matéria seca, para raízes totais (DRT), raízes finas (DRF) e raízes grossas (DRG) em função da umidade do solo.

Na profundidade de 0,0 - 0,30 m, para DCR, DSR e DVR, os valores máximos foram de  $2,34 \text{ m L}^{-1}$ ,  $10,59 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ L}^{-1}$  e  $6,04 \text{ mL L}^{-1}$ , resultando em densidades radiculares com base na massa seca, a saber, de  $0,64 \text{ g L}^{-1}$  para DRT,  $0,36 \text{ g L}^{-1}$  para DRF e  $0,22 \text{ g L}^{-1}$  para DRG. Já para a profundidade de 0,0 - 0,10 m, os pontos de máxima para DCR, DSR e DVR foram de  $2,53 \text{ m L}^{-1}$ ,  $11,23 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ L}^{-1}$ ,  $6,70 \text{ mL L}^{-1}$ . Nesta profundidade, para as densidades com base na matéria seca de raiz, obteve-se,  $0,65 \text{ g L}^{-1}$  para DRT,  $0,33 \text{ g L}^{-1}$  para DRF e  $0,33 \text{ g L}^{-1}$  para DRG. Para profundidade de 0,10 - 0,20 m, devido aos motivos já

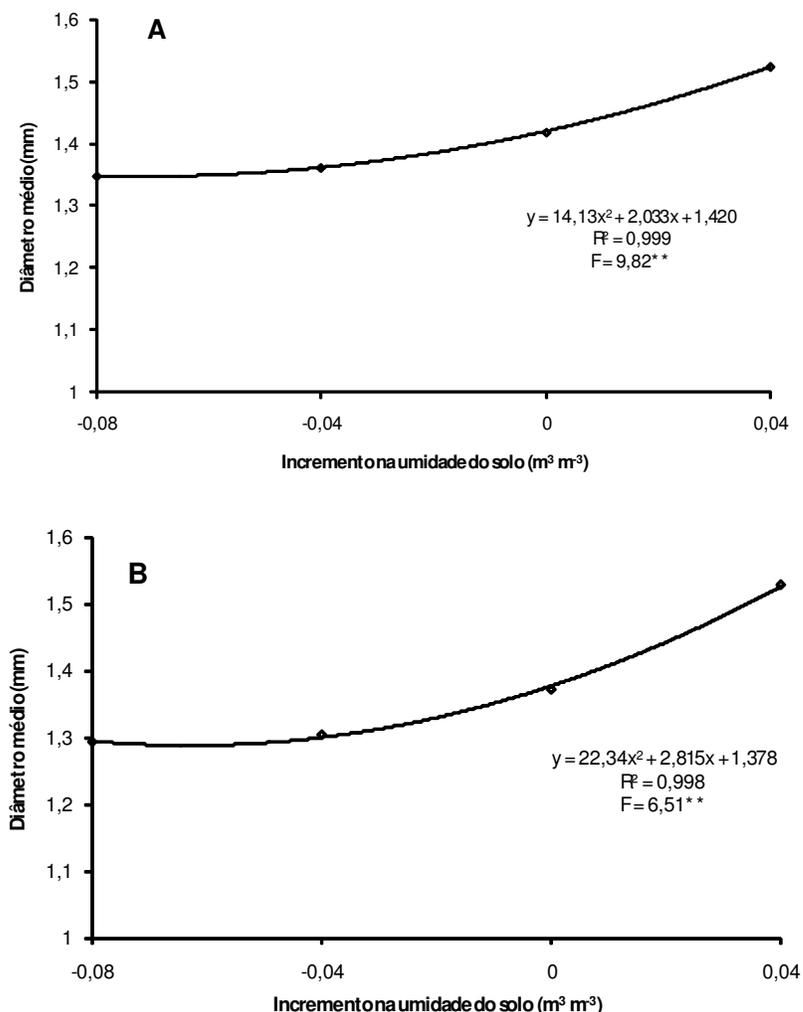
comentados, novamente se observam valores mais elevados, sendo de  $3,83 \text{ m L}^{-1}$ ,  $12,65 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ L}^{-1}$ ,  $7,54 \text{ mL L}^{-1}$  para DCR, DSR e DVR, e de  $1,26 \text{ g L}^{-1}$ ,  $0,66 \text{ g L}^{-1}$  e  $0,64 \text{ g L}^{-1}$  para DRT, DRF e DRG.

Além da menor resistência à penetração radicular quando o solo se encontra em níveis mais elevados de umidade, o maior crescimento das raízes, possivelmente, deve-se também à continuidade da disponibilidade hídrica, permitindo, assim, condições adequadas para a diferenciação e expansão das células meristemáticas do sistema radicular. Para os níveis mais baixos de umidade, bem como na camada de 0,0 - 0,10 m de profundidade, devido às irrigações terem sido efetuadas a cada de 2 - 3 dias, os ciclos de umedecimento e secagem do solo foram mais intensos, resultando assim em condições mais restritivas para as raízes se desenvolverem.

