

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS
CENTRO DE ESTUDOS SUPERIORES DE ITACOATIARA**

RUBIA PEREIRA RIBEIRO

**CALIBRAÇÃO DE SENSORES DE SOLO PARA A DETERMINAÇÃO DE TEOR
DE UMIDADE EM LATOSSOLOS AMARELOS NA AMAZÔNIA CENTRAL**

Itacoatiara

2019

RUBIA PEREIRA RIBEIRO

**CALIBRAÇÃO DE SENSORES DE SOLO PARA DETERMINAÇÃO DO TEOR DE
UMIDADE EM LATOSSOLOS AMARELOS NA AMAZÔNIA CENTRAL**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Florestal do Centro de Estudos Superiores de Itacoatiara, da Universidade do Estado do Amazonas como requisito para obtenção do título de bacharela em Engenharia Florestal.

Orientador: Me. Augusto Izuka Zanelato

Coorientador: Dr. Sávio José Filgueiras Ferreira

Itacoatiara

2019

RUBIA PEREIRA RIBEIRO

CALIBRAÇÃO DE SENSORES DE SOLO PARA A DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE EM LATOSSOLOS AMARELOS NA AMAZÔNIA CENTRAL

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Florestal, da Universidade do Estado do Amazonas, como requisito obrigatório para a obtenção do título de bacharela em Engenharia Florestal.

Itacoatiara-AM, 10 de dezembro de 2019.

Nota:

BANCA EXAMINADORA

Augusto Izuka Zanelato – UEA
(orientador)

Eduardo de Souza Mafra – UEA
(membro)

Sanderléia de Oliveira dos Santos – UEA
(membro)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho exclusivamente à minha valiosa mãe “Izaura” e em homenagem a meu amado pai “Rubem Moura Ribeiro”.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente a Deus, por ter me dado a vida e me sustentado com esperança de viver dias melhores.

Agradeço também aos meus irmãos pelo apoio em investimento. Principalmente, aos meus irmãos caçulas: Fabrina e Fabrício por ter acreditado e investido em mim. Sem vocês seria impossível ter orgulho da engenharia florestal. Sou muito feliz por vocês terem me enviado para o sul do país na busca do conhecimento.

Aos meus queridos amigos do INPA. Dr. Sávio e Marcelo, como sou feliz por tê-los conhecido. O que fizeram por mim neste trabalho espero poder retribuir de alguma forma ajudando outras pessoas perdidas como eu estava até conhecer vocês.

Aos meus amigos e parceiros de caminhada Adriene Amaral, Roberta Moura e Carlos Rodrigues. Obrigada por todos os momentos felizes que a companhia de vocês me proporcionou nessa caminhada árdua da graduação.

Carlos, meu amigo, agradeço por cada material que me doou e trouxe crescimento intelectual. As ferramentas foram muito úteis para meu desenvolvimento e a minha amiga Mariana minha eterna gratidão.

Ao meu querido orientador Augusto Izuka Zanelato pelo aceite de orientação de última hora.

Ao professor e coordenador fantástico, Judibal Cabral, por todo seu apoio em não medir esforços para o avanço e desenvolvimento intelectual do aluno, ao assinar meus papéis de intercâmbio que me permitiram viver uma das maiores experiências da minha vida em outra região do país.

À UNICENTRO por ter me recebido com tanto carinho e a todos seus professores maravilhosos, incrivelmente capacitados e preparados para dar formação profissional e transformar vidas humanas.

A minha Universidade do Estado do Amazonas, por ter me dado abrigo e suporte através de seus programas de monitoria, casa do estudante e auxílio financeiro. Sem isso, seria impossível continuar lutando até a formação.

A minha amiga Iona Guimarães e toda sua equipe (Lúcia, Júlia, Milena, Josué e Darley) por todos os cuidados e atenção prestada. Como fomos felizes em sua companhia!

E fechando os agradecimentos, quero agradecer em especial à minha mãe. Se não fosse o apoio dela jamais teria chegado tão longe e concluído o curso. Muito obrigada minha cacica. Sinto muito orgulho do sangue sateré-mawé que corre em minhas veias.

RESUMO

A floresta amazônica desenvolve um importante papel de evapotranspiração responsável por manter processos de regimes de chuva nas grandes regiões agrícolas do país. Porém, mudanças no uso da terra e o desmatamento podem afetar diretamente esse sistema, comprometendo o cenário econômico do país. Diante disso, cientistas desenvolvem pesquisas que monitoram a dinâmica da água e buscam compreender seu comportamento nesse sistema. Neste contexto o objetivo deste trabalho foi calibrar sensores de umidade do solo com intuito de se desenvolver uma curva padrão que determina e quantifica o teor de água no solo. Para isso, foram retiradas amostras de 22 kg de solo de cada um dos sete pontos do poço profundo da ZF2, para calibração dos sensores em ambiente de laboratório. Foram coletadas 3 amostras indeformadas de cada ponto, com auxílio do anel de Kopecky ao longo do perfil para análise da densidade do solo, da umidade gravimétrica e posterior valor da umidade volumétrica real do campo. Adotou-se o método da estufa como padrão para a calibração dos sete sensores do solo. As amostras de cada profundidade foram destorroadas e peneiradas, em peneiras de 2 mm, para se obter a Terra Fina Seca ao ar (TFSA) com intuito de se iniciar a calibração através dos sensores da *Campbell Scientific*, modelo CS655. Os equipamentos foram calibrados nos teores de umidade de 0% (TFSA), 5%, 10%, 20%, 25%, 30%, 35% e 45%. Para a análise dos dados foram aplicados regressão linear múltipla e gerou-se uma única curva de calibração para os sete níveis de solo. O modelo matemático que melhor se ajustou aos dados foi o modelo cubico polinomial com coeficiente de determinação (R^2) de 0,96 a nível de significância de $p < 0,05$. O modelo foi considerado satisfatório para todas as estimativas dos coeficientes da regressão, atendendo as análises de normalidade e homogeneidade avaliados nos resíduos. A equação poderá ser empregada em estudos de modelagem climática, ciclos hidrológicos e nas ciências que estudam o grande sistema solo-água-planta-atmosfera.

Palavras-chaves; Umidade volumétrica. Calibração de Sensores. Constante dielétrica.

ABSTRACT

The Amazon forest develops an important evapotranspiration role responsible for maintaining processes of rain regimes in the country's great agricultural regions. However, changes in land use and deforestation can directly affect this system, compromising the country's economic scenario. Thus, scientists develop research that monitors water dynamics and seeks to understand their behavior in this system. In this context, the objective of this work was to calibrate soil moisture sensors in order to develop a standard curve that determines and quantifies soil water content. For this, samples of 22 kg of soil were taken from each of the eight points of the deep well of ZF2, for calibration of the sensors in a laboratory environment. Three deformed samples of each point were collected with the aid of the Kopecky Ring along the profile for analysis of soil density, gravimetric moisture and subsequent value of the real volumetric moisture of the field. The greenhouse method was adopted as the standard for the calibration of the eight soil sensors. The samples of each depth were slashed and sieved in 2 mm sieves to obtain the Dry Air Filler (TFSA) in order to initiate the calibration through Campbell Scientific sensors, model CS655. The equipment was calibrated in the moisture contents of 0% (TFSA), 5%, 10%, 20%, 25%, 30%, 35% and 45%. For data analysis multiple linear regression was applied and a single calibration curve was applied and a single calibration curve was generated for the seven soil levels. The mathematical model that best fit the data was the polynomial cubic model with coefficient of determination (R^2) of 0.96 at a significance level of $p < 0.05$. The model was considered satisfactory for all estimates of regression coefficients, considering the normality and homogeneity analyzes evaluated in the residues. The equation may be used in climate modeling studies, hydrological cycles and in the sciences that study the large soil-water-plant-atmosphere system.

