ANDRÉ LUIZ JOHANN

Modelo preditivo *fuzzy* da mobilização do solo no sistema de plantio direto

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de doutor em ciências.

São Paulo
2016

ANDRÉ LUIZ JOHANN

Modelo preditivo *fuzzy* da mobilização do solo no sistema de plantio direto

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de doutor em ciências.

Área de concentração:
Engenharia de Computação

Orientador: Prof. Dr.
André Riyuiti Hirakawa

São Paulo
2016

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 19 de abril de 2016.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

Catálogo-na-publicação

Johann, André Luiz

Modelo preditivo fuzzy da mobilização do solo no sistema de plantio direto
/ A. L. Johann -- versão corr. -- São Paulo, 2016.
170 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais.

1.Lógica fuzzy 2.Modelos matemáticos 3.Mecânica dos solos 4.Solo agrícola I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais II.t.

*Ao meu querido avô
Lamartine Feliciano Nogueira de Sá (in memorian),
um modelo a ser seguido por toda a vida.*

*À minha eternamente querida irmã
Luciana Johann (in memorian),
sem a qual eu jamais teria chegado até aqui.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais, mais especificamente ao Laboratório de Automação Agrícola, pela oportunidade concedida.

Durante o período deste doutoramento eu recebi o apoio e a colaboração de várias pessoas as quais gostaria de manifestar a minha gratidão.

Agradeço ao meu orientador, Dr. André Riyuiti Hirakawa, pela orientação, o apoio, a amizade, e por me instigar a ir mais longe.

Muito obrigado aos professores Dr. Antônio Mauro Saraiva, Dr. Carlos Cugnasca e à professora Cristina Borba, pela amizade, ensinamentos e pelas valiosas contribuições.

Agradeço também aos meus amigos do IAPAR, Hevandro C. Delalibera, Anderson de Toledo, Audilei S. Ladeira e, em especial, ao Augusto Guilherme de Araújo, pelo apoio e pelas valiosas contribuições na concretização deste trabalho.

Muito obrigado à minha família. Aos meus pais, pelo apoio e incentivo incondicionais, e por valorizarem a minha educação desde a minha infância. À minha tia e madrinha, por ser a minha segunda mãe.

Agradeço à uma pessoa muito especial, Tatiane Aparecida Soares, por me apoiar e ajudar.

Quero também me desculpar àqueles que eu não mencionei, para os quais fica o meu sincero agradecimento.

E obrigado a Deus, por tudo e todos.

RESUMO

As culturas do milho e da soja respondem pela maior parte da produção nacional de grãos, predominando o sistema de plantio direto. Para uma semeadura direta de qualidade, o bom aterramento do sulco é indispensável, pois garante um ambiente adequado às sementes. Neste sentido, é importante estimar a mobilização de solo promovida por uma haste sulcadora estreita durante esta operação. O modelo analítico existente visa representar a mobilização do solo no sistema de plantio convencional. Como consequência, há situações em que este não pode se aplicado, como no caso de hastes sulcadoras estreitas utilizadas em semeadoras de plantio direto. Nestas situações, o mecanismo de falha do solo pode se alterar, assumindo um comportamento não modelado na literatura. Essa pesquisa propõe um modelo fuzzy capaz de representar estas situações, aproveitando conhecimento da teoria de mecânica dos solos e da análise de resultados experimentais. No modelo proposto, parte das regras descrevem situações não abrangidas pelo modelo analítico, as quais foram formuladas a partir da estimativa das prováveis áreas de solo mobilizado. O modelo fuzzy foi testado com dados de experimentos conduzidos durante a pesquisa, em duas condições de granulometria de solo (arenoso e argiloso). O modelo proposto reproduziu as tendências observadas nos dados experimentais, mas superestimou os valores de área observados, sendo esse efeito bem mais intenso para os dados do experimento em solo arenoso. A superestimativa ocorreu devido à soma de diversos fatores. Um deles é a diferença entre as leituras experimentais, as quais consideram apenas o solo realmente movimentado, e a premissa do modelo analítico, que considera toda a área de solo incluindo aquela cisalhada, porém não mobilizada. Outro fator foi devido ao efeito do disco de corte da palha, que pré-cisalha o solo à frente da ferramenta. No ensaio em solo arenoso os valores observados de área de solo mobilizado foram menores que os esperados, intensificando o efeito de superestimativa do modelo fuzzy, sendo que este efeito não representa uma deficiência deste modelo.

Palavras-chave: lógica *fuzzy*; modelos matemáticos; mecânica dos solos; solo agrícola.

ABSTRACT

Soybean and corn crops account for the majority of Brazilian crop production, predominantly under no-till system. A high quality no-till seeding requires adequate furrow finishing to ensure a suitable environment for seed germination and emergence. Therefore, it is important to estimate furrow soil mobilization promoted by a chisel opener during seeding operation. Existing analytical models aim to represent soil mobilization in conventional tillage. As result, there are situations which the model cannot be applied, such as the case of chisel opener of no-till seeders. Under these situations, soil failure mechanism may change assuming a behavior not modeled by other studies yet. This research proposes a fuzzy model to represent these situations, taking advantage of knowledge obtained from soil mechanics theory and analysis of experimental data. In the proposed model, part of the rules describes situations not covered by the analytical model, which were formulated based on the estimation of possible mobilized soil areas. The fuzzy model was tested using data from experiments for two conditions of soil particle size (sandy and clay). The model simulated trends observed in the experimental data but overestimated observed values of area, which effect was much more intense on sandy soil experiment. The overestimation was due a sum of factors. One is the difference between experimental and modeled data, the first only consider the really mobilized soil, while the last consider the whole soil area, including the sheared but not mobilized area. Another factor was the effect of the straw cutting disc, which pre-shear the soil in front of the tool. In sandy soil experiment, observed values of soil disturbed area were lower than expected, overestimating the effect of fuzzy model, which was not a deficiency of the model.

Keywords: fuzzy logic; mathematical models; soil mechanics; agricultural soil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes de uma linha de plantio em semeadora direta tradicional.....	29
Figura 2 - Linha de plantio em semeadora de plantio direto, equipadas com componentes específicos de aterramento do sulco e compactação do solo.....	29
Figura 3 - Exemplo de "plantio direto invisível"	30
Figura 4 - Qualidade de semeadura deficiente, normalmente obtido pelas semeadoras de plantio direto tradicionais	30
Figura 5 - Semeadora do tipo <i>dibble/puch</i>	32
Figura 6 - Efeito da relação entre profundidade de trabalho e largura da ferramenta na ruptura mecânica do solo	37
Figura 7 - Descrição geométrica do modelo de falha de solo proposto para ferramentas estreitas.....	38
Figura 8 - Representação geométrica da área de solo mobilizado.	39
Figura 9 - Representação das diferenças entre o perfil considerado para o modelo analítico e o perfil real observado em campo	42
Figura 10 - Representação dos resultados para os perfis de solo nos experimentos do IAPAR	42
Figura 11 - Comportamento adequado do adimensional $N\gamma$ em função de diferentes valores de β	43
Figura 12 - Comportamento do adimensional $N\gamma$ em função de diferentes valores de β , no qual a minimização obtém um β não factível	44
Figura 13 - Representação das forças atuantes na frente de falha na condição em que o β converge para um valor normal.....	45
Figura 14 - Representação das forças atuantes na frente de falha na condição em que o β converge para 90°	45
Figura 15 - Superfície de resposta do modelo do McKyes para: $w=2,4\text{cm}$, $\delta=0,68\phi$ e $d=8\text{cm}$	46
Figura 16 - Superfície de resposta do modelo do McKyes para: $w=2,4\text{cm}$, $\delta=0,68\phi$ e $d=12\text{cm}$	47
Figura 17 - Resultado do modelo de McKyes para $w=2,7\text{cm}$, $\phi=24,5^\circ$, $\delta=21,43^\circ$ e $d=12,5\text{cm}$	47

Figura 18 - Resultado do modelo de McKyes para $w=2,7\text{cm}$, $\varphi=30^\circ$, $\delta=26,25^\circ$ e $d=12,5\text{cm}$	48
Figura 19 - Resultado do modelo de McKyes para $w=2\text{cm}$, $\varphi=24.5^\circ$, $\delta=17^\circ$ e $d=10\text{cm}$	48
Figura 20 - Resultado do modelo de McKyes para a ponteira do IAPAR em solo argiloso úmido	49
Figura 21 - Situação experimental que ocorre e limitação do modelo de McKyes, bem como a área de solo mobilizado observada experimentalmente nesta situação	50
Figura 22 - Situação experimental em que ocorre e limitação do modelo de McKyes, bem como a área de solo mobilizado observada experimentalmente nesta situação	51
Figura 23 - Situação experimental em que ocorre e limitação do modelo de McKyes, bem como as áreas de solo mobilizado observadas experimentalmente nesta situação. Ensaio de Londrina 2012, solo argiloso úmido	51
Figura 24 - Situação experimental em que ocorre e limitação do modelo de McKyes, bem como as áreas de solo mobilizado observadas experimentalmente nesta situação. Ensaio de Umuarama 2012, solo arenoso úmido	52
Figura 25 - Gráfico da função <i>AREF</i> , com os dois parâmetros da função: intercepto (α') e inclinação (β')	56
Figura 26 - Classificação de quatro condições do solo por meio dos parâmetros <i>AREF</i> , α' e β' , para uma mesma velocidade de operação	57
Figura 27 - Componentes de um modelo <i>fuzzy</i>	62
Figura 28 - Implicação das regras, por truncamento (mínimo) e escalamento (produto).....	63
Figura 29 - Exemplo de agregação das regras utilizando o operador de máximo.....	64
Figura 30 - Dispositivo acoplado ao engate de três pontos para fixação da haste e anel octogonal	69
Figura 31 - Dispositivo acoplado ao engate de três pontos para fixação da haste, anel octogonal e DME	69
Figura 32 - Barreira ótica utilizada para a identificação dos pontos demarcados.....	71

Figura 33 - Estacas utilizadas para interromper o feixe de luz laser, identificando os pontos demarcados	72
Figura 34 - Esquema do fluxo de informações dentro do modelo proposto	78
Figura 35 - Esquema do fluxo de informações dentro do modelo secundário	78
Figura 36 - Representação do ângulo de atrito interno no perfil de falha do solo	81
Figura 37 - Representação do ângulo de atrito solo - ferramenta no perfil de falha do solo	82
Figura 38 - Histograma da série temporal de esforços horizontais atuantes na haste sulcadora	99
Figura 39 - Histograma da série temporal de esforços verticais atuantes na haste sulcadora	99
Figura 40 - Histograma da diferença entre dois valores consecutivos espaçados um período de 0,01s, obtidos a partir dos esforços horizontais atuantes na haste sulcadora, referentes a uma parcela do experimento.....	100
Figura 41 - Histograma da diferença entre dois valores consecutivos espaçados um período de 0,02s, obtidos a partir dos esforços horizontais atuantes na haste sulcadora, referentes a uma parcela do experimento.....	100
Figura 42 - Histograma da diferença entre dois valores consecutivos espaçados um período de 0,05s, obtidos a partir dos esforços horizontais atuantes na haste sulcadora, referentes a uma parcela do experimento.....	101
Figura 43 - Histograma da diferença entre dois valores consecutivos espaçados um período de 0,10s, obtidos a partir dos esforços horizontais atuantes na haste sulcadora, referentes a uma parcela do experimento.....	101
Figura 44 - Distribuição dos parâmetros da <i>AREF</i> para os ensaios de Londrina 2012 (Argiloso) e Umuarama 2012 (Arenoso)	105
Figura 45 - Distribuição dos valores médios da função <i>AREF</i> para os ensaios de Londrina 2012 (Argiloso) e Umuarama 2012 (Arenoso)	106
Figura 46 - Distribuição dos parâmetros da <i>AREF</i> , obtidos a partir dos esforços horizontais atuantes na haste, em função da umidade do solo e velocidade de operação	108

Figura 47 - Distribuição dos parâmetros da <i>AREF</i> , obtidos a partir dos esforços verticais atuantes na haste, em função da umidade do solo e velocidade de operação	108
Figura 48 - Resultados experimentais descrevendo a relação entre o ângulo de atrito interno do solo e o teor de argila, em diferentes condições de umidade (descritas em $g.g^{-1}$)	111
Figura 49 - Resultados experimentais descrevendo a relação entre o ângulo de atrito interno do solo e o teor de argila, em diferentes condições de umidade (descritas em $g.g^{-1}$)	111
Figura 50 - Funções de pertinência para o teor de argila do solo	112
Figura 51 - Resultados experimentais descrevendo a relação entre a umidade e o ângulo de atrito interno do solo, em diferentes teores de argila (descritos em percentuais)	113
Figura 52 - Resultados experimentais descrevendo a relação entre a umidade e o ângulo de atrito interno do solo, em diferentes teores de argila (descritos em percentuais)	113
Figura 53 - Funções de pertinência para a umidade do solo.....	115
Figura 54 - Funções de pertinência para a densidade do solo.....	116
Figura 55 - Funções de pertinência para o ângulo de atrito interno do solo.....	117
Figura 56 - Relação entre o ângulo de atrito interno do solo (φ), a profundidade de operação (d) e a área de solo mobilizado (A).....	121
Figura 57 - Funções de pertinência para o ângulo de atrito interno do solo.....	121
Figura 58 - Relação entre o ângulo de atrito solo ferramenta (δ), a profundidade de operação (d) e a área de solo mobilizado (A).....	122
Figura 59 - Funções de pertinência para o ângulo de atrito solo ferramenta	123
Figura 60 - Relação entre a profundidade de operação (d), o ângulo de atrito solo ferramenta (δ), e a área de solo mobilizado (A), considerando: $w = 2,4cm$, $\alpha = 24^\circ$ e $\delta = (7/8)\varphi$	124
Figura 61 - Funções de pertinência para a profundidade da haste	124
Figura 62 - Funções de pertinência para a área de solo mobilizado	125
Figura 63 - Área estimada quando φ é MB e d é B ($\varphi=25^\circ$, $\delta=26,25^\circ$, $d=5cm$).....	128
Figura 64 - Área estimada quando φ é MB e d é M ($\varphi=25^\circ$, $\delta=26,25^\circ$, $d=10,5cm$)	128
Figura 65 - Área estimada quando φ é B e d é M ($\varphi=29^\circ$, $\delta=26,25^\circ$, $d=10,5cm$)	129

Figura 66 - Área estimada quando φ é B e d é B ($\varphi=23,6^\circ$, $\delta=26,25^\circ$, $d=15\text{cm}$).....	130
Figura 67 - Área estimada quando φ é B e d é B ($\varphi=29^\circ$, $\delta=26,25^\circ$, $d=15\text{cm}$).....	131
Figura 68 - Área estimada quando δ é MB e d é B ($\varphi=35^\circ$, $\delta=12,5^\circ$, $d=5\text{cm}$)	131
Figura 69 - Área estimada quando δ é B e d é B ($\varphi=35^\circ$, $\delta=19^\circ$, $d=5\text{cm}$)	132
Figura 70 - Área estimada quando δ é MB e d é M ($\varphi=35^\circ$, $\delta=12,5^\circ$, $d=10,5\text{cm}$) ...	133
Figura 71 - Área estimada quando δ é B e d é M ($\varphi=35^\circ$, $\delta=19^\circ$, $d=10,5\text{cm}$)	133
Figura 72 - Área estimada quando δ é MB e d é A ($\varphi=35^\circ$, $\delta=12,5^\circ$, $d=15\text{cm}$)	134
Figura 73 - Área estimada quando δ é B e d é A ($\varphi=35^\circ$, $\delta=19^\circ$, $d=15\text{cm}$)	135
Figura 74 - Gráfico comparativo dos resultados de ângulo de atrito interno do solo, observados experimentalmente, e preditos pelo modelo	138
Figura 75 - Comparação entre o resultado observado e o previsto (escalonado) pelo modelo, para os dados do experimento conduzido em Umuarama (solo arenoso), em 2012.....	143
Figura 76 - Comparação entre o resultado observado e o previsto (escalonado) pelo modelo, para os dados do experimento conduzido em Londrina (solo argiloso), em 2012	145
Figura 77 - Situação experimental em que ocorre e limitação do modelo de McKyes, bem como a área de solo mobilizado observada experimentalmente nesta situação	166
Figura 78 - Situação experimental em que ocorre e limitação do modelo de McKyes, bem como a área de solo mobilizado observada experimentalmente nesta situação	166
Figura 79 - Situação experimental em que ocorre e limitação do modelo de McKyes, bem como a área de solo mobilizado observada experimentalmente nesta situação	167
Figura 80 - Situação experimental em que ocorre e limitação do modelo de McKyes, bem como a área de solo mobilizado observada experimentalmente nesta situação	167
Figura 81 - Situação experimental em que ocorre e limitação do modelo de McKyes, bem como a área de solo mobilizado observada experimentalmente nesta situação	168
Figura 82 - Situação experimental em que ocorre e limitação do modelo de McKyes, bem como a área de solo mobilizado observada experimentalmente nesta situação	168

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Nomenclatura adotada para os primeiros tratamentos.....	74
Tabela 2 - Nomenclatura adotada para os tratamentos experimento de Londrina, em 2013	74
Tabela 3 - Tratamentos dos experimentos em Londrina, 2011 e 2012	75
Tabela 4 - Tratamentos dos experimentos em Umuarama, 2012	75
Tabela 5 - Tratamentos dos experimentos em Londrina, 2013	75
Tabela 6 - Universo de discurso dos parâmetros de entrada e saída do modelo para a predição do ângulo de atrito interno do solo	79
Tabela 7 - Universo de discurso dos parâmetros de entrada e saída do modelo para a predição da área de solo mobilizado.....	83
Tabela 8 - Resultados do teste F e coeficientes de variação, para experimento conduzido em Londrina (solo argiloso), em 2011	88
Tabela 9 - Resultados médios do experimento conduzido em Londrina (solo argiloso), em 2011.....	88
Tabela 10 - Correlações do ensaio conduzido em Londrina, em 2011	89
Tabela 11 - Resultados do teste F e coeficientes de variação, para o experimento conduzido em Londrina (solo argiloso), em 2012	91
Tabela 12 - Resultados médios do experimento conduzido em Londrina (solo argiloso), em 2012.....	91
Tabela 13 - Correlações do ensaio conduzido em Londrina, em 2012	92
Tabela 14 - Resultados do teste F e coeficientes de variação, para o experimento conduzido em Umuarama (solo arenoso), em 2012	93
Tabela 15 - Resultados médios do experimento conduzido em Umuarama (solo arenoso), em 2012	94
Tabela 16 - Correlações do ensaio conduzido em Umuarama, em 2012.....	94
Tabela 17 - Resultados do teste F e coeficientes de variação, para o experimento conduzido em Londrina (solo argiloso), em 2013	96
Tabela 18 - Resultados médios do experimento conduzido em Londrina (solo argiloso), em 2013.....	96
Tabela 19 - Correlações do ensaio conduzido em Londrina, em 2013	97
Tabela 20 - Correlações com os parâmetros da <i>AREF</i> para o ensaio conduzido em Londrina, em 2011	102

