

UFRRJ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM
MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL

DISSERTAÇÃO

**Modelagem Fuzzy Aplicada à Estimativa da Umidade do
Solo da Formação Solimões - AM**

Marcio Prudêncio Belleza

2014



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM MATEMÁTICA E
COMPUTACIONAL**

**MODELAGEM FUZZY APLICADA À ESTIMATIVA DA UMIDADE DO
SOLO DA FORMAÇÃO SOLIMÕES – AM**

MARCIO PRUDÊNCIO BELLEZA

Sob a orientação da Professora
Rosane Ferreira de Oliveira

e Co-orientação do Professor
Marcos Bacis Ceddia

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, Área de Concentração em Modelagem Matemática e Computacional.

Seropédica, RJ
Outubro de 2014

004.0151

B442m

T

Belleza, Marcio Prudêncio, 1979-
Modelagem Fuzzy aplicada à estimativa da
umidade do solo da formação Solimões - AM/
Marcio Prudêncio Belleza. - 2014.
74 f.: il.

Orientador: Rosane Ferreira de Oliveira.
Dissertação (mestrado) - Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de
Pós-Graduação em Modelagem Matemática e
Computacional, 2014.

Bibliografia: f. 53-56.

1. Computação - Matemática - Teses. 2.
Modelos matemáticos - Teses. 3. Física do
solo - Processamento de dados - Teses. 4.
Solos - Umidade - Processamento de dados -
Tese. 5. Lógica difusa - Teses. I.
Oliveira, Rosane Ferreira de, 1963- II.
Universidade Federal Rural do Rio de
Janeiro. Curso de Pós-Graduação em
Modelagem Matemática e Computacional. III.
Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM MATEMÁTICA E
COMPUTACIONAL**

MARCIO PRUDÊNCIO BELLEZA

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, Área de Concentração em Modelagem Matemática e Computacional.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 02/10/2014.

Rosane Ferreira de Oliveira. Dra. UFRRJ
(Orientadora)

Claudia Mazza Dias. Dra. UFRRJ

Geraldo Lúcio Diniz. Dr. UFMT

DEDICATÓRIA

À minha mãe, Dilcea, e ao meu pai, Marcio (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, minha maior professora e investidora dos meus sonhos;
À minha esposa, Milena, fonte das minhas inspirações;
À minha tia Terezinha, minha guia com sábias palavras;
À Sildeia, minha madrinha e admiradora que, independente do momento, sempre esteve presente com seu espírito acolhedor;
À minha sogra Marilene, pela hospedagem e carinho durante a realização de boa parte deste estudo;
A todos da minha família, minha maior torcida;
Aos meus amigos, Ebert Viard, Augusto Garcia, Edgar Lima, Darlison Fernando Silva, Fábio Castro, Felipe Leite, Bruno Nascimento, Diego Brandão, Arnaldo Siqueira e Leonardo Melo, pelas conversas que equilibram minha vida;
À Profa. Dra. Rosane F. de Oliveira, amiga e orientadora acadêmica e de vida, exemplo de profissionalismo;
Ao Prof. Dr. Marcos B. Ceddia, por proporcionar meios para que toda pesquisa fluísse;
À Profa. Dra. Priscila M. V. Lima, pela gestão e carinho que conduziram o início deste trabalho;
Aos Professores Wanderson Lambert, Duílio T. da Conceição Júnior, Robson Mariano, Angel R. S. Delgado, Clarissa O. da Silva, Camila S. de Magalhães e Ana Paula P. Wyse, pela dedicação e empenho nos cursos ministrados;
Aos meus amigos de mestrado, Arnaldo Cesar Oliveira, Diogo Pinho, Fábio Cardozo, Tanise Santos, Leandro Guilherme Alves, Felipe Lins, Alessandro Calin, Ronilson Pinho, Charlan Dellon Alves, Eluã Ramos e Ítalo Vale, exemplo de equipe;
À secretária Janaína, sempre presente e pronta para cuidar da minha vida acadêmica;
Ao Prof. Dr. Moises M. de Araujo, pelas suas palavras motivadoras que servirão como trilhos nessa minha jornada;
À Profa. Dra. Claudia Mazza Dias, pelo carinho e pela contribuição demonstrados na realização deste trabalho;
Ao Prof. Dr. João Frederico da Costa Azevedo Meyer, pela colaboração na simulação;
Ao Prof. Dr. Geraldo Lúcio Diniz, pela dedicação ao se deslocar de tão longe e pela contribuição na fase final deste trabalho;
À Petrobras, por acreditar na pesquisa brasileira e ceder dados de seu relatório para a realização deste trabalho;
A CAPES, pelo fomento das atividades realizadas nessa fase muito especial da minha vida;
A todos da UFRRJ que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação.

RESUMO

BELLEZA, Marcio Prudêncio. **Modelagem fuzzy aplicada à estimativa da umidade do solo da Formação Solimões – AM.** 2014. 74p. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional). Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2014.

Este estudo propõe um modelo matemático para a estimativa da umidade do solo. É utilizada a matemática *fuzzy* e, mais especificamente, um controlador *fuzzy*. Os dados utilizados para a calibração do modelo correspondem a um levantamento de solos em escala detalhada referentes a um relatório da Petrobras, de 2010. A região de estudo foi a Base de Operações Geólogo Pedro de Moura (BOGPM) em Coari, Manaus – AM. O modelo foi sensível ao detectar a influência do carbono orgânico e outras propriedades do solo na curva de retenção de água no solo. A simplicidade da modelagem e simulação do controlador *fuzzy* é outro fator relevante quando comparado com modelos tradicionais. O erro absoluto médio é utilizado na área de física do solo e o modelo errou em média 0,021. Se comparado aos 2% do erro do TDR, informado por Gardner (1986), a estimativa gerada pelo modelo é bem razoável. O erro relativo médio foi de 8,1%. Portanto, os resultados estimados orientam para uma aplicação da lógica *fuzzy* em áreas com carência de curva de retenção ou regiões adjacentes a áreas com umidades observadas a fim de otimizar tempo e custo em projetos que visam o uso racional de recursos hídricos ou a previsão de impactos ambientais.

Palavras-chave: Modelo *fuzzy*. Água no solo. Física do solo.

ABSTRACT

BELLEZA, Marcio Prudêncio. **Fuzzy modeling applied to estimate soil water content from the Solimões Formation - AM.** 2014. 74p. Dissertation (Master in Computational and Mathematical Modeling). Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2014.

This work was conducted with soil data from Solimões Formation, available in one report from Petrobras of year 2010. The study area was the Base of Operations Geologist Pedro de Moura (BOGPM) in Coari, Amazonas, Brazil. The objective of this work was to estimate water content of soil from Solimões Formation using a fuzzy controller implemented on Fuzzy Logic Toolbox of MATLAB[®]. The model estimated the soil water content with mean relative error of 8.1% and a mean absolute error of 0.021. The model was sensitive to detect the influence of organic carbon and other soil properties to estimate the water retention curve. The simplicity of the modeling and simulation of the fuzzy model is also an advantage. Therefore, the results obtained by the model can be applied in areas without water retention curve to optimize time and cost for projects of water resources or environmental impacts.

Key Words: Fuzzy model. Soil water content. Soil physics.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 A Água no Solo	4
2.1.1 Curva de retenção de água no solo	7
2.1.2 Modelos matemáticos para descrever o fluxo de água no solo	9
2.2 Lógica <i>Fuzzy</i>	12
2.2.1 A lógica clássica e a lógica <i>fuzzy</i>	16
2.2.2 Propriedades físicas do solo como variáveis linguísticas	18
2.2.3 Aplicações de lógica <i>fuzzy</i>	26
3 MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1 Área de Estudo	27
3.2 Dados de Solo	27
3.3 Modelagem <i>Fuzzy</i>	30
3.4 Validação do Modelo	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5 CONCLUSÕES	52
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
APÊNDICE	57
ANEXOS	64
A - Análises Físicas e Químicas do Perfil P054	64
B - Análises Físicas e Químicas do Perfil P101	65
C - Análises Físicas e Químicas do Perfil P051	66
D - Análises Físicas e Químicas do Perfil P045	67
E - Análises Físicas e Químicas do Perfil P049	68
F - Análises Físicas e Químicas do Perfil P061	69
G - Análises Físicas e Químicas do Perfil P058	70
H - Análises Físicas e Químicas do Perfil P037	71
I - Análises Físicas e Químicas do Perfil P106	72
J - Análises Físicas e Químicas do Perfil P150	73
K - Análises Físicas e Químicas do Perfil P035	74

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior detentor de água doce do mundo, com 12% das reservas mundiais. Desse volume, 70% estão disponíveis na Bacia Amazônica, onde residem apenas 7% da população, enquanto os 30% restantes abastecem 93% dos consumidores (Biassusi, 2001).

Na produção vegetal, a água é fator decisivo para o desenvolvimento das culturas, assim seu manejo racional torna-se um imperativo tanto para a maximização da produção agrícola quanto para a preocupação em relação à sua futura escassez (Doorenbos e Kassam, 1979; English, 2002; Reichardt e Timm, 2004). É possível estudar a relação entre o suprimento de água e os rendimentos da cultura, exprimir a produtividade como função da água, como podemos encontrar nos trabalhos de Hanks (1974), Frizzone (1997), Carvalho *et al.* (2000) e Delgado *et al.* (2010).

Do ponto de vista agrônômico, é de fundamental importância conhecer a quantidade de água armazenada em um perfil de solo em um dado instante (Reichardt e Timm, 2004). Sendo essa quantidade determinada pela umidade do solo que, quando relacionada com as partículas do solo por uma força de ligação, gera a curva de retenção.

A curva de retenção de água no solo é necessária em estudos relacionados com o balanço hídrico e com a disponibilidade de água para as plantas, com a dinâmica da água e solutos no solo, com a infiltração e manejo de irrigação (Tormena e Silva, 2002).

Segundo Klute (1986 *apud* Tormena e Silva, 2002), os métodos utilizados na determinação da curva de retenção de água no solo demandam muito tempo, são tediosos e caros. Para Klar (1988) existem alguns métodos disponíveis para se medir a umidade do solo, todos apresentando limitações, ou de precisão, ou por serem dispendiosos, ou excessivamente morosos.

Desse modo, Angelotti Netto (2007) afirma que a pesquisa por modelos capazes de descrever o transporte de água e solutos no solo tem se tornado de grande importância prática na atualidade, sobretudo para se obter um melhor manejo ambiental e otimização das práticas agrícolas. Bardossy e Disse (1993) citam que recentes preocupações ambientais têm direcionado, novamente, a atenção dos hidrologistas para o problema de movimento de água no solo não saturado.

O fluxo de água no solo é, classicamente, modelado matematicamente pela equação de Richards (Reichardt e Timm, 2004; Mallants *et al.*, 2011). No entanto, um dos problemas apontados por Jury *et al.* (2011) como desafio é a modelagem de fluxos instáveis no solo (quando as forças gravitacionais superam as viscosas), com características que restringem a aplicação da equação de Richards. Segundo Chalkidis *et al.* (2007), problemas de fluxo de água no solo são geralmente muito difíceis de simular devido à incerteza dos parâmetros hidráulicos envolvidos.

As imprecisões afetam os parâmetros dos modelos matemáticos que são utilizados. Esta indefinição dos parâmetros tem uma grande influência sobre os resultados aritméticos e deve ser levada em conta durante os cálculos (Halkidis *et al.*, 2009).

A Teoria de Conjuntos *Fuzzy*, proposta por Zadeh (1965), e a Teoria da Probabilidade são ferramentas matemáticas que lidam com incertezas. Segundo Barros e Bassanezi (2006), a incerteza proveniente da aleatoriedade de eventos está bem desenvolvida, ocupando um lugar de destaque na galeria da matemática por meio da Teoria da Probabilidade. Porém, Massad *et al.* (2008 *apud* Missio e Barros, 2009) reportam que essa teoria não consegue, na maioria das vezes, abordar o problema da ignorância e da subjetividade. Segundo esses autores, em epidemiologia a ignorância resulta de erros de medida e a subjetividade é decorrente do

desconhecimento de parte do processo. Nesses casos, a Teoria de Conjuntos *Fuzzy* pode ser considerada como uma das ferramentas matemáticas mais poderosas para lidar com tais incertezas, imprecisões e verdades parciais (Missio e Barros, 2009).

Muitas áreas da ciência do solo estão sendo beneficiadas com as aplicações de conjuntos *fuzzy*, são elas: controle do potencial matricial (Lima *et al.*, 2010), erosão do solo (Cohen *et al.*, 2008; Mitra *et al.*, 1998), infiltração da água no solo (Bardossy e Disse, 1993), qualidade do solo (Torbert *et al.*, 2008), estimativa da densidade do solo (Benini, 2007), sistema de irrigação (Feliciano, 2012), balanço hídrico (Chalkidis *et al.*, 2007), dinâmica da água e solutos no solo (Souza, 2007), estimativa da curva de retenção de água no solo utilizando redes neurais artificiais (Soares *et al.*, 2014) e muitas outras encontradas em McBratney e Odeh (1997). Por exemplo, Soares *et al.* (2014) apresentaram uma rede neural com erro relativo médio de 13,28% para estimar a curva de retenção de água para solos do Rio Grande do Sul.

Os trabalhos de Benini (2007), Souza (2007) e Lima *et al.* (2010) estão diretamente relacionados com este estudo, uma vez que serviram como motivadores e em alguns momentos como parâmetros de eficiência e ajustes.

Benini (2007) propôs um sistema inteligente combinando *fuzzy* com rede neural para estimar a densidade do solo em estudos de compactação do solo, considerando a resistência a penetração (em kPa), a umidade do solo (em %) e a textura do solo (em percentual de argila). Somente a resistência a penetração e a umidade do solo foram fuzzificadas. Os resultados considerados melhores na simulação obtiveram erros relativos médios de 3,1% para solos com teores de argila menores que 30%, de 2,8% para solos com teores de argila entre 30 e 50%, e de 3,8% para solos com teores de argila superiores a 50%.

Segundo Mohamed e Hawas (2004 *apud* Souza, 2007), as redes neurais requerem um grande esforço computacional e tanto a escolha de um modelo de rede neural quanto o ajuste dos parâmetros associados ao algoritmo de aprendizagem são bastante difíceis e requerem uma grande experiência.

Lima *et al.* (2010) apresentam um sistema de controle inteligente *fuzzy* para definir o momento de irrigação, utilizando o método de Mamdani disponível no MATLAB[®]. As variáveis linguísticas de entrada foram a condutividade hidráulica do solo, o potencial matricial da água no solo e a pressão utilizada no conjunto motor-bomba do sistema de irrigação. A saída do controlador *fuzzy* foi a velocidade de rotação da bomba. Os resultados obtidos maximizaram a produtividade das culturas e a economia com gastos operacionais e minimizaram o uso da água e o consumo de energia.

Souza (2007) propôs um modelo *fuzzy*, baseado no modelo apresentado por Bardossy e Disse (1993), para descrever a dinâmica da água e de solutos no solo na direção vertical, considerando uma base de regras (com 37 regras) construída a partir de um conjunto de dados teóricos (conjunto de treinamento), obtido a partir da simulação numérica das equações diferenciais parciais que regem a dinâmica da água no solo. As simulações foram realizadas no software Hydrus_2D e o modelo *fuzzy* foi construído no MATLAB[®] 6.5. O modelo *fuzzy* mostrou-se pouco eficiente quando comparado com os dados experimentais, com muitos erros relativos médios superiores a 100%. Porém, quando comparado com os dados simulados pelo Hydrus_2D, o modelo mostrou-se promissor para descrever tal dinâmica.

Segundo Šimůnek *et al.* (1999 *apud* Souza, 2007), o Hydrus_2D é um modelo computacional que simula escoamentos bidimensionais de água, movimento de calor, transporte de solutos em meios variavelmente saturados e possibilita a implementação de uma cadeia extensa de condições de contorno e heterogeneidades do solo.

Nosso trabalho constitui-se em um estudo aplicado à física do solo, precisamente a dinâmica da água no solo. Pretendíamos, inicialmente, adicionar à abordagem clássica, a equação de Richards, uma equação diferencial parcial não linear, um componente novo, a

modelagem *fuzzy*. Porém, abordamos apenas um parâmetro dessa equação, a curva de retenção.

Propomos um modelo para estimar a umidade do solo considerando a textura e o potencial matricial do solo, usando um controlador *fuzzy*. Os métodos de inferência e defuzzificação do controlador foram, respectivamente, o de Mamdani e o centro de área. Escolhemos a textura por ser o principal determinante da retenção de água no solo (Reichardt, 1987). A escolha pelo potencial matricial e umidade do solo justifica-se pela relevância da curva de retenção de água no solo.

Nosso objetivo é estimar a umidade do solo da formação Solimões, aplicando lógica *fuzzy* via o software MATLAB[®] (colaboração do professor-pesquisador Dr. João Frederico C. Azevedo Meyer, do DMA-IMECC/UNICAMP).

Para validar nosso modelo *fuzzy*, dados de umidade e de textura do solo foram cedidos pela Petrobras (2010), que correspondem aos estudos de levantamento de solos, coordenado pelo Prof. Marcos Bacis Ceddia, referentes à área onde a Petrobras explora gás natural e petróleo. Essa área está inserida na formação Solimões, no Estado do Amazonas, cujas águas e demais recursos naturais destacam-se nos interesses nacionais.

Nosso modelo se difere do trabalho de Benini (2007), principalmente, no tratamento dos dados, quando deixamos de usar as redes neurais e optamos pelas ferramentas estatísticas por razões defendidas, anteriormente, por Mohamed e Hawas (2004 *apud* Souza, 2007). Uma diferença relevante entre nosso modelo e o proposto por Lima *et al.* (2010) é a sobreposição de funções de pertinência, considerada por nós e defendida por Benini (2007) e pelo modelo “Previsão de salinidade no estuário de Cananéia e Ilha Comprida” de Ranulfo Paiva Sobrinho (Barros e Bassanezi, 2006). A diferença fundamental entre Souza (2007) e nosso modelo é a não utilização do software Hydrus_2D para alcançarmos resultados promissores.

Além do interesse de Petrobras (2010) em conhecer a dinâmica da água no solo a fim de prever a contaminação da água e do solo, adicionamos a esta previsão a preocupação com a futura escassez de água e o seu uso racional na produção agrícola. Dessa forma, nosso modelo ajusta parâmetro (curva de retenção) considerando a incerteza.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Objetivando uma melhor compreensão dos capítulos a seguir, fundamentações teóricas referentes à água no solo e à lógica *fuzzy* serão apresentadas nesse capítulo. Para o estudo da água no solo, conceitos e definições darão suporte para os elementos essenciais na modelagem proposta neste trabalho: a umidade do solo, o potencial matricial e a textura do solo.

Já para o estudo da lógica *fuzzy*, além de conceitos e definições, também serão apresentados exemplos que contribuirão para a formação de uma base sólida sobre controlador *fuzzy* aplicado para estimar a umidade do solo.

2.1 A Água no Solo

O termo solo refere-se à camada externa e agriculturável da superfície terrestre (Reichardt e Timm, 2004). Segundo esses autores, a origem do solo é a rocha que, por ação de processos físicos, químicos e biológicos de desintegração, decomposição e recombinação, se transformou no decorrer das eras geológicas, em material poroso com características peculiares.

Sob a ação desse conjunto de fenômenos biológicos, físicos e químicos na formação do solo, organiza-se uma série de camadas sobrepostas, aproximadamente paralelas à superfície, denominadas horizontes (Lepsch, 2002). Segundo esse autor, o conjunto de horizontes, em um corte vertical iniciado na superfície e terminado no material semelhante ao da formação do solo (a rocha), é denominado perfil do solo (figura 1).

Normalmente o espaço poroso do solo no campo é ocupado por quantidades variáveis de uma solução aquosa denominada água no solo e de uma solução gasosa denominada ar no solo (Libardi, 2014). O fato de o solo ser constituído das fases sólida, líquida e gasosa torna-o um sistema trifásico.

A parte gasosa é semelhante ao ar atmosférico, porém apresenta menor quantidade de O₂ e maior quantidade de CO₂, resultados das atividades biológicas que ocorrem no solo (Reichardt e Timm, 2004).

Segundo Reichardt e Timm (2004), a fase sólida do solo compõe-se de minerais, matéria orgânica e vários componentes químicos.

Segundo Libardi (2014), dois são os processos que explicam a retenção da água num solo não saturado. No primeiro deles, a retenção ocorre nos chamados poros capilares do solo e pode ser ilustrada pelo fenômeno da capilaridade, o qual está sempre associado a uma interface curva água-ar. No segundo processo, a retenção ocorre nas superfícies dos sólidos do solo como filmes presos a ela, pelo fenômeno da adsorção.

A capilaridade atua na retenção de água quando o meio poroso está saturado e a adsorção passa a predominar na retenção à medida que esse meio vai se tornando não saturado (Reichardt e Timm, 2004).

Os fatores que influenciam a retenção de água no solo são a textura, a matéria orgânica, a estrutura e a porosidade.

Reichardt (1987) afirma que a textura é o principal determinante da retenção de água no solo, porque atua diretamente na área de contato entre as partículas sólidas e a água. A textura do solo refere-se à proporção relativa das frações granulométricas areia (2 a 0,05 mm), silte (0,05 a 0,002 mm) e argila (< 0,002 mm) na terra fina seca ao ar (TFSA). É a propriedade física do solo que menos sofre alteração ao longo do tempo.

As combinações dessas frações granulométricas (triângulo textural) geram as classes texturais, que podem ser reunidas em grupamentos texturais de acordo com o teor de argila. Os grupamentos são, de acordo com Embrapa (2006) e Petrobras (2010), arenoso com até 15% de argila, médio compreendido entre 15 e 35% de argila, argiloso compreendido entre 35 e 60% de argila e muito argiloso com mais de 60% de argila.

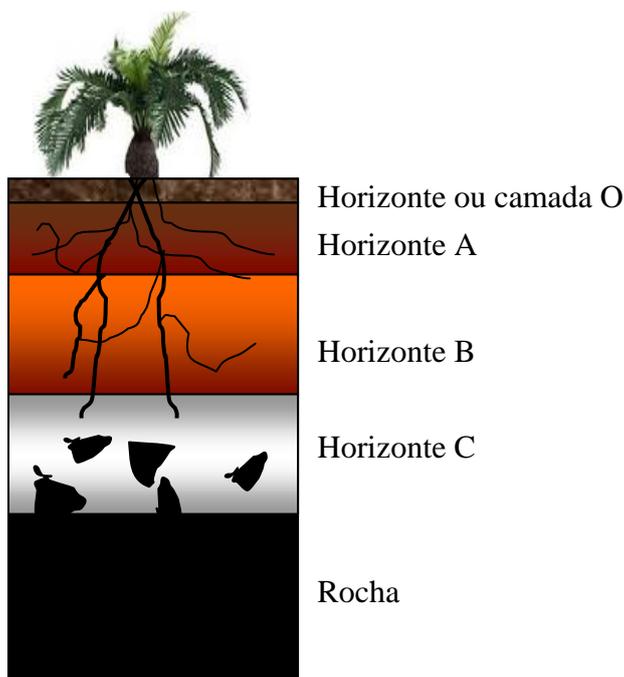


Figura 1. Perfil hipotético de solo com os principais horizontes (Reichardt e Timm, 2004).

A água no solo, assim como qualquer corpo na natureza, pode conter energia em quantidades diversas e sob várias formas, determinando um estado de energia. Duas formas principais de energia são reconhecidas pela Física Clássica, a cinética e a potencial (Reichardt, 1975).

Segundo Reichardt (1975), como a dinâmica da água no solo é muito lenta, sua energia cinética, que é proporcional ao quadrado da velocidade, é, na maioria dos casos, desprezível. Por outro lado, a energia potencial, que é uma função da posição e condição interna da água no ponto em consideração, é de fundamental importância na determinação de seu estado de energia e de seu movimento no solo. Este estado de energia da água é descrito pela função termodinâmica de energia livre de Gibbs, que recebe o nome particular de potencial total da água.

Segundo Klar (1988), o conceito de potencial total da água no solo foi primeiramente usado por Buckingham em 1907.

O potencial total da água no solo pode ser definido como o somatório dos trabalhos realizados quando uma quantidade infinitesimal de água num estado padrão é transportada isotérmica, isobárica e reversivelmente para o estado considerado no solo (Reichardt, 1975). As componentes desse somatório são: térmica, pressão, gravitacional, osmótica e matricial.

Como os processos que ocorrem no solo são aproximadamente isotérmicos, a componente térmica é desprezível. Segundo Reichardt (1990), a componente osmótica não é importante no estudo do movimento da água no solo, a não ser quando existe a presença de alguma membrana semipermeável no sistema, como é o caso das membranas celulares.

Segundo Viegas (1987), a maioria dos estudos termodinâmicos da água no solo indicam as componentes gravitacional e matricial como as mais importantes no estudo da dinâmica da água em solo não saturado.

Quando a água do solo está a uma pressão hidrostática menor do que a atmosférica, o potencial de pressão é considerado negativo e é denotado de potencial matricial (Reichardt e Timm, 2004). A diferença entre o potencial matricial e o de pressão é que o primeiro ocorre devido à matriz do solo, enquanto que o segundo resulta da carga de um determinado volume de água. Desta forma, o potencial matricial é o resultado das forças capilares e de adsorção da matriz do solo.

O potencial matricial torna-se importante quando o solo começa a perder umidade, gerando os primeiros capilares quando o ar substitui os espaços ocupados pela água e a capilaridade passa a ser um fator relevante na determinação desse potencial (Reichardt e Timm, 2004). Segundo esses autores, como a água tende a ocupar os menores poros, o potencial matricial torna-se mais negativo à medida que a secagem do solo continua. Em estado de seca severa, o potencial matricial passa a ser determinado pela adsorção.

O potencial gravitacional é o potencial atribuível à força gravitacional no campo, a qual depende da elevação ou localização vertical da água. Este potencial é determinado pela elevação do ponto relativo a algum nível de referência arbitrário, geralmente considerado como sendo a superfície do solo, e amarrado no perfil do solo, sendo convenientemente padronizado em valores positivos ou igual a zero (Reichardt e Timm, 2004).

Diferenças de potencial da água entre diferentes pontos do solo dão origem a seu movimento. É universal e espontânea a tendência, na natureza, dos corpos se transferirem de um ponto de energia potencial alta para outro de baixa energia potencial (sentido contrário ao seu gradiente de potencial), procurando equilíbrio com o meio ambiente. A água no solo obedece a esta tendência universal e move-se no sentido de diminuição de seu potencial, constantemente.

A velocidade da redução da energia potencial em relação à distância constitui, de fato, o gradiente hidráulico, força responsável pelo movimento ou fluxo da água no solo por unidade de peso de água. Assim, o conhecimento de seu estado de energia em cada ponto do solo pode nos permitir o cálculo das forças que atuam sobre a água do solo em todas as direções, bem como determinar quanto afastada a água do solo está do ponto ou estado de equilíbrio (um estado de energia potencial uniforme em todo o sistema).

Toda água no solo é afetada pelo campo gravitacional terrestre de tal forma que toda ela é “gravitacional”. Finalmente, deve ser frisado que a água é a mesma em qualquer posição e tempo dentro do solo. Ela não difere na “forma”, mas sim em seu estado de energia.

O fluxo de água no solo depende tanto da condutividade hidráulica quanto do gradiente hidráulico, que, por sua vez, são funções da umidade do solo.

Segundo Gonçalves e Libardi (2013), a condutividade hidráulica do solo é uma propriedade que expressa a facilidade com que a água nele se movimenta; é importante para o manejo do solo, para a produção das culturas e para a preservação do solo e do ambiente.

A umidade do solo ou teor de água no solo indica a quantidade de água presente no solo. Ela pode ser expressa na base de massa (grama de água por grama de solos seco em estufa - $\text{g H}_2\text{O.g}^{-1}$ de solo) ou volume (cm^3 de água por cm^3 de solo - $\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O por cm}^3$ de solo).

A capacidade de armazenamento e o fluxo de água pelo solo são, portanto, uma informação primordial em um estudo que pretende otimizar o uso de água em culturas irrigadas.

Os fatores que afetam a disponibilidade de água às culturas são a estrutura do solo, por determinar o arranjo das partículas e, por consequência, a distribuição do diâmetro dos poros; a textura, o tipo e quantidade de argila e o teor de matéria orgânica (Klein e Libardi, 2000).

2.1.1 Curva de retenção de água no solo

Segundo Reichardt e Timm (2004), a curva de retenção de água no solo, também conhecida como curva característica de água no solo, expressa a relação entre a umidade do solo e o potencial matricial da água no solo.

Um solo saturado em equilíbrio com a água livre, sob pressão atmosférica, se submetido à pequena força de sucção, terá pequena parte de sua água retirada, o ar penetrará e haverá formação das três fases - sólida, líquida e gasosa (Klar, 1988). Esse autor afirma que aumentando-se a sucção, poros menores perderão água, dando entrada a mais ar; sendo aplicados aumentos gradativos, o fenômeno se repetirá, com diminuição da espessura de película de água envolvente das partículas de solo; esta água estará “presa” mais fortemente, exigindo cada vez maiores sucções para retirá-las.

A curva de retenção de água no solo é fundamental para o desenvolvimento de estudos relacionados com a dinâmica da água, com a modelagem de processos físicos do solo e crescimento das plantas (Tormena e Silva, 2002).

A retenção de água no solo constitui uma propriedade de difícil caracterização, tanto pelo tempo que se consome nas análises, quanto pela intrínseca modificação da amostra, devido à histerese (Soares *et al.*, 2014).

A histerese é um fenômeno gerado quando a curva de retenção obtida por meio da extração de água de uma amostra de solo inicialmente úmida é distinta da curva de retenção obtida pelo umedecimento de uma amostra inicialmente seca. A histerese impõe mais dificuldades para a descrição matemática da curva de retenção e para a sua utilização nas equações que descrevem o movimento de água no solo (Reichardt e Timm, 2004).

Segundo Reichardt e Timm (2004), como as curvas de retenção são obtidas experimentalmente por não haver nenhuma teoria satisfatória para sua previsão, há a necessidade de definir modelos matemáticos que forneçam a curva melhor ajustada aos dados experimentais.

Há muitos modelos matemáticos para determinar a umidade do solo, como por exemplo, a equação (3) proposta por van Genuchten (1980), que relaciona θ (umidade do solo) com ψ_m (potencial matricial da água no solo) e baseia-se no modelo proposto por Mualem (1976) – que prevê a condutividade hidráulica em solo não saturado a partir do conhecimento da curva de retenção e da condutividade hidráulica de saturação por meio de uma integral.