Keywords; Volumetric Humidity, Sensor Calibration, Dielectric Constant.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Localização da área de estudo	14
Figura 2: Estrutura interna do poço e o local de amostragem	16
Figura 3: Pesagem do peso úmido.....	17
Figura 4: Processo de peneiramento para TFSA.....	19
Figura 5: Protótipo do corpo de prova.....	20
Figura 6: Processo de umedecimento da amostra.....	22
Figura 7: Disposição do sensor no cilindro.....	23
Figura 8: Pesagem da amostra.....	23
Figura 9: Três modelos de sensores TDR cs655.....	24
Figura 10: Sistema de aquisição de dados modelo CR 800.....	24
Figura 11: Dispersão dos valores de umidade volumétrica do sensor (equação de Topp) e método da estufa.....	28
Figura 12: Curvas de calibração da umidade volumétrica em função da constante dielétrica para cada ponto amostral.....	30
Figura 13: Disposição dos resíduos do valor estimado versus desvio padrão.....	32
Figura 14: Gráfico da probabilidade observada versus a probabilidade esperada	33
Figura 15: Representação gráfica da umidade volumétrica versus constantes dielétrica para os três modelos.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificação do fabricante para o modelo TDR 655.....	21
Tabela 2: Resultados da Análise Química do Latossolo Amarelo.....	26
Tabela 3: Análise da Densidade e Granulometria do Latossolo Amarelo.....	27
Tabela 4: Equações Polinomiais Cúbicas Ajustadas e seus Coeficientes de Determinação para cada nível do solo (cm).....	29
Tabela 5: Coeficientes de determinação da regressão.....	31
Tabela 6: Resumo da Análise de Variância da Equação Ajustada.....	31
Tabela 7: Coeficientes angulares e linear da Equação Ajustada.....	32

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	11
1 MATERIAIS E MÉTODOS	14
1.1 AREA DA COLETA	14
1.1.1 Clima	14
1.1.2 Solo	15
1.1.3 Vegetação	15
1.2 PROCESSO DE COLETA NO CAMPO	16
1.2.1 Coleta das Amostras	16
1.3 DETERMINAÇÃO DA UMIDADE VOLUMÉTRICA PELO MÉTODO PADRÃO.....	17
1.3.1 Determinação do Teor de Umidade Gravimétrica	17
1.3.2 Determinação da Densidade do Solo	18
1.3.3 Determinação da Umidade Volumétrica	18
1.4 PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DOS SENSORES	19
1.4.1 Preparação das Amostras no Laboratório Hidrobiogeoquímico	19
1.4.2 Projeção do Corpo de Prova	19
1.4.3 Processo e Registro dos Sensores	22
1.4.4 Análise dos dados	25
1.4.4.1 Análise Granulométrica e Química	25
2 RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
2.1 ESTATÍSTICA DA EQUAÇÃO AJUSTADA	31
CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
REFERÊNCIAS	35

INTRODUÇÃO

A floresta amazônica é um dos mais importantes ecossistemas do mundo, sua relevância se associa a sua elevada diversidade biológica, interação com ciclos biogeoquímicos e hidrológico para a manutenção do clima e vida na terra (FERREIRA, 2012).

Esse grande ecossistema desempenha um papel fundamental para o equilíbrio do clima e sua interação com as grandes regiões agrícolas. Consequente a interação água, solo e planta dessa região se tornam variáveis importantes de monitoramento uma vez que mudanças no uso da terra e o desmatamento dessa região podem afetar diretamente o sistema de vapor de água para atmosfera e comprometer o cenário econômico do país afirma o pesquisador (NETTO, 2018).

Neste contexto é importante frisar e conhecer o uso de tecnologias que são usados no monitoramento e amostragem dessas variáveis do sistema (NOBRE, 2014). Principalmente ao que diz respeito ao solo que é responsável pela manutenção das plantas através do suporte mecânico, água, nutrientes e serve como armazenamento de água, mantendo a qualidade dos reservatórios naturais e servindo de habitat para milhões de organismos vivos (COELHO *et al.*, 2013).

Sendo assim, saber quantificar e entender o funcionamento do subsistema solo-água. É fundamental para se conhecer o comportamento da água e sua interação com o solo no sistema maior solo-água-planta-atmosfera (FAULIN, 2005). Para isso, pesquisas procuram descrever e entender essa relação, analisando o conteúdo de água no solo ao longo do seu perfil, buscando compreender a dinâmica da água (BROEDEL *et al.*, 2017).

Um dos métodos que vem sendo aceito na comunidade científica é o uso de técnicas como a Time Domain Reflectometer – TDR (VILLWOCK, 2016). Essa tecnologia é um método indireto muito usado para quantificar e monitorar o conteúdo de água do solo em que relaciona a umidade às propriedades dielétricas do meio solo-água-ar (COSTA *et al.*, 2014).

A técnica de TDR ganha mais espaço na vida dos pesquisadores por ser uma técnica não destrutiva, efetua medidas contínuas por longos períodos, apresenta boa precisão e resolução (GUIMARÃES *et al.*, 2010). Segundo Tommaselli e Bacchi (2001), o equipamento apresenta rapidez na obtenção da umidade volumétrica, a

repetibilidade das leituras e também facilidade de se acoplar a dispositivos coletores de dados.

Porém, o solo é um elemento heterogêneo composto por 25% de água, 46% de minerais, 25% de ar e 4% de matéria orgânica que estão no solo compondo seus horizontes (LEPSH, 2010). As diferenças físicas e químicas de cada solo, pode influenciar na acurácia da constante dielétrica, devido as características peculiares de cada solo como o tamanho das partículas, o teor de óxido de ferro, o teor de matéria orgânica e a superfície específica (TOMMASELLI; BACCHI, 2001)

Portanto, a calibração dos sensores de umidade do solo para cada classe é uma necessidade desta técnica (GOMES *et al.*, 2010). O instrumento calcula a umidade volumétrica ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$) do solo a partir da variável constante dielétrica (K_a), usando a equação embutida no sensor de acordo com Silva e Gervásio (1999), conhecida como a equação geral de Topp conforme a equação a seguir:

$$\theta_v = -5.3 * 10^{-2} + 2.92 * 10^{-2}k_a - 5.5 * 10^{-4}k_a^2 + 4.3 * 10^{-6}k_a^3 \quad (1)$$

A equação empírica de Topp tem os coeficientes ajustados para os meios porosos artificiais e solos minerais de clima temperado, registrando na faixa de umidade de 0 a $0,5 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ (ANDRADE; COSTA; ALBUQUERQUE, 2003).

Na contrapartida, as características dos solos amazônicos são formadas por 43% da classe latossolos, que são altamente intemperizados, típicos das regiões tropicais, possuindo textura de até 90% de argila (FERRAZ *et al.*, 2015). Estudos comprovam que a equação universal de Topp não é apropriada para este tipo de solo (MELO, 2017).

Para o registro do equipamento e posterior conversão para umidade volumétrica, o sensor registra o tempo do deslocamento do sinal na guia da TDR e converte este valor para K_a (constante dielétrica), segundo a equação descrita em (VILLWOCK, 2016):

$$K_a = \left(\frac{t \cdot x \cdot c}{2 \cdot L} \right)^2, \quad (2)$$

Onde t é o tempo de deslocamento (ns), c é a velocidade da luz (30 cm/ns) e L é o comprimento da guia (cm), que a partir da constante dielétrica aparente lida, determina o conteúdo de água através da relação na equação (1).

Os impulsos eletromagnéticos emitidos pelo sensor e sua leitura são possíveis devido à constante dielétrica relativa dos elementos do solo ser distinta entre si, com

valores de 81 para água, 1 para ar atmosférico e entre 3-5 para materiais do solo (TOMMASELLI; BACCHI, 2001).

Com base na problemática aqui discutida, o presente trabalho teve como objetivo calibrar e gerar uma curva característica para latossolo amarelo avaliando o desempenho de sonda TDR em condições de laboratório.

1 MATERIAIS E MÉTODOS

1.1 ÁREA DA COLETA

As amostras de solo coletadas para a calibração dos 7 sensores TDR 655 da *Campbel Scientific* foram extraídas do poço profundo da ZF2 (dimensões 1,2 x 1,8 x 15 m), pertencente ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, situado na Reserva Biológica do Rio Cuieiras, distante 60 km a noroeste de Manaus.

A Reserva Biológica do Rio Cuieiras possui uma área equivalente a 22.735 ha, nas coordenadas 02° 35' 33" S e 60° 06' 55" O (figura 1). A reserva faz limite a estação/reserva Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira – CEPLAC e com área da Universidade Federal do Amazonas – UFAM. O acesso à reserva é feito pela rodovia BR-174 e desta pela estrada vicinal da ZF-2 (LBA, 2018).



Figura 1 – Localização da área de estudo.

1.1.1 Clima

Segundo Köppen-Geiger, a região de Manaus pode ser classificada como tipo “Am”, por apresentar clima quente e úmido durante o ano todo, ter precipitação anual média superior a 1500 mm e precipitação do mês mais seco ser inferior a 60 mm.

A área de estudo apresenta pluviosidade de 2.400 mm/ano, com o período de janeiro-março, o mais chuvoso. Apresenta uma precipitação mensal entre 300 e 350 mm no período chuvoso, e no período mais seco – junho a setembro – as médias ficam em torno de 50 mm.