Resultados similares a estes são relatados por Costa et al. (2003) para o melão, em que a maior lâmina de água aplicada (1,3 ETc) proporcionou maior desenvolvimento radicular.

A umidade do solo afetou também o diâmetro médio das raízes nas profundidades de 0,0 - 0,30 m (Figura 25A) e 0,0 - 0,10 m (Figura 25B). Em ambas as profundidades, com o aumento da umidade do solo, ocorreu um aumento gradual desta variável, sendo os diâmetros máximos (1,52 mm e 1,53 mm, respectivamente) determinados com o incremento de  $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ .

Este fato de as raízes aumentarem o seu diâmetro quando há maior disponibilidade hídrica pode estar associado às condições mais favoráveis para as células radiculares se expandirem, visto que, nos níveis mais baixos de umidade, as raízes podem ter tido dificuldade para dilatar os poros do solo para seu desenvolvimento, face à alta resistência. Conforme Oliveira et al. (2003); Silva et al. (2003); Streak et al. (2004), com o aumento da umidade, ocorre um espessamento do filme de água entre as partículas, facilitando, assim, o deslocamento das mesmas.



**Figura 25:** Diâmetro médio radicular nas profundidades 0,0 - 0,30 m (A) e 0,0 - 0,10 m (B) em função da umidade do solo.

#### 4.3.3 Efeito do solo

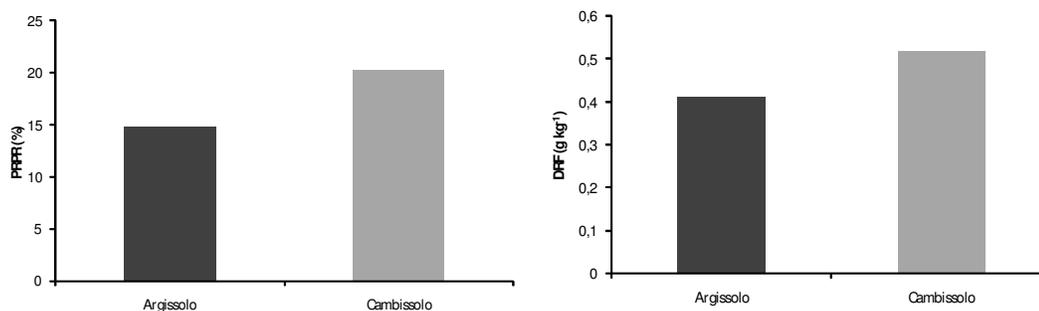
As classes de solos atuaram de forma diferenciada para o poder relativo de penetração radicular (PRPR) e densidade de raízes finas (DRF) na profundidade de 0,0 - 0,30 m (Figura 26). Também houve diferença entre os solos para o diâmetro médio na camada de 0,0 - 0,30 m de profundidade (Figura 27A) e 0,0 - 0,10 m (Figura 27B).

Para todas as variáveis e em ambas as profundidades, as plantas cultivadas no Cambissolo apresentaram valores superiores aos das cultivadas no Argissolo. Na profundidade de 0,0 - 0,30 m, o PRPR, a DRF e o diâmetro médio de raízes das plantas cultivadas no Cambissolo foram superiores em 36,0%,

27,9% e 5,8% aos das plantas cultivadas no Argissolo. Na profundidade de 0,0 - 0,10 m, para o diâmetro médio (Figura 27B), esta diferença foi maior, sendo o diâmetro médio radicular das plantas crescidas no Cambissolo 8,2%, superior aos das plantas cultivadas no Argissolo.

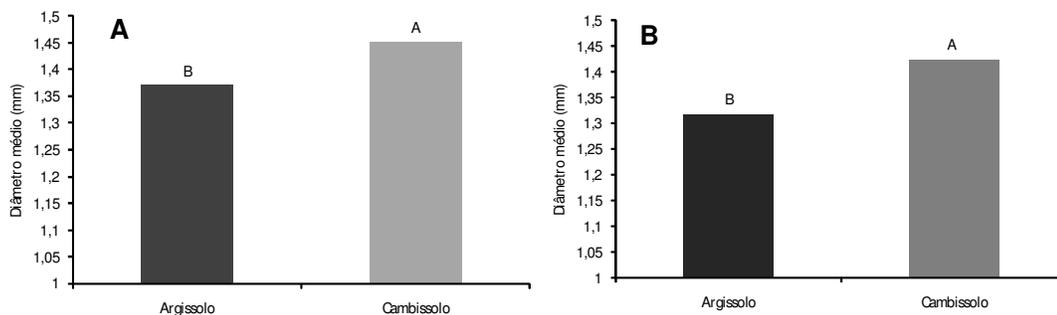
Esses resultados mais favoráveis para o Cambissolo, possivelmente, estão relacionados ao seu teor mais elevado de matéria orgânica e, também, ao fato deste solo apresentar agregados mais estáveis. Estes fatores, provavelmente, amenizaram o efeito dos níveis elevados de compactação, bem como os de umidade restritiva. Segundo Brady (1989), devido às propriedades da matéria orgânica, solos com teor mais elevado da mesma retêm mais água, mantendo, assim, condições hídricas mais favoráveis ao desenvolvimento do sistema radicular.

