

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – FEAGRI

**USO DA TÉCNICA DA “TDR” NA ESTIMATIVA DA UMIDADE
E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA EM SUBSTRATOS
ORGÂNICOS**

ROGER MANUEL MESTAS VALERO

**CAMPINAS
ABRIL DE 2006**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – FEAGRI

**USO DA TÉCNICA DA “TDR” NA ESTIMATIVA DA UMIDADE
E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA EM SUBSTRATOS
ORGÂNICOS**

Dissertação submetida à banca examinadora
para obtenção do Título de Mestre em
Engenharia Agrícola na área de concentração
Água e Solo.

ROGER MANUEL MESTAS VALERO
Orientador: Prof. Dr. Edson Eiji Matsura

CAMPINAS
ABRIL DE 2006

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

M564u Mestas Valero, Roger Manuel
Uso da técnica da "TDR" na estimativa da umidade e
condutividade elétrica em substratos orgânicos / Roger
Manuel Mestas Valero. --Campinas, SP: [s.n.], 2006.

Orientador: Edson Eiji Matsura.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Reflectometria no domínio do tempo. 2. Umidade.
3. Condutividade elétrica. I. Matsura, Edson Eiji. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Use of a TDR technique to estimate organic substrates
moisture content and electrical conductivity.

Palavras-chave em Inglês: Time domain reflectometry, Moisture, Electric
conductivity.

Área de concentração: Água e solo.

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola.

Banca examinadora: Mônica Ferreira de Abreu, Roberto Testezlaf.

Data da defesa: 28/04/2006.

À minha querida mãe Catalina Olga que com muito amor se dedicou e se esforçou para que eu pudesse alcançar os meus objetivos.

DEDICO

À meu Pai Romulo, aos meus irmãos, Abel e Patrícia, e queridas sobrinhas Ângela, Katerin e Ismênia, à minha namorada Rossmirieth, pela demonstração de carinho e presença constante.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

- À Deus, o grande criador, por permitir mais esta conquista em minha vida;
- À Faculdade de Engenharia Agrícola - UNICAMP, pela oportunidade oferecida;
- A minha família pelo constante incentivo para que este trabalho fosse concluído;
- Ao meu Orientador, Professor Dr. Edson Eiji Matsura, por sua segura e competente orientação e acima de tudo pelos votos de confiança depositados em mim ao longo destes anos;
- Aos queridos colegas e amigos do Laboratório de Irrigação: Márcio, Chris, Anderson, Laura, Evandro, Douglas, Renata, Aline e Carlos, por nossa fraterna convivência;
- Aos técnicos do Laboratório, Gelson e Túlio, pelos serviços prestados e pela amizade adquirida ao longo destes anos;
- Aos colegas do Laboratório de Solos: Célia, Júnior, Laura, Tânia e Fátima, por nossos momentos de bate-papo, principalmente na hora do cafézinho;
- Aos colegas da pós-graduação: Silvestre, Duvan, Saul, Delvio, Madalena, Marcão, Lúcia, e Erivelto, pela convivência e trocas de experiências;
- A todos os pós-graduandos da FEAGRI, por momentos agradáveis que compartilhamos;
- A todos os professores, de maneira especial ao Professor Roberto Testezlaf pela confiança e orientação;
- A minha Irmã Patricia, por sua amizade tão sincera e pelo carinho;
- Às empresas de substrato Amafibra e Mec Plant, pelo fornecimento do material para análise;
- A todos, que direta ou indiretamente, contribuíram para que este trabalho fosse possível de ser realizado.

Agradeço.

INDICE

LISTA DE SÍMBOLOS	vii
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	x
RESUMO	xi
ABSTRACTS	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 Salinização na agricultura.....	4
2.1.1 Efeitos da salinidade nas plantas	4
2.1.2 Salinização em ambiente protegido	5
2.1.3 Causas da salinização no solo e substratos	6
2.2 Substratos na agricultura.	7
2.2.1 Definição de substrato	7
2.2.2 Benefícios e limitações no uso de substratos	7
2.2.3 Propriedades dos substratos.....	8
2.2.3.1 Propriedades Físicas	8
2.2.3.2 Propriedades Químicas	13
2.2.3.3 Propriedades Biológicas	16
2.2.4 Características do substrato ideal.	18
2.3 A Técnica da TDR na agricultura.....	18
2.3.1 A TDR na estimativa da umidade e condutividade elétrica	19
2.3.2 Vantagens e desvantagens da TDR	21
2.3.3 Calibração da TDR	22
2.3.4 Estimativa da condutividade elétrica pelo TDR	23
2.3.5 Uso da TDR em substratos	26
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	27
3.1. Local	27

3.2. Caracterização dos substratos.....	27
3.2.1. Descrição dos substratos.....	27
3.2.2 Métodos para caracterização física dos substratos	27
3.3 Calibração da TDR.....	30
3.3.1 Calibração da TDR para determinação de umidade	30
3.3.2 Calibração da TDR para estimativa de condutividade elétrica.....	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 Caracterização dos substratos.....	38
4.1.1 Densidade	38
4.1.2 Curva de retenção de umidade.....	39
4.1.3 Distribuição do tamanho de partículas	41
4.2 Calibração da TDR.....	42
4.2.1 Calibração da TDR para estimativa da umidade.	42
4.2.2 Calibração da TDR para estimativa de condutividade elétrica.....	46
5. CONCLUSÕES.....	51
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA	52
7. ANEXOS.....	60

LISTA DE SÍMBOLOS

- AD = água disponível ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$);
AFD = água facilmente disponível ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$);
AT = água tamponante ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$);
c = velocidade da luz, 30 ($\text{cm} \cdot \text{ns}^{-1}$);
CE = condutividade elétrica ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)
CE_a e CE_{TDR} = condutividade elétrica aparente ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)
CE_{CS} = condutância superficial ;
CE_S = condutividade elétrica da solução ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$).
CE_{S'} = condutividade elétrica da solução estimada ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$).
CP = casca de pinus;
CRA₁₀ = capacidade de retenção de água na tensão de 10 cm de coluna de água ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$);
CRA₁₀₀ = capacidade de retenção de água na tensão de 100 cm de coluna de água ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$).
CRA₅₀ = capacidade de retenção de água na tensão de 50 cm de coluna de água ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$);
d = diâmetro da haste (mm);
DP = densidade de partícula ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);
DS = densidade seca ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);
DU = densidade úmida ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);
EA = espaço de aeração ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$);
FC = fibra de coco;
K e ϵ = Constante dielétrica (adimensional);
Ka = constante dielétrica aparente (adimensional);
L = comprimento da haste, (cm);
MS = matéria seca ($\text{g} \cdot 100\text{g}^{-1}$);
n = porosidade do solo;
p = Coeficiente de reflexão (adimensional);
PT = porosidade total ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$);
s = distância máxima entre as hastes (mm);
S-U = seco para úmido;
t = tempo de deslocamento, (ns);
T = coeficiente de transmissão;
U-S = úmido para seco;
V = volume de água (m^3);
V₀ = amplitude do sinal eletromagnético gerado pelo TDR (Ω);
V₁ e v₁ = amplitude do sinal eletromagnético depois da reflexão do início da sonda (Ω);
Z₀ = impedância característica (Ω);
Z_u = impedância no cabo coaxial (Ω);
 τ = tortuosidade;
 Ψ_o = potencial osmótico;
 α = fator estrutural;
 θ ou UV = umidade em base de volume; ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$);
 Δt = tempo de deslocamento do sinal eletromagnético (ns);
 ϵ_a ou k_a = constante dielétrica do ar (adimensional);
 ϵ_s ou k_m = constante dielétrica das partículas do solo (adimensional);
 ϵ_w ou k_w = constante dielétrica da água (adimensional);

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Classificação da sensibilidade das culturas a níveis de concentração salina no substrato (KÄMPF, 2000b)	15
TABELA 2. Interpretação de valores de condutividade elétrica (em dS m^{-1} a 25°C) para vários métodos de extração (CAVINS <i>et al.</i> , 2006).....	16
TABELA 3. Características físicas dos substratos casca de pinus (CP) e fibra de coco (FC). 38	
TABELA 4. Dados de umidade média (6 amostras) para as diferentes pressões, ajustada de acordo com VAN GENUCHEN (1980) para determinação das curvas características dos substratos fibra de coco (FC) e casca de pinus (CP).	40
TABELA 5. Equações obtidas na calibração do TDR para estimativa de umidade em substratos fibra de coco (FC) e casca de pinus CP).....	44
TABELA 6. Valores de CE_a para valores de $CE_s = 0$, para diferentes umidades fixas dos substratos CP e FC.....	46
TABELA 7. valores da tortuosidade (τ) em função da umidade dos substratos fibra de coco e casca de pinus.	48
TABELA 8. Dados observados para o modelo matemático proposto por RHOADES <i>et al.</i> (1976)	48
TABELA 9. Dados para a determinação de densidade em substrato casca de pinus (CP)	60
TABELA 10. Dados para a determinação de densidade em substrato fibra de coco (FC)	60
TABELA 11. Dados de umidade para determinação da curva característica do substrato casca de pinus (CP)	61
TABELA 12. Dados de umidade para determinação da curva característica do substrato fibra de coco (FC)	61
TABELA 13. Distribuição (percentual) do tamanho de partículas do substrato casca de pinus (CP) nas diferentes malhas (0,25; 0,50; 1,00; 2,0; 4,75) (amostra =100g).	62
TABELA 14. Distribuição (percentual) do tamanho de partículas do substrato fibra de coco. 62	
TABELA 15. Análise de variância para valores de umidade volumétrica (θ) obtidos pelo método gravimétrico e constante dielétrica aparente obtido pela TDR (K_a) na calibração da TDR para estimativa de umidade em casca de pinus (CP) de seco para úmido (S-U).	63
TABELA 16. Análise de variância para valores de umidade volumétrica (θ) obtidos pelo método gravimétrico e constante dielétrica aparente obtido pela TDR (K_a) na calibração da TDR para estimativa de umidade em fibra de coco (FC) de seco para úmido (S-U).	64
TABELA 17. Análise de variância para valores de umidade volumétrica (θ) obtidos pelo método gravimétrico e constante dielétrica aparente obtido pela TDR (K_a) na calibração da TDR para estimativa de umidade em casca de pinus (CP) de úmido para seco (U-S).	65

TABELA 18. Análise de variância para valores de umidade volumétrica (θ) obtidos pelo método gravimétrico e constante dielétrica aparente obtido pela TDR (K_a) na calibração da TDR para estimativa de umidade em fibra de coco (FC) de úmido para seco (U-S).....	66
TABELA 19. Valores de umidade obtida pelo método volumétrico (Méd.) com valores de umidade estimadas pelo TDR Para os dois tipos de calibração (U-S) e (S-U) em fibra de coco	67
TABELA 20. Análise de variância para valores de correlação de Umidade calculada X Umidade estimada com TDR (calibração U-S) em fibra de coco.	68
TABELA 21. Análise de variância para valores de correlação de Umidade calculada X Umidade estimada com TDR (calibração S-U) em fibra de coco.	68
TABELA 22. Valores de umidade obtida pelo método volumétrico (Méd.) com valores de umidade estimadas pelo TDR Para os dois tipos de calibração (U-S) e (S-U) em casca de pinus.	69
TABELA 23 . Análise de variância para valores de correlação de Umidade calculada X Umidade estimada com TDR (calibração U-S) em casca de pinus.	70
TABELA 24. Análise de variância para valores de correlação de Umidade calculada X Umidade estimada com TDR (calibração S-U) em casca de pinus.	70
TABELA 25. Valores de umidade volumétrica (θ), condutividade elétrica da solução (CE_S) e condutividade elétrica aparente obtido pela TDR (CE_{TDR}) na calibração da TDR para estimativa de condutividade elétrica para casca de pinus (CP).	71
TABELA 26. Valores de umidade volumétrica (θ), condutividade elétrica da solução (CE_S) e condutividade elétrica aparente obtido pela TDR (CE_{TDR}) na calibração da TDR para estimativa de condutividade elétrica para fibra de coco (FC).	72
TABELA 27. Valores de Fator de tortuosidade (T) X valores de umidade (θ) dos substratos fibra de coco (FC) e casca de pinus (CP)	73
TABELA 28. Valores de condutividade elétrica do extrato de solução medido pelo condutivímetro (CE_S) X Condutividade elétrica da solução estimada pela TDR ($CE_{S'}$) em casca de pinus (CP).	74
TABELA 29. Valores de condutividade elétrica do extrato de solução medido pelo condutivímetro (CE_S) X Condutividade elétrica da solução estimada pela TDR ($CE_{S'}$) em fibra de coco (FC).	75
TABELA 30. Análise de variância para valores de correlação de Condutividade elétrica da solução medida (CE_S) X Condutividade elétrica estimada TDR ($CE_{S'}$) em substrato casca de pinus (CP).	76
TABELA 31. Análise de variância para valores de correlação de Condutividade elétrica da solução medida (CE_S) X Condutividade elétrica estimada TDR ($CE_{S'}$) em substrato fibra de coco (FC).	76

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Curva de calibração de água de um substrato (De BOODT et al., 1974) EPT = porosidade total, CA = espaço de aeração, AFD = água facilmente disponível, ADD = água dificilmente disponível, AR = água de reserva.....	12
FIGURA 2: Curvas Características de TDR medidas em solos com diferentes conteúdos volumétricos de água.....	21
FIGURA 3: Arranjo utilizado para determinação da densidade dos substratos.....	28
FIGURA 4: Esquema da calibração da TDR para determinação de umidade.....	31
FIGURA 5: Calibração da TDR para estimativa de condutividade elétrica o TDR Tektronix 1502 C acoplado a um computador utilizando o programa WinTDR 6.0.....	35
FIGURA 6: Esquema para determinação da tortuosidade (τ) e Condutância superficial (CE_{CS}) para estimativa da condutividade elétrica da solução do substrato (CE_S) a partir de dados de umidade (θ) e condutividade elétrica (CE_{TDR}) obtidos por meio do aparelho TDR.....	36
FIGURA 7: Curvas características de retenção de água para os substratos: casca de pinus (CP) e fibra de coco (FC).....	40
FIGURA 8: Distribuição do tamanho de partícula dos substratos fibra de coco (FC) e casca de pinus (CP) (média de três amostras).....	42
FIGURA 9: Relações entre o conteúdo de água e a constante dielétrica aparente dos substratos casca de pinus calibração úmido para seco (CP) U-S, fibra de coco calibração úmido para seco (FC) U-S, casca de pinus calibração seco para úmido (CP) S-U, fibra de coco calibração seco para úmido (FC) S-U.....	43
FIGURA 10: Umidade dos substratos determinada gravimetricamente em relação às determinadas pelo TDR nos substratos casca de pinus (CP) e fibra de coco (FC) para os dois tipos de calibração úmido para seco (U-S) e seco para úmido (S-U)..	45
FIGURA 11: Correlação entre CE_{TDR} e CE_S de casca de pinus (CP) e fibra de coco (FC), para umidades fixas (0,60; 0,50; 0,40; 0,30; 0,20 e 0,10 $m^3.m^{-3}$).	47
FIGURA 12: Modelo linear para correlacionar o fator de tortuosidade em função da umidade dos substratos casca de pinus (CP) e fibra de coco (FC).....	48
FIGURA 13: Relação entre os valores de condutividade elétrica do extrato de solução medido (CE_s) e valores de condutividade elétrica estimada (CE_s').	49

RESUMO

O aumento na utilização de estufas para produção agrícola e o conseqüente cultivo em recipientes fez com que houvesse uma substituição de solos por substratos para plantas. Em cultivos em substratos, o pequeno volume e o baixo efeito tampão podem ocasionar prejuízos na produção, mas também podem aumentar as chances de sucesso agrônômico. Conseqüentemente um sistema sensível como este deve ser continuamente monitorado, a fim de se obter bons resultados. É preciso avaliar metodologias que determinem a umidade (θ) e condutividade elétrica (CE) nos substratos, com maior rapidez e *in situ*, mantendo boa correlação com o método padrão. Das várias propostas para determinação da umidade e CE dos meios porosos, a técnica da TDR (Reflectometria no domínio do tempo) vem despertando cada vez mais interesse, pois apresentam características desejáveis, como a mensuração em tempo real e a possibilidade de leituras automatizadas, porém apresenta como desvantagens seu alto custo e sua necessidade de calibração. Apesar da técnica da TDR para determinação de umidade em solos ser mais estudada é necessário novos conhecimentos acerca desta técnica quando se utiliza substratos. O objetivo deste trabalho foi de avaliar o uso da técnica TDR na estimativa de umidade e condutividade elétrica em dois substratos orgânicos: casca de pinus (CP) e fibra de coco (FC), na qual, determinou-se as principais características físicas destes substratos (densidade, granulometria e curva de retenção de umidade). A calibração da TDR foi feita através de duas metodologias; umedecimento e secagem do substrato. Já para estimativa da condutividade elétrica utilizou-se modelos matemáticos desenvolvidos por Rhoades et al., (1976). Os resultados mostraram que os valores da constante dielétrica (K_a) e da umidade volumétrica (θ) dos substratos puderam ser ajustados através de equações polinomiais cúbicas, estatisticamente significativas a nível de 1%. Conclui-se que o uso da TDR para estimativa de umidade em substratos é possível, desde que se faça a calibração para cada um. Além disso, houve correlação da condutividade elétrica determinada pela TDR com a condutividade elétrica determinada pelo condutivímetro no extrato de solução dos substratos, possibilitando o uso da TDR na estimativa de condutividade elétrica nos substratos estudados.

ABSTRACT

The increasing use of greenhouse in agricultural production and the resulting grow of container crops is determining the substitution of soil for substrates. The small container volume and the low tampon effect can cause failures in substrate crops production, but also has the potential to increase the opportunities of agronomic success. Therefore, this sensible production system must be continuously monitored in order to obtain good results. So, more precise and fast methodologies that determine *in situ* the water content and electrical conductivity (EC) in substrates has to be evaluated, when compared to standard method. From the several proposals methods to determinate water content and EC in a porous means, the technique of the TDR (Time Domain Reflectometry) show some desirable characteristics, like real time measurements and the possibility of automated readings. Some disadvantages of this technique are the high initial cost and necessity of calibration. Although, the number of information of TDR use in soil moisture determination its use in substrate still needs more developments. The objective of this work was to evaluate the use of TDR technique in the measurement of water content and electrical conductivity in two organic substrates: pine bark (CP) and coconut fiber (FC). The specific gravity, particle size distribution and water content retention curve of both substrates were determined. The calibration of the TDR was done using two methodologies: dryness and saturation cycles. In the electrical conductivity determination it was applied mathematical models developed by Rhodes et al. (1976). The results showed that the values of water content and dielectric constant of the substrates can be mathematically adjust in cubic polynomial equations with 1% significant level. Therefore, the use of TDR technique of the TDR is feasible since a calibration curve is determined for each substrate. In addition, there was correlation of the electrical conductivity determined by the TDR with the electrical conductivity determined in the extract saturation by conductivimeter, making possible the use of the TDR in the EC measuring of the studied substrates.

1. INTRODUÇÃO

Durante os últimos anos, a agricultura está experimentando avanços tecnológicos importantes. Neste sentido, põem-se a disposição do agricultor variedades de culturas mais produtivas do que as tradicionais, novos materiais, sistemas de irrigação, materiais de cobertura, etc. que exigem um controle ambiental mais preciso em algumas ou em todas as fases do processo produtivo.

Junto a todas estas mudanças tecnológicas se observa a substituição, de maneira cada vez mais importante, do cultivo tradicional em solo pelo cultivo em substrato. Logicamente, este fenômeno foi mais pronunciado nos setores mais intensivos da agricultura, como é o caso da produção hortícola e ornamental. Entre as diferentes razões desta substituição pode-se destacar, a presença cada vez maior de fatores limitantes para a continuidade de cultivos intensivos no solo (agentes fitopatógenos, salinização, irrigação, condições climáticas, etc.), obrigando ao agricultor a adotar técnicas produtivas com maior nível tecnológico. Neste sentido, o cultivo em ambiente protegido, tem sido uma alternativa viável.

O desenvolvimento dos substratos tem sua origem no cultivo de plantas em recipientes, onde a demanda deste setor produtivo obrigou a desenvolver materiais adequados.

A decisão de se produzir em substratos deve levar em conta o nível tecnológico do produtor. Cultivos em substratos demonstram grande avanço frente aos sistemas de cultivo no solo, pois oferecem vantagens como o manejo mais adequado da água, o fornecimento de nutrientes em doses e épocas apropriadas, a redução do risco de salinização do meio radicular e a redução da ocorrência de problemas fitossanitários, que se traduzem em benefícios diretos no rendimento e qualidade dos produtos colhidos.

Quando se observa os cultivos em recipientes com substratos, percebe-se uma limitação de espaço para a expansão das raízes, exigindo que o substrato seja capaz de manter a água facilmente disponível para as plantas sem comprometer o conteúdo do oxigênio no meio, requerendo portanto, um controle preciso de água, fertilizantes e condutividade elétrica.

Em ambientes protegidos, devido ao impedimento da entrada de água da chuva no interior de suas instalações, a irrigação torna-se indispensável. O uso da irrigação, permite a fertirrigação, permitindo uma maior eficiência no uso pelas plantas dos nutrientes. A técnica por outro lado, aumenta a possibilidade de salinização dos substratos. Portanto, um manejo

inadequado de fertilizantes, aliado ao desconhecimento da fisiologia dos vegetais em ambientes protegidos, podem diminuir as possibilidades de sucesso agrônomo por gerar acúmulo de sais nos substratos.

Quando se trabalha com substratos agrícolas é extremamente importante realizar um planejamento de irrigação e um manejo adequado do cultivo, desta forma é também importante considerar as propriedades físicas, químicas e biológicas dos substratos. As propriedades químicas e a concentração de sais, contidas nos substratos, podem ser modificadas com o uso da irrigação e da fertirrigação. Existem algumas propriedades físicas como densidade, porosidade, água facilmente disponível, água residual, que afetam a curva de retenção de água do substrato, influenciando diretamente o manejo de irrigação. Os substratos orgânicos são susceptíveis à decomposição biológica e modificam suas características físicas químicas ao longo do tempo, exigindo, assim uma análise periódica destas propriedades.

Existem métodos de laboratório para determinar a umidade e condutividade elétrica em solos. No caso de substratos estes métodos devem ser adequados, exigindo infra-estrutura de laboratório e tempo para as determinações. Desta forma, o maior desafio é conhecer os métodos mais adequados em condições de campo ou ambiente protegido. Várias são as proposições para determinação da umidade e condutividade elétrica nos substratos para fins agrícolas, porém nenhuma consegue satisfazer todas as necessidades e requisitos básicos para que se torne um método ideal. Dos vários métodos existentes, a técnica da TDR (“time domain reflectometry”), vem despertando muito interesse devido principalmente à possibilidade de leituras em tempo real de forma automatizada.

Desta forma, se faz necessário avaliar metodologias que determinem a umidade e condutividade elétrica com maior rapidez, *in situ*, mantendo uma boa correlação com o método padrão. Assim, propõe-se a validação técnica do uso de sensores de indução eletromagnética que utilizam princípios da TDR, especialmente quando se desejam informações contínuas e imediatas das variações de umidade e da condutividade elétrica, em cultivos sob substratos com uso da irrigação.

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o desempenho de um aparelho de TDR com sondas multiaste em substratos orgânicos em condições de laboratório, buscando identificar variações do comportamento do equipamento de TDR frente às diferentes condições de

umidade e condutividade elétrica dos substratos, levando em consideração as principais características físicas dos substratos através de uma curva de retenção de água.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Salinização na agricultura.

A salinização do solo representa um dos graves problemas da agricultura mundial, especialmente na agricultura irrigada. Esse fenômeno pode ocorrer pela elevação do lençol freático, sob condições de evapotranspiração superior à infiltração, devido a drenagem deficiente no solo, pelo processo de ascensão capilar quando a água atinge a superfície do solo, evapora e ocorre o acúmulo dos sais dissolvidos, próximo à zona radicular da cultura (QUEIROZ, 2004)

O manejo da agricultura irrigada, especialmente sob condições de fertirrigação, requer informações periódicas da concentração de sais solúveis próximos à zona radicular das plantas. Tal informação contribui para a adequação das práticas de uso do solo e cultivo, de planos de preservação da qualidade da água e operação de projetos de irrigação, envolvendo processos de lixiviação e drenagem, balanço de sais, sustentabilidade da irrigação e, proteção ambiental (QUEIROZ et al., 2002).

Diversos são os métodos empregados para estimar a salinidade dos solos, sendo a aferição dos valores da condutividade elétrica da solução do solo o mais prático e portanto, o mais utilizado.

