

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**TÉCNICA DA TDR NA ESTIMATIVA DA UMIDADE E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DE
SOLO IRRIGADO COM ÁGUA RESIDUÁRIA DA SUINOCULTURA**

ROSIMALDO SONCELA

CASCADEL – PR

JUNHO – 2009

ROSIMALDO SONCELA

**TÉCNICA DA TDR NA ESTIMATIVA DA UMIDADE E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DE
SOLO IRRIGADO COM ÁGUA RESIDUÁRIA DA SUINOCULTURA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Silvio César Sampaio.

Co-orientador: Prof. Dr. Marcio A. Vilas Boas

CASCADEL – PR

30 de Junho de 2009

Ficha catalográfica

Elaborada pela Biblioteca Central do Campus de Cascavel - Unioeste

S686t Soncela, Rosinaldo
Técnica da TDR na estimativa da umidade e condutividade elétrica de solo irrigado com água residuária da suinocultura/ Rosinaldo Soncela — Cascavel, PR: UNIOESTE, 2009.
48 f. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Silvio César Sampaio
Co-orientador: Prof. Dr. Márcio Antônio Vilas Boas
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná.
Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.
Bibliografia.

1. Reúso de água. 2. Calibração. 3. Umidade volumétrica. 4. Solo - Salinidade. 5. Água residuária (suinocultura). I. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. II. Título.

CDD 21ed. 631.86

Bibliotecária: Jeanine da Silva Barros CRB-9/1362

ROSIMALDO SONCELA

**TÉCNICA DA TDR NA ESTIMATIVA DA UMIDADE E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DE
SOLO IRRIGADO COM ÁGUA RESIDUÁRIA DA SUINOCULTURA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, **APROVADA** pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Professor Dr. Silvio César Sampaio
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE - Cascavel

Professor Dr. Claudinei Fonseca Souza
Departamento de Recursos Naturais e Proteção Ambiental - UFSCAR

Professora Dra. Maritane Prior
Departamento de Engenharia Agrícola - UEM

Professora Dra. Maria Hermínia Ferreira Tavares
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE - Cascavel

Professora Dr. Miguel Angel Uribe Opazo
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE - Cascavel

Cascavel, 30 de junho de 2009

BIOGRAFIA

- Data de nascimento: 25/05/1976;
- Naturalidade: Cascavel – PR;
- Pós-graduação *Strictu Sensu*: Mestrado Engenharia Agrícola: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - UNIOESTE
- Graduação: Engenharia Agrícola – UNIOESTE – 2002;
- Extensionista Rural – EMATER-RO – 2004/2007;
- Secretário Municipal da Agricultura e Meio Ambiente – Alvorada do Oeste – RO - 2005

“Determinação, coragem e autoconfiança são fatores decisivos para o sucesso. Não importam quais sejam os obstáculos e as dificuldades. Se estamos possuídos de uma inabalável determinação, conseguiremos superá-los. Independentemente das circunstâncias, devemos ser sempre humildes, recatados e despidos de orgulho”.

Dalai Lama

À minha mãe Vilma, ao meu pai Dorivaldo (*in memoriam*), aos meus irmãos Roberto e Romildo e à minha esposa, Adriana, pelo apoio, incentivo, compreensão e por serem meus exemplos de dedicação, seriedade e comprometimento.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, saúde e por ter colocado em meu caminho pessoas tão especiais no decorrer do mestrado e da vida;

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), *campus* de Cascavel, em especial ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização deste curso;

Ao Professor. Dr. Silvio César Sampaio, pela orientação, oportunidade da realização do mestrado, amizade e ensinamentos;

Ao Professor Dr. Márcio Antônio Vilas Boas, pela co-orientação deste trabalho e oportunidade concedida e também pela amizade, confiança e pelos ensinamentos, sem os quais não seria possível a realização deste trabalho;

À Professora Simone Damasceno Gomes, por ter disponibilizado o Laboratório de Saneamento Ambiental da UNIOESTE, *campus* de Cascavel, para a realização das análises do experimento e também pela amizade;

Aos Professores: Miguel Angel Uribe Opazo, Silvia Renata Machado Coelho, Maria Hermínia Ferreira Tavares e Simone Damasceno Gomes, pela dedicação e transposição dos conhecimentos durante a realização dos créditos;

À secretária do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Vera Celita Schmidt, pela constante disposição em ajudar e sanar as dúvidas;

Ao senhor Irno Prietto, por ter cedido a água residuária de suinocultura utilizada no experimento;

Às minhas amigas Tatiane Cristina Dal Bosco, Dinéia Tessaro, Larissa Mallmann, por terem feito parte deste momento tão importante e tão desafiador da minha vida. Agradeço pela amizade, confiança, incentivo, companheirismo, ajuda, paciência e dedicação;

A todos os colegas do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola e do grupo de estudos de Reúso de Água, pela colaboração e pelos momentos compartilhados no decorrer do curso;

Aos meus amigos Jhonatan e Linsderferson, pela amizade, confiança, incentivo, companheirismo;

A minha esposa, Adriana, pelo apoio, incentivo, dedicação e carinho durante a realização deste trabalho e todos os momentos de nossas vidas;

À Cristiane Andreis Soncela, Pedro Roberto, João Arthur e Paulo Antonio, pela compreensão, carinho, incentivo durante este período e toda a minha vida;

Ao senhor Neoclésio Smanhotto e Juliana Smanhotto, pelo incentivo e apoio;

À Inedes Pasquali Smanhotto (*in memoriam*), pelo exemplo de luta e perseverança;

Aos Amigos Ronywon e Cleonice, pelo incentivo e apoio;

Finalmente, a todos que colaboraram na concretização deste trabalho e na conclusão do curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	xi
RESUMO	x
ABSTRACT	Xi
1 INTRODUÇÃO	01
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	03
2.1 Reúso de água na agricultura.....	03
2.2 Solos afetados por sais.....	04
2.3 Técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo – TDR.....	07
3 MATERIAL E MÉTODOS	10
3.1 Confeções das sondas de TDR.....	10
3.2 Calibração das sondas de TDR.....	13
3.3 Cálculo umidade volumétrica.....	15
3.4 Instalação do experimento.....	16
3.5 Análises estatísticas.....	21
3.5.1 Comparação entre duas retas.....	22
3.5.1.1 Teste de igualdade das variâncias.....	23
3.5.1.2 Teste de paralelismo (comparação de coeficientes angulares).....	24
3.5.1.3 Comparação dos interceptos.....	26
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1 Análise das sondas.....	27
4.2 Padronização das sondas.....	28
4.3 Condutividade elétrica solo.....	35
4.3.1 Comparação das retas de regressão.....	39
4.3.2 Relação condutividade elétrica TDR e extrato saturado.....	41
5 CONCLUSÕES	43
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Equações utilizadas para calcular a Condutividade elétrica aparente do solo	09
Tabela 2	Resultado das análises química e granulométrica do solo da área experimental	16
Tabela 3	Caracterização da água residuária de suinocultura utilizada no experimento	18
Tabela 4	Valores de K_a para cada sonda	27
Tabela 5	Valores estimados dos coeficientes linear e angular das equações para cada sonda	28
Tabela 6	Distribuição das sondas nas colunas	30
Tabela 7	Resumo da análise de variância para a obtenção dos valores de F para as umidades volumétricas	33
Tabela 8	Resultado do teste de comparação de médias para umidade volumétrica para os métodos: Volumétrico, equação da coluna e TDR 6050 X1	33
Tabela 9	Modelos ajustados para cada coluna e agrupamento dos dados de todas as colunas e seus respectivos coeficientes de correlação (R^2)	34
Tabela 10	Análise de variância do modelo ajustado para correlação entre K_a e θ	35
Tabela 11	Teste de significância do modelo linear ajustado para correlação entre K_a e θ para todas as colunas	35
Tabela 12	Valores da impedância (Z_0) para cada sonda	36
Tabela 13	Caracterização química do solo tratado com ARS.	37
Tabela 14	Análise de variância do modelo ajustado para correlação entre CE_{es} e CE_{tdr}	38
Tabela 15	Teste de significância do modelo linear ajustado para correlação entre CE_{tdr} e β	38
Tabela 16	Teste de comparação dos coeficientes angulares e lineares das retas dos tratamentos de água residuária considerando a condutividade elétrica do solo pelo método da TDR ($S.m^{-1}$) e a umidade volumétrica ($cm^3.cm^{-3}$).	40
Tabela 17	Análise de variância do modelo ajustado para correlação entre CE_{es} e CE_{tdr}	41
Tabela 18	Teste de significância do modelo linear ajustado para correlação entre CE_{es} e CE_{tdr}	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Gabarito de madeira com as hastes de aço inoxidável	10
Figura 2	Estrutura das sondas de TDR	11
Figura 3	Gabarito preenchido com a resina epóxi	12
Figura 4	Sonda de TDR confeccionada	12
Figura 5	Coluna de solo com a distribuição das sondas de TDR	14
Figura 6	Modelo de instalação da TDR para determinação de umidade	14
Figura 7	Esboço para cálculo do volume da coluna	16
Figura 8	Recipiente contendo solo e ARS	17
Figura 9	Ponto de coleta da água residuária de suinocultura no biossistema integrado	18
Figura 10	Gráfico emitido pela TDR Trase 6050 X1 usado na determinação de V_0 , V_1 e V_{inf}	21
Figura 11	Gráfico de controle de qualidade relativo ao coeficiente linear das equações	29
Figura 12	Gráfico de controle de qualidade relativo ao coeficiente angular das equações	29
Figura 13	Gráfico de dispersão da constante dielétrica fornecida pelo equipamento TDR versus umidade pelo método volumétrico, modelo embutido no equipamento TDR e modelo ajustado para colunas	31
Figura 14	Gráfico de dispersão da constante dielétrica fornecida pelo equipamento TDR versus umidade pelo método volumétrico, modelo embutido no equipamento TDR e modelo ajustado para colunas	32
Figura 15	Modelo de regressão entre condutividade elétrica do solo e coeficiente de reflexão β .	38
Figura 16	Correlação entre condutividade elétrica do solo pelo método da TDR e umidade volumétrica do solo	39
Figura 17	Correlação entre condutividade elétrica do solo pelo método do extrato saturado do solo (CE_{es}) e condutividade elétrica do solo determinada por TDR (CE_{TDR}).	41

RESUMO

TÉCNICA DA TDR NA ESTIMATIVA DA UMIDADE E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DE SOLO IRRIGADO COM ÁGUA RESIDUÁRIA DA SUINOCULTURA

A aplicação de águas residuárias de suinocultura (ARS) no solo vem sendo uma alternativa como forma de adubação e reúso de água. Entretanto, atenção especial deve ser dada à quantidade de sais contidos nessas águas, uma vez que aplicações sucessivas podem favorecer o processo de salinização do solo, tornando-se necessário um monitoramento do teor de sais no solo. A reflectometria no domínio do tempo (TDR) possibilita o monitoramento simultâneo e contínuo do teor de água e da condutividade elétrica aparente do solo (CE_a) a fim de viabilizar a determinação indireta da condutividade elétrica da solução do solo, a qual possibilita a estimativa do teor de sais no solo. Porém, há necessidade de obtenção e calibração de um modelo para cada tipo de solo. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi obter um modelo de calibração de umidade volumétrica para um Latossolo Vermelho Distroférico Típico, bem como estudar a viabilidade da técnica na determinação indireta da condutividade elétrica da solução do solo por meio de uma equação empírica para o equipamento TDR Trase 6050X1. A calibração foi realizada em condições de laboratório, utilizando amostras deformadas do solo em estudo, acondicionadas em colunas com volume de 0,0078 m³. As sondas fabricadas artesanalmente da TDR com três hastes e 0,20 m de comprimento foram instaladas verticalmente nas colunas de solo, em um total de cinco sondas por coluna, totalizando 16 colunas. Realizaram-se as pesagens com balança digital e leituras diárias com o equipamento TDR. Para a determinação indireta da condutividade elétrica da solução do solo, foram utilizadas amostras deformadas, as quais foram saturadas com ARS nas taxas de 0, 10, 20, 40, 60 e 80 litros por um volume de 0,0225 m³ de solo. Deixou-se que a ARS evaporasse até que o solo saturado secasse totalmente, peneirado em peneira de 2 mm para formar Terra Fina Seca ao Ar (TFSA). Os volumes de solos secos foram acondicionados em três colunas, caracterizando-se os tratamentos T0, T1, T2, T3, T4 e T5. O mesmo processo ocorreu para a calibração das sondas. Nesta etapa, foram instaladas quatro sondas por coluna totalizando 18 colunas. O modelo empírico para estimativa da umidade volumétrica do solo em estudo apresentou suficiente grau de determinação. Foi possível estabelecer um modelo empírico que relacionou a condutividade elétrica aparente do solo (CE_{TDR}) e a condutividade elétrica do extrato saturado do solo (CE_{es}) para viabilizar o uso da técnica na estimativa da salinidade do solo.

Palavras-Chave: reúso de água, calibração, salinidade do solo, umidade volumétrica.

TIME-DOMAIN REFLECTOMETRY TECHNIQUE ON ESTIMATING HUMIDITY AND ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF A SOIL IRRIGATED WITH SWINE WASTE WATER

ABSTRACT

The swine waste water (SWW) application in soil has become an alternative fertilizer for soil and used as a water reuse. However, special attention must be given to the amount of salt content in such water since succeeding applications can stimulate the saltiness process on soil, which can ask for an indispensable monitoring of salt content in soil. The time-domain reflectometry (TDR) allows for a continuous and simultaneous monitoring of water content and apparent electric conductivity on soil (AEC), in order to make feasible the indirect determination of electric conductivity of soil solution, which can estimate salt content in the soil. Nevertheless, there is a need to obtain and calibrate a model for each type of soil. Thus, this trial aimed at obtaining a volumetric humidity calibration model for a typical Distroferric Red Latosol, as well as studying this technique viability to indirectly determine the electrical conductivity in a soil solution using an empiric equation for the TDR Trase 6050X1 device. Calibration was performed under laboratory conditions, with deformed samples of the studied soil, conditioned in columns, with a 0.0078 m³ volume. TDR hand-made probes, with three 0.20m-long shafts, were vertically installed in the soil columns, five probes per column, totaling 16 columns. The weighing answers were obtained by digital scales and daily readings with the TDR equipment. To indirectly determine soil solution electric conductivity, deformed and saturated samples were used and saturated with SWW at 0, 10, 20, 40, 60, and 80 liters with a soil volume of 0.0225 m³. The SWW was evaporated so that saturated soil got completely dry and sieved in a 2 mm sieve to obtain the air dried fine soil (ADFS). The volumes of dried soils were conditioned in three columns to characterize T0, T1, T2, T3, T4 and T5 treatments. The same procedure was carried out for probes calibration. At that moment, four probes were installed by column, totaling 18 columns. The empirical model to estimate the volumetric soil humidity under study showed an adequate degree of determination. At last, It was possible to establish an empirical model that connected AEC recorded by the TDR equipment and electrical conductivity of saturated soil sample (EC_{ss}), making possible the use of this technique on soil salinity estimation.

Keywords: calibration, soil salinity, volumetric humidity, water reuse.

1 INTRODUÇÃO

O reúso de água na agricultura como fonte de água e nutrientes para as culturas é uma das alternativas para o enfrentamento do problema ambiental gerado pela produção intensiva de suínos.

A aplicação de efluentes da suinocultura no solo é vista como uma forma efetiva de controle da poluição e alternativa na substituição dos adubos minerais. Por outro lado, a mesma pode acarretar problemas ambientais decorrentes da destinação inadequada dos dejetos gerados nas propriedades.

Ao contrário dos fertilizantes minerais, a água residuária de suinocultura possui composição química muito variável, principalmente, em função da alimentação e manejo da água empregada nos criatórios. Enquanto os fertilizantes minerais são formulados para condições específicas de cada cultura e solo, os dejetos de suínos apresentam, simultaneamente, vários nutrientes que se encontram em quantidades desproporcionais.

A aplicação contínua desses dejetos pode acarretar a concentração de sais no solo, podendo ocasionar a sua salinização, desta forma, afeta a germinação e a densidade das culturas, bem como reduz significativamente a produção.

Vários são os fatores que podem levar à salinização do solo: a decomposição dos minerais primários, águas subsuperficiais ricas em sais solúveis, drenagem deficiente, a qual também pode advir de manejo inadequado do solo e principalmente da utilização de águas residuárias de suinocultura. O conhecimento quanto à composição dessas águas é de fundamental importância, uma vez que toda água residuária contém sais, em maior ou menor teor, os quais elevam o potencial de salinização inerente à água.

Portanto, a reciclagem dessas águas, aliada ao manejo inadequado, pode gerar um acúmulo de sais no solo. Desta forma, faz-se necessário o monitoramento da concentração de sais no solo.