Tabela 21 - Correlações com os parâmetros da <i>AREF</i> para os ensaios conduzidos em Londrina e Umuarama, em 2012 e 2013.....	102
Tabela 22 - Regras para o ângulo de atrito interno do solo	119
Tabela 23 - Resultados para o modelo de predição de ângulo de atrito interno do solo, incluindo parâmetros de entrada e saída, com valores observados e preditos	136
Tabela 24 - Resultados para o modelo de predição da área de solo mobilizado, utilizando os dados do experimento conduzido em Umuarama, em 2012, incluindo parâmetros de entrada e saída, com valores observados e preditos	140
Tabela 25 - Resultados para o modelo de predição da área de solo mobilizado, utilizando os dados do experimento conduzido em Londrina, em 2012, incluindo parâmetros de entrada e saída, com valores observados e preditos	141
Tabela 26 - Dados detalhados dos ensaios descrevendo valores do ângulo de atrito interno do solo, em diferentes trabalhos da literatura.....	164

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ANN</i>	(<i>Artificial Neural Network</i>) Rede neural artificial
<i>ASAE</i>	American Society of Agricultural Engineers
<i>ASABE</i>	American Society of Agricultural and Biological Engineers
<i>APE</i>	(<i>Average Percentual Error</i>): Erro percentual médio
<i>AREF</i>	(<i>Auto-regressive error function</i>): Função do erro autorregressivo
DME	Dispositivo de medição de esforços
FAPEAGRO	Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento do Agronegócio
FINEP	Financiadora de estudos e projetos
<i>HBM</i>	Hottinger Baldwin Messtechnik
IAPAR	Instituto Agronômico do Paraná
<i>MAE</i>	(<i>Mean absolute error</i>): Erro médio absoluto
<i>MLP</i>	(<i>Multi layer perceptron</i>) Perceptron de múltiplas camadas
<i>MSE</i>	(<i>Mean square error</i>): Erro quadrático médio
<i>PE</i>	(<i>Percentual error</i>): Erro percentual
R	Coeficiente de correlação
R^2	Coeficiente de determinação
<i>RBF</i>	(<i>Radial basis function</i>) Função de base radial
<i>RMSE</i>	(<i>Root mean square error</i>): Raiz quadrada do erro quadrático médio.
RNA	Rede neural artificial
<i>SSE</i>	(<i>Sum of squares error</i>): Erro da soma de quadrados

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Ângulo de ataque da ferramenta
β	Ângulo de inclinação da frente de falha, em relação ao plano horizontal
α'	Parâmetro da função do erro autorregressivo
β'	Parâmetro da função do erro autorregressivo
φ	Ângulo de atrito interno do solo
δ	Ângulo de atrito solo-ferramenta
τ	Tensão de cisalhamento do solo
σ	Tensão normal
c	Coesão do solo
s	Tensão de atrito entre o solo e a superfície da ferramenta
c_a	Adesão entre solo e ferramenta
d	Profundidade de operação da ferramenta
γ	Densidade total do solo
g	Aceleração da gravidade
q	Pressão de sobrecarga sobre a superfície do solo
N_γ	Adimensional gravitacional
N_c	Adimensional coesivo
N_a	Adimensional adesivo
N_q	Adimensional de sobrecarga sobre a superfície do solo
r	Extensão da frente de falha na superfície do solo
S	Projeção da largura da frente de falha em relação a seção transversal do solo na altura da ferramenta
w	Largura da ferramenta
ρ'	Ângulo de abertura da frente de falha em relação ao plano horizontal, na superfície do solo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Justificativa	17
1.2 Motivação	23
1.3 Objetivo.....	24
1.4 Organização da Tese.....	24
2 BASE CONCEITUAL.....	26
2.1 Aspectos da qualidade de semeadura.....	27
2.2 Conceitos básicos da interação solo - ferramenta	33
2.2.1 Conceitos de mecânica dos solos.....	33
2.2.2 Modelo de Godwin para descrição dos esforços na haste.	36
2.2.3 Modelo de McKyes para descrição dos esforços na haste	38
2.2.4 Uma limitação no modelo de McKyes	43
2.2.5 Fatores que definem a resistência do solo ao cisalhamento.....	53
2.3 A função do erro autorregressivo (<i>AREF</i>).....	55
2.4 Modelagem <i>fuzzy</i>	58
3 METODOLOGIA.....	67
3.1 Ensaio de campo	67
3.2 Estudo da função <i>AREF</i>	76
3.3 Modelo <i>fuzzy</i>	77
3.3.1 Modelo para predição do ângulo de atrito interno do solo.....	79
3.3.2 Modelo para predição da área de solo mobilizado	80
3.4 Prova de conceito	83
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	87
4.1 Ensaio de campo	87
4.2 Estudo da função <i>AREF</i>	98
4.3 Modelo <i>fuzzy</i>	110

4.3.1 Modelo de predição do ângulo de atrito interno do solo.....	110
4.3.2 Modelo para a predição da área de solo mobilizado	120
4.4 Prova de conceito	135
4.4.1 Modelo de predição do ângulo de atrito interno do solo.....	136
4.4.2 Modelo de predição da área de solo mobilizado	138
4.5 Considerações finais.....	146
5 CONCLUSÕES	148
5.1 Trabalhos futuros	150
REFERÊNCIAS.....	153
ANEXO.....	164
GLOSSÁRIO	169

1 INTRODUÇÃO

As culturas de milho e soja respondem por aproximadamente 90% da produção nacional de grãos. Nestas culturas predomina o sistema plantio direto, o qual reduz a erosão do solo e propicia melhores condições para o estabelecimento e crescimento das culturas.

Na cultura do milho, a qualidade da sementeira é primordial, pois esta não possui a habilidade de compensar falhas na população ou no espaçamento entre as plantas. Além disso, a emergência das plantas deve ocorrer o mais simultaneamente possível, de modo a garantir uma colheita uniforme e melhores produtividades.

Uma sementeira inadequada pode resultar em sementes que não emergem ou que o fazem de forma tardia. Falhas na germinação das sementes de milho podem resultar em perdas de produtividade que vão de 20% até mais de 50% do potencial da cultura, resultando em grande prejuízo ao agricultor.

Neste contexto, estimar a mobilização do solo promovida por uma haste sulcadora de uma sementeira direta constitui fator importante para a melhoria da qualidade do processo de sementeira.

1.1 Justificativa

A mobilização do solo por uma ferramenta de ataque está relacionada às propriedades do solo, as quais apresentam um padrão de comportamento com elevado grau de complexidade, bem como notada variabilidade temporal e espacial (MOLIN, 1997; HEUVELINK; WEBSTER, 2001; LI et al., 2002; CORRÊA; TAVARES; URIBE-OPAZO, 2009). A mobilização do solo é influenciada por diversos fatores, tais como, textura, umidade, adesão e coesão do solo, que são definidos por fatores geológicos, climáticos, topográficos, pelo manejo e interação com fauna e flora. Além disso, boa parte destes fatores varia espacialmente, ao longo área cultivada, e ao longo do tempo.

A presença de cobertura vegetal e o alto teor de matéria orgânica no sistema de plantio direto resultam no aumento da microfauna e da macrofauna o que também incorpora um efeito estocástico, resultante da presença de estruturas vegetais no interior e na superfície do solo. Soma-se a isso, a ação das raízes que

interagem com a ferramenta, podendo arrastar uma determinada porção de solo às quais estão aderidas, quando movimentadas.

Os modelos matemáticos que procuram descrever o desempenho de ferramentas de cultivo do solo foram desenvolvidos de forma analítica e visam, em geral, determinar as forças atuantes sobre as ferramentas (otimização energética), mas não a mobilização do solo. Quando a mobilização é considerada, ela normalmente é um resultado secundário.

Neste contexto, os trabalhos mais relevantes são Godwin e Spoor (1977), Mckyes e Ali (1977), Godwin e O'Dogherty (2007), Liu et al. (2008) e Mckyes e Desir (1984), sendo que os quatro primeiros foram desenvolvidos a partir de experimentos realizados em caixas de solo, em laboratórios, utilizando materiais que simulam o comportamento do solo. No trabalho de Mckyes e Desir (1984), os estudos foram conduzidos em campo, mas no sistema de plantio convencional. Neste sistema a estrutura do solo é quebrada durante as operações de aração e gradagem, bem como a presença de matéria orgânica é muito menor. Como consequência, estes solos apresentam uma condição mais homogênea do que os solos no sistema de plantio direto.

Os modelos analíticos para predição da mobilização do solo por ferramentas apresentam limitações resultantes das hipóteses simplificadoras nas quais se baseiam e das aproximações inerentes ao processo analítico. Como consequência, surgem restrições ao seu emprego com situações em que não podem ser aplicados.

O modelo proposto por Mckyes e Ali (1977), o único que chega a representar da mobilização do solo, não descreve situações onde o ataque da ferramenta é pequeno, como é caso das hastes sulcadoras utilizadas nas semeadoras diretas, pois o foco deste modelo foi o de representar ferramentas maiores, normalmente empregadas nos países do hemisfério norte. Logo, torna-se necessário o desenvolvimento de um modelo complementar capaz de representar estas novas situações, observadas no sistema de plantio direto brasileiro.

As lógicas computacionais são técnicas normalmente utilizadas para suprir as limitações, ou deficiências, dos modelos analíticos e estatísticos.

Existem diferentes tipos de lógicas computacionais aplicadas na área de engenharia agrícola e biológica. Huang et al. (2010) destacam as lógicas *fuzzy*, as redes neurais artificiais, os algoritmos genéticos, a inferência Bayseana e as árvores

de decisão, sendo que estas últimas também abrangem as tabelas de decisão e os grafos.

Os algoritmos genéticos são reconhecidos como uma ferramenta poderosa para otimização e descrevem modelos com comportamento evolutivo (HUANG et al., 2010). Um exemplo do seu uso é o trabalho de Morimoto et al. (2003) no qual o algoritmo genético foi utilizado para otimizar a temperatura de armazenamento do tomate.

A inferência Bayseana e as redes Bayseanas trabalham no contexto da computação probabilística, sendo adequada na representação de modelos estatísticos. Um exemplo do uso de redes Bayseanas é o trabalho de Jana; Mohanty e Sheng (2012) no qual se obtiveram parâmetros hidráulicos do solo a partir de imagens aéreas e dados coletados em campo.

As árvores de decisão são empregadas em processos de tomada de decisão (KIRCHNER; TÖLLE; KRIETER, 2004) e em processos de classificação (PIETERSMA et al., 2003; KAMPHUIS et al., 2010), podendo se estender para a elaboração de mapas (GIASSON et al., 2011; GUO; RAGE; NINOMIYA, 2013). Elas descrevem modelos determinísticos de eventos discretos.

As redes neurais aplicam-se a modelos físicos, nos quais o fenômeno em estudo apresenta um comportamento estruturado, e seus dados de saída apresentam comportamento determinístico. Seu processo de treinamento possibilita o mapeamento de padrões nos dados observados. Quando adequadamente formuladas e treinadas, as redes neurais são capazes de reproduzir padrões em dados diferentes dos utilizados em seu treinamento, conferindo a elas a capacidade de generalização.

As redes neurais vêm sendo empregadas por muitos autores para descrever aspectos relacionados à interação entre solo e ferramenta.

Rahman et al. (2011) desenvolveram um modelo capaz de avaliar um parâmetro do cultivo tendo como entrada um número reduzido de parâmetros. Neste trabalho foi utilizada uma rede neural artificial do tipo *Multi Layer Perceptron (MLP)* para prever a energia consumida por uma haste estreita em função da profundidade de trabalho, velocidade de operação e teor de umidade do solo.

Zhang e Kushwaha (1999) desenvolveram um modelo utilizando uma rede neural artificial do tipo *Radial Basis Function (RBF)* para prever a força de tração de hastes estreitas utilizando como dados de entrada a velocidade de operação,

parâmetros geométricos da ferramenta e características do solo. A rede neural obtida apresentou uma boa capacidade de generalização dentro na faixa de parâmetros de entrada utilizada.

Roul et al. (2009) desenvolveram um modelo utilizando uma rede neural *MLP* para prever a força de tração requerida por um arado, comparando com os resultados do equacionamento descrito pela norma *ASAE D497.4* da “*American Society of Agricultural and Biological Engineers*” (*ASABE*), obtendo desempenho superior para o modelo em rede neural.

O trabalho de Goh (1995) avaliou o uso de redes neurais *MLP* no estudo de problemas na área de solos na engenharia civil, modelando um *push-cone*, uma espécie de penetrômetro de bolso, utilizado para medir a resistência do solo.

Choi; Lee e Park (2000), apud Rahman et al. (2011), desenvolveram um modelo utilizando rede neural recorrente com defasagem de tempo para prever a força de tração dinâmica de 3 tipos de ferramentas de preparo de solo, utilizando os dados de forma da ferramenta, tensão de cisalhamento do solo e índice de cone como parâmetros de entrada. Os autores descrevem que o modelo desenvolvido indica um método de modelagem promissor para o cálculo dos esforços dinâmicos de tração.

A teoria dos conjuntos *fuzzy* e a lógica *fuzzy* (ou nebulosa), apresentam um grande potencial de uso em situações nas quais não se têm um conhecimento quantitativo aprofundado do fenômeno em estudo, mas ao mesmo tempo deseja-se que o modelo mantenha uma representação abrangente, sem ficar restrito a universo descrito pelos dados, principalmente quando estes são viciados ou incompletos. Diferente de outras lógicas computacionais, ou mesmo de modelos analíticos ou estatísticos, a modelagem *fuzzy* permite agregar ao modelo o conhecimento linguístico, subjetivo, que se tem sobre o fenômeno. A lógica *fuzzy* permite lidar com situações nas quais há a presença de incertezas e ambiguidades.

No que se refere ao emprego de modelagem *fuzzy* em aplicações agrícolas, pode-se observar um grande número de trabalhos nesta linha. No entanto, são pouquíssimos os trabalhos modelando a interação solo-ferramenta.

Marakoğlu e Çarman (2010) empregaram a modelagem *fuzzy* para avaliar o empolamento e a eficiência no requerimento de força de um cultivador operando em uma caixa de solo. Foram utilizados como parâmetros de entrada, a profundidade de trabalho do cultivador e a sua velocidade de deslocamento, e como saídas, a

eficiência no requerimento de força e o empolamento. As regras foram formuladas a partir das opiniões de especialistas, ou seja, do seu conhecimento subjetivo. O modelo gerado obteve um bom desempenho, com erros relativos e coeficiente de correlação de 2,41% e 0,965 para a avaliação do empolamento e 2,86% e 0,945 para a eficiência no requerimento de força.

Zorluer et al. (2010) utilizaram a modelagem *fuzzy* na determinação da dispersibilidade em solos argilosos dispersivos. O objetivo foi propor um modelo capaz de integrar os resultados de dispersibilidade do solo, obtidos a partir de quatro métodos diferentes, em um único índice, tendo em vista que os métodos apresentam resultados diferentes entre si para uma mesma amostra de solo. O resultado do modelo *fuzzy* foi comparado com a metodologia normalmente adotada, que é subjetiva. Os métodos apresentaram resultados coincidentes em 65,5% dos casos testados. Os autores apontaram como vantagem da modelagem *fuzzy*, proporcionar resultados mais plausíveis e objetivos, e a menor necessidade de amostras, pois dispensa a recorrência amostral.

Papadopoulos; Kalivas e Hatzichristos (2011) desenvolveram um sistema *fuzzy* de suporte a decisão, para a recomendação da taxa ótima de aplicação de nitrogênio no solo, para a cultura do algodão na região de Atenas. O sistema era composto de um conjunto de modelos *fuzzy* associados em 4 estágios, desmembrando as diferentes fases teóricas envolvidas no processo de recomendação. Todos os modelos foram baseados em regras linguísticas, obtidas a partir do conhecimento de especialistas elicitados por entrevistas submetidas a 3 especialistas em adubação e 5 produtores de algodão, e por informações de trabalhos da literatura. O desempenho do modelo não foi avaliado de forma objetiva, tendo-se em vista a complexidade envolvida em se determinar as recomendações de adubação em cada área. No entanto, os autores destacam o seu potencial como uma ferramenta capaz de reduzir a adubação excessiva normalmente realizada na Grécia.

Não foram encontrados trabalhos abordando o uso de lógicas *fuzzy*, redes neurais, ou qualquer outra lógica computacional, para o estudo da mobilização do solo provocada por uma ferramenta de ataque ao solo. Mesmo nos trabalhos envolvendo a modelagem analítica, a mobilização do solo é tratada como um resultado secundário. Isto se deve ao fato do foco dos estudos da interação solo-

ferramenta realizados até então ter por objetivo a otimização energética dos implementos.

Em face disto, este trabalho propõe-se a estudar um modelo, capaz de representar a mobilização do solo em condições compatíveis com o sistema de plantio direto, fazendo uso de lógicas computacionais.

Outro ponto importante, é que a notada variabilidade temporal e espacial dos parâmetros do solo traz consigo elevado nível de ruído e descontinuidades nos dados. Uma das formas de se tratar esses efeitos é empregar ferramentas e modelos estatísticos, os quais são capazes de filtrar e quantificar tais variabilidades. Devido a isso, neste trabalho também foi avaliada a capacidade da função do erro autorregressivo (*AREF*) quantificar a complexidade dos padrões de força atuantes na ferramenta, relacionando-os com parâmetros do solo. No entanto, foi observado que os seus resultados são restritos aos dados utilizados para a sua obtenção, sendo limitada a generalização de suas observações.

Apesar da mobilização do solo ser um fenômeno físico, estruturado e, portanto, determinístico, os parâmetros do solo que o afetam não o são. A variabilidade espacial e temporal de parâmetros como a umidade e a densidade, que também são sujeitos a efeitos antrópicos, tais como o tráfego de máquinas, pessoas e animais de criação, faz com que o uso das redes neurais artificiais não seja a melhor alternativa, dada a interferência destes ruídos em seu treinamento. Portanto torna-se importante agregar ao modelo o conhecimento teórico da mecânica dos solos, bem como o conhecimento prático de especialistas, o qual pode ser representado fazendo-se o uso da lógica *fuzzy*.

Deste modo, o modelo proposto visa prever a mobilização do solo a partir do conhecimento especialista e de trabalhos da literatura contemplando situações as quais não são atualmente abrangidas pelos modelos analíticos.

Para auxiliar na prova de conceito deste modelo, também será proposto um segundo modelo para a predição do ângulo de atrito interno do solo, uma vez que não foram encontrados na literatura estudos de modelos preditivos para este parâmetro do solo.