A condutividade elétrica (C.E.) de uma solução representa a facilidade que esta tem em transportar corrente elétrica, ou seja, mede a resistência à passagem dos elétrons, que é função da quantidade de solutos iônicos (eletrólitos) presentes na solução.

2.1.1 Efeitos da salinidade nas plantas

Os efeitos adversos da salinidade sobre as plantas constituem um dos fatores limitantes da produção agrícola, devido, principalmente, ao aumento da pressão osmótica do solo e à toxidez resultante da concentração salina e dos íons específicos. Em solos sódicos, o problema maior são os impactos sobre as características físicas do solo, devido à dispersão da argila, criando problemas físicos, diminuindo, conseqüentemente, a aeração e dificultando o movimento de água e desenvolvimento radicular, além do efeito tóxico do sódio. (CORDEIRO, 2004)

Segundo TARCHTZKY (2002), as plantas, devido ao aumento da concentração salina e, conseqüentemente, da pressão osmótica, absorvem cada vez menos água, com evidente prejuízo de suas funções fisiológicas normais. E ainda, alguns sais se tornam tóxicos e as plantas chegam mesmo a secar.

A salinidade afeta o crescimento das plantas, afetando a sua produção muito antes de sintomas visuais se tornarem aparentes, além do efeito na pressão osmótica, alguns componentes que podem ocorrer em solos salinos, como carbonato de sódio ou bórax, prejudicando diretamente as plantas. Os efeitos da salinidade sobre as plantas variam para espécies e cultivares. (PRIMAVESI, 1994).

Segundo MEDEIROS (1999), os efeitos da salinidade no crescimento e no desenvolvimento das plantas têm sido estudados por diversos pesquisadores. Os efeitos nocivos dos sais nos vegetais caracterizam-se pela redução e pela não-uniformidade do crescimento, presença de coloração verde-azulada e pelas queimaduras nas bordas das folhas das plantas, além de manchas desnudas no solo. A salinidade afeta as plantas de três maneiras: diminuindo o potencial osmótico do meio, o que reduz a disponibilidade de água no solo; causando toxicidade através do acúmulo de íons específicos e proporcionando um efeito indireto de ordem nutricional.

2.1.2 Salinização em ambiente protegido

Em ambiente protegido, o excesso de fertilização, o uso de água salina e a ausência de drenagem adequada são fatores que contribuem para o maior risco de salinização do solo (BLANCO et al., 2002).

BLANCO e FOLEGATTI (2001) reportam que, em ambiente protegido, mesmo quando se utiliza água de irrigação de boa qualidade e concentrações adequadas de fertilizantes, pode ocorrer o acúmulo de sais na região radicular se não forem adotadas medidas de controle.

Na irrigação em estufas são freqüentes as irrigações com águas de má qualidade e, sobretudo, com excesso de sais, portanto deve-se manter um controle da mesma, tanto mais rigoroso quanto pior for a sua qualidade.

Em cultivo protegido, com características mais intensas de utilização do solo, a aplicação de fertilizante e o manejo de solo e da irrigação devem ser realizadas de forma adequada a fim de evitar o acúmulo excessivo e prejudicial de sais (TARCHTZKY, 2002).

MEDEIROS (1999), afirma que sob condições de ambiente protegido (estufas plásticas), na região de Campinas, mesmo irrigando com água de baixa salinidade (condutividade elétrica - CE < 0,30 dS/m), cerca de 6% das estufas avaliadas apresentavam solo salino e 40 % ficavam ligeiramente salinos. Nesse caso, a salinidade estava diretamente relacionada aos fertilizantes aplicados, e ao tempo de cultivo na área. Os íons mais presentes na solução do solo dessas estufas eram Ca, Mg, SO₄, Cl, Na e K.

BLANCO e FOLEGATTI (2001), mencionam que o excesso de fertilizantes e o manejo inadequado da irrigação nos cultivos em ambientes protegidos têm levado salinização dos solos e substratos, o que resulta na redução de produtividade das culturas. Nessa pesquisa verificaram que a aplicação da lâmina de lavagem para recuperação de solos salinos em ambientes protegidos pode ser realizado pelo próprio sistema de irrigação por gotejamento e que esse tipo de aplicação foi mais eficiente na lixiviação dos sais acumulados no solo.

2.1.3 Causas da salinização no solo e substratos

Segundo PRIMAVESI (1994), os problemas da água do solo dependem da relação entre infiltração e evaporação. Se a infiltração for maior, os solos e substratos são lixiviados e com facilidade se acidificam, se a evaporação predomina, ocorre o contrário, acumulam-se sais na camada superior dos solos e, com facilidade, ficam salinizados. Esta salinização é menor em solos arenosos e maior em solos argilosos. Sais depositados pela irrigação, as plantas retiram o que necessitam, sendo que o restante acumula-se, salinizando o solo.

Segundo CORDEIRO (2004), a maior parte dos solos salinos e sódicos ocorre, principalmente, em regiões áridas e semi-áridas, onde os processos de salinização e sodificação são, freqüentemente, acelerados por irrigação pouco eficiente e insuficiente drenagem.

MEDEIROS et al. (2001), mencionam que com a expansão dos cultivos de hortaliças em ambientes protegidos têm surgido problemas de salinização do solo, provavelmente relacionados ao manejo inadequado da fertilização e irrigação. Qualquer que seja a fonte, a

água utilizada na irrigação sempre contém sais, embora a quantidade e a qualidade de sais presentes nela possam variar.

SILVA et al. (2001), observaram que a distribuição de soluto no solo, aplicados via fertirrigação por gotejamento, não acompanha a frente avanço vertical da água, sendo que este movimenta-se um pouco à frente dos sais, o que também contribui para o acúmulo de sais nas camadas mais superficiais do solo. Também deve-se considerar a ascensão de sais profundos para aquelas próximas à superfície do solo pelo processo de evapotranspiração, podendo resultar na precipitação de sais na superfície do solo.

Em conclusão, a salinização em solos e substratos agrícolas apresenta problema na agricultura, principalmente em cultivos irrigados. Isto é devido ao aumento da pressão osmótica, causado pela presença dos sais. Muito destes sais podem causar toxidez nas plantas, por causa do manejo inadequado da fertirrigação.

2.2 Substratos na agricultura.

2.2.1 Definição de substrato

Segundo PASTOR (1974), CANOVAS e DIAZ (1993), FERMINO (1996), KÄMPF (2000a) e RÖBER (2000), entende-se como “substrato para plantas” todo material sólido diferente do solo, natural, de síntese ou residual, mineral ou orgânico, que, colocado num recipiente em forma pura ou em mistura, permite a fixação e desenvolvimento do sistema radicular das plantas cultivadas. Considera-se, como sua função primordial, prover suporte às plantas nele cultivadas, podendo ainda regular a disponibilidade de nutrientes e de água.

2.2.2 Benefícios e limitações no uso de substratos

Segundo MILNER(2002) existem muitos benefícios e limitações na produção em substratos.

Vantagens:

- 1) Possibilidade de cultivo em áreas com condições físicas inadequadas (baixa drenagem, baixa condutividade hidráulica e baixa porosidade);
- 2) Possibilidade de efetuar desinfecção do substrato para sua reutilização;
- 3) Possibilidade de cultivo onde o solo apresenta muita desuniformidade topográfica;
- 4) Permite o cultivo quando a água de irrigação é de baixa qualidade devido à elevada condutividade hidráulica dos substratos;

5) Altas produtividades e qualidade devido à otimização das condições da rizosfera, como relação ar/água, concentrações dos nutrientes e adequados valores de pH;

6) Possibilidade de introduzir novas plantas que não se desenvolveriam bem em solos locais.

Limitações:

1) Baixa capacidade tampão, significando baixa tolerância a erros no manejo da irrigação e da fertirrigação, exigindo, portanto, monitoramento constante;

2) Infecção causada por doenças de raízes;

3) Custos relativamente elevados;

4) Problemas ambientais (descarte da água drenada e substratos danosos como a lã de rocha);

5) Requer alto nível tecnológico a fim de interpretar os resultados e tornar as decisões corretas.

6) Substrato orgânico é susceptível à decomposição biológica, reduz a porosidade e a aeração e eleva a compactação destes materiais ao longo do tempo (WHITE e MASTALERZ, 1966 Citado por MILNER, 2002).

2.2.3 Propriedades dos substratos

O uso de substratos comerciais está associado à produção de mudas vegetais de qualidade em espécies florestais, hortaliças, frutíferas e de grandes lavouras, como café.

Apesar da demanda elevada, não existe ainda uma metodologia aceita universalmente para caracterização física e química de substratos comerciais, todavia existe o consenso quanto à determinação de propriedades como densidade, porosidade e espaço de aeração (KÄMPF, 2001).

2.2.3.1 Propriedades Físicas

Segundo SCHMIT et al.(2002); PASTOR (1999); MILNER (2001) as propriedades físicas do substratos são muito importantes para o bom desenvolvimento da plantas e, uma vez que o substrato após ser colocado em um recipiente fica praticamente impossível modificar tais propriedades, ao contrário das propriedades químicas, que podem ser alteradas escolhendo-se técnicas de manejo apropriadas. Sendo assim, atenção deve ser dada aos parâmetros físicos, em especial ao binômio “retenção de água – aeração”, condição

responsável do sucesso ou fracasso da utilização de um determinado material como substrato de cultivo.

As características físicas de maior importância para determinar o manejo dos substratos são: densidade, granulometria, porosidade e curva de retenção de água.

a) Densidade

A densidade de um substrato se refere à do material sólido que o compõe, definida como densidade real, ou à densidade calculada considerando o espaço total ocupado pelos componentes sólidos mais o espaço poroso, e se denomina porosidade aparente.

A densidade real tem um interesse relativo. Seu valor varia segundo o material que compõe o substrato deve oscilar entre 2,5 a 3 g.cm⁻³ para a maioria dos de origem mineral. A densidade aparente indica indiretamente a porosidade do substrato e sua facilidade de transporte e manejo. Os valores de densidade aparente devem ser baixos (0,7-1,5 kg.m⁻³) [garantindo](#) a consistência da estrutura.

A densidade de volume (“bulk density”), também chamada densidade volumétrica, expressa a relação entre a massa e volume de um amostra de substrato. De maneira geral, considera-se para substrato valores de densidade seca entre 400 e 500 kg.m⁻³ (BUNT, 1973)

Segundo FONTENO (1996), a modificação da densidade de volume tem efeito leve sobre a porosidade total, moderado sobre a capacidade de recipiente e um grande efeito sobre a Água Facilmente Disponível (AFD).

b) Granulometria

A definição da granulometria do substrato, ou proporções entre macro e micro porosidade e, conseqüentemente relações entre ar e água, permite sua manipulação e, conseqüentemente, sua melhor adaptação às situações de cultivo (FERMINO, 2002).

A granulometria dos substratos pode ser muito variável, dependendo da origem dos materiais, sistema de coleta, condições de trituração e peneiras utilizadas, entre outros (ANSORENA, 1994).

A distribuição do tamanho das partículas, ou seja, a granulometria, é importante para descrever a qualidade física do material e sua adequação para o cultivo de determinada espécie vegetal, tendo influência determinante sobre o volume de ar e água retida pelo substrato (WILSON, 1984).

Partículas com maior diâmetro são responsáveis pela formação de poros maiores (macro poros), que são ocupados por ar. Por outro lado, partículas de menor diâmetro são responsáveis pela formação de poros menores (microporos), que são ocupados por água.

A granulométrica ou tamanho dos grânulos ou fibras condiciona o comportamento do substrato, já que além de sua densidade aparente varia seu comportamento hídrico por causa de sua porosidade externa, que aumenta de tamanho de poros conforme seja maior a granulométrica (TERRES et al., 1997).

c) Porosidade

A porosidade total, isto é, a diferença entre o volume total e o volume de sólidos de um substrato, é considerada como um parâmetro pouco informativo, pois não especifica o tamanho dos poros presentes, de forma que o mesmo espaço poroso total pode ser ocupado por diferentes volumes de ar e água (WALLER e WILSON, 1984).

Em condições de saturação hídrica, os macroporos estão preenchidos com água, e o seu volume é caracterizado como espaço de aeração. Nas mesmas condições, os microporos estão preenchidos por água, em volume que corresponde à capacidade de retenção hídrica do substrato (KÄMPF, 2000b).

A água é retida na superfície das partículas e entre as partículas. A retenção da água entre as partículas depende da geometria do espaço poroso, ou seja, da forma e tamanho dos poros. Segundo NOBEL (1991) na matriz do substrato a água é retida entre as partículas até o equilíbrio da força de coesão da água com a força da gravidade.

Dessa forma, a dimensão dos poros é importante para estabelecer o quanto um substrato é capaz de regular o fornecimento de água e ar às plantas (HANDRECK e BLACK, 1999).

Os poros podem ser classificados como macroporos, mesoporos, microporos e ultramicroporos, segundo conceito que leva em consideração a função, estabelecido por DRZAL et al.(1999). Esses autores sugerem que os macroporos sejam os poros que não retêm água sob a força exercida pela gravidade, sendo esse espaço ocupado por ar e denominado de “espaço de aeração”. A força gravitacional depende da altura de substrato (definida pela altura no recipiente). Os mesoporos retêm água a tensões entre a tensão limite para o espaço de aeração (estabelecida como uma coluna de água equivalente à metade da altura de substrato) e 30 kPa (300 hPa). Essa é considerada como a “água facilmente disponível” para as plantas. Os

microporos retêm água a tensões entre 30 kPa e 1,5 MPa, sendo essa considerada como a reserva de água para as plantas. Os ultramicroporos caracterizam o espaço poroso que retém água a tensão maior que 1,5 MPa, considerada por esses pesquisadores como “água indisponível” para as plantas.

d) Retenção de água.

A curva de disponibilidade ou retenção de água de um meio é resultado da relação entre a umidade volumétrica e a tensão de umidade do meio (MILKS et al., 1989).

A determinação da curva de retenção de água de um substrato, segundo FERMINO (1996), é importante na medida em que informa o volume de água disponível às plantas dentro de cada faixa de tensão em uma determinada amostra. Maior volume de água disponível a baixas tensões representa menor gasto de energia pela planta para absorvê-la. Plantas submetidas a estresse moderado por falta de água ou salinidade excessiva são estimuladas a acumular e manter níveis elevados de solutos orgânicos no citoplasma, à custa de energia desviada de funções de crescimento. Esse acúmulo de solutos é uma forma de reduzir o potencial osmótico interno das células, e, assim, o potencial da água da planta como um todo, gerando um gradiente favorável à absorção de água. Esse fenômeno é denominado de ajuste osmótico (TAIZ e ZEIGER, 1991) ou condicionamento osmótico, e reduz a taxa de crescimento da planta.

A curva de retenção de um determinado substrato permite ao produtor programar o manejo mais adequado da irrigação, na medida em que ele pode determinar a quantidade de água a ser aplicada para uma espécie vegetal específica, cultivada num determinado recipiente (FERMINO, 2002).

Os conceitos de espaço de aeração e água disponível estão alicerçados na curva de retenção de água. O espaço de aeração é caracterizado como volume de macroporos preenchido com ar, em condições de saturação hídrica e após livre drenagem. Nas mesmas condições, a água disponível se refere aos microporos preenchidos com água (entre 10-100 cm de coluna de água).

As tensões limite no substrato críticas à retirada de água pelas plantas não são padronizadas mundialmente. Os conceitos consagrados no Brasil são os de De BOODT e VERDONCK, (1972). Esses autores consideram como “espaço de aeração” o espaço relativo de poros que liberam água a tensões até 10 hPa, sendo esses espaços considerados

macroporos. A “água facilmente disponível” é retida entre tensões de 10 e 50 hPa e a “água tamponante” entre 50 e 100 hPa. De 10 a 100 hPa estaria, portanto, a “água disponível” (Figura 1). A água de micróporos o volume de água retido a tensão maior que 100 hPa, conceituado por GROLLI (1991) como “água remanescente a 100 hPa”.

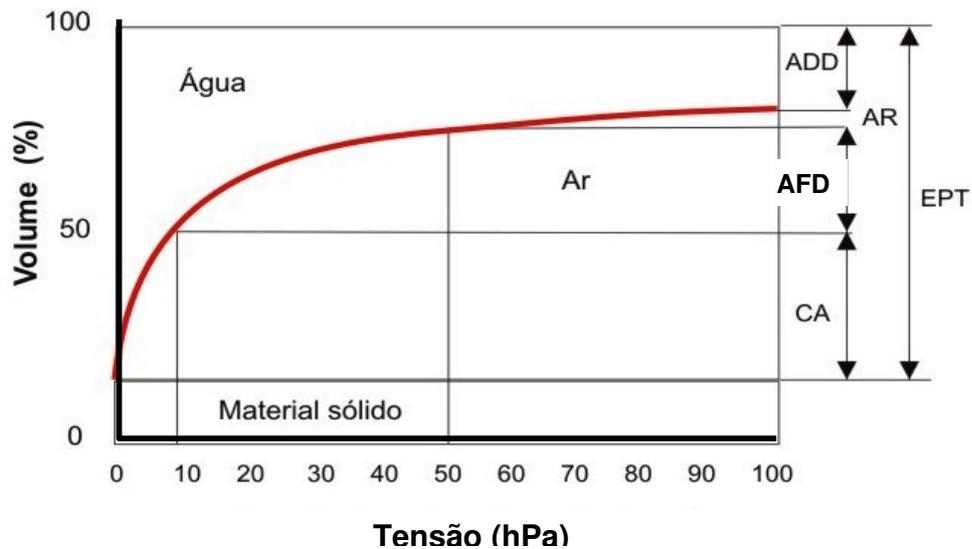


FIGURA 1: Curva de calibração de água de um substrato (De BOODT et al., 1974) EPT = porosidade total, CA = espaço de aeração, AFD = água facilmente disponível, ADD = água dificilmente disponível, AR = água de reserva.

De acordo com MILNER (2001), quanto maior a altura do recipiente utilizado, menor a capacidade de água disponível, independente do material utilizado.

Deve-se ressaltar que, o conhecimento das propriedades físicas dos substratos não deve ser utilizados de maneira isolada, para a determinação do manejo de irrigação. A capacidade, altura, formato e material de composição do recipiente também exercem influência na relação ar:água dos substratos.

Estrutura. Pode ser granular como a da maioria dos substratos minerais ou bem fibrilares. A primeira não tem forma estável, acoplando-se facilmente à forma do recipiente, enquanto a segunda dependerá das características das fibras. Se forem fixadas por algum tipo de material de sedimentação, conservam formas rígidas e não se adaptam ao recipiente, mas

têm certa facilidade de mudança de volume e consistência quando passam de secas a molhadas.

2.2.3.2 Propriedades Químicas

As propriedades químicas geralmente utilizadas em nível mundial para a caracterização de um substrato são: pH, capacidade de troca de cátions (CTC), a salinidade e ou teor percentual de matéria orgânica nele presente (SCHMITZ et al., 2002).

Normalmente se preferem os substratos inertes em relação aos quimicamente ativos. A atividade química contribui à solução nutritiva elementos adicionais por processos de hidrólise ou solubilidade. Se estes são tóxicos, o substrato não serve e tem que ser descartado, mas, ainda que sejam elementos nutritivos e úteis, atrapalham o equilíbrio da solução ao superpor na incorporação um aporte extra com o que terá que contar, e o aporte não têm garantia de continuidade quantitativa (temperatura, esgotamento, etc).

Os processos químicos também prejudicam a estrutura do substrato, mudando suas propriedades físicas iniciais. (MARTINES, 2002)

Tendo em vista que a nutrição das plantas é manejada pelo agricultor, utilizando adubações de base e complementares, a investigação do teor em nutrientes nos materiais puros e nas misturas só é realizada em casos especiais, quando houver interesse ou necessidade de quantificar os elementos presentes (KÄMPF, 2000a).

Valor de pH

O valor de pH é definido como a atividade do íon hidrogênio, expressa como logaritmo negativo da sua concentração, e determina a acidez relativa de um meio. O pH é de grande importância para o crescimento da planta devido ao seu efeito na disponibilidade de nutrientes, em especial de micronutrientes (WALLER e WILSON, 1984; BAILEY *et al.*, 2005).

FONTENO (1996) afirma que, além da possibilidade de ocorrer fitotoxicidade por excesso de manganês solúvel em valores de pH abaixo de 5,4, também aumenta o risco de toxidez do ferro, zinco e cobre, se esses estiverem presentes em quantidades significativas no substrato. No outro lado do espectro, BAILEY *et al.* (2005), ressaltam que um valor de pH acima de 6,2 pode levar a problemas com deficiências nas culturas de flores (deficiência de ferro em hortênsia e amor-perfeito, assim como deficiência de boro em amor-perfeito, alegria-de-jardim e petúnia).

Capacidade de Troca de Cátions (CTC)

Um importante mecanismo que auxilia na regulação do fornecimento dos nutrientes de carga positiva para a planta é a capacidade de troca de cátions (BUNT, 1988). A CTC é a quantidade de cargas eletrostáticas de superfície negativamente carregadas de um substrato por unidade de peso ou volume. Essas cargas são balanceadas por cátions (nutrientes de carga positiva) que ficam retidos em forma trocável nessas superfícies, em equilíbrio dinâmico com a solução (HANDRECK e BLACK, 1999; FONTENO, 1996; ROWEL, 1994).

A CTC está relacionada diretamente com a capacidade tampão do substrato às variações bruscas no valor de pH e na disponibilidade de nutrientes, sendo importante na redução das perdas de cátions por lixiviação (FERMINO, 1996).

Segundo FONTENO (1996), a CTC deve estar entre 6 e 15 meq por 100 mL⁻¹ de substrato, para uma ampla reserva de nutrientes. HANDRECK e BLACK (1999), sugerem uma CTC entre 5 e 10 meq 100mL⁻¹. Essas recomendações são referências, devendo-se considerar que a necessidade de maior CTC no substrato está diretamente relacionada com a menor tecnologia de controle das condições nutricionais e de irrigação do cultivo por parte do produtor.

Salinidade

Especialmente na utilização de materiais alternativos, em misturas não-industrializadas, é importante conhecer o nível de salinidade do substrato, a fim de evitar perdas na produção (KÄMPF, 2000a).

A condutividade elétrica é um indicativo da concentração de sais ionizados na solução (WALLER e WILSON, 1984) e fornece um parâmetro para a estimativa da salinidade do substrato. As plantas variam em sua tolerância a níveis de salinidade e estresse hídrico, não eletrólitos, como a uréia, que também contribuem para o estresse osmótico, não são, no entanto, mensurados na CE imediatamente após sua aplicação, mas somente após sua hidrolização (WALLER e WILSON, 1984).

A salinidade pode ser derivada da adubação de base ou do conteúdo natural de sais dos componentes utilizados na mistura (KÄMPF, 2000b). Corretivos de acidez também elevam o nível de salinidade (HANDRECK e BLACK, 1999).

RÖBER e SCHALLER (1985) citado por KÄMPF (2000a) elaboraram uma tabela de recomendação para substratos conforme três reações das culturas à concentração salina (Tabela 1).

TABELA 1. Classificação da sensibilidade das culturas a níveis de concentração salina no substrato (KÄMPF, 2000b)

Reação da Cultura	Níveis de salinidade	Salinidade *	Exemplos de culturas
Grupo 1: sensíveis	Baixo	0,5 a 1,0	Avenca, boca-de-leão, camélia, algumas bromélias e orquídeas
Grupo 2: tolerantes	Médio	1 a 2	Alamanda, begônia, gérbera, gladiolo, rosa, hibisco, zínia, copo-de-leite
Grupo 3: exigentes (em quantidade)	Alto	2 a 3	Hortênsia, crisântemo, gerânio

* expressa em g KCl L⁻¹ de substrato

CAVINS et al. (2006), fornecem uma tabela para a interpretação de valores de CE (mS/cm) para vários métodos de extração utilizados por produtores e laboratórios nos Estados Unidos da América, de acordo com o tipo de cultivo e sugerem que um substrato com CE entre 2,0 e 3,5 dS m⁻¹ (25°C), em extrato saturado, apresenta salinidade adequada ao desenvolvimento da maioria dos cultivos (Tabela 2).

Os sais dissolvidos tornam o potencial osmótico (Ψ_o) da solução do substrato mais negativo. A planta deve superar esse potencial para absorver água (HANDRECK e BLACK, 1999).

Isso sugere que a redução no conteúdo relativo de água no substrato, concentrando a solução em contato com as raízes, tem grande efeito no estresse hídrico, demonstrando a necessidade de se conduzir o cultivo em condições próximas à capacidade de recipiente.

TABELA 2. Interpretação de valores de condutividade elétrica (em dS m⁻¹ a 25°C) para vários métodos de extração (CAVINS *et al.*, 2006).