Além de reter mais água, o teor mais elevado de matéria orgânica do Cambissolo fez este solo menos susceptível à compactação, como pode ser verificado pelas densidades alcançadas no teste de Proctor Normal (Figura 3).



**Figura 26:** Poder relativo de penetração radicular (PRPR) e densidade de raízes finas (DRF), na profundidade de 0,0 - 0,30 m, em função das diferentes classes de solo.

Conforme Zhang et al. (1997), Ball, et al. (2000) e Braida et al. (2006), a menor compactação em solos com maior teor de matéria orgânica se deve: ao seu efeito amortecedor, que resulta em dissipação de parte da energia aplicada; à sua capacidade de retenção da água, que, ao retê-la junto de suas partículas, impede que a água atue como lubrificante entre as partículas minerais; à sua capacidade de estabelecer ligações entre as partículas de solo, aumentando a coesão entre as mesmas, e a sua baixa densidade, de modo que, ao aumentar o teor de matéria orgânica, diminui a densidade da mistura solo e matéria orgânica.



**Figura 27:** Diâmetro médio radicular na profundidade de 0,0 - 0,30 m (A) e 0,0 - 0,10 m (B) em função das diferentes classes de solo.

Associado a estes fatores, a superioridade do Cambissolo nestas variáveis, possivelmente, deve-se também ao fato deste solo apresentar poros mais contínuos e de maior diâmetro, que, além de permitirem maior desenvolvimento de raízes em profundidade, em diâmetro médio e de raízes finas, propicia uma maior difusão de oxigênio no solo, fundamental para a atividade das raízes.

Xu et al. (1992) investigaram o efeito da compactação na relação entre o coeficiente de difusão de gás no solo e no ar atmosférico ( $D/D_o$ ) em dois solos de textura arenosa e dois de textura mais fina. Os dois solos franco-arenosos apresentaram poros de aeração maior que  $0,3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e razão entre coeficientes difusão ( $D/D_o$ ) maior que 0,15, chegando até a 0,3. Nos solos franco-argilosos, a maior parte dos valores de porosidade de aeração foi inferior a  $0,3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , resultando na redução da difusão de gás no solo, que foi de praticamente zero em porosidades de aeração inferior a  $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Para estes autores, solos com textura mais gorsseira ou agregados mais estáveis apresentam poros contínuos, resultando em maiores coeficientes de difusão.

## 5. RESUMO E CONCLUSÕES

São possíveis as seguintes conclusões, em conformidade com os resultados experimentais obtidos:

1. Os solos aturam de forma diferenciada no suprimento de nutrientes para as plantas, sendo determinado teor mais elevado de Mg e Cu nas plantas cultivadas no Cambissolo e de K e Ca nas plantas cultivadas no Argissolo.
2. No Argissolo, o incremento da umidade do solo alterou de forma significativa a absorção de nitrogênio, fazendo com que as plantas cultivadas nos níveis mais elevados de umidade apresentassem maior teor deste elemento.
3. A compactação do solo proporcionou um aumento o teor de manganês, e uma redução no teor de cloro nas folhas das plantas cultivadas no Argissolo.
4. O Cambissolo, devido a suas propriedades físicas e químicas, foi menos afetado pela compactação, mantendo mais estável o fornecimento de nutrientes para as plantas.
5. Após 10 meses de experimento, nas profundidades de 0,0 - 0,10 m e 0,10 - 0,20 m, foram determinados teores mais elevados de Mg, Al, H + Al e C no Cambissolo e de K, Ca, Na e P no Argissolo.