A umidade relativa do ar é superior a 85% e a temperatura sofre pequenas alterações, mantendo-se geralmente entre 25° e 27° C, na média anual (INMET,2017).

1.1.2 Solo

Estima-se que 45% da área da floresta amazônica seja recoberta por latossolos, predominante nas áreas de platô. Esse tipo de solo possui alto teor de argila (até 90 %). São solos que apresentam boa porosidade e acidez variando entre muito ácidos (pH<4,5) e ácidos (pH entre 4,5 e 5,4), ricos em alumínio e pobres em nutrientes (nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio). Devido a estas características são classificados como oligotróficos (FERRAZ *et al.*, 2015).

O solo da área de estudo é do tipo latossolo amarelo distrófico com avançado estágio de intemperização e predomínio de argila. Este tipo de solo geralmente é profundo, contendo alto teor de alumínio e baixa capacidade de reter nutrientes (EMBRAPA, 2006).

1.1.3 Vegetação

Na área da coleta de dados, a vegetação predominante é a Floresta Ombrófila Densa de Terra Firme, que também recebe o nome de platô. Este tipo de vegetação tem um dossel que atinge de 35 a 40 m; entretanto, possui árvores que chegam a 60 m de altura (FERRAZ *et al.*, 2015) .

A Floresta Ombrófila Densa de Terra Firme se caracteriza pelo pouco acúmulo de serapilheira no solo e também por apresentar uma manta de raízes finas. Em estudos feitos na área foram encontrados 532 indivíduos arbóreos com DAP maior que 5 cm , abrangendo 41 famílias botânicas e 138 espécies diferentes na área de 4000 m² (LIMA *et al.*, 2007).

As famílias botânicas mais frequentes na área de estudo são Sapotacea, Chrysobalanaceae, Lecythydaceae e Mimosaceae, seguidas por Annoniaceae, Caesalpiniaceae e Lauraceae (op.cit.).

1.2 PROCESSO DE COLETA NO CAMPO

1.2.1 Coleta das Amostras

No mês de maio de 2018 foram amostrados 7 pontos ao longo do perfil vertical do poço profundo (1,2 x 1,8 x 15 m) como mostra (figura 2). Cada ponto de 1 a 7 correspondia aos níveis de profundidades de 80, 160, 240, 480, 640, 880, e 1.420 cm. Nestas diferentes profundidades estavam instalados os 7 sensores TDR's, modelo CS615. Os sensores registravam a umidade volumétrica de cada profundidade, estando posicionados a uma distância horizontal de 1,5 m da parede do poço. Os sensores foram retirados de seus locais e, das aberturas laterais do poço deixadas pelos sensores, foram coletados 154 kg de solo, sendo 22kg por cada ponto.

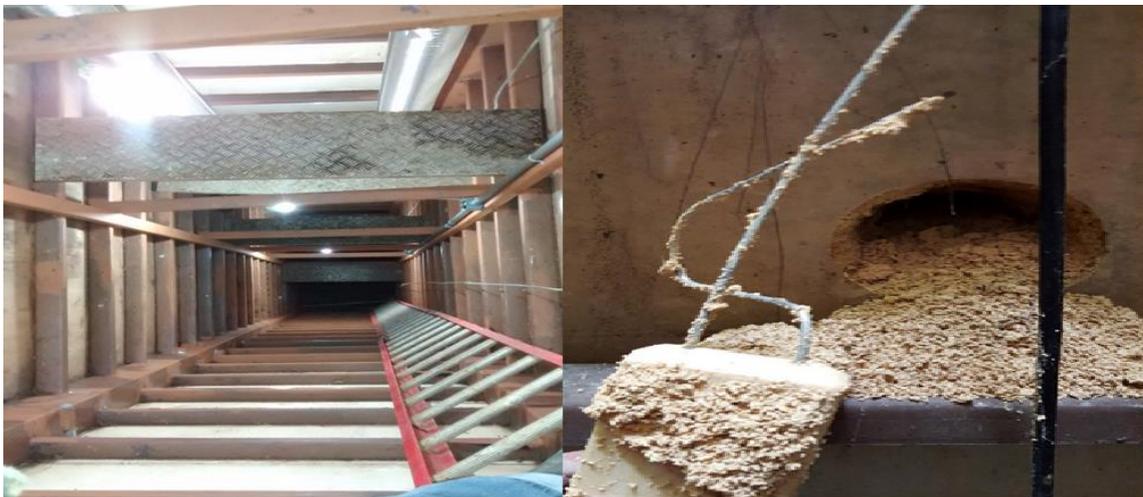


Figura 2 – Estrutura interna do poço e o local da amostragem

As amostras foram retiradas com o auxílio de trado holandês com caçamba de 20 cm e diâmetro de 4 polegadas, composto de quatro hastes prolongadoras de 100 cm. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos com capacidade para 30 kg. Os sacos foram fechados e identificados por cada profundidade a fim de se manter as condições naturais de sua umidade natural. As amostras foram utilizadas para o processo de calibração no Laboratório Hidrobiogeoquímico do INPA.

Para se obter a umidade gravimétrica e a densidade em laboratório foram retiradas, de cada profundidade, três amostras de solo com estrutura indeformada, perfazendo um total de 21 amostras de solo. As amostras foram coletadas com anéis metálicos (anéis volumétricos de Kopecky) de 98 cm³. Estas amostras foram envolvidas com filme plástico de PVC (policloreto de vinila) com intuito de se evitar a desestruturação e a perda de umidade.

1.3 DETERMINAÇÃO DA UMIDADE VOLUMÉTRICA PELO MÉTODO PADRÃO

1.3.1 Determinação do Teor de Umidade Gravimétrica

No Laboratório Hidrobiogeoquímico, primeiramente, foram pesados os 21 anéis contendo as amostras coletadas. Esta medição foi feita com o uso de uma balança de precisão marca Marte, modelo AD-330-0,001g (figura 3). A pesagem das amostras revelou a massa de solo úmido. Logo após, as mesmas foram levadas à estufa a 105° C por 48 h, para se determinar a massa de solo seco, necessária para se alcançar a umidade volumétrica (EMBRAPA, 1997).

Os valores foram obtidos através da seguinte fórmula:

$$\theta g = \frac{m_{wet} - m_{dry}}{m_{dry}} \quad (3)$$

Onde:

θg = Umidade gravimétrica (g);

m_{wet} = Massa úmida (g);

m_{dry} = Massa seca (g).

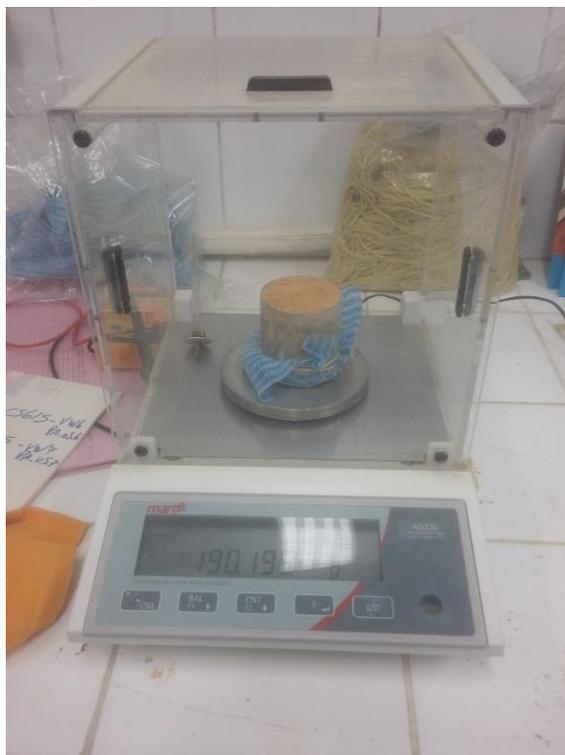


Figura 3 – Pesagem do peso úmido

1.3.2 Determinação da Densidade do Solo

O processo para determinação da densidade do solo seguiu o procedimento descrito conforme EMBRAPA (1997). Com os dados de volume e peso dos anéis volumétricos moldados em campo e pesados no laboratório, obteve-se a densidade do solo úmido e seco – antes e após secagem na estufa – através da razão entre massa sobre o volume da amostra.