Vários são os métodos para obtenção da salinidade do solo, o método tradicional de acordo com a EMBRAPA (1997) é o extrato saturado do solo, o qual é limitado no tempo e no espaço, uma vez que seus resultados representam uma condição referente apenas ao momento e ao volume do solo em que foi realizado, além de ser destrutivo, por necessitar da retirada de amostras de solo. Em condições de campo, a técnica da TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo) vem despertando muito interesse na determinação de forma indireta da condutividade elétrica da solução do solo, devido principalmente à possibilidade de leituras em tempo real, de forma contínua, rápida e automatizada, com o mínimo de distúrbio da estrutura do solo.

A técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) possibilita, com base no tempo de deslocamento de pulsos eletromagnéticos por uma linha de transmissão (sonda) introduzida no solo, composta de hastes de aço de comprimento conhecido, as determinações simultâneas do teor de água e da condutividade elétrica aparente do solo, a

fim de viabilizar a determinação indireta da condutividade elétrica da solução do solo (TOPP, DAVIS & ANNAN, 1980 e DALTON et al., 1984).

No entanto, para utilização do equipamento TDR, é necessário calibrá-lo, já que cada solo apresenta características específicas. A calibração do aparelho, fornecida pelo fabricante, não leva em consideração as características específicas de cada tipo de solo. Além disso, uma das preocupações constantes no uso do equipamento é com as sondas fornecidas pelo fabricante do aparelho, as quais quando danificadas, têm um alto custo para sua substituição. Para solucionar tal problema, várias sondas vêm sendo construídas no Brasil, empregando materiais nacionais (SOUZA et al., 2006), apresentando resultados consideráveis na redução do custo.

Dentro desse contexto, o objetivo desta pesquisa foi obter um modelo de calibração de umidade volumétrica para um solo Latossolo Vermelho Distroférrico Típico, em laboratório, bem como estudar a viabilidade da técnica na determinação indireta da condutividade elétrica da solução do solo por meio de uma equação empírica para o equipamento TDR Trase 6050X1.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Reúso de água na agricultura

A agricultura, no Brasil, consome aproximadamente 70 % do total de água captada dos mananciais (HESPANHOL, 2003). Essa demanda significativa leva a ponderar que as atividades agrícolas devem ser consideradas como prioritárias em termos de reúso de efluentes tratados.

Brega Filho & Mancuso (2003) conceituam o reúso de água como sendo o aproveitamento de águas previamente utilizadas, uma ou mais vezes, em alguma atividade, para que sejam supridas as necessidades de outros usos benéficos, inclusive o original.

O aproveitamento de águas residuárias na fertirrigação de culturas agrícolas tem despertado grande interesse em muitos agricultores, pois permite que a água de boa qualidade seja destinada a usos mais nobres (ANDRADE et al., 2005).

Para Basso (2003), o uso de águas residuárias como fertilizantes orgânicos tem sido realizado porque ela contém uma série de elementos químicos prontamente disponíveis, ou que, após o processo de mineralização, estarão disponíveis e poderão ser absorvidos pelas plantas da mesma forma que aqueles oriundos de fertilizantes minerais industrializados. Porém, ao contrário dos fertilizantes minerais que possuem uma composição mínima definida para cada condição de cultura e/ou solo, a composição das águas residuárias é extremamente desbalanceada em relação aos fertilizantes minerais.

Segundo Barros et al. (2005) e Pereira (2006), as quantidades e a frequência com que águas residuárias podem ser aplicadas ao solo, variam com o tipo de solo, com a natureza e composição dos resíduos, com as condições climáticas e com a espécie vegetal cultivada.

Conforme Metcalf & Eddy (2003), as águas residuárias brutas ou tratadas para reúso agrícola devem ser avaliadas sob os aspectos sodicidade, salinidade, excesso de nutrientes e também sob o aspecto da saúde pública, por exemplo, os agentes patogênicos: (bactérias, cistos de protozoários, ovos de helmintos e vírus) uma vez que acarretam enfermidades.

Ayers & Westcot (1991) ressaltam uma preocupação quanto à qualidade da água de irrigação com níveis de salinidade em termos de condutividade elétrica maiores do que 3dS m^{-1} e sais totais dissolvidos maiores que 2000 mg L^{-1} .

Dependendo das características dos resíduos, a prática da irrigação com águas residuárias por longos períodos pode levar à acumulação de compostos tóxicos, orgânicos e inorgânicos e ao aumento significativo de salinidade e sodicidade, em camadas insaturadas

(HESPANHOL, 2003). A presença de sais no solo reduz a disponibilidade de água para as plantas e pode tornar os solos inadequados ao cultivo (AYERS & WESTCOT, 1991).

De acordo com Freitas et al. (2005), a intensificação da produção de suínos em algumas regiões brasileiras resultou em considerável aumento na produção de águas residuárias, as quais, pela falta de tratamento adequado, se transformaram em uma das maiores fontes poluidoras. No entanto, tais resíduos, ao invés de serem fontes poluidoras, podem ser usados no suprimento hídrico e de nutrientes de solos cultivados.

Diesel, Miranda & Perdomo (2002) descrevem que a água residuária de suinocultura contém matéria orgânica, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio sódio, magnésio, manganês, ferro, zinco, cobre e outros elementos incluídos nas dietas dos animais. Assim, a composição do dejetos de suíno é muito variável, ainda mais no que se refere às águas residuárias produzidas, uma vez que essa também está condicionada à forma de manejo dos dejetos e à quantidade de água incorporada a eles (PEREIRA, 2006).

Conforme Basso (2003) e Barros et al. (2005), aplicações contínuas de águas residuárias de suinocultura poderão ocasionar desequilíbrios de nutrientes no solo e a gravidade do problema dependerá do tempo de aplicação, da composição e da quantidade de dejetos aplicados, além do tipo de solo e da capacidade de extração das plantas.

Portanto, o reúso de águas residuárias na agricultura deve ser condicionado ao tratamento dessas águas, ao planejamento quanto ao tipo de cultivos e à forma de aplicação desta água, além do controle da exposição humana, aspectos econômicos e ambientais (PEREIRA, 2006).

2.2 Solos afetados por sais

De acordo com Barros et al. (2004), os solos afetados por sais são normalmente encontrados em zonas áridas e semi-áridas, onde a evaporação é superior à precipitação. Alguns solos dessas regiões apresentam a drenagem interna deficiente, e juntamente com a excessiva evaporação produz a acumulação de sais solúveis e o incremento do sódio trocável na superfície e/ou na subsuperfície dos solos. Oliveira (2008) ressalta ainda que solos brasileiros com problemas de salinidade possam ocorrer em planícies aluviais, com drenagem deficiente e com lençol freático acima de 120 centímetros.

Outro fator que proporciona problemas ao solo é o manejo inadequado da irrigação. Tal fato pode ser observado nos estudos realizados por Costa et al. (2004) nos solos da bacia do rio Cabugí. Os autores verificaram que os solos irrigados em maiores períodos apresentaram problemas quanto à concentração de sais em relação a setores nunca irrigados.

Os íons mais comuns em solos afetados por sais são os cátions Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , e os ânions Cl^- , SO_4^- , HCO_3^- , CO_3^- , NO_3^- , formando sais como cloretos, sulfatos, nitratos, carbonatos e bicarbonatos, os quais são bastante solúveis (TERRES, 2006).

Sais de elementos alcalinos e alcalino-terrosos tendem a se acumular no solo por ascensão capilar do lençol freático, além da evaporação da água (BLANCO, 1999).

O sódio em solos agrícolas pode aumentar com a adição de efluente e alterar certas características físicas do solo, devido à dispersão de argilas e características químicas, assim, influencia direta ou indiretamente o desenvolvimento das plantas. A dispersão de argilas é uma das causas da redução da porosidade do solo, condutividade hidráulica, taxa de infiltração e da destruição da estrutura do solo (FEIGIN et al., 1991).

Terres (2006) e Paganini (2003) descreveram que condutividade elétrica (Ce) é um parâmetro muito utilizado para medir o nível de salinidade do solo ou da água de irrigação, sendo expressa em decisiemens por metro (dS/m), milimhos por centímetros (mmhos/cm), microsiemens por centímetro ($\mu\text{S/cm}$) ou Siemens por metro (S/m).

Valero (2006) explicou que a condutividade elétrica (CE) de uma solução representa a facilidade que esta tem em transportar corrente elétrica, ou seja, mede a resistência à passagem dos elétrons, a qual está em função da quantidade de solutos iônicos (eletrólitos) presentes na solução.

De acordo com Meurer (2000), os solos podem ser classificados como salinos (altas concentrações de sais solúveis), sódicos (altas concentrações de sódio trocável) e salino-sódico (altas concentrações de sais e de sódio trocável). Para Costa et al. (2004), a salinidade e sodicidade do solo são normalmente expressas pela condutividade elétrica (CE), percentual de sódio trocável (PST) e pH. O percentual de sódio trocável (PST) a partir de análises químicas do solo indica a proporção de sódio adsorvida no complexo de troca de cátions do solo e é determinado pela equação abaixo:

$$PST = \frac{Na}{CTC} * 100 \quad \text{Eq. (01)}$$

Em que:

Na = sódio trocável ou adsorvido;

CTC = capacidade de troca de cátions do solo.

A classificação pode ser feita conforme elaborada pelo Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos, apresentada por SANTOS (2004) como sendo:

- Solo não sódico e não salino: $CE < 4 \text{ dS m}^{-1}$ - $PST < 15 \%$ - $\text{pH} < 8,5$;
- Solo salino: $CE > 4 \text{ dS m}^{-1}$ - $PST > 15 \%$ - $\text{pH} > 8,5$;
- Solo sódico: $CE < 4 \text{ dS m}^{-1}$ - $PST > 15\%$ - $\text{pH} > 8,5$;
- Solo salino-sódico: $CE > 4 \text{ dS m}^{-1}$ - $PST > 15\%$ - $\text{pH} < 8,5$.

Conforme Feigin et al. (1991), são três os principais aspectos relacionados à composição dos efluentes que constituem riscos de salinização e sodificação de solos, quando utilizados como água na agricultura:

- Concentração total de sais na água pode causar aumento da salinidade do solo;
- As concentrações de certos íons tais como Cl^- e Na^+ podem causar, direta ou indiretamente, efeitos tóxicos às plantas, incluindo desequilíbrio nutricional;
- As concentrações de certos íons (principalmente Na^+ e HCO_3^-) podem resultar na deterioração da estrutura do solo e, conseqüentemente, na redução da permeabilidade.

Conforme Santos (2004), os cátions Ca^{+2} e Mg^{+2} predominam na solução do solo e no complexo de troca de cátions do solo. Porém, quando, nesses solos, passa a haver um acúmulo de sais solúveis, geralmente é o Na^+ que predomina na solução do solo e, desta forma, o Na^+ pode passar a ser o cátion predominante no complexo de troca devido ao deslocamento de Ca^{+2} e Mg^{+2} e conseqüente precipitação desses cátions na solução do solo.

De acordo com Ayers & Westcot (1991), a sodicidade refere-se à elevada atividade do íon sódio em relação aos íons cálcio e magnésio. A solução do solo, quando excessivamente sódica, promove a desagregação e dispersão dos minerais de argila que obstruem os poros do solo, reduzem a infiltração e aumentam os riscos de erodibilidade do solo.

A relação de absorção de sódio (RAS) tem sido utilizada na caracterização de solos sódicos e águas para irrigação e é calculada pela concentração de cátions em solução. A RAS é um índice que relaciona as concentrações de Na^+ às concentrações de Ca^{+2} e Mg^{+2} na água de irrigação, em extratos de saturação e extratos aquosos de solos, a qual é calculada a partir da Equação 2, descrita por Paganini (2003).

$$RAS = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^+}{2}}} \quad \text{Eq. (02)}$$

Em que a RAS é expressa em $(\text{meq} \cdot \text{L}^{-1})$ e as concentrações de Na^+ , Ca^{+2} e Mg^{+2} são expressas em $\text{meq} \cdot \text{L}^{-1}$.

2.3 Técnica da reflectometria no domínio do tempo – TDR

A técnica foi desenvolvida, inicialmente, por Fellner-Feldegg, em 1969, e introduzida recentemente no Brasil. A TDR vem obtendo grande destaque no meio agrônomo haja vista possibilitar medidas precisas e diretas. Topp et al. (1980) citam diversas aplicações da técnica de reflectometria de microondas, sendo a mais utilizada, a de determinação do conteúdo de água do solo. Entretanto, Queiroz (2005), Terres (2006), Souza et al. (2006a) e Valero (2006) estudaram a técnica para determinação da condutividade elétrica (Ce) do solo, objetivando a avaliação da salinidade do solo.

A técnica da TDR baseia-se em medir o tempo de deslocamento t em nanossegundos (ns) de uma sequência de pulsos de microondas em uma linha de transmissão (antena) composta de duas ou mais hastes de aço, de comprimento L (cm), introduzidas no solo (TOMMASELLI e BACCHI, 2001). O tempo de percurso está relacionado com a constante dielétrica média do meio no qual a sonda-guia é inserida (QUEIROZ, 2004).

Cada material tem uma constante dielétrica (K) e as constantes variam entre 1 e 80. O ar tem valor mínimo de K igual a 1 e na água tem valor máximo de K igual a 80. Uma mistura de materiais tem uma constante dielétrica aparente (K_a), determinada pela composição dos materiais que varia entre 1 e 80 (SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP., 1998).

A constante dielétrica aparente do complexo de ar-solo-água pode então ser determinada pela equação (NOBORIO, 2001):

$$K = \frac{(ct)^2}{L} \quad \text{Eq. (03)}$$

Em que:

L - comprimento das guias em centímetros;

t – tempo de transito em nanossegundos; e

c – velocidade da luz em centímetros por nanossegundos.

A energia da onda é atenuada em proporção à concentração iônica do meio ao longo das hastes condutoras, a qual serve como base para a medida da condutividade elétrica aparente. Desta forma, ao se conhecer a permissibilidade elétrica de um meio padrão (água deionizada), pôde-se estimar, comparativamente, a condutividade elétrica de um meio desejado, como a solução do solo (SOUZA et al., 2006 (a)).

Souza et al.(2006 (a)) relataram que, para estimar a condutividade elétrica através da técnica da TDR, é necessária a impedância característica da sonda em água destilada.

Segundo Or et al. (2004), pode-se determinar a impedância característica da sonda (Z_0), quando a mesma está envolta por um material dielétrico uniforme, através da Equação 04.

$$Z_0 = Z_u \sqrt{k} \left(\frac{1 + V_1}{1 + 2V_0 - V_1} \right) \quad \text{Eq. (04)}$$

Em que:

Z_0 = Impedância característica da sonda (Ω);

Z_u = Impedância no cabo $\sim 50 \Omega$;

V_0 e V_1 = voltagem relativa;

K = Constante dielétrica (água destilada).

Segundo Zegelin & White (1989), a impedância (Z_0) de uma linha coaxial de transmissão depende exclusivamente da geometria da linha e pode ser estimada pela Equação 05:

$$Z_0 = 60 \ln \left(\frac{2S}{d} \right) \quad \text{Eq. (05)}$$

Em que:

Z_0 = Impedância característica da sonda (Ω);

s = raio do condutor externo, (m);

d = diâmetro do condutor interno, (m).

Segundo Sousa (2006), 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 TDR, na qual 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.

A curva de calibração de Topp et al. (1980) e as curvas de calibração embutidas nos equipamentos para mensurar a umidade não são aplicáveis a todo tipo de solo e as curvas de calibração obtidas em cada solo individualmente tem boa precisão (SILVA & GERVÁSIO, 1999; TOMMASELLI & BACCHI, 2001; VALERO, 2006).

O processo de calibração consiste na coleta de dados do aparelho ou sistema a ser calibrado; da coleta dos valores de referência e da análise da relação entre ambas (CICHOTA, 2003).

Valero (2006) observou um bom desempenho da técnica da TDR na estimativa da umidade e da condutividade elétrica sem gerar alteração no meio amostrado. Sendo possível 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.

A técnica da reflectometria domínio do tempo é a única que tem a capacidade de medir a umidade volumétrica e a condutividade elétrica aparente no mesmo volume de solo (WRAITH & DAS, 1998).

A Tabela 1 apresenta as equações utilizadas para cálculo da condutividade elétrica aparente do solo (MUÑOZ-CARPENA, 2005).

Tabela 1 - Equações utilizadas para calcular a condutividade elétrica aparente do solo

Referência	Equação
Giese e Tieman (1975)	$C_e = \sqrt{\varepsilon_0 / 120\pi L} \left[\frac{V_0}{V_f} - 1 \right]$
Dalton et al. (1984)	$C_e = \sqrt{\varepsilon_0 / 120\pi L} \left[\frac{V_1}{V_2 - V_1} \right]$
Topp et al. (1988)	$C_e = \sqrt{\varepsilon_0 / 120\pi L} \ln \left[\frac{K_1 (V_0 - V_1) V_0 (V_2 - V_1)}{K_2 (V_0 - V_1)^2} \right]$
Yanuka et al. (1988)	$C_e = \sqrt{\varepsilon_0 / 120\pi L} \left[\frac{K_1 * V_f - V_0 (V_1 + V_f)}{V_0 (V_1 - V_f)} \right]$
Zegelin et al. (1989)	$C_e = \sqrt{\varepsilon_0 / 120\pi L} * \frac{V_1}{V_f} \left[\frac{V_0 - V_f}{V_0 - V_1} \right]$
Nadler et al. (1991)	$C_e = \left(\frac{K}{Z_s} \right) f_T$

Fonte: MUÑOZ-CARPENA, (2005).