6. A compactação afetou o pH do solo, sendo os menores valores determinados com incrementos que variaram de 0 a 0,3 da  $\Delta ds$  do solo.
7. O incremento da umidade do solo, associado aos baixos valores de pH no Cambissolo resultou em maior quantidade de alumínio na solução do solo.
8. O nível 1 de compactação do solo foi o que promoveu maior desenvolvimento de raízes finas, resultando em maior densidade radicular por comprimento.
9. Para a média geral por camada estudada, incrementos entre 0 a 0,3 da  $\Delta ds$  do solo proporcionaram maiores valores de densidade radicular por comprimento, volume, superfície e matéria seca de raízes.
10. Para o Argissolo, incrementos na densidade do solo superiores a 0,6 da  $\Delta ds$  o tornam severamente restritivo ao desenvolvimento radicular do coqueiro.
11. Em todas as profundidades estudadas, o nível mais elevado de umidade favoreceu o desenvolvimento das raízes, resultando em maiores valores de densidade radicular.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrianual (2001) Balanço mundial. São Paulo: FNP Consultoria e Comércio, p. 314-323.
- Alakukku, L., Weiskopf, P., Chamen, W.C.T., Tijink, F.G.J., Van Der Linden, J.P., Pires, S., Sommer, C., Spoor, G. (2003) Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part I – Machine/soil interactions, *Soil and Tillage Research*, 73:45-160.
- Anderson, J.M., Ingram, J.S.I. (1993) *Tropical soil Biology and Fertility*. 2. ed. Wallingford: Cob. Internacional, 221p.
- Almeida, J.A., Bertol, I., Leite, D., Amaral, A.J.A., Zoldan Júnior, W.A. (2005) Propriedades químicas de um Cambissolo Húmico sob preparo convencional e semeadura direta após seis anos de cultivo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 29:437-445.
- Alvarenga, R. C., Costa, L.M, Moura Filho, W., Regazzi, A.J. (1996) Crescimento de raízes de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 20:319-326.
- Alves, E.A.B. (2003) *Estabelecimento de faixas de teores adequados de nutrientes foliares em maracujazeiro amarelo, mamoeiro formosa e coqueiro anão verde cultivados no Norte Fluminense*. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 64p.

- Alves, V.G., Andrade, M.J.B., Corrêa, J.B.D., Moraes, A.V., Silva, M.V. (2001) Crescimento e produção de vagens do feijoeiro em diferentes graus de compactação e classes de solos. *Ciência Agrotécnica*, Lavras, 25 (5):1051-1062.
- Andrade, A.G. (1997) *Ciclagem de nutrientes e arquitetura radicular de leguminosas arbóreas de interesse para revegetação de solos degradados e estabilização de encostas*. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) – Seropédica - RJ, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ.
- Arachchi, L.P.V. (1998) Preliminary requirements to design a suitable drip irrigation system for coconut (*Cocos nucifera* L.) in gravelly soils. *Agricultural Water Management*. 38 (2):169-180.
- Araújo, M.C. (2003) *Demanda hídrica e distribuição de raízes do coqueiro anão verde (Cocos nucifera L.) na região Norte Fluminense*. Tese (Mestrado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 46p.
- Avilán, L., Rivas, N., Sucre, R. (1984) Estudio del sistema radical del cocotero (*Cocos nucifera* L.). *Oleagineux*, 39 (1):13-23.
- Azevedo, P.V.; Sousa, I.F.; DA Silva, B.B.; Da Silva, V.P.R. (2006) Water-use efficiency of dwarf-green coconut (*Cocos nucifera* L.) orchards in northeast Brazil. *Agricultural water management*, 84:259-264.
- Ball, B.C.; Campbell, D.J., Hunter, E.A. (2000) Soil compactibility in relation to physical and organic properties at 156 sites in UK. *Soil Till. Res.*, 57:83-91.
- Bengough, A. G.; Croser, C.; Pritchard, J. (1997) A biophysical analysis of root growth under mechanical stress. *Plant and Soil*, Dordrecht, 189:55-164.
- Bernardes R.S. (2005) *Condutividade hidráulica de três solos da região Norte Fluminense*. Tese (Mestrado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes - RJ. Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 71p.
- Beutler, A.N., Centurion, J.F. (2003) Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. Brasília, 38 (7):849-856.

- Beutler, A.N., Centurion, J.F. (2004) Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 39 (6):581-588.
- Beutler, A.N., Centurion, J.F.; Centurion, M.A.P., Freddi, O.S., Sousa Neto, E.L., Leonel, C.L., Da Silva, A.P. (2007) Traffic soil compaction of an oxisol related to soybean development and yield. *Scientia Agrícola*, Piracicaba, 64 (6):608-615.
- Bordin, I., Neves, C.S.V.J., Azevedo, M.C.B., Vidal, L.H.I. (2005) Desenvolvimento de mudas de aceroleira propagandas por estacas e sementes em solo compactado. *Ciência Rural*, Santa Maria, 35 (3):530-536.
- Borkert, C.M., Pavan, M.A., Bataglia, O.C. (2001) Disponibilidade e avaliação de elementos catiônicos: ferro e manganês. In: Ferreira, M.E.; Da Cruz, M.C.P.; Raij, B.; Abreu, C.A. *Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura*. Jaboticabal - SP. Ed. Legis Summa Ltda. Cap.7. p.151-187.
- Braccini, M.C.L., Martinez, H.E.P., E Braccini, A.L., Mendonça, S.M. (2000) Avaliação do pH da rizosfera de genótipos de café em resposta à toxidez de alumínio no solo. *Bragantia*, Campinas, 59 (1):83-88.
- Brady, N.C. (1989) *Natureza e propriedades dos solos*. Tradução de Antonio B. Neiva Figueiredo. 7.ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 898p.
- Braida, J.A., J Reichert, M.J., Veiga, M., Reinert, D.J. (2006) Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30:605-614.
- Camargo, O.A., Alleoni, L.R.F. (1997) *Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas*. Piracicaba, 132p.
- Campostrini, E. *Comportamento de quatro genótipos de mamoeiro (Carica papaya L.) sob restrição mecânica ao crescimento do sistema radicular*. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 166p.
- Carvalho Júnior, I.A., Fontes, L.E.F., Costa, L.M. (1998) Modificações causadas pelo uso e a formação de camadas compactadas e, ou, adensadas em um