Método de Extração				Indicação
1:5	1:2	Extrato Saturada	Lixiviado	
0 a 0,11	0 a 0,25	0 a 0,75	0 a 1,0	Muito Baixo. O nível de nutrientes pode não ser suficiente para sustentar um rápido crescimento
0,12 a 0,35	0,26 a 0,75	0,76 a 2,0	1,0 a 2,6	Baixo. Adequado para <i>seedlings</i> , forrações anuais e plantas sensíveis a salinidade
0,36 a 0,65	0,76 a 1,25	2,0 a 3,5	2,6 a 4,6	Normal. Faixa padrão para a maioria das plantas em crescimento. Limite superior para as sensíveis à salinidade
0,66 a 0,89	1,26 a 1,75	3,5 a 5,0	4,6 a 6,5	Alto. Vigor reduzido e crescimento podem ocorrer, especialmente durante épocas quentes.
0,9 a 1,10	1,76 a 2,25	5,0 a 6,0	6,6 a 7,8	Muito Alto. Pode resultar em danos devido à dificuldade na absorção de água, assim como crescimento reduzido. Sintomas incluem queima das bordas das folhas e murcha.
> 1,10	>2,25	>6,0	> 7,8	Extremo. A maioria dos cultivos sofrerá injúrias a esses níveis. Lixiviação imediata necessária.

* devido a variabilidade desse método, os produtores devem sempre comparar seus resultados com o extrato saturado para estabelecer faixas aceitáveis

2.2.3.3 Propriedades Biológicas

Refere-se a propriedades dadas pelos materiais orgânicos, quando estes não são de sínteses instáveis termodinamicamente e, portanto, susceptíveis de degradação mediante reações químicas de hidrólises, ou bem, pela ação de microorganismos. Entre as características biológicas destacam: conteúdo de matéria orgânica e estado e velocidade de decomposição (PASTOR, 1999).

Qualquer atividade biológica nos substratos é claramente prejudicial. Os microorganismos competem com a raiz por oxigênio e nutrientes. Também podem degradar o substrato e piorar suas características físicas iniciais. Geralmente diminui sua capacidade de aeração, podendo-se produzir asfixia radicular. A atividade biológica está restrita aos substratos orgânicos e se eliminarão aqueles cujo processo degradativo seja demasiado rápido.

Assim as propriedades biológicas de um substrato se podem concretizar em:

a) Velocidade de decomposição.- A velocidade de decomposição é função da população microbiana e das condições ambientais em que se encontra o substrato. Esta pode provocar deficiências de oxigênio e de nitrogênio, liberação de substâncias fito tóxicas e contração do substrato. A disponibilidade de compostos biodegradáveis (carboidratos, ácidos gordurosos e proteínas) determina a velocidade de decomposição.

b) Efeitos dos produtos de decomposição.- Muitos dos efeitos biológicos dos substratos orgânicos se atribuem aos ácidos húmicos e fúlvicos, que são os produtos finais da degradação biológica da lignina e a hemicelulosa. Uma grande variedade de funções vegetais se vêem afetadas por sua ação.

Alguns componentes da matéria orgânica, classificados sob o termo *fitotoxinas*, causam injúrias e eventualmente matam plantas quando presentes em substratos. Muitas cascas e serragens utilizadas contêm fitotoxinas, com variações de acordo com a espécie (HANDRECK e BLACK, 1999).

BOOMAN (2000), produtor norte-americano, alerta sobre teores de tanino tóxico na casca de sequóia e de outras madeiras de lei. Trabalhos como o de YATES e ROGERS (1981) e ORTEGA *et al.* (1996) demonstram a influência negativa de compostos fenólicos presentes em cascas de árvores na germinação e no desenvolvimento vegetal.

Casca de coníferas e serragens de madeira podem, no entanto, ter o nível de fitotoxinas reduzido através da compostagem, o que contribui igualmente para redução da relação C:N. (HANDRECK e BLACK, 1999). É importante, no entanto, que esse processo seja conduzido de forma aeróbia, a fim de evitar a formação de outros compostos prejudiciais ao desenvolvimento vegetal como ácido acético, e compostos fenólicos e alcalóides (BILDERBACK, 2005).

O tratamento com algumas substâncias pode minimizar o efeito de fitotoxinas. A utilização de sulfato de ferro para a complexação de taninos em serragem é uma prática utilizada por produtores da Califórnia (BOOMAN, 2000). A adição de Polyvinylpyrrolidona (PVP) teve efeito na inativação de fitotoxinas fenólicas em extratos de casca de coníferas (YATES e ROGERS, 1981).

Características biológicas favoráveis também podem estar presentes nas matérias-primas e nos substratos orgânicos. Alguns compostos e microorganismos antagônicos podem

auxiliar na supressão de patógenos e a inoculação de micorrizas já é uma prática comercial (KOIDE et al, 1999).

Solos minerais, no entanto, são potenciais inoculadores de patógenos nos cultivos quando utilizados nas misturas (HANDRECK e BLACK, 1999).

2.2.4 Características do substrato ideal.

Segundos SCHMIT (2002); MILNER (2002); PASTOR (1999), o melhor meio de cultivo depende de numerosos fatores, como o tipo de material vegetal com que se trabalha (sementes, plantas, estacas, etc.), espécie vegetal, condições climáticas, sistemas e programas de irrigação e fertilização, aspectos econômicos, etc.

Para obter bons resultados durante a germinação, o enraizamento e o crescimento das plantas as propriedades desejadas em substratos são:

a) Propriedades físicas: Elevada capacidade de retenção de água facilmente disponível.

Suficiente fornecimento de ar, distribuição do tamanho das partículas que mantém as duas condições anteriores, baixa densidade aparente, elevada porosidade, elevada condutibilidade hidráulica e a manutenção das propriedades anteriores ao longo do tempo.

b) Propriedades químicas: Baixa ou apreciável capacidade de intercâmbio catiônico, dependendo se a fertirrigação é aplicada permanentemente ou de modo intermitente; suficiente nível de nutrientes assimiláveis, baixa salinidade, elevada capacidade tampão e capacidade para manter constante o pH e mínima velocidade de decomposição.

c) Outras propriedades: Livre de sementes de ervas daninhas, nematóides, patogênicos e substâncias fito tóxicas, baixo custo, fácil de misturar, fácil de desinfetar e estabilidade frente à desinfecção, resistência à mudanças externas física, químicas e ambientais.

Em conclusão, o aumento na utilização de estufas na produção agrícola faz com que busquem-se substratos que possam garantir a qualidade do produto final, para o qual, é necessário determinar e monitorar as características físicas e químicas dos substratos, que podam permitir ao produtor um manejo adequado da fertirrigação evitando assim possíveis problemas de salinização

2.3 A Técnica da TDR na agricultura.

Na técnica TDR (Time Domain Reflectometry) confluem diversas aplicações industriais no campo da eletrônica, criadas em seu momento para detectar anomalias nas linhas de transmissão elétrica,

Onde a estimativa do tempo que demora para uma onda eletromagnética percorrer um meio, neste caso o cabo telefônico, até encontrar uma mudança de impedância auxilia na determinação do local exato aonde ocorreu um rompimento do meio.

Na década de 80 TOOP et al.(1980) obtiveram resultados de aplicação de TDR para medida de constante dielétrica do solo e da estimativa do conteúdo de água no solo

2.3.1 A TDR na estimativa da umidade e condutividade elétrica

A técnica da TDR, como método para estimativa da medida de umidade e condutividade elétrica do solo, vem se destacando no cenário das técnicas empregadas para medidas de parâmetros físicos do solo.

Entre os métodos não destrutivos que costumam empregar-se para determinar a umidade do solo (sonda de nêutrons, resistividade elétrica, blocos de gesso, etc.), a reflectometria no domínio do tempo (TDR) está sendo considerada atualmente como a mais adequada.

O método, permite calcular de forma simples a permissividade dielétrica.

Segundo TAPIAS et al. (2001), a permissividade dielétrica pode definir-se como a polarização elétrica adquirida por uma substância como consequência da indução gerada por um campo eletromagnético.

A permissividade dielétrica se expressa em faradios/metro, mas geralmente se utiliza a permissividade dielétrica relativa do vácuo, também denominada constante dielétrica (K_a), que é adimensional.

A permissividade dielétrica relativa (K) de um meio poroso e composto por três componentes (ar, água e partículas minerais ou orgânicas) é igual a:

$$K = k_w^\alpha \theta + k_m^\alpha (1-n) + k_a^\alpha (n-\theta) \dots\dots\dots(1)$$

Em que,

k_w = é a permissividade dielétrica relativa do água;

k_a = é a permissividade dielétrica do ar;

k_m = é a permissividade dielétrica das partículas minerais;

n = é a porosidade do solo;

θ = é o conteúdo volumétrico em água do solo;

α = é um fator estrutural, cujo valor para solos isotrópicos é 0,5.

A permissividade dielétrica relativa da água é aproximadamente igual a 80, a das partículas minerais ou orgânicas constituintes de meio poroso oscila entre 3 e 5, e a do ar é igual a 1.

Portanto, dado o elevado contraste entre k_w e os demais componentes do solo, o conteúdo em água é o fator dominante do valor desta propriedade nos solos.

A TDR mede o tempo de ida e volta de um impulso eletromagnético de alta frequência (do ordem do GHz). A velocidade de propagação do impulso é função da permissividade dielétrica do meio, que a sua vez está muito condicionada pelo conteúdo em água do mesmo. Então, o método pode ser aplicado para a medida indireta do conteúdo de umidade em meios porosos. Quando o impulso eletromagnético encontra uma mudança de impedância na linha sofre uma reflexão que é captada pelo receptor.

Numericamente, para os materiais não magnéticos, a permissividade dielétrica relativa (K_a) é equivalente ao quadrado do quociente entre a velocidade da luz no vácuo (C_o) e a velocidade de uma onda de volta (v):

$$K_a = \left(\frac{C_o}{v} \right)^2 \dots\dots\dots(2)$$

Esta relação de velocidade é igual ao quociente entre o tempo de volta da onda eletromagnética e a longitude das hastes, portanto, a permissividade dielétrica relativa pode medir-se de forma relativamente simples.

O tempo de trânsito de ida e volta do impulso eletromagnético esta dado por:

$$t = \frac{2L}{C_o} \sqrt{K_a} \dots\dots\dots(3)$$

onde:

t = tempo duplo de reflexão (ns);

L = Comprimento da haste (m);

K_a = permissividade dielétrica relativa do meio (adimensional);

C_0 = velocidade da luz ($\text{cm}\cdot\text{ns}^{-1}$).

A Figura 2 mostra a clara diferença entre os tempos de chegada para solos com conteúdo de umidade do 20%, 25% e 30%. Note-se o retardo na chegada do sinal desde x_1 até x_2 , à medida que aumenta a umidade do solo desde 20% até 25 e 30%.

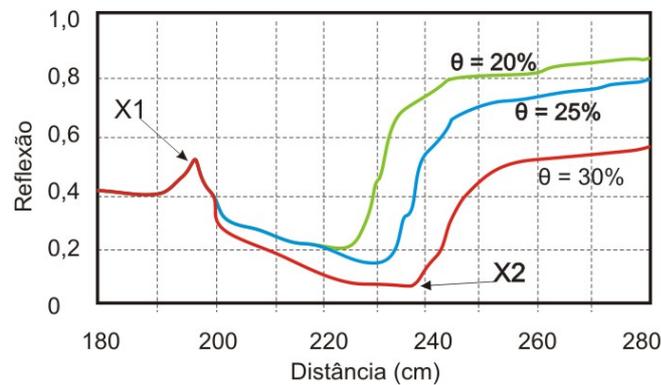


FIGURA 2: Curvas características de TDR medidas em solos com diferentes conteúdos volumétricos de água.

As sondas (guias de onda) usadas para transmitir o pulso eletromagnético gerado no testador de cabos ao solo e daí determinar a constante dielétrica do solo podem ser construídas de diferentes maneiras. COELHO et al (2001) e SOUZA et al. (2001) sugerem o uso de uma guia de onda de três hastes com um capacitor de 3,9 PiF para uso com a TDR Trase System. COELHO et al. (2003) sugerem o uso de uma guia de onda similar a anterior substituindo-se o capacitor por um resistor de 15 Ω para uso com a TDR 100. Essas guias de onda, construídas de forma artesanal, necessitam de avaliações.

2.3.2 Vantagens e desvantagens da TDR

Existem vantagens e desvantagens no uso da técnica da TDR para SOUZA et al. (2004); COELHO (2001); SOUZA et al. (2001); TOMMASELLI e BACHI (2001); OTTOL e ALCAIDE (2001) e TOOP et al.(1980). O princípio da TDR apresenta vantagens quanto à rapidez na obtenção da umidade, a também TDR proporciona a repetibilidade das leituras, a não destruição da região amostrada, a não emissão de radiações ionizantes, portabilidade e

facilidade de acoplamento a dispositivos coletores de dados, pouco sensíveis as características textuais e estruturais do solo, possibilidade de automação, é portátil e as medições podem ser feitas de forma automática, em condições de laboratório ou de campo, em qualquer direção no perfil do solo e no tempo real e pouca influência da textura, densidade e salinidade são justificativas fortes para a adoção cada vez maior da técnica em substituição de outros métodos.

Tendo como desvantagens, tanto considerando o testador de cabos como as guias de onda, tem sido o custo, ainda alto para os padrões da agricultura nacional. Os valores apenas das guias de onda compradas do fabricante de TDR chegam a ser compatível com os valores de tensiômetros, dependência do tipo de solo (mineral ou orgânico), materiais magnéticos, encontram-se também a necessidade de uma calibração específica e trabalhosa para cada tipo de solo, apesar da afirmada universalidade da relação entre umidade volumétrica e constante dielétrica proposta por (TOPP et al., 1980).

Segundo QUEIROZ (2004, p.44), “a elevação da salinidade do solo, bem como do teor da água do solo afeta negativamente a correlação das leituras de umidade e condutividade elétrica obtidas pelos equipamentos avaliadas, (TDR e Sigma Probe) quando comparadas àquelas realizadas pelos métodos de referência”.

2.3.3 Calibração da TDR

Embora o equipamento tenha uma curva de calibração embutida, que o manual do fabricante apregoa com sendo uma curva geral, recentemente pesquisadores mostraram que isto não ocorre.

Segundo TOMMASELLI (2001), a variáveis que afetam a resposta dielétrica do solo são: textura, estrutura, quantidade de sais solúveis, conteúdo de água, temperatura, densidade e a frequência eletromagnética do sinal da medida. TOPP et al. (1980), considera que, para frequências entre 1 e 20 GHz (frequências da reflectometria de microondas), a variável que mais afeta a resposta dielétrica do solo é o conteúdo de água, com um peso relativo de cerca de 93%.

Uns dos problemas da calibração dos equipamentos de TDR é a composição atípica de alguns solos. Há variações na curva de calibração para solos com maior susceptibilidade aos campos magnéticos, como por exemplo os solos com altos teores de óxido de ferro e em solos de diferentes densidades e porosidades (MALICKI et al.,1996)

Os modelos de calibração da TDR podem ser de natureza empírica e semiempírica ou física, que envolvem modelos dielétricos mistos (TOMMASELLI, 2001; NOBORIO, 2001), dentre esses modelos disponíveis destacam-se os de DOBSON et al. (1985) citado por TOMMASELLI (2001) e de ROTH et al. (1990). Outros modelos envolvem parâmetros físicos do solo como os de MALICKI et al. (1996) e WHALLEY et al. (1993).

Segundo TAPIAS et al. (2001), para calcular a umidade volumétrica a partir da constante dielétrica aparente medida com a técnica da TDR, podem utilizar-se dois tipos de relações matemáticas: relações empíricas descritas por: TOPP et al. (1980), NADLER (1991), JACOBSEN E SCHJONNING (1993) e as relações baseadas em modelos físicos descritas por: ROTH et al. (1990), WHALLEY (1993), VAN LOON et al. (1991).

Os modelos empíricos de calibração pressupõem que a relação entre a constante dielétrica aparente e o conteúdo de água do solo é dependente apenas deste último, e assim, TOPP et al.(1980), desenvolveram uma curva de calibração, que consideraram universal:

$$K_a = 3,03 + 9,3 \cdot \theta + 146 \cdot \theta^2 - 76,7 \cdot \theta^3 \dots\dots\dots(4)$$

Ou:

$$\theta = (-530 + 292K_a - 5,5K_a^2 + 0,043K_a^3)/10^4, \dots\dots\dots(5)$$

Onde K_a é a constante dielétrica relativa aparente do solo, e θ é o conteúdo volumétrico de água do solo, em $m^3 m^{-3}$.

O modelo de TOPP et al.(1980) têm sido muito usado, quando inseridos nos equipamentos de TDR dos fabricantes.

2.3.4 Estimativa da condutividade elétrica pelo TDR

O uso da reflectometria no domínio do tempo TDR permite o monitoramento da condutividade elétrica do solo (CE_a) em tempo real, onde uma sonda de TDR pode ao mesmo tempo estimar num dado local do solo a umidade e a condutividade elétrica (CE), o que abre caminho para inferir a concentração de um dado nutriente aplicado pela condutividade elétrica da solução do solo (CE_w).

Vários modelos matemáticos tem sido usados para estimar CE_a em função de umidade e da condutividade elétrica da solução do solo (CE_s), sendo que os mais usuais tem sido o de RHOADES et al. (1976).

A CE_a do solo é uma resultante da CE aparente da fase líquida do solo que ocupa a porosidade (CE_b) do mesmo e da condutividade elétrica referente aos cátions trocáveis situados na interface sólido líquido (CE_{cs}), conforme a RHOADES et al. (1976).

$$CE_a = CE_b + CE_{cs} \dots\dots\dots (6)$$

Em que $CE_b = CE_s \theta T$, onde θ é a umidade volumétrica do solo e T é o coeficiente de transmissão, que segundo RHOADES et al. (1976) leva em conta a tortuosidade na mobilidade dos íons nas interfases água-solo e água espaço poroso, sendo que T varia linearmente com θ . Dessa forma é possível, a partir de CE_a se chegar a CE_w , pela equação descrita por RHOADES et al. (1976), substituindo-se CE_b da equação 6 por $CE_s \theta T$ e obtendo-se a equação:

$$CE_a = CE_s \theta T + CE_{cs} \dots\dots\dots (7)$$

ROADES et al. (1976) avaliou estas relações para alguns tipos de solos confirmando os ajustes dos dados às equações propostas. Com isso, abre-se uma alternativa para uso da TDR na determinação da condutividade elétrica da solução do solo, o que depende da equação 7, onde é necessário o conhecimento do T e da CE_{cs} , que pode ser determinados em laboratório a partir de dados de campo obtidos com uso da TDR.

Segundo SOUSA (2004 p.2), “para medidas precisas da umidade e da concentração da solução do solo em laboratório e em campo existe uma tendência de utilização da técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), onde se recomenda o levantamento de uma curva de calibração para cada tipo de solo, um inconveniente normalmente aceitável comparado com as vantagens que apresenta em relação a outras técnicas”

Para caracterizar uma sonda é necessário conhecer o comprimento e o diâmetro das hastes, além da separação entre elas (TAPIAS et al., 2001).

A partir destes parâmetros se pode determinar a impedância da sonda (KRAUSS, 1984 citado por TAPIAS, 2001) mediante a seguinte equação:

$$Z_0 = 60 \ln\left(\frac{2s}{d}\right) \dots\dots\dots (8)$$

em que,

Z_0 = é a impedância da sonda (Ω)

s = é a distância máxima entre as hastes, (m)

d = é o diâmetro da haste (m)

As sondas podem ser de vários tipos: de duas hastes, de três ou mais hastes ou também coaxiais.

Teoricamente são preferíveis as sondas coaxiais devido à distribuição mais homogênea das linhas equipotenciais; sem embargo, pela maior facilidade de implantação no solo. Para as medidas de campo se utilizam preferencialmente as sondas constituídas por duas ou mais hastes paralelas. ZEGELIN et al.(1989) demonstraram a melhor resposta das sondas de 3 ou mais hastes.

Segundo OR (1998), citado por QUEIROZ (2004), os valores de condutividade elétrica do volume do solo (CE_{vs}) é calculada por:

$$CE_{vs} = \frac{Z_o}{120 \pi L} \left(\frac{Z_o}{Z_u} \right) \left(\frac{2V_o}{Vf - 1} \right) 10 \dots\dots\dots (9)$$

Sendo:

CE_{vs} – condutividade elétrica do volume de solo, ($dS.m^{-1}$);

Z_u – impedância do cabo (50Ω);

V_o – voltagem emitida;

Vf – voltagem recebida.

SOUSA (2004), concluiu que existe linearização relacionando a condutividade elétrica medida pelo TDR em função da condutividade elétrica da solução do solo, e conseqüentemente, viabilidade no uso da técnica da TDR na estimativa da umidade e da concentração da solução do solo. Sugere-se que seja realizada uma avaliação da calibração, observando sua validação e a obtenção de medidas de umidade e concentração da solução no solo em processos dinâmicos.

Conclui-se que o uso da indução eletromagnética para a estimativa da umidade e condutibilidade elétrica utilizada pela TDR, faz com que esta técnica não se torne destrutiva e apresente muitas vantagens como a velocidade, facilidade no manejo para obter dados e

possibilidade de automação, vantagens muito importantes que põem contra a desvantagem de uma necessidade de calibração e um custo ainda alto do aparelho.

2.3.5 Uso da TDR em substratos

O uso da TDR para medir o conteúdo de água em substratos foi avaliado por alguns pesquisadores como SILVA et al.(1998), que mediu o conteúdo de água em dois tipos de substratos hortícolas (refugos agrícolas, *red tuff* e uma combinação de ambos) obtendo equações de calibração para cada um mediante análise de regressão, e os resultados foram expressos em conteúdo volumétrico de água. Os resultados foram descritos pelas equações lineares cada uma com declive quase idêntica mas em diversas intersecções.

SCHURER e HILHORST (1998), utilizaram dois métodos para a medição de umidade em solos e substratos, empregando a medida das características dielétrica do solo e substrato, utilizando a reflectometria do domínio de tempo (TDR) e o método do domínio da frequência (FD), medidas a impedância estática entre um sistema de eletrodos. Os sensores de TDR e do FD foram provados em diversos solos e substratos e seu comportamento foi comparado com a resposta dada por (TOOP et al., 1980). E, concluindo que os sensores demonstram compatibilidade com as curvas descritas por (TOOP et al., 1980).

TAPIAS (2001), utilizou a técnica de TDR para medir a variação espacial e temporária da umidade do solo em campos de golfe. Neste trabalho apresentam-se os resultados obtidos da calibração do TDR para areias de textura e composição igual aos substratos utilizados para a construção de campos de golfe, bem como da aplicação da técnica na medida da variabilidade espacial e temporária do conteúdo volumétrico de água do solo de diferentes zonas em dois campos de golfe.

Embora a técnica de TDR tenha sido muito estudada na estimativa da umidade e condutividade elétrica em solos convencionais, para o caso de substratos agrícola tem pouca informação do uso desta técnica. Portanto, se adaptaram e empregaram as informações e metodologias aplicadas em solos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Local

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Hidráulica, Irrigação e Drenagem da Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, Campinas SP. As coordenadas geográficas são 22°30' S, 47°30' O e altitude de 625 m.

3.2. Caracterização dos substratos

3.2.1. Descrição dos substratos

Os substratos submetidos aos estudos foram:

a) Casca de Pinus (CP): Substrato comercial tipo horta 1, da empresa Mec Prec, localizada em Telêmaco Borba – PR. A matéria prima básica é a casca de pinus compostada. A umidade média do substrato formulado situa-se entre 54 e 58%. A densidade (relação peso/volume) sem compactação situa-se entre 360 e 400 g/litro, com média igual a 375 g/litro, com condutividade elétrica de 1,0 – 1,5 dS m⁻¹ e pH de 5,0 – 6,0 (características obtidas com o fabricante).

b) Fibra de coco (FC): Substrato comercial Golden Mix tipo 80-granulado da empresa Amafibra, localizada em Anamindeua – PA. substrato elaborado a partir do mesocarpo do coco, possuindo textura fina, indicado para formação de mudas em bandejas e tubetes. A densidade (material seco) e 92 kg m⁻³, matéria orgânica 89%, porosidade total de 94%, faixa de condutividade elétrica (1:2, v:v água) 0,2- 0,4 dS m⁻¹, Faixa de pH (1:2 v:v água) 5,0 –5,8 (características obtidas com o fabricante).

3.2.2 Métodos para caracterização física dos substratos

A) Densidade.