A condutividade elétrica (C_e) é um parâmetro muito utilizado para medir o nível de salinidade do solo ou da água de irrigação. Pode ser expressa em deciSiemens por metro ($dS.m^{-1}$), milimhos por centímetros ($mmhos.cm^{-1}$), microSiemens por centímetro ($\mu S.cm^{-1}$) ou Siemens por metro ($S.m^{-1}$) (TERRES, 2006; PAGANINI, 2003).

Valero (2006) apresenta como vantagens: a coleta de dados não-destrutivos, facilidade no manuseio e possibilidade de automação, vantagens muito importantes, contra a desvantagem de uma necessidade de calibração e um custo ainda alto do aparelho.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Confeccões das sondas de TDR

Foram confeccionadas oitenta sondas de TDR, com base na metodologia descrita por Souza et al. (2001). Cada sonda foi composta por três hastes de aço inoxidável com 0,30 m de comprimento e 0,033 m de diâmetro. Cabo coaxial RG – 58 de 50Ω , capacitor de cerâmica de 3,9 pF e conector BNC de 50Ω .

Para a montagem das sondas, foi feito um gabarito de madeira a fim de garantir o paralelismo das hastes, a distância de 0,02 m entre elas, bem como facilitar o acabamento final de cada sonda de TDR. Cada haste de aço inoxidável foi colocada no gabarito de madeira, como pode ser observado na Figura 1, de forma que o total de sondas finais no gabarito correspondeu a doze unidades com três hastes cada uma.

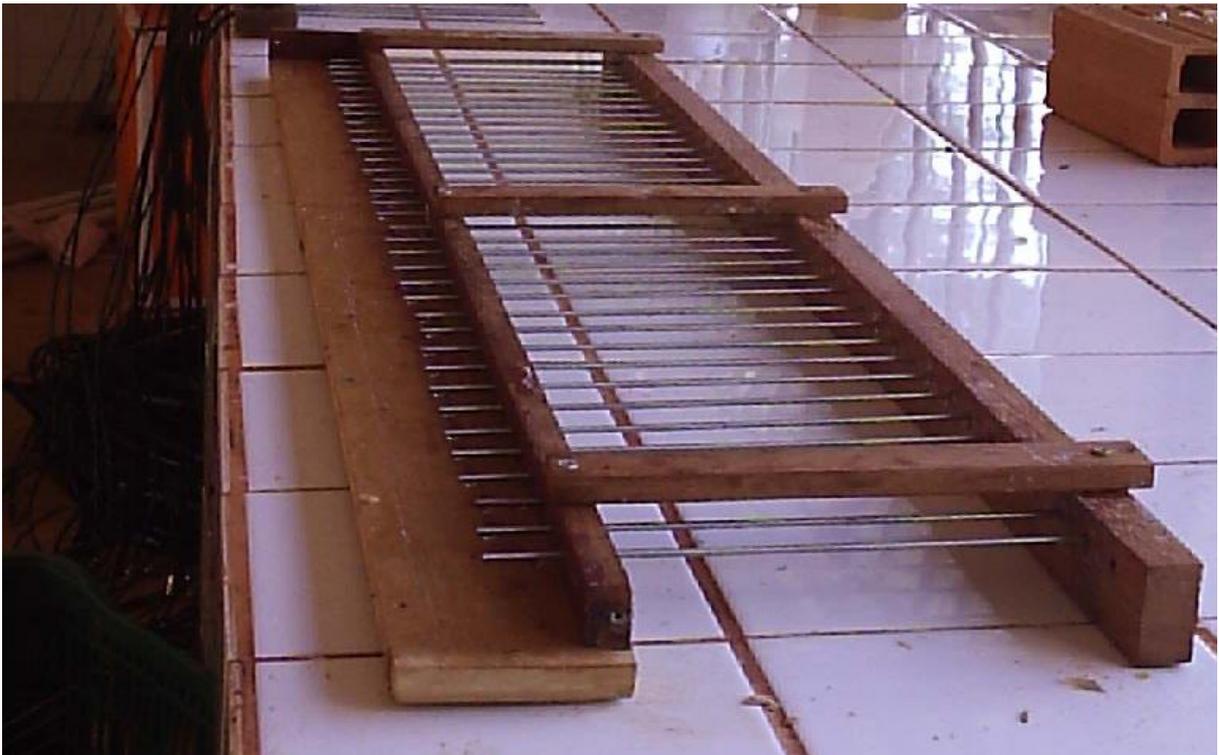


Figura 1 - Gabarito de madeira com as hastes de aço inoxidável.

Em seguida, foi cortado o cabo coaxial com 1,50 m de comprimento cada e em uma das extremidades, foi colocado o conector e, na outra extremidade, foi desencapado e separado o condutor externo em duas partes. Após, foi realizada a soldagem de cada parte nas duas hastes laterais e o condutor interno foi soldado na haste central de cada sonda.

Para uma melhor fixação das hastes ao cabo coaxial, antes da soldagem, as hastes foram limpas com uma solução 1 % de ácido fosfórico.

O capacitor foi soldado em duas hastes, ou seja, lateral e central, sendo uma conectada ao condutor interno e a outra conectada ao condutor externo. A função desse é a de alterar a impedância pontual na guia condutora e marcar o início da distância percorrida pela onda eletromagnética, desta forma, formou-se a estrutura da sonda de TDR, como pode ser observado na Figura 2.



Figura 2 - Estrutura das sondas de TDR.

Terminada a primeira etapa da confecção, passou-se para a etapa final montando-se o restante do gabarito na parte que foi soldada. Todos os encaixes foram isolados com massa de modelagem e para facilitar a retirada das sondas de TDR, foi passada uma solução desmoldante no gabarito. Feito isto, foi preparada a resina de epóxi com catalisador para que a resina pudesse endurecer e colocou-se na parte fechada do gabarito. Assim, promoveu-se a sustentação da estrutura das sondas conforme a Figura 3. Depois de vinte e quatro horas, foi retirado o gabarito e cerrada cada sonda para efetuar a divisão, com cuidado para não danificá-la. Em seguida, para obter um melhor acabamento de cada sonda de TDR, foram lixadas as laterais da resina, obtendo-se o produto final como se verifica na Figura 4.



Figura 3 - Gabarito preenchido com a resina epoxi.



Figura 4 - Sonda de TDR confeccionada.

As sondas confeccionadas primeiramente foram testadas em água no equipamento *Trase System 6050X1*, o qual permite fazer medições, gravar as leituras e gráficos e transferi-los para o computador, com dados que podem ser armazenados ou impressos,

conforme mostra o manual fornecido pelo fabricante (SOIL MOISTURE EQUIPMENT CORPORATION, 1998). Para gerenciar a comunicação entre o equipamento TDR e o computador, foi usado o programa denominado “INFOSYS-TDR” (TAVARES, 2006).

3.2 Calibração das sondas de TDR

Para verificar a variabilidade entre as sondas e a correção das leituras da constante dielétrica aparente (K_a), foram utilizados recipientes de segmentos de tubo de PVC (0,30 m de altura e 0,195 m de diâmetro interno) com solo em seu interior que consistiam em colunas de solo. Para isto, foi coletado solo do Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola – NEEA, localizado no município de Cascavel-PR, classificado como Latossolo Vermelho distroférico típico (EMBRAPA, 2006), o qual deixou-se secar ao ar, sendo posteriormente passado em peneira de dois milímetros, constituindo terra fina seca ao ar (TFSA).

Cada coluna de solo foi montada com uma altura de solo suficiente para instalar as guias de sonda no sentido vertical da coluna. Na parte inferior de cada segmento do tubo de PVC, colocou-se uma tela de malha fina, para evitarem-se perdas de solo e também permitir a passagem de água.

Dessa forma, foram montadas dezesseis colunas de solo deformado com 0,25 m em média de altura de solo e 0,20 m de diâmetro, sendo o conjunto previamente pesado. A colocação do solo dentro das colunas foi feita a uma altura constante, logo acima da abertura superior da coluna, em quantidade conhecida e constante. Após a colocação de cada quantidade, a coluna era batida sobre uma base de borracha por três vezes para que ocorresse o assentamento do solo dentro da coluna e se evitasse a formação de espaços vazios, em seguida, cada coluna foi novamente pesada.

Durante a montagem das colunas, foram retiradas amostras de solo para mensurar o teor de água no solo pelo método gravimétrico, de acordo com a EMBRAPA (1997).

Após a montagem das colunas, foram colocados 2/3 de água da altura da coluna em um recipiente, durante 48 horas para que chegassem à saturação. Depois de saturadas as colunas, foram instaladas cinco sondas, verticalmente, em cada coluna de solo, como pode ser observado na Figura 5 e, imediatamente, feitas as primeiras leituras da constante dielétrica aparente (K_a). Posteriormente, as colunas foram pesadas para a obtenção da massa total, utilizando-se balança de precisão e o equipamento de TDR da marca *Trase System 6050X1*, conforme verifica-se na Figura 6. As colunas de solo foram colocadas em uma bancada e mantidas com a superfície do solo exposta, para permitir perda de água por evaporação.



Figura 5 - Coluna de solo com a distribuição das sondas de TDR.

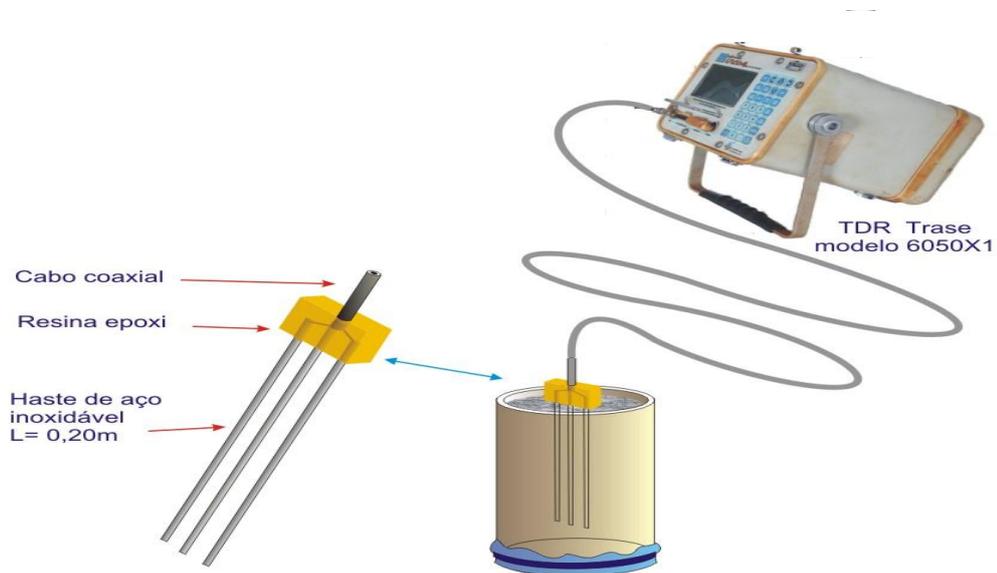


Figura 6 – Modelo de instalação da TDR para determinação de umidade.

Diariamente, foram feitas as leituras dos valores da constante dielétrica aparente do meio, da umidade com base em massa, obtidos a partir da medida da massa do conjunto com uma balança de precisão e da umidade com base em volume. Esse processo foi repetido durante um período de 20 dias e um ciclo de secagem do material. Posteriormente, foram retiradas as sondas das colunas e coletaram-se amostras de solo de cada um deles no perfil de 0-0,25 m para a determinação da umidade pelo método gravimétrico (EMBRAPA, 1997).

A partir dos valores de umidade com base em massa e em volume, assim como dos valores de K_a , foram ajustadas as curvas de umidade, em função da constante dielétrica, por meio de análise de regressão.

Desta forma, foi analisado o comportamento característico para cada sonda. De acordo com Serrarens et al. (2000), independente do meio, pode-se ajustar uma curva de

calibração para cada uma. Ou ainda, ser avaliada a possibilidade de se usar uma curva única de calibração que descrevesse adequadamente a relação de umidade e constante dielétrica aparente do solo utilizado.

3.3 Cálculo da umidade volumétrica

A umidade volumétrica, tomada a cada leitura, foi obtida por gravimetria, a partir da Equação 06, apresentada por REICHARDT & TIMM (2004).

$$\theta = u \times d_s \quad \text{Eq. (06)}$$

Em que:

θ : Umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$);

u : é a umidade à base de peso ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$);

d_s : a densidade do solo ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$).

A umidade à base de peso (u) foi obtida a partir da Equação 7, apresentada por REICHARDT & TIMM (2004).

$$u = \frac{m_u - m_s}{m_s} \quad \text{Eq. (07)}$$

Em que:

u : umidade à base de peso ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$);

m_u : massa do solo úmido (g);

m_s : massa do solo seco (g).

A densidade do solo foi obtida a partir da Equação 8, utilizando-se a metodologia do anel volumétrico (Figura 7) (EMBRAPA, 1997).

$$d_s = \frac{m_s}{V_c} \quad \text{Eq. (08)}$$

Em que:

d_s a densidade do solo ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$);

m_s a massa do solo seco (g); e

V_c o volume do cilindro (cm^3).

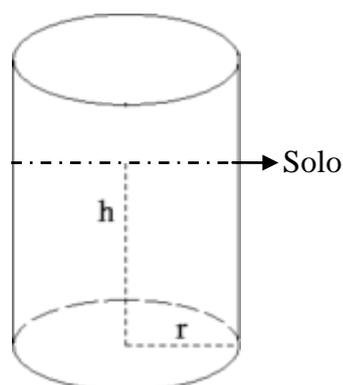


Figura 7 - Esboço para cálculo do volume da coluna

3.4 Instalação do experimento

O experimento foi instalado no laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), *Campus* de Cascavel.

O solo utilizado na instalação do experimento foi o mesmo usado na calibração das sondas, o qual é classificado como Latossolo Vermelho Distroférico típico (EMBRAPA, 2006) e coletado a uma profundidade de 0,2 m.

O solo foi deixado secar à sombra para que ocorresse a secagem natural. Em seguida, foi passado em peneira de dois milímetros para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

As análises química e granulométrica do solo podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2 Resultado das análises química e granulométrica do solo da área experimental

Parâmetros					
Profundidade	Areia %	Silte %	Argila %		
0-20 cm	5,90	14,62	79,48		
Parâmetros					
Ph CaCl ₂	MO g dm ³	V %	CE dS m ⁻¹	AL cmol _c dm ³	
4,40	19,23	23,37	0,518	1,42	
Parâmetros					
Al + H	K	Ca	Mg cmol _c dm ³	SB	CTC
8,36	0,19	1,58	0,78	2,55	10,91
Parâmetros					
Na	P	Cu	Fe mg dm ⁻³	Mn	Zn
1	4,67	10,43	36,07	37,17	0,82

Extrator Melich: K – P – Fe – Mn – Cu – Zn ; Extrator KCl : Ca – Mg – Al. Análise granulométrica: Método do densímetro de Bouyoucos.

Quantificou-se o volume de solo (TFSA) para compor três recipientes (repetições) de segmentos de tubo de PVC com volume de $0,0075 \text{ m}^3$ cada (0,25 m de altura e 0,195 m de diâmetro interno), totalizando $0,0225 \text{ m}^3$ de volume de solo, o qual foi acondicionado em recipiente forrado com lona plástica, saturou-se cada recipiente contendo solo (Figura 8) com diferentes volumes de água residuária de suinocultura (ARS), ou seja, 10, 20, 40, 60 e 80 litros. Deixou-se que a ARS evaporasse com o tempo até que o solo saturado secasse totalmente.



Figura 8 - Recipiente contendo solo e ARS.

A água residuária de suinocultura foi utilizada em razão da alta condutividade elétrica apresentada e, conseqüentemente, das altas taxas de sais.

A ARS utilizada na saturação do solo foi coletada no distrito de Três Bocas, município de Toledo-Paraná, em uma propriedade rural que dispõe de um Biossistema Integrado no tratamento de dejetos. A água residuária coletada foi tratada em um biodigestor seguido de um tanque de sedimentação e lagoa de estabilização, sendo, na tubulação de saída desta, o ponto de coleta, como pode ser observado na Figura 09.