1.2 Motivação

Esta pesquisa tem como propósitos principais, primeiro aplicar a modelagem computacional à estimativa da mobilização do solo, empregando as lógicas computacionais, mais especificamente a modelagem *fuzzy*, de modo a representar um fenômeno físico em um contexto ainda não estudado, ampliando o conhecimento já existente.

O segundo propósito reflete a necessidade constada pelo autor e por outros pesquisadores do Instituto Agrônomo do Paraná, de melhorar a qualidade da operação de semeadura no sistema de plantio direto, o que levou à criação de um projeto de pesquisa, com financiamento da FINEP. Este projeto consistia no desenvolvimento de um sistema de controle cujo algoritmo fosse capaz de definir a condição ótima de aterramento do sulco e compactação da semente e assim atuar nos componentes de acabamento de semeadura de uma semeadora adubadora, utilizada no sistema de plantio direto.

Durante o desenvolvimento deste projeto, verificou-se que para se elaborar tal algoritmo seria preciso estender o conhecimento existente na área de mecânica dos solos, no que se refere ao fenômeno da mobilização do solo promovido pela haste sulcadora estreita, que é a ferramenta utilizada neste tipo de semeadora.

A modelagem *fuzzy* foi escolhida devido à sua capacidade de representar fenômenos, nos quais o conhecimento qualitativo do especialista tem um papel importante, e onde existem incertezas envolvidas, dada a complexidade do fenômeno. Estes aspectos são relevantes na representação da mobilização do solo.

A pesquisa foi motivada pela constatação de que, apesar de muitas experiências em diferentes partes do mundo, os modelos existentes não chegam a representar a mobilização do promovida por ferramentas tão estreitas, e com ângulos de ataque tão pequenos, quanto às empregadas no sistema de plantio direto.

Este conhecimento não é importante somente para o desenvolvimento de algoritmos de controle em operações de semeadura, mas também podem contribuir em outros estudos na área de solos, como o da erosão do solo provocada pelas operações de cultivo.

1.3 Objetivo

O objetivo geral desta pesquisa é representar a mobilização do solo promovida por uma haste sulcadora estreita, em sistema de plantio direto, de forma complementar aos modelos analíticos existentes.

Para atingir o objetivo geral, os objetivos específicos são:

- Propor um modelo *fuzzy*, baseado em regras, para a predição da área de solo mobilizado a partir do conhecimento de trabalhos da literatura e especialista, que seja capaz de representar situações atualmente não abrangidas pelos modelos analíticos existentes.
- Propor um modelo *fuzzy*, baseado em regras, para estimar o atrito interno do solo a partir do conhecimento da teoria de mecânica dos solos, tendo como entrada parâmetros físicos do solo.

1.4 Organização da Tese

A tese está organizada em capítulos da seguinte forma:

- 1) Uma base conceitual onde é feita a:
 - a. Descrição do contexto de operação da haste sulcadora no sistema de plantio direto, detalhando os requisitos para uma operação de semeadura de qualidade.
 - b. Apresentação da teoria de mecânica dos solos, detalhando os modelos analíticos para representar a mobilização do solo, bem como suas limitações e fatores que influenciam nos seus resultados.
 - c. Apresentação da função do erro autorregressivo descrevendo a sua aplicação na estimativa de parâmetros físicos do solo.
 - d. Exposição de conceitos sobre a teoria dos conjuntos *fuzzy* e a lógica *fuzzy*
- 2) Uma metodologia abordando:
 - a. Os ensaios de campo realizados para obtenção de dados necessários ao estudo do comportamento do solo, bem como para a realização da prova de conceito.
 - b. O cálculo dos coeficientes da função do erro autorregressivo.

- c. Considerações referentes à formulação dos modelos em lógica *fuzzy*, bem como a definição dos universos de discurso dos seus parâmetros de entrada e saída.
 - d. A condução da prova de conceito, incluindo algumas considerações relativas aos dados utilizados, e a forma como seria avaliado o comportamento dos modelos.
- 3) Resultados e discussão, onde:
- a. São analisados os padrões de comportamento e a qualidade dos dados resultantes dos ensaios de campo.
 - b. É analisado o comportamento dos coeficientes da função do erro autorregressivo e as razões para a sua não utilização no modelo proposto nesta tese.
 - c. São apresentados modelos *fuzzy* propostos nesta tese, detalhando as funções de pertinência e as regras formuladas.
 - d. São analisados os resultados obtidos por meio da prova de conceito dos modelos propostos, utilizando dados experimentais.
- 4) Conclusões, onde são apresentadas as melhorias complementares na representação da mobilização do solo, resultantes do modelo proposto.

No anexo são apresentados os dados, provenientes de trabalhos da literatura, os quais são utilizados na prova de conceito de um dos modelos *fuzzy* propostos na tese, bem como alguns gráficos descrevendo algumas situações onde a mobilização do solo não é representada pelo modelo analítico abordado no desenvolvimento da tese.

Esta tese também conta com um glossário, descrevendo alguns termos específicos da área de solos e de modelagem computacional.

2 BASE CONCEITUAL

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica dos trabalhos que tratam da interação entre o solo e as ferramentas de ataque, utilizadas em implementos agrícolas. Também são abordados alguns trabalhos correlatos necessários para a condução da pesquisa.

A construção do conhecimento acerca dos trabalhos anteriores, envolvendo o estudo da interação solo-ferramenta, bem como sobre o emprego das lógicas computacionais na área de solos, foi obtida a partir de uma extensa busca à literatura. Para tanto, foram pesquisadas bases de dados, como os portais da CAPES, Scielo, Science Direct e Springer Verlag. Também foram consultados os portais dos periódicos mais relevantes da área, como a American Society of Agricultural and Biological Engineering – ASABE, Journal of Soil Tillage Research, Journal of Agricultural Engineering Research, Journal of Terramechanics, Biosystems Engineering e Computers and Electronics in Agriculture. Foram empregadas como palavras chave para as buscas, a associação de termos como: *soil, mobilization, area, deep, depth, profile, tillage, efforts, models, soil dynamics, soil spectral, modeling, mathematical models, fuzzy logic, neural networks, automation, precision agriculture, on the go, control, analysis*, bem como os correlatos em língua portuguesa.

Dentre os trabalhos encontrados, 12% empregam modelos analíticos para a descrição da interação solo-ferramenta, sendo que, destes, 1% chegaram a abordar a mobilização do solo, 7% descreveram abordagens numéricas tais como elementos finitos e fluído de Bighan, 8% empregaram modelos analíticos para a descrição de outros parâmetros do solo, 20% avaliaram o comportamento do solo e da interação solo-ferramenta e 53% empregaram lógicas computacionais. Dentre as lógicas computacionais, 35% estudam parâmetros de solo com o uso da modelagem *fuzzy*, 19% utilizam lógicas *fuzzy* em outros estudos na área agrícola, 10% descrevem modelos *Neuro-fuzzy*, 7% dos trabalhos descrevem a interação solo ferramenta com o uso das redes neurais, 18% usam redes neurais para descrever outros parâmetros de solo e 10% estudam o uso de outras lógicas computacionais, como algoritmos genéticos e árvores de decisão.

Nos próximos itens serão descritos: os aspectos da qualidade de semeadura relacionados à mecânica do solo; alguns conceitos básicos de mecânica dos solos; os modelos analíticos existentes para a descrição da interação solo-ferramenta; a função do erro autorregressivo *AREF* e conceitos básicos sobre a modelagem *fuzzy*.

2.1 Aspectos da qualidade de semeadura

Para se estudar a modelagem da mobilização do solo provocada por uma ferramenta de cultivo, primeiramente é necessário entender seu contexto de utilização. Neste item, serão abordados os aspectos da semeadura dentro do sistema de plantio direto.

O plantio direto consiste em um sistema de manejo do solo no qual a semeadura é realizada com o revolvimento mínimo do solo, preservando-se a cobertura vegetal de culturas anteriores sobre a sua superfície (ARAUJO; CASÃO JUNIOR; SIQUEIRA, 2001). Deste modo, preserva-se a sua estrutura, bem como promove-se a manutenção da umidade na superfície e nas camadas superficiais.

A manutenção da estrutura do solo confere suficiente espaço aéreo e porosidade, garantindo a disponibilidade de oxigênio e a capacidade adequada de retenção de água (MUZILLI, 2006). Conjuntamente com a cobertura vegetal, garante-se condição térmica apropriada, atividade organobiológica, ausência de acidez e disponibilidade equilibrada de nutrientes (CALEGARI, 2006; MUZILLI, 2006).

Outro aspecto importante no plantio direto é a qualidade da semeadura. Além da manutenção da cobertura vegetal sobre a superfície do solo, as sementes devem estar em íntimo contato com as partículas de solo para que absorvam água com facilidade, sem bolsões de ar e crostas formadas pelo selamento da superfície do solo (CASÃO JUNIOR; SIQUEIRA, 2006).

A maioria das culturas comerciais modernas envolve o emprego crescente de mecanização, tendo-se em vista a redução contínua da disponibilidade de mão de obra no campo. A cultura de grãos é um segmento da agricultura no qual se faz intenso uso de implementos, sendo amplamente adotado o sistema de plantio direto.

Os implementos empregados em sistema de plantio direto diferem dos empregados em plantio convencional pelo fato de incorporarem funções adicionais para trabalhar a cobertura vegetal existente. Uma semeadora de plantio direto

comumente usada no Brasil é composta pelas seguintes ferramentas (ARAUJO; CASÃO JUNIOR; SIQUEIRA, 2001):

1. Disco de corte: responsável por cortar a cobertura vegetal (palha) existente;
2. Discos duplos do adubo ou haste sulcadora: responsáveis por abrir o sulco para deposição do adubo (fertilizante), sendo que a haste também tem a função de romper a camada superficial do solo, quando esta apresenta compactação;
3. Discos duplos das sementes: responsáveis por abrir o sulco para a deposição das sementes;
4. Rodas controladoras de profundidade das sementes: responsáveis por controlar a profundidade do sulco para a deposição das sementes, podem ser projetadas para realizar também a função das rodas aterradoras ou discos aterradores, eliminando estes;
5. Discos ou rodas aterradoras: responsáveis por retornar o solo deslocado pela haste sulcadora e pelos discos duplos das sementes para o interior do sulco.
6. Roda compactadora: responsável por garantir que o solo fique completamente em contato com a semente, evitando vazios ao seu redor. Podem ser projetadas para realizar também a função das rodas aterradoras ou discos aterradores, eliminando estes.

A Figura 1 apresenta uma semeadora de plantio direto (semeadora direta) utilizada em ensaios do IAPAR (Instituto Agrônômico do Paraná) equipada com linhas de plantio direto tradicional, comumente utilizada no mercado brasileiro.

Figura 1 - Componentes de uma linha de plantio em semeadora direta tradicional

Ferramentas:

1. Disco de corte
2. Haste sulcadora estreita
3. Discos duplos das sementes
4. Rodas controladoras de profundidade das sementes
5. Rodas aterradoras e compactadoras em "V"

Fonte: IAPAR

A Figura 2 mostra um protótipo para ensaios do IAPAR, equipado com uma linha de semeadura dotada de discos aterradores e roda compactadora dedicados às suas funções.

Figura 2 - Linha de plantio em semeadora de plantio direto, equipadas com componentes específicos de aterramento do sulco e compactação do solo

Fonte: Soares (2009)

As semeadoras diretas devem promover o adequado contato solo - semente, bem como evitar a destruição da cobertura vegetal original (CASÃO JUNIOR; SIQUEIRA, 2006). Quando estas operações são bem executadas, obtém-se o chamado plantio "invisível", no qual a área cultivada apresenta o mesmo aspecto antes e depois do plantio. A Figura 3 exemplifica essa situação.

Figura 3 - Exemplo de "plantio direto invisível"

Fonte: Casão Junior e Siqueira (2006)

No entanto, as semeadoras normalmente não possuem rodas cobridoras ou discos cobridores. O fechamento do sulco é feito pelas rodas compactadoras ou, em alguns modelos, pelas rodas controladoras de profundidade. Esses componentes têm a sua geometria modificada para incorporar essa segunda função. Trata-se de uma medida comum, pois reduz o custo do equipamento, mas menos eficiente. O acúmulo de funções prejudica o desempenho dos componentes e compromete a qualidade da semeadura. Esses fatores, associados à regulação inadequada destes componentes, resultam em um acabamento de semeadura deficiente, como pode ser observado na Figura 4, na qual as rodas compactadoras e cobridoras deixam a superfície do sulco de sementes com solo exposto, sem cobertura vegetal.

Figura 4 - Qualidade de semeadura deficiente, normalmente obtido pelas semeadoras de plantio direto tradicionais

Fonte: Casão Junior e Siqueira (2006)

A inclinação das rodas compactadoras em “V”, ilustradas na Figura 4, é insuficiente para que se tenha um bom aterramento, notadamente quando a palha é lançada lateralmente ao sulco a mais de 10 cm, pelos componentes rompedores do solo, o que pode ocorrer quando utiliza-se haste sulcadora. O uso de componentes dedicados, como é o caso dos discos aterradores, melhora a qualidade da operação de aterramento (CASÃO JUNIOR; SIQUEIRA, 2006). Além da escolha da

ferramenta, a sua correta regulagem se faz necessária para garantir uma boa operação.

Após o aterramento há a necessidade de se compactar o solo sobre a semente, de modo que estas mantenham estreito contato com o solo fazendo com que absorvam água mais facilmente. Além da geometria da roda, que é muito importante para o bom desempenho, a carga aplicada sobre a roda compactadora também é essencial na manutenção do bom contato entre solo e semente, beneficiando a germinação e proporcionando um bom ambiente radicular. Em semeaduras sem pressão (0 N), ocorre menor taxa de transmissão de água e nutrientes por meio da interface solo - semente - raiz (CORTEZ et al., 2006). Por outro lado, se o solo for excessivamente compactado, a germinação será prejudicada devido à eliminação dos macroporos condutores de umidade e a formação de crostas sobre a semente impedindo a plântula de emergir (SOARES, 2009).

Portanto, para que a operação de semeadura ocorra de forma correta e apresente boa qualidade, os componentes das unidades de semeadura devem operar de forma adequada. Para que isto ocorra, estes componentes são normalmente regulados em campo de acordo com as condições médias da lavoura em termos de concentração de água, estado de compactação da camada superficial (densidade aparente) do solo, granulometria do solo e quantidade de matéria seca da cobertura vegetal. No entanto, estas características do solo e da cobertura vegetal apresentam uma marcante variabilidade espacial (JOHANN, 2004; LIMA, 2006), o que determina, para uma mesma área cultivada, diferentes condições operacionais principalmente dos componentes de compactação. Percebe-se, portanto, a necessidade de se aprofundar o estudo da interação entre estes componentes e o solo.

Existe outro conceito de semeadora o qual não faz a deposição da semente em um sulco contínuo, apesar de não ser utilizado comercialmente no Brasil, vale a pena ser mencionado. Murray; Tug e Basnet (2006), em sua revisão, descrevem este tipo alternativo de semeadoras, denominadas de *dibble/puch*. Nestes modelos, uma ou mais sementes, são depositadas dentro de covas, sulcos discretos, em lugar dos sulcos contínuos abertos pelas semeadoras tradicionais. Esses modelos são normalmente utilizados em horticultura, para o plantio em canteiros cobertos por filme plástico, mas também podem ser aplicados quando há resíduos culturais na

superfície do solo, o que inclui aplicações no sistema de plantio direto. Este tipo de semeadora apresenta limitações, como à regulação do espaçamento ao longo da linha, que em muitos casos é fixa no equipamento, mas já existem desenvolvimentos onde este espaçamento pode ser regulado dentro de uma determinada faixa, como o proposto Molin (2002) o qual é apresentado na Figura 5. No entanto, também há problemas na qualidade do contato solo - semente, o qual só ocorre de forma satisfatória em determinados tipos de solo e em faixas estreitas umidade, restringindo o seu uso. A regulação do espaçamento entre as sementes ainda é muito restrita se comparada a dos distribuidores mecânicos e pneumáticos tradicionais, mas existem potenciais benefícios relacionados à melhoria na manipulação de resíduos e à redução nos requerimentos de energia da semeadora. Não foram encontrados modelos destas semeadoras que efetuem a deposição das sementes conjuntamente com os fertilizantes, mas eles podem ser considerados como uma possibilidade futura, se este sistema distribuição e deposição das sementes for incorporado a uma semeadora direta, operando lateralmente à haste sulcadora.

Figura 5 - Semeadora do tipo *dibble/puch*.

Fonte: Molin (2002)

O estudo da interação solo - ferramenta, na forma da mobilização do solo provocada pela ferramenta de ataque, ou de cultivo, será conduzido analisando-se os modelos existentes em trabalhos da literatura. O resultado desta análise é apresentado no capítulo a seguir.

2.2 Conceitos básicos da interação solo - ferramenta

A teoria existente a cerca dos esforços atuantes em hastes sulcadoras, bem como da mobilização do solo promovida, foi desenvolvida a partir de dois trabalhos distintos, Godwin e Spoor (1977) e Mckyes e Ali (1977). Trabalhos anteriores, como Hettiaratchi; Witney e Reece (1966) e Hettiaratchi e Reece (1967), não abordaram a modelagem matemática tridimensional destes processos, e também não contemplavam as ferramentas estreitas, mas forneceram subsídios importantes para os trabalhos que os sucederam. No item 3.2.1 são tratados conceitos mais básicos de mecânica de solos, no item 3.2.2 é abordado o trabalho de Godwin e Spoor (1977), juntamente com outros relacionados a ele. No item 3.2.3 é descrito o trabalho de Mckyes e Ali (1977), e discutida uma limitação deste no item 3.2.4. O item 3.2.5 trata da resistência do solo ao cisalhamento e a sua relação com a umidade.

2.2.1 Conceitos de mecânica dos solos.

A tensão de cisalhamento é a resistência interna do solo à ação de forças externas e é função da coesão entre as partículas do solo e da fricção intergranular (GRAF; FREI; BOLL, 2009). A força de cisalhamento do solo é geralmente definida pela equação de Mohr - Coulomb que é composta por uma componente coesiva, bem como por uma de atrito (MCKYES, 1985).

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

A componente coesiva (coesão do solo) representa a resistência das partículas do solo durante o deslocamento, devido à atração intermolecular e a tensão superficial da água retida e depende do tamanho das partículas de argila, tipo de minerais de argila, ligação de valência entre partículas, teor de umidade e a proporção de argila. O atrito (ângulo de atrito interno do solo) depende da densidade do solo, textura e umidade, bem como da distribuição de tamanho de partículas e forma (JAIN; JAIN; BHADARIA, 2010). É importante destacar que a formulação descrita pela eq.1 considera o solo como sendo um corpo rígido - plástico, seguindo as leis de atrito e coesão de Coulomb. Além disso, para que o equacionamento seja válido as partículas do solo também devem, simultaneamente, seguir as descrições

de equilíbrio de força de Mohr. Isto é atendido se os planos de tensão não estiverem submetidos a acelerações durante o processo de falha do solo, o que somente ocorre em velocidades constantes (MCKYES, 1985).