A equação (3) foi obtida combinando a equação (1), umidade volumétrica normalizada, também conhecida como saturação efetiva, com a equação (2) proposta por van Genuchten (1980), que determina a umidade volumétrica como variável dependente do potencial matricial.

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (1)$$

sendo

θ_r , a umidade volumétrica residual do solo (unidade [L^3L^{-3}]);

θ_s , a umidade volumétrica saturada do solo (unidade [L^3L^{-3}]);

A equação (1) indica a porcentagem dos espaços vazios ocupados pela água.

$$\Theta = \frac{1}{[1 + |\alpha\psi_m|^b]^a} \quad (2)$$

$$\theta(\psi_m) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha\psi_m|^b)^a} \quad (3)$$

sendo

α uma constante empírica (unidade [L⁻¹]);

a uma constante empírica (adimensional);

b uma constante empírica (adimensional).

As curvas de retenção de água para três classes texturais diferentes são apresentadas na figura 2, como exemplo de curvas de retenção e aplicação do modelo de van Genuchten (1980). Essas curvas foram determinadas utilizando parâmetros hidráulicos do solo para as funções analíticas de van Genuchten (1980) para doze classes texturais do triângulo textural do solo do USDA (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos) apresentadas por Mallants *et al.* (2011).

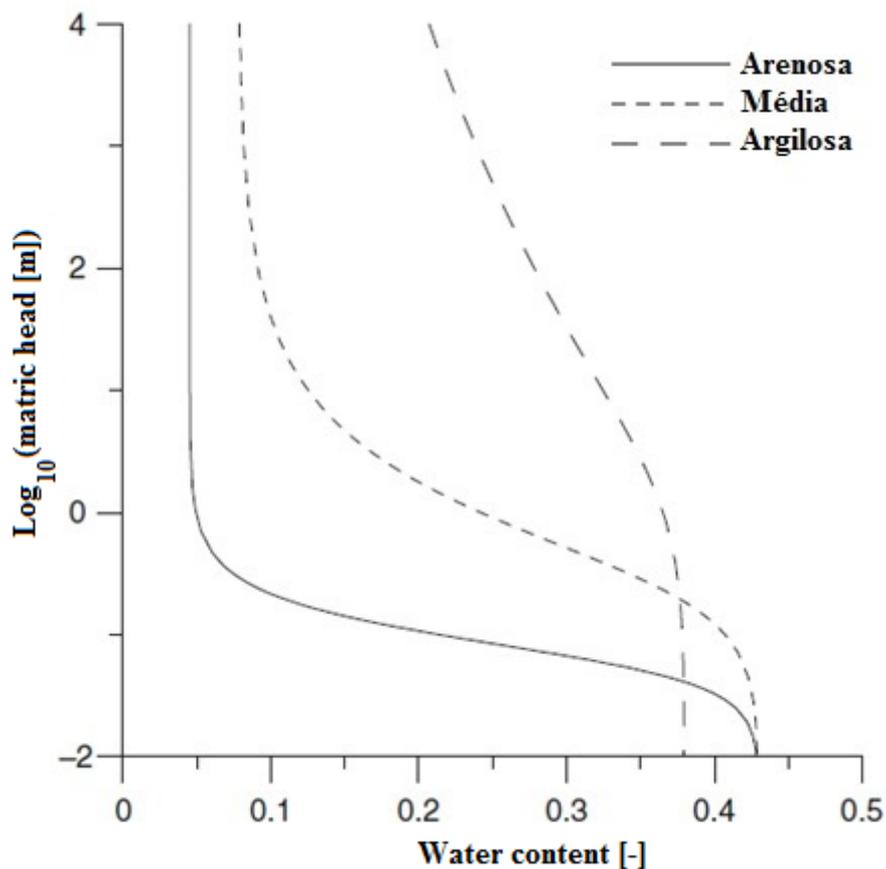


Figura 2. Curvas de retenção para três classes texturais - arenosa, média e argilosa (Mallants *et al.*, 2011).

A “curva tracejada” de retenção para solo argiloso, apresentada na figura 2, descreve a dificuldade de retirar água nesse tipo de solo, ou seja, solos argilosos retêm mais água. O ponto dessa curva que intersecta o eixo da umidade indica a umidade residual (aquela que ficará retida no solo). Já o comportamento assintótico dessa curva para potenciais mais altos indica um limite conhecido como umidade saturada. A umidade volumétrica está compreendida entre a umidade saturada e a residual.

O que foi descrito para solos argilosos no parágrafo anterior, segundo a figura 2, também pode ser dito sobre os solos arenosos. Porém, nos solos arenosos temos umidade

saturada e residual com valores distintos das que foram determinadas nos solos argilosos. Isso porque nos solos arenosos a água é retirada com mais facilidade.

A curva de retenção é necessária em estudos relacionados com o armazenamento e a dinâmica da água no solo (Tormena e Silva, 2002), sendo esta última descrita, tradicionalmente, pela equação de Richards que será apresentada na seção a seguir.

2.1.2 Modelos matemáticos para descrever o fluxo de água no solo

As equações que descrevem o fluxo de água no solo serão apresentadas de acordo com o seu desenvolvimento histórico, abrangendo inicialmente os solos saturados e encerrando nos solos não saturados. Estas equações apresentam-se sob duas condições, uma diz respeito as características do fluxo que não variam com o tempo (regime estacionário) mas podem variar com a posição, equações (4), (5) e (6). A outra condição é que tais características variam com o tempo e posição (regime transiente), equação (18).

O solo está saturado quando seu espaço poroso estiver totalmente cheio de água. Caso contrário, o solo está não saturado.

Segundo Libardi (1995 *apud* Souza, 2007), o primeiro modelo matemático para descrever o fluxo de um líquido em um meio poroso saturado foi proposto pelo engenheiro Henry Darcy, em 1856. Esse modelo ficou conhecido como Lei de Darcy (equação 4)

$$q = -k_s \frac{d\psi_t}{dz} \quad (4)$$

sendo

q a densidade de fluxo de água no solo (unidade $[LT^{-1}]$);

k_s a condutividade hidráulica do solo saturado, aqui considerada constante (unidade $[LT^{-1}]$);

ψ_t o potencial total da água no solo (unidade $[L]$);

z a coordenada vertical de posição (unidade $[L]$).

A densidade de fluxo é a vazão do líquido por unidade de área de seção transversal de solo.

O sinal negativo da equação (4) indica que o sentido do fluxo é oposto à força que atua na unidade de massa ou volume do líquido fazendo-a mover.

Darcy considerou $\psi_t = \psi_p + \psi_g$, sendo ψ_p o potencial de pressão (na saturação a carga hidráulica atua sobre o solo) e ψ_g o potencial gravitacional (a posição relativa a referência determina o estado energético da água).

Para entender a dinâmica da água no solo, o conhecimento da equação de Darcy não é suficiente (Reichardt e Timm, 2004).

Em 1907, Edgar Buckingham propôs uma modificação da Lei de Darcy, descrevendo o potencial matricial e a condutividade hidráulica como dependentes da umidade do solo (Souza, 2007), equação (5)

$$q = -k(\theta) \frac{\partial \psi_m(\theta)}{\partial z} \quad (5)$$

sendo

θ a umidade volumétrica do solo (unidade $[L^3L^{-3}]$);

ψ_m o potencial matricial da água no solo (unidade $[L]$).

Buckingham desconsiderou o efeito da gravidade e da pressão em ψ_t e acrescentou ψ_m como função de θ .

Lorenzo Adolph Richards, em 1928, introduziu o efeito da gravidade no modelo de Buckingham, obtendo a conhecida Equação de Darcy-Buckingham, equação (6)

$$q = -k(\theta) \frac{\partial \psi_t(\theta)}{\partial z} \quad (6)$$

Richards (1931) apresenta um modelo matemático combinando a Equação da Continuidade (lei de conservação de massa), equação (7) com a Equação de Darcy-Buckingham, equação (6), que descreve o movimento de um líquido em um meio poroso não saturado e incompressível. Este modelo ficou conhecido como Equação de Richards, uma equação diferencial parcial não linear (Reichardt e Timm, 2004; Mallants *et al.*, 2011), da forma

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \quad (7)$$

sendo

q_z a densidade de fluxo vertical da água no solo na direção z (unidade $[LT^{-1}]$);
 t o tempo (unidade $[T]$).

A equação da continuidade estabelece que a massa não pode ser criada nem destruída. Matematicamente, seja ΔV um elemento de volume de solo em torno do ponto M, apresentado na figura 3, e q_x a densidade de fluxo de água entrando em ΔV na direção x (volume de água por unidade de tempo e de área).

A quantidade de água Q_x (vazão) que entra pela superfície $\Delta y \Delta z$, na unidade de tempo Δt , é

$$\frac{Q_x}{\Delta t} = q_x \Delta y \Delta z. \quad (8)$$

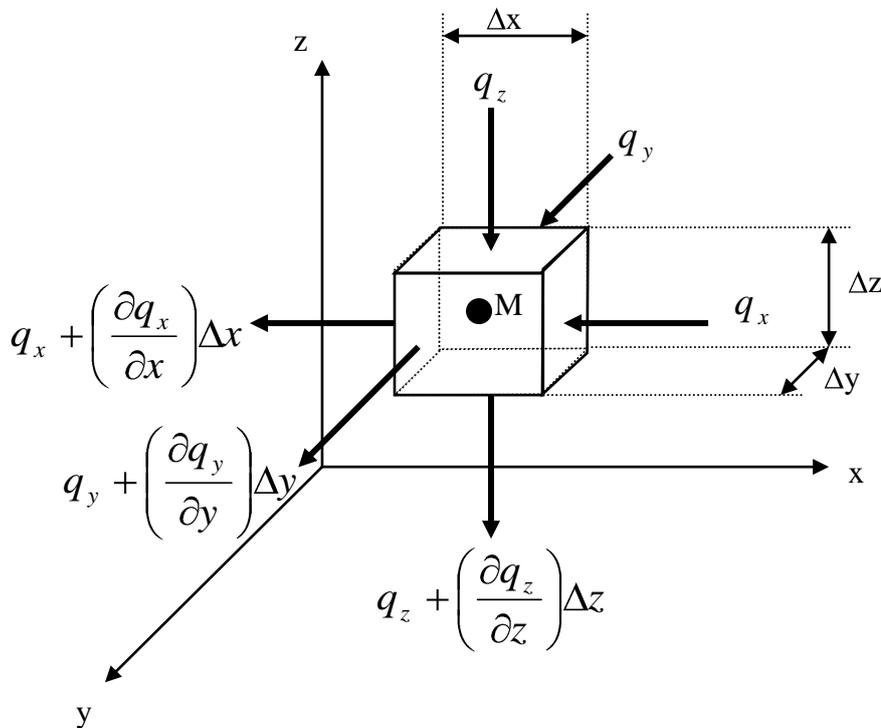


Figura 3. Esquema de um elemento de volume.

Como q_x pode sofrer variação ao longo da direção x , igual a $\frac{\partial q_x}{\partial x}$, então a densidade de fluxo q_x^* que sai pela superfície oposta a $\Delta y \Delta z$ é

$$q_x^* = q_x + \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} \right) \Delta x. \quad (9)$$

Logo, a quantidade de água Q_x^* que sai pela superfície oposta a $\Delta y \Delta z$ é

$$\frac{Q_x^*}{\Delta t} = \left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y \Delta z. \quad (10)$$

Segundo Reichardt e Timm (2004), a variação da quantidade de água no elemento de volume por unidade de tempo $\frac{\partial Q_x}{\partial t} = \frac{\Delta Q_x}{\Delta t}$ é a diferença entre a quantidade de água que entra e a quantidade que sai, matematicamente, escrita por

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} = \frac{Q_x}{\Delta t} - \frac{Q_x^*}{\Delta t}. \quad (11)$$

Combinando as equações (8), (10) e (11), obtemos

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} = q_x \Delta y \Delta z - \left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y \Delta z. \quad (12)$$

A simplificação da equação (12) é dada por

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} \right) \Delta V. \quad (13)$$

Analogamente, para as direções y e z , obtemos as seguintes equações

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \Delta V \quad (14)$$

e

$$\frac{\partial Q_z}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta V. \quad (15)$$

Sendo assim, a variação total $\frac{\partial Q}{\partial t}$ (em três dimensões) é dada por

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta V. \quad (16)$$

Dividindo ambos os lados da equação (16) por ΔV obtemos a variação da quantidade de água por unidade de volume, dada pela equação

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right). \quad (17)$$

A equação (17) é conhecida como equação da continuidade (lei da conservação de massa) que pode ser escrita pela expressão, em palavras, como

Taxa de variação de água dentro do elemento de volume	+	Taxa de fluxo de água resultante através da superfície do elemento de volume	= 0.
---	---	--	------

A não linearidade da equação de Richards, equação (18), ocorre pela dependência de parâmetros do solo com a curva de retenção de água no solo. A condutividade hidráulica é um exemplo.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta) \left(\frac{\partial \psi_m(\theta)}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (18)$$

Na equação (6) é considerado $\psi_t = \psi_m(\theta) + \psi_g$ e na equação (18) é considerado $\psi_g = z$, portanto, a densidade de fluxo torna-se $q = -k(\theta) \left(\frac{\partial \psi_m(\theta)}{\partial z} + 1 \right)$.

As dificuldades presentes nos parâmetros da equação de Richards motivam a utilização de ferramentas matemáticas não determinísticas, como por exemplo, a lógica *fuzzy* a ser apresentada a seguir. Bardossy e Disse (1993) acreditam que os modelos baseados em regras *fuzzy* podem ser eficientemente aplicados em problemas hidrológicos.

2.2 Lógica Fuzzy

A teoria dos conjuntos *fuzzy* foi introduzida em 1965 pelo matemático Lotfi Asker Zadeh (Barros e Bassanezi, 2006). Segundo esses autores, a intenção é de dar um tratamento matemático aos parâmetros ou às variáveis que possa ter relação com certos termos linguísticos e subjetivos, como “aproximadamente”, “em torno de”, dentre outros. Dessa forma, a teoria proposta por Zadeh permite modelar problemas envolvendo informações imprecisas como as presentes no cérebro humano, demonstrando a flexibilidade da teoria *fuzzy* quando comparada com a matemática tradicional.

Segundo Zadeh (1965), um conjunto *fuzzy* é uma classe de objetos com um contínuo de graus de pertinência. Tal conjunto é caracterizado por uma função de pertinência, que atribui a cada objeto um grau de pertinência que varia entre zero e um. Um conjunto clássico é um caso particular de um conjunto *fuzzy*, com grau de pertinência assumindo apenas dois valores: 0 (zero) para o caso do elemento não pertencer ao conjunto clássico ou 1 (um), caso pertença (função característica).

Seja U um conjunto clássico. Um subconjunto *fuzzy* A em U é caracterizado por uma função $f_A: U \rightarrow [0, 1]$, conhecida como função grau de pertinência.

Exemplo 1: Considere o subconjunto *fuzzy* M representando a textura média do solo:

$M = \{x \in \mathbb{R} : x \text{ é uma textura média}\}$. Sendo a textura média definida pelo teor de argila.

Seja $f_M: \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$ a função de pertinência definida, segundo Embrapa (2006), por

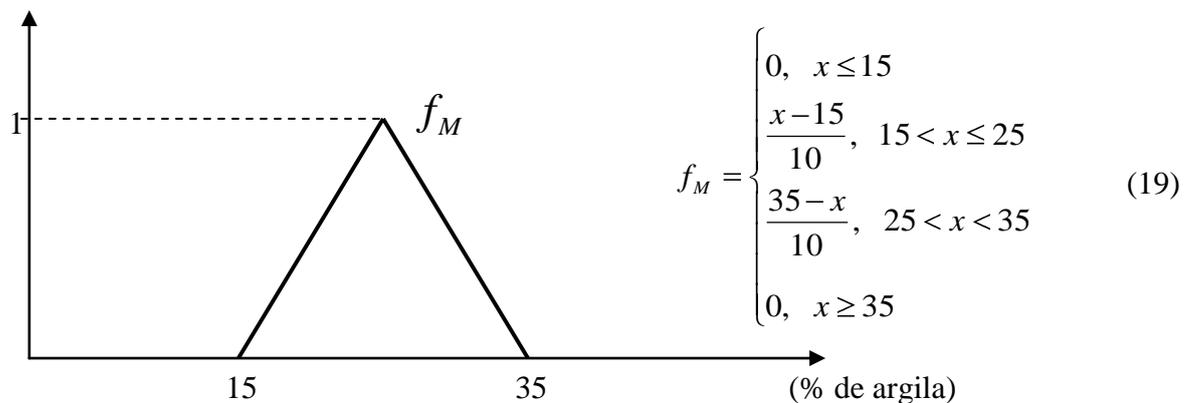


Figura 4. A textura média do solo representada por um conjunto *fuzzy* M , referente ao exemplo 1.

Aplicando o exemplo 1 em um perfil de solo com 34% de argila, $f(34) = 0,1$ indica que esse perfil tem pouca textura média. Porém, se tivéssemos um perfil com 27% de argila,

então teríamos um perfil de textura média com grau 0,8. Isso significa que 34% pertence pouco ao conjunto M, enquanto 27% pertence muito mais!

Sempre que nos referimos a um determinado conjunto A estamos considerando um subconjunto de algum conjunto universo U. Assim, usaremos ambos os termos sem distinção.

A fim de compreender melhor alguns operadores da lógica *fuzzy* e o método de inferência de Mamdani, a ser definido mais adiante e usado no controlador *fuzzy* proposto nesse trabalho, destacamos três operações básicas entre conjuntos *fuzzy*: união, interseção e complementar. Para isso, considere A e B dois subconjuntos *fuzzy* de U, com suas respectivas funções de pertinência f_A e f_B .

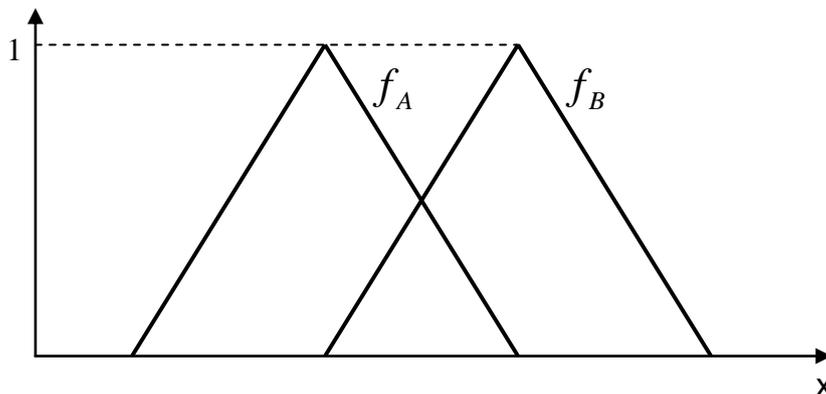


Figura 5. Dois conjuntos *fuzzy*, A (à esquerda) e B (à direita).

A união de A e B, escrita como $C = A \cup B$, é definida por $f_C(x) = \max\{f_A(x), f_B(x)\}$, $x \in U$.

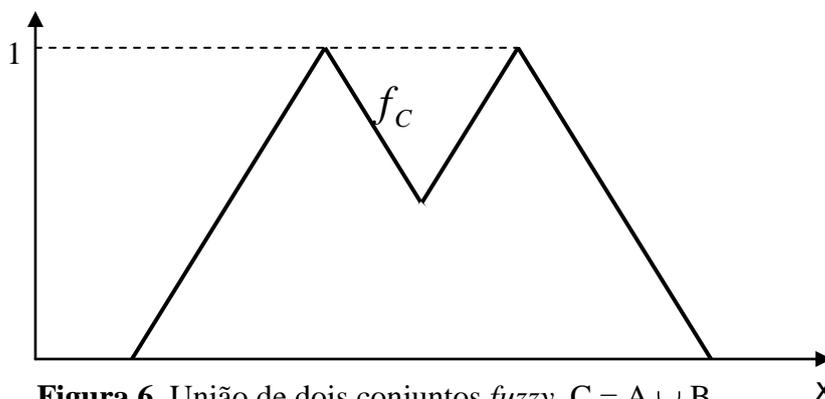


Figura 6. União de dois conjuntos *fuzzy*, $C = A \cup B$.

A interseção de A e B, escrita como $D = A \cap B$, é definida por $f_D(x) = \min\{f_A(x), f_B(x)\}$, $x \in U$.

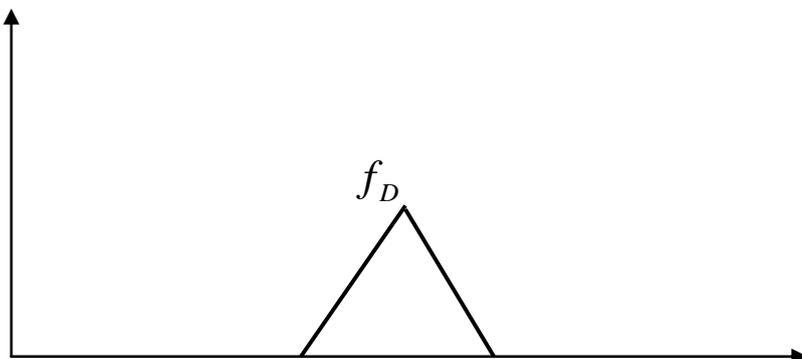


Figura 7. Interseção de dois conjuntos *fuzzy*, $D = A \cap B$.

O complementar de A, denotado por A' , é definido por $f_{A'}(x) = 1 - f_A(x)$, $x \in U$.

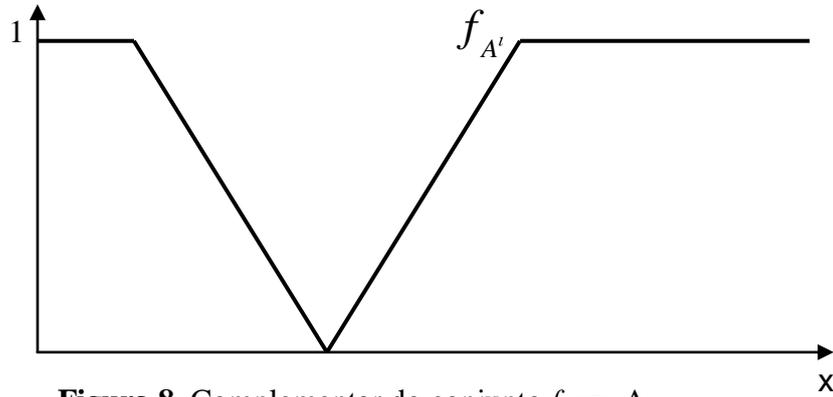


Figura 8. Complementar do conjunto *fuzzy* A.

Quando desejamos construir um subconjunto de U, formado por todos os graus de pertinência do elemento x no subconjunto *fuzzy* A de U, tal que esses graus sejam maiores ou iguais a um valor α entre zero e um, estamos determinando o que é conhecido por α -nível do subconjunto *fuzzy* A. Assim definido, seja A um subconjunto *fuzzy* de U e $\alpha \in [0, 1]$. O α -nível de A é o subconjunto de U definido por $[A]^\alpha = \{x \in U; f_A(x) \geq \alpha\}$ para $0 < \alpha \leq 1$. Exemplo 2: Seja A um subconjunto *fuzzy* e f_A sua função de pertinência definida por

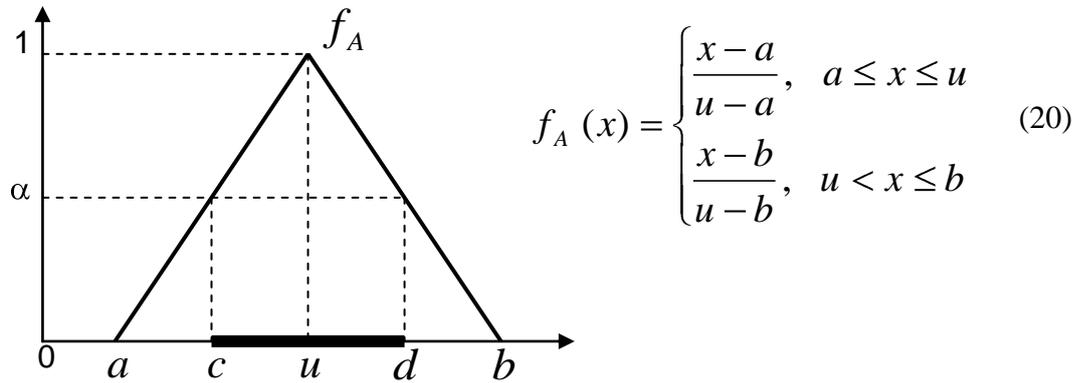


Figura 9. α -nível do subconjunto *fuzzy* A.

Algebricamente, o α -nível de A é $[A]^\alpha = [c, d]$.

Um elemento de $[A]^\alpha$ pertence a A com, no mínimo, grau α . Segundo Barros e Bassanezi (2006), o nível zero de um subconjunto *fuzzy* A é definido como sendo o menor subconjunto (clássico) fechado de U que contém o conjunto suporte de A, ou seja, do ponto de vista teórico matemático, o zero nível é o fecho em U do suporte da função de pertinência de A.

O suporte de um subconjunto *fuzzy* A de U é o subconjunto clássico de U definido por $\text{supp } A = \{x \in U; f_A(x) > 0\}$.

Um subconjunto *fuzzy* A é dito normal se $[A]^\alpha \neq \emptyset, \forall \alpha \in [0, 1]$.

Um subconjunto *fuzzy* A é convexo se, e somente se, $f_A[\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2] \geq \min[f_A(x_1), f_A(x_2)]$, para todo x_1 e x_2 em $U = \mathbb{R}$ e todo λ em $[0, 1]$.

Um conjunto *fuzzy* A está normalizado se, e somente se, existe $x \in U$ tal que $f_A(x) = 1$. Esta definição implica que $\sup_{x \in U} f_A(x) = 1$ (Dubois e Prade, 1980).

Segundo Dubois e Prade (1980), um número *fuzzy* é um conjunto *fuzzy* convexo normalizado em \mathbb{R} tal que

- (a) $\exists x_0 \in \mathbb{R}, f_A(x_0) = 1$;
- (b) f_A é contínua por partes.

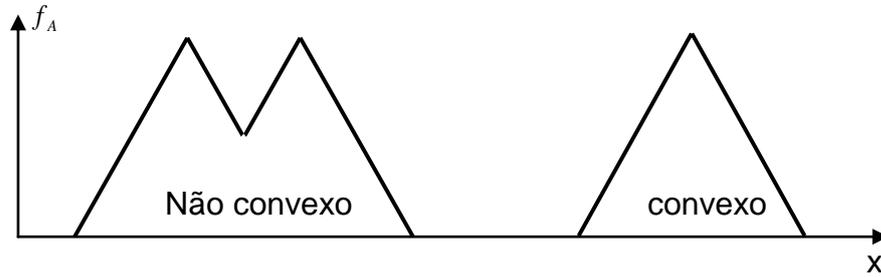


Figura 10. Conjunto *fuzzy* não convexo e convexo.

Segundo McBratney e Odeh (1997), geralmente, um número *fuzzy* é definido como um subconjunto *fuzzy* normal e convexo em \mathbb{R} . Os números *fuzzy* mais comuns são os triangulares, trapezoidais e os em forma de sino, gaussianos (Barros e Bassanezi, 2006). Todo número real é um número *fuzzy*, conhecido como *crisp*, cuja função de pertinência é a sua própria função característica (1, se $x \in \mathbb{R}$; 0, se $x \notin \mathbb{R}$).

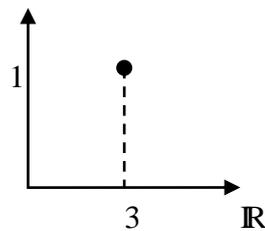


Figura 11. Representação do número *fuzzy* três (*crisp*).

Um número *fuzzy* A é triangular se sua função de pertinência for escrita como

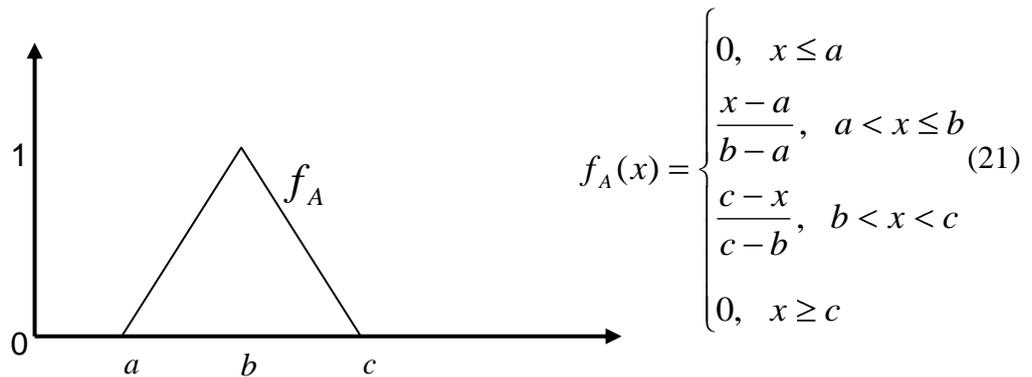


Figura 12. Representação de um número *fuzzy* triangular.

Segundo Barros e Bassanezi (2006), os números reais a , b e c definem o número *fuzzy* triangular A que será denotado pela terna ordenada $(a; b; c)$.

Um número *fuzzy* A é trapezoidal se sua função de pertinência for escrita como

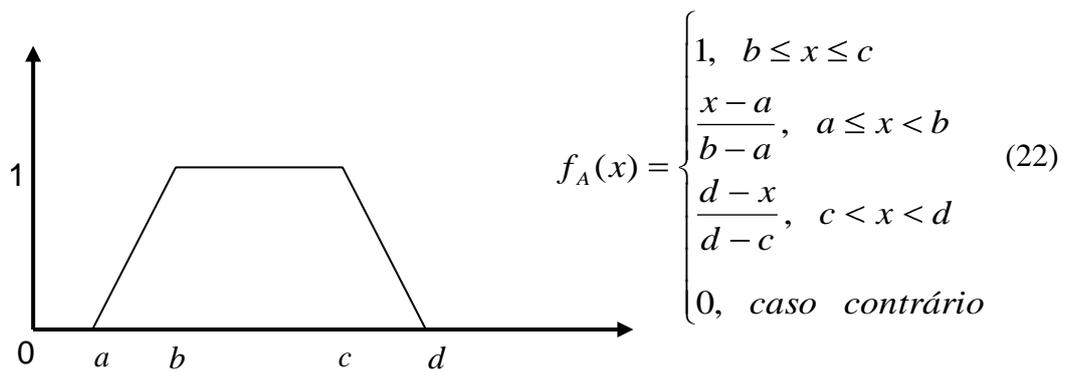


Figura 13. Representação de um número *fuzzy* trapezoidal.