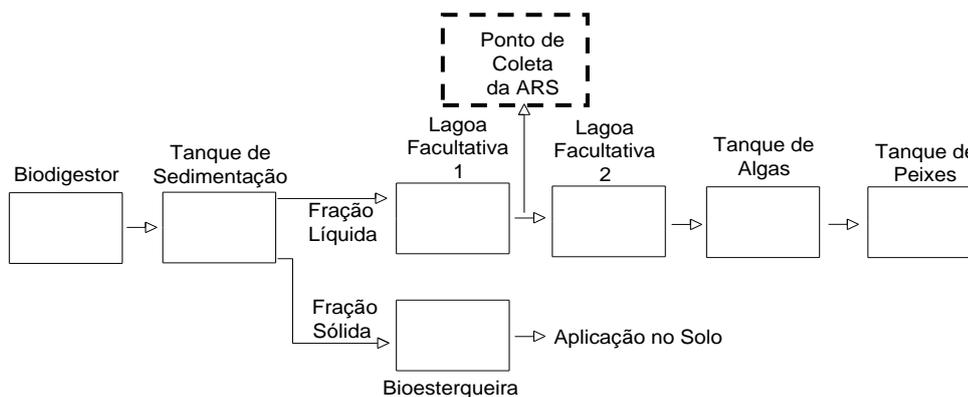


Figura 9 - Ponto de coleta da água residuária de suinocultura no biosistema integrado.

Na Tabela 3, é apresentada caracterização da água residuária de suinocultura (ARS) de acordo com a metodologia de APHA, AWWA & WEF (1998).

Tabela 3 - Caracterização da água residuária de suinocultura utilizada no experimento

Parâmetros	Média
pH (CaCl ₂)	7,73
Condutividade elétrica (dS m ⁻¹)	4,98
Turbidez (NTU)	459,33
DBO (mg L ⁻¹)	671,04
DQO (mg L ⁻¹)	1444,07
Fósforo total (mg L ⁻¹)	92,19
Orto fosfato solúvel (mg L ⁻¹)	96,86
Potássio (mg L ⁻¹)	543,33
Sódio (mg L ⁻¹)	18,20
Cálcio (mg L ⁻¹)	50,97
Magnésio (mg L ⁻¹)	23,77
Cobre (mg L ⁻¹)	0,20
Zinco (mg L ⁻¹)	0,17
RAS (meq L ⁻¹)	0,53

As taxas de ARS foram estipuladas levando-se em consideração a tolerância das plantas em relação à salinidade do solo de acordo AYERS & WESTCOT (1991). Para os autores, quando os valores de condutividade elétrica (CE) estão acima de 10 dS m⁻¹, o solo torna-se sem uso e nenhuma cultura pode tolerar taxa maior que essa. Os autores ainda ressaltam que, para a água de irrigação com restrição severa de uso, a CE é maior do que 3 dS.m⁻¹ ou a quantidade de sais totais dissolvidos é maior de 2000 mg l⁻¹. Segundo Paganini (2003), os valores da condutividade elétrica podem ser convertidos para mg l⁻¹ de sais dissolvidos totais (TSD) no líquido, multiplicando-se a condutividade elétrica da solução pelo valor de 640, conforme a Equação 9:

$$\bullet \quad (\text{TSD (mg.l}^{-1}\text{)}) = \text{dS m}^{-1} \times 640 \quad (09)$$

Supondo um solo impróprio para o uso, o total de sais dissolvidos é de 6400 mg l⁻¹. Como o volume total de cada coluna de solo compreendia 7,5 litros, cada uma teria que receber 48000 mg de sais.

Por conseguinte, ao se considerar também que a ARS utilizada na saturação continha 4,98 dS m⁻¹ e utilizando-se a Equação 08 acima, foram obtidos 3187,2 mg l⁻¹ de sais dissolvidos totais na ARS. Portanto, o volume de ARS para suprir a quantidade de sais necessária em cada coluna seria de 15 litros.

Como foram realizadas três colunas de repetições, o volume de ARS totalizou 45 litros, assim, optou-se pelo estudo de volumes menores do que o obtido bem como por pesquisar volumes maiores do que esse. Logo, os tratamentos foram:

- Tratamento 1 (T1) = 0 de ARS (Testemunha);
- Tratamento 2 (T2) = 10 litros de ARS;
- Tratamento 3 (T3) = 20 litros de ARS;
- Tratamento 4 (T4) = 40 litros de ARS;
- Tratamento 5 (T5) = 60 litros de ARS;
- Tratamento 6 (T6) = 80 litros de ARS.

Diariamente, os recipientes com o volume total de solo eram colocados ao sol para acelerar o processo de evaporação da ARS e, à noite, eram deixados em ambientes fechados. Conforme o solo de cada volume de ARS ficasse totalmente seco, esse era passado em peneira de dois milímetros, obtendo-se novamente TFSA.

Cada recipiente de TFSA, saturado com os diferentes tratamentos, foi colocado nos segmentos de tubo de PVC para a formação de colunas de solo, conforme o procedimento realizado na calibração das sondas de TDR, descrito anteriormente. Houve apenas uma alteração, a tela de malha fina, colocada na extremidade inferior do tubo, foi substituída por uma conexão de PVC do tipo CAP com o intuito de isolar e não permitir a drenagem de água por percolação, a fim de evitar a lixiviação de sais. Antes da montagem das colunas, os solos que receberam os diferentes tratamentos foram analisados quimicamente.

Após a montagem das colunas de solo e a instalação das sondas de TDR, as colunas foram saturadas com água deionizada até a formação de uma pequena lâmina na superfície do solo.

Diariamente foram feitas leituras dos dados com o equipamento TDR (*Trase System 6050X1*) e descarregadas no computador com o auxílio do programa denominado "INFOSYS-TDR" (TAVARES, 2006). O referido procedimento foi realizado durante o ciclo de secagem do material.

Para estimar a condutividade elétrica aparente, foi utilizada a impedância da sonda (Z_0 , em Ω), a qual foi obtida a partir da Equação 10:

$$Z_0 = Z_u \sqrt{k} \left(\frac{1 + V_1}{1 + 2V_0 - V_1} \right) \quad \text{Eq. (10)}$$

Em que:

Z_0 = Impedância característica da sonda (Ω);

Z_u = Impedância no cabo $\sim 50 \Omega$;

V_0 e V_1 = voltagem relativa (Figura 10)

K = Constante dielétrica (água destilada)

De posse dos dados e gráficos gerados pelo equipamento TDR e a impedância das sondas, foram estimadas a condutividade elétrica do volume de cada solo foi estimada a partir da Equação 11 de Giese & Tiemann (1975).

$$CE = \frac{Z_0}{120\pi Z_u L} \left(\frac{2V_0}{V_{inf}} - 1 \right) \quad \text{Eq. (11)}$$

Em que:

L = comprimento da sonda, m;

Z_0 = Impedância característica da sonda. (obtida em água destilada, Souza et al., 2004);

Z_u = Impedância no cabo $\sim 50 \Omega$;

V_0 e V_{inf} = voltagem relativa (Figura 10).

Na Figura 10, demonstra-se como são determinados V_0 , V_1 e V_{inf} , no gráfico formado através dos dados emitidos pelo equipamento TDR.

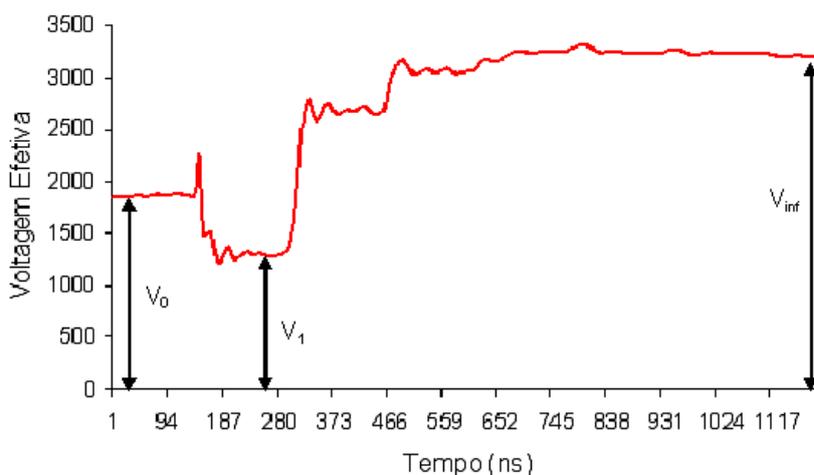


Figura 10 Gráfico emitido pela TDR Trase 6050 X1 usado na determinação de V_0 , V_1 e V_{inf}

3.5 Análises estatísticas

Para realização das análises estatísticas, foram utilizados os programas *Minitab* e *Sisvar* 4.6.

Para padronização das sondas, utilizou-se a ferramenta estatística de controle estatístico de qualidade de *Shewhart* para medidas individuais, disponível no programa *Minitab*.

O controle estatístico de qualidade de *Shewhart* leva em consideração estatísticas como a média amostral, o desvio padrão amostral, a mediana amostral, dentre outras. Um gráfico de controle tipo *Shewhart* usualmente contém uma linha central paralela à abscissa. A altura da linha central (*LC*) é dada pelo valor alvo do processo.

A linha central reflete o nível de operação do processo. E o valor pode, por exemplo, ser um valor nominal exigido por lei, um padrão ou especificações de produção. Pode ser também baseado na experiência passada do processo ou um valor estimado tomado de um processo sob condições sem perturbações.

O limite superior de controle (*LSC*) e o limite inferior de controle (*LIC*) definem os valores - máximo e mínimo - de uma variável. Esses valores são estabelecidos a três desvios-padrões. Assim, no estado de estabilidade, a probabilidade de um ponto sair dos limites de controle torna-se muito pequena (MONTGOMERY, 2004).

Há muitas situações em que o tamanho da amostra para monitoramento do processo ($n=1$), isto é, a amostra consiste de uma unidade. Em tais situações, o gráfico de

controle estatístico de qualidade para unidades individuais é útil. Seus limites são determinados por (MONTGOMERY, 2004).

$$LSC = \bar{x} + 3 \cdot \frac{\overline{MR}}{d_2}$$

$$LC = \bar{x}$$

$$LIC = \bar{x} - 3 \cdot \frac{\overline{MR}}{d_2}$$

Em que:

$$MR_i = |x_i - \bar{x}_{i-1}|, \quad \text{em que } n = 2, \quad d_2 = 1,128$$

Análise estatística da calibração das sondas foi realizada pela ANOVA, Teste de Tukey (nível 5 % de significância), utilizando o programa *Sisvar* 4.6. Os modelos para os dados foram gerados com o auxílio do programa *Minitab* 15 e foi construído um modelo para cada coluna e um único modelo para os dados das 16 colunas.

Com o auxílio do programa *Excel*, foram realizadas as análises descritivas para cada tratamento e, posteriormente, com a utilização do programa *Minitab*, foram realizadas as regressões, a partir dos dados gerados pelo *Excel* e *Minitab*, foram comparados os modelos de regressão entre os tratamentos (T1, T2, T3, T4, T5 e T6).

3.5.1 Comparação entre duas retas

Seja Y uma variável dependente, X a variável independente e que ambas as variáveis estão associadas a duas populações.

Assim, para a População 1, o modelo de regressão linear simples é definido a partir da Equação 12:

$$Y = \beta_{01} + \beta_{11} X + \varepsilon_1 \quad \text{Eq. (12)}$$

Com as suposições em que:

Os erros são aleatórios, independentes e identicamente distribuídos com média zero e variância σ_1^2 , isto é:

$$\varepsilon_1 \sim \text{IDN} (0, \sigma_1^2) \text{ e que } \varepsilon_{1j}, \varepsilon_{1k} \text{ são não correlacionadas, } j \neq k.$$

Para a População 2, o modelo de regressão linear simples é definido a partir da Equação 13.

$$Y = \beta_{02} + \beta_{12} X + \varepsilon_2 \quad \text{Eq. (13)}$$

Com as suposições em que:

Os erros são aleatórios, independentes e identicamente distribuídos com média zero e variância σ_2^2 , isto é:

$\varepsilon_2 \sim \text{IDN}(0, \sigma_2^2)$ e que $\varepsilon_{2j}, \varepsilon_{2k}$ são não correlacionadas, $j \neq k$.

O interesse é em comparar se o valor médio de Y associado a cada valor particular de X é o mesmo para as duas populações, ou seja, comparar \hat{Y}_1 e \hat{Y}_2 para um $X = x_0$ específico, seguindo os seguintes passos:

- 1° - Teste de igualdade das variâncias;
- 2° - Teste de paralelismo (comparação de coeficientes angulares);e
- 3° - Comparação dos interceptos.

3.5.1.1 Teste da igualdade das variâncias

Para realizar a comparação das duas retas, o primeiro passo consiste em testar a igualdade das variâncias das duas populações:

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

versus

$$H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2.$$

Sob H_0 , a estatística F_1 definida na Equação 14 tem distribuição F-Snedecor, onde $n_1 - 2$ e $n_2 - 2$ graus de liberdade.

$$F_1 = \frac{\text{Max}\{S_1^2, S_2^2\}}{\text{Min}\{S_1^2, S_2^2\}} \sim F(\max\{n_1 - 2; n_2 - 2\}, \min\{n_1 - 2; n_2 - 2\}) \quad \text{Eq. (14)}$$

Em que:

S_1^2 : QME da reta ajustada Y_1 ;e

S_2^2 : QME da reta ajustada Y_2 .

- Regra de decisão:

Rejeita-se H_0 ao nível de 5% de significância se $F_1 \geq F_c$, em que, $F(n_1 - 2; n_2 - 2) = F_c$ é o ponto crítico da tabela F-Snedecor com $n_1 - 2$ e $n_2 - 2$ graus de liberdade no numerador e denominador respectivamente ao nível de 5% de significância.

- Se rejeitarmos H_0 , o problema recai em um caso mais complicado, que não será discutido e a comparação é concluída.
- Se não rejeitarmos H_0 , obtém-se o estimador combinando **do (sair)** σ^2 comum a partir da Equação 15:

$$\hat{\sigma}^2 = S^2 = \frac{(n_1 - 2)S_1^2 + (n_2 - 2)S_2^2}{n_1 + n_2 - 4} \quad \text{Eq. (15)}$$

O passo seguinte é testar o Paralelismo das duas retas, isto é, se $\hat{\beta}_{11}$ e $\hat{\beta}_{12}$ são iguais.

3.5.1.2 Teste de paralelismo (Comparação de coeficientes angulares)

A hipótese apropriada para testar o *Paralelismo* das duas retas é testar as igualdades dos coeficientes angulares, isto é:

$$H_0: \hat{\beta}_{11} = \hat{\beta}_{12}$$

versus

$$H_1: \hat{\beta}_{11} \neq \hat{\beta}_{12}$$

Como $\hat{\beta}_{11}$ e $\hat{\beta}_{12}$ têm distribuição normal e são variáveis independentes, a variância estimada da diferença de $\hat{\beta}_{11} - \hat{\beta}_{12}$ pode ser obtida a partir da Equação 16.

$$\text{Var}(\hat{\beta}_{11} - \hat{\beta}_{12}) = S^2 \left[\frac{1}{(n_1 - 1)S_{x1}^2} + \frac{1}{(n_2 - 1)S_{x2}^2} \right] \quad \text{Eq. (16)}$$

Em que:

S^2 : é obtida da Equação 15;

S_{x1}^2 : amostra de X para a população 1; e

S_{x2}^2 : amostra de X para a População 2.

Sob H_0 , a estatística T_1 definida na Equação 17 tem distribuição t-Student com $n_1 + n_2 - 4$.

$$T_1 = \frac{\hat{\beta}_{11} - \hat{\beta}_{12}}{[\text{Var}(\hat{\beta}_{11} - \hat{\beta}_{12})]^{1/2}} \sim t(n_1 + n_2 - 4) \quad \text{Eq. (17)}$$

- Regra de decisão:
 - Rejeita-se H_0 ao nível de 5% de significância se $|T_1| \geq t_c$, em que, $t(n_1 + n_2 - 4) = t_c$, é o valor crítico da tabela t-Student bi caudal com $n_1 + n_2 - 4$ graus de liberdade e nível de 5% de significância.
 - Caso H_0 seja rejeitado, concluí-se que as inclinações são diferentes, e, por tanto as retas são diferentes ao nível de 5% de significância, conseqüentemente não existe paralelismo entre as retas e o processo de comparação das retas é dado por encerrado.

Quando não se rejeita H_0 , as retas de regressão tornam-se:

- $\hat{Y}_1 = \beta_{01} + \beta_1 X$; e
- $\hat{Y}_2 = \beta_{02} + \beta_2 X$.

Isto é, um único coeficiente angular β_1 .

Um estimador de β_1 é dado pela Equação 18, que tem a forma:

$$\hat{\beta}_1 = \frac{(n_1 - 1)S_{x1}^2 \hat{\beta}_{11} + (n_2 - 1)S_{x2}^2 \hat{\beta}_{12}}{(n_1 - 1)S_{x1}^2 + (n_2 - 1)S_{x2}^2} \quad \text{Eq. (18)}$$

Se as retas são paralelas, para verificar se as retas são *Coincidentes* deve-se verificar a seguir se os interceptos β_{01} e β_{02} são iguais.