Outra importante propriedade mecânica do solo, que influencia a falha do solo, é a adesão, que é a força resultante da atração entre as partículas de solo e a superfície da ferramenta (metal) e, deste modo, é caracterizada por duas componentes, a adesão do solo e o ângulo de atrito solo - ferramenta (PLASSE; RAGHAVAN; MCKYES, 1985). A eq.2 descreve esta relação. Os mesmos autores afirmam que a coesão e a adesão do solo são os principais contribuintes para a força de arraste da haste e são muito dependentes do estado de umidade do solo.

$$s = c_a + \sigma \tan \delta \quad (2)$$

O ângulo de atrito solo - ferramenta é geralmente inferior ao ângulo de atrito interno do solo, assim como a adesão em relação à coesão. A experiência prática aponta proporções para δ na faixa de 1/2 a 7/8 de φ , no caso das superfícies metálicas, e próximas a 7/8, no caso do concreto (MCKYES, 1985).

Outro efeito importante nas forças do solo refere-se à ação da velocidade, a qual pode elevar consideravelmente a força de arraste requerida pela haste. Essa elevação pode ocorrer devido a dois mecanismos, a necessidade de continuamente acelerar novas porções de solo devido ao movimento da ferramenta, e a alteração na resistência do solo ao cisalhamento devido às altas taxas de cisalhamento. Segundo os mesmos autores, a experiência mostra que em solos puramente friccionais a influência da velocidade não é muito grande. Nestes solos, o efeito mais importante com o aumento da velocidade são as forças inerciais envolvidas na aceleração da massa de solo. Por outro lado, em solos argilosos, podem ser observadas marcantes variações na resistência ao cisalhamento com o aumento da velocidade, sendo que esta variação supera quase que completamente o efeito inercial (MCKYES, 1985).

Em relação ao comportamento dinâmico instantâneo do solo, Jayasuriya e Salokhe (2001) identificaram quatro mecanismos de falha que descrevem os principais tipos de solo e são definidos pela mudança da sua faixa de umidade. Eles concluíram que os limites de consistência (limites de Atterberg) mostram divisões claras entre os quatro diferentes mecanismos de falha em solos ficcional - coesivos e coesivos. Quando o teor de umidade se eleva da condição seca para uma próxima

ao limite plástico, o mecanismo de falha por fratura predomina, apresentando uma variação cíclica nas curvas força - tempo para estes tipos de solo. Os autores concluem que as forças de arraste da ferramenta e o mecanismo de falha do solo estão relacionados com o teor de umidade nos solos friccionais - coesivos a coesivos.

No que se refere ao estudo das forças envolvidas no processo de cisalhamento do solo durante uma operação de cultivo, um dos primeiros trabalhos foi escrito por Hettiaratchi; Witney e Reece (1966), e envolvia a modelagem analítica para problemas de pressão de terra em mecânica dos solos. Neste trabalho é apresentada uma equação aditiva (eq.3) conhecida como equação universal do movimento de terra, obtida a partir de análise dimensional, com a proposta de proporcionar uma solução para boa parte dos problemas de pressão passiva bidimensional.

$$P = \gamma g d^2 N_\gamma + c d N_c + c_a d N_a + q c N_q \quad (3)$$

Na eq.3 os quatro termos representam as componentes gravitacional, coesiva, adesiva e de sobrecarga (carga normal de compactação aplicada sobre a superfície). Os autores explicam que a equação é rigorosamente válida quando os adimensionais N_γ , N_c , N_a e N_q são independentes dos parâmetros principais γ , c , c_a e q , o que não acontece para qualquer geometria de interface, e em geral, o seu uso pode carregar certo grau de erro.

Outro ponto importante é que a solução bidimensional só é válida para ferramentas muito largas na qual a mobilização lateral do solo é muito pequena se comparada com a mobilização à frente, podendo ser desprezada. Hettiaratchi e Reece (1967) explicam que a maioria dos problemas práticos representa situações tridimensionais. Este é o caso das ferramentas estreitas, como as hastes sulcadoras, no qual a mobilização lateral representa a maior parte da mobilização do solo provocada pela ferramenta (GODWIN; SPOOR, 1977; MCKYES; ALI, 1977).

O estudo da solução tridimensional realizado por Hettiaratchi e Reece (1967) faz uma abordagem semiempírica tomando por base a equação bidimensional e acrescentando o efeito das laterais utilizando geometrias propostas a partir de estudos em caixa de solo com paredes de vidro e com areia, para descrever a mobilização lateral do solo.

Os estudos de Godwin e Spoor (1977) seguem a mesma base semiempírica e também realizam experimentos em caixas de solo com paredes de vidro acrescentando o estudo da mobilização da areia a partir da visão sob o plano horizontal e assim propuseram uma nova geometria tridimensional para a mobilização superficial de solo promovida pela ferramenta, a qual será vista a seguir.

2.2.2 Modelo de Godwin para descrição dos esforços na haste.

Godwin e Spoor (1977), através de observações experimentais, assumindo que o solo segue o critério de falha de Mohr - Coulomb, apresentam um modelo que descreve a forma geométrica da falha. Esta abordagem apresenta um modelo tridimensional que descreve o comportamento do solo, quando mobilizado por uma haste estreita, de forma bem mais apropriada que os modelos bidimensionais. Em Godwin; Spoor e Soomro (1984), o modelo foi refinado, passando a considerar o raio da crescente de falha do solo como variável, eliminando a aproximação feita no modelo inicial que o considerava constante. Godwin e O'Dogherty (2007) descreve a integração de uma série de modelos para prever as forças que atuam sobre uma gama de ferramentas de preparo do solo. Esse conjunto de modelos tornou-se uma das teorias base empregadas no cálculo das forças exercidas pelas ferramentas de ataque ao solo.

Nesses modelos, as equações foram desenvolvidas para ferramentas retangulares simples passando através do solo. As ferramentas são divididas em três categorias, segundo a sua relação entre profundidade de trabalho e largura ("depth"/"width") d/w . A Figura 6 ilustra as três classes de ferramentas, bem como os volumes de solo mobilizado considerados para a elaboração dos modelos. Na parte inferior da figura também são ilustradas as seções transversais dos sulcos reais escavados por cada uma das ferramentas.

Figura 6 - Efeito da relação entre profundidade de trabalho e largura da ferramenta na ruptura mecânica do solo

Fonte: Godwin e O'Dogherty (2007)

A modelagem toma como ponto de partida a teoria da força passiva, descrevendo a composição das forças com base na geometria proposta para a frente de solo cisalhada.

Nesta modelagem é necessário o conhecimento da profundidade crítica que define a fronteira entre dois modelos, um para a parte superior e outro para a parte inferior da falha.

A nova geometria descreve a mobilização do solo acima desta profundidade crítica, enquanto que abaixo mantem-se a geometria apresentada originalmente por Hettiaratchi e Reece (1967).

Estes modelos possuem uma descrição matemática mais completa que a dos trabalhos de Mckyes e Ali (1977) e Liu et al. (2008), a qual será vista no item 3.2.3, mas que ao mesmo tempo requer o conhecimento de 13 parâmetros de solo, 2 parâmetros de interação e 3 parâmetros da ferramenta. Além disso, estes trabalhos focam nos esforços atuantes na ferramenta de ataque ao solo, não tratando matematicamente a mobilização do solo promovida pela ferramenta.

No que concerne à utilização do modelo, a obtenção de parâmetros como a coesão do solo, razão da distância de ruptura (dimensão da crescente de falha), coesão entre solo e ferramenta, bem como os seus adimensionais, requer que sejam conduzidos experimentos específicos. Tal fato torna o uso destes modelos bastante limitado, visto a dificuldade em se determinar, de forma precisa, toda a

gama de parâmetros de entrada requerida. Soma-se a isso, o fato de parte destes parâmetros se alterar ao longo do tempo e de formas diferentes.

No mesmo período foi conduzida uma pesquisa independente, apresentada por Mckyes e Ali (1977), partindo de uma descrição geométrica mais simples, a qual será vista a seguir.

2.2.3 Modelo de Mckyes para descrição dos esforços na haste

Mckyes e Ali (1977) apresentam um modelo de corte de solo alternativo, sendo desenvolvido de forma inteiramente independente. Este modelo também é utilizado por Mckyes e Desir (1984), Mckyes (1985) e Liu et al. (2008). Trata-se de um modelo desenvolvido para o uso em ferramentas estreitas que aborda um procedimento de cálculo que não requer o conhecimento prévio da dimensão da crescente de falha, a qual varia em solos com diferentes propriedades de densidade, coesão e atrito interno.

Segundo os mesmos autores, o que é necessário para uma aplicação geral é um meio para que a dimensão da crescente de falha possa ser predita em função das propriedades do solo, bem como das forças atuantes no cisalhamento. A descrição geométrica do modelo proposto é apresentada pela Figura 7.

Figura 7 - Descrição geométrica do modelo de falha de solo proposto para ferramentas estreitas

Fonte: Liu et al. (2008)

O modelo de Mckyes e Ali (1977) simplifica a geometria da superfície da frente de falha à frente da ferramenta, que em Hettiaratchi e Reece (1967) é representada

por uma espiral logarítmica, para uma reta. Esta simplificação, proposta por Terzaghi (1941) apud Mckyes (1985) para a falha bidimensional, é necessária quando se pensa em generalizar o uso do modelo, uma vez que o uso da espiral logarítmica requer que esta seja determinada experimentalmente, sendo os resultados restritos às características e condições específicas do solo em cada situação. Segundo os autores a simplificação é válida para situações nas quais a diferença entre a reta e a situação real é muito pequena, sendo válida quando o ângulo de ataque da ferramenta não excede $90 - \varphi$, sendo φ o ângulo de atrito interno do solo. O resultado deste trabalho é um modelo substancialmente mais simples que o apresentado por Godwin e Spoor (1977) e Godwin e O'Dogherty (2007).

O estudo de Mckyes e Ali (1977) também obteve o cálculo da área mobilizada (A) a partir da seção transversal do sulco na altura da ferramenta. Para tanto ele considera um trapézio com base menor igual à largura da ferramenta (w), base maior igual à largura da ferramenta somada à largura das laterais da superfície da frente de falha, projetadas na altura da ferramenta (S), e altura igual à profundidade de trabalho da ferramenta (d). A Figura 8 apresenta, à esquerda, uma representação do sulco resultante após a passagem da ferramenta e remoção do solo mobilizado por este. À direita há uma foto mostrando a ferramenta em operação, onde se observa a elevação superficial do solo. Também está representada a área de solo mobilizado, sendo que esta corresponde a uma seção transversal do sulco produzido pelo tráfego da ferramenta.

Figura 8 - Representação geométrica da área de solo mobilizado.

OBS: A ferramenta se desloca positivamente na direção de x. O plano xy corresponde à superfície do terreno. A área de solo mobilizado corresponde a toda a superfície transparente em verde.

Fonte: Autor

Deste modo têm-se:

$$A = \frac{(w + (S + w + S))d}{2} = (w + S)d \quad (4)$$

A largura S é obtida a partir da extensão da frente de falha na superfície do solo à frente da ferramenta (r), sendo que esta é dependente do ângulo de ataque da ferramenta (α), do ângulo da linha entre a ponta da ferramenta e a extremidade frontal da frente de falha em relação à superfície (β), e da profundidade de operação da ferramenta (d) (MCKYES; ALI, 1977).

Deste modo:

$$S = r \sin \rho' = d(\cot \alpha + \cot \beta) \sin \rho' \quad (5)$$

Sendo:

$$\cos \rho' = \frac{d}{r} \cot \alpha \quad (6)$$

Mckyes (1985) explica que as propriedades de atrito do solo sozinhas determinam as zonas de falha no cisalhamento, logo a linha de deslizamento mais provável do solo não depende da magnitude da coesão do solo nem da pressão de sobretaxa (carregamento aplicado na a superfície do solo, ex. pneu). Deste modo, ângulo β é obtido a partir da minimização do adimensional N_γ com respeito à β , de modo a determinar a menor resistência para o solo falhar.

$$N_\gamma = \frac{\frac{1}{2} [\cot \alpha + \cot \beta] \left[1 + \frac{2d}{3w} (\cot \alpha + \cot \beta) \left(1 - \left(\frac{\cot \alpha}{\cot \alpha + \cot \beta} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right]}{\cos(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta) \cot(\beta + \varphi)} \quad (7)$$

Nota-se que a profundidade de operação da ferramenta exerce grande influência na mobilização do solo, e, portanto na área de solo mobilizada. Nos modelos de McKyes a magnitude da profundidade (d) participa diretamente no termo da área mobilizada (A), bem como no adimensional cuja minimização determina o ângulo β e também na largura S. Dados experimentais de ensaios conduzidos no IAPAR, bem como de outros autores como Cepik, Trein e Levien (2005) e Rosa (2007), confirmam ser a profundidade da ferramenta o parâmetro de maior relevância na mobilização do solo.

Zhang e Kushwaha (1995) questionam a consideração de que as propriedades de atrito do solo sozinhas determinam as zonas de falha no cisalhamento, e explicam que a adesão e coesão também influenciam. Eles propuseram um modelo modificado que obtém ângulo β a partir da minimização de toda a equação universal do movimento de terra (eq. 3). Essa abordagem incluiu como entradas os parâmetros de adesão do solo e coesão solo - ferramenta, elevando substancialmente a complexidade do processo de determinação do ângulo β . Eles verificaram que o modelo modificado não demonstra melhora significativa para a predição dos esforços na haste em relação ao modelo de Mckyes. Em relação ao ângulo β , às variações relevantes ocorrem quando a coesão é próxima à zero, sendo que esta situação não é esperada em áreas sob sistema de plantio direto, mesmo em solos mais arenosos, dada a sua estruturação, presença de matéria orgânica e o fato de não serem trabalhados na sua zona de saturação. Zhang e Kushwaha (1995) também apontam para uma deficiência do método de Mckyes que superestima N_f nas situações nas quais o ângulo de ataque da ferramenta é mais elevado. Essa deficiência já havia sido observada por Mckyes e Ali (1977) e geralmente ocorre em ângulos superiores a 60° , o que está acima dos ângulos geralmente empregados nas semeadoras diretas utilizadas no Brasil (CASÃO JUNIOR; SIQUEIRA, 2006).

No que se refere à aplicação prática do modelo, a área de solo mobilizada observada nos experimentos não corresponde exatamente à calculada pelos modelos. Isto pode ser observado nos experimentos de Mckyes e Desir (1984), nos experimentos conduzidos no campo experimental do IAPAR e no trabalho de Godwin e O'Dogherty (2007), cujo perfil mobilizado é apresentado na Figura 6. Os gráficos da Figura 9 e

Figura 10 ilustram claramente estas diferenças. A Figura 9 mostra o perfil trapezoidal considerado pelo modelo preditivo em Mckyes e Desir (1984) e o perfil obtido experimentalmente, destacando a área predita a maior. A

Figura 10 compara os resultados médios obtidos a partir de experimentos conduzidos no IAPAR e a simplificação do modelo analítico, na qual também se observa a área predita a maior. Na

Figura 10 são descritos: o perfil do solo original, ou seja, antes da passagem da ferramenta; o perfil elevado, que considera a solo revolvido pela ferramenta; o perfil

do sulco, que corresponde à área do solo mobilizado pela ferramenta; e a consideração feita por Mckyes e Ali (1977) para o perfil do sulco.

Figura 9 - Representação das diferenças entre o perfil considerado para o modelo analítico e o perfil real observado em campo

Fonte: Mckyes e Desir (1984)

Figura 10 - Representação dos resultados para os perfis de solo nos experimentos do IAPAR

OBS: O perfil original, o perfil elevado logo após a passagem da ferramenta e o sulco com a área de solo mobilizada (a mobilização) provocada pela ferramenta, correspondem a valores médios experimentais. As escalas dos eixos estão em milímetros.

Fonte: Autor

No trabalho de Mckyes e Desir (1984) o autor concluiu que esta diferença ocorre devido à parte do solo, que chegou a ser cisalhada, não chegar a ser mobilizada uma vez que o cisalhamento sofrido não chegou a reorganizar a sua estrutura. Logo, o perfil da frente de falha, que descreve o solo cisalhado, não corresponde à movimentação de solo observada em campo, tendo-se em vista que o solo é normalmente escavado manualmente para a determinação do perfil.

Outro aspecto importante refere-se aos intervalos em que o modelo pode ser utilizado. O universo de áreas mobilizadas que o modelo de McKyes pode descrever apresenta limitações, e isto será visto a seguir.

2.2.4 Uma limitação no modelo de McKyes

Foram observadas nos trabalhos de McKyes e Desir (1984) e Zhang e Kushwaha (1995) situações em que a área de solo mobilizada não pode ser calculada a partir do modelo de McKyes. Os autores explicaram que nestas situações a minimização de N_γ ocorre com valores de $\beta = 90^\circ$, o que não é razoável, tendo-se em vista que não é fisicamente aceitável a superfície da frente de falha ocorrer perpendicular à superfície do solo. A Figura 11 exemplifica uma situação na qual a curva de N_γ apresenta ponto crítico em $\beta = 57^\circ$, sendo este um valor factível. A

Figura 12, por sua vez, exemplifica a situação na qual a curva de N_γ apresenta uma forma atípica para $\beta > 60^\circ$, e ponto crítico em $\beta = 90^\circ$, sendo este um valor não factível.

Figura 11 - Comportamento adequado do adimensional N_γ em função de diferentes valores de β

OBS. Neste exemplo: $w = 63\text{mm}$, $\alpha = 20^\circ$, $\varphi = 29,8^\circ$, $\delta = 25,2^\circ$ e $d = 150\text{mm}$

Fonte: Calculado a partir de dados de McKyes e Desir (1984) utilizando as equações de McKyes (1985)

Figura 12 - Comportamento do adimensional N_γ em função de diferentes valores de β , no qual a minimização obtém um β não factível

OBS. Neste exemplo: $w = 63\text{mm}$, $\alpha = 35^\circ$, $\varphi = 29,8^\circ$, $\delta = 25,2^\circ$ e $d = 150\text{mm}$.

Fonte: Calculado a partir de dados de McKyes e Desir (1984) utilizando as equações de McKyes (1985)

Como resultado disto, tem-se um conjunto de combinações dos parâmetros de entrada do modelo do McKyes em que não se consegue predizer a área de solo mobilizada.

Esta situação também ocorre com o modelo modificado de Zhang e Kushwaha (1995), com a diferença de que a limitação é um pouco menor. Apesar de este trabalho propor uma forma de determinação do ângulo β diferente, a limitação permanece, visto que ele utiliza os mesmos adimensionais.