- Latossolo Vermelho-escuro textura média, na região do cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 22:505-514.
- Carvalho, S.R.L., Rezende, J.R., Fernandes, J.C., Pereira, A.P. (2002) Caracterização e avaliação de leguminosas e gramíneas com alto poder relativo de penetração de raízes em solo coeso dos tabuleiros costeiros do recôncavo baiano - Etapa I. *Magistra*, Cruz das Almas, 14:1.
- Child, R. (1974) *Coconut*. London: Longman. 335p.
- Cintra, F.L.D., Fontes, H.R., Leal, M.L.S. (1996) Distribuição do sistema radicular do coqueiro gigante do Brasil submetido a diferentes sistemas de manejo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 20:327-332.
- Cintra, F.L.D., Leal, M.L.S., Passos, E.E.M. (1992) *Avaliação da distribuição do sistema radicular de coqueiros anões*. Aracaju: EMBRAPA – CNPCo. (Comunicado Técnico, 36). 8p.
- Cintra, F.L.D., Portela, J.C., Nogueira, L.C., Gornat, B. (2005) Distribuição de raízes do coqueiro anão verde sob sistemas de irrigação localizada em solos dos tabuleiros costeiros. *Boletim de pesquisa e desenvolvimento/Embrapa Tabuleiros Costeiros*, n.06, 17p.
- Ciotta, M.N., Bayer, C., Ernani, P.R., Fontoura, S.M.V., Albuquerque, J.A., Wobeto, C. (2002) Acidificação de um Latossolo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 26:1055-1064.
- Corrêa, J.B.D., Andrade, L.A., Dias Júnior, M.S., Alves, V.G. (1998) Efeito da compactação na concentração foliar de nutrientes na cana-de-açúcar em três tipos de solos. In: FERTBIO,1998, Lavras. Anais, Lavras-MG: UFLA/SBCS/SBM, p.91.
- Costa, L.M., Abrahão, W.A.P. (1996) Compactação e adensamento de solos relacionados às propriedades químicas, físicas e sedimentológicas. In: Alvarez, V.V.H., Fontes, L.E.F., Fontes, M.P.F., eds. O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Universidade Federal de Viçosa, p.429-443.

- Costa, M.C., Castro Silva, M.C., Medeiros, J.F., Porto Filho, F.Q. (2003) Distribuição do sistema radicular do meloeiro sob diferentes lâminas e salinidades da água de irrigação. *Irriga. Botucatu*. 8(2):106-112.
- Cuenca, M.A.G., Siquiera, L.A. (2003) Coco produção: aspectos econômicos da cocoicultura. Embrapa informação tecnológica, 1º ed.nº27, p.10-13.
- Da Ros, C.O., Secco, D., Fiorin, G.W. (1997) Manejo do solo a partir de campo nativo: efeito sobre a estabilidade da estrutura ao final de cinco anos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 21:241-247.
- Dias Júnior, M.S. (2000) Compactação do solo. In: Novais, R.F., Alvarez, V.V.H. e Schaefer, C.E.G.R., eds. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, p.55-94.
- Dias Júnior, M.S., Pierce, F.J.O. (1996) O processo de compactação do solo e sua modelagem. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 20:175-182.
- EMBRAPA (1997) *Manual e métodos de análises de solo*. 2º ed., rev. Atual. Rio de Janeiro. CNPS, 212p.
- EMBRAPA (2003) *Coco produção aspectos técnicos*. Aracaju - SE, Centro de Pesquisa Agropecuária dos Tabuleiros Costeiros, 106p. (Frutas do Brasil, 27).
- EMBRAPA (2006) *Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos*. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos – Embrapa Solos, 306p.
- Engels, C.; Mollenkopf, M.; Marcschner, H. (1994) Of drying and rewetting the topsoil on root growth of maize and rape in different soil depths. *Zeits. Pflanz. Bodenk*, 157:139-144.
- Foloni, J.S.S., Calonego, J.C., Lima, S.L. (2003) Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 38 (8):947-953.
- Foloni, J.S.S., Lima, S.L., Büll, T.L. (2006) Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 30:49-57.
- Gomes, R.P. (1992) *O coqueiro-da-baia*. 6. ed. São Paulo: Nobel, 111p.
- Guimarães, C.M., Stone, L.F., Moreira, A.A. (2002) Compactação do solo na cultura do feijoeiro. II: efeito sobre o desenvolvimento radicular e da parte