Um número *fuzzy* A é em forma de sino se sua função de pertinência for escrita como

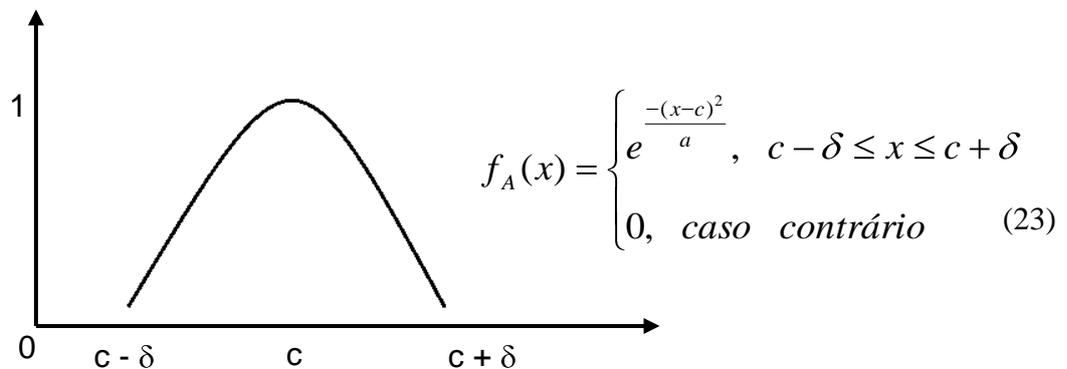


Figura 14. Representação de um número *fuzzy* em forma de sino.

2.2.1 A lógica clássica e a lógica *fuzzy*

A lógica booleana colaborou diretamente no avanço da ciência e da tecnologia, um exemplo é o computador eletrônico, cujo sistema funciona com dois estados (bits): 0 ou 1 (linguagem binária). Porém, tal lógica tem uma limitação em considerar apenas dois valores lógicos, quando inserida em um mundo subjetivo e incerto (Barros e Bassanezi, 2006). Diante desse fato, como também da necessidade de criação de sistemas inteligentes (modelos baseados no funcionamento do cérebro humano), a lógica *fuzzy* é uma extensão da lógica clássica, com valores lógicos pertencentes ao intervalo entre 0 (zero) e 1 (um). Zadeh (1973) fundamentou e aplicou a lógica *fuzzy* na análise de sistemas complexos e processos de decisão, para os quais, afirma que técnicas de matemática tradicional não se aplicam. Por exemplo, para um modelo baseado na lógica *fuzzy*, a água pode estar quente, morna ou fria (variações entre os extremos). A lógica de Boole é um algebrismo da lógica simbólica criada por Leibniz, que por sua vez é baseada na lógica aristotélica (Barros e Bassanezi, 2006). Segundo esses autores, o principal sucesso da lógica *fuzzy* é sua praticidade, pois possibilita conclusões a partir de proposições incertas. Um exemplo de verdade é dado pelo método de investigação de Sócrates, defendido por Aristóteles:

“*Todo homem é mortal;*
Sócrates é homem;
Logo, Sócrates é mortal.”

O raciocínio aproximado é a área que se aplica às proposições incertas, cuja forma segue do método de investigação proposto por Sócrates:

Potencial matricial muito alto acarreta umidade do solo muito baixa;

Umidade do solo muito baixa acarreta ponto de murcha permanente;

Conclusão: Potencial matricial muito alto acarreta ponto de murcha permanente.

A conclusão foi obtida a partir das premissas. Porém, a imprecisão de alguns termos presentes, tais como: muito baixo ou muito baixa, não podem ser modelados por meio da lógica clássica.

Assim como na lógica clássica, a lógica *fuzzy* possui operadores e em algumas definições os símbolos são os mesmos. Sejam x , x_1 e x_2 variáveis cujos valores pertencem ao intervalo entre 0 e 1. As seguintes notações são adotadas:

- i) $\neg x = 1 - x$ (negação);
- ii) $x_1 \vee x_2 = \max(x_1, x_2)$ (disjunção);
- iii) $x_1 \wedge x_2 = \min(x_1, x_2)$ (conjunção).

A t-norma e a t-conorma, definidas a seguir, são os operadores fundamentais na compreensão da definição do método de inferência de Mamdani, usado no controlador *fuzzy* proposto neste trabalho.

O operador $T: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$, $\forall x_1, \dots, x_5 \in [0, 1]$, é uma t-norma se as condições a seguir forem satisfeitas:

- i) elemento neutro: $T(x_1, 1) = x_1$;
- ii) comutativa: $T(x_1, x_2) = T(x_2, x_1)$;
- iii) monotonicidade: $x_1 \leq x_3$ e $x_2 \leq x_4 \Rightarrow T(x_1, x_2) \leq T(x_3, x_4)$;
- iv) associativa: $T(T(x_1, x_2), x_5) = T(x_1, T(x_2, x_5))$.

O operador $\perp: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$, $\forall x_1, \dots, x_5 \in [0, 1]$, é uma t-conorma se as condições a seguir forem satisfeitas:

- i) elemento neutro: $\perp(x_1, 0) = x_1$;
- ii) comutativa: $\perp(x_1, x_2) = \perp(x_2, x_1)$;
- iii) monotonicidade: $x_1 \leq x_3$ e $x_2 \leq x_4 \Rightarrow \perp(x_1, x_2) \leq \perp(x_3, x_4)$;
- iv) associativa: $\perp(\perp(x_1, x_2), x_5) = \perp(x_1, \perp(x_2, x_5))$.

Exemplo 3: O operador \wedge que modela o conectivo “e” é uma t-norma. Demonstração:

Seja $\wedge: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$, $\forall x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \in [0, 1]$, definido por $x_1 \wedge x_2 = \min(x_1, x_2)$.

- i) $\wedge(x_1, 0) = x_1 \wedge 0 = \min(x_1, 0) = 0$, $\wedge(x_1, 1) = x_1 \wedge 1 = \min(x_1, 1) = x_1$;
- ii) $\wedge(x_1, x_2) = x_1 \wedge x_2 = \min(x_1, x_2) = \min(x_2, x_1) = x_2 \wedge x_1 = \wedge(x_2, x_1)$;
- iii) $x_1 \leq x_3$ e $x_2 \leq x_4 \Rightarrow \min(x_1, x_2) \leq \min(x_3, x_4) \Rightarrow (x_1 \wedge x_2) \leq (x_3 \wedge x_4) \Rightarrow \wedge(x_1, x_2) \leq \wedge(x_3, x_4)$;
- iv) $\wedge(\wedge(x_1, x_2), x_5) = (x_1 \wedge x_2) \wedge x_5 = \min(\min(x_1, x_2), x_5) = \min(\min(x_1, x_2), \min(x_5, 1)) = \min(\min(x_1, x_2, x_5, 1)) = \min(\min(x_1, 1), \min(x_2, x_5)) = \min(x_1, \min(x_2, x_5)) = x_1 \wedge (x_2 \wedge x_5) = \wedge(x_1, (x_2 \wedge x_5))$. \square

De forma análoga pode-se demonstrar que o operador \vee , que modela o conectivo “ou”, é uma t-conorma.

Uma função $\eta: [0, 1] \rightarrow [0, 1]$, $\forall x \in [0, 1]$, é uma negação se as condições a seguir forem satisfeitas:

- i) $\eta(0) = 1$ e $\eta(1) = 0$;
- ii) $\eta(\eta(x)) = x$;
- iii) η é decrescente.

Qualquer operação $\Rightarrow: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ que gere a tabela verdade da implicação da lógica clássica é uma implicação *fuzzy*.

Os exemplos 4 e 5 são implicações *fuzzy* e geram a tabela 1, na qual as quatro primeiras linhas correspondem aos valores da tabela verdade da implicação da lógica clássica.

Exemplo 4: Implicação de Belleza definida por

$$(x \Rightarrow y) = B(x, y) = \begin{cases} 1, & x \leq y \\ \min(\sqrt[3]{xy}, \frac{y}{x}), & x > y \end{cases} \quad (24)$$

Exemplo 5: Implicação de Zadeh definida por

$$(x \Rightarrow y) = Z(x, y) = \max\{1 - x, \min(x, y)\} \quad (25)$$

Tabela 1. Implicações *fuzzy* para alguns valores.

X	Y	B(x, y)	Z(x, y)
0	0	1	1
1	0	0	0
0	1	1	1
1	1	1	1
0	0,3	1	1
0,5	0,3	0,531	0,5
0,7	0,3	0,429	0,3
1	0,7	0,7	0,7
0,7	0,5	0,705	0,5
0,5	0,7	1	0,5

2.2.2 Propriedades físicas do solo como variáveis linguísticas

Na construção do controlador *fuzzy* proposto neste trabalho, precisamos expressar formalmente sentenças com variáveis como, por exemplo, as usadas no raciocínio aproximado. Uma variável que modela um substantivo receberá determinadas classificações ou adjetivos, representados por conjuntos *fuzzy*. Por exemplo, o substantivo textura receberá os adjetivos arenosa, média e argilosa. Para “unir” as teorias de conjuntos *fuzzy* e a de lógica *fuzzy* presentes nas sentenças que relacionam substantivos com adjetivos, faz-se necessário o conceito de variável linguística.

Uma variável linguística X no universo U assume valores que são subconjuntos *fuzzy* de U.

Assim, a textura média pode ser classificada pelo subconjunto *fuzzy* que modela o adjetivo média do exemplo 1. Ainda nessa sequência de exemplos relacionados à física do solo, X pode representar a condutividade hidráulica.

Exemplo 6: Segundo Amaral (2011), em termos práticos, pode-se classificar a condutividade hidráulica em muito lenta (menor que 0,4 cm/h), lenta (entre 0,4 e 2 cm/h), moderada (entre 2 e 8 cm/h), rápida (entre 8 e 12 cm/h) e muito rápida (maior que 12 cm/h). Chalkidis *et al.* (2007) afirma que a incerteza da condutividade hidráulica permite defini-la como um conjunto *fuzzy*. Sendo assim, a condutividade hidráulica é uma variável linguística que assume valores que a classificam como descrito anteriormente e cada classe sendo definida por um conjunto *fuzzy*.

Uma relação *fuzzy* R sobre $U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$ é qualquer subconjunto *fuzzy* de $U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$, definida pela função de pertinência

$$f_R : U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n \rightarrow [0, 1] \quad (26)$$

Se tivermos R sobre $U_1 \times U_2$, então R é chamada de relação *fuzzy* binária.

Na teoria dos controladores *fuzzy*, o produto cartesiano *fuzzy* é uma relação *fuzzy* de grande relevância.

O produto cartesiano *fuzzy* dos subconjuntos *fuzzy* A_1, A_2, \dots, A_n de U_1, U_2, \dots, U_n , respectivamente, é a relação *fuzzy* $A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$, cuja função de pertinência é

$$f_{A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_{A_1}(x_1) \wedge f_{A_2}(x_2) \wedge \dots \wedge f_{A_n}(x_n). \quad (27)$$

Um sistema baseado em regras *fuzzy* utiliza a lógica *fuzzy* na tentativa de reproduzir o funcionamento do cérebro humano, capaz de tomar decisões a partir de informações imprecisas e com graus de subjetividade. Isto é, cada indivíduo funciona como uma “caixa preta.”

Por estar baseada em regras que descrevem linguisticamente a relação de variáveis de entrada e de saída, a modelagem baseada em regras *fuzzy* destaca-se pela sua simplicidade de formulação, interpretação e generalização, tornando-a uma alternativa bastante atrativa para auxiliar o processo de tomada de decisão (Souza, 2007).

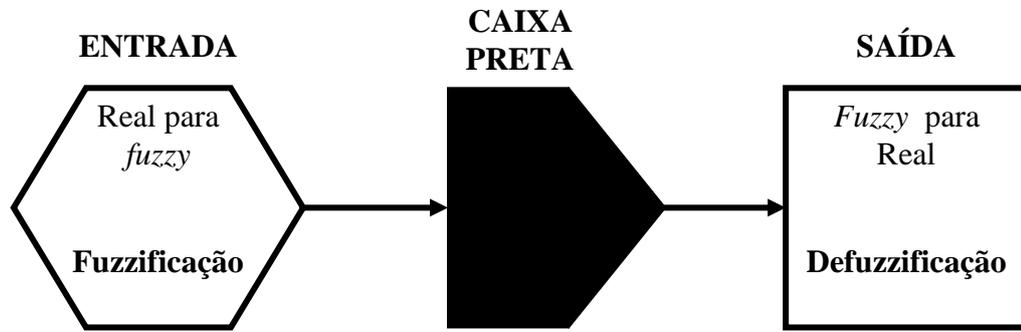


Figura 15. Um esquema de entrada-saída de um típico sistema baseado em regra *fuzzy* (McBratney e Odeh, 1997).

A relação *fuzzy* é obtida a partir de uma base de regras *fuzzy*, produzindo a saída para cada entrada. Para entender um sistema baseado em regras *fuzzy* é importante compreender cada parte desse sistema, tais como: base de regras *fuzzy*, controlador *fuzzy*, método de inferência e método de defuzzificação. Segundo Barros e Bassanezi (2006), a forma geral de uma base de regras *fuzzy* é:

R_1 : “proposição *fuzzy* 1”;

ou

R_2 : “proposição *fuzzy* 2”;

ou

R_n : “proposição *fuzzy* n”.

Cada proposição *fuzzy* é da forma: SE “estado” ENTÃO “resposta”. Para o caso de um controlador *fuzzy*, a forma é: SE “condição” ENTÃO “ação”. Os termos entre aspas são modelados por variáveis linguísticas.

Uma tentativa de reproduzir a estratégia de um controlador humano é dada pelo controlador *fuzzy*, um sistema que utiliza a lógica *fuzzy* para gerar saída para cada entrada *fuzzy*. Segundo Barros e Bassanezi (2006) e Souza (2007), os controladores *fuzzy* foram introduzidos por Mamdani (1974) e Mamdani e Assilian (1975). Ambos faziam referência, principalmente, a Zadeh (1968) e Zadeh (1973). Um sistema *fuzzy* é uma função de \mathbb{R}^n em \mathbb{R}^m construída de acordo com os módulos a seguir (Barros e Bassanezi, 2006).

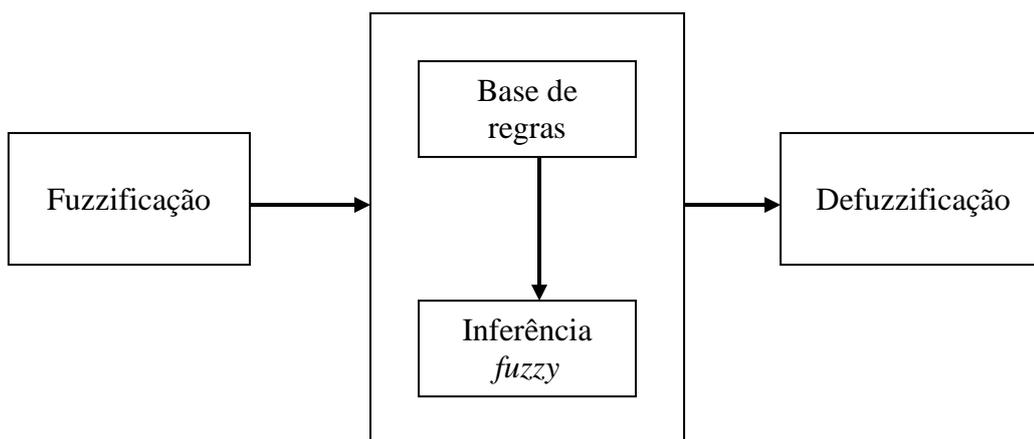


Figura 16. Esquema geral de um controlador *fuzzy* (Barros e Bassanezi, 2006).

- No módulo de fuzzificação as variáveis linguísticas de entrada são modeladas por conjuntos *fuzzy*. Neste estágio, a atuação de especialistas no problema a ser modelado é relevante e contribui significativamente na construção das funções de pertinência.
- No módulo da base de regras as proposições *fuzzy* são descritas na forma linguística SE x_1 é A_1 E x_2 é A_2 E . . . E x_n é A_n ENTÃO y_1 é B_1 E y_2 é B_2 E . . . E y_m é B_m , de acordo com as informações de especialistas. Sendo A_1, A_2, \dots, A_n e B_1, B_2, \dots, B_m conjuntos *fuzzy*.
- No módulo de inferência *fuzzy* as proposições descritas no módulo de base de regras são “interpretadas” matematicamente usando técnicas da lógica *fuzzy*. Define-se, nesse módulo, t-norma, t-conorma e o método de inferência (responsáveis pela modelagem da base de regras). Ao final deste estágio é que obtemos a saída *fuzzy*, tornando-o fundamental para um bom funcionamento do controlador *fuzzy*.
- No módulo de defuzzificação a saída gerada no módulo de inferência *fuzzy* é transformada em um número real.

Segundo Barros e Bassanezi (2006), existem diversos métodos de inferência *fuzzy*, os dois mais utilizados são o método de Mamdani e o método de KTS (Kang-Takagi-Sugeno), cuja diferença fundamental entre eles está na forma de escrever o conseqüente de cada regra da forma “SE-ENTÃO”. Segundo Ortega (2001), o primeiro é mais divulgado pela sua simplicidade e por se adaptar muito bem aos controladores *fuzzy*. Para um estudo sobre o método de KTS, recomendamos Barros e Bassanezi (2006) ou Takagi e Sugeno (1985).

Considere R e S duas relações *fuzzy* binárias em $U \times V$ e $V \times W$, respectivamente. A composição $R \circ S$ é uma relação *fuzzy* binária em $U \times W$, cuja função de pertinência é

$$f_{R \circ S}(x, z) = \sup_{y \in V} [\min(f_R(x, y), f_S(y, z))]. \quad (28)$$

Essa composição é conhecida por MAX-MIN (Barros e Bassanezi, 2006).

Um caso especial de composição MAX-MIN é a regra de composição de inferência, base para o método de inferência de Mamdani que será apresentado após a definição e observação sobre essa regra.

Seja R é uma relação *fuzzy* de U para V , e A é um subconjunto *fuzzy* de U . O subconjunto *fuzzy* B de V que é deduzido por A é dado pela composição $B = R \circ A$, cuja função de pertinência é (Zadeh, 1973; Barros e Bassanezi, 2006)

$$f_B(y) = \sup_{x \in U} [\min(f_R(x, y), f_A(x))]. \quad (29)$$

Essa regra foi proposta por Zadeh (1973) e pode ser considerada como uma extensão da regra de Modus Ponens (Barros e Bassanezi, 2006).

Dentre muitas definições presentes em seu trabalho, Zadeh (1973) apresenta uma que facilitará a compreensão de um passo no método de inferência de Mamdani. Tal definição modela a regra do tipo “SE A ENTÃO B” por meio do produto cartesiano *fuzzy* $A \times B$.

Teoricamente, Mamdani propõe uma relação *fuzzy* binária M entre x e y para modelar matematicamente a base de regras, aplicando o seguinte procedimento (Barros e Bassanezi, 2006).

- Cada regra R_j , do tipo “SE x é A_j ENTÃO y é B_j ” é modelada pelo \wedge (mínimo);
- O conectivo lógico “E” é modelado pela t-norma \wedge (mínimo);
- O conectivo lógico “OU” é modelado pela t-conorma \vee (máximo) que conecta as regras *fuzzy* da base de regras.

A relação *fuzzy* M é o subconjunto *fuzzy* de $U \times V$, cuja função de pertinência é dada por

$$f_M(x, y) = \max_{1 \leq j \leq r} [f_{A_j}(x) \wedge f_{B_j}(y)], \quad (30)$$

sendo r o número de regras e, A_j e B_j subconjuntos *fuzzy* da regra j.

A relação R, que aparece na definição de regra de composição de inferência, pode ser definida de diversas formas. No método de Mamdani, por exemplo, R é a relação M definida anteriormente. Ou seja, o método de Mamdani representa um caso particular da regra de composição de inferência.

Muitos métodos de inferência, incluindo o de Mamdani, são exemplos de operadores reticulados (Castilho e Valle, 2009). Segundo esses autores, um reticulado é um conjunto parcialmente ordenado L onde todo subconjunto finito possui supremo e ínfimo. Se acrescentarmos subconjunto infinito na definição anterior, obtemos a definição de reticulado completo. O intervalo [0, 1] é um exemplo de reticulado completo.

As operações de supremo e ínfimo definem, respectivamente, duas operações binárias, junção (\vee) e reunião (\wedge). Essas operações formam a base para definirmos os operadores reticulados sup- \wedge e inf- \vee .

Os principais sistemas baseados em regras *fuzzy* representam operadores sup- \wedge , por exemplo, o método de inferência de Mamdani (Castilho e Valle, 2009).

Segundo Castilho e Valle (2009), um espaço reticulado sup- \wedge é um conjunto não vazio \mathfrak{T} definido sobre um reticulado distributivo L (\vee e \wedge são distributivas uma em relação à outra) onde a operação junção associa a cada par $x, y \in \mathfrak{T}$ um elemento $x \vee y \in \mathfrak{T}$ e a operação reunião associa a cada $x \in \mathfrak{T}$ e $\alpha \in L$ um elemento $\alpha \wedge x \in \mathfrak{T}$.

Sejam \mathfrak{T} e \wp espaços reticulados sobre L. Dizemos que $T: \mathfrak{T} \rightarrow \wp$ é um operador sup- \wedge se a equação a seguir for satisfeita para todo $x, y \in \mathfrak{T}$ e $\alpha, \beta \in L$ (Castilho e Valle, 2009).

$$T[(\alpha \wedge x) \vee (\beta \wedge y)] = [\alpha \wedge T(x)] \vee [\beta \wedge T(y)]. \quad (31)$$

Após a aplicação da inferência de Mamdani, obtemos uma saída *fuzzy* (conjunto *fuzzy*) que precisará ser convertido em um número real que, finalmente, indicará o controle a ser adotado. Para isso, necessitamos de um método de defuzzificação que represente um conjunto *fuzzy* por um número real.

Neste trabalho será usado o método centro de área, também conhecido como centróide ou centro de gravidade, um dos mais comuns defuzzificadores (Barros e Bassanezi, 2006). Existem outros métodos de defuzzificação, podemos citar dois bem comuns na literatura, o centro dos máximos e a média dos máximos apresentados em Barros e Bassanezi (2006).

O centro de área $S(B)$ é uma média ponderada, cujos pesos são as funções de pertinência de cada ponto do domínio de um conjunto *fuzzy* B. As equações (32) e (33) determinam o centro de área para um domínio discreto e contínuo, respectivamente.

$$S(B) = \frac{\sum_{i=0}^n x_i f_B(x_i)}{\sum_{i=0}^n f_B(x_i)} \quad (32)$$

$$S(B) = \frac{\int_x f_B(x) x dx}{\int_x f_B(x) dx} \quad (33)$$

A seguir é apresentado um exemplo abstrato de um controlador *fuzzy*.

Exemplo 7: Considere um controlador *fuzzy* com duas entradas (x e y), uma saída (z) e duas regras (R_1 e R_2). Esse exemplo será dividido em etapas a fim de associarmos com conceitos vistos anteriormente sobre controladores *fuzzy*.

1ª etapa (fuzzificação): construção das funções de pertinências.

$$f_{A_1}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ \frac{x}{2}, & 0 < x \leq 2 \\ \frac{-x}{2} + 2, & 2 < x < 4 \\ 0, & x \geq 4 \end{cases} \quad (34)$$

$$f_{A_2}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 2 \\ \frac{x}{2} - 1, & 2 < x \leq 4 \\ \frac{-x}{2} + 3, & 4 < x < 6 \\ 0, & x \geq 6 \end{cases} \quad (35)$$

$$f_{B_1}(y) = \begin{cases} 0, & y \leq 4 \\ \frac{y}{2} - 2, & 4 < y \leq 6 \\ \frac{-y}{2} + 4, & 6 < y < 8 \\ 0, & y \geq 8 \end{cases} \quad (36)$$

$$f_{B_2}(y) = \begin{cases} 0, & y \leq 6 \\ \frac{y}{2} - 3, & 6 < y \leq 8 \\ \frac{-y}{2} + 5, & 8 < y < 10 \\ 0, & y \geq 10 \end{cases} \quad (37)$$

$$f_{C_1}(z) = \begin{cases} 0, & z \leq 1 \\ \frac{z-1}{2}, & 1 < z \leq 3 \\ \frac{-z+5}{2}, & 3 < z < 5 \\ 0, & z \geq 5 \end{cases} \quad (38)$$

$$f_{C_2}(z) = \begin{cases} 0, & z \leq 3 \\ \frac{z-3}{2}, & 3 < z \leq 5 \\ \frac{-z+7}{2}, & 5 < z < 7 \\ 0, & z \geq 7 \end{cases} \quad (39)$$

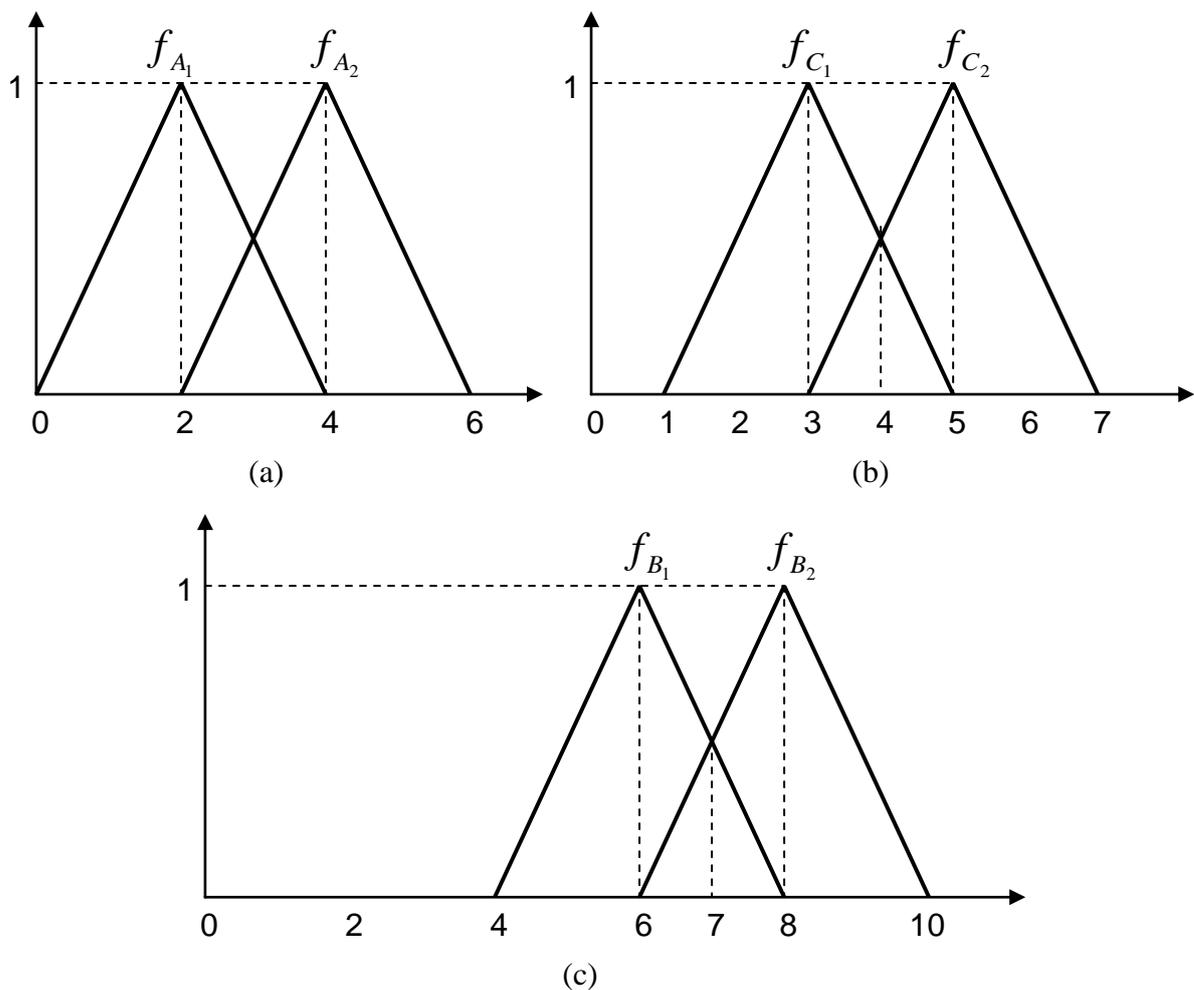


Figura 17. Funções de pertinência para os conjuntos *fuzzy* A (a), C (b) e B (c).

2ª etapa (base de regras): x e y são os valores de entrada e z é o valor de saída. Consideramos apenas duas regras para fins didáticos, R_1 e R_2 , para mostrar o funcionamento de um controlador *fuzzy*. No entanto, a quantidade de regras está associada à combinação das variáveis de entrada e ao conhecimento de especialistas no fenômeno a ser modelado pelo controlador.

R_1 : SE x é A_1 E y é B_1 ENTÃO z é C_1 .

R_2 : SE x é A_2 E y é B_2 ENTÃO z é C_2 .

Considere $x_0 = 3$ e $y_0 = 6,5$ os valores iniciais para testar o controlador *fuzzy*.

3ª etapa (inferência *fuzzy*): o método escolhido foi o de Mamdani. O primeiro passo, nessa etapa, é relacionar os valores iniciais $x_0 = 3$ e $y_0 = 6,5$ com os correspondentes valores dos conjuntos *fuzzy* A_1 e B_1 , pertencentes à regra R_1 . Sendo assim, aplicam-se os valores iniciais nas funções de pertinência dos respectivos conjuntos *fuzzy*, A_1 e B_1 .

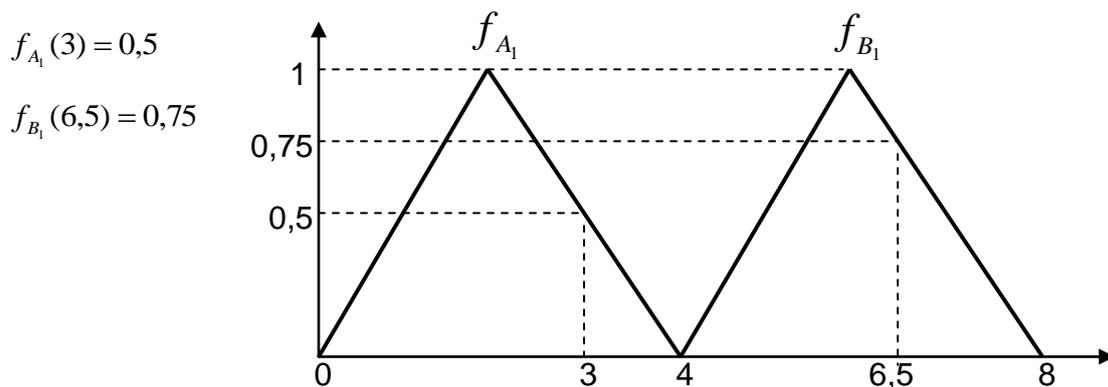


Figura 18. Valores iniciais aplicados à regra R_1 .