Para a determinação da densidade úmida e seca foi empregado o método descrito por HOFFMAN (1970), e utilizado pela federação dos institutos para a pesquisa e análises agrícola da Alemanha (VDLUFA) para análise de substratos hortícolas (ROBER e SCHALLER, 1985).

Onde seis amostras de cada substrato no estado fresco, é colocada em proveta de plástico transparente e graduada de 500 ml de capacidade (Figura 3) a qual deixa-se cair por 10 vezes consecutivas sob ação de seu próprio peso de uma altura de 10 cm.

Com ajuda de uma espátula nivelou-se o volume obtido (ml).

Em seguida, pesou-se o material fresco (g) e colocou-se em estufa a 65 °C, por 48 horas ou até peso constante.

Os valores das densidades de volume (media de 3 amostras) foram obtidos aplicando-se as seguintes formulas:

$$Densidade\ úmida\ (kg.m^{-3}) = \frac{Massa\ úmida\ (g)}{Volume\ (cm^3)} \times 1000 \dots\dots\dots(10)$$

$$Matéria\ seca\ (\%) = \left(\frac{Massa\ seca}{Massa\ úmida} \right) \times 100 \dots\dots\dots(11)$$

$$Densidade\ seca\ (kg.m^{-3}) = \frac{Densidade\ úmida\ (kg.m^{-3}) \times Matéria\ seca\ (\%)}{100} \dots\dots(12)$$

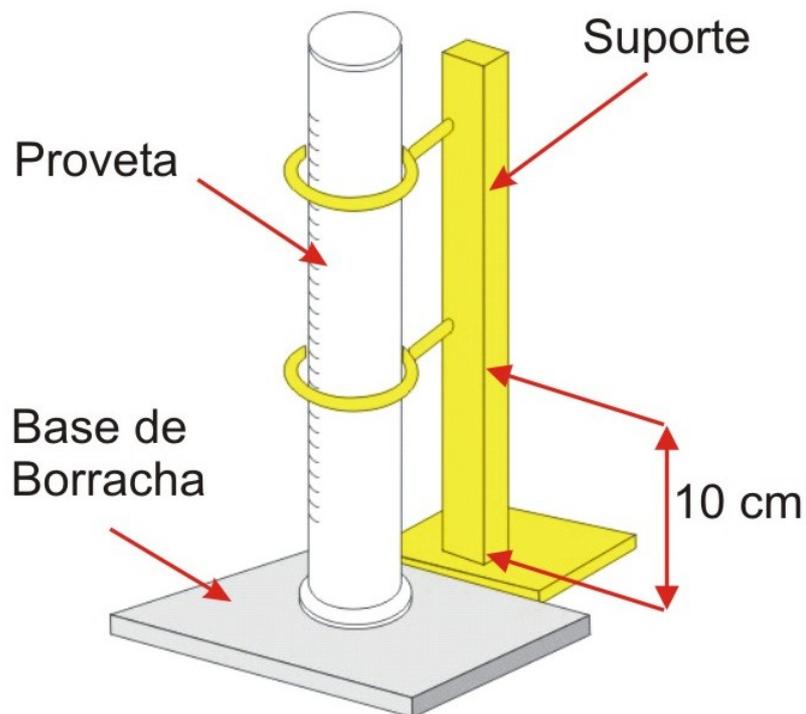


FIGURA 3: Arranjo utilizado para determinação da densidade dos substratos

B) Determinação da curva de retenção de água pelos substratos.

Os valores de retenção de água pelos substratos foram obtidos em seis amostras pelo método da placa extratora de Richards (panela de pressão).

Utilizou-se o seguinte procedimento:

a. Vedação do fundo dos anéis (cilindros metálicos) com tecidos de nylon preso por um elástico a pesagem destes anéis;

b. Preenchimento dos anéis com os substratos cerca de 107 ml (5,20 cm de diâmetro e 5,00 cm de altura), de acordo com a densidade úmida dos mesmos, para garantir sua uniformidade.

c. Colocação dos anéis em bandejas plásticas com água até 2/3 de sua altura, para saturação, por 24 horas.

d. Retirada dos anéis da água.

e. Pesagem dos anéis. O volume de água contida na amostra neste momento corresponde ao ponto zero de tensão equivalente à porosidade total.

f. Transferência dos anéis para a panela de pressão.

g. Ajuste da tensão para 10 cm de coluna de água (10hPa)

h. Permanência na panela de pressão até atingir equilíbrio (cerca de 48 horas)

i. Pesagem

j. Retorno dos anéis para a panela de pressão, repetindo o procedimento para tensões de 20, 50, 75 e 100 cm de coluna de água (20,50,75 e 100 hPa)

k. Secagem das amostras em estufa a 65°C até peso constante (cerca de 48 horas) para determinação dos teores de umidade e peso de matéria seca.

A construção das curvas de retenção de água foi efetuada com os valores de umidade volumétrica obtidos através dos percentuais de água retida para cada tensão. Sendo feito o ajuste dos pontos por meio da metodologia descrita por (VAN GENUCHETN, 1980)

De posse destes dados, foram obtidas as seguintes características:

Porosidade total (PT): corresponde à umidade volumétrica presente nas amostras saturadas (tensão 0 hPa).

Espaço de aeração (EA): diferença entre a porosidade total e o volume de água na tensão de 10 cm de coluna de água (10 hPa).

Água disponível (AD): é o volume de água liberado entre 10 e 100 cm de coluna de água (10-100 hPa).

Água remanescente (AR₁₀₀): volume de água remanescente no material após ter sido submetido à tensão de 100 hPa. Equivalente à “água de micro poros”.

Água facilmente disponível (AFD): Volume da água encontrado entre os pontos 10 e 50 cm de coluna de água (10-50 hPa)

Água tamponante (AT): volume de água liberado entre 50 e 100 cm de coluna de água (50-100 hPa)

Capacidade de retenção de água (CRA): é a quantidade de água retida por um substrato, num determinado recipiente, após ser submetido a uma determinada tensão.

Capacidade de recipiente (CR): quantidade máxima de água retida por um substrato, num determinado recipiente, após saturação e cessada a drenagem (capacidade de retenção a 10 cm de coluna de água ou 10 hPa)

C) Determinação de Granulometria

Para a realização desta análise foi utilizada uma amostra de 100 g de substrato, seco ao ar, colocada sobre um jogo de peneiras, acoplado a um agitador mecânico e foram agitadas durante três minutos a 240 agitações/min. As malhas das peneiras empregadas apresentavam 4,70 – 2,00 – 1,00 – 0,50 – 0,25 mm. Após a agitação, o material retido em cada peneira foi pesado sendo o valor determinado utilizado para calcular a porcentagem em relação ao peso da amostra (média de 3 amostras).

3.3 Calibração da TDR

3.3.1 Calibração da TDR para determinação de umidade

Para calibração da TDR foram construídos 6 recipientes com segmentos de tubo de PVC com volume de 1767,14 cm³ (22,5 cm de altura e 10,0 cm de diâmetro interno) tendo uma altura suficiente para instalar as guias de sonda no sentido vertical do recipiente (Figura 4)

A fim de permitir a passagem da água e evitar perdas de substrato, as partes inferiores dos recipientes foram vedadas com tela de malha fina.

A sonda utilizada consistia de três hastes de aço inox de 6,35 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento separadas entre si por 2,5 mm.

Os valores da constante dielétrica aparente (K_a) do meio poroso (substrato), foram medidos pelo equipamento TDR Tektronix modelo 1502 C.

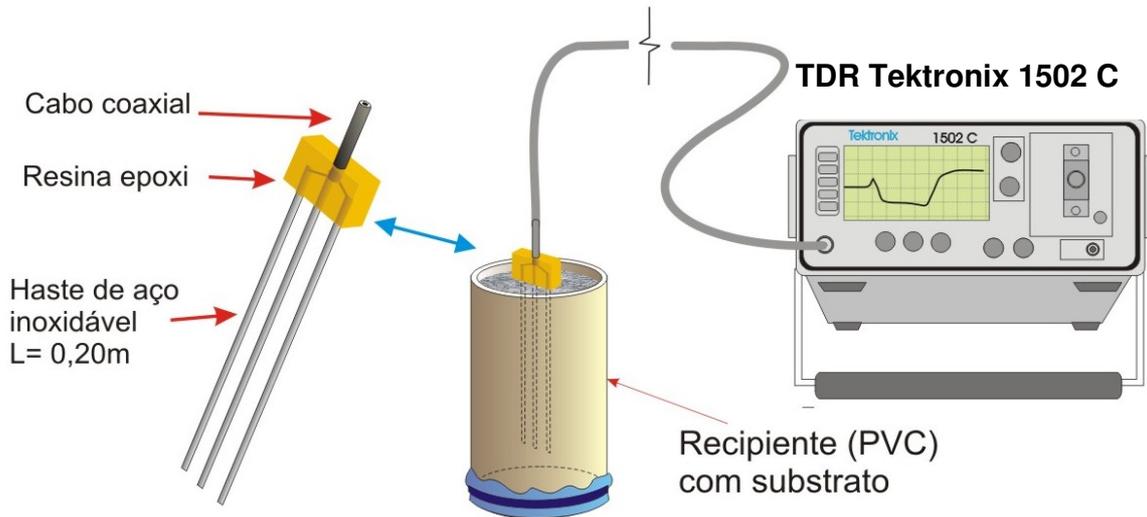


FIGURA 4: Esquema da calibração da TDR para determinação de umidade.

A calibração da TDR para a estimativa de umidade em substratos foi feita utilizando duas metodologias: de úmido para seco e de seco para úmido

a) Calibração da TDR (de úmido para seco)

A fim de proceder a calibração, as amostras do substrato foram secas ao ar e peneiradas em malhas de 4 mm, sendo, em seguida acondicionadas em 6 recipientes construídos com segmentos de tubos de PVC. A massa de substrato acondicionada nos tubos foi igual aquela necessária para a obtenção de densidade aparente igual a 112 kg.m^{-3} para fibra de coco e 252 kg.m^{-3} para casca de pinus.

Os substratos contidos dentro dos recipientes foram então saturados por capilaridade durante um período de 24 horas.

Os recipientes preenchidos com substrato tiveram suas massas medidas, por intermédio de balança analítica, desde a saturação até uma umidade próxima a água tamponante (umidade próxima a valores do ponto de murcha permanente)

Juntamente com a determinação da massa foram feitas leituras de constante dielétrica (K_a), utilizando-se o equipamento TDR Tektronix modelo 1502C.

Para acelerar o processo de perda de umidade os recipientes foram colocados em estufa com temperatura de 65°C.

Associando-se os valores de umidade volumétrica calculados pelo método gravimétrico aos valores de K_a determinados pelo TDR, foi realizada a calibração de TDR, por meio do ajuste de um modelo polinomial do terceiro grau (TOPP et al., 1980).

b) Calibração da TDR (de seco para úmido)

As amostras de substrato para a calibração de seco para úmido foram secas ao ar e peneiradas com malhas de 4 mm.

Os níveis de umidade (intervalos de cerca de $5,6 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) foram obtidos espalhando o substrato sobre uma bandeja e adicionando água com o pulverizador. A seguir o substrato era remexido para homogeneização, e adicionava-se mais água até o total desejado (cerca de 100 ml). Para melhorar a homogeneização final, o substrato removido e depois deixado a repousar cerca de 2 horas. Seguidamente, os substratos foram colocadas em 3 recipientes de PVC cada um, preenchendo em camadas mantendo sua densidade o mais uniforme possível. O recipiente com o substrato era então pesado o que permitia a obtenção do valor da unidade volumétrica (UV).

A etapa seguinte foi a obtenção das leituras da constante dielétrica relativa aparente (K_a), realizadas pelo equipamento de TDR Tektronix 1502 C.

Os substratos eram novamente espalhados nas bandejas, sendo repetido o procedimento de umedecimento dos substratos. Este procedimento era repetido até próximo da condição de saturação do substrato, avaliada de modo subjetivo.

Com base nas massas do substrato seco, do recipiente, além da densidade do substrato e as massas úmidas determinadas em cada leitura, obteve-se os valores de umidade gravimétrica (U_g) e umidade volumétrica (UV) do substrato a cada determinação da constante dielétrica (K_a) pelo TDR.

Associando-se os valores de umidade ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) aos valores de constante dielétrica (K_a) determinados utilizando o aparelho TDR, foi obtida a curva de calibração de TDR para estimativa de umidade, por meio do ajuste de um modelo polinomial do terceiro grau proposto por (TOPP et al., 1980).

Determinou-se a validade do uso dessa equação foi analisada por uma regressão linear com os dados obtidos a partir de uma curva de calibração e da umidade volumétrica calculada, a nível de 1% de significância.

3.3.2 Calibração da TDR para estimativa de condutividade elétrica

Os substratos em estudo foram secos ao ar e passados por peneira com malha de 4 mm, e cada substrato foi acondicionado em 12 recipientes plásticos de 0,22 m de altura e 0,10 m de diâmetro, a diferença da calibração anterior os recipientes plásticos foram fechados na parte inferior mediante uma tampa de plástico.

Para estabelecer uma relação entre a condutividade elétrica da solução dos substratos ($dS\ m^{-1}$) e a condutividade elétrica aparente (CE_{TDR} , $dS\ m^{-1}$) medida pelo TDR baseou-se nos estudos realizados por RHOADES et al. (1976), no qual os autores introduzem nas equações, um coeficiente de transmissão (T) que, segundo eles leva em conta a tortuosidade (τ) e a condutância superficial (CE_{CS} , $dS\ m^{-1}$), para ajustar a correlação entre CE_{TDR} e a condutividade elétrica da solução (CE_s , $dS\ m^{-1}$).

$$CE_s = \frac{CE_{TDR} - CE_{CS}}{\tau \cdot \theta} \dots\dots\dots (13)$$

Para estimar a condutividade elétrica aparente, a técnica da TDR necessita da impedância característica da sonda. A impedância característica da sonda (Z_o , em Ω), de uma linha coaxial depende exclusivamente da geometria da linha e foi calculada por:

$$Z_o = 60 \ln\left(\frac{2s}{d}\right) \dots\dots\dots (14)$$

Sendo:

s = raio do condutor externo, (m);

d = diâmetro do condutor interno, (m).

Em posse deste valor, o programa WinTDR 6.0 (Utah State University, UT, EUA) analisa a impedância causada pelo meio estudado utilizando um aparelho TDR Tektronix modelo 1502C, e estima a condutividade elétrica (CE_{TDR} dS m^{-1}) através da equação a seguir.(GIESE e TIEMANN citado por SOUSA et al.,2004).

$$CE_{TDR} = \frac{Z_o}{120 \pi L Z_U} \left(\frac{2V_o}{V_{inf}} \right) \dots \dots \dots (15)$$

Sendo:

L = comprimento da sonda, (m);

Z_o = impedância característica da sonda;

Z_u = impedância do cabo (50 Ω);

V_o = voltagem emitida pelo TDR;

V_{inf} = Voltagem recebida.

Em seguida, para estimativa da condutância superficial (CE_{CS}) e da tortuosidade (τ), os substratos foram preenchidos nos recipientes sob condições de densidade do substrato próximos as densidades da calibração anterior.

Esses recipientes foram divididos em 4 lotes iguais separados de três amostras que foram levados, cada uma, à saturação com soluções de KNO_3 com condutividade elétrica de 0 (água destilada), 2, 4, 6 dS m^{-1} . Os recipientes foram deixados em repouso por 24 horas, procurando assegurar a distribuição no perfil do substrato.

A água dos substratos evaporou com o tempo e, conseqüentemente, alterou-se a condutividade elétrica da solução do substrato devido ao aumento na concentração iônica .

Apos a saturação e durante a secagem das amostras, para determinação de umidade volumétrica (UV) foram feitas pesagens dos recipientes contendo os substratos mediante uma balança analítica.

Em seguida, utilizando o testador de cabos Tektronix modelo 1502 C e o programa computacional WinTDR 6,0, a condutividade elétrica aparente (CE_{TDR}), foi determinada pela inserção das sondas em lugar próximo as cápsulas do extrator de solução nos recipientes nas diferentes fases de secagem dos substratos.

Logo após a pesagem das amostras e as leituras da condutividade elétrica com TDR (CE_{TDR}), foram feitas a extrações da solução do substrato, através de um extrator construído

com um tubo de PVC e uma cápsula porosa (Figura 5), a extração foi feita com ajuda de uma bomba de vácuo sob tensão próxima a 90 kPa, Logo após a sucção de aproximadamente 15 mL de solução de substrato retirou-se a solução, armazenando, em frascos de vidro, previamente lavados. Acondicionou-se esses frascos em geladeira para posterior determinação da condutividade elétrica da solução (CE_S), por meio de um condutivímetro digital.

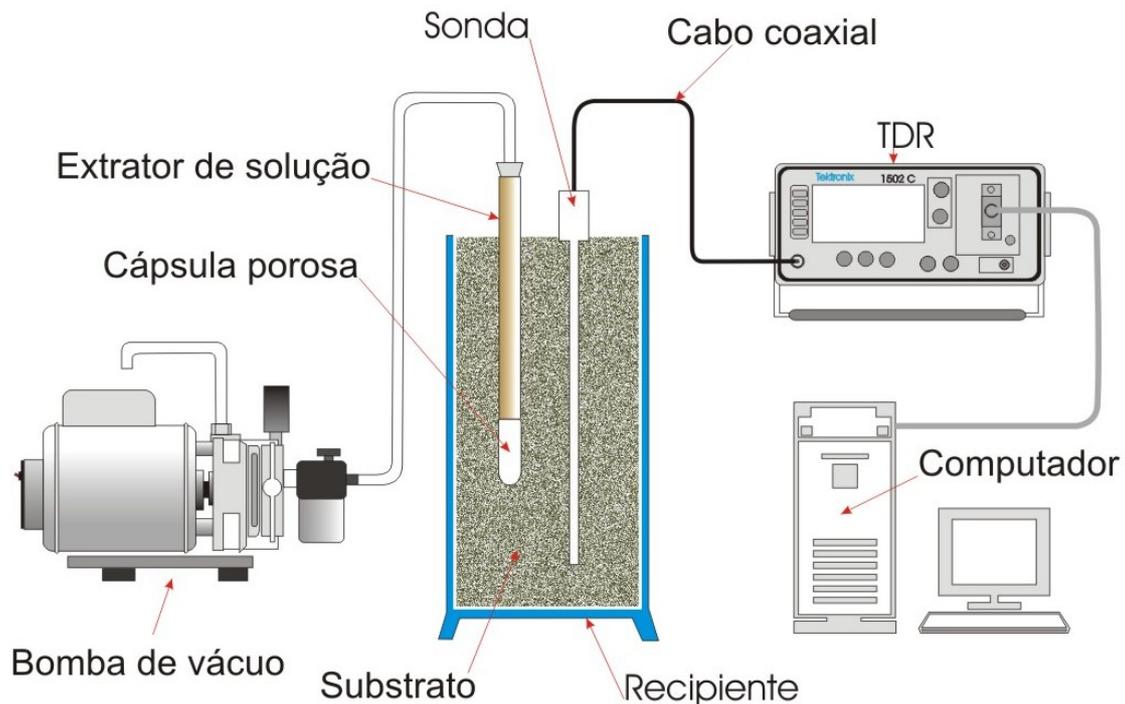


FIGURA 5: Calibração da TDR para estimativa de condutividade elétrica o TDR Tektronix 1502 C acoplado a um computador utilizando o programa WinTDR 6.0

A metodologia proposta por RHOADES et al. (1976), possibilita a relação entre a CE_{TDR} e a CE_S para diferentes umidades pré-estabelecidas. Desta maneira, aplica-se uma extrapolação, tendendo a $CE_S = 0$, para as diferentes curvas geradas pela relação entre CE_{TDR} e CE_S com o propósito de adquirir um valor de CE_{CS} . Esta extrapolação revelará uma desigualdade entre a CE_S e CE_{TDR} cuja teoria aponta o fenômeno da CE_{CS} como a responsável pela diferença. Para o cálculo do valor de CE_{CS} e tortuosidade (τ) foram feitas de acordo com a Figura 6.

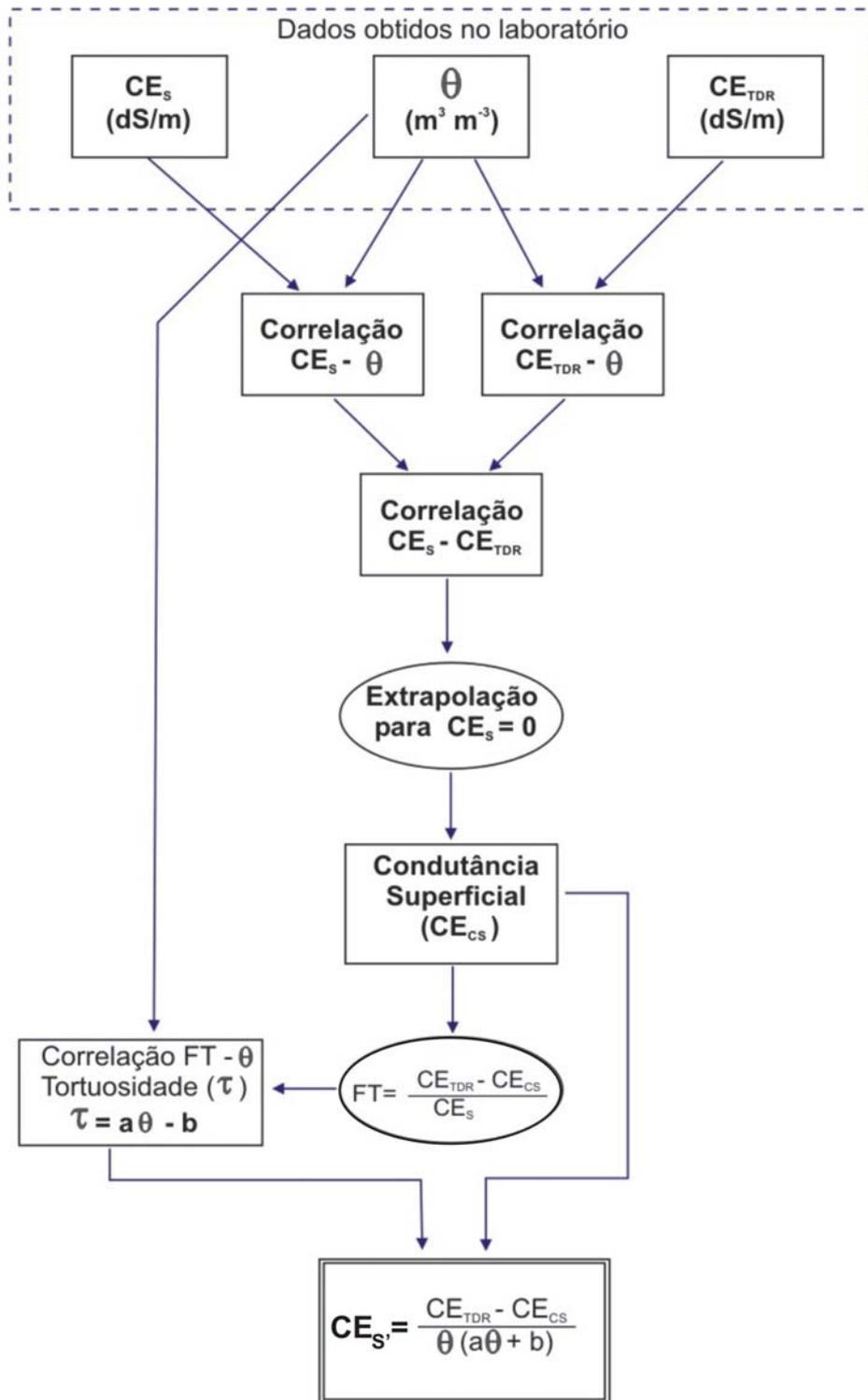


FIGURA 6: Esquema para determinação da tortuosidade (τ) e Condutância superficial (CE_{CS}) para estimativa da condutividade elétrica da solução do substrato (CE_s) a partir de dados de umidade (θ) e condutividade elétrica (CE_{TDR}) obtidos por meio do aparelho TDR.

Dados de condutividade elétrica obtidos mediante o aparelho TDR (CE_{TDR}), e umidade volumétrica obtida pelo método volumétrico(θ), juntamente com os dados de condutividade elétrica da solução dos substratos (CE_S) obtida pelo condutivímetro, foram ajustados por meio do modelo matemático proposto por RHOADES et al. (1976), o que possibilitou a estimativa de condutividade elétrica da solução dos substratos ($CE_{S'}$) a partir de dados de θ e CE_{TDR} de acordo com a (Figura 6).