Essa limitação decorre da formulação do adimensional N_γ . A formulação de N_γ , bem como dos demais adimensionais presentes no modelo de McKyes e Ali (1977) é obtida a partir do equilíbrio entre as forças atuantes dentro da região que define a frente de falha. Na Figura 13 estão representadas todas as forças envolvidas na formulação dos adimensionais. A formulação de N_γ envolve os vetores de força P e R , os ângulos de atrito φ e δ , o ângulo de ataque da fermenta α , a inclinação da superfície da frente de falha β , e a extensão da frente de falha em relação à superfície do solo r . Os demais elementos presentes na Figura 13 estão relacionados a outros adimensionais do modelo analítico e a equação universal do movimento de terra, não participando na representação da mobilização do solo.

Figura 13 - Representação das forças atuantes na frente de falha na condição em que o β converge para um valor normal.

Fonte: Mckyes (1985).

O problema acontece quando os valores de α , ϕ , δ são mais baixos. Nesta situação o valor de β torna-se mais alto e o vetor de reação R se aproxima da posição horizontal e então a ultrapassa tornando a sua componente vertical negativa. Além disso, valores mais baixos do ângulo de ataque da ferramenta α , também podem resultar em componentes verticais do vetor de reação da frente de falha sobre a ferramenta P mais elevados. A Figura 14 ilustra essa situação, nela se pode observar a inversão do vetor de reação R , bem como o aumento do β .

Figura 14 - Representação das forças atuantes na frente de falha na condição em que o β converge para 90° .

Fonte: Adaptado de Mckyes (1985).

A inclinação de R em relação ao plano horizontal é definida por $90 - (\beta + \phi)$ e faz parte da equação de N_γ na forma da razão entre as suas componentes horizontal e vertical e é representada pela cotangente de $(\beta + \phi)$.

Os ângulos de ataque mais elevados fazem com que a massa de solo no interior da frente de falha seja empurrada na direção do plano de falha. Na medida

em que este ângulo de ataque diminui esse efeito também se reduz. O modelo de Mckyes e Ali (1977), bem como o modelo de Godwin e Spoor (1977) consideram ferramentas totalmente retas e com a extremidade da ponteira tendo espessura zero. Para estas ferramentas, em uma condição hipotética de ângulo de ataque zero, seria de se esperar do equacionamento que o solo não fosse mais empurrado pela ferramenta, podendo realmente resultar em valores de $\beta = 90^\circ$, ou talvez até maiores, tornando plausíveis as reações descritas pela Figura 14. No entanto, as ferramentas reais diferem das idealizadas na formulação dos modelos. A ponteira da ferramenta, que é o principal elemento da frente de falha, não possui espessura desprezível. Logo, mesmo em ângulos de ataque mais suaves, a massa de solo se mantém reagindo da forma representada pela Figura 13, ou seja, sendo empurrada para frente pela ferramenta.

Devido a isso, apesar minimização de N_y ainda convergir para valores de β coerentes em situações com $(\beta + \phi)$ próximos ou um pouco superiores a 100° , após esse ponto a inversão na componente vertical de R deixa de ser fisicamente coerente, tendo-se em vista que o β ainda possui valores inferiores a 90° , além do efeito gravitacional da massa de solo presente no interior da frente de falha.

As Figuras 15 e 16 ilustram essa limitação. Nestes exemplos, a superfície de respostas para combinações de α e ϕ apresenta uma região na qual não se pode calcular o valor da área de solo mobilizada.

Figura 15 - Superfície de resposta do modelo do McKyes para: $w=2,4\text{cm}$, $\delta=0,68\phi$ e $d=8\text{cm}$

Fonte: Calculado utilizando as equações de McKyes (1985)

Figura 16 - Superfície de resposta do modelo do McKyes para: $w=2,4\text{cm}$, $\delta=0,68\phi$ e $d=12\text{cm}$

Fonte: Calculado utilizando as equações de McKyes (1985)

Observando-se as curvas da área mobilizada em função de α , para diferentes valores de ϕ e δ (Figura 17 a Figura 20), nota-se que estas apresentam um comportamento muito próximo do linear para valores de α que resultem em $\beta + \phi$ iguais ou inferiores a 90° , podendo ser um pouco superiores em alguns casos, perdendo rapidamente a sua linearidade após esse ponto.

Figura 17 - Resultado do modelo de McKyes para $w=2,7\text{cm}$, $\phi=24,5^\circ$, $\delta=21,43^\circ$ e $d=12,5\text{cm}$

Fonte: Calculado utilizando as equações de McKyes (1985)

Figura 18 - Resultado do modelo de McKyes para $w=2,7\text{cm}$, $\varphi=30^\circ$, $\delta=26,25^\circ$ e $d=12,5\text{cm}$

Fonte: Calculado utilizando as equações de McKyes (1985)

Figura 19 - Resultado do modelo de McKyes para $w=2\text{cm}$, $\varphi=24.5^\circ$, $\delta=17^\circ$ e $d=10\text{cm}$

Fonte: Calculado utilizando as equações de McKyes (1985)

Figura 20 - Resultado do modelo de McKyes para a ponteira do IAPAR em solo argiloso úmido

OBS. Parâmetros utilizados: $w=2,4\text{cm}$, $\phi=24,5^{\circ}$, $\delta=17^{\circ}$ e $d=10\text{cm}$.

Fonte: Calculado utilizando as equações de McKyes (1985)

Não há estudos específicos descrevendo o comportamento da frente de falha do solo em situações similares às da limitação do modelo de McKyes, ou seja, ferramentas estreitas com α , ϕ , δ menores. Hettiaratchi; Witney e Reece (1966) limitam o uso do modelo da espiral logarítmica em ângulos de ataque menores, acreditando que a forma da superfície de falha poderia se modificar nesta região. Por outro lado, o trabalho de Godwin (2007) faz uma breve descrição dos resultados obtidos por Payne e Tanner (1959), na qual se pode observar a frente de falha descrita para uma ferramenta estreita com um ângulo de ataque de 20° , sendo que esta apresenta uma geometria compatível com a utilizada por McKyes e Ali (1977). Deste modo, percebe-se uma indefinição sobre o que acontece na região em que ocorre a limitação do modelo de McKyes.

Diante desta indefinição, uma abordagem interessante seria deduzir qual seria o comportamento mais provável da mobilização do solo nesta região, o que pode ser feito observando resultados experimentais.

O trabalho de McKyes e Desir (1984) descreve um ensaio realizado em dois tipos diferentes de solo e em duas condições de umidade, e em seus dados se observam pontos nos quais ocorre a limitação do seu modelo. Além desse trabalho, os experimentos conduzidos no IAPAR, integrantes desta tese, também representam situações similares. Nestes ensaios, a partir das áreas mobilizadas medidas nos pontos nos quais se observa a limitação do modelo de McKyes, é

possível se definir a região das possíveis áreas que deveriam ser preditas pelo modelo. Essa região situa-se abaixo da projeção do intervalo linear descrito por $\beta + \phi > 90^\circ$, o que significa que a relação entre a área mobilizada e o ângulo de ataque da ferramenta deixa de ser linear neste ponto. A Figura 21 e a Figura 22 apresentam duas situações observadas no experimento de McKyes e Desir (1984), enquanto que a Figura 23 e a Figura 24 apresentam algumas situações observadas nos experimentos conduzidos no IAPAR. As demais situações observadas em McKyes e Desir (1984), encontram-se no anexo desta tese. Nestas figuras, se pode observar as linhas descrevendo o intervalo representado pelo modelo analítico, além dos pontos, que descrevem os valores de área observados nos experimentos.

Figura 21 - Situação experimental que ocorre e limitação do modelo de McKyes, bem como a área de solo mobilizado observada experimentalmente nesta situação

OBS. Parâmetros utilizados: $\phi=33,1^\circ$, $\delta=22,1^\circ$, $w=6,3\text{cm}$, $d=15\text{cm}$.

Fonte: Adaptado de McKyes e Desir (1984)

Figura 22 - Situação experimental em que ocorre e limitação do modelo de McKyes, bem como a área de solo mobilizado observada experimentalmente nesta situação

OBS. Parâmetros utilizados: $\phi = 36^{\circ}$, $\delta = 23,3^{\circ}$, $w = 0,063$, $d = 0,15$

Fonte: Adaptado de McKyes e Desir (1984)

Figura 23 - Situação experimental em que ocorre e limitação do modelo de McKyes, bem como as áreas de solo mobilizado observadas experimentalmente nesta situação. Ensaio de Londrina 2012, solo argiloso úmido

OBS. Parâmetros utilizados: $\phi = 30^{\circ}$, $\delta = 20,7^{\circ}$, $w = 2,4\text{cm}$, $d = 10\text{cm}$.

Fonte: Autor

Figura 24 - Situação experimental em que ocorre e limitação do modelo de McKyes, bem como as áreas de solo mobilizado observadas experimentalmente nesta situação. Ensaio de Umuarama 2012, solo arenoso úmido

OBS. Parâmetros utilizados: $\phi=34^{\circ}$, $\delta=23,4^{\circ}$, $d=10,4\text{cm}$.

Fonte: Autor

Deste modo, é possível prever a região das possíveis áreas de solo mobilizado para as situações descritas pelo modelo analítico. Essa região situa-se abaixo da projeção do intervalo linear descrito por $\beta + \phi > 90^{\circ}$ e bem acima da área descrita quando $\beta = 90^{\circ}$, em outras palavras, acima da seção transversal da ferramenta sem mobilização lateral ($A = w.d$).

Tem-se portanto situações nas quais não há um método analítico para se prever a área de solo mobilizada por uma ferramenta, sendo que não há um conhecimento apurado do comportamento da mobilização do solo nestas situações. Mas ao mesmo tempo, há um conhecimento subjetivo de como a área de solo mobilizado deve estar se comportando, e sabe-se que este comportamento é não linear. Tem-se então um cenário perfeito para o emprego das lógicas computacionais, em especial a modelagem *fuzzy*, cuja grande qualidade é a capacidade de representar situações nas quais há a presença ambiguidades e incertezas, aproveitando o conhecimento especialista que se tem do fenômeno.

Para predição da área de solo mobilizado, tanto pelo modelos analíticos, quanto por lógicas computacionais, é necessário que se conheça alguns parâmetros que influenciam resistência do solo ao cisalhamento, pois estes podem ser entradas nestes modelos. O próximo capítulo trata destes parâmetros, descrevendo as suas causas e fontes de variação.

2.2.5 Fatores que definem a resistência do solo ao cisalhamento.

Os parâmetros de coesão e ângulo de atrito interno do solo são determinados pelas propriedades e atributos do solo, tais como textura, estrutura, teor de matéria orgânica, densidade, mineralogia e teor de água (MCKYES, 1985; SOANE, 1990; BRAIDA et al., 2007a; SILVA; CARVALHO, 2007; VASCONCELOS et al., 2010). Devido a isso, esperam-se alterações nos parâmetros de resistência ao cisalhamento, mesmo em um mesmo solo, uma vez que o manejo deste solo também determina o seu comportamento (BRAIDA et al., 2007a).

No sistema de plantio direto o revolvimento do solo é muito baixo, devido a isso, após alguns anos este passa a apresentar agregados mais densos, resistentes e próximos entre si, podendo também elevar a sua densidade (CHANEY; HODGSON; BRAIM, 1985). Além disso, ocorre um aumento no teor de matéria orgânica, principalmente na camada superficial. Essa matéria orgânica altera o comportamento do solo, uma vez que as suas partículas interagem com as partículas de argila alterando o comportamento da coesão. Essas alterações geralmente elevam a resistência do solo ao cisalhamento (BRAIDA et al., 2007a).

O efeito da matéria orgânica sobre os parâmetros de cisalhamento do solo ocorre de diferentes formas, e não se restringindo apenas a coesão. O aumento da coesão é resultante do aumento das forças das ligações moleculares e valência já existentes juntamente com o estabelecimento de novas ligações entre as partículas de solo, que também podem ser resultantes de enlaces de partículas produzidos por filamentos orgânicos como hifas de fungos e raízes (SOANE, 1990). Ao mesmo tempo, a matéria orgânica pode reduzir a densidade do solo, diminuindo o número de partículas por volume e consequentemente o número de ligações, com consequente redução do ângulo de atrito interno e redução da resistência do solo ao cisalhamento (BRAIDA et al., 2007a). Por outro lado, quando em baixos teores de umidade gravimétrica, as partículas de matéria orgânica tendem a reter mais fortemente a água, diminuindo a água existente para a lubrificação das partículas de solo, com consequente aumento do atrito entre estas (ZHANG, 1994). Deste modo, percebe-se que a presença de matéria orgânica pode elevar ou reduzir a resistência do solo, o que irá depender do balanço entre os seus efeitos sobre a densidade, os parâmetros de cisalhamento e a distribuição de água.

Há um número muito pequeno de trabalhos que quantificam os parâmetros de resistência do solo ao cisalhamento, em sistema de plantio direto, incluindo a variação do seu ângulo de atrito interno em função da umidade. Dentre eles, há trabalho de Braidia et al. (2007a), Braidia et al. (2007b), Carvalho et al. (2010), Rocha et al. (2002), Silva e Carvalho (2007) e Silva et al. (2004), sendo que os seus resultados encontram-se resumidos na Tabela 26, presente no anexo.

No que se refere à umidade do solo, parâmetro que influencia a resistência do solo ao cisalhamento, esta é determinada pela ação de diferentes fenômenos. Em um solo agricultável a entrada de água pode ocorrer de duas formas, a primeira é devido à precipitação natural, a segunda ocorre de forma artificial promovida pela irrigação. A movimentação da água no interior do solo pode ocorrer de algumas formas. A primeira ocorre devido à evaporação da água para atmosfera, sendo esta forma bastante atenuada no sistema de plantio direto (SCALÉA, 2007). A segunda forma ocorre por evapotranspiração, que é resultante da atividade fisiológica das plantas, sendo esta atividade vital para as mesmas. A terceira forma ocorre devido à infiltração da água presente no solo desde a superfície até camadas mais profundas. Estes mecanismos definem a movimentação da água no solo, e são dependentes da sua textura, macro e micro porosidade. Estas características definem a capacidade de armazenamento de água pelo solo, bem como a sua tensão matricial, que determina a facilidade ou dificuldade que a água encontra para ser infiltrada, evaporada e evapotranspirada (REICHARDT; TIMM, 2012). Além disso, estes mecanismos, bem como a sua capacidade de retenção de água, são fortemente influenciados pela densidade do solo e pela sua estrutura.

As operações agrícolas podem promover intensas variações na estrutura e densidade do solo. No sistema de plantio direto a estruturação solo, descrita por Braidia et al. (2007b), cria canais de aeração bem como estruturas de solo com maior resistência mecânica se comparadas ao sistema de plantio convencional. Por outro lado, o tráfego de máquinas sobre a superfície do solo também afeta a sua estrutura, promovendo a compactação das suas camadas mais superficiais. Neste sentido, o sistema de plantio direto, que preserva a estrutura do solo, reduz a compactação das suas camadas mais profundas, mas ao mesmo tempo preserva a compactação das camadas mais superficiais. E é justamente nestas camadas superficiais que a operação de plantio ocorre.

A compactação do solo eleva a sua densidade, bem como reduz a sua macroporosidade (TORMENA et al., 2004). Este efeito é mais sensível em solos argilosos, nos quais predominam partículas de menor dimensão, e têm como consequência uma redução na sua capacidade de retenção de água, bem como a elevação da sua tensão matricial, reduzindo a taxa de entrada e saída de água, ou seja, a sua movimentação dentro do solo. Uma vez que o tráfego de máquinas é uma atividade antrópica, não natural, o efeito de compactação apresenta notada variabilidade espacial. Devido à relação existente entre a umidade do solo e a compactação, a umidade compartilha da mesma variabilidade.

Estas várias fontes de variabilidade do solo permitem confirmar o observado por Heuvelink e Webster (2001), que a variabilidade do solo é complexa, de tal forma que nenhuma descrição consegue ser completa. Portanto, a sua representação sempre terá a presença de incertezas. Os mesmos autores ainda comentam que os modelos para a representação destas variações também devem tratar de um elemento aleatório que representa as variações não previsíveis. Portanto, o emprego de lógicas computacionais concebidas para a representação de fenômenos onde há a presença de variabilidade e incertezas, como é o caso da lógica *fuzzy*, aqui também se torna a alternativa mais interessante, uma vez que com esta é possível incorporar ao modelo o conhecimento já existente.

O próximo capítulo aborda uma das formas de se trabalhar com essa variabilidade, apresentando a função do erro autorregressivo.

2.3 A função do erro autorregressivo (AREF)

A variabilidade dos parâmetros do solo traz consigo uma considerável componente de ruído, a qual deve ser tratada antes destes serem aproveitados. Uma das formas de se realizar este tratamento é utilizando-se ferramentas ou modelos estatísticos.

No trabalho de Young; Johnson e Schafer (1988) foi observado que a força de tração de uma ferramenta não é constante, mas sim cíclica por natureza devido ao desenvolvimento de falhas principais por cisalhamento.

Em Sakai; Andrade-Sanches e Upadhyaya (2005) verificou-se a existência de autossimilaridade nos padrões de flutuação dos esforços atuantes na ferramenta de ataque ao solo. Estes autores analisaram o espectro de potência espacial e a função

de distribuição do erro autorregressivo (*AREF*) para estudar a relação entre os parâmetros da *AREF*, os quais quantificam a complexidade dos padrões de flutuação da força de corte do solo.

A função de erro autorregressivo (*AREF*) é definida pela relação entre $\log \tau$ e $\log \sigma(\tau)$, no qual $\sigma(\tau)$ é o desvio padrão das diferenças das forças para diferentes atrasos de tempo (τ). Na Figura 25 pode-se observar a classificação dada pelos autores para as faixas de frequência espacial do movimento da força de corte do solo. Sakai; Andrade-Sanches e Upadhyaya (2005) as classificam em três faixas: coerente, periódica e estocástica. A porção linear no gráfico é descrita dentro da faixa estocástica da *AREF*, o que segundo os autores indica a existência de autossimilaridade no movimento da força de corte do solo. O intercepto (α') e a inclinação (β') da porção linear da *AREF* são parâmetros que podem ser usados para identificar condição física do solo.

Figura 25 - Gráfico da função *AREF*, com os dois parâmetros da função: intercepto (α') e inclinação (β')

Fonte: Sakai; Andrade-Sanches e Upadhyaya (2005)

A Figura 26 apresenta um gráfico de β' em função de α' , no qual se pode observar a relação entre estes parâmetros e parâmetros do solo. Nota-se que os parâmetros da *AREF* se agrupam em função dos tratamentos testados, sendo eles: úmido e não cultivado (UW), seco e não cultivado (UD), úmido e cultivado (TW) e seco e cultivado (TD).