- aérea. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, 6 (2):213-218.
- Hakansson, I., Stenberg, M., Rydberg, T. (1998) Long term experiments with different depths of mouldboard plough in Sweden. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, 46:209-223.
- Horn, R., Lebert, M. (1994) Soil compactability and compressibility. In: Soane, B.D.; Van Ouwerkerk, C. Soil compaction in crop production. *Amsterdam: Elsevier*, 1994. p.45-69.
- IBGE (2005) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br> Acesso em 12/jan/2008.
- Imhoff, S., Silva, A. P., Tormena, C. A. (2000) Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 35 (7):1493-1500.
- IRHO – Coconut (1992) *Climatology*. *Oleagineux*, 47 (6): 331-332.
- Jackson, M.L. (1965) *Soil Chemical analysis*. New Jersey: Prentice Hall, 498p.
- Kiehl, E.J. (1979) *Manual de edafologia: relações solo-planta*. São Paulo: Editora Agronômica, Ceres, 262p.
- Kondo, M.K., Dias Junior, M.S. (1999) Compressibilidade de três latossolos em função da umidade e uso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 23:211-218.
- Letey, J. (1985) Relationship between soil physical properties and crop production. *Advances in Soil Science*, 1:277-294.
- Lipiec, J., Hatano, R. (2003) Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*, 116:107–136.
- Malavolta, E., Vitti, G. C., Oliveira, S. A. (1997) *Avaliação do estado nutricional das plantas; princípios e aplicações*. 2.ed. Piracicaba: Potafos, 319p.
- Mantovani, E.C. (1992) Relação entre o teor de umidade e compactação de solo para diferentes classes de Latossolos. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Londrina. Anais. SBEA, p1384.
- Marschner, H. (1995) *Mineral Nutrition of higher plants*. 2. ed. San Diego: Academic Press, 889p.

- Materechera, S.A., Alston, A.M., Kirby, J.M., Dexter, A.R. (1992) Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil. *Plant Soil*, 144:297-303.
- Medeiros, R.D. (2004) *Efeitos da compactação do solo e da umidade sobre a absorção de N,P,K, os componentes de produção e a produtividade de grãos de arroz*. Tese (Doutorado) – Lavras – MG. Universidade Federal de Lavras - UFLA, 162p.
- Medeiros, R.D., Soares, A.A., Guimarães, R.M. (2005) Compactação do solo e manejo da água I: efeitos sobre a absorção de N, P, K, massa seca de raízes e parte aérea de plantas de arroz. *Ciência Agrotécnica*, Lavras, 29 (4):940-945.
- Miranda, F.R., Gomes, A.R.M. (2006) Manejo da irrigação do coqueiro anão. Circular técnica, n.25, Embrapa Tabuleiros Costeiros. 8 p.
- Miranda, F.R., Montenegro, A.A.T., De Lima, R.N., Rossetti, A.G., Freitas, D.J.A. (2004) Distribuição do sistema radicular de plantas jovens de coqueiro-anão sob diferentes freqüências de irrigação. *Revista Ciência Agronômica*, 35 (2):309–318.
- Miranda, F.R., Oliveira, V.H., Santos, F.J.S. (1998) Desenvolvimento de plantas jovens de coqueiro anão (*Cocos nucifera* L.) submetidas a diferentes regimes de irrigação. Fortaleza: Embrapa-CNPAT, 4p.
- Miyazawa, M., Pavan, M.A., Martin Neto, L. (1993) Provável mecanismo de liberação e manganês no solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 28:725-731.
- Monte Leite, I.R., Encarnação, C.R.F. (2002) Fenologia do coqueiro na zona costeira de Pernambuco. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 37 (6):745-752.
- Moraes, M.H., Benez, S.H., Libardi, P.L. (1995) Efeitos da compactação em algumas propriedades físicas do solo e seu reflexo no desenvolvimento das raízes de plantas de soja. *Bragantia*, 54:393-403.
- Moraes, S.O., Libardi, P.L., Dourado Neto, D. (1993) Problemas metodológicos na retenção da água pelo solo. *Scientia Agrícola*, Piracicaba, 50 (3):383-391.