Para o valor da variável foi utilizada a seguinte fórmula, conforme o manual do fabricante (CAMPBELL, 2012).

$$\rho_{bulk} = \frac{m_{dry}}{Volume_{cilindro}} \quad (4)$$

Onde

ρ_{bulk} = Massa específica (g.cm⁻³);

m_{dry} = Massa seca (g);

Volume = Volume do cilindro vazio (cm³).

1.3.3 Determinação da Umidade Volumétrica

Com os valores encontrados pelo método gravimétrico (EMBRAPA, 1997), foi possível determinar a umidade volumétrica, multiplicando-se a umidade gravimétrica pela densidade do solo seco.

Assim, as umidades volumétricas serviram de referência para as medidas coletadas pelos modelos de TDR's calibrados na pesquisa.

Para determinação da umidade volumétrica foi utilizada a seguinte fórmula (CAMPBELL, 2012):

$$\theta_v = \theta_g * \rho_{bulk} \quad (5)$$

Onde:

θ_v = Umidade volumétrica (cm³.cm⁻³);

θ_g = Umidade gravimétrica (g.g⁻¹);

ρ_{bulk} = Densidade do solo (g.cm⁻³).

1.4. PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

1.4.1 Preparação das Amostras no Laboratório Hidrobiogeoquímico

Nesta etapa, as sete amostras de 22 kg foram colocadas para secar em cima das bancadas do laboratório por um período de 336 h (14 dias). Após este período de secagem, para desfazer os torrões das amostras foi usado, cuidadosamente, um cilindro metálico para não comprometer a granulometria da partícula. Posteriormente, as amostras sofreram processo de peneiramento, em peneiras com malha de 2 mm (figura 4). Este procedimento foi necessário para se obter a Terra Fina Seca ao Ar (TFSA), imprescindível para o início da calibração.



Figura 4 – Processo de peneiramento para TFSA

1.4.2 Projeção do Corpo de Prova

As amostras de TFSA foram acondicionadas em tubos de PVC perfazendo raio de 10 cm e altura de 20 cm, com capacidade de acondicionamento de 6,283 cm³ figura 5.

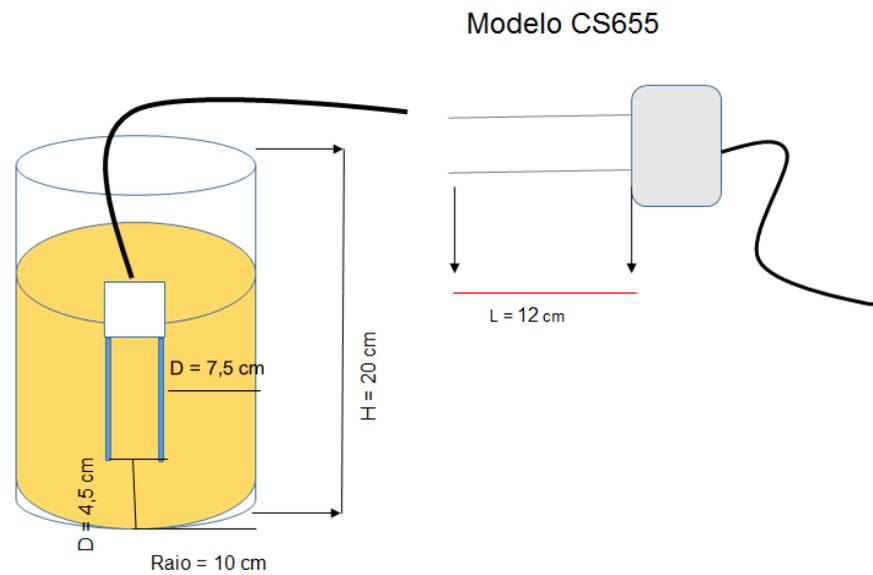


Figura 5 – Protótipo do corpo de prova

Foram construídos dois corpos de provas com as dimensões acima, para a calibração dos sensores TDR CS 655, cujo par de hastes possui 12 cm de seguimento.

As medidas dos referidos tubos seguiram rigorosamente as especificações da *Campbell Scientific* quanto ao volume de solo livre (presença apenas de solo, água e ar) necessário no interior dos cilindros.

Para que ocorra a detecção da constante dielétrica (K_a), é necessário no mínimo 7,5 cm de raio em torno de cada haste do sensor e 4,5 cm além do final delas

Na tabela 1 estão demonstradas algumas propriedades específicas do sensor emitidas pelo fabricante.

Tabela 1

Especificação do fabricante para o modelo TDR 655

Condutividade elétrica	
Faixa para solução EC	0 a 8 dS / m
Gama para CE em massa	0 a 8 dS / m
Acurácia	± (5% da leitura + 0,05 dS / m)
Precisão	0,5% de BEC
Permissividade dielétrica relativa	
Alcance	1 a 81
Acurácia	± (3% da leitura + 0,8) de 1 a 40 para solução CE ≤ 8 dS/m ± 2 (de 40 a 81 para solução CE ≤ 2,8 dS/m)
Precisão	<0,02
Teor de água Volumétrica	
Faixa	0 a 100% (com comando M4)
Acurácia do teor de água	± 1% (com calibração específica do solo) onde a solução EC < 3 dS/m ± 3% (típico do modelo VWC de fábrica) em que a solução CE < 10 dS/m
Precisão	<0,05%
Temperatura do solo	
Faixa	Faixa de -50 ° a + 70 ° C
Resolução	0,001 °C
Acurácia	± 0,1 °C (para temperaturas típicas do solo [0 a 40 °C] quando o corpo da sonda é enterrado no solo) ± 0,5 °C (para faixa de temperatura total)
Precisão	± 0,02 °C

1.4.3 Processo e Registro dos Sensores

Todas as medidas registradas pelos 7 TDR's empregados na calibração ocorreram com as amostras de solo contendo 0% (umidade da TFSA): 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% e 45% de umidade em relação aos volumes dos cilindros nº 1 e nº 2. Para isso, foram utilizados 311 ml de água para o acréscimo dos 5% de umidade. Quando a umidade aumentou em 10%, os volumes adicionados foram de 622 ml.

Cada vez que o solo era umedecido, este era disposto em uma bacia com capacidade para 50 l (figura 6), sendo cuidadosamente misturado quando pulverizado com água Milli-Q mais pura que a destilada para a homogeneização da umidade em toda a amostra.

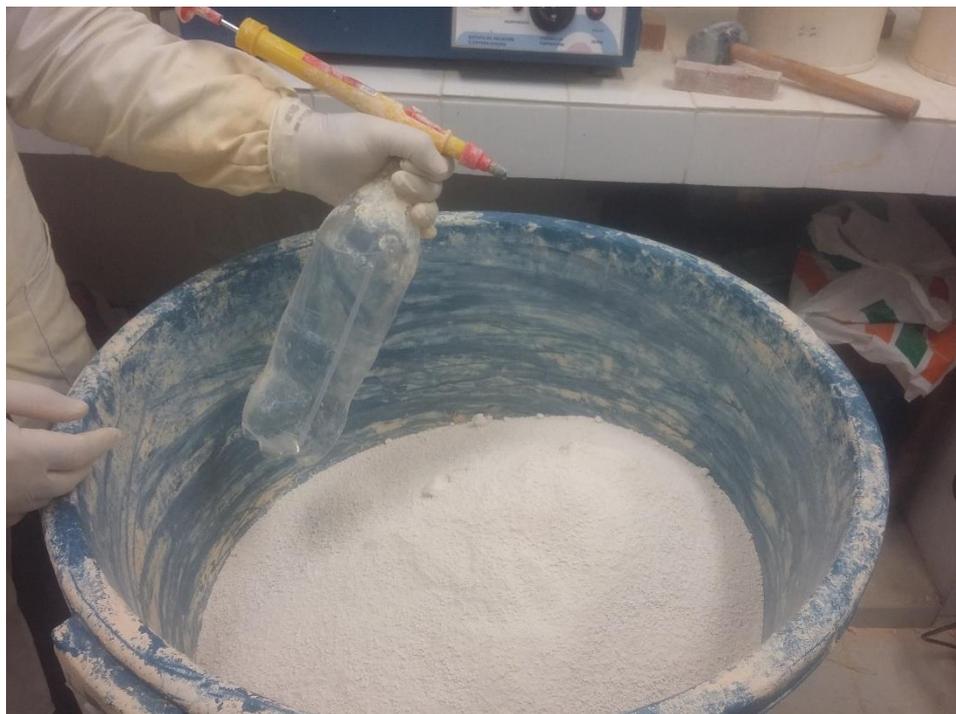


Figura 6 - Processo de umedecimento da amostra

Todo acréscimo de água no solo objetivou a alterar os teores de umidade para a determinação da constante dielétrica (k_a), através das sondas no corpo de prova (figura 7). Para tanto, o solo era acomodado e compactado levemente para que a densidade da amostra fosse representativa do local onde foi coletada (1,17; 1,14; 1,20; 1,11; 1,18; 1,30; 1,32 g.cm⁻³).