3.5.1.3 Comparação dos interceptos

A hipótese apropriada para comparar a igualdade dos interceptos, isto é:

$$H_0: \hat{\beta}_{01} = \hat{\beta}_{02}$$

versus

$$H_1: \hat{\beta}_{01} \neq \hat{\beta}_{02}$$

Sob H_0 , a estatística do teste T_2 , definida na Equação 19, tem distribuição t-Student com $n_1 + n_2 - 3$ graus de liberdade.

$$T_2 = \frac{\hat{\beta}_{01} - \hat{\beta}_{02}}{[Var(\hat{\beta}_{01} - \hat{\beta}_{02})]^{1/2}} \sim t(n_1 + n_2 - 3) \quad \text{Eq. (19)}$$

Em que, $Var(\hat{\beta}_{01} - \hat{\beta}_{02})$, é definida na Equação 20:

$$Var(\hat{\beta}_{01} - \hat{\beta}_{02}) = S^2 \left[\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} + \frac{\bar{X}_1^2}{(n_1 - 1)S_{x1}^2} + \frac{\bar{X}_2^2}{(n_2 - 1)S_{x2}^2} \right]. \quad \text{Eq. (20)}$$

- Regra de decisão:
 - Rejeita-se H_0 ao nível de 5% de significância se $|T_2| \geq t_c$, em que, $t(n_1 + n_2 - 3) = t_c$ é o valor crítico da tabela t-Student bicaudal com $n_1 + n_2 - 3$ graus de liberdade ao nível de 5% de significância.
 - Caso H_0 seja rejeitado, conclui-se que: os interceptos β_{01} e β_{02} são diferentes, portanto, as retas são diferentes ao nível de 5% de significância, consequentemente as retas não são coincidentes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise das sondas

Na Tabela 04, é apresentado o valor médio das leituras da constante dielétrica aparente (Ka) para cada sonda imersa em água, como teste inicial.

Tabela 04 Valores de Ka para cada sonda

Sonda	Ka	Sonda	Ka	Sonda	Ka	Sonda	Ka
Sonda 2	74,7	Sonda 31	75,3	Sonda 54	76,8	Sonda 77	73,0
Sonda 3	74,2	Sonda 32	71,7	Sonda 55	78,0	Sonda 78	75,8
Sonda 5	76,5	Sonda 34	73,4	Sonda 56	75,7	Sonda 79	77,5
Sonda 6	76,7	Sonda 35	78,0	Sonda 57	74,3	Sonda 80	75,8
Sonda 8	75,5	Sonda 36	73,8	Sonda 58	75,5	Sonda 81	74,2
Sonda 9	76,0	Sonda 38	78,2	Sonda 59	76,0	Sonda 87	74,2
Sonda 12	76,2	Sonda 39	77,7	Sonda 60	72,4	Sonda 88	74,1
Sonda 13	77,1	Sonda 40	75,8	Sonda 61	78,2	Sonda 89	73,6
Sonda 14	73,4	Sonda 41	77,7	Sonda 63	72,4	Sonda 90	73,6
Sonda 17	72,0	Sonda 42	77,7	Sonda 64	74,0	Sonda 91	75,5
Sonda 19	77,5	Sonda 43	75,6	Sonda 65	72,3	Sonda 92	78,7
Sonda 20	76,9	Sonda 44	70,9	Sonda 66	76,4	Sonda 93	76,7
Sonda 21	75,9	Sonda 45	76,1	Sonda 69	79,7	Sonda 94	75,2
Sonda 22	73,6	Sonda 46	76,2	Sonda 70	76,2	Sonda 95	78,4
Sonda 23	74,9	Sonda 47	76,2	Sonda 71	73,0	Sonda 96	75,5
Sonda 24	75,3	Sonda 48	78,6	Sonda 72	76,0	Sonda 4	75,7
Sonda 25	74,6	Sonda 50	78,6	Sonda 73	77,3	Sonda 10	74,5
Sonda 26	73,1	Sonda 51	76,8	Sonda 74	76,2	Sonda 11	77,0
Sonda 28	75,2	Sonda 52	77,9	Sonda 75	75,7	Sonda 16	77,7
Sonda 29	73,6	Sonda 53	77,8	Sonda 76	77,3	Sonda 49	75,2
Média							75,6
C.V.(%)							2,49
S							1,88

C.V.: Coeficiente de Variação; S: Desvio Padrão

Observa-se na Tabela 04 que o coeficiente de variação (C.V) da constante dielétrica aparente (Ka) em água para as sondas construídas foi classificado como baixo, visto que o resultado foi abaixo de 10%, representando dados homogêneos (PIMENTEL GOMES, 2000). Os dados observados no presente estudo corroboram com os dados verificados por Villwock (2003), o qual obteve valor médio de Ka igual a 74,5 e coeficiente de variação de 2,61%, em sondas construídas artesanalmente.

De acordo com Mastrorilli et al. (1998), a constante dielétrica aparente da água atinge valor próximo de 80, dado que concorda com os valores observados no presente estudo.

4.2 Padronização das sondas

Na Tabela 05, são apresentados os valores dos coeficientes \underline{a} (linear) e \underline{b} (angular), obtidos a partir da regressão linear ($y = a + bx$) com 26 leituras realizadas para cada sonda, os quais foram utilizados para padronização das sondas construídas.

Tabela 05 Valores estimados dos coeficientes linear e angular das equações para cada sonda.

Observação	Sonda	Coef. \underline{a}	Coef. \underline{b}	Observação	Sonda	Coef. \underline{a}	Coef. \underline{B}
1	2	1,02	20,241	41	54	1,0362	16,067
2	3	1,0216	18,095	42	55	0,9975	14,343
3	5	1,0094	18,285	43	56	0,9295	15,643
4	6	1,0804	16,078	44	57	0,9763	16,64
5	8	1,0542	17,204	45	58	1,0658	15,783
6	9	1,2182	16,996	46	59	1,0318	17,442
7	12	1,0137	19,587	47	60	1,1139	16,884
8	13	1,0399	19,157	48	61	1,125	16,788
9	14	1,0615	19,392	49	63	1,1075	16,856
10	17	0,9944	19,147	50	64	1,1307	16,234
11	19	1,0905	19,263	51	65	1,0706	18,578
12	20	1,0493	19,59	52	66	1,0507	22,338
13	21	0,9906	19,196	53	69	1,0554	20,027
14	22	1,092	19,061	54	70	1,0874	17,742
15	23	1,0959	21,628	55	71	1,0974	17,994
16	24	1,5213	4,4922	56	72	1,1084	16,777
17	25	1,4282	8,1549	57	73	1,1349	16,072
18	26	1,6359	15,946	58	74	1,1243	16,404
19	28	1,5402	7,7642	59	75	1,1463	15,772
20	29	1,3355	6,8906	60	76	1,0953	17,225
21	31	1,0197	22,875	61	77	1,1639	16,655
22	32	1,1343	19,745	62	78	1,1522	16,523
23	34	1,0614	18,196	63	79	1,109	15,605
24	35	0,9908	21,342	64	80	1,1652	17,334
25	36	1,0155	20,251	65	81	1,0946	15,624
26	38	1,072	19,165	66	87	1,0616	18,441
27	39	1,1003	16,946	67	88	1,0859	21,115
28	40	1,0957	17,343	68	89	1,0849	17,116
29	41	0,9937	16,385	69	90	1,0848	17,391
30	42	0,9998	19,154	70	91	1,1399	16,613
31	48	0,8815	20,022	71	92	1,049	18,497
32	50	1,0761	20,904	72	93	1,0841	19,851
33	51	0,9447	21,479	73	94	1,0813	19,917
34	52	0,9587	19,317	74	95	1,0576	20,522
35	53	0,9306	19,746	75	96	1,1202	21,336
36	43	1,1415	20,727	76	4	1,3212	21,223
37	44	1,0882	20,592	77	10	1,1392	19,887
38	45	1,0692	19,621	78	11	1,1152	19,183
39	46	1,0401	18,588	79	16	1,1046	15,73
40	47	1,0315	20,836	80	49	0,9668	19,165

A partir dos dados apresentados na Tabela 05, foram realizados testes estatísticos de controle estatístico de qualidade com auxílio do programa *Minitab*.

Nas Figuras 11 e 12 são apresentados os gráficos de controle estatístico de qualidade de Shewhart para medidas individuais, obtidos, pelos valores dos coeficientes linear (a) e angular (b) das equações de cada sonda construída.

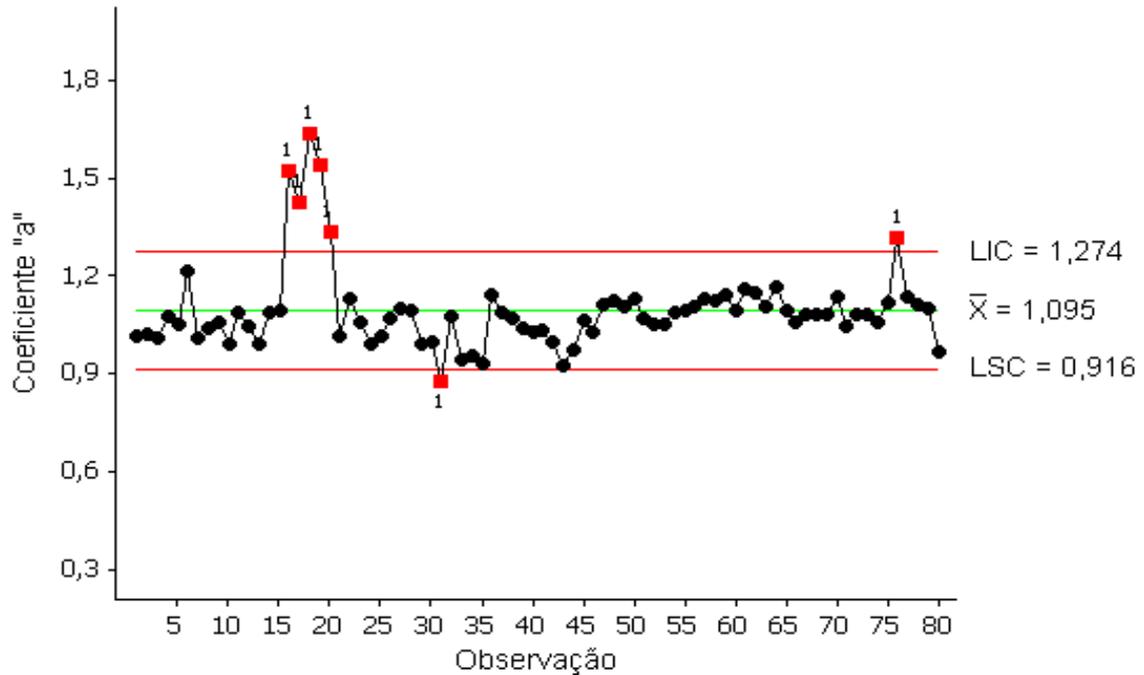


Figura 11 - Gráfico de controle de qualidade, relativo ao coeficiente linear das equações

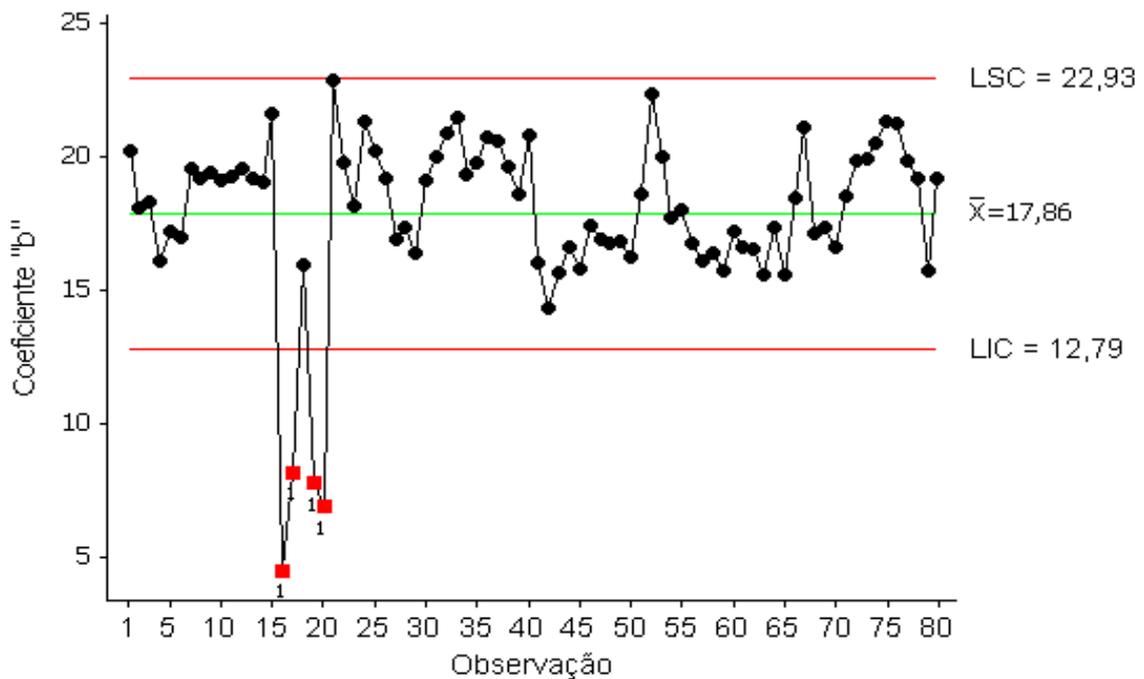


Figura 12 - Gráfico de controle de qualidade, relativo ao coeficiente angular da equação

Verifica-se pela Figura 11 que os valores das observações 16, 17, 18, 19, 20 e 76, referentes às sondas 24, 25, 26, 28, 29 e 04, respectivamente, ficarão acima do limite superior de controle (LSC), portanto considera-se o processo como instável, fora de controle ou imprevisível. Assim, foram desprezadas as mesmas para este experimento, bem como para a observação 31 referente à sonda 48, a qual ficou além do Limite Inferior de Controle (LIC).

Na Figura 12, nota-se que as observações 16, 17, 19 e 20, referentes às sondas 24, 25, 28, 29, respectivamente, ficaram além do Limite Inferior de Controle (LIC).

Pode-se notar que as demais observações estão distribuídas aleatoriamente sobre os limites inferior e superior, portanto, diz-se que o processo está estável ou sob controle ou ele é previsível, desta forma, estão dentro do controle de qualidade admitido para gráficos individuais.

Na Tabela 06, está apresentada a distribuição da instalação das sondas em cada coluna.

Tabela 06 - Distribuição das sondas nas colunas

Coluna		Sondas			
01	02	03	05	06	08
02	09	12	13	14	17
03	19	20	21	22	23
04	24*	25*	26*	28*	29*
05	31*	32	34	35	36
06	38	39	40	41	42
07	48*	50	51	52	53
08	43	44	45	46	47
09	54	55	56	57	58
10	59	60	61	63	64
11	65	66	69	70	71
12	72	73	74	75	76
13	77	78	79	80	81
15	87	88	89	90	91
16	92	93	94	95	96
17	04*	10	11	16	49

* sondas descartadas.

Observa-se, pela Tabela 06, que as sondas descartadas: 24, 25, 26, 28 e 29 encontravam-se instaladas na mesma coluna. Pode ter ocorrido um erro de instalação e/ou de movimentação das mesmas dentro da coluna quando do transporte da bancada para a pesagem e leitura dos dados. Pode ter ocorrido a mesma falha para as sondas 04 e 48. A sonda 31 foi descartada ao acaso.

Nas Figuras 13 e 14, são apresentados os gráficos de dispersão da constante dielétrica aparente versus umidade volumétrica, medidos pelo método volumétrico, modelo embutido no equipamento TDR 6050-X1 e o modelo linear ajustado para cada coluna.