Aplicando $\min(0,5; 0,75) = 0,5 \wedge 0,75 = 0,5$ à conclusão da regra R_1 , obtemos a área hachurada do trapézio (figura 19).

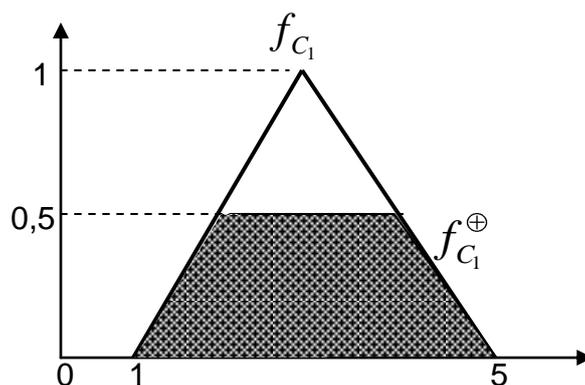


Figura 19. Saída parcial para a regra R_1 .

Repetindo o procedimento para a regra R_2 , obtemos

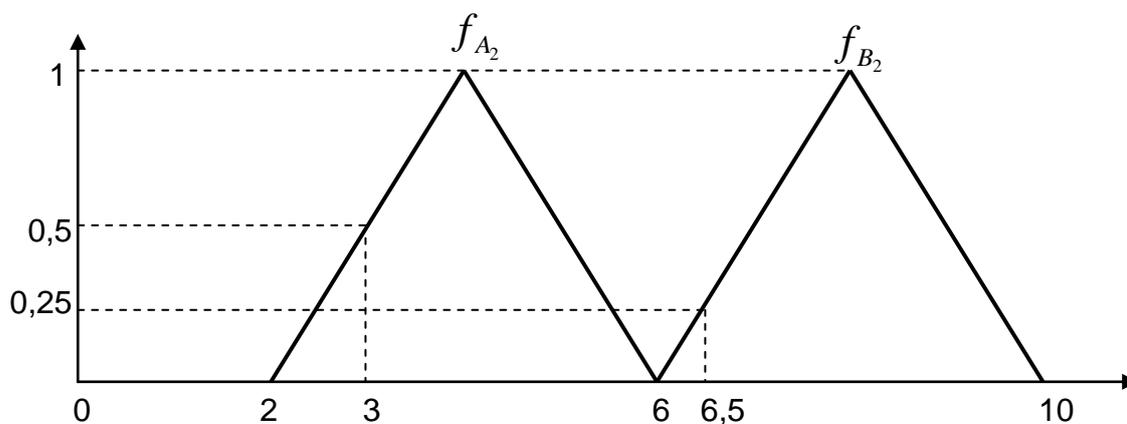


Figura 20. Valores iniciais aplicados à regra R_2 .

Aplicando $\min(0,25; 0,5) = 0,25 \wedge 0,5 = 0,25$ à conclusão da regra R_2 , obtemos a área hachurada do trapézio (figura 21).

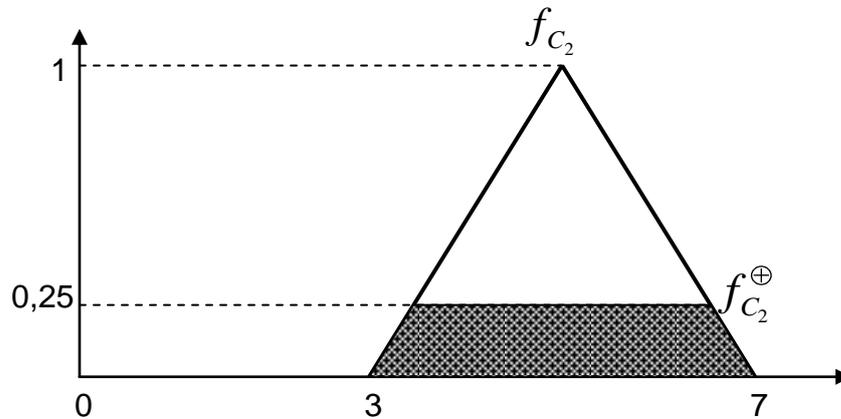


Figura 21. Saída parcial para a regra R_2 .

Aplicando $\max(f_{C_1}^\oplus, f_{C_2}^\oplus) = f_{C_1}^\oplus \vee f_{C_2}^\oplus$, obtém-se a união das duas áreas hachuradas correspondentes às saídas parciais para cada regra.

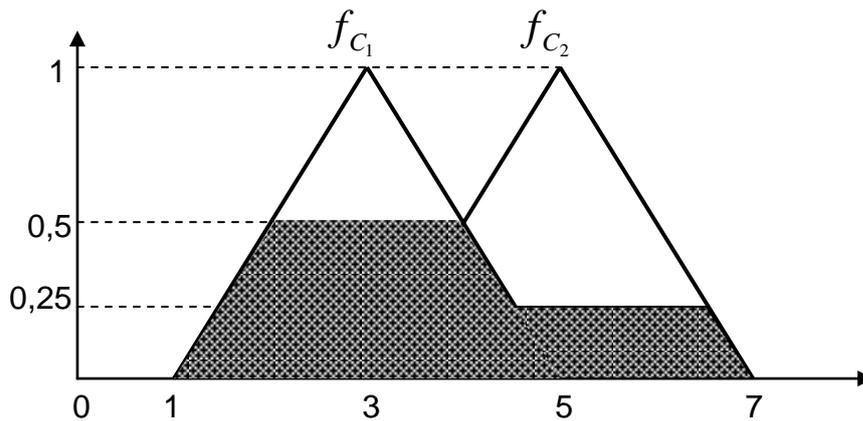


Figura 22. Saída final do controlador *fuzzy*.

A saída final do controlador *fuzzy* é um conjunto *fuzzy*, cuja função de pertinência é descrita na figura 23.

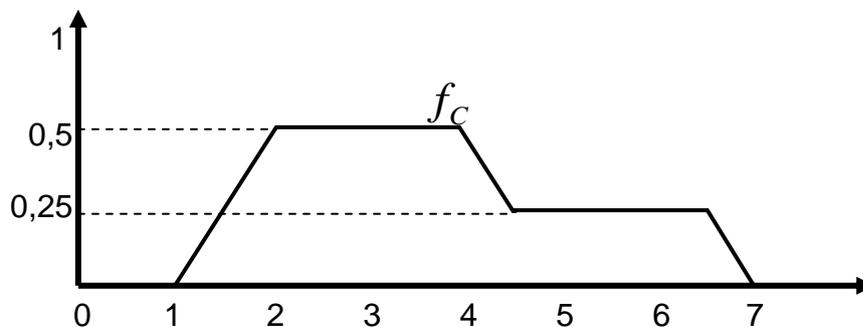


Figura 23. Função de pertinência para a saída final do controlador *fuzzy*.

4ª etapa (defuzzificação): o método utilizado é o centro de área. Aplicando a equação (32) na saída final do controlador *fuzzy* (figura 23), obtemos

$$S(C) = \frac{2.(0,5) + 3.(0,5) + 4.(0,5) + 5.(0,25) + 6.(0,25)}{0,5 + 0,5 + 0,5 + 0,25 + 0,25} = 3,6 \quad (40)$$

O valor 3,6 corresponde à saída *crisp* (número real) do conjunto *fuzzy* C. Como o exemplo 7 tem apenas o objetivo de ilustrar o funcionamento de um controlador *fuzzy*, o valor 3,6 possui apenas o significado numérico.

2.2.3 Aplicações de lógica *fuzzy*

Na ciência do solo, a teoria dos conjuntos *fuzzy* é utilizada principalmente para a classificação de solos. O objetivo da classificação é reduzir um sistema complexo, representado por alguns conjuntos de dados, em classes explicitamente definidas (McBratney e Odeh, 1997). De acordo com esses autores, destacam-se outras áreas potenciais de aplicação de conjuntos *fuzzy* em ciência do solo, tais como: modelagem de processos físicos do solo e geoestatística *fuzzy*.

Outras áreas da ciência do solo estão sendo beneficiadas com as aplicações de conjuntos *fuzzy*, são elas: controle do potencial matricial (Lima *et al.*, 2010), erosão do solo (Cohen *et al.*, 2008; Mitra *et al.*, 1998), infiltração da água no solo (Bardossy e Disse, 1993), qualidade do solo (Torbert *et al.*, 2008), estimativa da densidade do solo (Benini, 2007), sistema de irrigação (Feliciano, 2012), balanço hídrico (Chalkidis *et al.*, 2007) e dinâmica da água e solutos no solo (Souza, 2007). Também há aplicações de conjuntos *fuzzy* em outras ciências, por exemplo, em biomedicina (Ortega, 2001), na área nuclear (Garcia *et al.*, 2009), em geofísica, biologia e engenharia de sistemas (Bardossy e Duckstein, 1995). Não esquecendo das publicações do grupo de biomatemática da UNICAMP, nas quais aplicações *fuzzy* têm grande destaque.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

Desde 1988 a Petrobras vem explorando gás natural e petróleo na província petrolífera de Urucu. A unidade, denominada Base de Operações Geólogo Pedro Moura (UN-BSOL), esta situada no município de Coari, distando 650 km a sudoeste de Manaus-AM. O trecho do rio Urucu onde se situa a Base de Operações Geólogo Pedro Moura é localizada entre os paralelos de 4° 45' e 5° 05'S e os meridianos de 65° 00' e 65° 25' W. A UN-BSOL se insere na bacia do Solimões, a qual se separa da bacia do Acre pelo arco de Iquitos e da bacia do Amazonas pelo arco de Purus (Figura 24). Os sedimentos depositados no Período Terciário-Quaternário (Formação Solimões - TQs) é que definem o material de origem dos solos da área de estudo. Basicamente, a Formação Solimões é composta de arenitos muito finos e médios com níveis grosseiros e conglomeráticos. Na área de estudo o domínio Morfoestrutural predominante é o Planalto Rebaixado da Amazônia (Ocidental). Essa área pertence ao Domínio Morfoclimático Planaltos e Depressões Dissecadas e Superficiais Pediplanadas. Os sedimentos da formação Solimões não são resistentes aos processos erosivos e o clima atual da região é bastante úmido (Petrobras, 2010).

O Prof. Marcos Bacis Ceddia, co-orientador desta dissertação, coordenou o projeto aprovado e financiado pela Petrobras nesta região. De fato, ele foi o grande incentivador da utilização dos dados contidos no relatório da Petrobras, uma vez que tem interesse em utilizar a modelagem da umidade para estimá-la em localidades ainda não exploradas ou com pouca informação relevante.

O conhecimento do comportamento da água no solo desta área é de grande interesse para a Petrobras porque gera medidas de previsão e tomada de decisão sobre contaminação da água e do solo. A fim de atender a esse interesse e também a recente preocupação com o uso racional da água na produção agrícola, faz-se necessário o desenvolvimento de modelos como o apresentado neste trabalho.

3.2 Dados de Solo

Os dados utilizados neste trabalho foram cedidos pela Petrobras (2010), especificamente de 43 perfis de solo dos 44 perfis que apresentavam curvas de retenção. Isso porque apenas o perfil 81 não apresentou o percentual de argila (informação relevante para o modelo proposto), e desta forma foi desconsiderado.

Baseando-se nos 43 perfis disponíveis realizamos tratamentos estatísticos nas informações presentes nas tabelas desses perfis (anexos), como umidade volumétrica, potencial matricial e percentual de argila. Esses tratamentos foram necessários para a construção das tabelas 2, 3 e 4 (pág. 31 e 32) e correspondem, sobretudo, aos cálculos de médias e desvios padrão dessas informações de solo para a realização dos passos seguintes da modelagem *fuzzy*, descritos na seção a seguir.

Na tabela do apêndice, os 43 perfis estão organizados segundo a ordem crescente do percentual de argila em cada um de seus respectivos horizontes.

A importância do percentual de argila justifica-se pelo fato dele poder ser utilizado para classificar as texturas (arenosa, média, argilosa e muito argilosa) (Embrapa 2006).

No entanto, foram considerados três grupamentos de classes texturais: arenosa, média e argilosa.

Não houve necessidade de considerar a classe muito argilosa, com mais de 60% de argila, visto que não está presente, significativamente, no levantamento detalhado realizado pela Petrobras (2010).

Nós ordenamos o percentual de argila para separarmos esses 43 perfis de acordo com as classes texturais definidas anteriormente. Dessa forma, visualizamos 236 horizontes segundo o seu percentual de argila, dos quais 28% são de textura arenosa, 49% são de textura média e 23% de textura argilosa. Desse total de horizontes, a média e o desvio padrão de argila foram de, respectivamente, 25% e 14%.

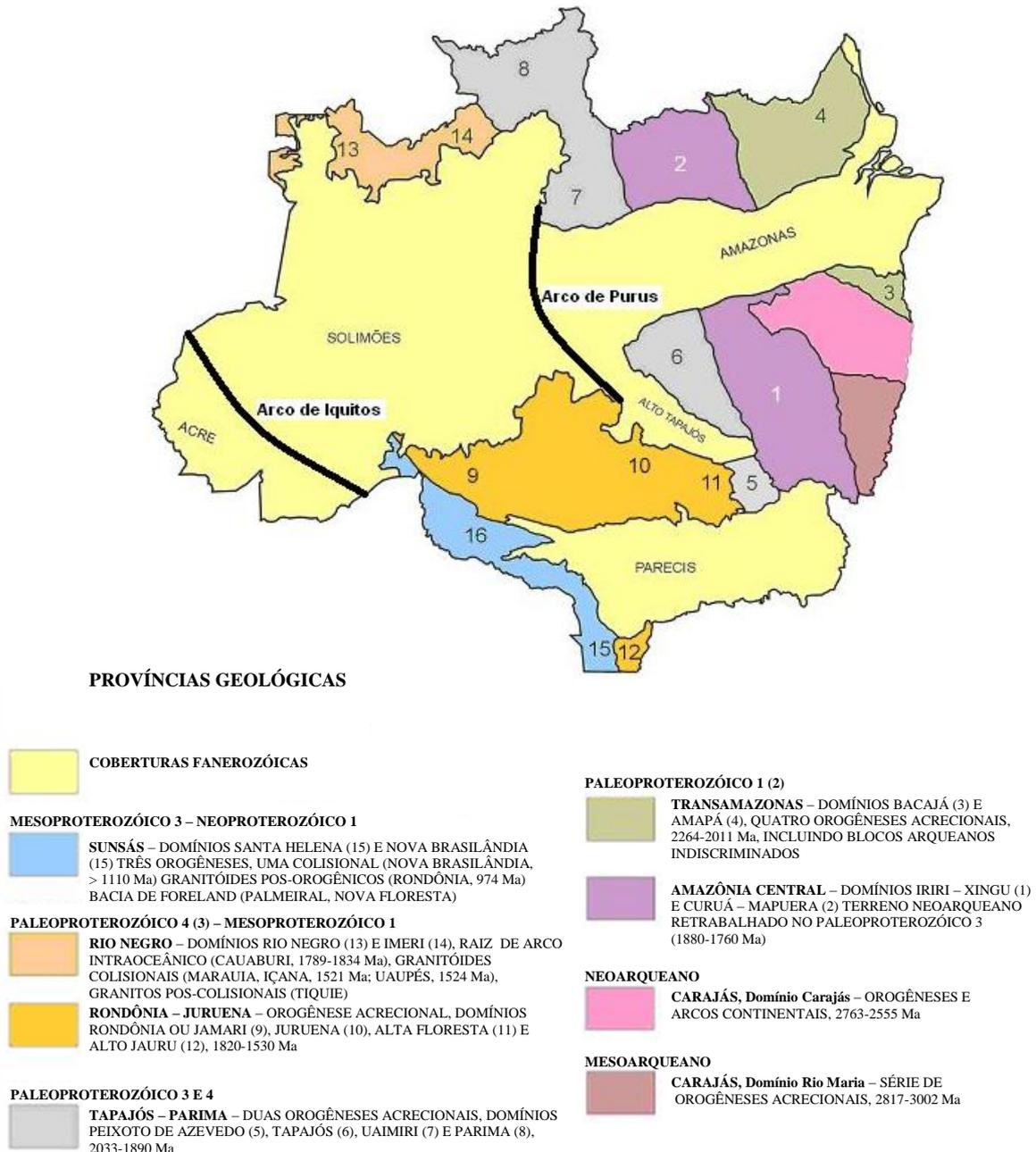


Figura 24. Províncias geológicas da região da Amazônia Legal. (Fonte CPRM, 2003 *apud* Petrobras, 2010).

Segundo Petrobras (2010), as classes de solos encontradas na área de estudo são Argissolos, Cambissolos, Espodossolos, Gleissolos, Neossolos e Planossolos. No entanto, dos

11 perfis selecionados aleatoriamente para validação do modelo, nenhum deles pertence à classe Espodossolo e nem a Planossolo. Dessa forma, os 11 perfis selecionados correspondem a uma boa amostragem para validação, equivalendo a 66,7% das classes de solos da área de estudo, que serão descritas pela Petrobras (2010) a seguir.

Os Argissolos compreendem solos constituídos por material mineral, que têm como características diferenciais a presença de horizonte B textural (Bt) de argila de atividade baixa, ou alta conjugada com saturação por bases baixa ou caráter alítico.

A textura varia de arenosa a argilosa no horizonte A e de média a muito argilosa no horizonte Bt, sempre havendo aumento de argila daquele para este.

Os Cambissolos compreendem solos constituídos por material mineral com horizontes B incipiente (Bi) subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial, desde que em qualquer dos casos não satisfaçam os requisitos estabelecidos para serem enquadrados nas classes Vertissolos, Chernossolos, Plintossolos e Organossolos.

O horizonte Bi tem textura franco-arenosa ou mais argilosa e o solum, geralmente, apresenta teores uniformes de argila, podendo ocorrer ligeiro decréscimo ou um pequeno incremento de argila do horizonte A para o Bi. A estrutura do Bi pode ser em blocos, granular ou prismática, havendo casos, também, de estruturas em grãos simples e maciça.

Os Gleissolos compreendem solos hidromórficos, constituídos por material mineral que apresentam horizonte glei dentro de 150 cm da superfície do solo, imediatamente abaixo de horizontes A ou E (com ou sem gleização), ou de horizonte hístico com espessura insuficiente para definir a classe dos Organossolos; não apresentam textura exclusivamente areia ou areia franca em todos os horizontes dentro dos primeiros 150 cm da superfície do solo ou até um contato lítico, tampouco horizonte vértico, ou horizonte Bt com mudança textural abrupta acima ou coincidente com horizonte glei ou qualquer outro tipo de horizonte B diagnóstico acima do horizonte glei.

Os solos desta classe encontram-se permanentemente ou periodicamente saturados com água, salvo se artificialmente drenados. A água permanece estagnada internamente, ou a saturação é por fluxo lateral no solo. Em qualquer circunstância, a água nos solos pode se elevar por ascensão capilar, atingindo a superfície.

O horizonte superficial tem teores médios a altos de carbono orgânico.

Os Neossolos compreendem solos constituídos por material mineral ou orgânico pouco espesso, que não apresentam alterações expressivas em relação ao material originário devido à baixa intensidade de atuação dos processos pedogenéticos, seja em razão de características inerentes ao próprio material de origem, como maior resistência ao intemperismo ou composição químico-mineralógica, ou por influência dos demais fatores de formação (clima, relevo ou tempo), que podem impedir ou limitar a evolução dos solos.

Os 11 perfis, com seus respectivos horizontes, selecionados aleatoriamente são descritos a seguir. As análises físicas e químicas de cada perfil estão nos anexos.

O perfil P054 é um Cambissolo Háplico Alítico típico A moderado hiperdistrófico (CXal). O horizonte selecionado foi Bi₁ (B incipiente) com profundidade de 48 a 76 cm; Amarelo-avermelhado (7,5YR 6/8, úmido); Franco-argilosa; forte, pequena e média, blocos sub angulares; dura, firme, plástica e pegajosa; transição gradual e plana.

O perfil P101 é um Argissolo Amarelo Distrófico típico A moderado álico (PAd). O horizonte selecionado foi BA com profundidade de 20 a 50 cm; Amarelo (10YR 7/6, úmido); Franca; forte, pequena e média, franca; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição gradual e plana.

O perfil P051 é um Gleissolo Háplico Ta Distrófico neofluvíssólico A moderado (GXvd). O horizonte selecionado foi AC com profundidade de 7 a 23 cm; Bruno-avermelhado-claro (5YR 6/4, úmido); Franco-arenosa; moderada, pequena e média, blocos

sub angulares; ligeiramente dura, friável, Ligeiramente plástica e Ligeiramente pegajosa; transição clara e plana.

O perfil P045 é um Neossolo Flúvico Tb Distrófico típico A moderado Extremamente drenado (RYbd). O horizonte selecionado foi CA com profundidade de 5 a 23 cm (18-33 cm); Bruno muito claro-acinzentado (10YR 7/4, úmido); Areia; fraca, pequena e média, blocos sub angulares; solta, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição clara e ondulada.

O perfil P049 é um Argissolo Amarelo Alítico plíntico A moderado moderadamente drenado (PAal). O horizonte selecionado foi Btf₂ com profundidade de 56 a 76 cm; (10YR 7/8, úmido); mosqueado comum, pequeno, proeminente Vermelho-claro (2,5YR 6/8, úmido); Franco-argilosa; forte, pequena e média, blocos angulares; dura, firme, ligeiramente plástica e pegajosa; transição clara e plana.

O perfil P061 é um Cambissolo Háptico Tb Distrófico plíntico A moderado álico (CXbd). O horizonte selecionado foi Bif₂ com profundidade de 66 a 91 cm; Amarelo-avermelhado (7,5YR 6/6, úmido); mosqueado abundante, pequeno, difuso Vermelho-claro (2,5YR 6/6, úmido); Argila; forte, pequena, prismático e blocos angulares; dura, firme, ligeiramente plástica e muito pegajosa; transição difusa e plana.

O perfil P058 é um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico A moderado álico (PVAd). O horizonte selecionado foi BA com profundidade de 23 a 53 cm; Amarelo-avermelhado (5YR 6/6, úmido); Franca; forte, muito pequena e pequena, blocos sub angulares; ligeiramente dura, friável, plástica e pegajosa; transição clara e plana.

O perfil P037 é um Cambissolo Háptico Alítico típico A moderado hiperdistrófico (CXal). O horizonte selecionado foi BA com profundidade de 21 a 42 cm; Bruno-amarelado-claro (10YR 6/4, úmido); Franco-argiloarenosa; forte, pequeno e médio, blocos sub angulares; dura, firme, muito plástica e pegajosa; transição plana e clara.

O perfil P106 é um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico A moderado moderadamente drenado (PVAA). O horizonte selecionado foi AB com profundidade de 7 a 19 cm; Amarelo-avermelhado (7,5YR 6/6, úmido); Franca; forte, pequena, blocos sub angulares; dura, muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição clara e plana.

O perfil P150 é um Cambissolo Háptico Alumínico típico A moderado hiperdistrófico (CXa). O horizonte selecionado foi A com profundidade de 0 a 7 cm; Bruno-amarelado-escuro (10YR 3/6, úmido); Franca; fraca, pequena, granular; dura, muito friável, não plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.

O perfil P035 é um Cambissolo Háptico Alumínico típico A moderado hiperdistrófico (CXa). O horizonte selecionado foi Bi₁ com profundidade de 73 a 106 cm; Bruno muito claro-acinzentado (10YR 7/4, úmido); Franco-argiloarenosa; forte, muito pequena e pequena, blocos sub angulares; ligeiramente dura, friável, plástica e muito pegajosa; transição clara e plana.

3.3 Modelagem *Fuzzy*

Dou *et al.* (1999 *apud* Souza, 2007), afirmam que o método de Mamdani tem se destacado por sua eficiência e simplicidade, justificando a escolha desse método neste trabalho.

Segundo Sugeno e Yasukawa (1993 *apud* Souza, 2007), os modelos baseados em regras *fuzzy* são pouco sensíveis ao formato das funções de pertinência. Sendo assim, por facilidade e simplicidade, neste trabalho, assim como em Lima *et al.* (2010), Bardossy e Disse (1993) e Souza (2007), foram utilizadas funções de pertinência triangulares.

Nosso modelo baseia-se em um controlador *fuzzy* implementado no *Fuzzy Logic Toolbox* do MATLAB® (Amendola *et al.*, 2005), utilizando o método de inferência de

Mamdani e o centro de área como método de defuzzificação. As variáveis linguísticas consideradas para o controlador são o potencial matricial, a textura e a umidade do solo. Sendo que as duas primeiras variáveis são de entrada e a última a de saída.

Para o potencial matricial (PM), 7 funções triangulares foram definidas segundo observações de curvas de retenção e sugestões do especialista Dr. Marcos B. Ceddia (Prof. Associado - Depto. de Solos/UFRRJ). O intervalo para PM é de 0 a 15 atm. Cada função de pertinência está associada a um termo linguístico e definida por um número *fuzzy* triangular, descritos na tabela 2. Os valores médios entre os potenciais padrões têm grau 1 a fim de considerar a influência das pequenas variações de potenciais. Os valores extremos de PM, 0 e 15 atm, também têm grau 1, por serem os potenciais mais baixo e mais alto, respectivamente. As funções de pertinência para a variável PM estão descritas na figura 25.

Para a textura do solo (TS), segundo a classificação das classes texturais definidas pelo percentual de argila (Embrapa, 2006), foram definidas três funções de pertinência do tipo triangular. O universo de discurso para a variável textura é o intervalo de 0 a 0,6 (que corresponde ao percentual de argila). Foi considerada uma pequena interseção entre as funções de pertinência a fim de melhor “cobrir” valores de transição entre as classes texturais. Definimos o comprimento do intervalo de interseção usando como critério a média entre o percentual de horizontes arenosos (28%) e argilosos (23%) dos 43 perfis. Aplicamos esses percentuais nos comprimentos das classes arenosa (0,15) e argilosa (0,25), obtendo, respectivamente, 0,04 e 0,06. Cada função de pertinência está associada a um termo linguístico e definida por um número *fuzzy* triangular, descritos na tabela 3. As funções de pertinência para a variável linguística TS estão descritas na figura 26.

Tabela 2. Termos linguísticos para a variável potencial matricial.

Potencial Matricial (PM)	Número <i>fuzzy</i>
Baixíssimo (P1)	(0; 0; 0,1)
Muito baixo (P2)	(0,05; 0,2; 0,3)
Baixo (P3)	(0,2; 0,4; 0,5)
Médio baixo (P4)	(0,4; 0,75; 1)
Médio alto (P5)	(0,75; 2; 3)
Alto (P6)	(2; 4; 5)
Muito alto (P7)	(4; 15; 15)

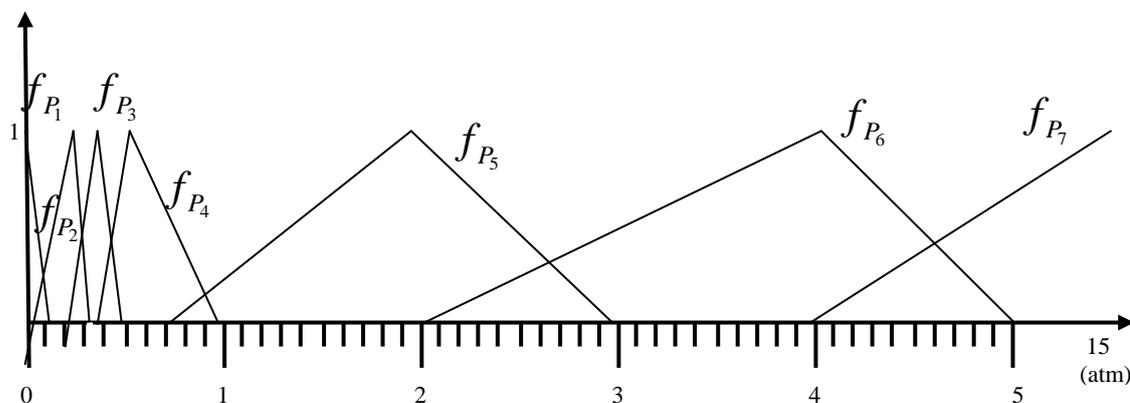


Figura 25. Funções de pertinência para a variável linguística PM.

Para a variável de saída, umidade do solo (US), os intervalos para cada função de pertinência foram obtidos segundo a variância, média e desvio padrão das umidades determinadas para os 43 perfis e seus respectivos horizontes. O universo de discurso para a variável umidade é o intervalo de 0,06 a 0,54, que corresponde ao valor máximo e mínimo das umidades determinadas por Petrobras (2010), em média (para evitar o uso de uma umidade muito elevada ou muito baixa que apareça o mínimo de vezes nos horizontes dos 43 perfis). Cada função de pertinência está associada a um termo linguístico e definida por um número *fuzzy* triangular, descritos na tabela 4. As funções de pertinência para a variável linguística US estão descritas na figura 27.

A maior variância (aproximadamente 0,02) entre as variâncias das classes arenosa, média e argilosa determinou o intervalo de sobreposição das funções triangulares da umidade do solo. O desvio padrão das umidades, de aproximadamente 0,10, definiu o subintervalo para cada função triangular da umidade juntamente com a variância de 0,02 entre as funções, cujos valores de umidade com grau 1 correspondem as médias das umidades com maior frequência dentro de cada subintervalo (média das modas).

Tabela 3. Termos linguísticos para a variável textura.

Textura do solo (TS)	Número <i>fuzzy</i>
Arenosa (T1)	(0; 0; 0,2)
Média (T2)	(0,15; 0,25; 0,35)
Argilosa (T3)	(0,3; 0,6; 0,6)

Tabela 4. Termos linguísticos para a variável umidade.