A precisão do modelo foi avaliada pela comparação dos valores de condutividade elétrica do extrato de solução medidos (CE_S) e valores da condutividade elétrica estimados ($CE_{S'}$), através de uma regressão linear e uma análise de variância a nível de 1% significância.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização dos substratos

TABELA 3. Características físicas dos substratos casca de pinus (CP) e fibra de coco (FC).

Característica		Substratos	
		CP	FC
DU	(kg.m ⁻³)	540,3	156,88
DS	(kg.m ⁻³)	233,7	95,55
MS	(g.100g ⁻¹)	43,2	60,91
PT	(m ³ .m ⁻³)	0,78	0,79
EA	(m ³ .m ⁻³)	0,21	0,19
AFD	(m ³ .m ⁻³)	0,18	0,20
AT	(m ³ .m ⁻³)	0,02	0,04
AD	(m ³ .m ⁻³)	0,21	0,24
CRA₁₀	(m ³ .m ⁻³)	0,56	0,60
CRA₅₀	(m ³ .m ⁻³)	0,38	0,40
CRA₁₀₀	(m ³ .m ⁻³)	0,36	0,36

DU = densidade úmida, DS = densidade seca, MS = matéria seca, PT = porosidade total, EA = espaço de aeração, AFD = água facilmente disponível, AT = água tamponante, AD = água disponível, CRA₁₀ = capacidade de retenção água na tensão de 10 cm de coluna de água (10 hPa), CRA₅₀ = capacidade de retenção água na tensão de 50 cm de coluna de água (50 hPa), CRA₁₀₀ = capacidade de retenção água na tensão de 100 cm de coluna de água (100 hPa)

4.1.1 Densidade

A partir dos resultados da determinação da densidade úmida (DU) (Tabela 3) e (Tabelas 9 e 10) o substrato de casca de pinus apresentou um maior DU (540,3 kg m⁻³) comparado com a fibra de coco com (156,88 kg m⁻³). Apropriados para uso em recipientes conforme KÄMPF (2000 b).

Os substratos estudados apresentam baixa densidade seca (DS)(Tabela 3), com valores inferiores àqueles considerados como referências para um substrato hortícola (400-500 g L⁻¹) segundo BUND (1988).

4.1.2 Curva de retenção de umidade

Os substratos em estudo (FC e CP) apresentaram baixa porosidade total (PT de 79,2 e 77,5 m^3m^{-3}) (Tabela 3), com valores de sub-referência (0,85 m^3m^{-3}) para substratos, segundo De BOODT et al. (1974).

Os valores de espaço de aeração (EA) obtidos para CP = 0,20 m^3m^{-3} e FC = 0,19 m^3m^{-3} , estão próximos aos valores de referência (0,20 – 0,30 m^3m^{-3}), sugeridos por De BOODT et al. (1974), embora BUND (1973) tenha sugerido valores entre 0,10 e 0,15 m^3m^{-3} . A escolha de um material com um determinado valor de espaço de aeração esta condicionada à espécie vegetal a ser cultivada, estágio de desenvolvimento e manejo de irrigação.

Quanto às características de disponibilidade de água (Tabela 3) os substratos CP e FC têm valores de água facilmente disponível (AFD) de 0,18 e 0,20 m^3m^{-3} , respectivamente. Os quais estão abaixo daqueles valores de referência (0,20-0,30 m^3m^{-3}) sugeridos por De BOODT et al. (1974).

Estes substratos podem ser utilizados como condicionador de materiais ou de outros substratos que contenham de alto teor de água disponível a sucção até 50 cm de coluna de água.

As amostras com menos de 20% de espaço ocupado com AFD podem ter restrições de uso como substrato, devendo considerar-se este fato na seleção de materiais para compor as misturas (FERMINO, 2000).

Um material pode apresentar proporção de ar e água favorável a sua utilização mesmo quando seu valor de porosidade total não se encontra dentro da faixa referencial para cultivo em recipiente. A decisão de utilizá-lo ou não em uma mistura será baseada nas exigências da espécie que se deseja cultivar e nas características dos demais componentes.

Quanto à característica de capacidade de retenção de água (CRA) os substratos em estudo apresentam altos valores de água retida em todas as tensões (Tabela 3). No entanto, na análise de CRA₁₀, CRA₅₀ e CRA₁₀₀ a FC tem valores mais altos.

Embora a retenção de água, nas tensões de 10 e 50 hPa, seja uma característica positiva do ponto de vista do armazenamento de água, é necessário considerar que o mais importante é a liberação de volumes de água suficientes às necessidades das plantas em cultivo.

O gráfico da curva de retenção de umidade esta apresentado na (Figura 7) e os valores de retenção de umidade as diferentes pressões se mostra na (Tabela 4) e (Tabelas 11 e 12)

TABELA 4. Dados de umidade média (6 amostras) para as diferentes pressões, ajustada de acordo com VAN GENUCHEN (1980) para determinação das curvas características dos substratos fibra de coco (FC) e casca de pinus (CP).

Substrato	Umidade ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) nas seguintes pressões (hPa.)							
	0	10	20	30	40	50	75	100
(CP)	0,78	0,56	0,47	0,42	0,39	0,38	0,36	0,36
(FC)	0,79	0,60	0,51	0,46	0,42	0,40	0,37	0,36

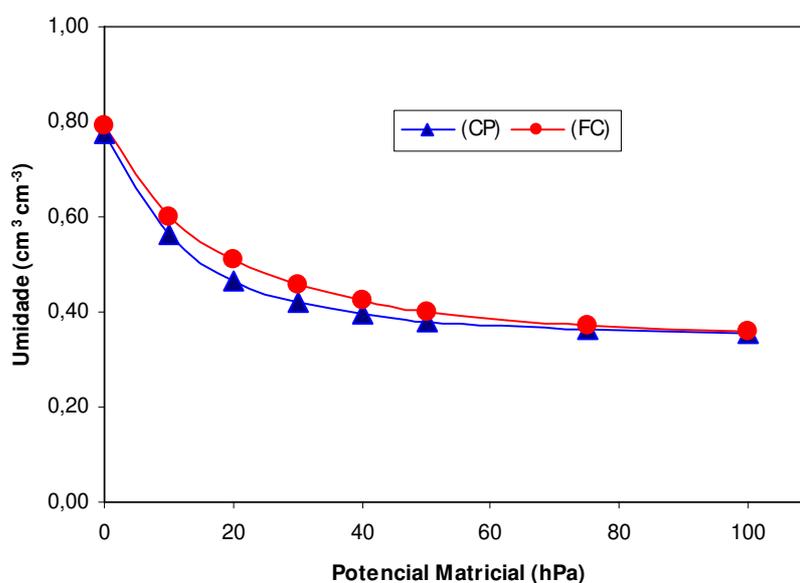


FIGURA 7: Curvas características de retenção de água para os substratos: casca de pinus (CP) e fibra de coco (FC).

Na Figura 7 pode-se observar que na faixa de AFD o substrato FC tem maior capacidade de retenção de umidade, para tanto, tensões acima de 50 hPa a diferença de retenção de umidade é mínima entre os dois substratos, tendendo a igualar-se quando a tensão está próximo à 100 hPa.

4.1.3 Distribuição do tamanho de partículas

O substrato Fibra de Coco (FC) apresenta uma maior quantidade de partículas nas classes entre (2 – 1 e 1 – 0,5 mm de diâmetro) (62,39%) (Tabela 14)

No entanto, as partículas pequenas (<0,50 mm) têm maior expressão na casca de pinus, enquanto, as partículas grandes (entre 4,75 – 2,00 mm) na casca de pinus (CP) (Tabela 13)

Esta predominância de partículas maiores, nos substratos (substratos comerciais), evidencia uma tendência de mercado devido a sua melhor adequação às condições de cultivo em recipientes pequenos, nos quais as partículas pequenas proporcionando maior retenção de água.

Na análise do tamanho de partícula, em solos, malhas de peneira se referem ao diâmetro da partícula, no entanto, em substratos orgânicos predominam materiais pouco decompostos. Nestes casos, as fibras e outras partículas de formas variadas dificultam o uso do termo diâmetro. Neste contexto, é necessário ressaltar que principalmente a FC, por apresentarem fibras, algumas podem ter passado pelas malhas no sentido da menor dimensão. Assim, a análise dos dados de distribuição do tamanho e da forma de partículas destes materiais necessita de uma maior atenção e uma observação mais detalhada.

Casca de Pinus (CP) é predominantemente o material com distribuição de partículas mais equitativa, apresentando maior percentual de partículas pequenas e o menor percentual de partículas grandes, quando comparado ao outro substrato estudado. Esse fato aliado a sua maior densidade (Figura 8) explica sua menor porosidade e seu menor espaço de aeração.

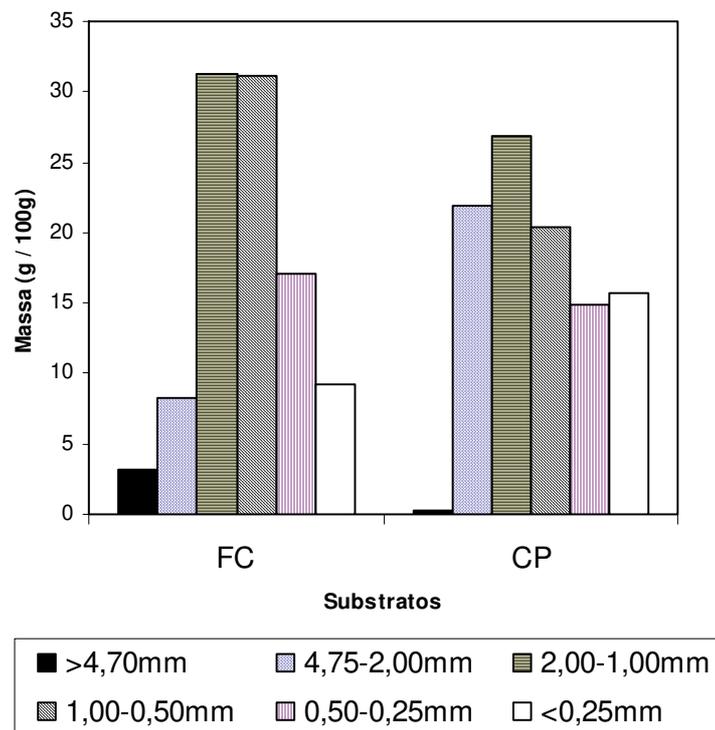


FIGURA 8: Distribuição do tamanho de partícula dos substratos fibra de coco (FC) e casca de pinus (CP) (média de três amostras).

4. 2 Calibração da TDR

4.2.1 Calibração da TDR para estimativa da umidade.

A Figura 9 mostra os valores observados da constante dielétrica relativa aparente (K_a), em razão do conteúdo volumétrico de água θ ($m^3 m^{-3}$), nos substratos casca de pinus (CP) e fibra de coco (FC) em duas formas de calibração: de úmido para seco (U-S) e seco para úmido (S-U).

Nestas [figuras](#) estão apresentado também, as curvas polinomiais cúbicas ajustadas dos dados observados, e a curva de calibração embutida no equipamento TDR utilizando o modelo de TOPP et al. (1980),

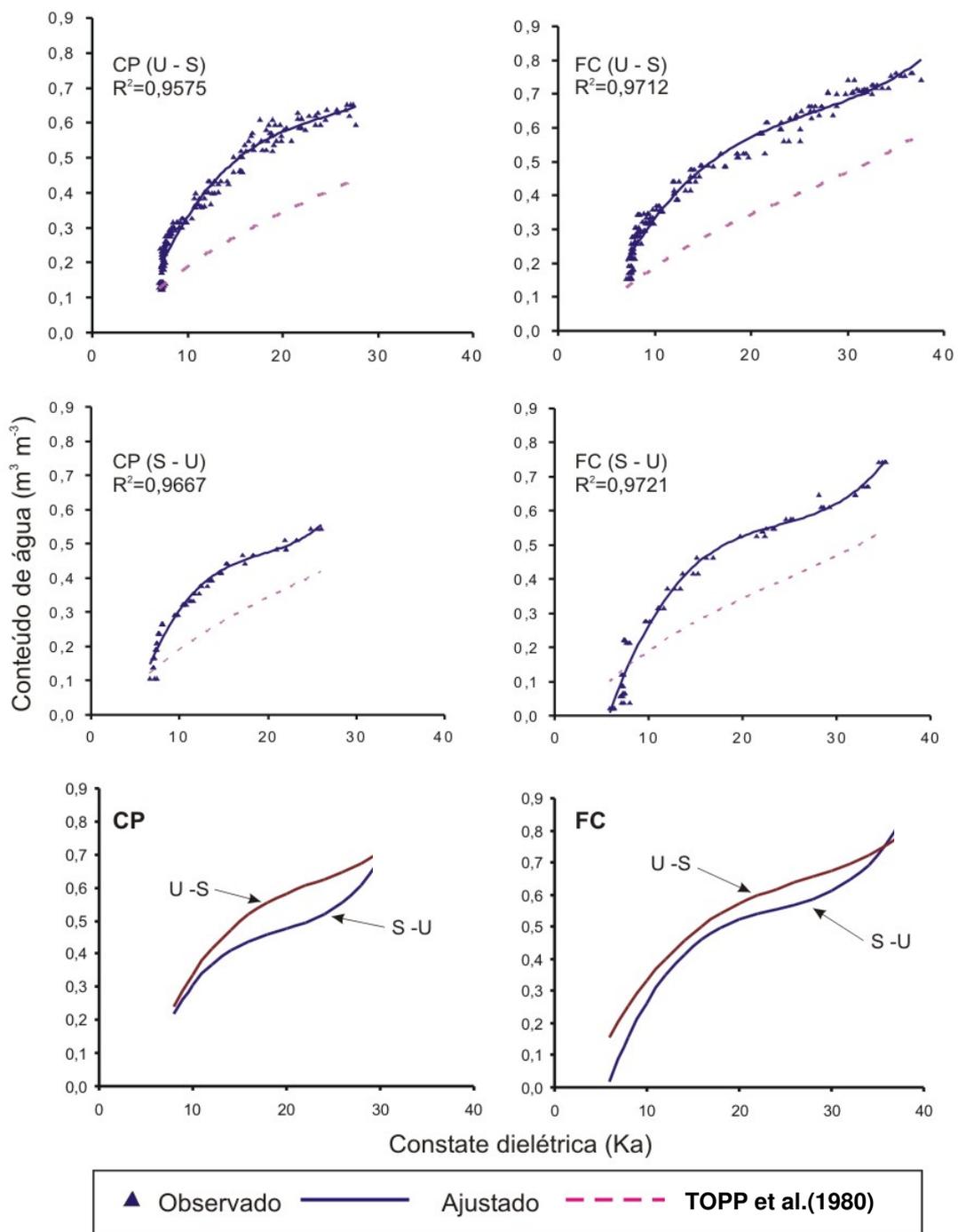


FIGURA 9: Relações entre o conteúdo de água e a constante dielétrica aparente dos substratos casca de pinus calibração úmido para seco (CP) U-S, fibra de coco calibração úmido para seco (FC) U-S, casca de pinus calibração seco para úmido (CP) S-U, fibra de coco calibração seco para úmido (FC) S-U.

Na Figura 9 são mostradas as curvas de TOPP et al.(1980) embutido no equipamento TDR e o polinômio cúbico ajustado. A curva de TOPP et al. (1980) subestima sistematicamente os valores da constante dielétrica aparente em valores de umidade.

De maneira geral, as curvas ajustadas não são, nenhum dos substratos, coincidentes, e assim mostram a necessidade de calibração do aparelho em cada substrato especificamente (Figura 9).

Todas as curvas de calibração ajustadas apresentaram coeficientes de correlação acima de 0,96. Percebe-se, também, a ineficácia do modelo de TOPP et al. (1980) para uso em substratos estudados.(Tabela 5)

TABELA 5. Equações obtidas na calibração do TDR para estimativa de umidade em substratos fibra de coco (FC) e casca de pinus (CP)

Substrato	Forma de calibração	Equações	R ²
CP	U-S	$\theta = 5E-05 Ka^3 - 0,004 Ka^2 + 0,1061 Ka - 0,3853$	0,9604
CP	S-U	$\theta = 0,0001 Ka^3 - 0,0063 Ka^2 + 0,13 Ka - 0,4749$	0,9667
FC	U-S	$\theta = 3E-05 Ka^3 - 0,0026 Ka^2 + 0,0801 Ka - 0,2388$	0,9712
FC	S-U	$\theta = 7E-05 Ka^3 - 0,00501 Ka^2 + 0,1276 Ka - 0,5804$	0,9721

A Figura 10 mostra a relação entre os valores de umidade volumétrica (θ) dos substratos CP e FC medidos e os estimados pelo equipamento TDR marca Tektronix 1502C para cada substrato propriamente dito, considerando as formas de calibração (U-S e S-U).

As Tabelas 15, 16, 17 e 18 apresentam as análises de variância para as regressões polinomiais ajustadas, sendo o ajuste estatisticamente significativo a nível de 1%. As curvas mostraram um bom ajuste entre os pontos, de forma a explicar a variabilidade de Ka em relação aos valores de umidade volumétrica dos substratos (θ).

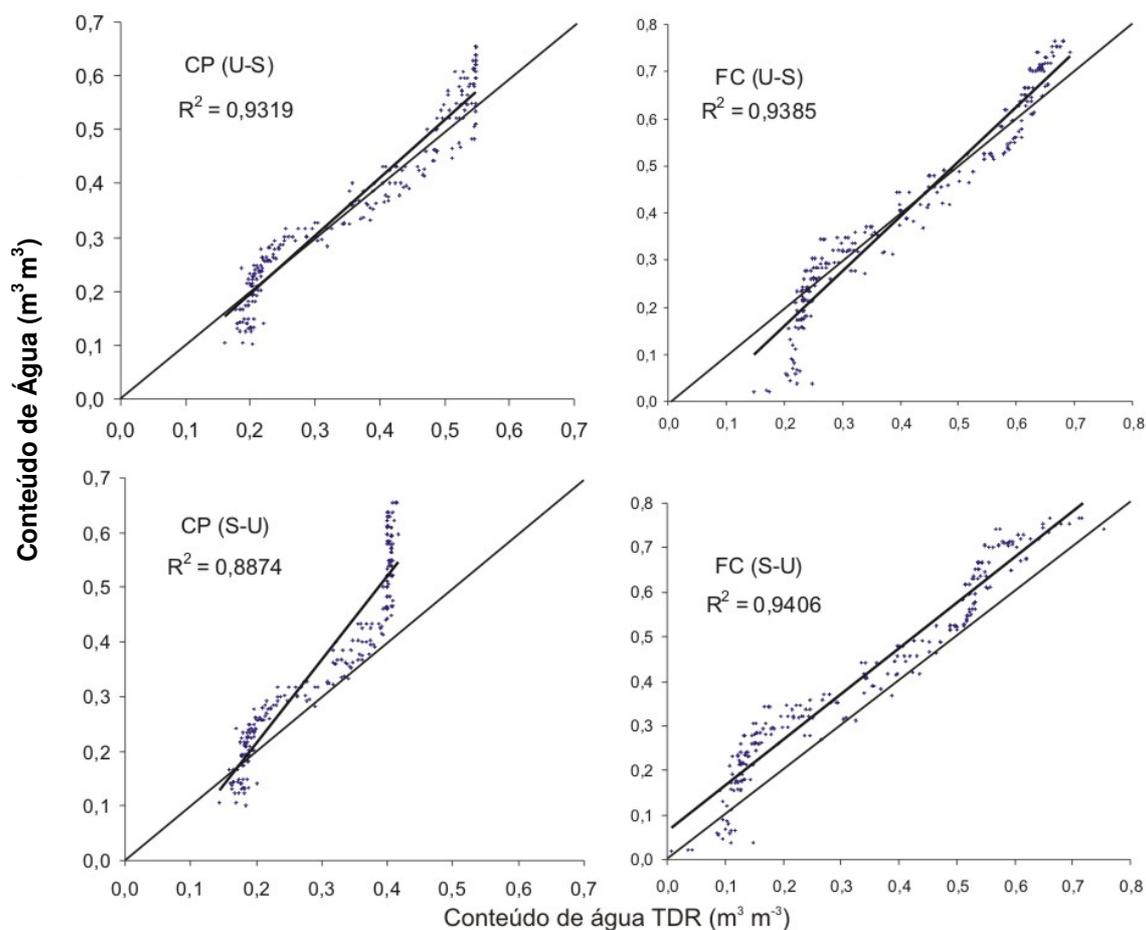


FIGURA 10: Umidade dos substratos determinada gravimetricamente em relação às determinadas pelo TDR nos substratos casca de pinus (CP) e fibra de coco (FC) para os dois tipos de calibração úmido para seco (U-S) e seco para úmido (S-U).

Pela afirmativa de TOPP et al. (1980) de que a constante dielétrica relativa aparente dos meios porosos depende apenas do seu conteúdo de água, seria de se esperar que o seu modelo tivesse o mesmo tipo de comportamento em cada um dos substratos mostrados na (Figura 9).

Contudo, observa-se que o comportamento do modelo é distinto para cada um dos substratos, demonstrando que a constante dielétrica aparente relativa (K_a) dos substratos depende de suas propriedades intrínsecas.

Os resultados deste trabalho dão evidências de que, além da água, a distribuição do tamanho de partículas e a superfície específica são características que podem influenciar o valor da constante dielétrica do material poroso (substratos orgânicos em estudo).

4.2.2 Calibração da TDR para estimativa de condutividade elétrica

Logo após fazer as relações da condutividade elétrica da solução do substrato (CE_s) medida pelo condutivímetro e a condutividade elétrica aparente estimados pelo equipamento TDR (CE_{TDR}), foi determinado a condutância superficial (CE_{cs}), para casca de pinus (CP) e fibra de coco (FC), extrapolando-se os gráficos da Figura 11 para condições de $CE_s = 0$ e estimado pela média de cada substrato.

A condutância de superficial estimada para CP foi 0,122 e FC foi 0,031 $dS\ m^{-1}$ de acordo com a Tabela 6 (Figura 11)

TABELA 6. Valores de CE_a para valores de $CE_s = 0$, para diferentes umidades dos substratos CP e FC.

θ ($m^3\ m^{-3}$)	Casca de pinus	Fibra de coco
	CE_a ($dS\ m^{-1}$)	CE_a ($dS\ m^{-1}$)
0,60	0,355	0,090
0,50	0,215	0,059
0,40	0,110	0,028
0,30	0,043	0,007
0,20	0,009	0,003
0,10	0,001	0,003
	Média 1,122	0,031

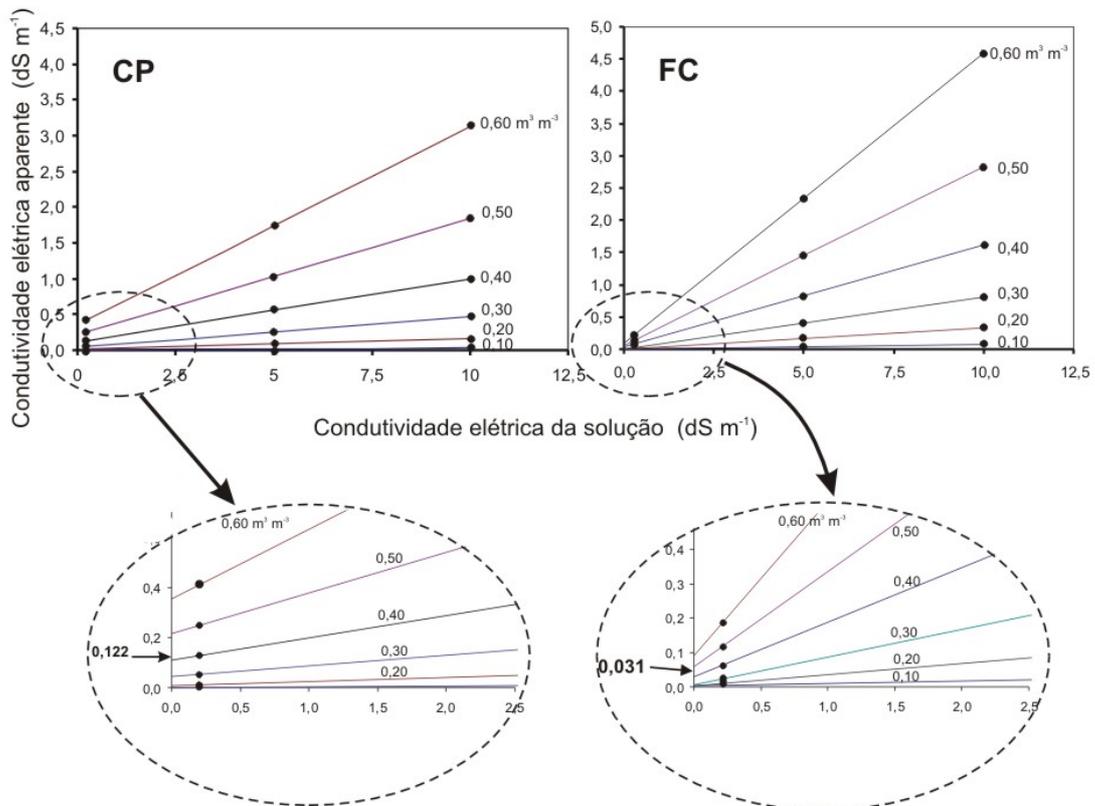


FIGURA 11: Correlação entre CE_{TDR} e CE_S de casca de pinus (CP) e fibra de coco (FC), para umidades fixas (0,60; 0,50; 0,40; 0,30; 0,20 e 0,10 $m^3 \cdot m^{-3}$).