- Müller, M.M.L., Ceccon, G., Rosolem, C.A. (2001) Influência da compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento radicular de plantas de adubação verde de inverno. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 25:531-538.
- Nogueira, L.C., Nogueira, L.R.Q., Miranda, F.R. (1998) Irrigação do coqueiro. In: Ferreira, J.M.S., WarWick, D.R.N., Siqueira, L.A. (eds.) *A cultura do coqueiro no Brasil*. 2.ed. Brasília: EMBRAPA-CPATC. Cap. 7. p.159-188.
- Novais, R.F., Smyth, T.J. (1999) *Fósforo em solo e planta em condições tropicais*. Viçosa. Universidade Federal de Viçosa, 399p.
- Oliveira, G.C., Dias Junior, M.S., Resck, D.V.S., Curi, N. (2003) Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 38 (2):291-299.
- Oliveira, T.S. (1992) *Efeitos dos ciclos de umedecimento e secagem sobre propriedades físicas e químicas de quatro Latossolos brasileiros*. Tese (Mestrado) – Viçosa – MG, Universidade Federal de Viçosa – UFV, 104p.
- Passos, E.E.M. (1998) Ecofisiologia do coqueiro. In: Ferreira, J.M.S., WarWick, D.R.N., Siqueira, L.A. (eds.) *A cultura do coqueiro no Brasil*. 2.ed. Brasília: EMBRAPA-CPATC. Cap. 3. p.65-72.
- Pavan, M.A., Miyazawa, M. (1984) Disponibilidade de manganês no solo: dificuldades e problemas na interpretação da análise para fins de fertilidade. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 8:285-289.
- Peçanha, A.L. (2007) *Relações hídricas e trocas gasosas do coqueiro anão verde em função da compactação, lâmina de irrigação e classe de solo*. Tese (Mestrado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 73p.
- Posse, R.P. (2005) *Relações hídricas em plantas de coqueiro anão verde (Cocos nucifera L.) na Região Norte Fluminense*. Tese (Mestrado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 104p.
- Queiroz-Voltan, R.B., Nogueira, S.S.S., Miranda, M.A.C. (2000) Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 35:929-938.

- Rezende, M.A., Resende, P.C.S., Lima, A.B., Bruder, E.M. Rodrigues, V.A. (2003) Estudo do crescimento do sistema radicular do feijoeiro sob diferentes níveis de compactação, resistência mecânica e umidade do solo. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 29., 2003, Ribeirão Preto-SP. Anais Ribeirão Preto:UNESP, 4p. CD-ROM.
- Ribeiro, M.A.V. (1999) *Resposta da soja e do eucalipto a fósforo em solos de diferentes texturas, níveis de densidade e de umidade*. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras-UFLA, Lavras-MG. 71p.
- Rocha, F.A., Martinez, M.A., Matos, A.T., Cantarutti, R.B., Da Silva, J.O. (2008) Modelo numérico do transporte de nitrogênio no solo. Parte II: Reações biológicas durante a lixiviação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, 12 (1):54-61.
- Rosolem, C.A., Almeida, A.C.S., Sacramento, L.V.S. (1994a) Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. *Bragantia*, Campinas, 53:259-266.
- Rosolem, C.A., Vale, L.S.R., Grassi, Filho, H., Moraes, M.H. (1994b) Sistema radicular e nutrição do milho em função da calagem e da compactação do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 18:491-497.
- Santana, M.B., Silva Souza, L., Souza, L.D., Fontes, L.E.F. (2006) Atributos físicos do solo e distribuição do sistema radicular de citros como indicadores de horizontes coesos em dois solos de tabuleiros costeiros do estado da Bahia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 30:1-12.
- Santos, A.L. (2002) *Estabelecimento de normas de amostragem foliar para avaliação do estado nutricional e adubação mineral do coqueiro anão verde na região Norte Fluminense*. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 83p.
- Silva, A.P., Kay, B.D., Perfect, E. (1994) Characterization of the least limiting water range. *Soil Science Society of America Journal*. Madison, 58 (6):1775-1781.

- Silva, A.P., Libardi, P.L., Camargo, O.A. (1986) Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Viçosa, 10:91-95.
- Silva, R.B., Dias Junior, M.S., Silva, F. A. M., Fole, S. M. (2003) O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latossolo dos cerrados. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, Viçosa, 27:973-983.
- Silva, R.H., Rosolem, C.A. (2001) Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Viçosa, 25:253-260.
- Silva, V.R., Reinert, D.J., Soares, J.M. (2002) Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. I – Estado inicial de compactação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 26:1-8.
- Singh, B.P., Sainju, U.M. (1998) Soil physical and morphological properties and root growth. *Hort Science*, 33 (6):966-971.
- Siqueira, E.R., Ribeiro, F.E., Aragão, W.M., Tupinambá, E.A. (1998) Melhoramento genético do coqueiro. In: Ferreira, J.M.S., WarWick, D.R.N., Siqueira, L.A. (eds.) *A cultura do coqueiro no Brasil*. 2.ed. Brasília: EMBRAPA-CPATC. Cap. 3. p.65-72.
- Siqueira, J.O., Moreira, F.M.S. (2001) *Biologia e bioquímica do solo*. Editora UFLA, 291p.
- Smith, C. W., Johnston, M. A., Lorentz, S. (1997) The effect of soil compaction and soil physical properties on the mechanical resistance of South African forestry soils. *Geoderma*, Amsterdam, 78:93-111.
- Soane, B.D., Van Ouwerkerk, C. (1994) Soil compaction in crop production. In: Soane, B.D., Van Ouwerkerk, C. (Ed.). *Soil compaction problems in world agriculture*. *Elsevier*, Amsterdam, p.1-21.
- Sobral, L.F. (1998) Nutrição e adubação do coqueiro. In: Ferreira, J.M.S., WarWick, D.R.N., Siqueira, L.A. (eds.) *A cultura do coqueiro no Brasil*. 2.ed. Brasília: EMBRAPA-CPATC. Cap. 3. p.65-72.