Umidade do solo (US)	Número <i>fuzzy</i>
Muito baixa (U1)	(0,06; 0,1; 0,18)
Baixa (U2)	(0,16; 0,22; 0,24)
Média baixa (U3)	(0,22; 0,26; 0,32)
Média alta (U4)	(0,3; 0,34; 0,36)
Alta (U5)	(0,34; 0,38; 0,4)
Muito alta (U6)	(0,38; 0,42; 0,46)
Altíssima (U7)	(0,44; 0,46; 0,54)

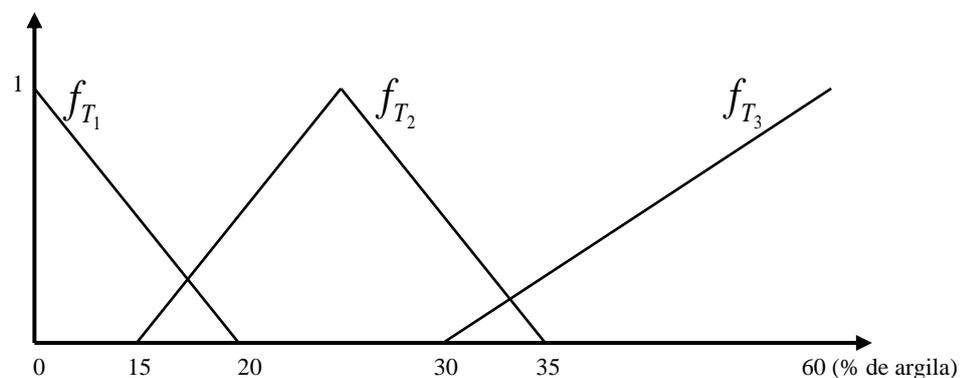


Figura 26. Funções de pertinência para a variável linguística TS.

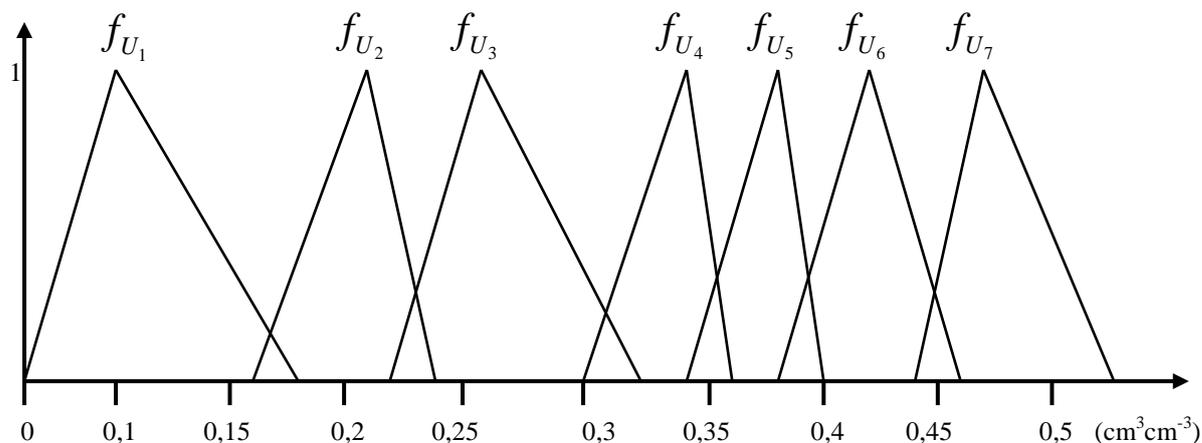


Figura 27. Funções de pertinência para a variável linguística US.

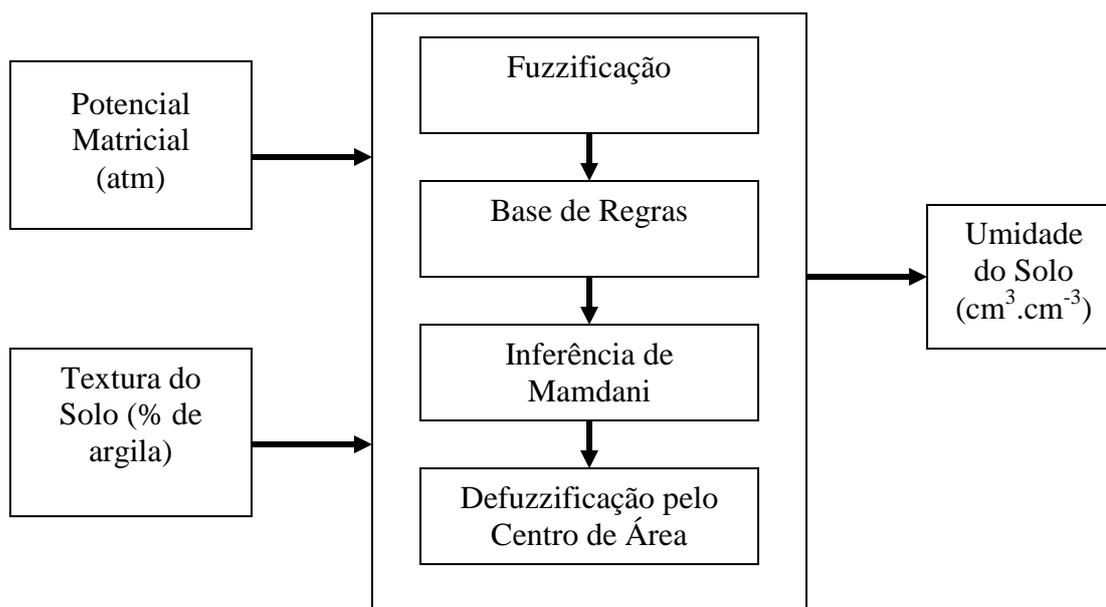


Figura 28. Arquitetura do modelo *fuzzy*.

Construímos a base de regras com 21 regras, todas do tipo “SE-ENTÃO” como descritas na tabela 5, combinando as funções de pertinência das duas variáveis de entrada (PM e TS) com as funções de pertinência da variável de saída (US), segundo interpretações das curvas de retenção apresentadas em Petrobras (2010) e sugestões do especialista Dr. Marcos B. Ceddia.

Tabela 5. Base de regras com duas entradas e uma saída.

Regra	Se		Então
	PM	e	US
1	P1	T1	U7
2	P2	T1	U6
3	P3	T1	U4
4	P4	T1	U4
5	P5	T1	U1
6	P6	T1	U1
7	P7	T1	U1
8	P1	T2	U6
9	P2	T2	U5
10	P3	T2	U4
11	P4	T2	U4
12	P5	T2	U3
13	P6	T2	U3
14	P7	T2	U2
15	P1	T3	U6
16	P2	T3	U6
17	P3	T3	U5
18	P4	T3	U5
19	P5	T3	U5
20	P6	T3	U4
21	P7	T3	U4

Apresentaremos, a seguir, um exemplo ilustrando o funcionamento do controlador *fuzzy* proposto como modelo para estimar a umidade do solo da formação Solimões.

Exemplo 8: Considere o horizonte CA do perfil P045, com 6% de argila na sua composição e potencial matricial igual a 0 atm.

Um esquema da aplicação da inferência de Mamdani é apresentado na figura 29.

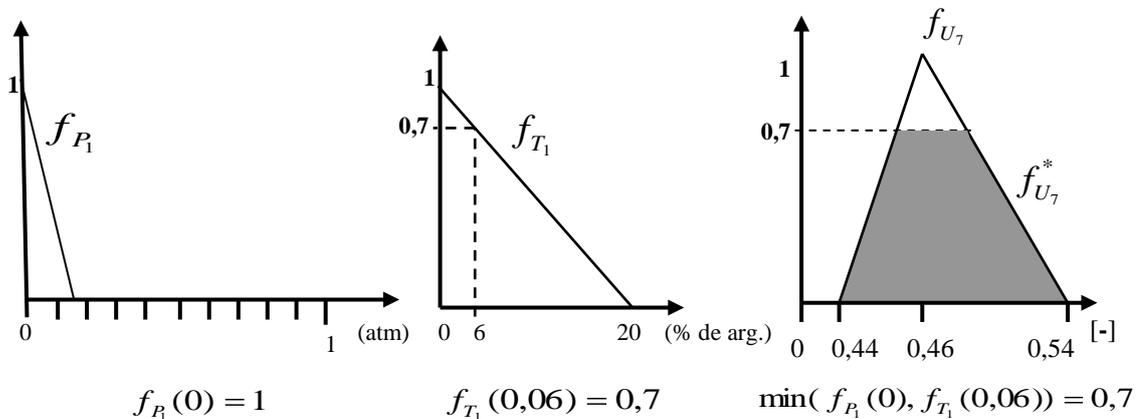


Figura 29. Esquema da aplicação do método de Mamdani na regra 1 do modelo *fuzzy*.

Os valores de entrada 0 atm e 6% aplicaram-se, simultaneamente, somente na regra 1, o que tornou irrelevante a ilustração do cálculo do máximo entre saídas de regras diferentes para as mesmas entradas, uma vez que a saída final será a saída referente a regra 1 ($f_{U_7}^*$).

Devemos aplicar um método de defuzzificação na saída fuzzy $f_{U_7}^*$ (figura 29) para obtermos um valor real, a umidade estimada. A função $f_{U_7}^*$ descreve o perímetro de um trapézio sobre o eixo horizonte (umidade volumétrica). O método de defuzzificação será o centro de área (S), aplicado sobre o intervalo [0,44; 0,54] para nos aproximarmos do resultado obtido pelo MATLAB[®].

$$S = \frac{\int_{0,44}^{0,54} f_{U_7}^*(x) x dx}{\int_{0,44}^{0,54} f_{U_7}^*(x) dx} = \frac{\int_{0,44}^{0,454} (50x - 22) x dx + \int_{0,454}^{0,484} 0,7 x dx + \int_{0,484}^{0,54} \left(\frac{-100}{8} x + \frac{54}{8} \right) x dx}{\int_{0,44}^{0,454} (50x - 22) dx + \int_{0,454}^{0,484} 0,7 dx + \int_{0,484}^{0,54} \left(\frac{-100}{8} x + \frac{54}{8} \right) dx} =$$

$$\frac{0,021903}{0,0455} = 0,481385. \quad (41)$$

Também realizamos o cálculo do centro de área discretizando o intervalo [0,44; 0,54] de $f_{U_7}^*$ em 13 pontos e obtemos seus respectivos graus de pertinência (tabela 6).

Tabela 6. Relação de 13 valores do intervalo [0,44; 0,54] com seus graus de pertinência.

Pontos (x_i)	Grau de pertinência ($f_{U_7}^*(x_i)$)
0,445	0,25
0,45	0,5
0,454	0,7
0,458	0,7
0,46	0,7
0,47	0,7
0,48	0,7
0,484	0,7
0,49	0,625
0,5	0,5
0,51	0,375
0,52	0,25
0,53	0,125

Aplicando a fórmula do centro de área (equação 32) nos valores da tabela 6, obtemos 0,4753.

A figura 30 apresenta o exemplo 8 com todas as regras (mesmo sem uso) do ponto de vista do MATLAB[®] para fins de comparação com nossos cálculos, com o objetivo de esclarecer

didaticamente a simulação realizada no MATLAB[®]. Para mais informações sobre o funcionamento de um controlador *fuzzy* no MATLAB[®], recomendamos Amendola *et al.* (2005).

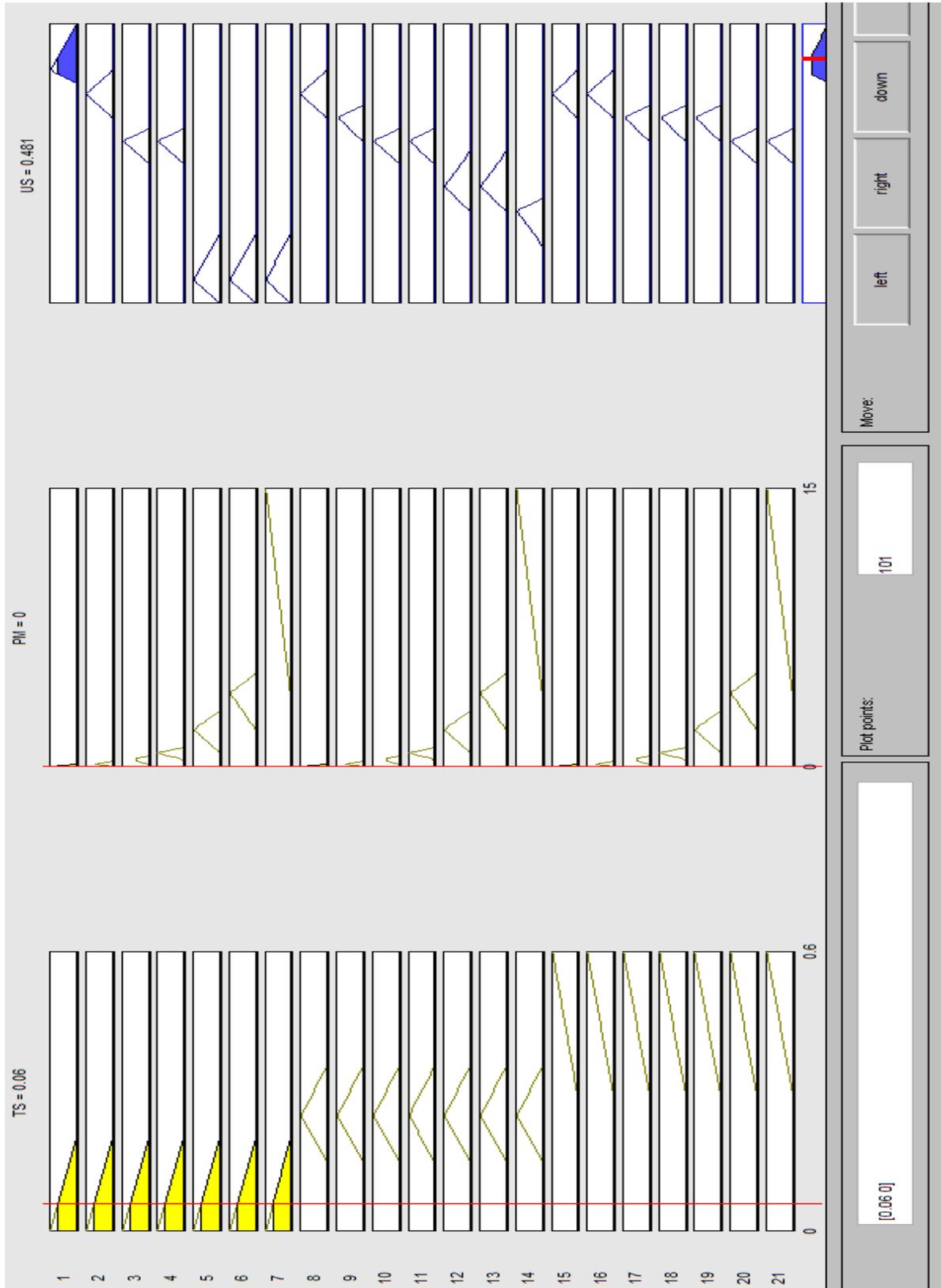


Figura 30. Inferência de Mamdani e defuzzificação via centro de área para $TS = 6\%$ e $PM = 0$, no horizonte CA do perfil P045 (Fonte MATLAB[®]).

3.4 Validação do Modelo

Utilizamos 11 perfis dos 43 para validarmos nosso modelo *fuzzy*. Essa escolha foi aleatória por meio de uma função do Microsoft Excel 2010 definida por “=aleatórioentre(1;236)”, sendo 236 o total de horizontes de todos os 43 perfis. Na ocorrência de um horizonte para um perfil já sorteado ou de um horizonte com um percentual de argila já sorteado, realizamos um novo sorteio. Esses critérios justificam-se pela heterogeneidade do solo e sensibilidade do modelo *fuzzy* proposto.

Para estudar o erro em nossa modelagem *fuzzy* consideramos o erro absoluto (EA), o erro absoluto médio (EAM), o erro relativo (ER) e o erro relativo médio (ERM). Essa consideração tem como base o erro absoluto de $\pm 2\%$ em métodos indiretos de medição de umidade do solo, como o TDR e a sonda de nêutrons (Gardner, 1986). O erro aceitável nesses métodos é nossa referência de uma boa estimativa quando comparamos com as umidades determinadas por Petrobras (2010). Os erros considerados neste trabalho são calculados pelas equações (42), (43), (44) e (45), sendo y_i o valor observado, \hat{y}_i o valor estimado e n a quantidade de observações.

$$EA = |y_i - \hat{y}_i| \quad (42)$$

$$EAM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (43)$$

$$ER = \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \quad (44)$$

$$ERM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \quad (45)$$

Como a umidade do solo pode ser expressa em porcentagem e Gardner (1986) expressa o erro absoluto em porcentagem, então os erros absolutos neste trabalho serão expressos em porcentagem a fim de comparação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente, para uma melhor compreensão dos resultados obtidos, apresentamos algumas observações sobre o fenômeno estudado.

Segundo o Prof. Dr. Marcos Bacis Ceddia, pequena variação de umidade do solo para grande variação de potencial matricial gera erro relativo maior quando comparamos a umidade observada com a umidade estimada. Por exemplo, na figura 2, a variação de 0 a 4 para o potencial causou pequena variação de umidade em torno de 0,05 para textura arenosa.

Outra observação do professor é sobre a influência da matéria orgânica na curva de retenção da água no solo, um efeito semelhante ao da argila. Isto é, um solo arenoso (baixo teor de argila) pode ter uma curva de retenção semelhante a de um solo argiloso (alto teor de argila) quando apresentar alta quantidade de matéria orgânica.

Antes de compararmos as umidades estimadas pelo modelo *fuzzy* com as observadas por Petrobras (2010), uma primeira simulação computacional foi realizada para termos uma visão geral do comportamento do fenômeno. Isso permitiu a realização de feedback e ajustes no modelo para termos uma coerência com o comportamento da umidade do solo para as três classes texturais consideradas (arenosa, média e argilosa).

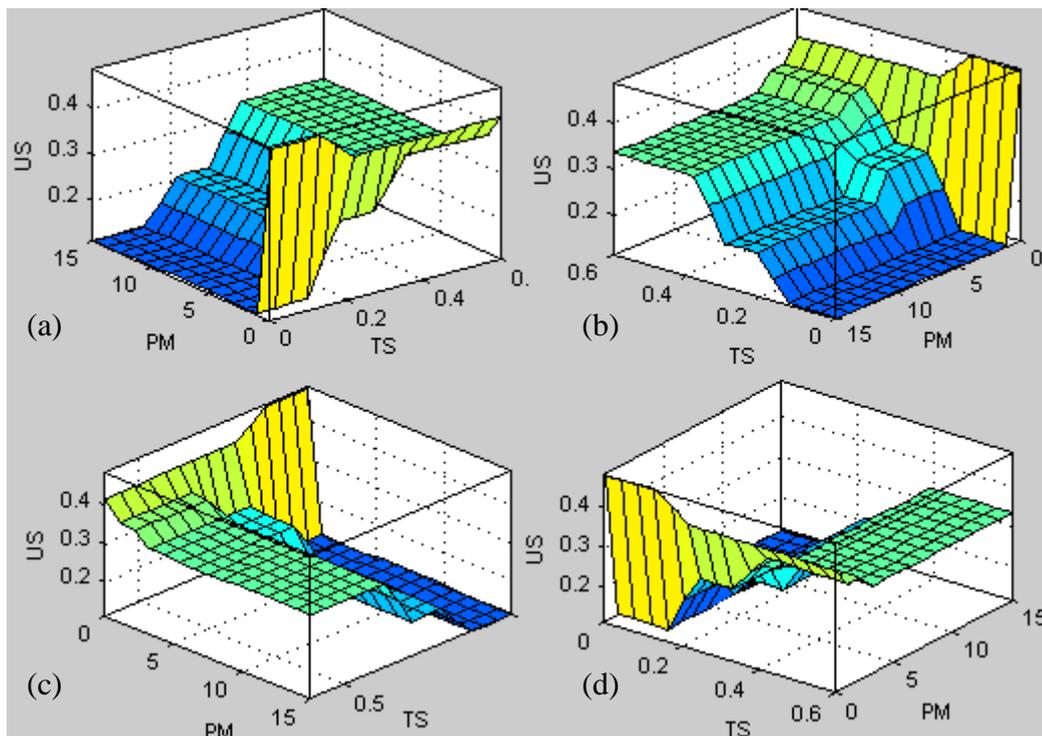


Figura 31. Superfícies de resposta relacionando as variáveis de entrada (PM e TS) e a de saída (US) sob diferentes ângulos (90°, 180° e 270°).

Aplicando uma rotação de 90°, 180° e 270° na figura 31a obtemos, respectivamente, a figura 31b, 31c e 31d.

Percebemos na figura 31 que solos com texturas argilosas têm decaimento de umidade menor, retêm mais água (região esverdeada). O mesmo não se verifica na região amarela da figura 31, que apresenta decaimento acelerado em solos arenosos (dificuldade em reter água).

A simulação apresentada na figura 31 está coerente com o comportamento esperado da umidade para diferentes potenciais matriciais e classes texturais. Outra forma de visualizar esse comportamento é descrita pela figura 32.

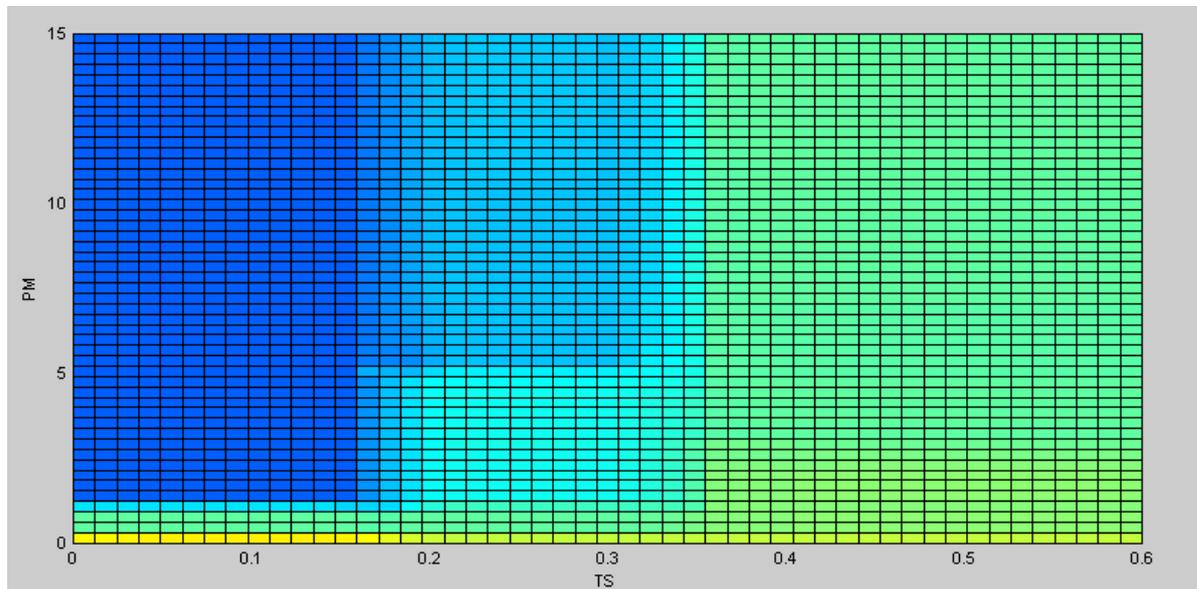


Figura 32. Variação da umidade do solo para diferentes potenciais matriciais e teores de argila.

A figura 32 corresponde à figura 31a vista de cima (plano PM versus TS). A região azul escura descreve uma baixa umidade do solo. A maior concentração de água é descrita nas regiões esverdeadas.

A relação entre umidade (US) e classe textural (TS) é descrita pela figura 33.

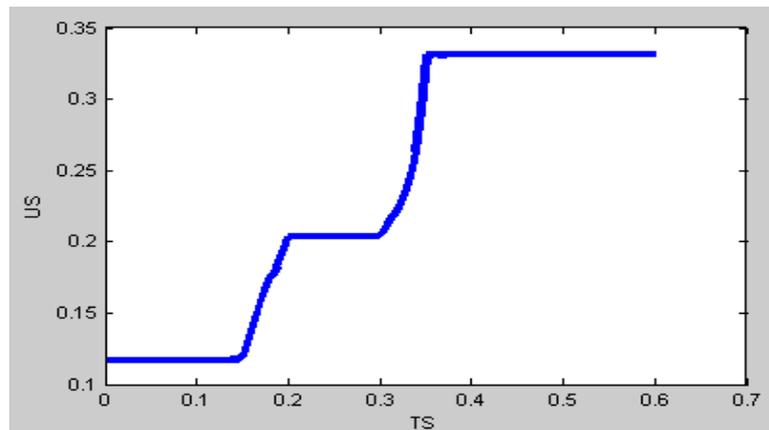


Figura 33. Curva do teor de umidade em função do teor de argila.

A figura 33, assim como as figuras 32 e 31, foi gerada pelo *Fuzzy Logic Toolbox* do MATLAB[®]. A curva da figura 33 descreve o comportamento de maior retenção de umidade em texturas com maior percentual de argila, sem considerar outros fatores que influenciam na retenção.

A seguir, apresentamos as tabelas e suas respectivas curvas de retenção para compararmos as umidades estimadas pelo modelo *fuzzy* com as de Petrobras (2010).

Tabela 7. Perfil P054, horizonte Bi₁, 32% de argila.

Potencial Matricial (atm)	Umidade (cm ³ .cm ⁻³)		Erro Absoluto (%)	Erro Relativo (%)
	Observada	Estimada		
0	0,474	0,420	5,4	11,4
0,1	0,358	0,383	2,5	7,0
0,3	0,317	0,338	2,1	6,6
0,6	0,295	0,338	4,3	14,6
1	0,258	0,287	2,9	11,2
3	0,255	0,276	2,1	8,2
4	0,252	0,276	2,4	9,5
5	0,249	0,247	0,2	0,8

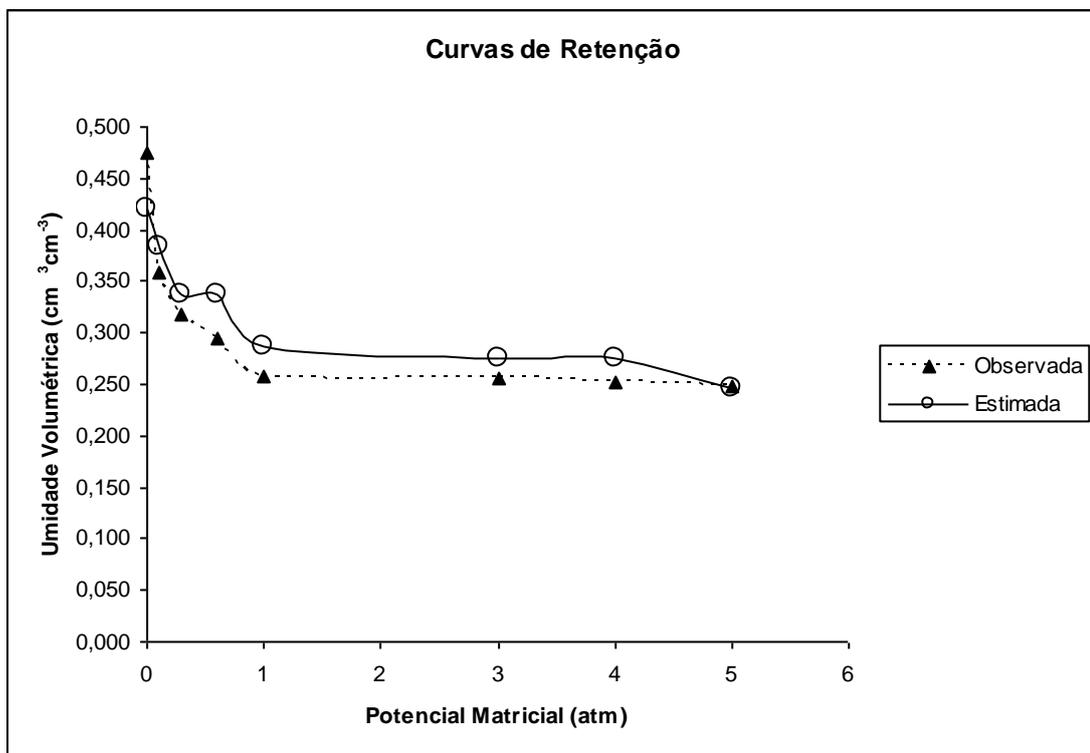


Figura 34. Curva de retenção referente à tabela 7.

Tabela 8. Perfil P035, horizonte Bi₁, 31% de argila.

Potencial Matricial (atm)	Umidade (cm ³ .cm ⁻³)		Erro Absoluto (%)	Erro Relativo (%)
	Observada	Estimada		
0	0,409	0,420	1,1	2,7
0,1	0,362	0,378	1,6	4,4
0,3	0,332	0,335	0,3	0,9
0,6	0,310	0,335	2,5	8,1
1	0,260	0,279	1,9	7,3
3	0,255	0,271	1,6	6,3
4	0,248	0,271	2,3	9,3
5	0,246	0,229	1,7	6,9

Uma diferença significativa encontrada quando comparamos os erros da tabela 7 com os erros da tabela 8, uma vez que ambas possuem praticamente o mesmo percentual de argila e o mesmo horizonte, é o percentual de argila dispersa em água (determinado em Petrobras (2010)), que corresponde a um pouco mais de três vezes o percentual encontrado no horizonte Bi_1 do perfil P035, que pode ter acarretado retenção menor no perfil P054. Isso justifica a pouca influência de 32% de argila no horizonte Bi_1 do perfil P054 e, conseqüentemente, um maior erro médio, tanto absoluto quanto relativo. O desvio padrão do erro absoluto e do erro relativo para a tabela 7 foi de, respectivamente, 1,6% e 4,1%.