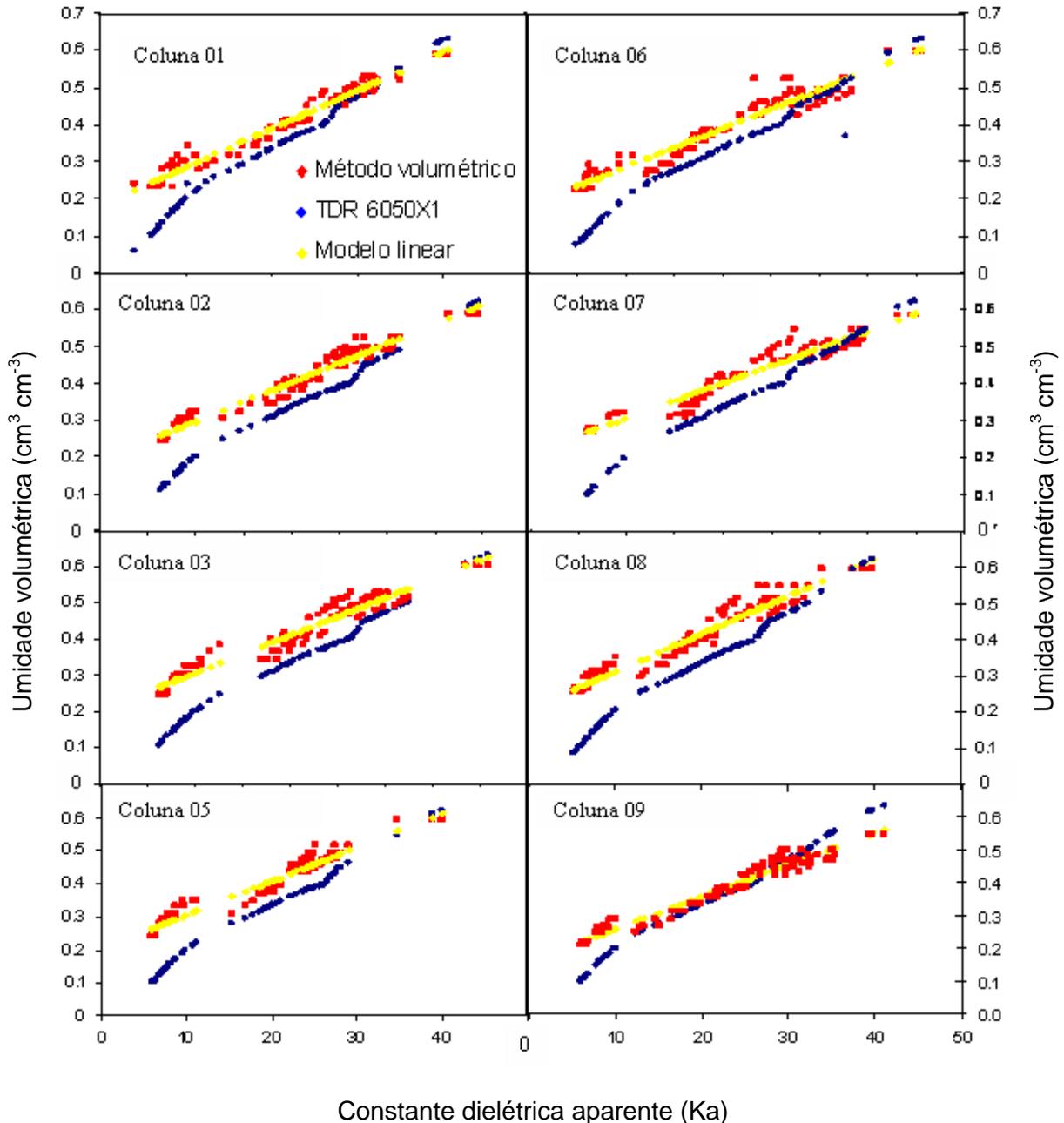


Figura 13 - Gráfico de dispersão da constante dielétrica, fornecida pelo equipamento TDR versus umidade pelo método volumétrico, modelo embutida no equipamento TDR e modelo ajustada para colunas

Pode verificar, através das Figuras 13 e 14, a necessidade de ajuste dos modelos para cada tipo de solo, nota-se que o modelo embutido no equipamento TDR subestima a umidade volumétrica em todo decorrer do estudo, isto é, no intervalo entre $0,130 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,620 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Verifica-se na Figura 13, no gráfico da Coluna 09, que o modelo embutido no equipamento TDR superestima a umidade volumétrica quando a coluna atinge umidade acima de $0,500 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e subestima a umidade volumétrica abaixo de $0,250 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

Observa-se, na Figura 14, que o gráfico da Coluna 4 teve um comportamento diferente dos demais, tal fato está relacionado com a dispersão dos dados obtidos pela

sonda 26.

Os dados observados no presente estudo corroboram com os dados verificados por Silva & Gervásio (1999) e Tommaselli & Bacchi (2001).

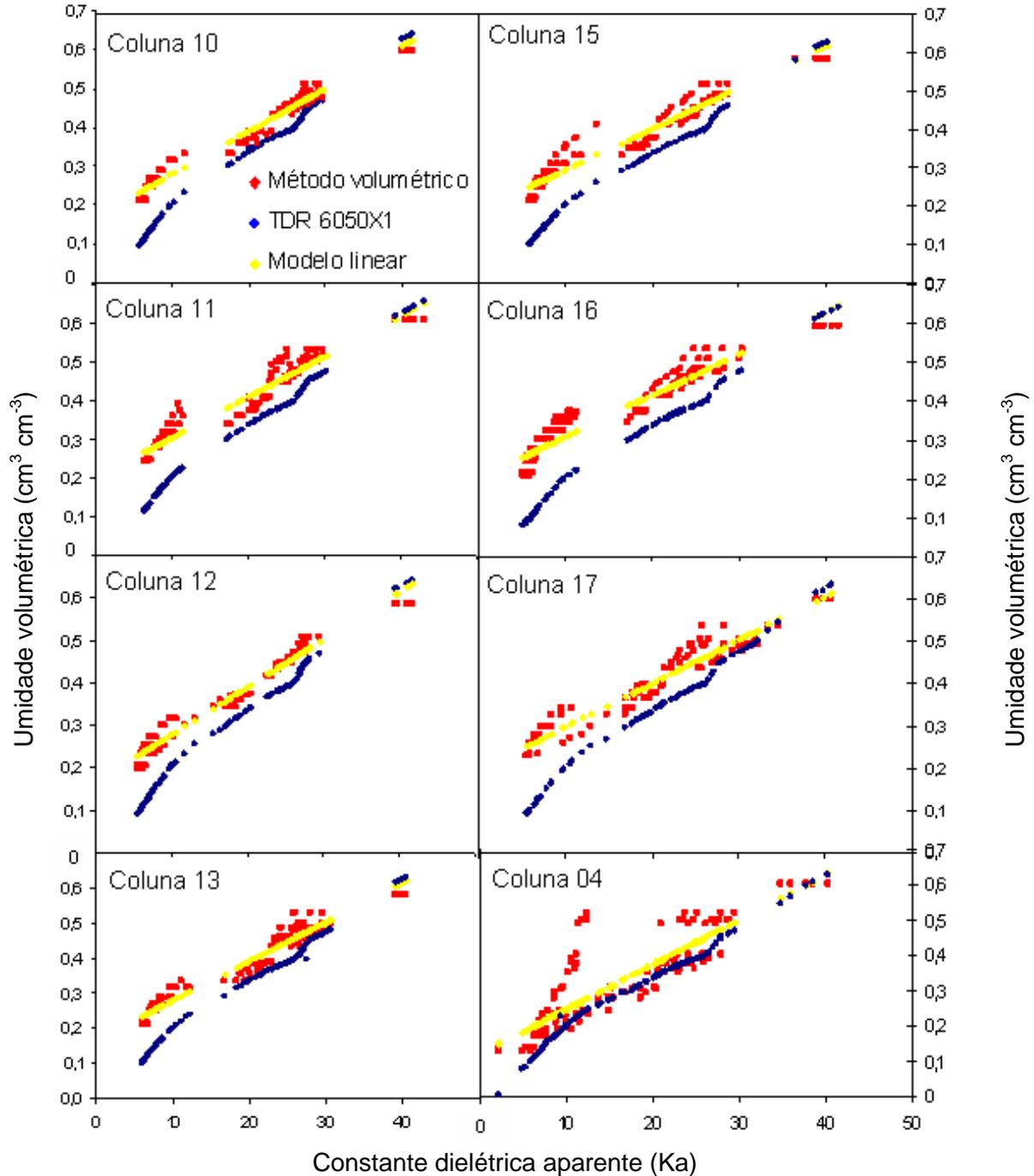


Figura 14 - Gráfico de dispersão da constante dielétrica, fornecida pelo equipamento TDR versus umidade pelo método volumétrico, modelo embutida no equipamento TDR e modelo ajustada para colunas.

Na Tabela 07 é apresentado o resumo da análise de variância da umidade volumétrica obtida a partir dos três métodos: gravimétrico, equação da coluna e equação embutida no equipamento TDR Trase 6050 X1.

Tabela 07 - Resumo da análise de variância para a obtenção dos valores de F para as umidades volumétricas

Fonte de variação	Colunas							
	F							
	01	02	03	04	05	06	07	08
Método	7.27	17.6	20.0	6.60	20.3	10.4	8.86	25.4

Fonte de variação	Colunas							
	F							
	09	10	11	12	13	15	16	17
Método	0.75 ^{ns}	11.0	19.3	12.0	12.1	19.3	29.4	12.3

* indica que o valor de F é significativo e "ns" que o valor de F não é significativo ao nível de 5% de significância.

Observa-se pelo resumo da análise de variância apresentada na Tabela 07 que o valor da estatística F só não foi significativo ao nível de 5% de probabilidade para os métodos na coluna 09. Nos demais métodos, a estatística F foi significativa a 5 % de probabilidade.

Na Tabela 09 são apresentadas as médias para umidade volumétrica de acordo com o método utilizado.

Tabela 08 - Resultado do teste de comparação de médias para umidade volumétrica para os métodos: Volumétrico, equação da coluna e TDR 6050 X1

Colunas	Métodos		
	Volumétrico	Equação da coluna	TDR 6050 X1
01	0,412 A	0,413 A	0,363 B
02	0,409 A	0,410 A	0,338 B
03	0,417 A	0,418 A	0,337 B
04	0,327 A	0,327 A	0,257 B
05	0,399 A	0,399 A	0,313 B
06	0,391 A	0,393 A	0,331 B
07	0,424 A	0,425 A	0,360 B
08	0,419 A	0,420 A	0,334 B
09	0,382 A	0,382 A	0,366 A
10	0,388 A	0,388 A	0,324 B
11	0,411 A	0,411 A	0,332 B
12	0,380 A	0,380 A	0,314 B
13	0,391 A	0,390 A	0,326 B
15	0,381 A	0,382 A	0,302 B
16	0,383 A	0,383 A	0,279 B
17	0,401 A	0,400 A	0,327 B
Todas	0,399 A	0,400 A	0,330 B

Letras maiúsculas iguais na linha não diferem entre si de acordo com o Teste de Tukey ao nível de 5 % de significância.

Pode-se observar, pela Tabela 08, diferença significativa ao nível de 5 % de significância entre os métodos empregados, sendo que o método volumétrico e a equação da coluna foram iguais entre si. Nota-se também que o método da equação da coluna e as médias das umidades adquiridas, através do equipamento TDR 6050 X1, foram estatisticamente diferentes, ao nível de 5%, com exceção para coluna 09, onde não houve diferença significativa ao nível de 5 % entre os métodos. Entretanto, mesmo não havendo diferença significativa entre os métodos para coluna 09, verifica-se uma diferença de 4,8 % a menos para o método da TDR 6050 X1, assim sendo, foram subestimados os valores da umidade volumétrica na coluna.

Na Tabela 9, são apresentados os modelos ajustados com os dados obtidos em cada coluna e para todas as colunas com respectivos coeficientes de determinação (R^2), obtidos pela regressão.

Tabela 9 - Modelos ajustados para cada coluna e agrupamento dos dados de todas as colunas e seus respectivos coeficientes de determinação (R^2)

Coluna	Modelo	R^2
01	$\theta = 0,0103X + 0,1825$	0,970
02	$\theta = 0,0105X + 0,1919$	0,956
03	$\theta = 0,0104X + 0,2029$	0,946
04	$\theta = 0,0127X + 0,1202$	0,732
05	$\theta = 0,0103X + 0,2021$	0,946
06	$\theta = 0,0102X + 0,1825$	0,940
07	$\theta = 0,0103X + 0,1825$	0,927
08	$\theta = 0,0094X + 0,2124$	0,936
09	$\theta = 0,0105X + 0,2060$	0,957
10	$\theta = 0,0110X + 0,1692$	0,963
11	$\theta = 0,0105X + 0,1980$	0,930
12	$\theta = 0,0112X + 0,1652$	0,967
13	$\theta = 0,0112X + 0,1667$	0,943
15	$\theta = 0,0107X + 0,1861$	0,930
16	$\theta = 0,0106X + 0,2030$	0,923
17	$\theta = 0,0103X + 0,1941$	0,932
Todas	$\theta = 0,0103X + 0,1900$	0,930

Verifica-se pela Tabela 9 que os modelos ajustados obtiveram alto valor de R^2 , dentro de um intervalo de 0,923 a 0,970, com exceção da coluna 04, que obteve um valor de 0,732. A Coluna 01 mostrou o melhor R^2 com valor de 0,970.

Valores semelhantes foram verificados por Milani et al. (2008), Villwock, Tavares & Vilas Boas (2004), Tommaselli & Bacchi (2001) e Silva & Gervásio (1999).

Trintinalha (2001), em estudo semelhante com oito sondas em um Nitossolo vermelho eutroférico, encontrou valor do coeficiente de determinação igual a 0,93.

Na Tabela 10 é apresentada a análise de variância para o modelo ajustado aos dados agrupados de constante dielétrica (K_a) e umidade volumétrica (θ) para todas as colunas.

Tabela 10 - Análise de variância do modelo ajustado para correlação entre K_a e θ

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma quadrada	Quadrado médio	Estatística F	p-valor
Regressão	1	15,323	15,323	19598,81	0,000*
Resíduo	1648	1,288	1,288		
Total	1649	16,612			

* significativo ao nível de 5 %.

Verifica-se pela Tabela 10 que $p\text{-valor} < 0,05$, ao nível de 5 % significância para a regressão, assim, pelo menos uma das variáveis explicativas afetou a variável resposta.

Na Tabela 11 é apresentado o teste de significância das variáveis do modelo ajustado para todas as colunas.

Tabela 11 - Teste de significância do modelo linear ajustado para correlação entre K_a e θ para todas as colunas

Estimadores	Coefficiente	Desvio padrão	Estatística t_0	p-valor	Decisão
Linear	0,190	0,0016	115,53	0,000	*
Angular	0,0103	0,00007	140,00	0,000	*

Observa-se, pela Tabela 12, que os coeficientes foram significativos ao nível de 5%, portanto, aceita-se esse modelo de calibração para as sondas em estudo em um Latossolo vermelho distroférico Típico.

4.3 Condutividade elétrica do solo

Na Tabela 12 pode-se observar os valores da impedância de cada sonda, determinada em água destilada, obtida através da Equação 10.

Observa-se na Tabela 12 que o coeficiente de variação (C.V.) da impedância da sonda em água destilada para as sondas construídas, foram classificados como baixo, visto que foram abaixo de 10%, representando dados homogêneos (PIMENTEL GOMES, 2000).

Tabela 12 - Valores da impedância (Z_0) para cada sonda

Sonda	$Z_0(\Omega)$	Sonda	$Z_0(\Omega)$	Sonda	$Z_0(\Omega)$	Sonda	$Z_0(\Omega)$
Sonda 02	226,52	Sonda 32	220,36	Sonda 53	228,02	Sonda 74	220,94
Sonda 03	225,96	Sonda 34	226,40	Sonda 54	225,67,	Sonda 75	222,57
Sonda 05	225,90	Sonda 35	221,11	Sonda 55	224,82	Sonda 76	221,04
Sonda 06	223,68	Sonda 36	223,57	Sonda 56	227,10	Sonda 77	221,50
Sonda 08	236,93	Sonda 38	252,65	Sonda 57	221,77	Sonda 78	219,60
Sonda 09	218,59	Sonda 39	228,03	Sonda 58	213,89	Sonda 79	219,58
Sonda 10	218,09	Sonda 40	222,56	Sonda 59	222,15	Sonda 80	227,00
Sonda 11	222,51	Sonda 41	224,20	Sonda 60	219,14	Sonda 81	216,27
Sonda 12	221,97	Sonda 42	227,36	Sonda 61	231,18	Sonda 87	221,92
Sonda 13	221,90	Sonda 43	224,14	Sonda 63	216,95	Sonda 88	216,43
Sonda 14	220,30	Sonda 44	222,23	Sonda 64	222,68	Sonda 89	222,19
Sonda 16	228,31	Sonda 45	262,30	Sonda 65	221,61	Sonda 90	221,45
Sonda 17	245,71	Sonda 46	224,83	Sonda 66	221,13	Sonda 91	218,26
Sonda 19	227,10	Sonda 47	223,43	Sonda 69	216,51	Sonda 92	224,08
Sonda 20	222,61	Sonda 49	221,80	Sonda 70	216,66	Sonda 93	233,01
Sonda 21	217,79	Sonda 50	226,39	Sonda 71	228,79	Sonda 94	220,76
Sonda 22	221,70	Sonda 51	226,23	Sonda 72	222,23	Sonda 95	222,39
Sonda 23	222,80	Sonda 52	226,57	Sonda 73	217,57	Sonda 96	216,32
Média							224,10
C.V.(%)							3,36
S							7,54

C.V.: Coeficiente de Variação; S: Desvio Padrão; Ω ohms.