Na Figura 11 foi feita a extrapolação das 6 curvas de umidade para $CE_S = 0$ para **determinação** do valor de CE_{CS} .

Os valores de fator de tortuosidade (T) foram correlacionados com umidade dos substratos (Anexo - Tabela 27) utilizando a equação 13, como mostra a Figura 12 as quais gera as equações da tortuosidade (τ) para cada substrato como mostra a (Tabela 7)

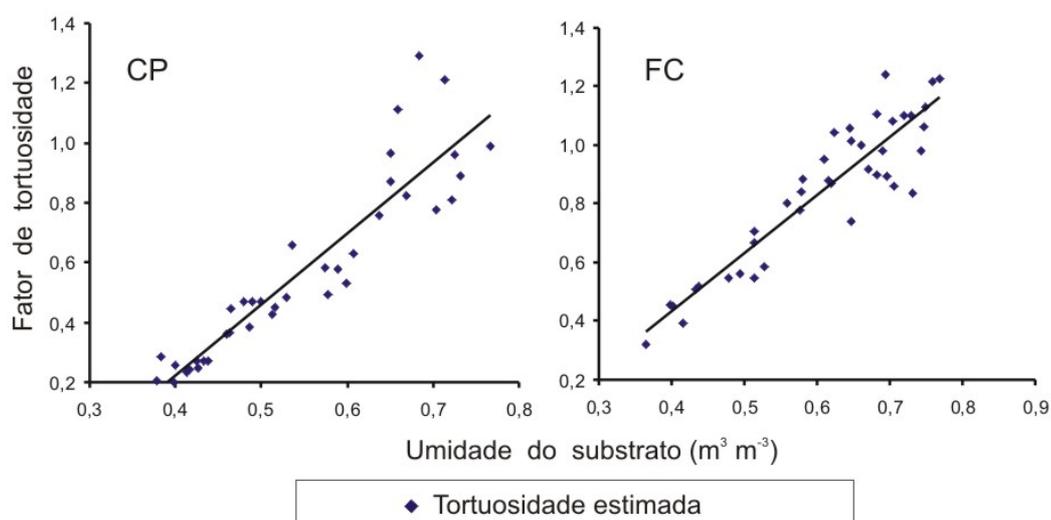


FIGURA 12: Modelo linear para correlacionar o fator de tortuosidade em função da umidade dos substratos casca de pinus (CP) e fibra de coco (FC)

TABELA 7. Valores da tortuosidade (τ) em função da umidade dos substratos fibra de coco e casca de pinus.

Substrato	Equação	R ²
Casca de pinus (CP)	$\tau = 2,37240 - 0,7274$	0,8574
Fibra de coco (FC)	$\tau = 1,97980 - 0,3601$	0,8444

Abaixo um resumo dos dados do modelo matemático proposto por RHOADES et al, (1976) obtido pelas relações anteriores.

TABELA 8. Dados observados para o modelo matemático proposto por RHOADES et al. (1976)

Substratos	Parâmetros			R ²
	a	b	CEcs	
Casca de pinus	2,3724	-0,7274	0,122	0,8090
Fibra de coco	1,9798	-0,3601	0,031	0,9208

A seguir utilizou-se a equação descrita por RHOADES et al. (1976) para relacionar CE_{TDR} com CE_S , obtendo-se as seguintes equações:

Equação para casca de pinus:

$$CE_S = \frac{CE_{TDR} - 0,122}{(2,3724\theta - 0,7274)\theta} \dots\dots\dots (16)$$

Equação para fibra de coco:

$$CE_S = \frac{CE_{TDR} - 0,031}{(1,9798\theta - 0,3601)\theta} \dots\dots\dots (17)$$

Na Figura 13, é mostrada a relação existente entre a condutividade elétrica da solução medida pelo condutivímetro e a condutividade elétrica obtida pelo TDR.

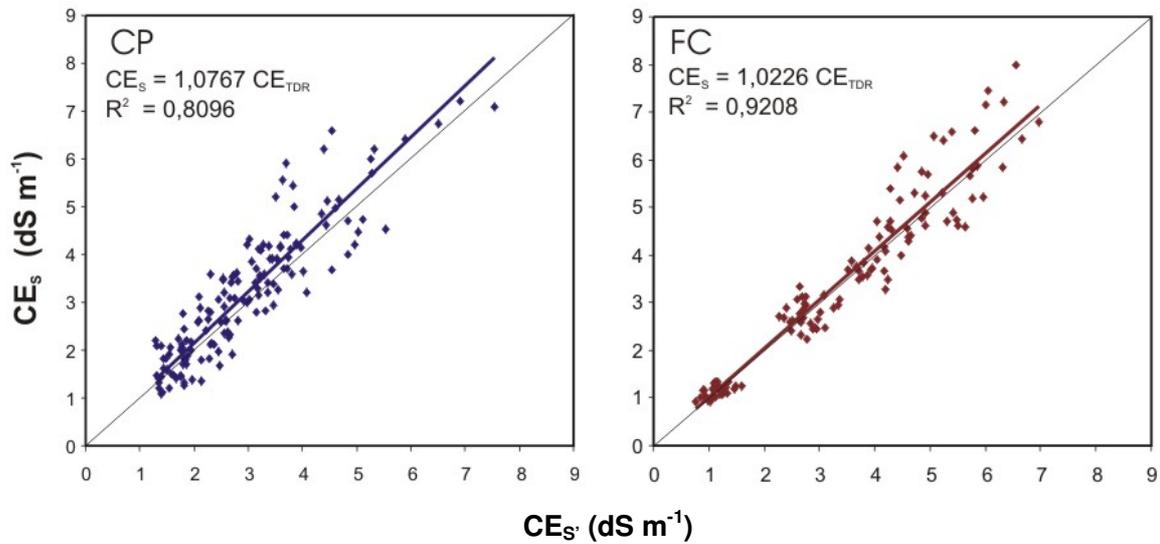


FIGURA 13: Relação entre os valores de condutividade elétrica do extrato de solução medido (CE_S) e valores de condutividade elétrica estimada (CE_{TDR}).

Verificou-se, a nível de 1% de significância que os coeficientes de correlação são satisfatórios para a CP (0,81) e FC (0,92) com coeficientes angulares das equação de regressão próximo de 1 (Figura 13).

Estes resultados comprovam que existe uma relação linear entre as técnicas e indicam uma variação direta no valor de CE_s para uma unidade de CE_{TDR} , comprovando-se que suas características apresentam uma relação funcional na estimativa da condutividade elétrica do extrato da solução dos substratos em estudo.

Desta forma, a técnica da TDR pode substituir a técnica do extrato da solução promovendo agilidade na estimativa, uma vez que o tempo envolvido na estimativa da condutividade elétrica dos substratos através da TDR é inferior e com resultados consistentes para os substratos estudados.

5. CONCLUSÕES

As curvas de calibração da K_a e umidade volumétrica obtidas em cada substrato mostrou-se adequada e estatisticamente significativa, no intervalo de aplicabilidade, ou seja na faixa de água facilmente disponível, nos substratos estudados.

A curva de calibração proposta por TOPP et al. (1980) embutida no equipamento TDR (Tektronix 1502 C) não é aplicável para estimativa de umidade volumétrica nos substratos estudados, necessitando uma calibração individual para cada um deles.

Foi possível, utilizando o modelo proposto por RHOADES et al. (1976) determinar uma equação que relaciona a condutividade elétrica medida pela TDR e a condutividade elétrica da solução dos substratos, de forma a viabilizar o uso da técnica da TDR na estimativa da condutividade elétrica nos substratos estudados.

De uma maneira geral, observou-se a boa performance da técnica da TDR na estimativa da umidade e da condutividade elétrica sem gerar alteração no meio amostrado.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

ANSORENA, J.M. **Sustratos: propiedades y caracterizacion**. Espanha: Mundi-Prensa, 172p. 1994.

BAILEY, D. A.; NELSON, P. V.; FONTENO W.C. **Substrates pH and water quality**. Raleigh: North Carolina State University, 2000. Disponível em: <<http://www.ces.ncsu.edu/depts/hort/floriculture/plugs/ph.pdf>>. Acesso em: 16 set. 2005.

BILDERBACK, T. **Pine bark storage and handling**. Raleigh: North Carolina State University, 2000. Disponível em: <http://www.ces.ncsu.edu/depts/hort/nursery/substrates/storage_hand.htm>. Acesso em: 28 dez. 2005.

BLANCO F.F.; FOLEGATTI, M.V. Recuperação de um solo salinizado após do cultivo em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiente**. AGRIAMBI, v.5, n1 p.76-80 Jan/Abr 2001

BLANCO, F.F.; FOLEGATTI, M.V.; NOGUEIRA, M.C.S. Fertirrigação com água salina e seus efeitos na produção do pepino enxertado cultivado em ambiente protegido. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.20, n. 3, p.442-446, set 2002.

BOOMAN, J. Evolution of California substrates used in ornamental horticulture. In: KÄMPF, A.N.; FERMINO, M.H. (ed.). **Substratos para plantas: a base da produção vegetal em recipientes**. Porto Alegre: Genesis, p. 23-42 . 2000.

BUNT, A. C. **Media and mixes for container-grown plants**. London:Unwin and Hyman,. Cap. 4: Principles of nutrition. 1988.

BUNT, A. C. Some physical and chemical characteristics of loamless pot-plant substrates and their relation to plant growth. **Plant and Soil**. The Hague, v. 38, p. 1954-1954, 1973.

CANOVAS, F.; DÍAZ, J.R. **Cultivos Sin suelo. Curso Superior de Especialización**. Ed. **Instituto de Estudios Almerienses**. Fundación para la Investigación Agraria en la Provincia de Almería. Almería 1993.

CAVINS, T.J.; WHIPKER B. E.; FONTENO, W.C.; HARDEN, B.; McCALL, I.; GIBSON, J. L. Monitoring and managing pH and EC using the PourThru Extraction Method. **Horticulture Information Leaflet / NCSU**, Raleigh, n.590, 2006. Disponível em: <<http://www2.ncsu.edu/unity/lockers/project/hortsublab/>>. Acesso em: 5 jan. 2006.

COELHO, E.F.; ANDRADE, C.L.T.; OR, D.; LOPES, L.C.; SOUZA, C. F. Desempenho de diferentes guias de ondas para uso com o analisador de umidade Trase. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, 1n., p.81-87, 2003.

COELHO, E.F.; ARRDAM, F.B. **Aplicações da Técnica de TDR: Manejo da água no solo**, In: MATSURA, E. E.; JÚNIOR, A.J.; GOMES, E.P.; SOUZA, C..F., Aplicações da técnica de TDR na agricultura. Campinas: UNICAMP 2001.

CORDEIRO, G. **Salinidade em áreas irrigadas**. Embrapa Semi-Árido. <<http://www.embrapa.com.br>> . acesso em: 10 nov.2004

De BOODT, M; VERDONCK, O; CAPPAERT I. Method for measuring the water release curve of organic substrates. **Acta Horticulturae**, Belgium, v. 37, p.2054-2062, 1974.

De BOODT, M; VERDONCK, O. The physical properties of the substrates in horticulture. **Acta Horticulturae**, Wageningen, v. 26, p.37-44, 1972.

DRZAL, M.S.; CASSEL, D.K.; FONTENO, W.C. Pore fraction analysis: a new tool for substrate testing. **Acta Horticulturae**, Wageningen, n. 481, v. 1, p. 43-53,1999.

FERMINO, M.H. **Aproveitamento de Resíduos Industriais e Agrícolas como Alternativas de Substratos Hortícolas**.. 90 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

FERMINO, M.H. O uso da análise física na avaliação da qualidade de componentes e substratos. In: FURLANI, A.M.C.; BATAGLIA, O.C.; ABREU, M.F.; ABREU, C.A.; FURLANI, P.R., QUAGGIO, J.A.; MINAMI, K. **Caracterização, manejo e qualidade de substratos para a produção de plantas**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2002. p.29-37.

FONTENO, W. C. Problems & considerations in determining physical properties of horticultural substrates. In **Acta Horticulture**, Wageningen, n.342, p. 197-204, 1996.

GIESE, K.; TIEMANN, R. Determination of the complex permittivity from thin-sample time domain reflectometry: Improved analysis of the step response waveform. **Advances in Molecular Relaxation Processes**, Amsterdam, v.7, p.45-59, 1975.

GROLLI, P. R. **Composto de lixo domiciliar urbano como condicionador de substratos para plantas arbóreas**. 1991. 126 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

HANDRECK, K.; BLACK, N. **Growing media for ornamental plants and turf**. Sydney: University of New South Wales Press,. p. 448, 1999.

HOFFMAN, G. Verbindliche Methoden zur Untersuchung von TKS und Gartnerischen Erden. **Mitteilubngen der VDLFA**, Heft, v.6, p. 129-153, 1970.

JACOBSEN O.H.; SCHJONNING P. F. Evaluation of time domain reflectometry for soil water measurements. **J. Hydrology**. v. 151, p.159-172, 1993.

KÄMPF, A. N. **Análise física de substratos para plantas**. In: Boletim informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 26, n. 1, p. 5-7, 2001.

KÄMPF, A. N. Substrato. In: KÄMPF, A. N. (Coord.) **Produção comercial de plantas ornamentais**. Guaíba: Agropecuária,. p.254, 2000 a.

KÄMPF, A.N. Seleção de materiais para uso como substrato. In: KÄMPF, A.N.; FERMINO, M.H. (ed.). **Substratos para plantas: a base da produção vegetal em recipientes**. Porto Alegre: Genesis,. p 209-215. 2000 b.

KOIDE, R. T. ; LANDHERR, L. L. ; BESMER, Y.L.; DETWEILER, J. M.; HOLCOMB, E. J. Strategies for mycorrhizal inoculation of six annual bedding plant species. **HortScience**, Alexandria, v.34, n.7, p.1217-1220, 1999.

KRAUSS, J. D. Electromagnetic. 3ª edição. Mc Graw-Hill, p.775, 1984.

MALICKI, M.A.; PLAGGE, R.; ROTH, C.H. Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil. **European Journal of Soil Science.**, p.47, 357-366,1996.

MARTINES, P. F. Manejo de substratos para horticultura In: FURLANI, A.M.C.; BATAGLIA, O.C.; ABREU, M.F.; ABREU, C.A.; FURLANI, P.R.; QUAGGIO, J.A.; MINAMI, K. **Caracterização, manejo e qualidade de substratos para a produção de plantas.** Campinas: Instituto Agronômico,. p.52-57. 2002.

MEDEIROS J.F.; CRUCIANI, D.E.; MIRANDA N.O. Tolerância do pimentão à salinidade sob condições de cultivo protegido. **Revista de Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola.** V.22, n2, p 200-210, mai., 2001.

MEDEIROS, J.F. Salinização em áreas fertiirrigadas. In: FOLEGATTI, M.V. **Fertilização: citrus, flores, hortaliças Guaíba Agropecuária**, p. 201 -239, 1999.

MILKS, R. R.; FONTENO, W. C.; LARSON, R. A. Hydrology of horticultural substrates: In Mathematical models for moisture characteristics of horticultural container media . **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 114,n. 1, p.48-52, 1989.

MILNER, L. Water and Fertilizers management in substrates. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF CITRUS NURSERYMEN, 6, Ribeirão Preto, 2001. **Proceeding.** Ribeirão Preto: ISCN, , p.108-111, 2001.

MILNER, L. Manejo de irrigação e fertirrigação em substratos. In: FURLANI, A.M.C.; BATAGLIA, O.C.; ABREU, M.F.; ABREU, C.A.; FURLANI, P.R.; QUAGGIO, J.A.; MINAMI, K. **Caracterização, manejo e qualidade de substratos para a produção de plantas.** Campinas: Instituto Agronômico,. p.45-51. 2002.

NADLER, A.; DASBERG, S. e LAPID, I. Time Domain Reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns. **Soil Sci. Soc. Am.** v. 55, p.938-943. 1991.

NOBEL, P. S. **Physicochemical and environmental plant physiology**. San Diego: Academic Press, p. 635 1991.

NOBORIO, K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v.31, p.213–237, 2001.

OR, D., FISHER, B., HUBSCHER, R. A., WRAITH, J. **Win TDR – User Guide**, Utah State University, Logan Utah, 1998.

ORTEGA, M.C.; MORENO, M.T.; ORDOVÁS, J.; AGUADO, M.T. Behavior of different horticultural species in phytotoxicity bioassays of bark substrates. **Scientia Horticulturae**, Doetinchen, v. 66, p. 125-132, 1996.

OTTOL, S. L.; ALCAIDE, M. Utilização do método TDR-tensiometro na obtenção da curva de retenção de água no solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.2, p.265-269, Campina Grande, PB, DEAg/UFPB. 2001.

PASTOR, S. J. N. Method for measuring the water release curve of organic substrates (ed.). Universidad de Lleida. España. DeBoodt, M., O. Verdonck e I. Cappaert. **Acta Horticola**. V.37, p.2054-2062, 1974.

PASTOR, S. J. N. Utilización de sustratos en viveros. Use of Growing Mediums in the Nursery Production. **Terra**. v 17 n 3, 1999.

PRIMAVESI A. **A água em regiões tropicais. O manejo ecológico do solo**. 2ª Edição Editora Nobel S.A. p 67, 1994.

QUEIROZ, S. O. **Método para avaliação de salinização do solo sob condições de ambiente protegido**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola na Área de Concentração Água e Solo) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2004.

QUEIROZ, S. O.; TESTEZLAF, R.; MATSURA, E. E. Avaliação de metodologia para determinação da condutividade elétrica do solo. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, 31, 2002, Salvador. Anais... Salvador: SBEA, 2002. CD Rom.

RHOADES, J.D.; RAATS, P.A.; PRATHER, R. J. Effects of liquid phase electrical conductivity, water content and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.40, p.651-655, 1976.

RÖBER, R. Substratos hortícolas: possibilidades e limites de sua composição e uso; exemplos da pesquisa, da indústria e do consumo. In: KÄMPF, A.N.; FERMINO, M.H. (ed.). **Substratos para plantas: a base da produção vegetal em recipientes**. Porto Alegre: Genesis, p 209-215. 2000.

RÖBER, R.; SCHALLER, K. **Pflanzenernahrung im Gartenbau**. Stuttgart: Ulmer, p.350,1985.

ROTH, C.H.; SCHULIN, R.; FLUHLER, H.; ATTINGER, W. Calibration of time-domain reflectometry for water content measurement using composite dielectric approach. **Water Resources Research**, Washington, v.26, n.10, p.2267-2273, 1990.

ROWEL, D.L. **Soil science: methods & applications**. Essex: Longman, p 350 , 1994.

SCHMIT, J.; SOUSA, P.; KÄMPF, A. N. Propriedades químicas e físicas de substratos de origem mineral e orgânica para o cultivo de mudas em recipientes. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.32, n.6, p.937-944, 2002.

SCHURER, K.; HILHORST M. A. Sensing moisture in soils and substrates. In: **II International Symposium on Sensors Acta Hort.** (ISHS) 421:179-184, 1998.

SILVA, E.F.F; DUARTE, S. N; COELHO, R.D. **Salinização dos solos cultivados sob ambientes protegidos no estado de São Paulo**. In: FOLEGATTI, M.V. Fertirrigação: citrus, flores hortaliças. Guaíba: Agropecuária p. 267-277, 2001.

SILVA, F. F. da; WALLCH, R.; CHENG, Y. Measuring water content of horticultural substrates using Time Domain Reflectometry. In: **II International Symposium on Sensors Acta Hort.** (ISHS) 421:165-170, 1998.

SOUZA, C. F.; FOLEGATTI, M. V.; MATSURA, E. E.; OR, D. Calibração da Reflectometria no domínio do Tempo (TDR) Para a Estimativa da Concentração da Solução no Solo ,**XXXIII**

Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. 02 a 06 de Agosto de 2004 - São Pedro – SP.2004.

SOUZA, C.F.; MATSURA, E.E.; TESTEZLAF, R. Experiência de laboratório de hidráulica, irrigação e drenagem da Faculdade de Engenharia Agrícola/UNICAMP no uso da técnica da TDR. In: Matsura, E.E.; Javarez Junior,A.; Gomes, E.P.; Souza, C.F. (eds.). **Aplicações técnicas de TDR na agricultura.** Campinas:FEAGRI/UNICAMPI, p.147-176, 2001.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology.** Redwood City: Benjamin & Cummings, 1991. Cap 13: Surface protection and secondary defense compounds: phenolics compounds. 1991.

TAPIAS, J.C.; SALGOT, M.; CASAS, A. Utilidad de la técnica de TDR para la medida de la variación espacial y temporal de la humedad del suelo en campos del golf. **Edafología.** Vol. 8 (3) p 1-10 .2001.

TARCHTZKY, J. El riego por goteo. In: **Curso Internacional Planificación de redes de riego a presión.** Shefain Israel, 2002.

TERRES, V.; ARTETXE, A.; BEUNZA, A. Caracterización física de los substratos de cultivo. **Revista Horticultura** Nº 125. Madrid ,España. Diciembre 1997.

TOMMASELLI, J.T.C.; BACCHI, O. O. S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. **Pesquisa Agropecuária. Brasileira,** v.36,p.1145-1154, set 2001.

TOMMASELLI, J.T.G. Critérios para calibração de sondas de TDR. In: MATSURA, E.E.; JAVAREZ JUNIOR,A.; GOMES, E.P.; SOUZA, C.F. (eds.). **Aplicações técnicas de TDR na agricultura.** Campinas:FEAGRI/UNICAMPI, p85-114, 2001.

TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. **Walter Resources Research,** Washington, v16., p.576-583., 1980.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity unsaturated soils. **Soil Science Society American Journal,** v.47, p.892-898, 1980.

VAN LOON K.W.P., PERFECT E., GROENEVELT P.H. e KAY B.D. Application of dispersion theory to time domain reflectometry in soils. **Transport in porous media**. v.6, p.391-406, 1991.

WALLER, P. L.; WILSON, G.C.S. Evaluation of growing media for consumer use. **Acta Horticulturae**, Wageningen, n. 150, p. 51-58, 1984.

WHALLEY, W.R. Considerations on the use of time domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content. **Journal of Soil Science**, v44., 1 n., p1-9, 1993.

WHITE, J. W., MASTALERZ, J.W. Soil Moisture as related to "container capacity". **Society for Horticultural Science**. , v. 89, p. 758-765, 1966.

WILSON, G.C.S. Analytical analyses and physical properties of horticultural substrates. **Acta Horticulturae**, Wageningen, n. 150, p. 19-32, 1984.

YATES L. ROGERS, M.N. Effects of time, temperature, and nitrogen source on the composting of hardwood bark for use as a plant growing medium. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 106, p. 589-593, 1981.

ZEGELIN, S. J.; WHITE, I.; JENKINS, D. R. Improved field techniques for soil water content and electrical conductivity measurement using TDR. **Water Resources Research**. v.25 p.2367-2376, 1989.