Figura 7 - Disposição do sensor no cilindro

No final de toda leitura com o sensor em cada ponto de umidade, eram retiradas duas amostras, usando-se os anéis de Kopeky, para a obtenção do teor de umidade gravimétrica (figura 8) para posterior conversão em umidade volumétrica, mediante a determinação da densidade de cada amostra.



Figura 8 – Amostragem após a leitura do sensor

Os sensores CS 655 (figura 9) foram programados para lançar uma média de 50 leituras, com intervalo de 1 segundo entre elas. Todos os sensores foram calibrados separadamente no cilindro nº 1 e replicados no cilindro nº 2, de modo a verificar a variação de conjuntos de valores de umidade volumétrica e constante

dielétrica. E através dos valores obtidos pelos dois corpos de prova foi calculada a média aritmética. Esta média foi tomada como valor de registro do sensor.

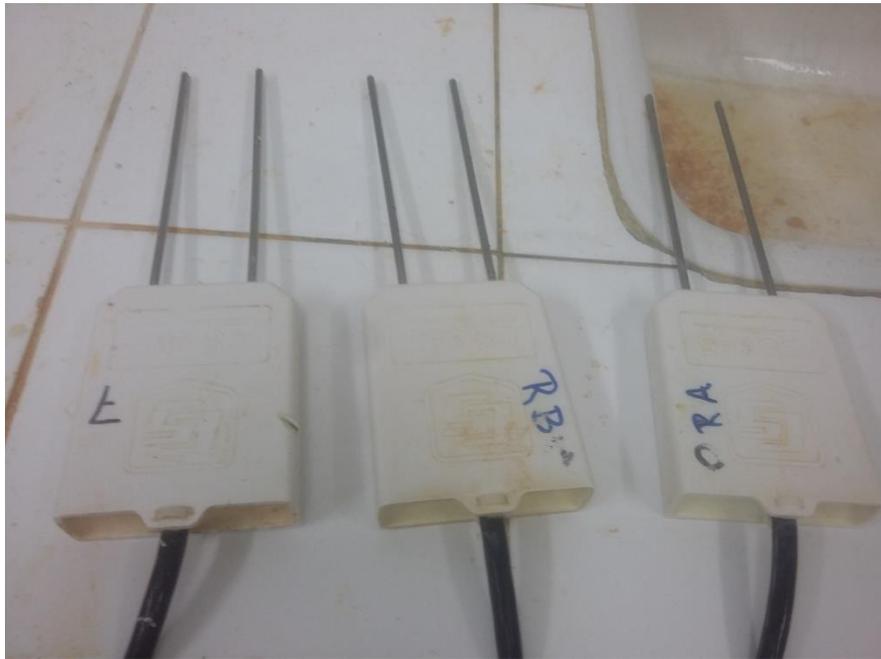


Figura 9 - Três modelos de sensores TDR CS655

Para o registro do sensor havia um sistema de aquisição de dados realizado pelo *datalogger*, modelo CR800 da *Campbell Scientific*, utilizando-se o programa PC200W 4.5 Datalogger Suport Software (figura 10).



Figura 10 – Sistema de aquisição de dados modelo CR 800

Foi calibrado um sensor para cada profundidade já citada anteriormente. Esta calibração também serviu para ratificação das medidas de umidade volumétrica e

constante dielétrica. Foram usados mais dois TDR's que forneciam dados instantâneos a partir da interface do dispositivo USB A200 da *Campbell Scientific*, usado tipicamente para configurar os sensores das séries CS650 e CS450, usando-se o Device Configuration Utility (Deviconfig) empregado em todas as profundidades.

1.4.4 Análise dos Dados

Para a calibração dos sensores TDR CS655 foram empregadas planilhas eletrônicas da Microsoft excel para os ajustes de curva, onde foram empregados análises de regressão para os modelos, quadrático, linear, exponencial, potência, polinomial e logarítmico, com a finalidade de escolher o modelo que se ajustasse mais adequadamente aos dados. Ressalta-se que o modelo mais apropriado foi o polinomial de terceiro grau; os demais modelos não estão descritos na metodologia deste trabalho.

1.4.4.1 Análises Granulométrica e Química

Separou-se 1 kg das amostras para as análises químicas e granulométricas do solo. Estas amostras foram encaminhadas para o Laboratório Temático de Solo e Planta - LTSP do INPA. As análises granulométrica e química se procederam conforme descrito em (EMBRAPA, 1997).

2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 2 são apresentadas as concentrações dos nutrientes encontrados em cada profundidade (0 a 1420 cm), correspondentes a cada nível do solo com seu equivalente teor de acidez, com valores entre 4,18 a 5,49 de pH, característicos de latossolos profundos e muito intemperizados (EMBRAPA, 2006).

As amostras dos pontos 3 (240 cm) não foram analisadas por falta de material amostral. Trabalho realizado por Ferraz *et al.* (2012) encontrou resultados semelhantes, com grau de acidez variando entre “muito ácido” (<4,5) e “ácido” (4,5 e 5,4) de pH. As condições de pH no nível de P1 (80 cm) se deve a sua proximidade da camada mais superficial do horizonte O (0 a 20 cm), em que os detritos mais antigos estão decompostos ou em estado de fermentação (LEPSH, 2013).

Tabela 2

Resultados da Análise Química do Latossolo Amarelo									
Nível do Solo	PH	P	K	Ca	Mg	Al	Fe	Zn	Mn
cm	H ₂ O	mg/kg			cmol _c /kg			mg/kg	
P1 - 80	4,18	0,19	4,10	0,03	0,02	0,86	15	0,79	0,95
P2 - 160	5,33	0,13	2,70	0,02	0,02	0,19	7	0,92	0,59
P4 - 480	5,22	0,10	1,30	0,03	0,02	0,00	3	0,37	0,24
P5 - 640	5,44	0,10	1,80	0,02	0,02	0,00	3	0,39	0,2
P6 - 880	5,49	0,10	4,60	0,07	0,07	0,00	3	0,77	0,24
P7 - 1420	5,22	0,10	0,33	0,02	0,01	0,49	3	0,64	0,31

Observa-se em P1 valores maiores na concentração de quatro minerais em relação aos demais níveis do solo: Fósforo (P), com 0,19 (mg/kg); Alumínio (Al), com 0,86 (cmol_c/kg), Ferro (Fe), com 15 (mg/kg) e Manganês (Mn), com 0,95 (mg/kg).

De acordo com a classificação de Ribeiro, Guimarães e Alvarez (1999), a concentração de P quando inferior a 2,7 mg/dm³ é considerada “baixa”, em solos com percentual de argila entre 60 a 100%. Por outro lado, quando a saturação por Al for superior a 80%, esta é tida como “muito elevada”, sendo este o caso da amostra P1, que foi de 93,38%. Com relação aos teores de Fe e Mn disponíveis, estes são classificados como “baixos” em P1.

Os valores mais elevados de macro nutrientes em camadas mais profundas se devem ao processo de lixiviação, associado ao regime de chuva característico da região amazônica (NETTO *et al.*, 2014).

As análises químicas realizadas reforçam as características do solo categorizada nos estudos de (JUNIOR *et. al*, 2011).

Na tabela 3 são demonstrados os resultados da análise referente à densidade e à textura do solo ao longo do seu perfil através do trabalho realizado por Broedel (2017) no ano de 2012 no poço.

Tabela 3

Análise da Densidade e Granulometria do Latossolo Amarelo				
Nível do solo (cm)	Ds g/cm ³	Argila	Silte %	Areia Total
P1-80	1,06	78,11	11,21	10,68
P2-160	1,08	73,85	18,19	7,97
P3-240	1,14	72,41	19,34	8,26
P4-480	1,12	64,26	20,36	15,38
P5-640	1,12	67,72	17,52	14,76
P6-880	1,20	64,77	15,81	19,42
P7-1420	1,29	58,80	15,60	25,59

A densidade encontrada variou entre 1,06 g/cm³ (80 cm) a 1,29 g/cm³ (1430 cm), demonstrando pequenas variações alternadas, aumento e diminuição, da densidade ao longo do perfil inteiro.