Observa-se na Tabela 12 que o valor da impedância para cada sonda foi superior a 200 Ω sendo considerado um fator limitante para a determinação da umidade do solo e condutividade elétrica aparente, pois neste caso a impedância característica pode causar um aumento na atenuação do sinal da onda eletromagnética a ser analisado durante a distância percorrida. Contudo este aumento é justificado pelo uso do capacitor na construção da sonda, vale salientar que Coelho et al. (2006), Vellame et al. (2003), descrevem bons resultados utilizando sondas com impedância superior a 200 Ω .

Na Tabela 13, podem-se observar as características químicas do solo, determinadas após a sua saturação com água residuária da suinocultura.

Observa-se, na Tabela 13, um incremento nos elementos em relação às taxas de ARS aplicadas, principalmente, para os elementos: potássio, ferro, fósforo, manganês e sódio. Esse fato provavelmente ocorreu por ser a água residuária de suinocultura fonte rica nesses nutrientes. Além disso, a matéria orgânica ajuda a manter tais nutrientes disponíveis, na forma trocável. A condutividade elétrica não obteve os valores esperados, sendo para taxa de 80 litros de ARS, uma condutividade elétrica superior 0,500 $S.m^{-1}$. Entretanto,

conforme aumentou a taxa de ARS, houve uma elevação também na condutividade elétrica do solo (extrato saturado).

Observa-se, na Tabela 13, que os valores de pH permaneceram, praticamente, inalterados com a adição de águas residuárias de suinocultura. Resultados semelhantes foram encontrados por Ceretta et al. (2003), Queiroz et al. (2005) em trabalhos com águas residuárias de suinocultura.

Tabela 13 Caracterização química do solo tratado com ARS

Elementos		Tratamentos					
		1	2	3	4	5	6
Cálcio		2,46	1,51	1,70	2,06	2,48	2,82
Magnésio		1,23	0,93	1,09	1,34	1,86	2,21
Potássio	Cmol _c dm ⁻³	0,21	0,84	1,22	2,06	2,88	3,88
Alumínio		0,96	1,94	1,40	0,37	0,25	0,31
CTC		15,16	16,35	16,14	15,16	16,23	17,92
Soma de bases		3,90	3,28	4,01	5,46	7,22	8,91
M. Orgânica	g dm ⁻³	30,63	24,15	24,15	24,15	24,15	24,15
Saturação bases	%	25,73	20,06	24,85	36,02	44,49	49,72
Fósforo		4,34	5,72	8,74	9,68	14,57	17,60
Ferro		72,33	68,21	71,53	102,52	118,43	134,72
Manganês	mg m ⁻³	56,85	81,54	196,22	228,74	229,34	221,56
Cobre		9,39	8,64	9,33	10,65	12,17	15,76
Zinco		25,22	3,68	10,91	11,68	7,78	14,79
Sódio		01	04	07	14	20	24
Cond. Elétrica	S m ⁻¹	0,024	0,156	0,197	0,213	0,222	0,252
pH (CaCl ₂)		4,20	3,80	3,90	4,40	4,50	4,40
PST		0,03	0,03	0,1	0,4	0,5	0,6

Extrator Melich: K – P – Fe – Mn – Cu – Zn ; Extrator KCl : Ca – Mg – Al; Cond. Elét.: extrato saturado (EMBRAPA, 1997).

Verifica-se, pela Tabela 13, que os valores de PST, pH e condutividade elétrica foram inferiores a 15 %, 8,5 e 0,4 S m⁻¹, respectivamente, desta forma, o solo pode ser classificado como “solo não sódico e não salino”. Contudo, segundo Tomé Jr (1997), a produtividade de culturas muito sensíveis à salinidade pode ser reduzida em solos com condutividades elétricas entre 0,2 a 0,4 S m⁻¹.

A não ocorrência de salinização do solo, verificada na Tabela 13, pelos baixos valores de PST, pode ser justificada pelas características do efluente utilizado, uma vez que, o mesmo contém altos teores de cálcio, magnésio e potássio em relação ao sódio.

Na Figura 15, é apresentada a correlação entre o coeficiente de reflexão (β) na estimativa da condutividade elétrica do solo medido com o equipamento TDR (CE_{TDR}), para os diversos níveis de salinidade obtidos através dos tratamentos com água residuária de suinocultura.

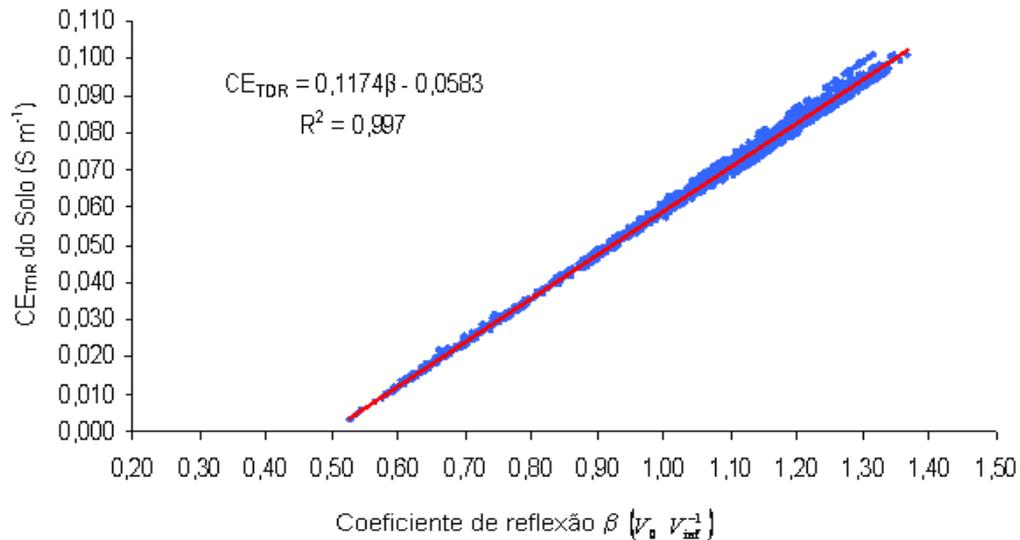


Figura 15 – Modelo de regressão entre condutividade elétrica do solo e coeficiente de reflexão β .

A partir da Figura 15, verifica-se que o coeficiente de determinação é satisfatório ($R^2 = 99,7$). Esses resultados comprovam que existe uma relação linear entre o coeficiente de reflexão (β) e a condutividade elétrica do solo obtido através da técnica da reflectometria, indicando uma variação direta no valor de CE_{tdr} para um coeficiente de reflexão (β).

Na Tabela 14, está apresentada a análise de variância para o modelo ajustado aos dados da Figura 15.

Tabela 14 - Análise de variância do modelo ajustado para correlação entre CE_{es} e CE_{tdr}

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma quadrada	Quadrado médio	Estatística F	p-valor
Regressão	1	1,2134	1,2134	831747	0,000*
Resíduo	2169	0,0032	0,00000145		
Total	2170	1,2166			

* significativo ao nível de 5 % de probabilidade.

Verifica-se pela Tabela 14 que o p-valor $< 0,05$, ao nível de 5 % de significância para a regressão, desta forma, pelo menos uma das variáveis explicativas afetou a variável resposta.

Na Tabela 15, é apresentado o teste de significância das variáveis do modelo ajustado (Figura 15) para a relação entre condutividade elétrica do solo pelo método da TDR (CE_{TDR}) e o coeficiente de reflexão (β).

Tabela 15 - Teste de significância do modelo linear ajustado para correlação entre CE_{tdr} e β

Estimadores	Coefficiente	Desvio padrão	Estatística t_0	p-valor	Decisão
Linear	0,0583	0,00014	-432,93	0,000	*
Angular	0,117	0,00013	912,0	0,000	*

* significativo ao nível de 5 % probabilidade.

Observa-se, pela Tabela 15, que os coeficientes foram significativos ao nível de 5%, portanto, aceita-se esse modelo para estimativa da condutividade elétrica do solo pelo método da TDR, utilizando o coeficiente de reflexão (β) proposto neste estudo.

4.3.1 Comparação das retas de regressão

Na Figura 16, é apresentada a linha de tendência para cada modelo de regressão aos respectivos tratamentos.

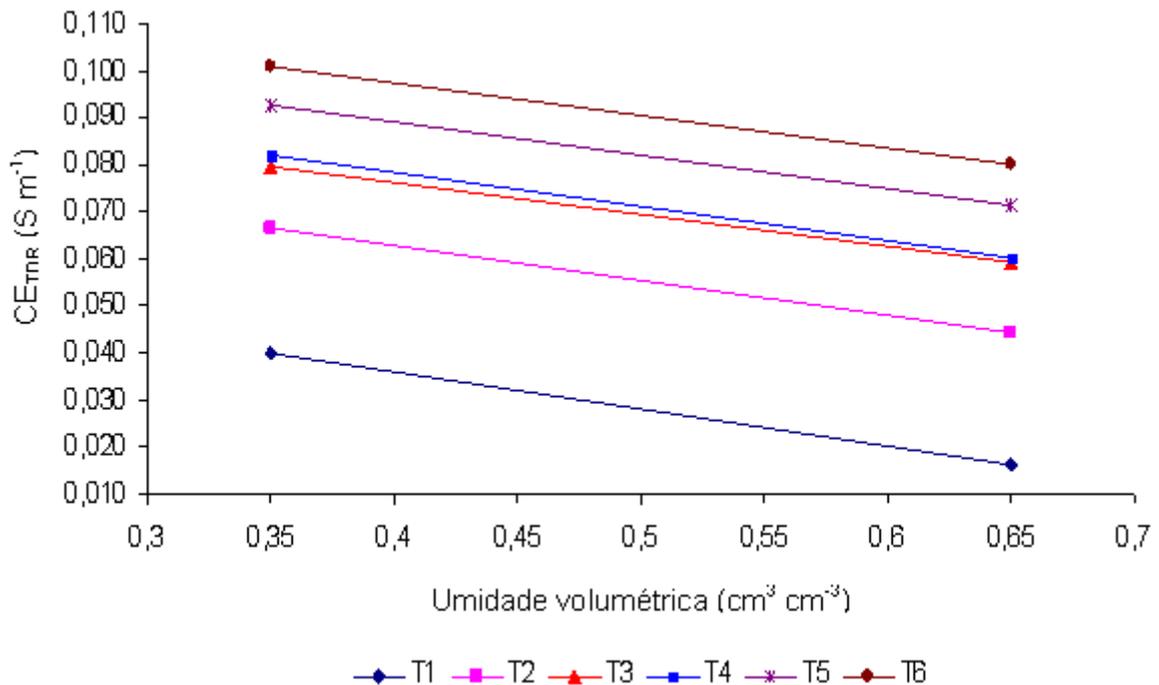


Figura 16 - Correlação entre condutividade elétrica do solo pelo método da TDR e umidade volumétrica do solo

Observa-se, na Figura 16, que os modelos obtiveram o mesmo comportamento na faixa de umidade volumétrica (0,350 a 0,650 cm³ cm⁻³). Entretanto, ocorreu variação da condutividade elétrica em relação aos tratamentos aplicados, conforme esperado, quanto maior a taxa de água residuária da suinocultura, maior a taxa de condutividade elétrica.

Na Tabela 16, verificam-se os resultados obtidos pelo teste de comparação das retas para os valores de condutividade elétrica do equipamento TDR no solo, para umidade de trabalho.

Nota-se, pela Tabela 16, que todos os tratamentos obtiveram igualdade de variâncias pelo teste de F ($\sigma^2_D = \sigma^2_1$) e apresentaram coeficientes angulares iguais pelo teste T, indicando que as retas são paralelas. Verifica-se ainda, pela Tabela 16, que os

coeficientes lineares obtiveram igualdade quanto ao teste T, indicando que as retas possuem o mesmo coeficiente linear ao nível de 5 % de significância.

Tabela 16 - Teste de comparação dos coeficientes angulares e lineares das retas dos tratamentos de água residuária considerando a condutividade elétrica do solo pelo método da TDR ($S\ m^{-1}$) e a umidade volumétrica ($cm^3\ cm^{-3}$).

	Coef. Angular (b)	Coef. Linear (a)	QME	Teste F QME	Teste T (b)	Teste T (a)
T1	-0,0793	0,0680	0,000003	$ 0,77_{F_c} < 1,75_{F_t}$	$ 0,80_{T_c} < 1,98_{T_t}$	$ 0,006_{T_c} < 1,98_{T_t}$
T2	-0,0747	0,0928	0,000004	$QME_{T1} = QME_{T2}$	$B_{T1} = b_{T2}$	$A_{T1} = a_{T2}$
T1	-0,0793	0,0680	0,000003	$ 0,43_{F_c} < 1,65_{F_t}$	$ 1,75_{T_c} > 1,98_{T_t}$	$ 0,001_{T_c} < 1,98_{T_t}$
T3	-0,0673	0,1030	0,000007	$QME_{T1} = QME_{T4}$	$B_{T1} = b_{T4}$	$A_{T1} = a_{T4}$
T1	-0,0793	0,0680	0,000003	$ 0,41_{F_c} < 1,61_{F_t}$	$ 0,94_{T_c} < 1,98_{T_t}$	$ 0,005_{T_c} < 1,98_{T_t}$
T4	-0,0719	0,1070	0,000008	$QME_{T1} = QME_{T3}$	$B_{T1} = b_{T3}$	$A_{T1} = a_{T3}$
T1	-0,0793	0,0680	0,000003	$ 0,69_{F_c} < 1,75_{F_t}$	$ 1,19_{T_c} < 1,98_{T_t}$	$ 0,01_{T_c} < 1,98_{T_t}$
T5	-0,0720	0,1180	0,000005	$QME_{T1} = QME_{T5}$	$B_{T1} = b_{T5}$	$A_{T1} = a_{T5}$
T1	-0,0793	0,0680	0,000003	$ 0,71_{F_c} < 1,80_{F_t}$	$ 1,60_{T_c} < 1,98_{T_t}$	$ 0,01_{T_c} < 1,98_{T_t}$
T6	-0,0693	0,1250	0,000004	$QME_{T1} = QME_{T6}$	$B_{T1} = b_{T6}$	$A_{T1} = a_{T6}$
T2	-0,0747	0,0928	0,000004	$ 0,57_{F_c} < 1,74_{F_t}$	$ 1,03_{T_c} < 1,98_{T_t}$	$ 0,03_{T_c} < 1,98_{T_t}$
T3	-0,0673	0,1030	0,000007	$QME_{T2} = QME_{T4}$	$B_{T2} = b_{T4}$	$A_{T2} = a_{T4}$
T2	-0,0747	0,0928	0,000004	$ 0,53_{F_c} < 1,74_{F_t}$	$ 0,34_{T_c} < 1,98_{T_t}$	$ 0,04_{T_c} < 1,98_{T_t}$
T4	-0,0719	0,1070	0,000008	$QME_{T2} = QME_{T3}$	$B_{T2} = b_{T3}$	$A_{T2} = a_{T3}$
T2	-0,0747	0,0928	0,000004	$ 0,88_{F_c} < 1,84_{F_t}$	$ 0,42_{T_c} < 2,00_{T_t}$	$ 0,02_{T_c} < 2,00_{T_t}$
T5	-0,0720	0,1180	0,000005	$QME_{T2} = QME_{T5}$	$B_{T2} = b_{T5}$	$A_{T2} = a_{T5}$
T2	-0,0747	0,0928	0,000004	$ 0,92_{F_c} < 1,88_{F_t}$	$ 0,82_{T_c} < 2,00_{T_t}$	$ 0,02_{T_c} < 2,0_{T_t}$
T6	-0,0693	0,1250	0,000004	$QME_{T2} = QME_{T6}$	$B_{T2} = b_{T6}$	$A_{T2} = a_{T5}$
T3	-0,0673	0,1030	0,000007	$ 1,07_{F_c} < 1,69_{F_t}$	$ 0,50_{T_c} < 1,98_{T_t}$	$ 0,05_{T_c} < 1,98_{T_t}$
T4	-0,0719	0,1070	0,000008	$QME_{T3} = QME_{T4}$	$B_{T3} = b_{T4}$	$A_{T3} = a_{T4}$
T3	-0,0673	0,1030	0,000007	$ 1,67_{F_c} < 1,74_{F_t}$	$ 0,01_{T_c} < 1,98_{T_t}$	$ 0,04_{T_c} < 1,98_{T_t}$
T5	-0,0720	0,1180	0,000005	$QME_{T3} = QME_{T5}$	$B_{T3} = b_{T5}$	$A_{T3} = a_{T5}$
T3	-0,0673	0,1030	0,000007	$ 1,72_{F_c} < 1,84_{F_t}$	$ 0,29_{T_c} < 2,00_{T_t}$	$ 0,04_{T_c} < 2,00_{T_t}$
T6	-0,0693	0,1250	0,000004	$QME_{T3} = QME_{T6}$	$B_{T3} = b_{T6}$	$A_{T3} = a_{T6}$
T4	-0,0719	0,1070	0,000008	$ 1,40_{F_c} < 1,79_{F_t}$	$ 0,60_{T_c} < 1,98_{T_t}$	$ 0,02_{T_c} < 1,98_{T_t}$
T5	-0,0720	0,1180	0,000005	$QME_{T4} = QME_{T5}$	$B_{T4} = b_{T5}$	$A_{T4} = a_{T5}$
T4	-0,0719	0,1070	0,000008	$ 1,60_{F_c} < 1,84_{F_t}$	$ 0,25_{T_c} < 1,98_{T_t}$	$ 0,02_{T_c} < 1,98_{T_t}$
T6	-0,0693	0,1250	0,000004	$QME_{T4} = QME_{T6}$	$B_{T4} = b_{T6}$	$A_{T4} = a_{T6}$
T5	-0,0720	0,1180	0,000005	$ 1,04_{F_c} < 1,88_{F_t}$	$ 0,38_{T_c} < 2,00_{T_t}$	$ 0,04_{T_c} < 2,00_{T_t}$
T6	-0,0693	0,1250	0,000004	$QME_{T5} = QME_{T6}$	$B_{T5} = b_{T6}$	$A_{T5} = a_{T6}$

T: Tratamentos; D: amostras deformadas; I: amostras indeformadas; QME: quadrado médio residual; "b": coeficiente angular; "a": coeficiente linear; F_c : valor de F calculado; F_t : ponto crítico da tabela F-Snedecor; T_c : valor de T calculado; T_t : valor crítico da tabela t-Student bicaudal; ns: diferença não significativa a 5% de probabilidade; *: diferença significativa a 5% de probabilidade.