- Souza, I.F., Da Silva, V.P.R., Azevedo, P.V.; Da Silva, B.B.; Cintra, F.L.D. (2006) Estimativa da evapotranspiração do coqueiro irrigado pelo método do balanço hídrico no solo. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 14 (1):33-42.
- Souza, L.S., Souza, L.D., Caldas, R.C. (2001) Identificação da coesão com base em atributos físicos convencionais em solos dos tabuleiros costeiros. In: Anais. Coesão em Solos dos Tabuleiros Costeiros, Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju-SE. 169-190.
- Souza, M.S. (2004) *Caracterização do intervalo hídrico ótimo de três solos da Região Norte Fluminense*. Tese (Mestrado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes - RJ. Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 72p.
- Stasovski, E., Peterson, C.A. (1993) The effects of drought and subsequent rehydration on the structure, vitality and permeability of *Allium cepa* L. adventitious roots. *Canadian Journal of Botany*, 71:700-707.
- Stirzaker, R.J., Passioura, J.B., Wilms, Y. (1996) Soil structure and plant growth: Impact of bulk density and biopores. *Plant and Soil*, 185:151-162.
- Streck, A.C., Dalvan Reinert, J, Reichert, J.M., Kaiser, D.K. (2004) Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. *Ciência Rural*, Santa Maria. 34 (3):755-760.
- Strong, D. T., Fillery, I. R. P. (2002) Denitrification response to nitrate concentrations in sandy soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 24:945-954.
- Suarez, G. A. S. (2004) *Minimização das restrições físicas da camada adensada dos solos de tabuleiros e seu efeito no desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar*. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes - RJ. Universidade estadual do Norte Fluminense – UENF, 122p.
- Taiz, L., Zeiger, E. (2004) *Plant physiology*. Tradução de Eliane Romanato Santarém et al. 3 ed. Porto Alegre, Artmed, 719p.
- Tardieu, F. (1988) Analysis of spatial variability of maize root density: I: effect of wheel compaction on the spatial arrangement of roots. *Plant and Soil*, 107: 259-266.

- Tavares Filho, R., Ralisch, R., Guimarães, M.F., Medina, C.C., Balbino, L.C., Neves, C.S.V.J. (1999) Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 23:393-399.
- Teixeira, I.R., Souza, C.M., Borém, A., Da Silva, G.F. (2003) Variação dos valores de pH e dos teores de carbono orgânico, cobre, manganês, zinco e ferro em profundidade em Argissolo vermelho-amarelo, sob diferentes sistemas de preparo de solo. *Bragantia*, Campinas, 62 (1)119-126.
- Teixeira, L.A.J., Silva, J.A.A. (2003) Nutrição mineral de populações e híbridos de coqueiro (*Cocos nucifera* L.) cultivados em Bebedouro (SP). *Revista Brasileira de Fruticultura*, Jaboticabal, 25 (2)371-374.
- Tormena, C. A., Silva, A. P., Libardi, P. L. (1998) Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 22:573-581.
- Tormena, C.A., Barbosa, C.M., Costa, A.C.S., Gonçalves, A.C.A. (2002) Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. *Scientia Agricola*, Piracicaba, 59 (4):795-780.
- Unger, W. P., Kaspar, T. C. (1994) Soil compaction and root growth: a review. *Agronomy Journal*, Madison, 86:759-766.
- Vasconcelos, A.C.M., Prado, H., Landell, M.G.A. (2004) Desenvolvimento do Sistema Radicular da cana-de-açúcar e características físico-hídricas e químicas dos ambientes de produção. *Projeto Rhizocana: relatório de pesquisa*, 31p.
- Vega, F.V.V., Bovi, M.L.A., Godoy Júnior, G., Berton, R.S. (2005) Lodo de esgoto e sistema radicular da pupunheira. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*. 29:259-268.
- Villani, E.M.A. Novais, R.F., Barros, N.F., Fontes, L.E.F., Neves, J.C.L. (1993) Difusão de fósforo em solos com diferentes texturas e níveis de umidade. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 17 (3):343-347.

- Weirich Neto, P.H., Da Rosa, A.L.T., Gomes, J.A. (2002) Suscetibilidade de dois tipos de solo à compactação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, 6 (2):349-353.
- Wraith, J.M., Wright, C.K. (1998) Soil water and root growth. *HortScience*, 33 (6):951-959.
- Xu, X., Nieber, J.L., Gupta, S.C. (1992) Compaction effect on the gás diffusion coefficient in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 56:1743-1750.
- Zanão Júnior, L.A., Lana, R.M.Q., Guimarães, E.C. (2007) Variabilidade espacial do pH, teores de matéria orgânica e micronutrientes em profundidades de amostragem num Latossolo Vermelho sob semeadura direta. *Ciência Rural*, Santa Maria, 37 (4):1000-1007.
- Zhang, H., Hartge, K.H., Ringe, H. (1997) Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactability. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:239-245.