Na textura do solo pode-se notar que a maior porcentagem de argila (78.11%) está no P1 (80 cm), decaindo ao longo perfil, até os pontos P4 (480 cm) no P5 (640 cm) decorre um ligeiro aumento e volta a regredir nos dois últimos pontos chegando na sua menor porcentagem de 58,80%.

Para o silte, o primeiro nível do solo (P1) apresenta a menor porcentagem (11,21%). Porém, diferentemente da argila, a porcentagem de silte aumenta até o P4 (20,36%), e decai nos demais pontos até P7 chegando a 15,60 %.

Com relação à concentração de areia, não há um padrão como nos demais – argila e silte –, que diminuem ou aumentam de acordo com a profundidade do solo. Na areia, temos que o P7 apresenta a maior porcentagem (25,59%). Contudo, este mesmo ponto em relação a argila exhibe a menor porcentagem (58,80%).

Nesse estudo pôde-se observar uma gradação entre P5 (640 cm) e P6 (880 cm). Há diminuição da densidade e logo em seguida ocorre um aumento, seguindo com o decréscimo da concentração argila e o crescimento da concentração areia.

Estudos de Manieri et. al (2007) afirmam que as partículas das frações do solo como sais, densidade, concentração de argila maior que 60% podem influenciar a constante dielétrica.

Na figura 11 são apresentados os gráficos de dispersão da umidade volumétrica em função da constante dielétrica (K_a) para os dois métodos de obtenção de umidade volumétrica do solo que são o método gravimétrico (método direto) e através do método indireto usando o sensor CS 655 com uma equação já embutida (equação de Topp) para determinar o valor de umidade volumétrica.

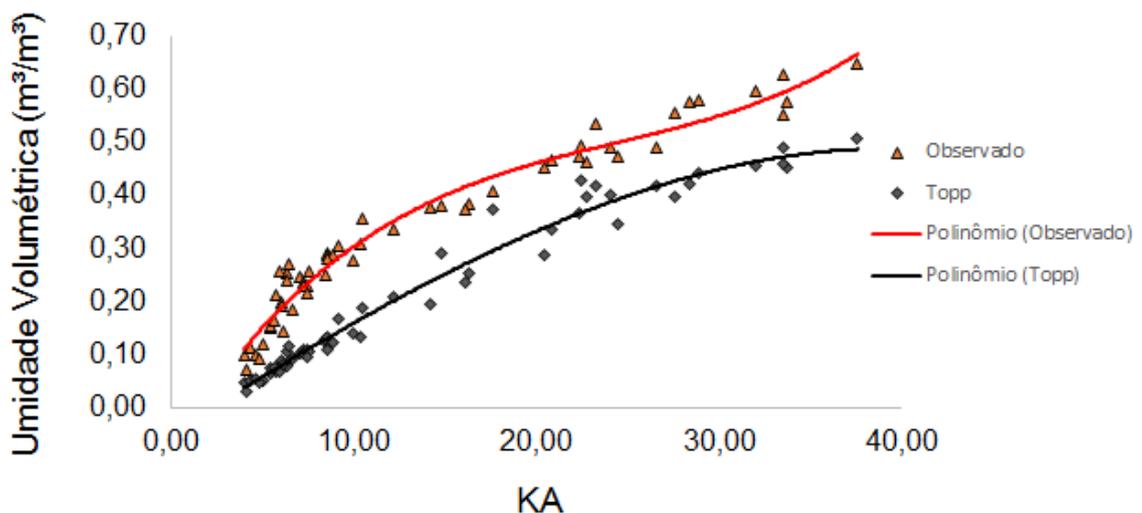


Figura 11: Dispersão dos valores de umidade volumétrica do sensor (Equação de Topp) e Método da Estufa.

Nota-se que a maior concentração dos valores observados se encontra nos extremos, abaixo de $0,3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ e para o sensor (Topp) estão abaixo de $0,2 \text{ m}^3/\text{m}^3$, demonstrando assim que os valores de umidade volumétrica são distintos para os dois métodos, sendo perceptível que a Equação de Topp subestima sistematicamente o conteúdo de água em relação ao método gravimétrico. Em estudo realizado com a mesma classe de solo, Tommaselli e Bacchi (2001) afirmam que o emprego da Equação geral de Topp não é apropriada para o cálculo da umidade volumétrica de solos argilosos por sofrer influências de suas características estruturais.

Corroborando com os resultados encontrado por Silva e Gervásio, (1999) em latossolos distroférico.

O Manual do Proprietário do sensor CS 655 (CAMPBELL, 2012) atesta que a precisão e acurácia do equipamento pode comprometer os resultados quando a faixa de umidade ultrapassar os 0,5 m³/m³. No entanto, utilizando-se o Método da Estufa, os valores de umidade volumétrica ultrapassam os valores de 0,5 m³/m³, chegando a 0,65 m³/m³, demonstrando assim que o sensor realmente subestima a umidade do solo argiloso.

A tabela 4 mostra todas as equações polinomiais cúbicas ajustadas e seus coeficientes de determinação (R²), para cada nível de profundidade. Os coeficientes de determinação variaram entre 0,95 (P2-160 cm) e 0,99 (P6-640 cm e P7-1420). Valores de coeficientes de determinação podem variar de 0 a 1 e quanto mais se próxima de 1 melhor o modelo explica os dados (JACQUES, 2003).

Tabela 4

Equações Polinomiais Cúbicas Ajustadas e seus Coeficientes de Determinação para cada Nível do Solo (cm)

Nível do Solo	Equação Ajustada	R²
P1 - 80	$y = 0,0002x^3 - 0,008x^2 + 0,1224x - 0,2656$	0,96
P2 - 160	$y = 0,0003x^3 - 0,014x^2 + 0,1871x - 0,4712$	0,95
P3 - 240	$y = 0,00006x^3 - 0,0032x^2 + 0,072x - 0,1433$	0,98
P4 - 480	$y = 0,00008x^3 - 0,0043x^2 + 0,0894x - 0,2215$	0,99
P5 - 640	$y = 0,000006x^3 - 0,0005x^2 + 0,0267x - 0,0733$	0,98
P6 - 880	$y = 0,00006x^3 - 0,0039x^2 + 0,0876x - 0,2294$	0,98
P7- 1420	$y = 0,00002x^3 - 0,0018x^2 + 0,0545x - 0,1176$	0,99

Os dados de umidade volumétrica dos valores observados nos sete níveis de solo, obtidos através do Método da Estufa e os respectivos valores de suas constantes dielétricas alcançadas pelo equipamento TDR estão representados na figura 12.