4.3.2 Relação condutividade elétrica TDR e extrato saturado

Na Figura 17, é apresentada a relação entre a condutividade elétrica obtida pelo método do extrato saturado (CE_{es}) e a condutividade elétrica obtida pelo método da TDR (CE_{TDR}).

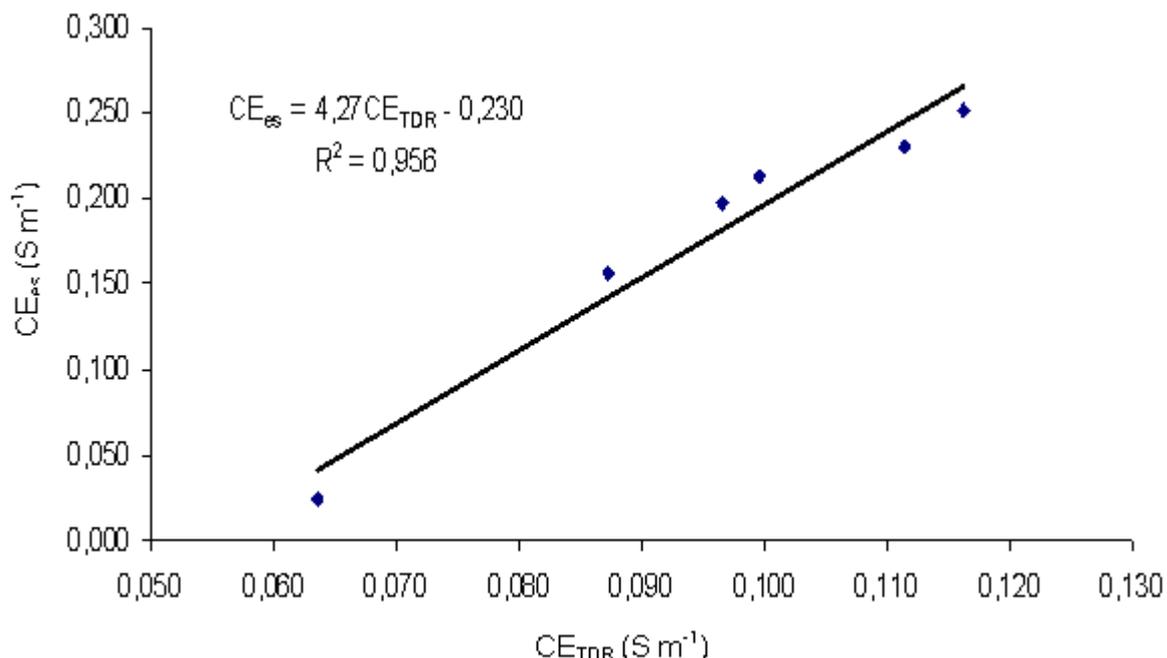


Figura 17 – Modelo de regressão da condutividade elétrica do solo pelo método do extrato saturado do solo (CE_{es}) e condutividade elétrica do solo determinada através da TDR (CE_{TDR})

Verifica-se, na Figura 17, que o coeficiente de correlação estatística foi próximo de 1 e pode ser considerado como excelente. Tal resultado mostra que existe uma relação linear entre os métodos, logo, suas características apresentam uma relação funcional na estimativa da condutividade elétrica do extrato saturado, corroborando com QUEIROZ (2005).

Na Tabela 17, é apresentada a análise de variância para o modelo ajustado aos dados da Figura 17.

Tabela 17 - Análise de variância do modelo ajustado para correlação entre CE_{es} e CE_{tdr}

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma quadrada	Quadrado médio	Estatística F	p-valor
Regressão	1	0,032585	0,032585	86,77	0,001*
Resíduo	4	0,001502	0,000376		
Total	5	0,034087			

* significativo ao nível de 5 % de probabilidade.

Verifica-se, pela Tabela 17, que $p\text{-valor} < 0,05$, ao nível de 5 % significância para a regressão, desta forma, pelo menos uma das variáveis explicativas afetou a variável resposta.

Na Tabela 18, é apresentado o teste de significância das variáveis do modelo ajustado (Figura 17) para a relação entre a condutividade elétrica obtida pelo método do extrato saturado do solo e o método da TDR.

Tabela 18 - Teste de significância do modelo linear ajustado para correlação entre CE_{es} e CE_{tdr}

Estimadores	Coeficiente	Desvio padrão	Estatística t_0	p-valor	Decisão
Linear	0,230	0,04461	-5,16	0,007	*
Angular	4,27	0,4583	9,32	0,001	*

* significativo ao nível de 5 % de probabilidade.

Observa-se, pela Tabela 18, que os coeficientes foram significativos ao nível de 5% de probabilidade, portanto, aceita-se esse modelo para estimativa da condutividade elétrica do extrato saturado do solo através da condutividade elétrica do solo, pelo método da reflectometria no domínio do tempo.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho permitiram concluir que:

- O modelo embutido no equipamento TDR Trase 6050 X1 não foi aplicável para as sondas construídas artesanalmente para o solo estudado.
- O modelo empírico para estimativa da umidade volumétrica do solo em estudo apresentou suficiente grau de correlação, podendo ser denominado como curva de calibração para o Latossolo Vermelho Distroférrico Típico.
- Foi possível estabelecer uma equação empírica que relacionou a condutividade elétrica aparente do solo pelo equipamento TDR e ao método padrão, viabilizando o uso da técnica na estimativa da salinidade do solo.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, I. P.; MONTENEGRO, A. A. A. de; SILVA, J. A. A.da; FREIRE, M. B. G. S. dos; SANTOS, T. E. M. dos. Impacto do reúso de efluentes de esgoto no lixiviado de solos cultivados com milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, (Suplemento), p.212-216, 2005.

APHA, AWWA, WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20 ed. Washington: American Public Health Association, 1998, 1193p.

AYERS, R. S., WESTCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. Campina Grande: UFPB, 1991. 218p.

BARROS, M. F. C.; FONTES, M. P. F.; ALVAREZ, V. H.; RUIZ, H. A. Recuperação de solos afetados por sais pela aplicação de gesso de jazida e calcário no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p.59-64, 2004.

BARROS, F. M.; MARTINEZ, M. A.; NEVES, J. C. L.; MATOS, A. T. de; SILVA, D. D. da.. Características químicas do solo influenciadas pela adição de água residuária da suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, (Suplemento), p.47-51, 2005.

BASSO, J. C. **Perdas de nitrogênio e fósforo com aplicação no solo de dejetos líquidos de suínos**. 2003, 125 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

BLANCO, F.F. **Tolerância do pepino enxertado à salinidade em ambiente protegido e controle da salinização do solo**. 1999, 122 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1999.

BREGA FILHO, D.; MANCUSO, P. C. S. Conceito de reúso de água. In: MANCUSO, P.C.S.; SANTOS, H. F. dos. (Editores). **Reúso de Água**. Barueri: Manole, 2003, p. 339-402.

CERETTA, C. A.; DURIGON, R.; BASSO, C. J.; BARCELLOS, L. A. R.; VIEIRA, F. C. B. Características químicas do solo sob aplicação de esterco líquido de suínos em pastagem natural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 6, p. 729-735, 2003.

CICHOTA, R. **Avaliação do campo de um TDR segmentado para determinação de umidade no solo**. 2003, 121 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2003.

COSTA F. M. da; OLIVEIRA J. M. de; GUIMARÃES E. C.; TAVARES M. Classificação do coeficiente de variação da umidade do solo em experimentação agrícola. **FAMAT em revista**, Uberlândia – MG, n. 10, p. 99 – 105, 2008.

COSTA, M. A. D. da; HOLANDA, J. S. de; FIGUEIREDO FILHO, O. A. de. Caracterização de solos quanto à afetação por sais na bacia do rio Cabugí - Afonso Bezerra-RN. **Holos (online)**: Afonso Bezerra, v. 20, n., p.1-13, 2004.

DALTON, F.N., HERKELRATH, W.N., RAWLINS, D.S., RHOADES, J.D., Time-domain reflectometry: simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. **Science** V. 224. n. 4652, p. 989 – 990, 1984.

DE NEVE, J. S.; VAN DE STEENE, R.; HARTMANN & HOFMAN, G. Using time domain reflectometry for monitoring mineralization of nitrogen from soil organic matter. **European Journal of Soil Science**, London, n.51, p. 295-304, 2000.

DIESEL, R.; MIRANDA, C. R.; PERDOMO, C. C. **Boletim Informativo de Pesquisa – Embrapa Suínos e Aves e Extensão**. EMATER/RS, ano 10, agosto/2002.

EMBRAPA (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA). **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**. 2. Ed. Rio de Janeiro, 2006, 306 p.

EMBRAPA (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA). Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro, 1997. 221p.

FEIGIN, A.; RAVINA, I.; SHALHEVET, J. **Irrigation with treated sewage effluent: management for environmental protection**. Berlin: springer-verlag, 1991, 224 p.

FREITAS, W. da S.; OLIVEIRA, R. A. de; PINTO, F. A.; CECON, P. R.; GALVÃO, J. C. C. Efeito da aplicação de águas residuárias de suinocultura em solo cultivado com milho. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 13, n. 2, p.95-102, Abr/jun., 2005.

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

HESPANHOL, I. Potencial de reuso de água no Brasil: agricultura, industria, município e recarga de aquífero. In: MANCUSO, P.C.S.; SANTOS, H. F. dos. (Editores). *Reuso de Água*. Barueri: Manole, 2003, p. 37-96.

MASTRORILLI M.; KATERJI N.; RANA G.; NOUNA B. B. Daily actual evapotranspiration measured with TDR technique in Mediterranean conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, Bari, Italy v. 90, n. 1, p. 81-89, March 1998.

METCALF & EDDY, I. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 4. ed. International edition. 2003. p. 1345-1443.

MEURER, E. J. **Fundamentos de Química do Solo**. Porto Alegre: Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2000. 174p.

MONTGOMERY, D. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. 4a. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

MUNÓZ-CARPENA, R. REGALADO, A.; RITTER, J. ALVAREZ-BENEDÍ, C. SOCORRO A. R. TDR Estimation of electrical Conductivity and Saline Solute Concentration in a Volcanic Soil. **Geoderma** 124 399-413 (2005).

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

OLIVEIRA, J. B. de. Classificação de Solos e seu Emprego Agrícola e não Agrícola Disponível em: http://jararaca.ufsm.br/websites/dalmolin/download/textos/pl_classif.pdf Acesso: 20, maio/2008.

OR, D.; JONES, S. B.; VANSHAAR, J. R.; WRAITH, J. M; HUMPHRIES, S.; KOBERSTEIN, L. **WinTDR 6.0 Users Guide**, Disponível em:

http://soilphysics.usu.edu/wintdr/Documents/Manuals/2004Fall/WinTDRManual_Fall2004.pdf
. Acesso: 25, maio/2008.

PAGANINI, W.S.da. Reúso de água na agricultura. In: MANCUSO, P.C.S.; SANTOS, H. F. dos. (Editores). **Reúso de Água**. Barueri: Manole, 2003, p. 339-402.

PEREIRA, E. R. **Qualidade da água residuária em sistemas de produção e de tratamento de efluentes de suínos e seu reúso no ambiente agrícola**. 2006, 129 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2006.

PIMENTEL GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 14. ed. Piracicaba: Degaspari, 2000. 477 p.

QUEIROZ, S.O. P.; TESTEZLAF, R.; MATSURA, E. E. Avaliação de equipamentos para determinação da condutividade elétrica do solo. **Revista Irriga**, Botucatu-SP, v. 10, n. 3, p. 279-287, agosto-outubro, 2005.

QUEIROZ, S. O. P. de. **Métodos para a avaliação de salinização do solo sob ambientes protegidos**. 2004, 116 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI, Campinas, 2004.

RAIJ, B.V.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri – SP, Manole, 2004, p. 471.

SANTOS, A. P. R. dos. **Efeito da irrigação com efluente de esgoto tratado, rico em sódio, em propriedades químicas e físicas de um argissolo vermelho distrófico cultivado com Capim-Tifton 85**. 2004, 79 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2004.

SERRARENS, D.; MACLINTYRE, J.L.; HOPMANS, J.W.; BASSOI, L.H.; Soil moisture calibration of TDR multilevel probes. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.57, n.2, p.349-354, 2000.

SILVA, E. L. da; GERVÁSIO, E. S. Uso do instrumento TDR para determinação do teor de água em diferentes camadas de um latossolo roxo distrófico. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 3, p. 417-420, 1999.

SOILMOISTURE EQUIPMENT CORPORATION. **Trase Operating Instructions**. Santa Barbara, 1998, 119 p.

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. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p.282-291, janeiro-abril, 2006.(a).

SOUZA, C. F.; MATSURA, E. E.; FOLEGATTI, M. V.; COELHO E. F.; OR, D. Sondas de TDR para a estimativa da umidade e da condutividade elétrica do solo. **Irriga**, Botucatu, v. 11, n. 1, p.12-25, janeiro-março, 2006. (b).

SOUZA, C. F.; OR, D.; MATSURA, E.E. A variable-volume TDR probe for measuring water content in large soil volumes. **Soil Science Society of America Journal**, Medison, USA, v. 68, p. 25-31, 2004.

SOUZA, C. F.; SANDRI, D.; MATSURA, E. E.; TESTEZLAF, R. Construção de sondas de TDR para a irrigação. In: **XXX CONBEA 2001**, Foz do Iguaçu. CD-ROM, 2001.

TAVARES, M. H. F.; BUSATA, O. J.; VILAS BOAS, M. A.; ORO, A. L. T. Desenvolvimento de aplicativo para um equipamento TDR. **Irriga**, Botucatu, v. 11, n. 4, p.543-552, outubro-dezembro, 2006.

TERRES, A. L. **Utilização da técnica da reflectometria no domínio do tempo para medidas de condutividade elétrica aparente de latossolo**. 2006, 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2006.

TOMÉ JR., J. B. **Manual para interpretação de análises de solo**. Guaíba: Agropecuária, 1997. 247 p.

TOMMASELLI, J. T. G.; BACCHI, O. O. S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília-DF, v. 36, n. 9, p.1145-1154, Setembro, 2001.

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

VALERO, R. M. M. **Uso da técnica da “TDR” na estimativa da umidade e condutividade elétrica em substratos orgânicos**. 2006, 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI, Campinas, 2006.

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

VILLWOCK, R. Construção, calibração e avaliação de sondas de TDR em condições de laboratório e de campo. 2003, 71f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Cascavel, 2003.

WRAITH, J. M.; ROBINSON, D. A. JONES, S. B.; LONG, S. S. Spatially Characterizing Apparent Electrical Conductivity and Water Content of Surface Soils with Time Domain Reflectometry. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, n. 46, p. 239-261, 2005.

WRAITH J. M.; DAS B. S. Monitoring soil water and ionic solute distributions using time-domain reflectometry. **Soil & Tillage Research**, Montana, USA, v. 47, n. 1-2, p. 145-150, 1998.

ZEGELIN, S. J. and WHITE, I. Improved Field Probes for Soil Water Content and Electrical Conductivity Measurement Using Time Refletometry. **Water Resources Research, Washington**, v.25, n.11, p.2367-2376, 1989.