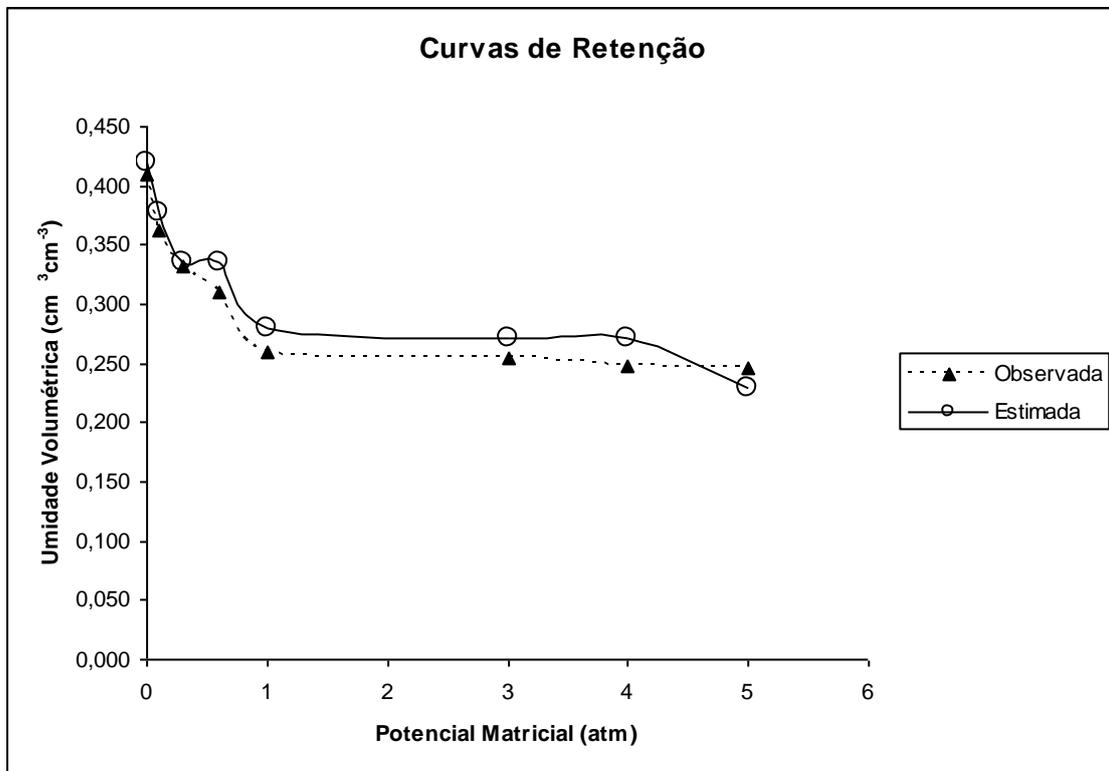


Figura 35. Curva de retenção referente à tabela 8.

Tabela 9. Perfil P101, horizonte BA, 20% de argila.

Potencial Matricial (atm)	Umidade ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)		Erro Absoluto (%)	Erro Relativo (%)
	Observada	Estimada		
0	0,394	0,420	2,6	6,6
0,1	0,357	0,371	1,4	3,9
0,3	0,322	0,332	1,0	3,1
0,6	0,329	0,332	0,3	0,9
1	0,240	0,269	2,9	12,1
3	0,238	0,268	3,0	12,6
4	0,231	0,268	3,7	16,0
5	0,227	0,201	2,6	11,5

A tabela 9 apresenta um EAM de 2,2% e maiores erros relativos para potenciais matriciais maiores (comportamento esperado).

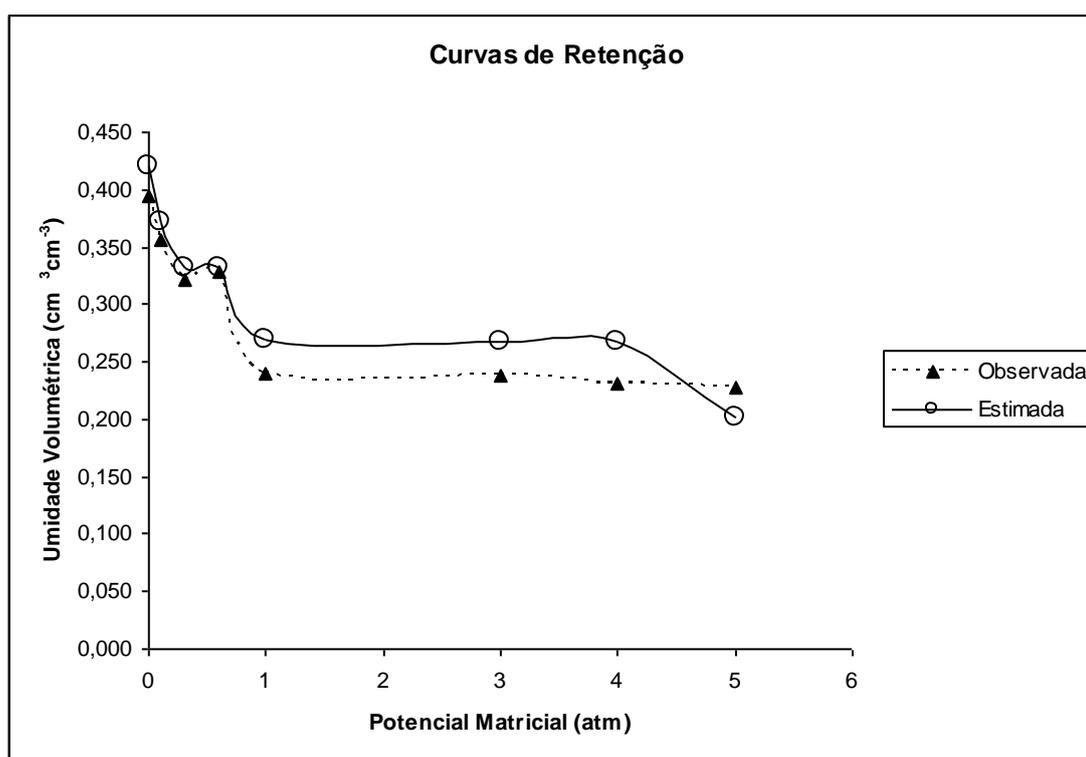


Figura 36. Curva de retenção referente à tabela 9.

Tabela 10. Perfil P051, horizonte AC, 12% de argila.

Potencial Matricial (atm)	Umidade ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)		Erro Absoluto (%)	Erro Relativo (%)
	Observada	Estimada		
0	0,457	0,484	2,7	5,9
0,1	0,413	0,420	0,7	1,7
0,3	0,342	0,332	1,0	2,9
0,6	0,347	0,332	1,5	4,3
1	0,124	0,118	0,6	4,8
3	0,122	0,116	0,6	4,9
4	0,116	0,116	0,0	0,0
5	0,109	0,119	1,0	9,2

A tabela 10 corresponde ao melhor resultado para uma classe arenosa, apresentando um erro absoluto médio de 1% e desvio padrão do erro absoluto igual a 0,8%. Isto é, o erro absoluto médio é a metade do erro absoluto aceitável em métodos indiretos de determinação de umidade do solo.

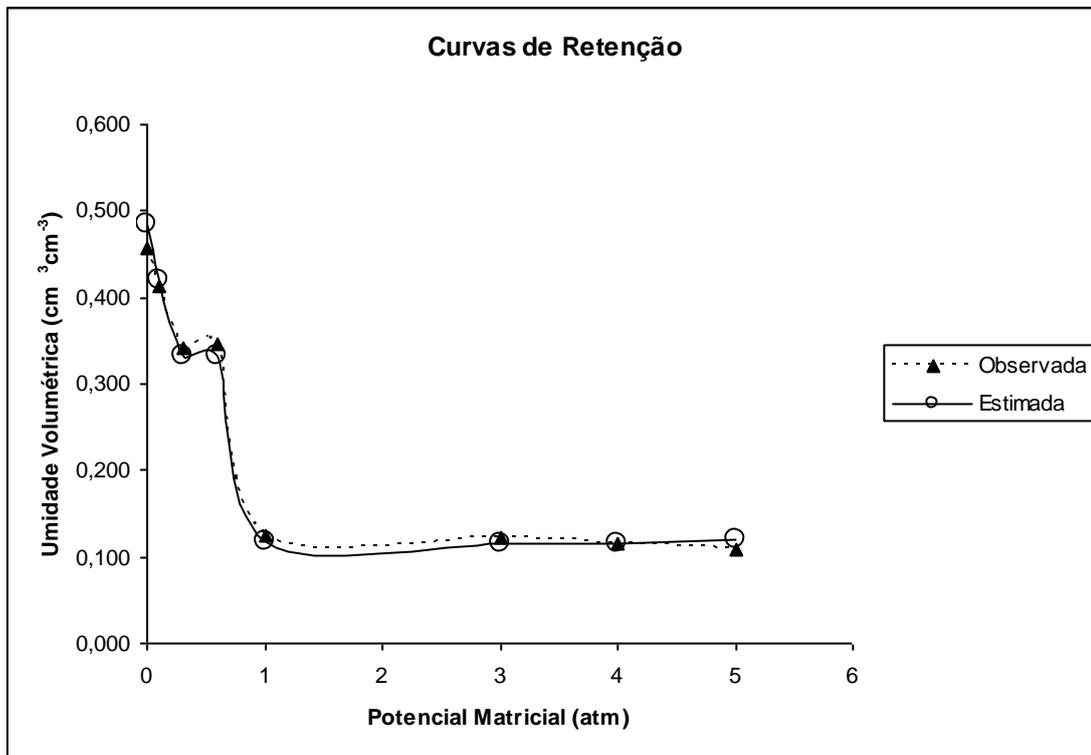


Figura 37. Curva de retenção referente à tabela 10.

Mais uma vez a observação do Prof. Marcos se comprova na tabela 11, maiores erros em potenciais maiores. Porém, dessa vez temos um melhor erro absoluto médio quando comparamos com a tabela 7, correspondendo a 1,7%.

Tabela 11. Perfil P045, horizonte CA, 6% de argila.

Potencial Matricial (atm)	Umidade ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)		Erro Absoluto (%)	Erro Relativo (%)
	Observada	Estimada		
0	0,477	0,481	0,4	0,8
0,1	0,406	0,420	1,4	3,4
0,3	0,339	0,332	0,7	2,1
0,6	0,328	0,332	0,4	1,2
1	0,091	0,118	2,7	29,7
3	0,090	0,116	2,6	28,9
4	0,086	0,114	2,8	32,6
5	0,091	0,119	2,8	30,8

O erro relativo médio referente à tabela 11 é de 16,2%, o mais alto de todas as simulações. Uma possível explicação para esse erro pode estar na quantidade de matéria orgânica encontrada, que equivale à metade da quantidade encontrada no horizonte AC do P051, cujo valor é de 12 g/kg. Outro fato é a presença de 90% de areia no horizonte CA, que colabora para uma perda acelerada de umidade à medida que aumentamos o potencial, causando uma superestimação do modelo diante de parâmetros do solo não considerados na modelagem.

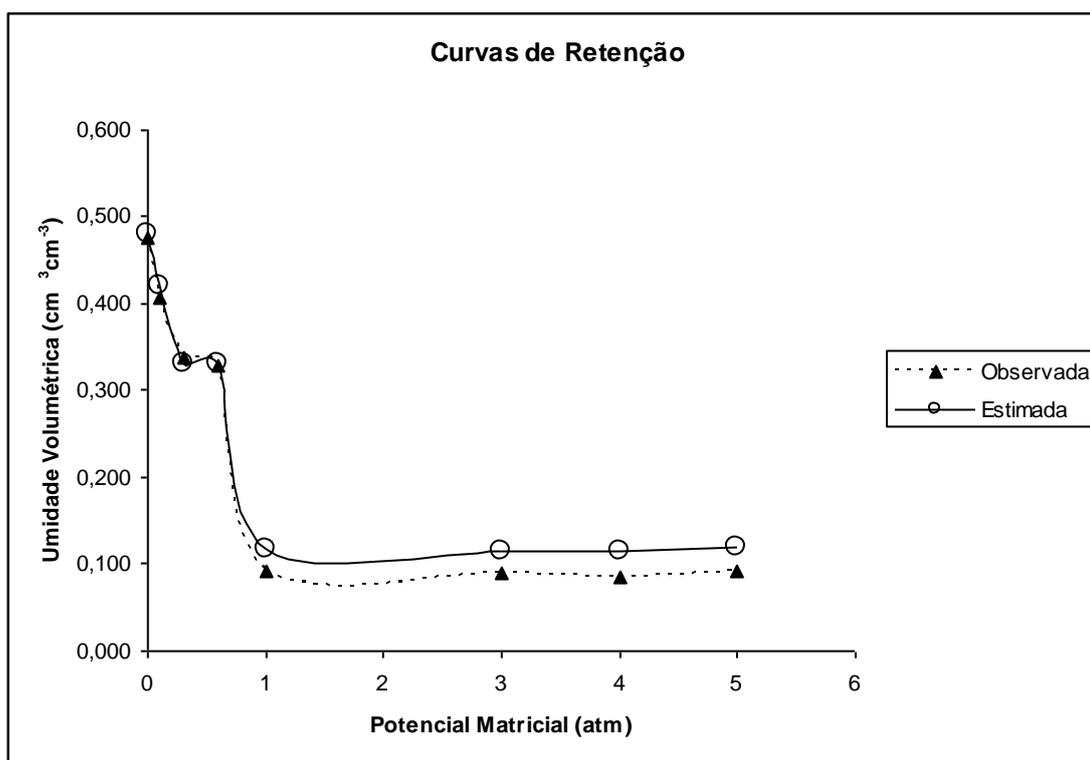


Figura 38. Curva de retenção referente à tabela 11.

Tabela 12. Perfil P049, horizonte Btf₂, 39% de argila.

Potencial Matricial (atm)	Umidade (cm ³ .cm ⁻³)		Erro Absoluto (%)	Erro Relativo (%)
	Observada	Estimada		
0	0,402	0,420	1,8	4,5
0,1	0,379	0,420	4,1	10,8
0,3	0,360	0,371	1,1	3,1
0,6	0,363	0,371	0,8	2,2
1	0,328	0,371	4,3	13,1
3	0,326	0,332	0,6	1,8
4	0,322	0,332	1,0	3,1
5	0,319	0,331	1,2	3,8

Mesmo não possuindo uma boa quantidade de solos argilosos na região de estudo para treinar o modelo, as umidades estimadas nas tabelas 12 e 13 demonstram a sensibilidade do modelo e apresentam erros satisfatórios quando comparamos com resultados obtidos em tabelas referentes a classes texturais predominantes no estudo realizado pela Petrobras (2010) e com o erro aceitável para os métodos indiretos de determinação de umidade do solo. O erro absoluto médio referente à tabela 12 é de 1,9%.

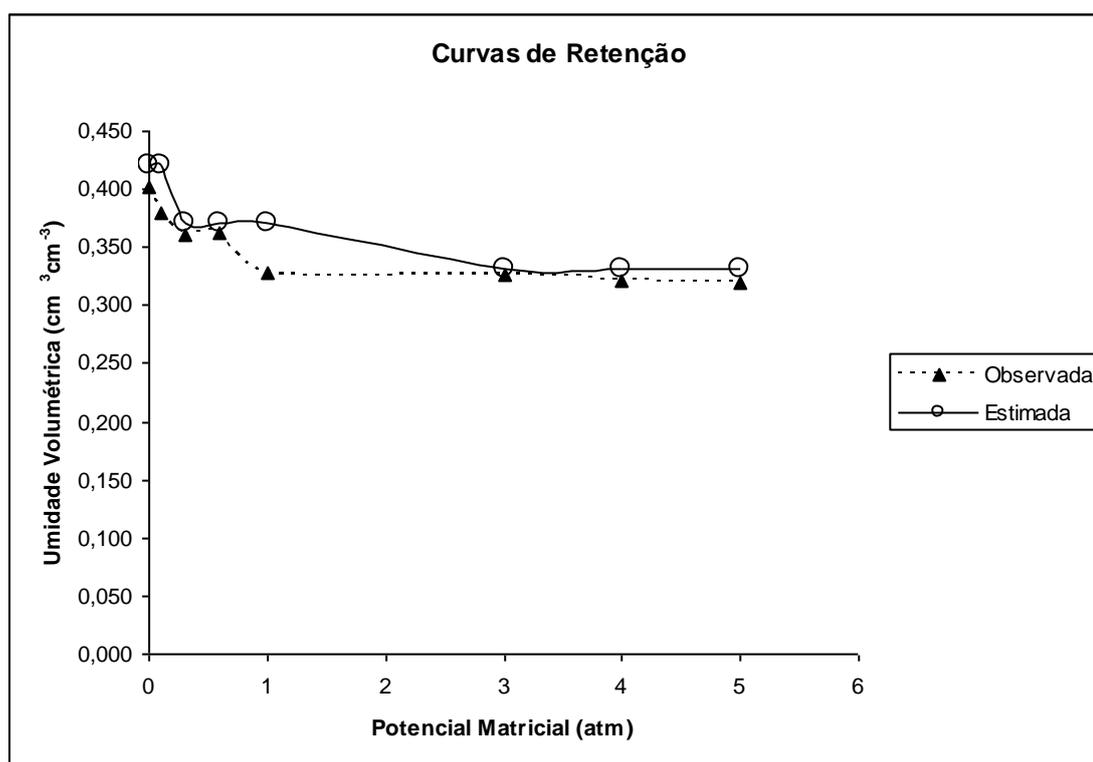


Figura 39. Curva de retenção referente à tabela 12.

Tabela 13. Perfil P061, horizonte Bif₂, 46% de argila.

Potencial Matricial (atm)	Umidade (cm ³ .cm ⁻³)		Erro Absoluto (%)	Erro Relativo (%)
	Observada	Estimada		
0	0,425	0,420	0,5	1,2
0,1	0,408	0,420	1,2	2,9
0,3	0,388	0,372	1,6	4,1
0,6	0,390	0,372	1,8	4,6
1	0,364	0,371	0,7	1,9
3	0,360	0,332	2,8	7,8
4	0,354	0,332	2,2	6,2
5	0,349	0,331	1,8	5,2

A tabela 13 apresenta o melhor resultado para um solo de classe argilosa, com erro absoluto médio de 1,6%, erro relativo médio de 4,2% e desvio padrão do erro absoluto de 0,8%. A tabela 13 apresenta erros satisfatórios quando comparamos com o erro absoluto de 2%, aceitável para os métodos indiretos, e com erros gerados nos resultados deste trabalho para solos médios (predominantes na área de estudo).

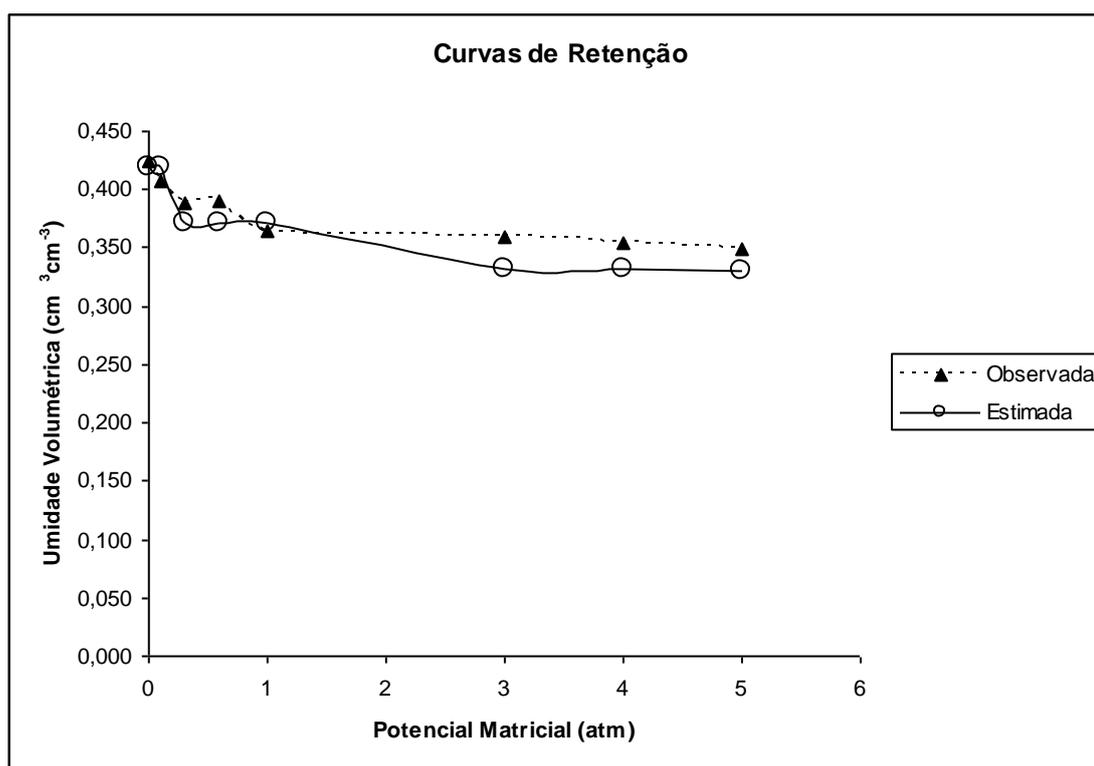


Figura 40. Curva de retenção referente à tabela 13.

A tabela 14 descreve a sensibilidade do modelo com as considerações feitas sobre a transição entre as classes arenosa e média, nas suas respectivas funções de pertinência (figura 26). A tabela 14 apresenta maiores erros para menores potenciais com desvio padrão do erro relativo de 7,7%.

Tabela 14. Perfil P058, horizonte BA, 17% de argila.

Potencial Matricial (atm)	Umidade ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)		Erro Absoluto (%)	Erro Relativo (%)
	Observada	Estimada		
0	0,410	0,454	4,4	10,7
0,1	0,354	0,396	4,2	11,9
0,3	0,310	0,331	2,1	6,8
0,6	0,275	0,331	5,6	20,4
1	0,213	0,197	1,6	7,5
3	0,205	0,197	0,8	3,9
4	0,198	0,197	0,1	0,5
5	0,195	0,151	4,4	22,6

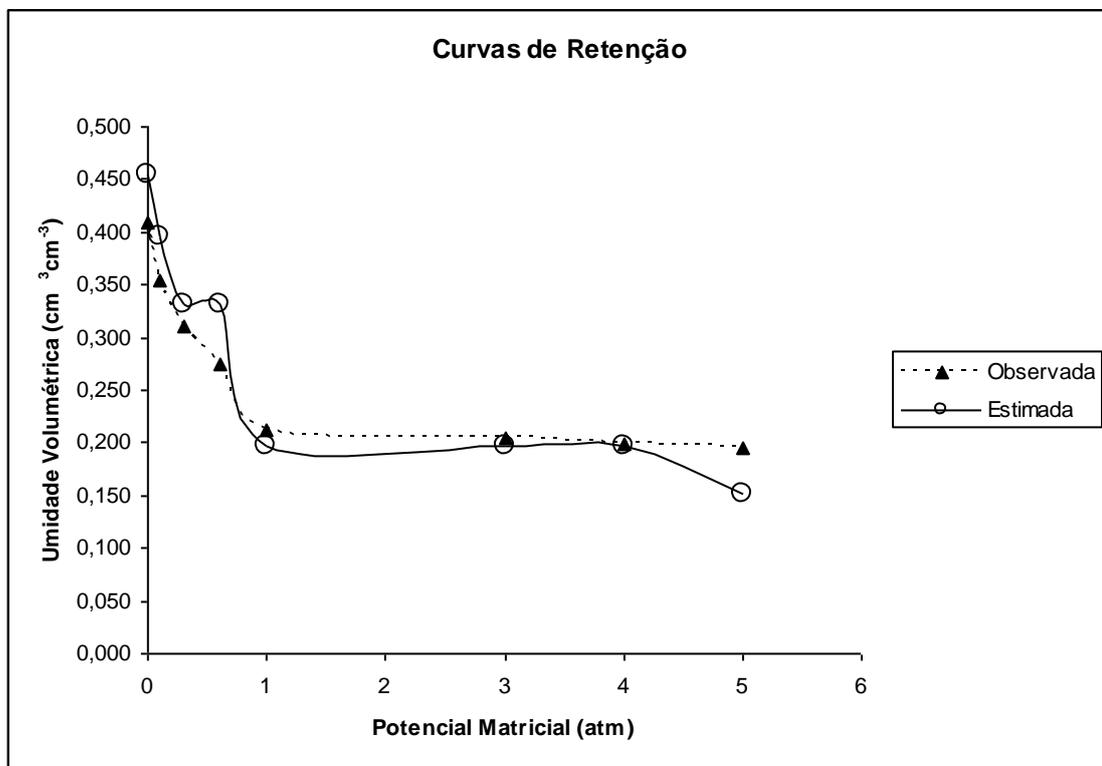


Figura 41. Curva de retenção referente à tabela 14.

A tabela 15 descreve satisfatoriamente tanto o comportamento do fenômeno umidade do solo quanto o surgimento de erros maiores à medida que aplicamos potenciais matriciais maiores. Já era de se esperar bons resultados para percentuais de argila pertencentes a classe textural média, uma vez que predomina na região de estudo.

Tabela 15. Perfil P037, horizonte BA, 21% de argila.

Potencial Matricial (atm)	Umidade ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)		Erro Absoluto (%)	Erro Relativo (%)
	Observada	Estimada		
0	0,418	0,420	0,2	0,5
0,1	0,385	0,371	1,4	3,6
0,3	0,342	0,332	1,0	2,9
0,6	0,347	0,333	1,4	4,0
1	0,253	0,269	1,6	6,3
3	0,251	0,268	1,7	6,8
4	0,245	0,267	2,2	9,0
5	0,233	0,201	3,2	13,7

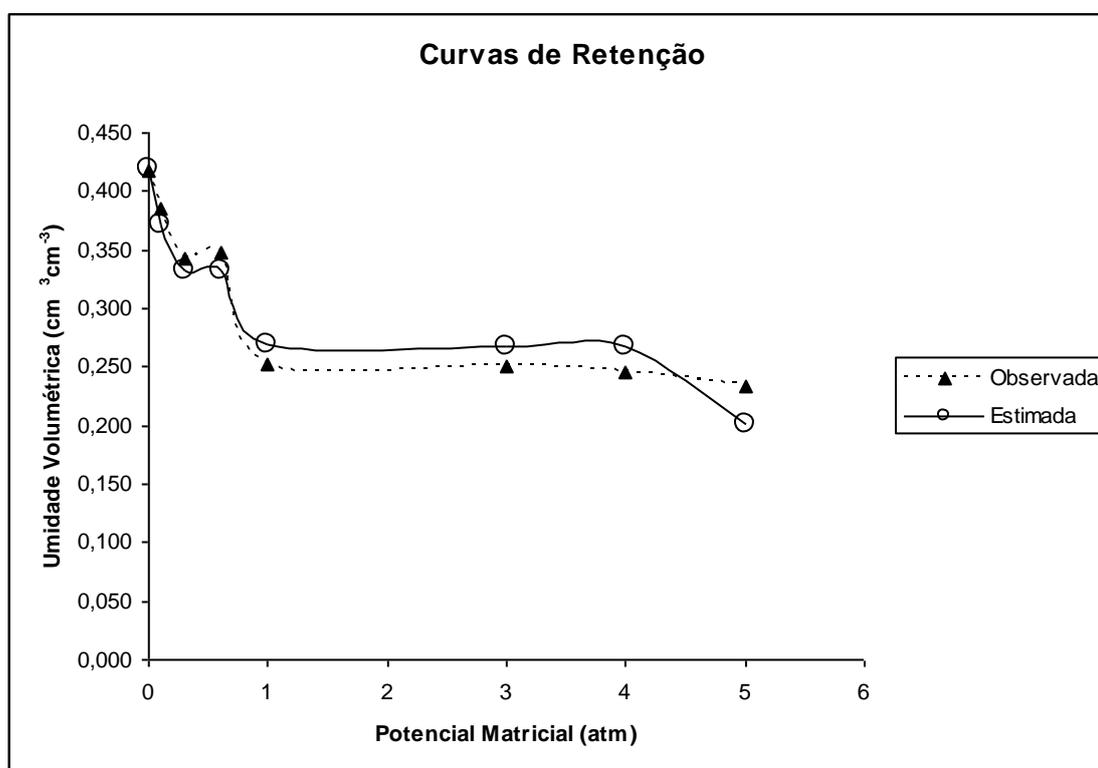


Figura 42. Curva de retenção referente à tabela 15.

Comparando os erros das tabelas 9, 14, 15, 16 e 17, que correspondem aos teores de argila entre classes texturais arenosa e média, observamos que o melhor resultado está presente na tabela cuja diferença entre o teor de argila e silte é menor, resultado presente na tabela 15.

Os desvios padrão dos erros absoluto e relativo referentes à tabela 9 são, respectivamente, iguais a 0,9% e 4,1%.

Tabela 16. Perfil P106, horizonte AB, 18% de argila.

Potencial Matricial (atm)	Umidade ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)		Erro Absoluto (%)	Erro Relativo (%)
	Observada	Estimada		
0	0,490	0,441	4,9	10,0
0,1	0,390	0,387	0,3	0,8
0,3	0,340	0,332	0,8	2,4
0,6	0,307	0,332	2,5	8,1
1	0,250	0,221	2,9	11,6
3	0,241	0,223	1,8	7,5
4	0,240	0,223	1,7	7,1
5	0,234	0,151	8,3	35,5

A tabela 16 descreve a sensibilidade do modelo com as considerações feitas sobre a transição entre as classes arenosa e média (figura 26). A tabela 16 apresenta maiores erros para potenciais maiores com desvio padrão do erro relativo de 10,4%. Os erros médios para as tabelas 14 e 16 são aproximadamente iguais.

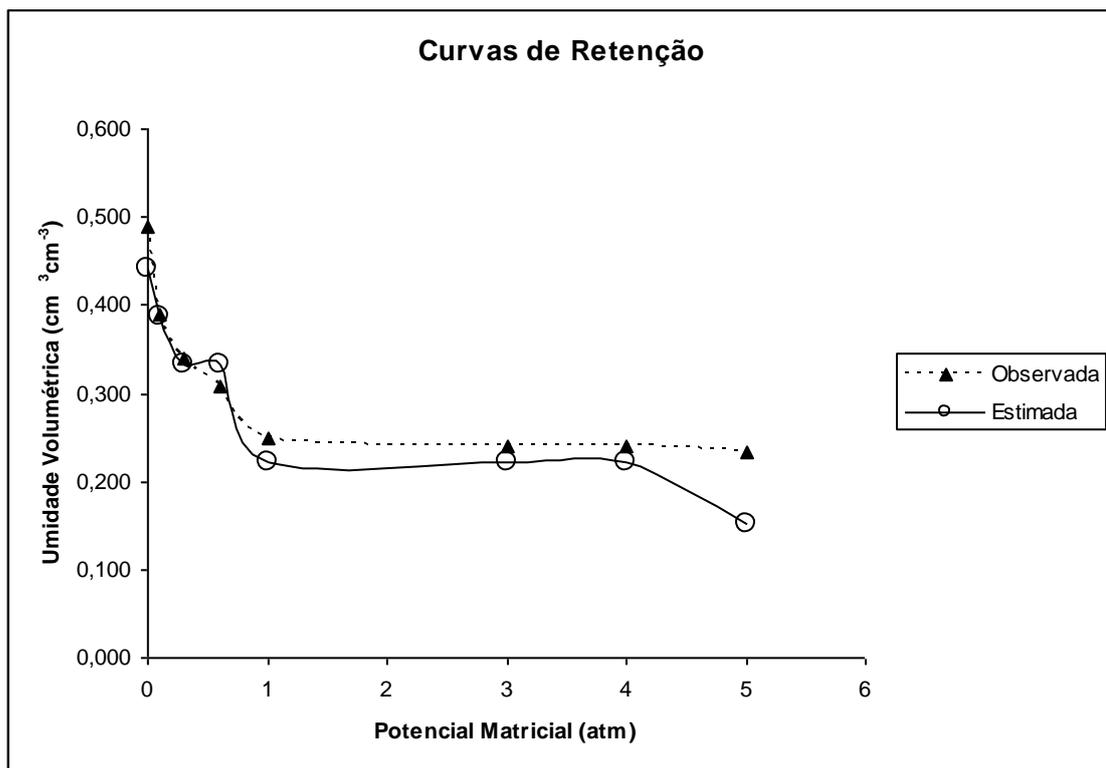


Figura 43. Curva de retenção referente à tabela 16.