Figura 26 - Classificação de quatro condições do solo por meio dos parâmetros $AREF$, α' e β' , para uma mesma velocidade de operação

Fonte: Sakai; Andrade-Sanches e Upadhyaya (2005)

Araújo et al. (2012) avaliaram a metodologia empregada por Sakai; Andrade-Sanches e Upadhyaya (2005) para estimar a umidade, densidade e resistência à penetração do solo em sistema de plantio direto. Eles chegaram à conclusão de que os parâmetros de umidade do solo e resistência à penetração apresentaram correlação significativa com o intercepto e inclinação da função $AREF$, confirmando a observação de Sakai; Andrade-Sanches e Upadhyaya (2005).

Essa metodologia foi novamente avaliada nesta tese, bem como foi avaliada e discutida a sua aplicabilidade na modelagem da mobilização do solo. O capítulo 4.2 irá descrever a metodologia adotada, enquanto o 5.2 apresentará e discutirá os resultados desta avaliação.

Pôde-se verificar que trabalhos de Godwin e Spoor (1977), Mckyes e Ali (1977), bem como os demais relacionados a estes, propuseram modelos para a predição dos esforços atuantes em uma ferramenta considerando a geometria da frente de falha do solo e partindo da equação universal do movimento de terra. Foi observado que estes modelos possuem restrições quando a sua utilização. O modelo proposto por Godwin e Spoor (1977) é dependente de dados experimentais, o que limita o seu uso. No trabalho de McKyes e Desir (1984), pôde-se observar que o modelo proposto por Mckyes e Ali (1977) não é capaz de representar a mobilização do solo em situações nas quais o ângulo de ataque da ferramenta é muito baixo, e os ângulos de atrito do solo não são muito elevados.

Também foi verificado que não há o conhecimento preciso sobre como deve ser a área de solo mobilizada por uma ferramenta nas situações não representadas pelo modelo analítico proposto por Mckyes, no entanto, é possível se ter uma ideia aproxima de como ele deve ser. Verificando-se os valores observados de área nos experimentos de McKyes e Desir (1984), bem como dos experimentos conduzidos no IAPAR, pôde-se concluir que as situações não representadas pelo modelo analítico correspondem à mobilizações de solo mais baixas. Estas situações são de grande interesse para estudos envolvendo o sistema de plantio direto, pois este preza pela mobilização mínima do solo.

A partir deste conhecimento é possível propor a formulação do modelo *fuzzy* capaz de representar as situações não descritas pelo modelo proposto por McKyes e Ali (1977), aproveitando o conhecimento aproximado de como deveria ser área de solo mobilizado nestas situações.

No próximo capítulo serão apresentados os conceitos básicos da modelagem *fuzzy*, finalizando com a contextualização da sua utilização em situações nas quais se deseja agregar ao modelo o conhecimento subjetivo que se tem do fenômeno.

2.4 Modelagem *fuzzy*

A teoria dos conjuntos *fuzzy*, e a lógica *fuzzy*, propostos por Zadeh (1965), vêm em contraposição ao tratamento matemático tradicionalmente adotado para descrever e compreender o comportamento de um sistema, o qual utiliza modelos analíticos, nos quais a descrição matemática de um fenômeno físico pressupõe um amplo conhecimento dos processos envolvidos. Sabe-se que, no entanto, tal conhecimento é impossível de ser obtido para a maioria dos sistemas reais (ARAÚJO, 2004). O mesmo autor ainda explica que a natureza imprecisa e qualitativa do conhecimento humano dificulta o tratamento matemático preciso exigido pelos modelos analíticos. Por outro lado, Shaw e Simões (1999) explicam que está demonstrado que uma das atividades mais importantes do cérebro humano é a capacidade de manipular conjuntos *fuzzy*. Eles também argumentam que em sistemas mais complexos a precisão matemática perde o seu significado, uma vez que a capacidade humana de fazer afirmações precisas e significativas sobre o comportamento destes sistemas diminui, na medida em que a sua complexidade aumenta.

A teoria dos conjuntos *fuzzy* representa uma extensão da teoria clássica dos conjuntos. A diferença é que a primeira considera como sendo gradual a pertinência de um elemento ou objeto a um conjunto ou classe, enquanto que a segunda considera que um elemento ou objeto pode apenas pertencer ou não pertencer a um conjunto ou classe (ZADEH, 1965).

A lógica *fuzzy* constitui uma generalização da lógica clássica, possibilitando o estabelecimento de valores parciais de verdade, ou seja, valores entre o completamente verdadeiro e completamente falso.

Diferente da teoria tradicional, na qual um objeto pode estar ou não contido em um determinado conjunto, a teoria dos conjuntos *fuzzy* permite a associação parcial de um objeto a um conjunto, a qual é definida por um grau de pertinência que pode variar no intervalo $[0,1]$. Deste modo: o objeto pode ser claramente classificado dentro deste grupo, pertinência igual a 1; estar parcialmente classificado, pertinência maior que 0 e menor que 1; ou estar claramente desclassificado, quando a pertinência é 0.

Um exemplo prático seria a classificação de uma pessoa como alta ou baixa. Na abordagem tradicional, há a necessidade de se definir um valor limite, por exemplo, 1,8 m. Deste modo, pessoas com menos de 1,8 m são classificadas como baixas e com 1,8m, ou mais, são classificadas como altas. Surge então a situação na qual, duas pessoas, uma com 1,79 m e outra com 1,81 m são classificadas como baixa e alta respectivamente, sem que exista uma diferença significativa entre suas alturas. Nos conjuntos *fuzzy*, as pessoas baixas teriam pertinência 1 no grupo “baixas” apenas se fossem realmente baixas, 1,6 m por exemplo. Enquanto que as altas só seriam realmente altas se tivessem 2,0 m, por exemplo. Nesta situação, as mesmas duas pessoas, com 1,79 m e 1,81 m, seriam parcialmente altas e parcialmente baixas ao mesmo tempo, com uma diferença muito pequena entre as suas pertinências em cada grupo.

A lógica *fuzzy* opera com estas verdades parciais, ou seja, com regras associadas ao grau de pertinência dos conjuntos que as ativaram. Deste modo, um modelo *fuzzy* é capaz de lidar com situações ambíguas, ativando regras diferentes simultaneamente e ponderando a resposta do modelo a partir da pertinência associada a cada regra.

Essa abordagem possibilita a formulação de lógicas a partir do conhecimento humano e do processo dedutivo, explicitado através de regras heurísticas ou

linguísticas do tipo “se...então”. Além disso, pode ser empregada quando os parâmetros do fenômeno estão associados a incertezas, podendo também apresentar comportamento não linear (BABUŠKA, 1996).

Descrevendo esse conceito (ZADEH, 1965, p. 339): “seja X um espaço de pontos (objetos) com um elemento genérico representado por x . Assim $X = \{x\}$. Um conjunto (classe) *fuzzy* A em X é caracterizado por uma função de pertinência $\mu_A(x)$ a qual associa, a cada ponto em X , um número real no intervalo $\{0,1\}$. O valor de $\mu_A(x)$ em x representa o grau de pertinência de x em A . deste modo, quanto mais próximo $\mu_A(x)$ for de 1, maior será o grau de pertinência de x em A ”.

Assim,

$$A = \{x, \mu_A(x)\}, \text{ para cada } x \in X \quad (8)$$

Deste modo, a função de pertinência define um mapeamento entre os elementos do conjunto A e valores no intervalo $[0,1]$, sendo o espaço X denominado de “universo de discurso” do conjunto *fuzzy* A (ARAÚJO, 2004).

Geralmente o tipo de um número *fuzzy* é denominado de acordo com o tipo, ou a forma, da função de pertinência que o caracteriza. As funções de pertinência podem assumir inúmeras formas, podendo ser triangulares, trapezoidais, gaussianas, dentre outras.

As operações envolvendo conjuntos *fuzzy* são extensões das operações correspondentes com conjuntos tradicionais, sendo as mais comuns definidas por Zadeh (1965):

Considerando dois conjuntos A e B :

- União: $\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$;
- Intersecção: $\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$;
- Complemento: A é complemento de B se: $\mu_A(x) = 1 - \mu_B(x)$;
- Inclusão: A está incluída em B se: $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$;
- Igualdade: A é igual a B se: $\mu_A(x) = \mu_B(x)$.

O grau de pertinência de uma regra é obtido a partir das operações entre os conjuntos *fuzzy* que a compõe. Da seguinte forma:

- Operação “e”: “Se A e B , então...”

A pertinência da regra é obtida a partir da intersecção entre os conjuntos A e B, em outras palavras, $\min(\mu_A(x), \mu_B(x))$.

- Operação “ou”: “Se A ou B, então...”

A pertinência da regra é obtida a partir da união entre os conjuntos A e B, em outras palavras, $\max(\mu_A(x), \mu_B(x))$.

- Operação “negado”: “Se $\neg(A)$, então...”

A pertinência da regra é obtida a partir do complemento da A, em outras palavras, $1 - \mu_A(x)$.

Bárdossy e Duckstein (1995) explicam que quando se utiliza nas operações o *min* e o *max*, apenas o conjunto extremo ou limitante é considerado na determinação da pertinência da regra. Os mesmos autores descrevem uma segunda forma de se determinar a pertinência nas operações de união e intersecção, utilizando o produto entre as pertinências dos conjuntos *fuzzy*. Da seguinte forma:

- Operação “e”: “Se A e B, então...”

A pertinência da regra é obtida a partir da intersecção entre os conjuntos A e B, utilizando $\mu_A(x)\mu_B(x)$.

- Operação “ou”: “Se A ou B, então...”

A pertinência da regra é obtida a partir da união entre os conjuntos A e B, utilizando $\mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x)\mu_B(x)$.

Os autores explicam que esta forma toma em consideração a pertinência de todos os conjuntos que compõe a regra, em contraste a forma anterior.

As variáveis linguísticas, que são os parâmetros de entrada e saída nos modelos *fuzzy*, são aquelas cujos valores são palavras ou sentenças as quais podem ser expressas na forma de conjuntos *fuzzy* (BÁRDOSSY; DUCKSTEIN, 1995).

Por exemplo, se a umidade do solo é uma variável linguística, então ela pode ser *baixa*, *média* ou *alta*. Cada termo, ou condição, que a umidade pode assumir é

caracterizado por um conjunto *fuzzy* no universo de discurso, por exemplo, $U=[0,1 ; 0,4]$, que neste caso seria a faixa de umidades que o solo pode apresentar.

Os modelos *fuzzy* mais comuns são os que empregam regras de inferência baseadas em sentenças condicionais do tipo “se...então” e são denominados de “modelos baseados em regras” ou simplesmente “modelos *fuzzy*” (BÁRDOSSY; DUCKSTEIN, 1995; SHAW; SIMÕES, 1999; ARAÚJO, 2004). Geralmente a estrutura de um modelo *fuzzy* é dividida em: conjunto de regras *fuzzy*, funções de pertinência, unidade de inferência *fuzzy*, unidade de fuzificação e unidade de defuzificação. Na Figura 27 pode-se observar esta estrutura geral.

Figura 27 - Componentes de um modelo *fuzzy*

Fonte: Adaptado de Araújo (2004)

As funções de pertinência relacionam os conjuntos *fuzzy* a valores de pertinência entre 0 e 1, os quais são utilizados pelas regras.

As regras *fuzzy* são compostas por um conjunto de sentenças condicionais do tipo “se...então” e formam o chamado “conhecimento especialista” do modelo. Elas podem relacionar um ou mais parâmetros de entrada associado a um conjunto *fuzzy*, sendo denominados de premissa ou antecedente, e um ou mais parâmetro de saída, denominado de conseqüente ou conclusão (MAMDANI, 1977).

Na etapa de fuzificação de um modelo *fuzzy* se associa, a cada valor numérico ou categórico de um parâmetro de entrada, um valor no intervalo $[0,1]$ relacionado à sua pertinência dentro de cada conjunto *fuzzy* correspondente àquele parâmetro (ZADEH, 1965). Nesta etapa, os valores numéricos, ou discretos, do domínio do mundo real são transformados em valores do domínio *fuzzy* (SHAW; SIMÕES, 1999).

Na etapa de inferência *fuzzy* são processadas as regras *fuzzy*, inferindo pertinências aos conjuntos *fuzzy* do consequente a partir das pertinências dos conjuntos *fuzzy* do antecedente. Em cada regra, os valores dos antecedentes são geralmente combinados utilizando conectivos do tipo “e” e “ou”, por meio das operações de máximo, mínimo ou produto, descritas anteriormente. Essa operação é chamada de conexão, e a pertinência resultante em cada regra é chamada de “grau de suporte da regra” (BÁRDOSSY; DUCKSTEIN, 1995; SHAW; SIMÕES, 1999).

O grau de suporte da regra é utilizado para definir a forma da função de pertinência do conjunto *fuzzy* do consequente da regra, sendo esta operação denominada de implicação (ZIMMERMANN, 2001). Nesta etapa, os operadores mais comuns são o mínimo, e o produto. O mínimo define a forma resultante truncando a forma original da função de pertinência, descartando a área situada acima do valor do respectivo grau de suporte. O produto multiplica todos os pontos da função de pertinência pelo grau de suporte, resultando em uma escala da forma original da função de pertinência. A Figura 28 mostra como é feita essa operação, e como fica o seu resultado quanto à forma.

Figura 28 - Implicação das regras, por truncamento (mínimo) e escalamento (produto)

Fonte: Shaw e Simões (1999)

A próxima etapa é denominada de agregação e nela é feita a combinação dos conjuntos *fuzzy* consequentes de todas as regras. Nesta etapa, utiliza-se em geral o operador “máximo” ou “soma”. O “máximo” corresponde à operação lógica de união,

descrita anteriormente. O operador “soma” simplesmente soma as saídas de cada conjunto *fuzzy* consequente de cada regra. A Figura 29 mostra um exemplo de como é feita essa operação. Nela, pode-se observar a forma consequente sendo definida pela união das formas dos dois antecedentes.

Figura 29 - Exemplo de agregação das regras utilizando o operador de máximo

Fonte: Adaptado de Shaw e Simões (1999)

Na etapa de defuzzificação o resultado inferido pelas regras é traduzido em um valor discreto. Em outras palavras, a defuzzificação realiza a operação inversa da fuzzificação, transformando o resultado dos conjuntos *fuzzy* em um valor numérico ou discreto. Nesta etapa, o objetivo é obter um valor que melhor represente o resultado *fuzzy* inferido pelas regras heurísticas ou linguísticas (SHAW; SIMÕES, 1999).

Existem diversos métodos para se efetuar a defuzzificação, o mais comum é o método do centroide. Neste método, também conhecido como centro da área, ou centro de gravidade, o valor de saída é obtido a partir do cálculo do centro de gravidade da área resultante da agregação. Em outras palavras, é obtido o valor que divide a área do conjunto *fuzzy* resultante da agregação em duas partes iguais (SHAW; SIMÕES, 1999).

Existem outros métodos, como o método da média dos máximos, que corresponde à média dos valores máximos obtidos da agregação, método do maior máximo, método do menor máximo, dentre outros.

Os modelos *fuzzy* podem ser classificados em modelos linguísticos ou paramétricos.

Os modelos linguísticos, também chamados de modelos do tipo Mamdani seguem as regras linguísticas nas quais, tanto o antecedente quanto o consequente são conjuntos *fuzzy*. A principal vantagem deste modelo é a capacidade de representar o conhecimento qualitativo humano (ARAÚJO, 2004).

Nos modelos paramétricos, o consequente é formado por uma função não *fuzzy*. Esses modelos são chamados de Takagi - Sugeno, e fazem uma abordagem híbrida combinando as regras linguísticas com funções lineares. Estas funções utilizam como entrada os valores discretos (numéricos) dos parâmetros de entrada do modelo *fuzzy* relacionados à ativação de cada regra, sendo uma função diferente para cada regra. O valor discreto de saída é obtido a partir da ponderação do resultado de cada função linear em função do valor do suporte da regra a que esta função está associada. Takagi e Sugeno (1985) explicam que o modelo paramétrico se baseia em uma ideia simples, que é realizar uma partição *fuzzy* do espaço dos parâmetros de entrada, relacionando cada subespaço *fuzzy* a uma regra, que estabelece uma relação linear entre os parâmetros de entrada e de saída.

Percebe-se então, que a modelagem *fuzzy* é adequada para a representação de fenômenos que apresentam comportamento estocástico, com a presença de incertezas, ambiguidades e ruído. Ela difere da modelagem estatística, pois não é dependente dos dados, sendo capaz de agregar o conhecimento que se possui sobre o fenômeno em estudo, mesmo que este seja aproximado ou subjetivo.

Existem vários trabalhos na literatura que exploram essa característica.

Um deles é o trabalho de Vargens; Tanscheit e Vellasco (2003) em que se utiliza de regras linguísticas e lógica *fuzzy* para a previsão da produtividade do cacau. Nesta pesquisa, a modelagem *fuzzy* se mostrou ser a mais adequada, pois não se tinha medidas precisas a respeito das práticas agrícolas definidas pelos agricultores, devido a falhas humanas e perda de material ao longo do processo. O objetivo foi criar um modelo que captasse a medida subjetiva, por parte dos agricultores, de quão aderentes eles estavam das recomendações técnicas dos órgãos oficiais.

Outro é o trabalho de Kweon (2012) que desenvolveu um procedimento para a definição de zonas de produtividade utilizando a modelagem *fuzzy*, tendo como entradas mapas de condutividade elétrica do solo, teor de matéria orgânica e dados topográficos. Nele, as informações eram insuficientes para tal, uma vez que em muitos casos não havia um histórico de mapas suficiente para se caracterizar todas as condições de produtividade existentes. A modelagem foi possível, pois a formulação das regras aproveitou o conhecimento de produtores da região, pois estes eram capazes de suprir as deficiências agregando o seu conhecimento empírico, adquirido ao longo de anos de produção.

Outros trabalhos como o de Marakoğlu e Çarman (2010) e o de Papadopoulos; Kalivas e Hatzichristos (2011) também aproveitam o conhecimento subjetivo de especialistas e agricultores para a criação de modelos *fuzzy*. No primeiro trabalho, o modelo teve como objetivo avaliar o comportamento de uma ferramenta de cultivo de solo, enquanto que no segundo, o modelo obtido foi a base para o desenvolvimento de um sistema de suporte a decisão para a adubação nitrogenada em várias propriedades agrícolas.

Em todos estes trabalhos não haviam dados suficientes ou adequados para a obtenção de modelos representativos, mas a modelagem foi possível, pois havia um conhecimento acumulado de cada situação e este pôde ser aproveitado graças à modelagem *fuzzy*.

3 METODOLOGIA

A metodologia compreendeu quatro fases. Uma fase experimental para a obtenção de dados que representassem a mobilização do solo no sistema de plantio direto; uma segunda fase na qual foram determinados os parâmetros da função do erro autorregressivo (*AREF*) a partir dos dados obtidos na primeira fase; uma fase de modelagem, na qual os modelos *fuzzy* foram identificados pela teoria da mecânica dos solos, do conhecimento especialista e de dados experimentais, sendo, posteriormente, avaliados na última fase, que é a prova de conceito.