7. ANEXOS.

TABELA 9. Dados para a determinação de densidade em substrato casca de pinus (CP)

Nro	Vol inicial (ml)	Vol final (ml)	PU (g)	PS (g)	DU (kg.m ⁻³)	MS (%)	DS (kg.m ⁻³)	
1	500,00	360,00	194,20	84,12	539,44	43,32	233,67	
2	500,00	350,00	189,80	81,90	542,29	43,15	234,00	
3	500,00	360,00	196,50	84,83	545,83	43,17	235,64	
4	500,00	370,00	199,70	86,64	539,73	43,39	234,16	
5	500,00	380,00	201,50	87,62	530,26	43,48	230,58	
6	500,00	350,00	190,60	82,05	544,57	43,05	234,43	
						540,35	43,26	233,75

PU= massa úmida, PS= massa seca, DU = densidade úmida, DS = densidade seca, MS = % matéria seca

TABELA 10. Dados para a determinação de densidade em substrato fibra de coco (FC)

Nro	Vol inicial (ml)	Vol final (ml)	PU (g)	PS (g)	DU (kg.m ⁻³)	MS (%)	DS (kg.m ⁻³)	
1	500,00	425,00	67,04	41,01	157,74	61,17	96,49	
2	500,00	435,00	68,41	41,68	157,26	60,93	95,82	
3	500,00	425,00	65,81	40,43	154,84	61,44	95,13	
4	500,00	435,00	67,99	40,90	156,30	60,16	94,02	
5	500,00	440,00	68,90	41,70	156,59	60,52	94,77	
6	500,00	430,00	68,19	41,75	158,57	61,23	97,09	
						156,88	60,91	95,55

PU= massa úmida, PS= massa seca, DU = densidade úmida, DS = densidade seca, MS = % matéria seca

TABELA 11. Dados de umidade para determinação da curva característica do substrato casca de pinus (CP)

Umidades ($m^3.m^{-3}$) nas seguintes pressões (hPa)								
Anel	Sat	10	20	30	40	50	75	100
1	0,78	0,55	0,45	0,43	0,39	0,39	0,37	0,36
2	0,76	0,57	0,49	0,42	0,40	0,38	0,37	0,36
3	0,79	0,60	0,52	0,44	0,41	0,39	0,37	0,36
4	0,78	0,53	0,42	0,40	0,38	0,37	0,36	0,34
5	0,78	0,55	0,44	0,40	0,38	0,37	0,36	0,35
6	0,76	0,57	0,49	0,43	0,40	0,39	0,37	0,36

TABELA 12. Dados de umidade para determinação da curva característica do substrato fibra de coco (FC)

Umidade ($m^3.m^{-3}$) nas seguintes pressões (hPa)								
Anel	Sat	10	20	30	40	50	75	100
1	0,79	0,61	0,53	0,47	0,43	0,40	0,38	0,36
2	0,78	0,61	0,54	0,46	0,42	0,41	0,38	0,36
3	0,82	0,62	0,53	0,47	0,43	0,40	0,38	0,36
4	0,79	0,57	0,48	0,45	0,42	0,40	0,38	0,36
5	0,78	0,62	0,54	0,46	0,42	0,40	0,38	0,36
6	0,79	0,57	0,47	0,45	0,41	0,40	0,38	0,36

TABELA 13. Distribuição (percentual) do tamanho de partículas do substrato casca de pinus (CP) nas diferentes malhas (0,25; 0,50; 1,00; 2,0; 4,75) (amostra =100g).

Malha	Casca de pinus			
	Peso amostra 1 (100g)	Peso amostra 2 (100g)	Peso amostra 3 (100g)	Media (100g)
>4,70 mm.	0,30	0,25	0,27	0,27
4,75-2,00 mm.	20,30	23,05	22,23	21,86
2,00-1,00 mm.	24,90	28,60	27,23	26,91
1,00-0,50 mm.	21,10	19,90	20,07	20,36
0,50-0,25 mm.	16,30	13,50	14,70	14,83
<0,25 mm.	17,10	14,70	15,50	15,77

TABELA 14. Distribuição (percentual) do tamanho de partículas do substrato fibra de coco (FC) nas diferentes malhas (0,25; 0,50; 1,00; 2,0; 4,75) (amostra =100g).

Malha	Fibra de coco			
	Peso amostra 1 (100g)	Peso amostra 2 (100g)	Peso amostra 3 (100g)	Media (100g)
>4,70 mm.	4,50	2,05	2,87	3,14
4,75-2,00 mm.	9,70	7,15	7,83	8,23
2,00-1,00 mm.	27,50	34,05	31,94	31,16
1,00-0,50 mm.	31,80	30,65	31,04	31,16
0,50-0,25 mm.	16,50	17,45	17,21	17,05
<0,25 mm.	10,00	8,65	9,10	9,25

TABELA 15. Análise de variância para valores de umidade volumétrica (θ) obtidos pelo método gravimétrico e constante dielétrica aparente obtido pela TDR (K_a) na calibração da TDR para estimativa de umidade em casca de pinus (CP) de seco para úmido (S-U).

θ ($m^3 m^{-3}$)	K_a	θ ($m^3 m^{-3}$)	K_a
0,102	7,44	0,336	11,31
0,105	6,70	0,353	11,75
0,106	7,16	0,356	11,62
0,139	7,03	0,367	12,24
0,140	7,01	0,375	12,48
0,143	7,09	0,377	12,31
0,166	6,98	0,379	13,09
0,167	7,19	0,391	13,67
0,167	7,09	0,395	13,29
0,191	7,45	0,395	13,50
0,193	7,30	0,413	14,70
0,195	7,36	0,415	14,59
0,210	7,43	0,427	14,65
0,211	7,39	0,441	15,32
0,213	7,42	0,443	15,48
0,234	7,65	0,448	17,35
0,239	7,72	0,465	17,19
0,240	7,52	0,466	18,33
0,260	8,13	0,475	18,30
0,264	8,03	0,483	22,04
0,268	8,04	0,483	20,94
0,283	9,82	0,484	22,03
0,293	9,49	0,507	21,97
0,296	9,63	0,510	23,23
0,323	10,71	0,512	23,25
0,324	10,50	0,534	24,80
0,324	10,42	0,543	26,02
0,332	11,60	0,549	25,71
0,334	11,16		

Quadro de análise de variância da regressão

Item	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	P-Valor
Modelo	0,8952	3	0,29840	504,78	<0,0001
Resíduo	0,03133	53	0,00059		
Total	0,92653	56			

TABELA 16. Análise de variância para valores de umidade volumétrica (θ) obtidos pelo método gravimétrico e constante dielétrica aparente obtido pela TDR (K_a) na calibração da TDR para estimativa de umidade em fibra de coco (FC) de seco para úmido (S-U).

θ ($m^3 m^{-3}$)	K_a	θ ($m^3 m^{-3}$)	K_a
0,020	5,88	0,382	12,8
0,021	6,36	0,412	13,65
0,022	6,27	0,418	15,27
0,056	7,02	0,421	14,78
0,058	7,31	0,458	15,12
0,059	6,98	0,463	16,9
0,037	7,36	0,467	16,11
0,038	7,96	0,521	19,71
0,045	7,13	0,527	21,46
0,063	7,46	0,535	22,4
0,066	7,34	0,548	22,55
0,069	7,19	0,548	23,43
0,082	7,26	0,557	23,3
0,087	7,22	0,537	22,13
0,089	7,14	0,541	22,16
0,112	7,33	0,546	22,16
0,121	7,22	0,573	24,57
0,131	7,12	0,577	25,39
0,210	7,32	0,579	25,18
0,223	7,56	0,609	28,68
0,232	7,37	0,611	28,43
0,212	7,61	0,612	29,29
0,213	7,91	0,646	28,15
0,245	8,05	0,647	31,95
0,270	10,18	0,650	31,95
0,276	9,74	0,670	32,9
0,278	9,57	0,672	33,37
0,311	11,58	0,676	33,31
0,316	11,05	0,734	34,85
0,318	11,15	0,743	34,53
0,368	13,4	0,752	35,28
0,374	11,97		

Quadro de análise de variância da regressão

Item	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	P-Valor
Modelo	3,27560	3	1,09187	688,26	<0,0001
Resíduo	0,09360	59	0,00159		
Total	3,36920	62			

TABELA 17. Análise de variância para valores de umidade volumétrica (θ) obtidos pelo método gravimétrico e constante dielétrica aparente obtido pela TDR (K_a) na calibração da TDR para estimativa de umidade em casca de pinus (CP) de úmido para seco (U-S).

θ m^3m^{-3}	K_a								
0,65	27,48	0,55	19,35	0,40	12,55	0,28	7,94	0,21	7,55
0,65	27,20	0,55	20,88	0,40	10,83	0,28	8,20	0,21	7,43
0,65	26,75	0,55	17,73	0,40	12,88	0,28	7,91	0,21	7,41
0,64	26,56	0,55	16,41	0,39	11,26	0,28	7,66	0,20	7,67
0,64	24,66	0,55	19,86	0,39	10,68	0,28	8,20	0,20	7,61
0,64	25,70	0,55	18,35	0,39	11,73	0,28	8,10	0,20	7,50
0,63	25,85	0,54	19,13	0,37	12,50	0,26	7,82	0,19	7,43
0,63	23,70	0,54	16,97	0,37	10,93	0,26	7,70	0,19	7,32
0,63	21,60	0,54	16,02	0,37	11,11	0,26	7,70	0,19	7,50
0,62	27,07	0,52	18,31	0,36	11,41	0,26	7,93	0,19	7,55
0,62	22,82	0,52	16,97	0,36	11,84	0,26	7,75	0,19	7,31
0,62	23,50	0,52	17,85	0,36	10,73	0,26	7,90	0,19	7,30
0,61	22,03	0,52	18,93	0,36	10,74	0,26	7,81	0,18	7,45
0,61	21,60	0,52	15,69	0,36	11,47	0,26	7,88	0,18	7,34
0,61	22,00	0,52	16,17	0,36	10,83	0,26	7,98	0,18	7,52
0,61	18,93	0,50	15,55	0,33	10,45	0,25	7,49	0,17	7,33
0,61	24,48	0,50	15,74	0,33	9,51	0,25	7,66	0,17	7,23
0,61	17,60	0,50	14,88	0,33	9,38	0,25	7,56	0,17	7,33
0,60	27,69	0,46	15,52	0,32	8,81	0,24	7,59	0,15	7,33
0,60	23,38	0,46	15,59	0,32	9,85	0,24	7,70	0,15	7,48
0,60	24,00	0,46	15,44	0,32	8,43	0,24	7,15	0,15	7,21
0,59	19,26	0,46	14,85	0,32	9,27	0,24	7,69	0,14	7,08
0,59	18,51	0,46	15,72	0,32	9,05	0,24	7,64	0,14	7,18
0,59	19,79	0,46	15,73	0,32	9,97	0,24	7,64	0,14	7,09
0,59	21,74	0,43	14,18	0,30	8,64	0,23	7,47	0,14	7,74
0,59	22,00	0,43	12,23	0,30	9,45	0,23	7,35	0,14	7,30
0,59	20,42	0,43	12,85	0,30	9,09	0,23	7,53	0,14	7,27
0,58	22,32	0,43	13,45	0,30	8,52	0,23	7,49	0,13	7,39
0,58	20,10	0,43	12,91	0,30	8,40	0,23	7,46	0,13	7,35
0,58	18,30	0,43	12,37	0,30	9,09	0,23	7,69	0,13	7,50
0,57	16,86	0,43	12,55	0,29	8,74	0,22	7,57	0,13	7,40
0,57	18,69	0,43	13,26	0,29	8,07	0,22	7,31	0,13	7,32
0,57	18,77	0,43	14,32	0,29	8,40	0,22	7,45	0,13	7,02
0,56	18,77	0,40	13,20	0,29	8,27	0,22	7,28	0,12	7,40
0,56	19,89	0,40	12,22	0,29	8,02	0,22	7,37	0,12	7,23
0,56	16,75	0,40	11,82	0,29	8,35	0,22	7,45	0,12	7,10

Quadro de análise de variância da regressão

Item	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	P-Valor
Modelo	4,5818	3	1,5273	1380,85	<0,0001
Resíduo	0,1947	176	0,0011		
Total	4,7765	179			

TABELA 18. Análise de variância para valores de umidade volumétrica (θ) obtidos pelo método gravimétrico e constante dielétrica aparente obtido pela TDR (K_a) na calibração da TDR para estimativa de umidade em fibra de coco (FC) de úmido para seco (U-S).

θ m^3m^{-3}	K_a								
0,72	34,24	0,32	8,77	0,67	25,95	0,26	7,61	0,44	13,59
0,72	33,60	0,32	9,50	0,67	28,93	0,26	8,10	0,44	13,56
0,72	32,91	0,32	9,45	0,67	26,61	0,26	8,68	0,44	14,31
0,71	31,24	0,30	9,01	0,63	24,05	0,23	7,81	0,41	12,04
0,71	31,45	0,30	8,51	0,63	26,31	0,23	7,85	0,41	12,08
0,71	31,60	0,30	8,84	0,63	24,61	0,23	7,53	0,41	12,00
0,70	31,69	0,28	7,98	0,56	23,37	0,19	7,57	0,35	10,55
0,70	30,45	0,28	8,30	0,56	25,15	0,19	7,63	0,35	10,81
0,70	28,00	0,28	8,50	0,56	23,94	0,19	7,38	0,35	10,77
0,67	27,32	0,26	8,01	0,52	16,80	0,17	7,54	0,34	9,77
0,67	26,21	0,26	8,02	0,52	19,48	0,17	7,44	0,34	9,60
0,67	27,36	0,26	8,21	0,52	18,56	0,17	7,36	0,34	9,15
0,64	27,07	0,24	7,59	0,49	17,31	0,73	32,59	0,32	9,87
0,64	28,46	0,24	7,75	0,49	17,34	0,73	32,65	0,32	9,21
0,64	24,76	0,24	7,80	0,49	16,11	0,73	33,05	0,32	9,36
0,60	23,01	0,22	7,59	0,44	11,84	0,71	31,82	0,29	8,25
0,60	23,14	0,22	7,63	0,44	12,00	0,71	32,05	0,29	8,59
0,60	25,10	0,22	7,69	0,44	12,55	0,71	30,98	0,29	8,50
0,52	19,22	0,17	7,64	0,39	12,40	0,71	32,04	0,28	7,69
0,52	18,51	0,17	7,50	0,39	12,34	0,71	30,56	0,28	7,90
0,52	21,43	0,17	7,59	0,39	12,34	0,71	28,00	0,28	7,72
0,49	15,52	0,15	7,42	0,37	10,49	0,65	26,09	0,26	7,90
0,49	14,83	0,15	7,61	0,37	10,26	0,65	25,23	0,26	8,10
0,49	14,87	0,15	7,05	0,37	10,45	0,65	26,59	0,26	7,98
0,46	14,59	0,76	36,67	0,35	9,40	0,62	21,76	0,24	7,72
0,46	14,17	0,76	36,55	0,35	8,95	0,62	21,60	0,24	7,71
0,46	13,78	0,76	35,00	0,35	9,30	0,62	23,09	0,24	7,55
0,42	13,71	0,75	35,57	0,32	9,17	0,58	21,14	0,21	7,58
0,42	11,98	0,75	36,01	0,32	9,01	0,58	20,92	0,21	7,95
0,42	13,20	0,75	34,55	0,32	9,70	0,58	20,91	0,21	7,78
0,36	9,76	0,74	37,65	0,30	8,33	0,51	18,67	0,18	7,70
0,36	10,65	0,74	30,69	0,30	7,95	0,51	19,77	0,18	7,89
0,36	10,21	0,74	30,01	0,30	8,04	0,51	18,54	0,18	7,72
0,34	8,27	0,70	28,89	0,28	8,09	0,48	13,77	0,16	7,59
0,34	8,44	0,70	29,76	0,28	8,02	0,48	14,10	0,16	7,52
0,34	8,40	0,70	32,51	0,28	8,14	0,48	13,83	0,16	7,33

Quadro de análise de variância da regressão

Item	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	P-Valor
Modelo	6,2331	3	2,0777	1936,43	<0,0001
Resíduo	0,1888	176	0,0011		
Total	6,4219	179			

TABELA 19. Valores de umidade obtida pelo método volumétrico (Méd.) com valores de umidade estimadas pelo TDR Para os dois tipos de calibração (U-S) e (S-U) em fibra de coco

Méd.	Estimado																
	U-S	S-U															
0,72	0,66	0,64	0,30	0,29	0,20	0,52	0,56	0,50	0,71	0,64	0,59	0,28	0,24	0,13	0,28	0,32	0,25
0,72	0,66	0,63	0,28	0,25	0,15	0,52	0,54	0,49	0,71	0,65	0,60	0,26	0,25	0,15	0,28	0,32	0,24
0,72	0,65	0,61	0,28	0,26	0,17	0,49	0,52	0,47	0,71	0,64	0,58	0,26	0,26	0,16	0,31	0,39	0,33
0,71	0,64	0,58	0,28	0,27	0,18	0,49	0,52	0,47	0,71	0,65	0,60	0,26	0,25	0,15	0,32	0,37	0,31
0,71	0,64	0,59	0,26	0,25	0,15	0,49	0,50	0,45	0,71	0,64	0,57	0,24	0,24	0,13	0,32	0,37	0,31
0,71	0,64	0,59	0,26	0,25	0,15	0,44	0,39	0,34	0,71	0,62	0,55	0,24	0,24	0,13	0,37	0,44	0,39
0,70	0,64	0,59	0,26	0,26	0,16	0,44	0,40	0,34	0,65	0,61	0,54	0,24	0,23	0,12	0,37	0,40	0,34
0,70	0,64	0,57	0,24	0,23	0,13	0,44	0,42	0,36	0,65	0,61	0,53	0,21	0,23	0,13	0,38	0,42	0,37
0,70	0,62	0,55	0,24	0,24	0,14	0,39	0,41	0,36	0,65	0,62	0,54	0,21	0,25	0,15	0,41	0,45	0,39
0,67	0,62	0,54	0,24	0,24	0,14	0,39	0,41	0,35	0,62	0,58	0,51	0,21	0,24	0,14	0,42	0,48	0,44
0,67	0,61	0,54	0,22	0,23	0,13	0,39	0,41	0,35	0,62	0,58	0,51	0,18	0,24	0,13	0,42	0,47	0,42
0,67	0,62	0,54	0,22	0,23	0,13	0,37	0,35	0,28	0,62	0,59	0,52	0,18	0,25	0,14	0,46	0,48	0,43
0,64	0,62	0,54	0,22	0,24	0,13	0,37	0,34	0,27	0,58	0,58	0,51	0,18	0,24	0,13	0,46	0,52	0,47
0,64	0,63	0,55	0,17	0,23	0,13	0,37	0,35	0,28	0,58	0,57	0,51	0,16	0,23	0,13	0,47	0,50	0,45
0,64	0,61	0,53	0,17	0,23	0,12	0,35	0,31	0,23	0,58	0,57	0,51	0,16	0,23	0,12	0,52	0,56	0,50
0,60	0,59	0,52	0,17	0,23	0,13	0,35	0,29	0,21	0,51	0,55	0,49	0,16	0,22	0,11	0,53	0,58	0,51
0,60	0,59	0,52	0,15	0,22	0,12	0,35	0,31	0,22	0,51	0,56	0,50	0,02	0,15	0,01	0,54	0,59	0,52
0,60	0,61	0,53	0,15	0,23	0,13	0,32	0,30	0,22	0,51	0,54	0,49	0,02	0,17	0,04	0,55	0,59	0,52
0,52	0,55	0,50	0,15	0,21	0,09	0,32	0,29	0,21	0,48	0,45	0,40	0,02	0,17	0,04	0,55	0,60	0,52
0,52	0,54	0,49	0,76	0,68	0,72	0,32	0,32	0,24	0,48	0,46	0,41	0,06	0,21	0,09	0,56	0,60	0,52
0,52	0,58	0,51	0,76	0,68	0,71	0,30	0,27	0,17	0,48	0,45	0,40	0,06	0,22	0,11	0,54	0,59	0,52
0,49	0,49	0,44	0,76	0,67	0,66	0,30	0,25	0,15	0,44	0,44	0,39	0,06	0,20	0,09	0,54	0,59	0,52
0,49	0,48	0,43	0,75	0,67	0,68	0,30	0,25	0,15	0,44	0,44	0,39	0,04	0,22	0,11	0,55	0,59	0,52
0,49	0,48	0,43	0,75	0,67	0,69	0,28	0,25	0,16	0,44	0,46	0,41	0,04	0,25	0,15	0,57	0,60	0,53
0,46	0,47	0,42	0,75	0,66	0,65	0,28	0,25	0,15	0,41	0,40	0,34	0,05	0,21	0,10	0,58	0,61	0,53
0,46	0,46	0,41	0,74	0,69	0,76	0,28	0,26	0,16	0,41	0,40	0,34	0,06	0,23	0,12	0,58	0,61	0,53
0,46	0,45	0,40	0,74	0,64	0,57	0,26	0,23	0,13	0,41	0,40	0,34	0,07	0,22	0,11	0,61	0,63	0,55
0,42	0,45	0,40	0,74	0,63	0,57	0,26	0,26	0,16	0,35	0,35	0,28	0,07	0,21	0,10	0,61	0,63	0,55
0,42	0,40	0,34	0,70	0,63	0,56	0,26	0,28	0,19	0,35	0,36	0,29	0,08	0,22	0,10	0,61	0,63	0,56
0,42	0,43	0,38	0,70	0,63	0,56	0,23	0,24	0,14	0,35	0,36	0,29	0,09	0,22	0,10	0,65	0,62	0,55
0,36	0,32	0,25	0,70	0,65	0,60	0,23	0,24	0,14	0,34	0,32	0,25	0,09	0,21	0,10	0,65	0,64	0,59
0,36	0,36	0,29	0,67	0,61	0,54	0,23	0,23	0,12	0,34	0,32	0,24	0,11	0,22	0,11	0,65	0,64	0,59
0,36	0,34	0,27	0,67	0,63	0,56	0,19	0,23	0,12	0,34	0,30	0,22	0,12	0,22	0,10	0,67	0,65	0,61
0,34	0,26	0,17	0,67	0,62	0,54	0,19	0,23	0,13	0,32	0,33	0,25	0,13	0,21	0,10	0,67	0,65	0,62
0,34	0,27	0,18	0,63	0,60	0,53	0,19	0,22	0,11	0,32	0,30	0,22	0,21	0,22	0,11	0,68	0,65	0,62
0,34	0,27	0,17	0,63	0,62	0,54	0,17	0,23	0,12	0,32	0,31	0,23	0,22	0,23	0,12	0,73	0,66	0,66
0,32	0,28	0,20	0,63	0,60	0,53	0,17	0,23	0,12	0,29	0,26	0,17	0,23	0,22	0,11	0,74	0,66	0,65
0,32	0,31	0,23	0,56	0,60	0,52	0,17	0,22	0,11	0,29	0,28	0,19	0,21	0,23	0,13	0,75	0,67	0,67
0,32	0,31	0,23	0,56	0,61	0,53	0,73	0,65	0,61	0,29	0,27	0,18	0,21	0,25	0,15			
0,30	0,29	0,21	0,56	0,60	0,53	0,73	0,65	0,61	0,28	0,24	0,13	0,24	0,25	0,15			
0,30	0,27	0,18	0,52	0,52	0,46	0,73	0,65	0,61	0,28	0,25	0,15	0,27	0,34	0,27			

TABELA 20. Análise de variância para valores de correlação de Umidade calculada X Umidade estimada com TDR (calibração U-S) em fibra de coco.

ANÁLISE DE VARIÂNCIA					
Item	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	P-Valor
Modelo	9,4435	1	9,44353	3687,84	<0,0001
Resíduo	0,6171	241	0,00256		
Total	10,061	242			

$$R^2 = 0,9385$$

$$\text{Equação: } \theta \text{ Calculada} = -0,0741136 + 1,16639 * \theta \text{ Estimada}$$

TABELA 21. Análise de variância para valores de correlação de Umidade calculada X Umidade estimada com TDR (calibração S-U) em fibra de coco.

ANÁLISE DE VARIÂNCIA					
Item	S.Q.	G.L.	Q.M.	F	P-Valor
Modelo	9,46677	1	9,46677	3841,58	<0,0001
Resíduo	0,593895	241	0,002464		
Total	10,0607	242			

$$R^2 = 0,9406$$

$$\text{Equação: } \theta \text{ Calculada} = 0,0617824 + 1,02544 * \theta \text{ Estimada}$$

TABELA 22. Valores de umidade obtida pelo método volumétrico (Méd.) com valores de umidade estimadas pelo TDR Para os dois tipos de calibração (U-S) e (S-U) em casca de pinus.