Tabela 17. Perfil P150, horizonte A, 16% de argila.

Potencial Matricial (atm)	Umidade ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)		Erro Absoluto (%)	Erro Relativo (%)
	Observada	Estimada		
0	0,490	0,468	2,2	4,5
0,1	0,370	0,407	3,7	10,0
0,3	0,290	0,331	4,1	14,1
0,6	0,254	0,331	7,7	30,3
1	0,170	0,165	0,5	2,9
3	0,168	0,165	0,3	1,8
4	0,160	0,165	0,5	3,1
5	0,162	0,151	1,1	6,8

O comportamento dos erros da tabela 17 fortalecem a justificativa dada para as tabelas 14 e 16. O desvio padrão do erro relativo é de 9,5% para a tabela 17. Para o erro absoluto, o desvio padrão é de 2,6%.

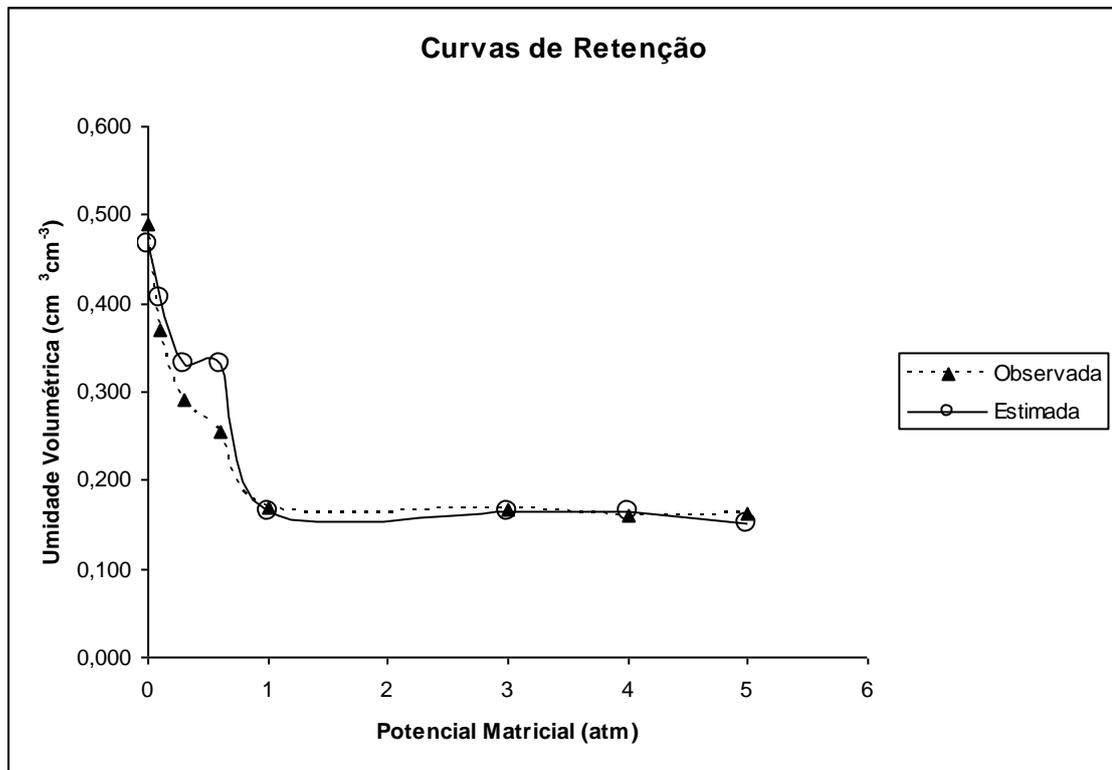


Figura 44. Curva de retenção referente à tabela 17.

O melhor resultado para a classe textural média ocorre na tabela 8, nossa última simulação, apresentando erro absoluto médio de 1,6% e desvio padrão do erro absoluto de 0,7%. Além de descrever o comportamento esperado para os erros sobre potenciais matriciais maiores.

A tabela 18 reúne todos os erros absolutos e relativos médios dos perfis selecionados para validação do modelo a fim de analisarmos o comportamento desses erros nas simulações, de uma forma geral.

Baseando-se na tabela 18, também determinamos um erro médio geral tanto para o absoluto quanto para o relativo, cujos valores são respectivamente iguais a 2,1% e 8,1%.

Tabela 18. Erros médios obtidos nos perfis selecionados.

Perfis	EAM (%)	ERM (%)
P045	1,7	16,2
P051	1	4,2
P150	2,5	9,2
P058	2,9	10,5
P106	2,9	10,4
P101	2,2	8,3
P037	1,6	5,9
P035	1,6	5,7
P054	2,7	8,7
P049	1,9	5,3
P061	1,6	4,2

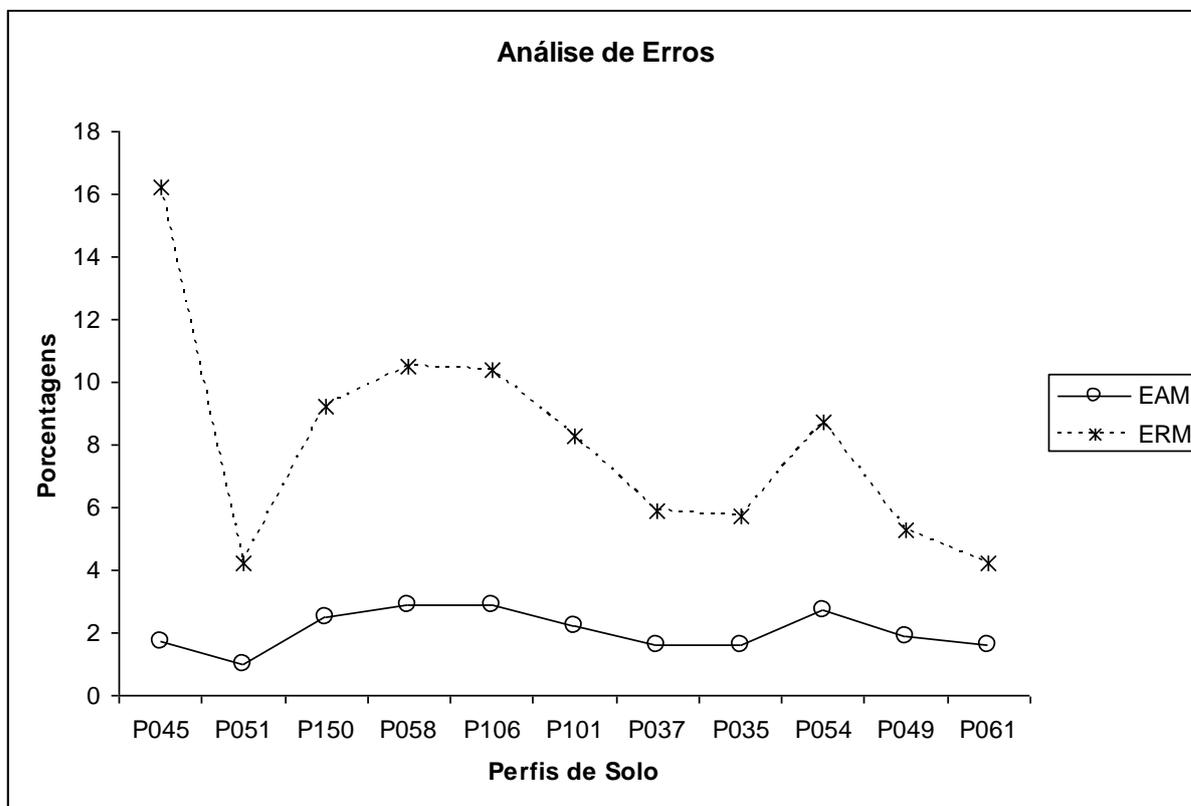


Figura 45. Comportamento dos erros médios da validação do modelo *fuzzy*.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos foram satisfatórios e promissores quando comparamos com o erro absoluto de Gardner (1986), de $\pm 2\%$, aceitável em métodos indiretos de determinação de umidade do solo, como o TDR e a sonda de nêutrons, visto que o erro absoluto médio e erro relativo médio de todas as simulações foram de, respectivamente, 2,1% e 8,1%. Esses resultados demonstram que a lógica *fuzzy* pode ser utilizada para estimar a umidade do solo em áreas com carência de curvas de retenção tanto para fins agrícolas (irrigação) quanto para impactos ambientais (contaminação de solo e água).

Os melhores resultados, considerando o erro absoluto aceitável para métodos indiretos e o aumento dos erros relativos (fenômeno presente em outros métodos de determinação de umidade do solo, por exemplo, o TDR) à medida que ocorre pouca variação de umidade para grandes variações de potenciais matriciais, foram obtidos em 63,6% dos perfis selecionados aleatoriamente para validação do modelo *fuzzy*.

O modelo também se mostrou promissor a partir do momento em que outras informações do solo, não consideradas na modelagem, tornaram-se fundamentais na discussão sobre os piores resultados apresentados nos perfis P054, P058, P106 e P150, situações que podem estar relacionadas ao teor de carbono orgânico, ou a diferença entre percentual de argila e silte, ou a porosidade do solo ou até mesmo no percentual de argila dispersa em água. Essa sensibilidade do modelo *fuzzy* orienta para novas formulações e parâmetros do solo que podem minimizar os erros cometidos.

Os erros relativos médios do nosso modelo *fuzzy* são um pouco superiores aos de Benini (2007), porém o modelo proposto por ele requer maior esforço computacional por utilizar redes neurais.

Quando comparamos nosso modelo com o modelo apresentado em Souza (2007), descrito na introdução, os erros relativos médios do nosso foram bem inferiores aos erros relativos médios apresentados por ele (aproximadamente dez vezes menores).

Quando consideramos a modelagem e simulação, nosso modelo apresenta baixo custo e simplicidade quando comparamos, por exemplo, com Benini (2007), Souza (2007) e os métodos indiretos citados anteriormente.

Tendo em vista a dificuldade de medir determinadas informações do solo que possam influenciar a retenção de água, ou até mesmo a falta de relações diretas entre esses parâmetros para a montagem da base de regras, sugerimos para trabalhos futuros o acréscimo do carbono orgânico, a densidade do solo e uma nova forma de introduzir a textura do solo. Essa última, considerando não só o teor de argila, mas também os teores de areia e silte. Também poderá ser feita uma consideração na variável umidade, a qual deverá ser atribuída três saídas distintas (universos de discurso e funções de pertinência diferentes) segundo a classe textural.

Uma dica para trabalhos futuros é que devemos ser cautelosos no número de regras, da base de regras, que é um fator importante segundo análise de convergência apresentada por dois teoremas de Nguyen (aumentando o número de regras mais próximo do valor observado será a saída do controlador *fuzzy*) em Barros e Bassanezi (2006). Aumentar muito o número de regras sem ganhos consideráveis não é viável.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, F. C. S. Embrapa Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Terras para Irrigação: enfoque na região semi-árida**. 2ª edição. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 164 p.

AMENDOLA, M.; SOUZA, A. L.; BARROS, L. C. Manual do uso da teoria dos conjuntos fuzzy no MATLAB® 6.5. Versão 2005 do manual apresentado no Ciclo de Palestras/2004, realizado na FEAGRI/UNICAMP. Disponível em: http://www.ime.unicamp.br/~laeciocb/manual_fuzzy_matlab.pdf. Acesso em 24/09/2013.

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

BARDOSSY, A.; DISSE, M. Fuzzy rule-based models for infiltration. **Water Resources Research**. v.29, n. 2, p. 373-382, 1993.

_____; DUCKSTEIN, L. **Fuzzy Rule-Based Modeling with Applications to Geophysical, Biological and Engineering Systems**. Flórida: CRC, 1995. 232 p.

BARROS, L. C.; BASSANEZI, R. C. **Tópicos de Lógica Fuzzy e Biomatemática**. Coleção IMECC. Textos Didáticos, v. 5, Campinas - SP: UNICAMP, 2006.

BENINI, L. C. **Estimação da densidade de solos utilizando sistemas de inferência fuzzy**. 2007. Tese (Doutorado). Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP. Botucatu – SP, 2007. 194 f.

BIASSUSI, M. **Simulação do movimento da água no solo utilizando modelo numérico**. Tese (Doutorado) – Faculdade de Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2001.

CARVALHO, D. F.; SOARES, A. A.; RIBEIRO, A.A. S.; *et al.* Otimização do uso da água no perímetro irrigado do Gorotuba, utilizando a técnica de programação linear. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 4, n. 2, p. 203-209, 2000.

CASTILHO, A. S.; VALLE, M. E. Analogia da Regra Composicional de Inferência e Operadores Lineares. **TEMA/SBMAC**, v. 10, n. 2, p. 135-144, 2009.

CHALKIDIS, I. N.; TZIMOPOULOS, CH. D.; EVANGELIDES, CH. H.; *et al.* Fuzzy Logic Model for Soil Water Balance Problem. In: 2nd IASME / WSEAS, Portoroz, Slovenia. **Proceedings**. p. 47-51, 2007.

COHEN, S.; SVORAY, T.; LARONNE, J. B.; *et al.* Fuzzy-based dynamic soil erosion model (FuDSEM): Modelling approach and preliminary evaluation. **Journal of Hydrology**. v. 356, n. 1-2, p. 185–198, 2008.

DELGADO, A. R. S.; DUARTE, W. S.; LIMA, V. N.; *et al.* Modelagem matemática para otimização da produção e renda de melão e melancia em função de lâminas de água e dose de nitrogênio. **Irriga**, Botucatu, v. 15, n.1, p. 1-9, 2010.

DOORENBOS, J., KASSAM, A. H. **Yield response to water**. FAO Irrigation and Drainage Paper n. 33, FAO, Rome, Italy. 1979. 193p.

DUBOIS, D.; PRADE, H. **Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications**. Mathematics in science and engineering, v. 144, Academic Press, New York, 1980. 393 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed., Rio de Janeiro: Embrapa-SPI, 2006. 306 p.

ENGLISH, M. Irrigation Advisory Services for optimum use of limited water. FAO-ICID Workshop. Montreal. Canadá. 2002.

FELICIANO, R. de A. C. **Controle Fuzzy Espacialmente Diferenciado para um Sistema de Irrigação**. 2012. XXf. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Natal-RN, 2012.

FRIZZONE, J. A.; COELHO, R.D.; DOURADO-NETO, D.; *et al.* Linear programming model to optimize the water resource use in irrigations projects: An application to the Nilo Coelho Senator Project. **Sci. Apic.**, Piracicaba - SP, v. 54 (número especial), p. 136-148, 1997.

GARCIA, P. A. de A.; FRUTUOSO, P. F. F.; SCHIRRU, R. Aplicação de um modelo fuzzy DEA para priorizar modos de falha em sistemas nucleares. **Pesquisa Operacional**. v. 29, n.2, p. 383-402, 2009.

GARDNER, W. H. Water content. Chapter 21 in Klute, A., ed. Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2nd Ed. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin. 1986.

GONÇALVES, A. D. M. de A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1174-1184, 2013.

HALKIDIS, I. N.; TZIMOPOULOS, CH. D. ; EVANGELIDES, CH. H. ; *et al.* Soil Water Management Problem Using Fuzzy Arithmetic. **Global NEST Journal**. v. 11, n. 4, p. 556-565, 2009.

HANKS, R. J. Model for predicting yield as influenced by water use. **Agronomy Journal**, v. 66, p. 660-665, 1974.

JURY, W. A.; OR, B.; PACHEPSKY, Y.; *et al.* Kirkham's legacy and contemporary challenges in soil physics research, **Soil Sci. Soc. Am. J.**, special issue 75th anniversary of SSSAJ, v. 75, n. 5, p. 1589-1601, 2011.

KLAR, A. E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera.** São Paulo: Nobel, 1988.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e sua relação com a densidade do solo ao longo do perfil de um latossolo roxo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 6, p. 959-964, 2000.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos.** Uberlândia: Oficina dos textos, 2002. 178p.

LIBARDI, P. L. Água no Solo. Notas de aula ministrada em 2014. ESALQ/USP. Disponível em: http://www.leb.esalq.usp.br/aulas/lce200/Agua_no_Solo_2014.pdf. Acesso em: 19/02/2014.

LIMA, F. M. C. de; SILVA, S. A. da; FILGUEIRA, H. J. A.; *et al.* Controle do Potencial Matricial da Água no Solo por Meio de Lógica Fuzzy. **Irriga.** Botucatu, v. 15, n. 4, p. 431-442, 2010.

MAMDANI, E. H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. **Proc. IEEE**, v. 121, n. 12, p. 1585 – 1588, 1974.

_____ and ASSILIAN, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, **Int. J. Man-Machine Studies**, v. 7, p. 1 – 13, 1975.

MALLANTS, D.; VAN GENUTCHEN, M. T.; SIMUNEK, J.; *et al.* Section 18, Book Chapter in “Dealing with Contaminated Sites, From Theory to Practical Applications” Ed. F. A. Swartjes, Springer, 1st Edition, XXVIII, ISBN: 978-90-481-9756-9, 2011, p. 787-850, 2011.

McBRETNEY, A. B.; ODEH, I. O. A. Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions. **Geoderma.** v. 77, p. 85 -113, 1997.

MISSIO, M.; BARROS, L. C. Modelo probabilístico para uma variável fuzzy. **Biomatemática-IMECC/Unicamp**, v. 19, p. 25-38, 2009.

MITRA, B.; SCOTT, D.; DIXON, C.; *et al.* Application of fuzzy logic to the prediction of soil erosion in a large watershed. **Geoderma.** v. 86, n. 4, p.183-209, 1998.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resour. Res.**, v. 12, p. 513-522, 1976.

ORTEGA, N. R. S. **Aplicação da teoria de conjuntos fuzzy a problemas da biomedicina.** 2001. Tese (Doutorado). Instituto de física. USP. São Paulo – SP, 2001.

PETROBRAS SA. Relatório final do levantamento detalhado de solos da Base Petrolífera Geólogo Pedro de Moura (BOGPM), Coari - AM. Projeto Petrossolos Amazônicos (Convênio

- PETROBRAS/UFRRJ/FAPUR, Nº 45/08). Coordenador: Marcos Bacis Ceddia. 642p. 2010.
- REICHARDT, K. A **Água em Sistemas Agrícolas**. São Paulo: Manole Ltda, 1990.
- _____. **Processos de Transferência no Sistema Solo-Planta-Atmosfera**. São Paulo: Fundação Cargill, 1975.
- _____. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo, Manole, 1987. 188p.
- _____ e TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera – Conceitos, Processos e Aplicações**. Editora Manole: São Paulo-SP, 2004.
- RICHARDS, L. A. Capillary Conduction of Liquids Through Porous Mediums. **Journal of Applied Physics**, v. 1, p. 318-333, 1931.
- SOARES, F. C.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; RUSSI, J. L.; VIVAN, G. A. Redes neurais artificiais na estimativa da retenção de água do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 2, p. 293-300, 2014.
- SOUZA, A. L. de. **Teoria de conjuntos fuzzy no estudo da dinâmica da água e de solutos no solo**. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Agrícola. UNICAMP. Campinas, 2007.
- TAKAGI, T.; SUGENO, M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v.15, n.1, p.116-132, 1985.
- TORBERT, H. A.; KRUEGER, E.; KURTENER, D. Soil Quality Assessment using fuzzy modeling. **International Agrophysics**, v. 22, p. 365-370, 2008.
- TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Incorporação da densidade no ajuste de dois modelos à curva de retenção de água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 305-314, 2002.
- VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 44, p. 892-898, 1980.
- VIEGAS, G. P. (editor). **Simpósio sobre o manejo de água na agricultura**. Campinas: Fundação Cargill, 1987.
- ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. **Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965.
- _____. Fuzzy Algorithms. **Information and Control**, v. 12, p. 94-102, 1968.
- _____. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. **IEEE Transactions on systems, man and cybernetics**, S1C-3, n. 1, p. 28-44, 1973.

APÊNDICE

Apêndice. Dados para escolha aleatória (continua).

Código	Perfil	Horizonte	Argila
1	P068	EB	1%
2	P068	E	1%
3	P068	EA	1%
4	P068	Bhsm	1%
5	P068	AE	2%
6	P057B	A	2%
7	P068	A ₂	3%
8	P088	A	3%
9	P089	E ₂	4%
10	P089	E ₁	4%
11	P089	AE	4%
12	P045	2C ₂	4%
13	P158	A	5%
14	P051	2C ₁	5%
15	P123	2C _g	5%
16	P057B	AB	5%
17	P074	A	5%
18	P097	EB	5%
19	P045	3C ₃	5%
20	P045	A	6%
21	P045	2C ₁	6%
22	P097	E	6%
23	P045	CA	6%
24	P045	3C ₄	6%
25	P079	A	6%
26	P058	A	6%
27	P123	Bi ₃	6%
28	P123	Bi ₁	6%
29	P123	Bi ₂	7%
30	P068	A ₁	7%
31	P097	O	8%
32	P110	A	9%
33	P089	A	9%
34	P051	2C ₂	9%

Apêndice. Continuação.

Código	Perfil	Horizonte	Argila
35	P088	AC	9%
36	P103	A	10%
37	P110	AB	10%
38	P123	BA	10%
39	P088	CA	10%
40	P101	A	11%
41	P123	A	12%
42	P099	AB	12%
43	P099	A	12%
44	P051	AC	12%
45	P051	3Cg ₃	12%
46	P088	C	12%
47	P101	AB	12%
48	P051	A	13%
49	P103	AB	13%
50	P123	AB	13%
51	P031	A	13%
52	P039	A	13%
53	P143	A	14%
54	P094	A	14%
55	P090	A	14%
56	P103	BA	14%
57	P143	AB	14%
58	P090	AB	15%
59	P105	A	15%
60	P110	BA	15%
61	P069	AB	15%
62	P069	A	15%
63	P086	A	15%
64	P037	A	15%
65	P089	B _{tg}	15%
66	P039	Big	15%
67	P106	A	15%
68	P139	A	16%
69	P150	A	16%

Apêndice. Continuação.

Código	Perfil	Horizonte	Argila
70	P105	AB	16%
71	P108	A	16%
72	P031	AB	16%
73	P039	BA _g	16%
74	P058	AB	16%
75	P049	A	17%
76	P049	AB	17%
77	P057B	BA	17%
78	P058	BA	17%
79	P035	A	18%
80	P075	A	18%
81	P106	AB	18%
82	P103	Bi ₁	18%
83	P143	BA	18%
84	P054	A	18%
85	P090	BA	18%
86	P150	AB	19%
87	P103	Bi ₂	19%
88	P108	AB	19%
89	P078	A	19%
90	P099	BA	19%
91	P074	AB	19%
92	P101	BA	20%
93	P105	BA	20%
94	P057B	Bt ₂	20%
95	P079	AB	20%
96	P101	Bt ₃	21%
97	P139	AB	21%
98	P097	Bh	21%
99	P057B	BC	21%
100	P057B	Bt ₁	21%
101	P037	BA	21%
102	P096	A	21%
103	P110	Btg ₂	21%
104	P090	Btg ₁	22%

Apêndice. Continuação.

Código	Perfil	Horizonte	Argila
105	P060	A	22%
106	P101	Bt ₁	22%
107	P079	BA	22%
108	P037	AB	22%
109	P051	2Cg ₄	22%
110	P080	A	22%
111	P054	AB	22%
112	P143	Bt ₂	23%
113	P094	AB	23%
114	P078	AB	24%
115	P150	BA	24%
116	P060	AB	24%
117	P086	AB	24%
118	P110	Bt ₁	24%
119	P079	BCg	24%
120	P099	Bt ₁	24%
121	P078	BA	25%
122	P075	AB	25%
123	P096	AB	25%
124	P136	AB	25%
125	P078	Bi ₁	25%
126	P105	Bi ₁	25%
127	P136	A	25%
128	P158	AB	25%
129	P079	Btg ₁	26%
130	P106	BA	26%
131	P035	AB	26%
132	P079	Btg ₂	26%
133	P080	BA	26%
134	P058	Bt ₁	26%
135	P139	BA	26%
136	P075	BA	26%
137	P101	Bt ₂	26%
138	P069	BA	27%
139	P070	A	27%

Apêndice. Continuação.

Código	Perfil	Horizonte	Argila
140	P061	A	27%
141	P078	Bi ₂	27%
142	P099	Bt ₂	27%
143	P037	Bi ₁	27%
144	P054	BA	28%
145	P060	BA	28%
146	P108	BA	28%
147	P078	Bi ₃	28%
148	P086	BA	28%
149	P139	Bi ₁	28%
150	P035	BA	29%
151	P095	A	29%
152	P105	Bi ₂	29%
153	P075	Bic ₁	29%
154	P095	AB	29%
155	P058	Bt ₂	29%
156	P037	Bi ₂	30%
157	P049	BA	30%
158	P061	AB	30%
159	P035	Bi ₁	31%
160	P060	Bi ₁	31%
161	P094	Bt ₁	31%
162	P070	AB	31%
163	P075	BC	31%
164	P049	Bt ₁	31%
165	P075	Bif ₂	32%
166	P079	Btg ₃	32%
167	P065	A	32%
168	P054	Bi ₁	32%
169	P143	Bt ₁	32%
170	P055	A	32%
171	P150	Bi ₁	32%
172	P108	Bt ₁	33%
173	P099	Bt ₃	33%
174	P106	Bt ₂	33%

Apêndice. Continuação.

Código	Perfil	Horizonte	Argila
175	P078	Bi ₄	33%
176	P074	BA	33%
177	P106	Bt ₁	33%
178	P096	BA	34%
179	P086	Bi ₁	34%
180	P058	Bt ₃	34%
181	P031	BA	35%
182	P069	Bt ₁	35%
183	P136	BA	36%
184	P055	AB	36%
185	P054	Bi ₂	37%
186	P086	Bic ₂	37%
187	P065	AB	37%
188	P060	Bi ₂	37%
189	P095	Bi ₁	37%
190	P055	Bi ₂	38%
191	P060	Bi ₃	38%
192	P080	Bic ₂	38%
193	P139	Bi ₂	38%
194	P054	Bi ₃	39%
195	P150	Bi ₂	39%
196	P049	Btf ₂	39%
197	P108	Bt ₂	39%
198	P055	BA	40%
199	P055	Bi ₁	40%
200	P090	Btg ₂	40%
201	P070	BA	40%
202	P080	Bi _{f1}	40%
203	P031	Bt	40%
204	P074	Bt ₂	40%
205	P061	Bi ₁	41%
206	P035	Bi ₂	41%
207	P136	Bt ₁	42%
208	P069	Bt ₂	44%
209	P080	Bi ₃	44%

Apêndice. Continuação.

Código	Perfil	Horizonte	Argila
210	P158	BA	44%
211	P074	Bt ₁	44%
212	P095	Bif ₃	44%
213	P035	BC	45%
214	P065	BA	45%
215	P061	Bif ₂	46%
216	P136	Bt ₄	46%
217	P095	Bi ₂	46%
218	P095	Bi ₄	46%
219	P061	Bi ₃	47%
220	P049	Bt ₄	47%
221	P096	Bt ₁	47%
222	P094	Bt ₂	47%
223	P070	Bi ₃	48%
224	P136	Bt ₂	48%
225	P136	Bt ₃	48%
226	P070	Bi ₁	48%
227	P070	Bi ₂	49%
228	P049	Btc ₃	49%
229	P158	Btf ₂	49%
230	P080	BC	51%
231	P069	Bt ₃	53%
232	P096	Btg ₂	53%
233	P065	Bi ₁	53%
234	P065	Bi ₂	56%
235	P158	Btc ₁	56%
236	P096	Btg ₃	61%

ANEXOS

Anexo A. Análises físicas e químicas do perfil P054.

Horizonte		Frações da amostra total %			Composição granulométrica da terra fina (dispersão com NaOH / calgon) g/kg				Argila dispersa em água g/kg	Grau de flocculação %	silte argila	Densidade kg/dm ³		Poros. Cm ³ /100cm ³
Símbolo	Profund. Cm	Calhaus > 20 Mm	Cascalho 20-2 mm	Terra Fina < 2mm	Areia grossa 2-0,20 mm	Areia fina 0,20-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila < 0,002 mm				Solo	Partícula	
A	0-5	-	-	100	36	464	318	182	74	59	1.75	1.21	2.44	0.504
AB	5-27	-	-	100	25	379	373	223	177	21	1.67	1.17	2.47	0.526
BA	27-48	-	-	100	18	320	387	275	199	28	1.41	1.10	2.41	0.544
Bi ₁	48-76	-	-	100	20	357	302	321	254	21	0.94	1.37	2.45	0.441
Bi ₂	76-91	-	-	100	15	323	297	365	122	67	0.81	1.40	2.51	0.442
Bi ₃	91-123+	-	-	100	11	298	301	390	193	51	0.77	1.41	2.50	0.436
Horiz.	pH (1:2,5)		Complexo sortivo cmol _c /dm ³								Valor V	100Al ³⁺	P ass.	
	Água	KCl 1N	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Valor S (soma)	Al ³⁺	H	Valor T (soma)	(sat. de bases) %	S+Al ³⁺ %	mg/L	
A	4.0	-	2.20	1.20	0.02	0.01	3.43	1.00	12.30	16.73	21	23	4	
AB	3.9	-	2.00	1.00	0.01	0.01	3.02	1.80	7.00	11.82	26	37	2	
BA	4.1	-	0.80	0.50	0.01	0.01	1.32	1.60	5.20	8.12	16	55	3	
Bi ₁	4.0	-	0.50	0.40	0.01	0.01	0.92	1.90	5.10	7.92	12	67	4	
Bi ₂	4.6	-	0.40	0.40	0.01	0.01	0.82	4.70	3.10	8.62	10	85	1	
Bi ₃	4.6	-	0.30	0.20	0.01	0.01	0.52	4.00	3.80	8.32	6	88	1	
Horiz.	C org. g/kg	N g/kg	C N	Ataque por H ₂ SO ₄ (1:1) - NaOH (0.8%) g/kg						Si O ₂ Al ₂ O ₃ (Ki)	Si O ₂ R ₂ O ₃ (Kr)	Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ livre g/kg	Equiv. CaCO ₃ g/kg
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO					
A	13.60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AB	7.70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BA	7.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bi ₁	6.30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bi ₂	5.90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bi ₃	4.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Horiz.	100 Na ⁺ T %	Pasta saturada		Sais solúveis (extrato 1:5) g/100g								Umidade Atual (%)	Umidade 15 ATM	Água dispon. Máxima
		C.E. do Extrato MS/cm 25°C	Água %	← cmol _c /kg de TF →										
A	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32.1	-	-
AB	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26.2	-	-
BA	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26.7	-	-
Bi ₁	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25.3	-	-
Bi ₂	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25.3	-	-
Bi ₃	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26.2	-	-

Anexo B. Análises físicas e químicas do perfil P101.