3.1 Ensaios de campo

Foram conduzidos experimentos nas estações experimentais do IAPAR visando levantar o maior número possível de informações, tanto em relação à quantidade de grandezas mensuradas quanto ao número de amostragens realizadas. Estes experimentos fizeram parte de um projeto, em parceria com a USP, subsidiado pelo convênio FINEP - FAPEAGRO 01/2008, e tiveram por objetivo o levantamento de informações sobre a interação solo - ferramenta de uma haste sulcadora estreita operando em sistema de plantio direto. Nestes experimentos, foram aproveitados os dados relevantes ao estudo conduzido nesta tese.

Foram realizados os seguintes experimentos:

1. Londrina, solo argiloso, 2011;
2. Londrina, solo argiloso, 2012;
3. Umuarama, solo arenoso, 2012;
4. Londrina, solo argiloso, 2013.

Os esforços atuantes foram medidos por um anel octogonal do IAPAR, desenvolvido pela Unicamp com base no trabalho de Godwin (1975), o qual se constitui de um dinamômetro biaxial para medição de forças em duas direções ortogonais e momento atuantes em implementos até o limite de 20 kN para força horizontal, 8 kN para vertical e 1,2 kN m para momento, utilizando extensômetros resistivos.

O anel estava fixado a um dispositivo especialmente projetado e acoplado ao engate de três pontos do trator e que possui duas rodas laterais para apoio no solo e regulação da profundidade de operação, sendo mostrado na Figura 30. A haste está acoplada diretamente ao anel octogonal e um disco de corte foi colocado à frente da haste de modo similar ao usado em semeadoras diretas. A calibração do anel octogonal foi previamente verificada utilizando-se uma prensa hidráulica e um transdutor de força calibrado em laboratório credenciado.

A partir do 3º experimento, realizado em Umuarama 2013, o dispositivo passou a incorporar um segundo sensor para as medidas dos esforços atuantes. Este constituiu-se de um conjunto denominado Dispositivo de Medição de Esforços (DME) que é equipado com células de carga comerciais da Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM), modelo HLCA1C3, sendo duas células de 4.4 Mg para medir o esforço horizontal e um célula de 1,76 Mg para o vertical. Este dispositivo foi desenvolvido por Santo et al. (2010) com o objetivo de facilitar a sua instalação em uma semeadora, tendo-se em vista as dimensões desfavoráveis do anel octogonal. O quadrante inferior esquerdo da Figura 31 mostra o DME, acoplado ao anel octogonal e ao restante da estrutura. Nesta tese o DME trouxe como benefício leituras mais precisas dos esforços na direção horizontal. No entanto, as leituras verticais ficaram prejudicadas, dada a elevada capacidade do sensor (1,76 Mg) sendo que as leituras neste eixo não passam de 100 kg, durante a operação, o que resulta em maior contribuição do ruído. Além disso, o seu peso próprio interfere nas leituras verticais do Anel Octogonal, agregando a este sensor um ruído associado à oscilação vertical do DME. No entanto, as leituras dos esforços na direção vertical são aproveitadas apenas em parte da análise da função do erro autorregressivo (*AREF*), sendo que os modelos *fuzzy*, propostos nesta tese, não fazem uso destas leituras.

Figura 30 - Dispositivo acoplado ao engate de três pontos para fixação da haste e anel octogonal

Fonte: Autor

Figura 31 - Dispositivo acoplado ao engate de três pontos para fixação da haste, anel octogonal e DME

Fonte: Autor

No primeiro experimento foi usado um *datalogger* modelo CR3000, da Campbell Scientific, para aquisição e gravação dos sinais de saída dos canais do anel. Os dados coletados foram transferidos ao computador via conexão serial RS232 utilizando o programa LoggerNet 3.0 e analisados usando-se programa Excel

da Microsoft em conjunto com *macro-scripts* escritos em *Visual Basic for Applications* (VBA). A taxa de aquisição dos dados de força e momento foi de 100 Hz.

Nos demais experimentos foi usado um *datalogger* modelo *eDAClite* da HBM, para aquisição e gravação dos mesmos sinais do primeiro experimento acrescidos de novos canais para as medidas de velocidade via radar agrícola e GPS. Para tanto, foi utilizado um radar-II da Dickey John e um GPS18-5Hz da Garmin. Os dados coletados foram transferidos via rede sem fio e servidor *HTTP* do próprio *datalogger*, sendo analisados usando-se o programa CatmanAP da HBM em conjunto com *macro-scripts* escritos em VBA, integrando este com o *Excel* da Microsoft, versão 2010. A taxa de aquisição dos dados de força e momento é a mesma utilizada anteriormente, 100 Hz.

A haste empregada é comercial de aço endurecido com área da seção transversal retangular, ponteira comercial removível de aço temperado com as seguintes características: ângulo de ataque $\alpha = 24^\circ$, espessura da ponteira da haste $w = 24$ mm, espessura o corpo da haste = 13 mm.

Os experimentos de Londrina, PR foram realizados em solo do tipo Latossolo Vermelho distroférico típico na estação experimental do IAPAR ($23^\circ 23'S$ e $51^\circ 11'W$). O solo possui as seguintes propriedades texturais: 82% de argila, 13% de silte e 5% de areia. Em 2011, a área estava sob semeadura direta há 7 anos, com cobertura de *Brachiaria* (*Leucophrys* rendle), apresentando em média 3,1 ton/hectare de massa seca. Em 2012, com cobertura de Milheto (*Pennisetum glaucum*), apresentando em média 860 g.m^{-2} ($8,6 \text{ t.ha}^{-1}$). Em 2013, com cobertura consorciada de Aveia preta (*Avena strigosa*) e *Brachiária*, apresentando aproximadamente 970 g.m^{-2} ($9,7 \text{ t.ha}^{-1}$).

Os experimentos em Umuarama, PR foram realizados em solo do tipo Argissolo Vermelho distrófico na estação experimental do IAPAR ($23^\circ 79'S$ e $53^\circ 25'W$). O solo possui as seguintes propriedades texturais: 7% de argila, 1% de silte e 92% de areia. A área estava sob semeadura direta há 2 anos. Em 2012, a área estava com cobertura de Aveia preta, apresentando aproximadamente 620 g.m^{-2} ($6,2 \text{ t.ha}^{-1}$).

Em todos os experimentos, as áreas foram manejadas com triturador de restos culturais e, após rebrota, com Gifosato (30 mL.m^{-2}) dez dias antes da instalação de cada experimento.

Para possibilitar a identificação espacial dos dados de força e momento, relacionando-os com as características do solo, as parcelas possuíam pontos demarcados com estacas apropriadamente posicionadas. A função delas era interromper um feixe de luz laser, entre uma fonte emissora e um receptor, na forma de uma barreira, mostrada na Figura 32. Já na Figura 33, são mostradas as estacas que interrompem o feixe de luz laser. A interrupção do sinal laser também foi gravada pelo *datalogger* e permitiu identificar os valores das forças e momento exatamente nos pontos demarcados uma vez que emissor e receptor estavam alinhados com a haste.

Figura 32 - Barreira ótica utilizada para a identificação dos pontos demarcados

Fonte: Autor

Figura 33 - Estacas utilizadas para interromper o feixe de luz laser, identificando os pontos demarcados

Fonte: Autor

A umidade e densidade do solo foram determinadas utilizando anéis volumétricos com 100 cm^3 (50 mm de diâmetro e 50 mm de altura) os quais foram coletados próximos a oito dos quinze pontos demarcados nas parcelas, nas profundidades de 25 a 75 mm, logo após a passagem da haste.

No primeiro ensaio, embora inicialmente o objetivo fosse medir todos os parâmetros de força e do solo em quinze pontos por parcela, na prática se mostrou inviável em virtude do tempo requerido para completar as amostragens. Por essa razão, decidiu-se amostrar o solo (umidade, densidade e resistência à penetração) apenas em oito pontos, mantendo-se as leituras de força, perfil e cobertura vegetal com 15 pontos. As amostras foram pesadas logo após sua coleta, posteriormente encaminhadas para secagem em estufa por 24 h a 100°C e pesadas novamente. A haste foi ajustada para operar na profundidade média de 100 mm.

A resistência à penetração foi determinada utilizando-se um penetrômetro digital marca Spectrum, com cone em conformidade com a norma da ASAE, com registro da força de penetração a cada 50 mm de profundidade.

O perfil do solo foi caracterizado utilizando-se um perfilógrafo laser desenvolvido por Johann et al. (2012). O aparelho estava ajustado para a realização de leituras espaçadas de 10 mm entre si. Foram determinados os perfis do solo em cada um dos pontos demarcados pelas estacas que interrompem a barreira laser,

excetuando-se as estacas de entrada e saída das parcelas. No primeiro e segundo experimentos, em cada um destes pontos foram determinados três perfis de solo, sendo o primeiro referente ao perfil original do solo, o segundo ao perfil após a passagem da ferramenta e o terceiro ao perfil do sulco escavado, onde todo o solo que foi mobilizado pela ferramenta é removido. Nos experimentos seguintes, para melhorar a comparação das leituras, o perfil original não foi mais obtido. As leituras passaram a ser feitas em um único momento, sem o deslocamento do perfilógrafo durante toda a medição em um ponto demarcado.

A avaliação destes perfis permitiu obter a profundidade real do sulco e a área da secção transversal do sulco.

Nos três primeiros experimentos, o delineamento experimental foi o de blocos completos ao acaso com oito tratamentos e três repetições, sendo cada tratamento formado pela combinação de dois níveis de umidade do solo (solo úmido e solo seco), dois níveis de densidade do solo (natural em plantio direto e após compactação com duas passadas de trator com aproximadamente 35 kN) e dois níveis de velocidade de operação (3 km.h^{-1} e 6 km.h^{-1}).

As estações experimentais do IAPAR não dispunham de irrigação para a condução dos experimentos. Para se conseguir as condições seca e úmida, metade dos ensaios era primeiramente conduzida em solo seco, sendo então finalizados logo após a ocorrência de chuvas em quantidade suficiente para se atingir a condição úmida.

As parcelas possuíam 25 m de comprimento e 2 m de largura, sendo constituída por uma passada da haste, e apresentavam no primeiro experimento, 15 pontos demarcados espaçados a 1,5 m entre si sendo que o primeiro e último se localizaram após 2 m do início e final da parcela, respectivamente. Lembrando que neste experimento, as amostras de umidade e densidade, bem como as leituras de resistência do solo a penetração foram coletadas apenas 8 pontos em cada parcela. Nos demais experimentos, optou-se por reduzir o número de pontos para 8, espaçados de 3,0 m entre si, de modo a se ter uma quantidade de leituras uniforme em todas as grandezas. Nestes experimentos, as amostras de solo eram feitas em todos os pontos. A nomenclatura adotada nos tratamentos é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Nomenclatura adotada para os primeiros tratamentos

Níveis dos Tratamentos	Sigla Adotada
Seco	U1
Úmido	U2
Natural em plantio direto	D1
Compactado	D2
3 km.h ⁻¹	V1
6 km.h ⁻¹	V2

Fonte: Autor

No último experimento, o tratamento de densidade foi substituído por mais um tratamento de velocidade e mais um bloco. Deste modo, o experimento passou a ter dois níveis de umidade, três níveis de velocidade e 4 blocos casualizados. A nomenclatura adotada nos tratamentos é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Nomenclatura adotada para os tratamentos experimento de Londrina, em 2013

Níveis dos Tratamentos	Sigla Adotada
Seco	U1
Úmido	U2
3 km.h ⁻¹	V1
6 km.h ⁻¹	V2
8 km.h ⁻¹	V3

Fonte: Autor

Em todos os experimentos, o trator utilizado foi da marca New Holland modelo NH 75 na marcha I-4 a 1450 rpm a 3 km.h⁻¹, marcha II-3 a 1750 rpm a 6 km.h⁻¹ e marcha II-4 a 1650 rpm a 8 km.h⁻¹.

As Tabelas 3 a 5 apresentam as combinações de fatores para cada tratamento em cada experimento realizado.

Tabela 3 - Tratamentos dos experimentos em Londrina, 2011 e 2012

TRATAMENTO	FATORES					
	UMIDADE SOLO		DENSIDADE SOLO		VELOCIDADE	
	<i>úmido</i>	<i>seco</i>	<i>sem sobre tráfego</i>	<i>com sobre tráfego</i>	3 km.h^{-1}	6 km.h^{-1}
T1	X		X		X	
T2	X		X			X
T3	X			X	X	
T4	X			X		X
T5		X	X		X	
T6		X	X			X
T7		X		X	X	
T8		X		X		X

Fonte: Autor

Tabela 4 - Tratamentos dos experimentos em Umuarama, 2012

TRATAMENTO	FATORES					
	UMIDADE SOLO		DENSIDADE SOLO		VELOCIDADE	
	<i>úmido</i>	<i>seco</i>	<i>sem sobre tráfego</i>	<i>com sobre tráfego</i>	3 km.h^{-1}	6 km.h^{-1}
T1		X	X		X	
T2		X	X			X
T3		X		X	X	
T4		X		X		X
T5	X		X		X	
T6	X		X			X
T7	X			X	X	
T8	X			X		X

Fonte: Autor

Tabela 5 - Tratamentos dos experimentos em Londrina, 2013

TRATAMENTO	FATORES				
	UMIDADE SOLO		VELOCIDADE		
	<i>úmido</i>	<i>seco</i>	3 km.h^{-1}	6 km.h^{-1}	8 km.h^{-1}
T1		X	X		
T2	X		X		
T3		X		X	
T4	X			X	
T5		X			X
T6	X				X

Fonte: Autor

Após o pré-processamento dos dados para a eliminação dos casos com inconsistências (*outliers*) os resultados dos experimentos foram sintetizados, agrupando-se as subamostras em amostras, sendo uma para cada parcela.

A eliminação dos *outliers* foi feita utilizando o método dos resíduos padronizados (SNEDECOR; COCHRAN, 1982). Foi adotado como valor crítico de corte 3,09 da tabela Z, que corresponde a 99,8% de probabilidade dos dados da subamostra não estarem contidos dentro da população.

O valor representativo de cada parcela foi obtido a partir da média e da mediana dos valores das subamostras. Utilizou-se a média para os parâmetros cujos dados apresentaram distribuição normal segundo os testes de D'Agostinho e D'Agostinho Pearson. Para os não normais utilizou-se a mediana.

Após esse tratamento, o comportamento dos dados foi avaliado utilizando a análise de variância, por meio do teste F, do teste de Tukey para as médias, e da matriz de correlação, calculados com o auxílio do programa Statsoft - *Statistica*, versão 2010. O cálculo da matriz de correlação considerou a significância em um intervalo de 5% de probabilidade.

O cálculo do coeficiente de variação do experimento considerou a raiz quadrada do quadrado médio (QM) do erro, obtido pela análise de variância, e a média global de cada parâmetro, em cada experimento.

3.2 Estudo da função *AREF*

A função do erro autoregressivo (*AREF*), proposta por Sakai; Andrade-Sanches e Upadhyaya (2005), foi analisada com mais detalhes no intuito de verificar a sua aplicabilidade como filtro de entrada para um modelo baseado em lógicas computacionais, além da sua utilidade como ferramenta de análise das condições físicas do solo.

A determinação dos parâmetros da *AREF* seguiu a metodologia descrita por Sakai; Andrade-Sanches e Upadhyaya (2005). No experimento realizado em Londrina em 2011, os cálculos com os dados das séries temporais dos esforços na haste, coletados pelo *datalogger* - CR3000, foram realizados utilizando-se o programa *Excel* da Microsoft e *macro-scripts* escritos em *Visual Basic for Applications* (VBA). Nos demais ensaios, com a substituição do *datalogger* para o

eDAClite, também foi utilizado o programa *CatmanAP*, da *HBM*. Este programa foi utilizado integrado com o *Excel*, por meio de *macro-scripts* escritos em *VBA*.

O estudo da *AREF* foi conduzido buscando relacionar os seus coeficientes com os demais resultados dos experimentos e, quando possível, com a teoria da mecânica dos solos.

3.3 Modelo *fuzzy*

Conforme discutido no capítulo de revisão bibliográfica, o modelo analítico proposto por Mckyes e Ali (1977) para a representação da mobilização do solo apresenta limitações em relação ao seu emprego, fazendo com que este não seja capaz de representar determinadas situações.

Em face desse cenário, este trabalho propõe o uso de lógicas computacionais para propor um modelo capaz de representar as situações não descritas pelo modelo proposto por Mckyes.

A proposta inicial da pesquisa era utilizar redes neurais artificiais (*ANN*) para a estimativa da área de solo mobilizada a partir de parâmetros do solo, da operação e da *AREF*. No entanto, verificou-se que a elevada variabilidade da umidade do solo, bem como de outros parâmetros, fez com que os dados obtidos para a realização da etapa de treinamento da *ANN* descrevessem situações onde a importância de cada parâmetro dentro do fenômeno não se comportasse de maneira uniforme, não provendo uma *ANN* que pudesse representar o fenômeno da forma mais adequada. Por esta razão, se optou por utilizar outra lógica computacional.

Dentre as lógicas computacionais existentes, a computação *fuzzy* mostrou-se a mais adequada pela sua capacidade de representar fenômenos nos quais há a presença de incertezas, além de não linearidade, agregando o conhecimento teórico e especialista que se tem sobre o fenômeno.

O modelo *fuzzy* foi construído com base no conhecimento especialista obtido a partir da teoria de mecânica dos solos, agregado ao conhecimento do autor, e validado utilizando-se ensaios experimentais referentes à área de solo mobilizada pela haste sulcadora em condições de sistema de plantio direto.

O modelo consiste na predição da área de solo mobilizada a partir da profundidade da operação, do ângulo de atrito interno do solo e do ângulo de atrito

solo-ferramenta. A Figura 34 ilustra o fluxo de informações dentro do modelo proposto, identificando as entradas e saída do modelo.

Figura 34 - Esquema do fluxo de informações dentro do modelo proposto

Fonte: Autor

Nos ensaios conduzidos no IAPAR não foi possível levantar os parâmetros de fricção do solo, uma vez que o sistema de medição não era disponível. Para superar essa limitação, foi formulado e validado um modelo secundário, para a predição do ângulo de atrito interno do solo, a partir de parâmetros do solo obtidos a campo. Este modelo também é baseado na teoria dos conjuntos *fuzzy* e na lógica *fuzzy*. A Figura 35, ilustra o fluxo de informações dentro deste modelo, bem como os seus parâmetros de entrada e saída.