Méd.	Estimado																
	U-S	S-U															
0,62	0,55	0,41	0,26	0,23	0,21	0,43	0,46	0,39	0,65	0,55	0,42	0,26	0,22	0,20	0,27	0,24	0,22
0,62	0,55	0,40	0,26	0,23	0,21	0,39	0,37	0,33	0,65	0,55	0,41	0,26	0,22	0,20	0,28	0,32	0,29
0,62	0,55	0,40	0,24	0,21	0,19	0,39	0,35	0,32	0,65	0,55	0,41	0,25	0,21	0,19	0,29	0,30	0,28
0,61	0,55	0,40	0,24	0,22	0,20	0,39	0,39	0,34	0,64	0,55	0,41	0,25	0,22	0,20	0,30	0,31	0,28
0,61	0,54	0,40	0,24	0,19	0,17	0,36	0,35	0,32	0,64	0,55	0,40	0,25	0,21	0,19	0,32	0,35	0,32
0,61	0,55	0,40	0,23	0,21	0,19	0,36	0,38	0,34	0,64	0,55	0,40	0,23	0,20	0,19	0,32	0,35	0,31
0,61	0,53	0,41	0,23	0,20	0,19	0,36	0,36	0,32	0,63	0,55	0,40	0,23	0,20	0,18	0,32	0,34	0,31
0,61	0,55	0,40	0,23	0,22	0,20	0,33	0,34	0,31	0,63	0,55	0,40	0,23	0,21	0,19	0,33	0,39	0,34
0,61	0,52	0,41	0,20	0,22	0,20	0,33	0,30	0,28	0,63	0,54	0,40	0,22	0,19	0,18	0,33	0,37	0,33
0,57	0,51	0,41	0,20	0,21	0,19	0,33	0,30	0,27	0,59	0,53	0,41	0,22	0,20	0,18	0,34	0,38	0,33
0,57	0,53	0,41	0,20	0,21	0,19	0,29	0,27	0,25	0,59	0,53	0,41	0,22	0,20	0,19	0,35	0,39	0,35
0,57	0,53	0,41	0,18	0,20	0,19	0,29	0,24	0,22	0,59	0,54	0,41	0,19	0,20	0,18	0,36	0,39	0,34
0,55	0,53	0,41	0,18	0,20	0,18	0,29	0,25	0,23	0,56	0,53	0,41	0,19	0,20	0,18	0,37	0,41	0,36
0,55	0,54	0,40	0,18	0,21	0,19	0,28	0,23	0,21	0,56	0,54	0,41	0,19	0,21	0,19	0,38	0,41	0,36
0,55	0,52	0,41	0,14	0,18	0,17	0,28	0,24	0,22	0,56	0,50	0,40	0,13	0,20	0,18	0,38	0,41	0,36
0,52	0,52	0,41	0,14	0,19	0,17	0,28	0,23	0,21	0,54	0,53	0,41	0,13	0,20	0,18	0,38	0,43	0,37
0,52	0,51	0,41	0,14	0,18	0,17	0,26	0,23	0,21	0,54	0,51	0,41	0,13	0,21	0,19	0,39	0,45	0,38
0,52	0,52	0,41	0,13	0,20	0,18	0,26	0,22	0,20	0,54	0,49	0,40	0,15	0,20	0,18	0,39	0,44	0,37
0,46	0,48	0,40	0,13	0,20	0,18	0,26	0,23	0,21	0,46	0,47	0,39	0,15	0,21	0,19	0,40	0,44	0,38
0,46	0,49	0,40	0,13	0,18	0,16	0,24	0,22	0,20	0,46	0,49	0,40	0,15	0,19	0,17	0,41	0,47	0,39
0,46	0,48	0,40	0,60	0,55	0,42	0,24	0,21	0,20	0,46	0,49	0,40	0,10	0,20	0,18	0,42	0,47	0,39
0,43	0,44	0,38	0,60	0,55	0,40	0,24	0,21	0,20	0,43	0,46	0,39	0,11	0,16	0,14	0,43	0,47	0,39
0,43	0,43	0,37	0,60	0,55	0,40	0,22	0,21	0,19	0,43	0,41	0,36	0,11	0,19	0,17	0,44	0,48	0,40
0,43	0,41	0,36	0,59	0,54	0,40	0,22	0,20	0,18	0,43	0,42	0,37	0,14	0,18	0,16	0,44	0,48	0,40
0,40	0,42	0,36	0,59	0,55	0,40	0,22	0,20	0,19	0,40	0,43	0,37	0,14	0,18	0,16	0,45	0,51	0,41
0,40	0,36	0,32	0,59	0,54	0,40	0,21	0,21	0,19	0,40	0,41	0,36	0,14	0,18	0,17	0,47	0,51	0,41
0,40	0,42	0,37	0,58	0,55	0,40	0,21	0,20	0,18	0,40	0,39	0,35	0,17	0,18	0,16	0,47	0,52	0,41
0,37	0,41	0,36	0,58	0,54	0,40	0,21	0,20	0,18	0,36	0,38	0,34	0,17	0,19	0,17	0,48	0,52	0,41
0,37	0,36	0,32	0,58	0,52	0,41	0,19	0,21	0,19	0,36	0,39	0,35	0,17	0,18	0,17	0,48	0,55	0,40
0,37	0,37	0,33	0,55	0,50	0,40	0,19	0,20	0,18	0,36	0,35	0,32	0,19	0,20	0,19	0,48	0,54	0,40
0,32	0,29	0,27	0,55	0,54	0,41	0,19	0,20	0,18	0,32	0,27	0,25	0,19	0,20	0,18	0,48	0,55	0,40
0,32	0,28	0,26	0,55	0,52	0,41	0,17	0,20	0,18	0,32	0,32	0,29	0,20	0,20	0,18	0,51	0,55	0,40
0,32	0,32	0,29	0,52	0,53	0,41	0,17	0,19	0,17	0,32	0,25	0,23	0,21	0,20	0,18	0,51	0,55	0,40
0,30	0,26	0,24	0,52	0,49	0,40	0,17	0,20	0,18	0,30	0,27	0,24	0,21	0,20	0,18	0,51	0,55	0,40
0,30	0,25	0,23	0,52	0,50	0,40	0,14	0,22	0,20	0,30	0,30	0,28	0,21	0,20	0,18	0,53	0,55	0,40
0,30	0,29	0,26	0,50	0,49	0,40	0,14	0,20	0,18	0,30	0,29	0,26	0,23	0,21	0,20	0,54	0,55	0,40
0,28	0,22	0,20	0,50	0,49	0,40	0,14	0,19	0,18	0,29	0,25	0,23	0,24	0,22	0,20	0,55	0,55	0,40
0,28	0,24	0,22	0,50	0,47	0,39	0,12	0,20	0,18	0,29	0,23	0,21	0,24	0,21	0,19			
0,28	0,24	0,22	0,43	0,42	0,36	0,12	0,19	0,17	0,29	0,25	0,23	0,26	0,24	0,22			
0,26	0,22	0,20	0,43	0,43	0,37	0,12	0,18	0,17	0,26	0,22	0,20	0,26	0,23	0,21			

TABELA 23 . Análise de variância para valores de correlação de Umidade calculada X Umidade estimada com TDR (calibração U-S) em casca de pinus.

ANÁLISE DE VARIÂNCIA					
Item	S.Q	G.L.	Q.M.	F	P-Valor
Modelo	5,36475	1	5,36475	3166,96	<0,0001
Resíduo	0,398085	235	0,001694		
Total	5,76284	236			

$$R^2 = 0,9319$$

$$\text{Equação: } \theta \text{ Calculada} = -0,0201607 + 1,07189 * \theta \text{ Estimada}$$

TABELA 24. Análise de variância para valores de correlação de Umidade calculada X Umidade estimada com TDR (calibração S-U) em casca de pinus.

ANÁLISE DE VARIÂNCIA					
Item	S.Q	G.L.	Q.M.	F	P-Valor
Modelo	5,1116	1	5,1116	1844,53	<0,0001
Resíduo	0,651235	235	0,00277121		
Total	5,76284	236			

$$R^2 = 0,8874$$

$$\text{Equação: } \theta \text{ Calculada} = -0,0895787 + 1,51903 * \theta \text{ Estimada}$$

TABELA 25. Valores de umidade volumétrica (θ), condutividade elétrica da solução (CE_S) e condutividade elétrica aparente obtido pela TDR (CE_{TDR}) na calibração da TDR para estimativa de condutividade elétrica para casca de pinus (CP).

θ m^3m^{-3}	CE_S dS/m	CE_{TDR} dS/m									
0,78	1,83	1,37	0,77	2,20	1,72	0,80	3,07	2,42	0,79	3,49	2,99
0,77	1,21	1,28	0,76	1,97	2,11	0,78	2,92	2,40	0,78	3,45	2,61
0,70	1,49	1,17	0,72	2,36	1,93	0,74	3,03	2,38	0,78	3,85	2,80
0,65	1,33	1,09	0,69	1,90	1,82	0,67	3,05	1,84	0,78	4,32	2,75
0,64	1,48	1,01	0,68	2,27	1,69	0,64	3,40	1,73	0,71	4,41	2,67
0,57	1,33	0,60	0,61	2,25	0,89	0,59	3,61	1,23	0,61	4,63	2,05
0,50	1,37	0,58	0,56	1,67	0,93	0,52	3,26	1,05	0,55	4,98	1,56
0,46	1,40	0,39	0,50	2,11	0,68	0,48	3,20	0,77	0,53	4,48	1,53
0,44	1,48	0,34	0,48	2,61	0,65	0,46	3,20	0,80	0,47	5,70	1,10
0,40	1,48	0,23	0,45	2,82	0,46	0,42	4,15	0,54	0,45	6,01	0,95
0,37	1,80	0,22	0,42	2,89	0,37	0,40	4,14	0,46	0,44	6,20	0,76
0,35	2,01	0,20	0,41	3,11	0,32	0,38	5,55	0,36	0,42	6,60	0,65
0,76	1,20	1,40	0,78	2,17	1,81	0,79	3,46	2,37	0,77	4,21	2,91
0,76	1,08	1,26	0,76	2,61	1,84	0,77	3,08	2,35	0,77	4,12	2,81
0,71	1,13	1,10	0,72	2,80	1,76	0,73	3,28	2,41	0,77	3,55	2,81
0,68	1,26	1,23	0,65	2,63	1,61	0,67	3,60	2,31	0,73	3,91	2,67
0,66	1,34	1,31	0,64	2,58	1,37	0,65	2,93	1,96	0,70	4,41	2,53
0,61	1,63	0,75	0,59	2,05	0,82	0,60	3,53	1,24	0,57	4,20	1,93
0,54	1,45	0,63	0,53	2,40	0,74	0,58	3,56	1,14	0,51	5,10	1,24
0,49	1,71	0,52	0,48	2,31	0,64	0,52	3,60	0,96	0,49	5,16	1,09
0,47	1,79	0,49	0,46	2,99	0,62	0,50	3,39	0,92	0,44	6,20	0,85
0,43	2,20	0,28	0,43	3,60	0,40	0,46	3,70	0,75	0,42	6,41	0,77
0,40	2,10	0,24	0,40	4,10	0,40	0,43	3,90	0,58	0,39	6,74	0,62
0,38	1,90	0,23	0,38	4,01	0,43	0,41	4,21	0,53	0,38	7,10	0,59
0,78	1,83	1,42	0,77	2,60	1,89	0,78	3,20	2,39	0,77	4,19	2,96
0,76	2,04	1,56	0,75	2,66	1,90	0,76	3,10	2,40	0,74	4,18	2,89
0,66	1,81	1,36	0,71	2,63	1,89	0,73	3,41	2,58	0,71	4,25	2,71
0,61	1,82	0,90	0,68	2,39	1,69	0,69	2,80	2,08	0,65	3,92	1,95
0,59	1,45	0,69	0,65	2,12	1,36	0,67	3,14	2,00	0,61	3,93	1,80
0,53	1,60	0,55	0,59	2,77	0,84	0,61	3,50	1,26	0,61	4,12	1,76
0,49	1,70	0,51	0,52	2,45	0,61	0,55	3,40	0,96	0,55	4,84	1,52
0,45	1,87	0,41	0,47	2,10	0,43	0,50	3,71	0,82	0,52	4,73	1,51
0,43	1,99	0,34	0,39	2,83	0,39	0,48	3,65	0,89	0,47	5,00	0,80
0,39	2,05	0,25	0,35	3,69	0,29	0,44	4,22	0,53	0,45	5,44	0,72
0,37	2,10	0,20	0,34	3,70	0,22	0,37	4,70	0,41	0,43	5,90	0,60
0,35	2,15	0,21	0,34	4,52	0,25	0,38	5,20	0,36	0,38	7,21	0,60

TABELA 26. Valores de umidade volumétrica (θ), condutividade elétrica da solução (CE_S) e condutividade elétrica aparente obtido pela TDR (CE_{TDR}) na calibração da TDR para estimativa de condutividade elétrica para fibra de coco (FC).

θ m^3m^{-3}	CE_S dS/m	CE_{TDR} dS/m									
0,77	1,02	0,99	0,75	2,86	2,30	0,76	3,48	3,24	0,75	4,56	3,88
0,74	1,05	0,80	0,71	2,90	1,79	0,73	3,66	2,97	0,69	4,60	3,99
0,73	1,16	0,74	0,70	2,68	1,70	0,72	3,90	3,11	0,68	5,18	3,94
0,70	0,94	0,75	0,67	2,60	1,63	0,69	3,75	2,57	0,64	4,75	3,27
0,68	1,19	0,76	0,65	2,57	1,72	0,66	3,74	2,50	0,62	4,61	3,03
0,65	1,15	0,58	0,61	2,60	1,44	0,62	4,16	2,27	0,58	5,80	2,63
0,61	1,07	0,65	0,58	2,65	1,39	0,58	4,30	2,12	0,51	5,84	2,15
0,56	1,19	0,56	0,53	3,14	1,00	0,51	4,77	1,67	0,43	6,80	1,53
0,51	1,33	0,40	0,49	2,99	0,86	0,48	4,39	1,18	0,40	6,44	1,19
0,44	1,33	0,03	0,42	3,06	0,53	0,40	4,61	0,86	0,37	6,61	0,80
0,77	1,26	1,02	0,76	2,45	2,59	0,75	3,54	3,19	0,76	5,15	3,88
0,74	1,33	0,95	0,72	2,70	1,79	0,71	3,57	2,92	0,72	5,23	4,62
0,73	1,02	0,72	0,72	2,32	2,06	0,70	3,48	3,07	0,71	4,90	4,04
0,71	1,03	0,72	0,69	2,41	1,77	0,67	3,84	2,53	0,66	5,29	3,03
0,68	1,02	0,79	0,67	2,48	1,90	0,64	4,00	2,65	0,65	5,31	3,13
0,65	1,05	0,69	0,63	2,78	1,52	0,61	4,07	2,19	0,60	5,87	2,97
0,61	1,08	0,67	0,59	2,89	1,59	0,57	4,37	2,04	0,54	5,65	2,22
0,56	1,12	0,58	0,54	2,95	1,32	0,51	4,54	1,45	0,46	7,20	1,61
0,52	1,15	0,41	0,50	2,95	0,91	0,47	4,60	1,20	0,42	8,15	1,20
0,42	1,22	0,30	0,43	3,15	0,68	0,40	4,72	0,76	0,37	8,27	0,95
0,76	1,34	1,02	0,76	2,48	2,76	0,75	3,71	2,97	0,76	5,39	3,81
0,73	1,28	0,93	0,74	2,64	2,18	0,70	3,69	2,82	0,74	5,70	4,10
0,72	0,91	0,60	0,73	2,25	2,22	0,69	3,29	2,90	0,73	5,24	3,91
0,69	0,93	0,75	0,69	2,62	1,79	0,66	3,88	2,25	0,69	6,08	3,21
0,67	1,34	0,77	0,65	2,43	1,79	0,63	3,67	2,38	0,68	5,83	3,02
0,63	1,05	0,64	0,61	2,68	1,42	0,60	4,14	1,96	0,64	5,75	2,83
0,59	1,12	0,62	0,56	2,79	1,28	0,55	4,41	1,87	0,57	6,60	2,44
0,54	1,18	0,60	0,49	3,08	1,04	0,51	4,70	1,35	0,50	6,40	1,64
0,50	1,25	0,53	0,45	3,13	0,69	0,43	4,70	1,17	0,45	7,50	1,22
0,41	1,26	0,31	0,38	3,33	0,42	0,37	4,89	0,71	0,39	7,45	0,97

TABELA 27. Valores de fator de tortuosidade (T) X valores de umidade (θ) dos substratos fibra de coco (FC) e casca de pinus (CP)

Casca de pinus				Fibra de coco			
Fator T	θ m ³ m ⁻³	Fator T	θ m ³ m ⁻³	Fator T	θ m ³ m ⁻³	Fator T	θ m ³ m ⁻³
1,21	0,71	0,96	0,73	1,23	0,77	1,22	0,76
1,29	0,68	0,82	0,67	0,98	0,74	1,10	0,73
1,11	0,66	0,96	0,65	0,84	0,73	1,10	0,72
0,63	0,61	0,53	0,60	1,08	0,70	0,98	0,69
0,66	0,54	0,50	0,58	0,90	0,68	1,00	0,66
0,47	0,49	0,45	0,52	0,74	0,65	0,87	0,62
0,45	0,47	0,47	0,50	0,95	0,61	0,84	0,58
0,27	0,43	0,37	0,46	0,80	0,56	0,67	0,51
0,26	0,40	0,27	0,43	0,54	0,51	0,55	0,48
0,29	0,38	0,23	0,41	0,52	0,44	0,45	0,40
0,81	0,72	0,99	0,77	1,06	0,75	1,13	0,75
0,87	0,65	0,89	0,73	0,86	0,71	1,24	0,69
0,76	0,64	0,78	0,70	0,90	0,70	1,11	0,68
0,58	0,59	0,58	0,57	0,92	0,67	1,06	0,64
0,49	0,53	0,43	0,51	1,02	0,65	1,04	0,62
0,47	0,48	0,38	0,49	0,88	0,61	0,78	0,58
0,36	0,46	0,27	0,44	0,88	0,58	0,71	0,51
0,25	0,43	0,24	0,42	0,59	0,53	0,51	0,43
0,20	0,40	0,18	0,40	0,56	0,49	0,45	0,40
0,21	0,38	0,17	0,38	0,39	0,42	0,32	0,37

Casca de pinus (CP)

$$\tau = 2,3724\theta - 0,7274$$

$$R^2 = 0,8574$$

Fibra de coco (FC)

$$\tau = 1,9798\theta - 0,3601$$

$$R^2 = 0,8444$$

TABELA 28. Valores de condutividade elétrica do extrato de solução medido pelo condutivímetro (CE_s) X Condutividade elétrica da solução estimada pela TDR ($CE_{s'}$) em casca de pinus (CP).

CE_s dS m ⁻¹	$CE_{s'}$ dS m ⁻¹								
1,83	1,43	1,60	1,51	4,10	3,23	3,60	3,81	5,70	5,27
1,21	1,36	1,70	1,79	4,01	4,84	2,93	3,46	6,01	5,25
1,49	1,58	1,87	1,89	2,60	2,08	3,53	2,70	6,20	4,40
1,33	1,82	1,99	1,76	2,66	2,26	3,56	2,74	6,60	4,54
1,48	1,74	2,05	1,57	2,63	2,60	3,60	3,29	4,21	3,28
1,33	1,36	2,10	1,40	2,39	2,63	3,39	3,47	4,12	3,19
1,37	1,96	2,15	2,50	2,12	2,30	3,70	3,66	3,55	3,21
1,40	1,67	2,20	1,87	2,77	1,80	3,90	3,52	3,91	3,44
1,48	1,63	1,97	2,45	2,45	1,81	4,21	3,90	4,41	3,64
1,48	1,30	2,36	2,57	2,10	1,78	3,20	2,56	4,20	4,96
1,80	1,83	1,90	2,71	2,83	3,31	3,10	2,76	5,10	4,45
2,01	1,95	2,27	2,64	3,69	4,54	3,41	3,37	5,16	4,66
1,20	1,54	2,25	1,72	3,70	3,72	2,80	3,15	6,20	5,33
1,08	1,40	1,67	2,47	4,52	5,54	3,14	3,19	6,41	5,90
1,13	1,42	2,11	2,36	3,07	2,45	3,50	2,54	6,74	6,51
1,26	1,82	2,61	2,57	2,92	2,56	3,40	2,68	7,10	7,54
1,34	2,14	2,82	2,25	3,03	2,92	3,71	3,14	4,19	3,38
1,63	1,45	2,89	2,10	3,05	3,02	3,65	4,02	4,18	3,58
1,45	1,75	3,11	2,08	3,40	3,13	4,22	2,98	4,25	3,88
1,71	1,85	2,17	1,95	3,61	2,78	4,70	4,84	3,92	3,40
1,79	2,13	2,61	2,09	3,26	3,55	5,20	3,51	3,93	3,75
2,20	1,29	2,80	2,31	3,20	3,36	3,49	3,21	4,12	3,79
2,10	1,31	2,63	2,81	3,20	4,07	3,45	2,82	4,84	4,35
1,90	1,54	2,58	2,49	4,15	3,59	3,85	3,07	4,73	5,10
1,83	1,49	2,05	1,77	4,14	3,97	4,32	3,01	5,00	3,84
2,04	1,78	2,40	2,21	5,55	3,63	4,41	3,71	5,44	3,82
1,81	2,28	2,31	2,66	3,46	2,52	4,63	4,43	5,90	3,70
1,82	1,81	2,99	2,97	3,08	2,66	4,98	4,60	7,21	6,90
1,45	1,40	3,60	2,31	3,28	3,17	4,48	5,02		

TABELA 29. Valores de condutividade elétrica do extrato de solução medido pelo condutivímetro (CE_s) X Condutividade elétrica da solução estimada pela TDR ($CE_{s'}$) em fibra de coco (FC).

CE_s dS m ⁻¹	$CE_{s'}$ dS m ⁻¹								
1,02	1,07	1,34	1,15	2,95	2,75	3,48	4,23	5,84	6,30
1,05	0,93	1,05	1,08	3,15	3,08	3,84	3,81	6,80	6,97
1,16	0,89	1,12	1,22	2,48	3,11	4,00	4,48	6,44	6,65
0,94	0,98	1,18	1,47	2,64	2,63	4,07	4,20	6,61	5,82
1,19	1,07	1,25	1,60	2,25	2,77	4,37	4,61	5,15	4,45
1,15	0,93	1,26	1,49	2,62	2,52	4,54	4,31	5,23	5,97
1,07	1,20	2,86	2,72	2,43	2,89	4,60	4,24	4,90	5,41
1,19	1,27	2,90	2,40	2,68	2,71	4,72	4,28	5,29	4,73
1,33	1,10	2,68	2,36	2,79	3,00	3,71	3,52	5,31	5,22
1,33	1,36	2,60	2,47	3,08	3,36	3,69	3,94	5,87	5,86
1,26	1,11	2,57	2,84	3,13	2,75	3,29	4,19	5,65	5,72
1,33	1,11	2,60	2,67	3,33	2,64	3,88	3,57	7,20	6,33
1,02	0,86	2,65	2,97	3,48	3,71	3,67	4,18	7,15	6,00
1,03	0,94	3,14	2,68	3,66	3,71	4,14	3,89	8,00	6,55
1,02	1,12	2,99	2,72	3,90	4,04	4,41	4,65	5,39	4,29
1,05	1,09	3,06	2,59	3,75	3,66	4,70	4,03	5,70	4,96
1,08	1,24	2,45	2,96	3,74	3,94	4,70	5,31	5,24	4,91
1,12	1,32	2,70	2,26	4,16	4,18	4,89	4,91	6,08	4,51
1,15	1,10	2,32	2,66	4,30	4,61	4,56	4,58	5,83	4,42
1,22	1,32	2,41	2,49	4,77	4,85	4,60	5,63	5,75	4,84
1,34	1,14	2,48	2,94	4,39	4,08	5,18	5,77	6,60	5,40
1,28	1,15	2,78	2,64	4,61	4,91	4,75	5,47	6,40	5,25
0,91	0,75	2,89	3,24	3,54	3,79	4,61	5,51	6,50	5,06
0,93	1,03	2,95	3,35	3,57	3,87	5,80	5,76	7,45	6,05

TABELA 30. Análise de variância para valores de correlação de Condutividade elétrica da solução medida (CE_S) X Condutividade elétrica estimada TDR ($CE_{S'}$) em substrato casca de pinus (CP).

ANÁLISE DE VARIÂNCIA					
Item	S.Q	G.L.	Q.M.	F	P-Valor
Modelo	226,31	1	226,31	611,82	<0,0001
Resíduo	52,5248	142	0,369893		
Total	278,834	143			

$$R^2 = 0,8096$$

$$\text{Equação: } CE_S = 1,0767 * CE_{S'}$$

TABELA 31. Análise de variância para valores de correlação de Condutividade elétrica da solução medida (CE_S) X Condutividade elétrica estimada TDR ($CE_{S'}$) em substrato fibra de coco (FC).

ANÁLISE DE VARIÂNCIA					
Item	S.Q	G.L.	Q.M.	F	P-Valor
Modelo	310,915	1	310,915	1371,92	<0,0001
Resíduo	26,7421	118	0,226628		
Total	337,657	119			

$$R^2 = 0,9208$$

$$\text{Equação: } CE_S = 1,0226 * CE_{S'}$$