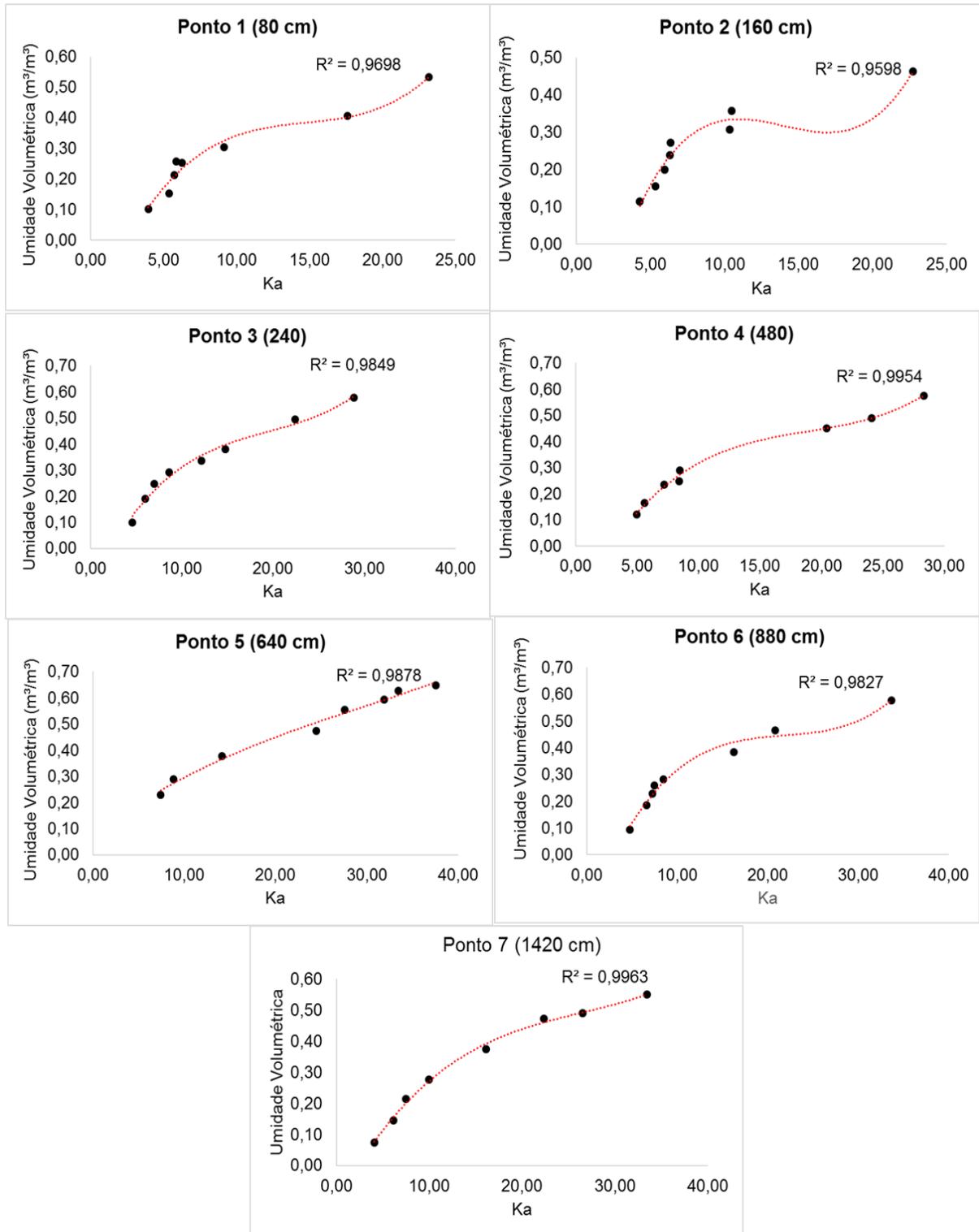


Figura 12 - Curvas de calibração da umidade volumétrica em função da constante dielétrica para cada ponto amostral.

Os gráficos de dispersão expostos na figura 12 demonstram a correlação da umidade volumétrica do solo, em função de sua constante dielétrica (ka), para cada ponto amostrado, revelando correlação positiva. Isto ocorre porque os valores das

variáveis quantitativas – constante dielétrica e umidade volumétrica – aumentam na mesma proporção a um nível de correlação de 0,96.

Verifica-se também que a maior parte dos dados observados em cada nível, concentra-se na faixa de umidade volumétrica entre 0 e 0,5 m³/m³; e para constante dielétrica (k_a) fica entre 5 e 10.

2.1 ESTATÍSTICA DA EQUAÇÃO AJUSTADA

Nas tabelas 5 e 6, estão demonstrados os valores da estatística da regressão linear múltipla para os valores das sete camadas do solo em uma única equação. A equação ajustada apresentou um coeficiente de determinação $R^2 = 0,96$ a nível de significância de $p < 0,05$ conforme demonstrado na tabela da estatística da regressão e na tabela de análise de variância.

Tabela 5
Coeficientes de Determinação da Regressão
Estatística de Regressão

R múltiplo	0,98
R^2	0,96
R^2 Ajustado	0,96
Erro Padrão	0,03
Observações	56

Tabela 6
Resumo da Análise de Variância da Equação Ajustada

	GL	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	3	1,3292	0,443	461,9	1,8841E-37
Resíduo	52	0,0499	0,001		
Total	55				

A tabela da análise variância com nível de significância $p < 0,05$ mostrou que existe correlação entre a variável explicativa k_a e a variável resposta umidade volumétrica.

Tabela 7
Coefficientes Angulares e Linear da Equação Ajustada

	Coefficiente	Erro Padrão	Stat t	Valor p	95% Inferior	95% Superior
Interseção	-0,073691	0,02953	-2,4958	0,01578	-0,1322938644	-0,01444325
Ka	0,053982	0,00650	8,2998	0,00000	0,040930829	0,067033287
Ka²	-0,001876	0,00037	-5,0224	0,00001	-0,002625555	-0,001126475
Ka³	0,000026	0,00001	4,1092	0,00014	0,000013117	0,0000381

$$Y = 0,000026Ka^3 - 0,001876ka^2 + 0,053982ka - 0,073691$$

Para a validação dos coeficientes angulares da equação ajustada, não basta apenas possuir valores menores que o nível de significância mas também satisfazer os pressupostos da regressão que são a observância da homogeneidade da variância e normalidade nos resíduos para que a equação seja validada.

Os testes de normalidade foram alcançados através dos valores residuais entre os valores observados menos o estimado da umidade volumétrica. Para fazer as análises da variância dos dados em torno do eixo x foi trabalhado a relação entre o valor estimado e desvio padrão com a finalidade de se encontrar uma variação constante e homogênea (figura 13), distribuída ao longo da faixa de umidade. A distribuição dos dados de forma homogênea é um pressuposto para se considerar uma variação constante e normal (JACQUES, 2003)

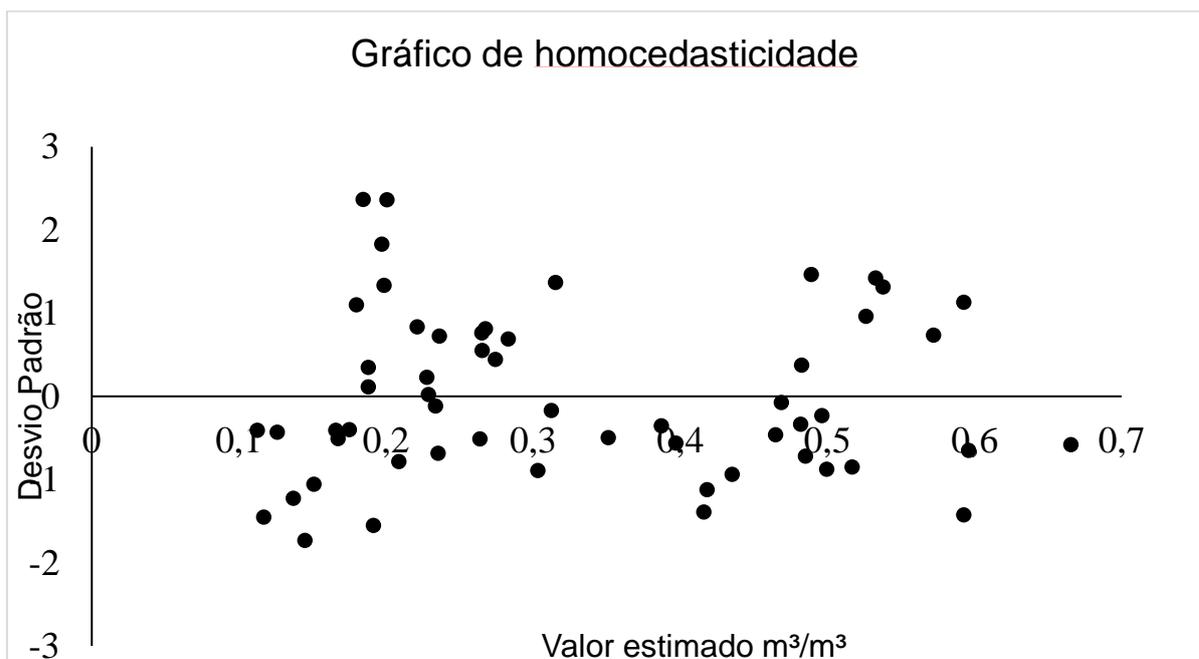


Figura 13 - Disposição dos resíduos do valor estimado versus desvio padrão

Para a análise de normalidade dos resíduos, demonstrados na figura 14 mostram valores de probabilidade dos dados caso seguissem normal. Pode-se analisar que através do comportamento dos resíduos é possível avaliar se as suposições para a regressão são satisfatórias ou não e que permite confiar nos resultados das previsões. Na figura 15 estão dispostas as curvas de calibração entre a constante dielétrica e a unidade volumétrica para os valores observados, estimados e equação de TOPP.