Horizonte		Frações da amostra total %			Composição granulométrica da terra fina (dispersão com NaOH / calgon) g/kg				Argila	Grau de silte	Densidade kg/dm ³	Poros.		
Símbolo	Profund. cm	Calhaus > 20 Mm	Cascalho 20-2 mm	Terra Fina < 2mm	Areia grossa 2-0,20 mm	Areia fina 0,20-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila < 0,002 mm	dispersa em água g/kg	Floculação %	argila	Solo	Partícula	Cm ³ /100cm ³
A	0-7	-	-	100	216	368	311	105	4	96	2.96	1.28	2.26	0.434
AB	7-20	-	-	100	135	439	302	124	31	63	5.36	1.21	2.30	0.474
BA	20-50	-	-	100	91	401	313	195	88	55	1.61	1.35	2.38	0.433
Bt ₁	50-89	-	-	100	305	182	293	220	120	45	1.33	1.59	2.36	0.326
Bt ₂	89-118	-	-	100	346	218	173	263	57	78	0.66	1.58	2.42	0.347
Bt ₃	118-150 ⁺	-	-	100	454	159	182	205	5	98	0.89	1.60	2.37	0.325
Horiz.	pH (1:2.5)		Complexo sortivo cmol/dm ³								Valor V	100Al ³⁺	P ass.	
	Água	KCl 1N	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Valor S (soma)	Al ³⁺	H	Valor T (soma)	(sat. de bases) %	S+Al ³⁺ %	mg/L	
A	4.2	-	1.50	1.10	0.01	0.00	2.6	3.0	7.6	13.2	20	53	0	
AB	5.1	-	1.50	1.00	0.01	0.00	2.5	3.5	4.8	10.8	23	58	0	
BA	5.2	-	1.00	0.50	0.00	0.00	1.5	3.0	2.6	7.1	21	67	1	
Bt ₁	4.9	-	0.70	0.50	0.00	0.00	1.2	3.0	1.3	5.5	22	71	5	
Bt ₂	5.3	-	0.50	0.40	0.00	0.00	0.9	3.1	0.9	4.9	18	78	0	
Bt ₃	4.2	-	0.50	0.30	0.00	0.00	0.8	2.0	0.9	3.7	22	71	0	
Horiz.	C org.	N	Ataque por H ₂ SO ₄ (1:1) - NaOH (0.8%) g/kg						Si O ₂ Al ₂ O ₃	Si O ₂ R ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ livre	Equiv. CaCO ₃	
	g/kg	g/kg	N	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	(Ki)	(Kr)	g/kg	g/kg	
A	14.40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
AB	10.70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
BA	6.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Bt ₁	3.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Bt ₂	3.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Bt ₃	2.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Horiz.	100 Na ⁺ T %	Pasta saturada		Sais solúveis (extrato 1:5) ← cmol/kg de TF →								g/100g		
		C.E. do Extrato mS/cm 25°C	Água %	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Umidade Atual (%)	Umidade 15 ATM	Água dispon. Máxima
A	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AB	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BA	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bt ₁	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bt ₂	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bt ₃	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Anexo C. Análises físicas e químicas do perfil P051.

Horizonte		Frações da amostra total %			Composição granulométrica da terra fina (dispersão com NaOH / calgon) g/kg				Argila	Grau de	silte	Densidade kg/dm ³		Poros.
Símbolo	Profund. cm	Calhaus > 20 Mm	Cascalho 20-2 mm	Terra Fina < 2mm	Areia grossa 2-0,20 mm	Areia fina 0,20-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila < 0,002 mm	dispersa em água g/kg	Floculação %	argila	Solo	Partícula	Cm ³ /100cm ³
A	0-7	-	-	100	68	411	396	125	19	85	3.17	-	2.24	-
AC	7-23	-	-	100	87	462	330	121	16	87	2.73	-	2.32	-
2C ₁	23-30	-	-	100	128	582	244	46	28	39	5.3	-	2.39	-
2C ₂	30-70	-	-	100	170	477	260	93	57	39	2.8	-	2.59	-
3Cg ₃	70-98	-	-	100	42	507	329	122	98	20	2.70	-	2.46	-
2Cg ₄	98-123+	-	-	100	25	320	433	222	155	30	1.95	-	2.44	-
Horiz.	pH (1:2.5)		Complexo sortivo cmol./dm ³								Valor V	100Al ³⁺	P ass.	
	Água	KCl 1N	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Valor S (soma)	Al ³⁺	H	Valor T (soma)	(sat. de bases) %	S+Al ³⁺ %	mg/L	
A	4.5	-	1.3	1.0	0.01	0.01	2.3	3.0	8.6	13.9	17	56	4	
AC	3.8	-	1.2	0.8	0.01	0.01	2.0	2.8	3.9	8.6	23	58	3	
2C ₁	5.0	-	1.5	1.0	0.01	0.00	2.5	1.5	3.5	7.5	34	37	1	
2C ₂	5.4	-	1.3	1.1	0.01	0.00	2.4	1.6	2.7	6.7	36	39	1	
3Cg ₃	5.1	-	1.5	1.0	0.01	0.01	2.5	2.2	1.8	6.5	39	47	0	
2Cg ₄	4.2	-	2.5	1.5	0.01	0.02	4.0	2.2	3.4	9.6	42	35	1	
Horiz.	C org.	N	C	Ataque por H ₂ SO ₄ (1:1) - NaOH (0.8%) g/kg						Si O ₂ Al ₂ O ₃	Si O ₂ R ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ livre g/kg	Equiv. CaCO ₃ g/kg
	g/kg	g/kg	N	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	(Ki)	(Kr)			
A	16.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AC	12.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2C ₁	6.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2C ₂	4.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3Cg ₃	2.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2Cg ₄	2.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Horiz.	100 Na ⁺ T %	Pasta saturada		Sais solúveis (extrato 1:5) ← cmol/kg de TF →								g/100g		
		C.E. do Extrato MS/cm 25°C	Água %	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Umidade Atual (%)	Umidade 15 ATM	Água dispon. Máxima
A	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AC	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2C ₁	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2C ₂	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3Cg ₃	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2Cg ₄	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Anexo D. Análises físicas e químicas do perfil P045.

Horizonte		Frações da amostra total %			Composição granulométrica da terra fina (dispersão com NaOH / calgon) g/kg				Argila	Grau de	silte	Densidade kg/dm ³		Poros.
Símbolo	Profund. cm	Calhaus > 20 Mm	Cascalho 20-2 mm	Terra Fina < 2mm	Areia grossa 2-0,20 mm	Areia fina 0,20-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila < 0,002 Mm	dispersa em água g/kg	Floculação %	argila	Solo	Partícula	Cm ³ /100cm ³
A	0-5	-	-	100	302	616	26	56	0	100	0.5	1.17	2.61	0.552
CA	5-23	-	-	100	249	653	39	59	23	61	0.7	1.06	2.65	0.600
2C ₁	23-41	-	-	100	92	704	148	56	13	77	2.6	1.11	2.55	0.565
2C ₂	41-56	-	-	100	63	728	166	43	26	40	3.9	1.15	2.60	0.558
3C ₃	56-83	-	-	100	209	541	197	53	19	64	3.7	1.18	2.58	0.543
3C ₄	83-93+	-	-	100	104	687	148	61	26	57	2.4	1.32	2.68	0.507
Horiz.	pH (1:2.5)		Complexo sortivo cmol/dm ³								Valor V	100Al ³⁺	P ass.	
	Água	KCl 1N	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Valor S (soma)	Al ³⁺	H	Valor T (soma)	(sat. de bases) %	S+Al ³⁺ %	mg/L	
A	4.3	-	2.0	0.7	0.01	0.01	2.7	1.3	2.1	6.0	45	32	6	
CA	4.3	-	2.0	0.5	0.00	0.01	2.5	0.8	2.2	5.5	46	23	3	
2C ₁	4.3	-	2.2	0.8	0.00	0.01	3.0	1.3	2.9	7.1	42	29	4	
2C ₂	4.6	-	2.2	1.2	0.00	0.01	3.4	1.0	3.0	7.4	46	23	2	
3C ₃	4.7	-	2.2	0.8	0.00	0.00	3.0	1.3	2.9	7.1	42	29	1	
3C ₄	4.8	-	2.0	1.1	0.00	0.00	3.1	0.8	1.7	5.6	56	19	1	
Horiz.	C org.	N	C	Ataque por H ₂ SO ₄ (1:1) - NaOH (0.8%) g/kg						Si O ₂ Al ₂ O ₃	Si O ₂ R ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ livre	Equiv. CaCO ₃
	g/kg	g/kg	N	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	(Ki)	(Kr)	g/kg	g/kg	
A	8.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
CA	6.18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2C ₁	6.06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2C ₂	4.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3C ₃	4.08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3C ₄	1.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Horiz.	100 Na ⁺ T %	Pasta saturada		Sais solúveis (extrato 1:5) ← cmol/kg de TF →								g/100g		
		C.E. do Extrato MS/cm 25°C	Água %	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Umidade Atual (%)	Umidade 15 ATM	Água dispon. Máxima
A	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22.5	-	-	
CA	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18.6	-	-	
2C ₁	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22.9	-	-	
2C ₂	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.6	-	-	
3C ₃	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.2	-	-	
3C ₄	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.6	-	-	

Anexo E. Análises físicas e químicas do perfil P049.

Horizonte		Frações da amostra total %			Composição granulométrica da terra fina (dispersão com NaOH / calgon)g/kg				Argila dispersa em água g/kg	Grau de flocculação %	silte argila	Densidade kg/dm ³		Poros. Cm ³ /100cm ³
Símbolo	Profund. cm	Calhaus > 20 Mm	Cascalho 20-2 mm	Terra Fina < 2mm	Areia grossa 2-0,20 mm	Areia fina 0,20-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila < 0,002 mm				Solo	Partícula	
A	0-4	-	-	100	60	287	488	165	64	61	2.96	0.62	1.95	0.682
AB	4-16	-	-	100	31	280	521	168	95	43	3.10	0.93	2.20	0.577
BA	16-36	-	-	100	18	214	469	299	292	2	1.60	1.38	2.55	0.459
Bt ₁	36-56	-	-	100	21	214	452	313	222	29	1.40	1.35	2.56	0.473
Btf ₂	56-76	-	-	100	29	191	388	392	156	60	1.00	1.32	2.57	0.486
Btc ₃	76-106	-	-	100	29	125	355	491	31	94	0.72	1.36	2.58	0.473
Bt ₄	106-145 ⁺	-	-	100	36	147	349	468	24	61	0.75	1.39	2.58	0.461
Horiz.	pH (1:2,5)		Complexo sortivo cmol./dm ³								Valor V	100Al ³⁺	P ass.	
	Água	KCl 1N	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Valor S (soma)	Al ³⁺	H	Valor T (soma)	(sat. de bases) %	S+Al ³⁺ %	mg/L	
A	3.9	-	1.50	0.90	0.02	0.00	2.42	3.30	11.70	17.42	14	58	5	
AB	4.1	-	1.50	0.70	0.01	0.00	2.21	4.20	9.00	15.41	14	66	1	
BA	4.7	-	1.20	0.20	0.01	0.00	1.41	5.50	2.80	9.71	15	80	1	
Bt ₁	4.4	-	1.00	0.20	0.00	0.00	1.20	4.60	2.50	8.30	14	79	1	
Btf ₂	4.4	-	0.60	0.10	0.01	0.00	0.71	4.60	2.40	7.71	9	87	1	
Btc ₃	4.7	-	0.50	0.10	0.00	0.00	0.60	6.00	2.60	9.20	7	91	0	
Bt ₄	4.9	-	0.50	0.10	0.00	0.00	0.60	6.00	2.10	8.70	7	91	0	
Horiz.	C org.	N	C	Ataque por H ₂ SO ₄ (1:1) - NaOH (0.8%) g/kg						Si O ₂	Si O ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Equiv. CaCO ₃
	g/kg	g/kg	N	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	(Ki)	(Kr)	Fe ₂ O ₃	livre g/kg	g/kg
A	18.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AB	7.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BA	6.60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bt ₁	6.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Btf ₂	5.28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Btc ₃	2.60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bt ₄	1.68	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Horiz.	100 Na ⁺ T %	Pasta saturada		Sais solúveis (extrato 1:5)								g/100g		
		C.E. do Extrato MS/cm 25°C	Água %	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Umidade Atual (%)	Umidade 15 ATM	Água dispon. Máxima
A	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	39.6	-	-	
AB	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29.1	-	-	
BA	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24.5	-	-	
Bt ₁	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24.3	-	-	
Btf ₂	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32.0	-	-	
Btc ₃	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32.1	-	-	
Bt ₄	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32.6	-	-	

Anexo F. Análises físicas e químicas do perfil P061.

Horizonte		Frações da amostra total %			Composição granulométrica da terra fina (dispersão com NaOH / calgon) g/kg				Argila	Grau de silte	Densidade kg/dm ³		Poros.	
Símbolo	Profund. cm	Calhaus > 20 Mm	Cascalho 20-2 Mm	Terra Fina < 2mm	Areia grossa 2-0,20 mm	Areia fina 0,20-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila < 0,002 mm	dispersa em água g/kg	Floculação %	argila	Solo	Partícula	Cm ³ /100cm ³
A	0-7	-	-	100	70	285	375	270	93	66	1.39	0.91	2.14	0.575
AB	7-32	-	-	100	31	424	242	303	251	17	0.80	1.24	2.17	0.429
Bi ₁	32-66	-	-	100	28	210	353	409	224	45	0.86	1.25	2.16	0.421
Bif ₂	66-91	-	-	100	27	126	388	459	270	41	0.85	1.54	2.23	0.309
Bi ₃	91-135+	-	-	100	13	125	395	467	185	60	0.85	1.62	2.29	0.293
Horiz.	pH (1:2.5)		Complexo sortivo cmol _c /dm ³								Valor V	100Al ³⁺	P ass.	
	Água	KCl 1N	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Valor S (soma)	Al ³⁺	H	Valor T (soma)	(sat. de bases) %	S+Al ³⁺ %	mg/L	
A	4.2	-	2.00	1.50	0.02	0.01	3.53	3.30	12.90	19.73	18	48	3	
AB	4.3	-	2.00	0.40	0.01	0.00	2.41	3.20	3.60	9.21	26	57	2	
Bi ₁	5.0	-	1.50	0.30	0.00	0.00	1.80	2.80	2.25	6.85	26	61	0	
Bif ₂	5.2	-	1.30	0.30	0.00	0.00	1.60	3.30	2.05	6.95	23	67	0	
Bi ₃	5.0	-	1.10	0.30	0.00	0.00	1.40	2.00	0.50	3.90	36	59	4	
Horiz.	C org. g/kg	N g/kg	C N	Ataque por H ₂ SO ₄ (1:1) - NaOH (0.8%) g/kg						Si O ₂ Al ₂ O ₃	Si O ₂ R ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ livre g/kg	Equiv. CaCO ₃ g/kg
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	(Ki)	(Kr)			
A	21.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AB	11.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bi ₁	7.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bif ₂	4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bi ₃	3.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Horiz.	100 Na ⁺ T %	Pasta saturada		Sais solúveis (extrato 1:5) ← cmol _c /kg de TF →								g/100g		
		C.E. do Extrato mS/cm 25°C	Água %	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Umidade Atual (%)	Umidade 15 ATM	Água dispon. Máxima
A	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	36.3	-	-
AB	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30.2	-	-
Bi ₁	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28.2	-	-
Bif ₂	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25.3	-	-
Bi ₃	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18.3	-	-

Anexo G. Análises físicas e químicas do perfil P058.

Horizonte		Frações da amostra total %			Composição granulométrica da terra fina (dispersão com NaOH / calgon) g/kg				Argila	Grau de silte	Densidade kg/dm ³	Poros.		
Símbolo	Profund. cm	Calhaus > 20 mm	Cascalho 20-2 mm	Terra Fina < 2mm	Areia grossa 2-0,20 mm	Areia fina 0,20-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila < 0,002 mm	dispersa em água g/kg	Floculação %	argila	Solo	Partícula	Cm ³ /100cm ³
A	0-5	-	-	100	450	414	74	62	15	76	1.2	1.05	2.35	0.553
AB	5-23	-	-	100	219	320	297	164	85	48	1.8	1.06	2.56	0.586
BA	23-53	-	-	100	191	302	333	174	87	50	1.9	1.26	2.3	0.452
Bt ₁	53-59	-	-	100	170	285	287	258	106	59	1.1	1.37	2.35	0.417
Bt ₂	59-101	-	-	100	150	269	287	294	164	44	1.0	1.44	2.47	0.417
Bt ₃	101-150 ⁺	-	-	100	106	225	325	344	8	98	0.9	1.44	2.35	0.387
Horiz.	pH (1:2,5)		Complexo sortivo cmol/dm ³								Valor V	100Al ³⁺	P ass.	
	Água	KCl 1N	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Valor S (soma)	Al ³⁺	H	Valor T (soma)	(sat. de bases) %	S+Al ³⁺ %	mg/L	
A	4.0	-	2.00	1.70	0.02	0.00	3.72	2.30	10.10	16.12	23	38	5	
AB	4.2	-	1.50	1.40	0.01	0.00	2.91	2.80	4.20	9.91	29	49	2	
BA	4.4	-	1.30	0.70	0.00	0.00	2.00	3.00	2.40	7.40	27	60	0	
Bt ₁	4.8	-	0.80	0.50	0.00	0.00	1.30	3.30	1.70	6.30	21	72	0	
Bt ₂	4.8	-	0.60	0.40	0.00	0.00	1.00	3.30	1.60	5.90	17	77	0	
Bt ₃	4.6	-	0.50	0.30	0.01	0.00	0.81	4.30	1.60	6.71	12	84	1	
Horiz.	C org. g/kg	N g/kg	C N	Ataque por H ₂ SO ₄ (1:1) - NaOH (0.8%) g/kg						Si O ₂	Si O ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Equiv. CaCO ₃
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Al ₂ O ₃ (Ki)	R ₂ O ₃ (Kr)	Fe ₂ O ₃ livre g/kg	g/kg	
A	20.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
AB	10.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
BA	7.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Bt ₁	5.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Bt ₂	4.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Bt ₃	2.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Horiz.	100 Na ⁺ T %	Pasta saturada		Sais solúveis (extrato 1:5) ← cmol/kg de TF →								g/100g		
		C.E. do Extrato mS/cm 25°C	Água %	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Umidade Atual (%)	Umidade 15 ATM	Água dispon. Máxima
A	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31.1	-	-
AB	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	34.8	-	-
BA	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30.5	-	-
Bt ₁	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27.4	-	-
Bt ₂	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25.3	-	-
Bt ₃	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28.4	-	-

Anexo H. Análises físicas e químicas do perfil P037.

Horizonte		Frações da amostra total %			Composição granulométrica da terra fina (dispersão com NaOH / calgon) g/kg				Argila	Grau de silte	Densidade kg/dm ³		Poros.	
Símbolo	Profund. cm	Calhaus > 20 Mm	Cascalho 20-2 mm	Terra Fina < 2mm	Areia grossa 2-0,20 mm	Areia fina 0,20-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 Mm	Argila < 0,002 mm	dispersa em água g/kg	Floculação %	argila	Solo	Partícula	Cm ³ /100cm ³
A	0-6	-	-	100	156	584	108	152	41	73	0.71	1.08	2.53	0.573
AB	6-21	-	-	100	95	479	205	222	151	32	0.92	1.10	2.41	0.544
BA	21-42	-	-	100	70	446	264	211	182	14	1.25	1.30	2.35	0.447
Bi ₁	42-60	-	-	100	75	457	194	274	252	8	0.71	1.44	2.50	0.424
Bi ₂	60-80 ⁺	-	-	100	72	445	186	297	232	22	0.63	1.48	2.56	0.422
Horiz.	pH (1:2,5)		Complexo sortivo cmol _c /dm ³								Valor V	100Al ³⁺	P ass.	
	Água	KCl 1N	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Valor S (soma)	Al ³⁺	H	Valor T (soma)	(sat. de bases) %	S+Al ³⁺ %	mg/L	
A	3.9	-	1.00	0.50	0.02	0.00	1.52	5.75	4.45	11.72	13	79	2	
AB	4.5	-	0.90	0.40	0.01	0.00	1.31	5.00	1.20	7.51	17	79	1	
BA	4.5	-	0.90	0.30	0.01	0.00	1.21	5.10	0.10	6.41	19	81	0	
Bi ₁	4.7	-	0.70	0.30	0.01	0.00	1.01	5.25	0.05	6.31	16	84	3	
Bi ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Horiz.	C org. g/kg	N g/kg	C N	Ataque por H ₂ SO ₄ (1:1) - NaOH (0,8%) g/kg						Si O ₂ Al ₂ O ₃	Si O ₂ R ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ livre g/kg	Equiv. CaCO ₃ g/kg
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	(Ki)	(Kr)	-	-	-
A	10.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AB	7.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BA	6.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bi ₁	4.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bi ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Horiz.	100 Na ⁺ T %	Pasta saturada		Sais solúveis (extrato 1:5) ← cmol _c /kg de TF →								g/100g		
		C.E. do Extrato MS/cm 25°C	Água %	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Umidade Atual (%)	Umidade 15 ATM	Água dispon. Máxima
A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29.5	-	-
AB	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29.4	-	-
BA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28.8	-	-
Bi ₁	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26.5	-	-
Bi ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24.7	-	-

Anexo I. Análises físicas e químicas do perfil P106.

Horizonte		Frações da amostra total %			Composição granulométrica da terra fina (dispersão com NaOH / calgon) g/kg				Argila	Grau de silte	Densidade kg/dm ³	Poros.		
Símbolo	Profund. cm	Calhaus > 20 Mm	Cascalho 20-2 mm	Terra Fina < 2mm	Areia grossa 2-0,20 mm	Areia fina 0,20-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila < 0,002 mm	dispersa em água g/kg	Floculação %	argila	Solo	Partícula	Cm ³ /100cm ³
A	0-7	-	-	100	115	408	323	154	8	95	2.1	0.92	2.22	0.586
AB	7-19	-	-	100	107	351	363	179	13	93	2.0	1.17	2.35	0.502
BA	19-39	-	-	100	87	309	348	256	73	71	1.4	1.28	2.41	0.469
Bt ₁	39-79	-	-	100	66	319	282	333	129	61	0.8	1.39	2.42	0.426
Bt ₂	79-153+	-	-	100	64	316	291	329	71	78	0.88	1.64	2.51	0.347
Horiz.	pH (1:2.5)		Complexo sortivo cmol _c /dm ³								Valor V	100Al ³⁺	P ass.	
	Água	KCl 1N	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Valor S (soma)	Al ³⁺	H	Valor T (soma)	(sat. de bases) %	S+Al ³⁺ %	mg/L	
A	4.2	-	2.5	0.6	0.0	0.0	3.1	3.2	7.5	6.3	49	51	1	
AB	4.1	-	1.0	0.4	0.0	0.0	1.4	4.8	3.4	6.2	23	77	0	
BA	4.2	-	0.7	0.3	0.0	0.0	1.0	4.5	1.7	5.5	18	82	0	
Bt ₁	4.6	-	0.5	0.3	0.0	0.0	0.8	4.7	1.3	5.5	15	85	0	
Bt ₂	4.8	-	0.3	0.2	0.0	0.0	0.5	3.4	0.7	3.9	13	87	0	
Horiz.	C org. g/kg	N g/kg	C N	Ataque por H ₂ SO ₄ (1:1) - NaOH (0.8%) g/kg						Si O ₂ Al ₂ O ₃	Si O ₂ R ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ livre g/kg	Equiv. CaCO ₃ g/kg
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	(Ki)	(Kr)			
A	22.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AB	9.60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BA	7.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bt ₁	5.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bt ₂	2.30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Horiz.	100 Na ⁺ T %	Pasta saturada		Sais solúveis (extrato 1:5) ← cmol _c /kg de TF →								g/100g		
		C.E. do Extrato mS/cm 25°C	Água %	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Umidade Atual (%)	Umidade 15 ATM	Água dispon. Máxima
A	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22.7	-	-
AB	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25.2	-	-
BA	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29.1	-	-
Bt ₁	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25.7	-	-
Bt ₂	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17.4	-	-

Anexo J. Análises físicas e químicas do perfil P150.

Horizonte		Frações da amostra total %			Composição granulométrica da terra fina (dispersão com NaOH / calgon) g/kg				Argila	Grau de silte	Densidade kg/dm ³		Poros.	
Símbolo	Profund. cm	Calhaus > 20 Mm	Cascalho 20-2 mm	Terra Fina < 2mm	Areia grossa 2-0,20 mm	Areia fina 0,20-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila < 0,002 mm	dispersa em água g/kg	Floculação %	argila	Solo	Partícula	Cm ³ /100cm ³
A	0-7	-	-	100	56	348	435	161	30	81	2.70	0.78	1.88	0.585
AB	7-17	-	-	100	42	331	440	187	91	51	2.35	1.10	2.26	0.513
BA	17-29	-	-	100	34	291	437	238	127	47	1.84	1.35	2.20	0.386
Bi ₁	29-63	-	-	100	35	299	344	322	170	47	1.07	1.37	2.40	0.429
Bi ₂	63-142 ⁺	-	-	100	30	259	320	391	78	80	0.82	1.37	2.37	0.422
Horiz.	pH (1:2.5)		Complexo sortivo cmol _c /dm ³								Valor V	100Al ³⁺	P ass.	
	Água	KCl 1N	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Valor S (soma)	Al ³⁺	H	Valor T (soma)	(sat. de bases) %	S+Al ³⁺ %	mg/L	
A	4.1	-	2	1.2	0.01	0	3.2	2.5	7.9	13.6	24	44	1	
AB	4.4	-	1.5	0.9	0.01	0	2.4	4.3	4.2	10.9	22	64	1	
BA	4.4	-	0.6	0.5	0	0	1.1	4.2	1.7	7.0	16	79	1	
Bi ₁	4.3	-	0.4	0.4	0	0	0.8	4.8	1.6	7.2	11	86	0	
Bi ₂	4.9	-	0.3	0.2	0	0	0.5	4.8	1.2	6.5	8	91	0	
Horiz.	C org.	N	C	Ataque por H ₂ SO ₄ (1:1) - NaOH (0.8%) g/kg						Si O ₂ Al ₂ O ₃	Si O ₂ R ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ livre g/kg	Equiv. CaCO ₃ g/kg
	g/kg	g/kg	N	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	(Ki)	(Kr)			
A	18.40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AB	9.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BA	5.40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bi ₁	4.30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bi ₂	4.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Horiz.	100 Na ⁺ T %	Pasta saturada		Sais solúveis (extrato 1:5) ← cmol _c /kg de TF →								g/100g		
		C.E. do Extrato mS/cm 25°C	Água %	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Umidade Atual (%)	Umidade 15 ATM	Água dispon. Máxima
A	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	37.3	-	-
AB	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31.0	-	-
BA	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27.9	-	-
Bi ₁	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27.1	-	-
Bi ₂	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27.4	-	-

Anexo K. Análises físicas e químicas do perfil P035.

Horizonte		Frações da amostra total %			Composição granulométrica da terra fina (dispersão com NaOH / calgon) g/kg				Argila	Grau de	silte	Densidade kg/dm ³		Poros.
Símbolo	Profund. Cm	Calhaus > 20 Mm	Cascalho 20-2 mm	Terra Fina < 2mm	Areia grossa 2-0,20 mm	Areia fina 0,20-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila < 0,002 mm	dispersa em água g/kg	Floculação %	argila	Solo	Partícula	Cm ³ /100cm ³
A	0-19	-	-	100	86	509	227	178	16	91	1.28	1.12	2.32	0.517
AB	19-35	-	-	100	73	443	227	257	53	79	0.88	1.28	2.29	0.441
BA	35-73	-	-	100	69	429	217	285	28	91	0.76	1.43	2.40	0.404
Bi ₁	73-106	-	-	100	65	409	221	305	72	76	0.72	1.42	2.22	0.360
Bi ₂	106-145	-	-	100	58	311	221	410	47	89	0.54	1.46	2.36	0.381
BC	145-165 ⁺	-	-	100	44	318	188	450	56	88	0.42	1.44	2.26	0.363
Horiz.	pH (1:2,5)		Complexo sortivo cmol _c /dm ³								Valor V		100Al ³⁺	P ass.
	Água	KCl 1N	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Valor S (soma)	Al ³⁺	H	Valor T (soma)	(sat. de bases) %	S+Al ³⁺ %	mg/L	
A	3.5	-	1.70	1.00	0.01	0.01	2.72	5.75	4.45	12.92	21	68	5	
AB	4.1	-	1.40	0.90	0.01	0.01	2.32	5.00	2.80	10.12	23	68	1	
BA	4.4	-	1.30	0.70	0.00	0.01	2.01	5.10	1.40	8.51	24	72	0	
Bi ₁	4.6	-	0.80	0.50	0.00	0.01	1.31	5.25	0.05	6.61	20	80	0	
Bi ₂	4.6	-	0.60	0.50	0.00	0.01	1.11	5.00	0.30	6.41	17	82	0	
BC	4.9	-	0.70	0.40	0.00	0.01	1.11	5.50	0.10	6.71	17	83	0	
Horiz.	C org.	N	C	Ataque por H ₂ SO ₄ (1:1) - NaOH (0,8%) g/kg						Si O ₂	Si O ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Equiv. CaCO ₃
	g/kg	g/kg	N	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	(Ki)	(Kr)	Fe ₂ O ₃	livre g/kg	g/kg
A	14.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AB	10.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BA	7.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bi ₁	5.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bi ₂	5.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BC	4.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Horiz.	100 Na ⁺ T %	Pasta saturada		Sais solúveis (extrato 1:5) ← cmol _c /kg de TF →								g/100g		
		C.E. do Extrato MS/cm 25°C	Água %	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Umidade Atual (%)	Umidade 15 ATM	Água dispon. Máxima
A	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29.4	-	-	
AB	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28.7	-	-	
BA	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25.9	-	-	
Bi ₁	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23.7	-	-	
Bi ₂	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27.4	-	-	
BC	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26.8	-	-	