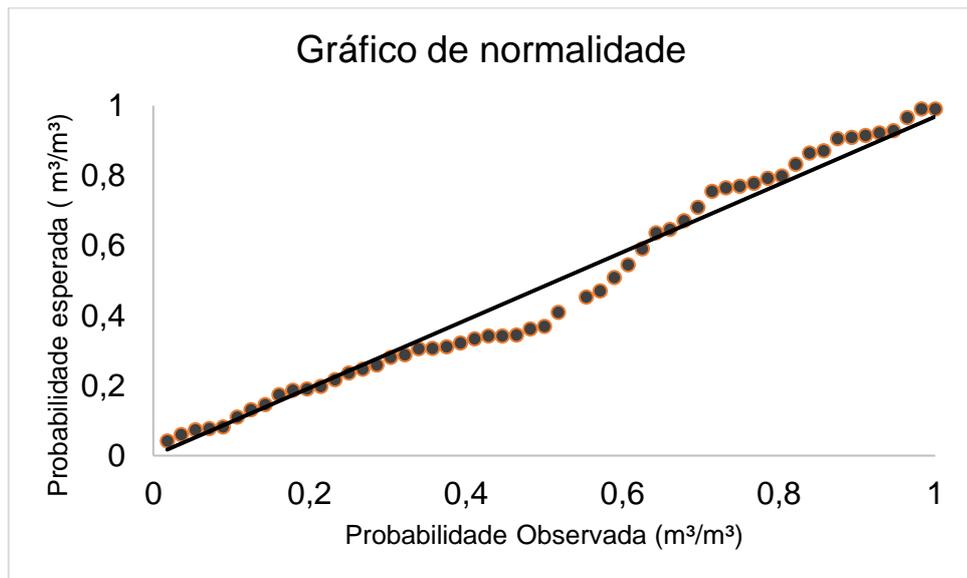


Figura 14- Gráfico da probabilidade observada versus a probabilidade esperada

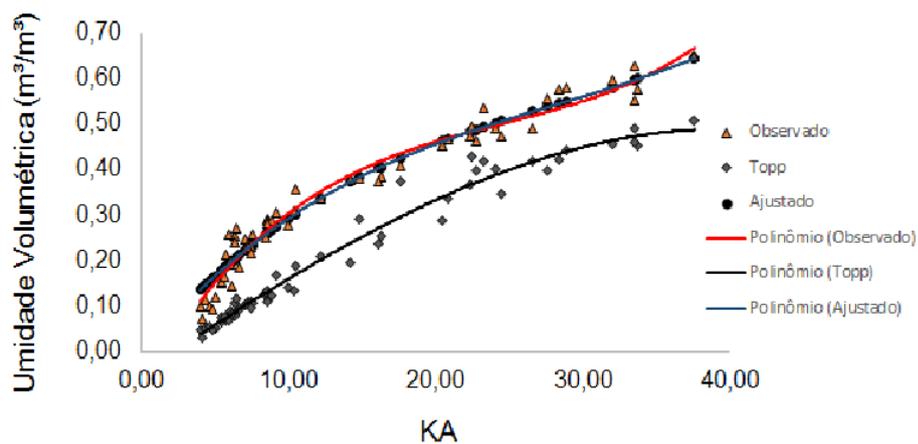


Figura 15 - Umidade volumétrica versus constante dielétrica para os três modelos polinomiais

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em condições de laboratório, o modelo polinomial cúbico foi $y = 0,000026 \cdot K^3 - 0,001876 \cdot k^2 + 0,053982 \cdot ka - 0,073691$ o que melhor se ajustou aos dados com coeficiente de determinação de 0,96.

Para determinação do teor de umidade para latossolos amarelos, a Equação de Topp embutida no TDR subestima os valores reais de umidade volumétrica. O equipamento pode ser útil para fornecer a constante dielétrica e através da equação única gerada neste trabalho é possível utilizá-la para realizar estimativas de teor de umidade volumétrica reais em latossolos amarelos nos níveis de 80, 160, 240, 480, 640, 880 e 1420 cm de profundidade.

Na mesma proporção, a quantificação do teor de umidade do solo através da Equação de Ajuste possibilita conhecer a dinâmica da água e sua interação com o solo.

Consequente, pode-se gerar dados acurados de umidade volumétrica importantes e utilizados nas Ciências Exatas e Ambientais, como Modelagem Climática, Hidrologia, Meteorologia, dentre outras, principalmente as relacionadas ao estudo do complexo sistema solo-água-planta-atmosfera.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, Camilo de L. T. de; COSTA, Édio L. da; ALBUQUERQUE, Paulo E. P. de. Desenvolvimento calibração de guias de onda para TDR. **Revista Brasileira de engenharia agrícola**, Campina Grande, v.7, n. 1, p. 173–176, 2003.
- BROEDEL, E. et al. Deep soil water dynamics in an undisturbed primary forest in central Amazonia: Differences between normal years and the 2005 drought. **Hydrological Processes**, v. 31, n. 9, p. 1749–1759, 2017.
- CAMPBELL SCIENTIFIC INC. **CS650 and CS655 Water Content Reflectometers Instruction Manual**, 2012. Disponível em: <www.campbellsci.com.> Acesso em: 10 de oct. 2019.
- COELHO, M. et al. Solos: tipos, suas funções no ambiente, como se formam e sua relação com o crescimento das plantas. **Embrapa**, 2013.
- COSTA, F. DOS S. et al. **CALIBRAÇÃO DE SENSOR DIELÉTRICO EM DIFERENTES TIPOS DE SOLO**, 2014. (Nota técnica).
- EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Rio de Janeiro, 2007.
- EMBRAPA, Empresa B D. P. A. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 2006.
- FAULIN, Gustavo Di Chiacchio. Variabilidade espacial do teor de água e sua influência na condutividade elétrica do solo. **Dissertação Mestrado**, p. 63, 2005.
- FERRAZ, J. B. S. et al. **A FLORESTA AMAZÔNICA E SUAS MÚLTIPLAS DIMENSÕES** : Uma proposta de educação ambiental. In: A floresta e o solo [s.l: s.n.]. p. 101 a 119.
- GOMES, R. J. et al. Reflectometria No Domínio Do Tempo (Tdr) Como Instrumento Para a Mensuração Da Umidade Do Solo Na Bacia Do Alto Ipanema-Pe. **Water**, p. 18–20, 2010.
- GUIMARÃES, P. L. O. et al. **PROPOSTA DE PROCEDIMENTO PARA CALIBRAÇÃO DE SENSORES E MEDIDORES DE UMIDADE DO SOLO (SOIL MOISTURE)**. 2010. Disponível em: <http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.19.11.37/doc/Guimaraes_Proposta.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2018
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia**: Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/graficosClimaticos>>. Acesso em: 17 nov. 2018.
- JUNIOR, José Frutuoso do Vale *et al.* Solos da Amazônia: etnopedologia e desenvolvimento sustentável. **Revista Agro@ambiente**, v.5, n.2, p. 158-165. Boa Vista - RR, 2011.

LBA - The Large Scale Atmosphere - Biosfere Experiment in Amazônia. Missão e História. Disponível em: <<http://lba2.inpa.gov.br/index.php/estacoes-de-pesquisa/zf-2-manauas/missao-historia.html>>. Acesso em: 13 nov. 2018.

LEPSH, I. F. **Formação e Conservação dos Solos.** 2.ed. São Paulo: Câmara Brasileira do Livro, Brasil, 2010.

LIMA, A. J. N. et al. Análise da estrutura e do estoque de fitomassa de uma floresta secundária da região de Manaus AM, dez anos após corte raso seguido de fogo. **Acta Amazonica**, v. 37, n. 1, p. 49–53, 2007.

MELO, A. G. **CALIBRAÇÃO DE DISPOSITIVO TDR (TIME DOMAIN REFLECTOMETRY) PARA ESTIMATIVA DE UMIDADE VOLUMÉTRICA EM LATOSSOLO.** Cerro Largo - RS, 2017. Disponível em: <<https://rd.uffs.edu.br/bitstream/prefix/1876/1/MELO.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2018

NETTO, Paulo Artaxo. **As dimensões científicas, sociais e econômicas do desenvolvimento da Amazônia.** In: Evento FAPESP-INPA-Wilson Center. Manaus, 16 de Agosto de 2018.

NETTO, Paulo Artaxo *et al.* Perspectivas de pesquisas na relação entre clima e o funcionamento da floresta amazônica. **Ciência e Cultura**, v. 66, n. 3, p. 6, 2014.

NOBRE, A. D. **O Futuro Climático da Amazônia**, 2014.

RIBEIRO, Antônio Carlos; Paulo Tácito G.; Alvarez, Vítor Hugo. **Recomendações Para o Uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais**, 1999.

SILVA, Elio Lemos da; GERVÁSIO, Eliezer Saturbano. Uso do instrumento tdr para determinação do teor de água em diferentes camadas de um latossolo roxo distrófico. p. p.417-420, 1999.

TOMMASELLI, José Tadeu Garcia; BACCHI, Osny Oliveira Santos. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, 2001.

VILLWOCK, R. Calibração de um equipamento tdr em condições de campo. n. May, 2016.