Figura 35 - Esquema do fluxo de informações dentro do modelo secundário

Fonte: Autor

As regras e funções de pertinência foram formuladas como um modelo linguístico, em ambos os modelos, e implementadas por meio do programa *Matlab*, da *Mathworks*, versão 8, utilizando o seu pacote de lógica *fuzzy*, associado a *macro-scripts* escritos em *VBA* e planilhas elaboradas no programa *Excel* da Microsoft, versão 2010.

3.3.1 Modelo para predição do ângulo de atrito interno do solo

Neste modelo, o teor de argila, a umidade e a densidade foram escolhidos como parâmetros de entrada. O teor de matéria orgânica não foi considerado, pois não foram encontradas informações suficientes nos trabalhos da literatura que permitissem quantificar o seu efeito sob o ângulo de atrito interno nas diferentes condições de teor de argila, umidade e densidade.

A definição dos universos de discurso dos parâmetros de entrada tomou por base o conhecimento especialista de pesquisadores do IAPAR, bem como informações de referência, descritas por Kiehl (1979). Eles estão apresentados na Tabela 6.

A definição do universo de discurso do parâmetro de saída está descrita com mais detalhes no próximo capítulo (3.3.2). Ela tomou por base os dados dos ensaios de Braida et al. (2007a), BRAIDA et al., 2007b, Carvalho et al. (2010), Rocha et al. (2002), Silva e Carvalho (2007) e Silva et al. (2004), e também se encontra na Tabela 6.

Tabela 6 - Universo de discurso dos parâmetros de entrada e saída do modelo para a predição do ângulo de atrito interno do solo

Parâmetro de entrada	Universo de discurso
Teor de argila (g.kg^{-1})	0 a 900
Umidade (g.g^{-1})	0,1 a 0,4
Densidade (kg.m^{-3})	0,9 a 1,5
Parâmetro de saída	
Ângulo de atrito interno do solo ($^{\circ}$)	25 a 45

Fonte: Autor

O universo de discurso foi particionado em função da amplitude esperada para cada parâmetro no sistema de plantio direto. A escolha do tipo das funções de pertinência tomou por base a relação entre cada parâmetro de entrada e o ângulo de atrito interno do solo.

3.3.2 Modelo para predição da área de solo mobilizado

Neste modelo, os parâmetros de entrada foram definidos a partir do modelo analítico desenvolvido por Mckyes e Ali (1977) para a predição da área de solo mobilizado. São eles:

- Ângulo de atrito solo - ferramenta, δ
- Ângulo de atrito interno do solo, ϕ
- Largura da ferramenta, w
- Ângulo de ataque da ferramenta, α
- Profundidade, d

A haste sulcadora, utilizada nos experimentos conduzidos no IAPAR, apresenta pequeno ângulo de atrito ($\alpha = 24^\circ$), e é do tipo estreita, com $w = 24\text{mm}$. A sua geometria faz com que esta não seja representada pelo modelo proposto por Mckyes em conjunto muito grande de combinações de ângulo de atrito interno do solo, ângulo de atrito solo - ferramenta e profundidade.

A formulação do modelo proposto tomou como base esta ferramenta, sendo que isto se deve a dois fatores. Primeiro, em ferramentas estreitas o efeito da largura pode ser desconsiderado, pois conforme pode ser observado na Figura 6b o efeito do plano de falha lateral do solo é muito maior neste tipo de ferramenta. Segundo, não há sentido em se contemplar ferramentas com maiores ângulos de ataque, uma vez que a área de solo mobilizado por estas ferramentas já é representada pelo modelo analítico.

No modelo de Mckyes, a relação entre α e a área de solo mobilizado é linear em quase todo seu intervalo, ocorrendo o mesmo para a largura (w). Além disso, a largura apresenta efeito mínimo sobre a área mobilizada, devido a pouca variação de dimensões para as ferramentas de plantio direto, com valores entre 19 e 27 mm para a maioria das máquinas comerciais (CASÃO JUNIOR; SIQUEIRA, 2006).

A definição dos universos de discurso dos parâmetros de entrada e saída foi realizada com base em trabalhos da literatura, e segue descrita abaixo.

- *Ângulo de atrito interno do solo (φ)*

É um dos parâmetros que descrevem o atrito do solo, neste caso, entre partículas de solo. Este ângulo descreve a inclinação da reta que relaciona a tensão de cisalhamento com a tensão normal, obtida a partir de ensaios de cisalhamento em amostras de solo. Na Figura 36 é mostrado o papel do ângulo na frente de falha do solo, lembrando que ele participa do equilíbrio de forças que define os adimensionais presentes na equação universal de movimento de terra.

Figura 36 - Representação do ângulo de atrito interno no perfil de falha do solo

Fonte: Adaptado de Mckyes (1985)

Para solos brasileiros, Braidá et al. (2007a), Braidá et al. (2007b), Carvalho et al. (2010), Rocha et al. (2002), Silva e Carvalho (2007) e Silva et al. (2004) indicam valores do ângulo de atrito interno do solo no intervalo entre 27,9° e 45° (Tabela 26, anexo). Considerando que os solos podem atingir teores de argila um pouco maiores que os abrangidos pela tabela, definiu-se como universo de discurso de φ o intervalo entre 25° e 45°.

- *Ângulo de atrito solo - ferramenta (δ)*

É o segundo parâmetro que descreve o atrito do solo, neste caso, o atrito entre o solo e a superfície da ferramenta. Este ângulo também quantifica a inclinação de uma reta, que descreve a relação entre a tensão de atrito ao longo da interface solo - ferramenta e a tensão normal exercida pelo solo sobre a superfície da ferramenta.

Na Figura 37 é mostrado o papel deste ângulo na frente de falha do solo, uma vez que também participa na definição dos adimensionais presentes na equação universal do movimento de terra.

Figura 37 - Representação do ângulo de atrito solo - ferramenta no perfil de falha do solo

Fonte: Adaptado de Mckyes (1985)

Mckyes (1985) relaciona o ângulo de atrito solo - ferramenta e o ângulo de atrito interno do solo da seguinte maneira: para ferramentas perfeitamente lisas, $\delta=0$; para ferramentas perfeitamente rugosas, $\delta=\varphi$; e para ferramentas metálicas em condições reais, δ assume valores entre $1/2$ e $7/8$ de φ .

Deste modo, o universo de discurso de δ ficou definido como o intervalo entre $12,5^\circ$ e 40° , que corresponde ao menor e ao maior valor de δ , estando entre $1/2$ e $7/8$ do universo de discurso de φ .

- Profundidade da ferramenta (d)

A função da haste sulcadora é romper a camada superficial compactada de solo que se forma ao longo dos anos nas áreas em sistema de plantio direto, logo, a profundidade de operação da ferramenta deve ser tal que possibilite essa função. Araujo et al. (2001) explicam que esta camada se situa entre 50 e 200 mm de profundidade. Além disso, a deposição das sementes normalmente não deve ocorrer muito próxima da superfície, sendo o fertilizante depositado abaixo desta profundidade. Não são comuns profundidades de deposição de fertilizantes superiores a 150mm, como pode se observar nos trabalhos de Aratani et al. (2006), Cepik; Trein e Levien (2005), Conte et al. (2009), Grotta et al. (2006) e Mion e Benez (2008), nos quais as profundidades não ultrapassaram 150 mm. Deste modo, define-se como universo de discurso de d , o intervalo entre 50 e 150 mm.

- Área de solo mobilizado (A)

O limite superior do universo de discurso da área de solo mobilizado foi definido a partir do modelo analítico, o qual obteve 603 cm^2 para a condição máxima

de mobilização descrita pelos universos de discurso dos parâmetros de entrada, em outras palavras, $\phi = 45^\circ$, $\delta = 40^\circ$ e $d = 150$ mm.

O limite inferior descreve um valor de área inferior ao representado pelo modelo analítico, tendo-se em vista que este não é capaz de representar condições de mobilização muito baixas. O menor valor ainda representado pelo modelo analítico é de aproximadamente 50 cm^2 . O menor valor observado nos experimentos conduzidos no IAPAR foi de 18 cm^2 , sendo este valor coerente com a hipótese proposta nesta tese. Definiu-se então, como universo de discurso de A, o intervalo entre 18 e 603 cm^2 .

Deste modo, tem-se o resumo dos universos de discurso dos parâmetros de entrada e saída descritos na Tabela 7.

Tabela 7 - Universo de discurso dos parâmetros de entrada e saída do modelo para a predição da área de solo mobilizado

Parâmetro de entrada	Universo de discurso
Ângulo de atrito interno do solo ($^\circ$)	25 a 45
Ângulo de atrito solo - ferramenta ($^\circ$)	12,5 a 40
Profundidade (cm)	5 a 15
Parâmetro de saída	
Área de solo mobilizada (cm^2)	18 a 603

Fonte: Autor

A definição do tipo das funções de pertinência foi baseada no padrão de comportamento dos dados e do modelo. Os demais parâmetros, que são os tipos de operação, implicação, agregação e defuzzificação, também tomaram por base o comportamento que se espera obter do modelo.

3.4 Prova de conceito

O objetivo da prova de conceito foi apresentar, de forma prática, o uso do modelo *fuzzy* para a representação da área de solo mobilizado por uma haste sulcadora estreita em sistema de plantio direto, proposto nesta pesquisa. Este modelo foi testado com os dados obtidos nos experimentos realizados durante a

pesquisa, ou seja, nos campos experimentais do IAPAR em Londrina – PR e Umuarama - PR.

Também foi avaliado o uso do modelo *fuzzy* para a predição do ângulo de atrito interno do solo. Para isso, foram utilizados dados de experimentos da literatura, extraídos dos trabalhos de Braida et al. (2007a), Carvalho et al. (2010), Silva e Carvalho (2007) e Silva et al. (2004).

Os modelos, concebidos em lógica *fuzzy*, foram avaliados utilizando-se o pacote de lógica *fuzzy* do programa *Matlab*, da Matworks, versão 8, em conjunto com *macroscripts* escritas em VBA, e planilhas do *Excel*, da Microsoft, versão 2010. As predições obtidas a partir do modelo foram comparadas com os valores de área mobilizada obtidos experimentalmente para cada amostra, de cada bloco e tratamento, em cada experimento.

O desempenho do modelo foi avaliado utilizando as métricas de desempenho, descritas a seguir, bem como gráficos apresentando os valores preditos e os observados.

Os valores observados de área de solo mobilizado foram os provenientes dos experimentos. Os valores preditos foram os obtidos pelo modelo de predição da área de solo mobilizado, foco desta pesquisa, que teve como parâmetros de entrada os valores de ângulo de atrito interno do solo, ângulo de atrito solo - ferramenta e profundidade da haste. Os valores do ângulo de atrito interno do solo (φ) foram definidos a partir do modelo para a predição do ângulo de atrito interno do solo.

Uma vez que os valores do ângulo de atrito solo - ferramenta (δ) também não puderam ser obtidos durante os experimentos, estes foram considerados como sendo uma fração do ângulo de atrito solo - ferramenta, que segundo Mckyes (1985), para ferramentas metálicas, situa-se na faixa entre $1/2$ e $7/8$ de φ .

Os valores da profundidade de operação da ferramenta foram determinados durante os experimentos, através das leituras do perfilógrafo. Os parâmetros de entrada para o modelo de predição do ângulo de atrito interno do solo, também foram determinados durante os experimentos.

O modelo de predição do ângulo de atrito interno do solo foi testado e validado utilizando dados provenientes dos trabalhos da literatura, cujos valores encontram-se tabelados no capítulo de anexos.

É importante destacar que estes experimentos apresentaram grande variabilidade, podendo-se observar situações contraditórias entre eles. Um exemplo

disto é o valor do ângulo de atrito interno observado nos ensaios de Braida et al. (2007a) e Silva e Carvalho (2007). Percebe-se no primeiro, no qual o solo é mais arenoso (15,5% de argila), valores inferiores aos descritos no segundo para o teor de 29,5% de argila, sendo os intervalos de umidade bastante próximos. Essa diferença a princípio não é aderente à teoria, tendo-se em vista que o menor teor de argila deveria reduzir o efeito de lubrificação das partículas do solo com consequente elevação no atrito interno. Uma das causas poderia ser atribuída ao efeito da matéria orgânica, que poderia eventualmente melhorar a lubrificação entre as partículas, conforme observado por Braida et al. (2007a). No entanto, nos trabalhos analisados, os teores de matéria orgânica não apresentaram relação com os valores de ângulo de atrito interno obtidos.

Outras causas poderiam ser diferenças entre outras propriedades dos solos, como mineralogia e formato das partículas. Também se sabe que nos ensaios de Silva e Carvalho (2007) foram coletadas amostras de diferentes horizontes de um mesmo solo, diferente de Silva et al. (2004) que coletou o horizonte superficial de diferentes locais, com diferentes condições de cultivo. Outra fonte de variação pode ser as diferenças entre os procedimentos experimentais em cada trabalho, tais como, amostragens do solo no campo, e na condução dos ensaios.

Os dados também não descrevem uma relação clara entre a densidade e o ângulo de atrito interno do solo. Esta variou conjuntamente o teor de argila, em cada amostra, não tornando possível avaliar o seu comportamento de forma quantitativa.

Conforme descrito anteriormente, parte da validação se deu pela avaliação do desempenho do modelo proposto através de três índices estatísticos, sendo eles: raiz quadrada do erro quadrático médio, erro percentual médio e o coeficiente de correlação.

O *RMSE* indica o tamanho médio dos resíduos ou desvio da estimativa da variável de saída do modelo em relação aos dados obtidos experimentalmente (ARAÚJO, 2004). O desempenho do modelo é melhor na medida em que este valor de erro apresenta valores menores. O cálculo do RMSE se dá pela equação:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{c=1}^m (y_c^{obs} - y_c^{est})^2}{m}} \quad (8)$$

O erro percentual médio (*APE*) quantifica o tamanho relativo dos resíduos. O seu cálculo se dá pela equação:

$$APE = \frac{1}{m} \sum_{c=1}^m \frac{|y_c^{obs} - y_c^{est}|}{y_c^{obs}} \times 100\% \quad (9)$$

O coeficiente de correlação (*R*) indica o grau de dispersão dos dados em relação aos seus valores médios. Se a dispersão dos dados diferir da descrita pelos valores médios, a correlação entre estes é baixa (ARAÚJO, 2004).

Os seus valores variam entre -1 e 1, e seu cálculo se dá pela equação:

$$R = \frac{\sum_{c=1}^m (y_c^{est} - \overline{y^{est}})(y_c^{obs} - \overline{y^{obs}})}{\sqrt{\sum_{c=1}^m (y_c^{est} - \overline{y^{est}})^2 \sum_{c=1}^m (y_c^{obs} - \overline{y^{obs}})^2}} \quad (10)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo está dividido em cinco partes. Na primeira, os resultados experimentais são analisados quanto à sua representatividade para construção do modelo *fuzzy* que irá prever a área de solo mobilizado, bem como para a realização da prova de conceito deste modelo.

Na segunda, a função do erro autorregressivo (*AREF*) é analisada quanto à sua capacidade de representar parâmetros mecânicos do solo, bem como a sua aplicabilidade como filtro de entrada para os modelos em lógicas computacionais.

Na terceira parte, são descritos os modelos *fuzzy* para a representação do ângulo de atrito interno do solo e da área de solo mobilizado pela haste sulcadora.

Na quarta, é apresentada a prova de conceito, na qual se avalia o desempenho dos modelos *fuzzy*. O modelo para a representação da área de solo mobilizado é avaliado para as situações abrangidas pelos experimentos conduzidos e analisados nesta pesquisa. O modelo para a representação do ângulo de atrito interno do solo é avaliado para situações descritas em trabalhos da literatura.

Por fim, são realizadas considerações finais acerca dos resultados obtidos.

4.1 Ensaios de campo

Os resultados da análise de variância para os dados dos experimentos conduzidos em Londrina / 2011 encontram-se na Tabela 8, os valores médios encontram-se na Tabela 9 e a matriz de correlações na Tabela 10. Neste experimento, o pré-processamento dos dados, para a remoção de *outliers*, descartou 43 subamostras, que correspondem a 22% do total. Os parâmetros de umidade, densidade e velocidade foram os fatores controlados nos tratamentos.

Tabela 8 - Resultados do teste F e coeficientes de variação, para experimento conduzido em Londrina (solo argiloso), em 2011

Parâmetro	Fonte de Variação	GL	QM	F	p ¹	CV ² (%)
Umidade	Tratamento	7	19,01	18,82	0,0000 **	3,447
	Bloco	2	4,613	4,567	0,02973 *	
	Erro	14	1,010			
Densidade	Tratamento	7	0,0009456	1,844	0,1562 ns	1,813
	Bloco	2	0,0007053	1,376	0,2848	
	Erro	14	0,0005127			
Velocidade	Tratamento	7	6,5299	669,7	0,0000 **	2,269
	Bloco	2	0,01379	1,414	0,2759 ns	
	Erro	14	0,009751			
Profundidade	Tratamento	7	226,5	0,5262	0,8008 ns	23,09
	Bloco	2	1248	2,8983	0,08846 ns	
	Erro	14	430,5			
Área Mobilizada	Tratamento	7	8006635	0,2364	0,9687 ns	57,99
	Bloco	2	1017081	0,0300	0,9705 ns	
	Erro	14	33866263			
RP-7,5cm	Tratamento	7	4384703	48,63	0,0000 **	9,123
	Bloco	2	298373	3,309	0,06654 ns	
	Erro	14	90165			
RP-10cm	Tratamento	7	4577091	37,67	0,0000 **	11,06
	Bloco	2	522213	4,2981	0,03505 *	
	Erro	14	121500			

¹*significativo a 5% de probabilidade e **significativo a 1% pelo teste F.

² Coeficientes de variação do experimento.

Fonte: Autor

Tabela 9 - Resultados médios do experimento conduzido em Londrina (solo argiloso), em 2011

Trat.	Umidade (%)	Densidade (g.cm ⁻³)	Velocidade (km.h ⁻¹)	Profund. (cm)	Área Mob. (cm ²)	RP-7,5cm (MPa)	RP-10cm (MPa)
1	27,36 a	1,248 a	2,982 a	9,288 a	11378 a	4156 ab	3859 a
2	25,73 a	1,248 a	5,701 b	8,492 a	12709 a	4055 a	4239 a
3	26,86 a	1,258 a	2,933 a	7,588 a	8249 a	4950 b	4766 a
4	27,57 a	1,255 a	5,717 b	8,925 a	8952 a	4335 ab	4220 a
5	30,71 b	1,208 a	2,961 a	10,329 a	8737 a	2105 c	2024 b
6	32,02 b	1,251 a	5,772 b	9,962 a	11638 a	1819 c	1696 b
7	31,23 b	1,266 a	3,010 a	8,615 a	9493 a	2673 c	2369 b
8	31,74 b	1,260 a	5,734 b	8,672 a	9130 a	2240 c	2035 b

OBS: Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Autor

Tabela 10 - Correlações do ensaio conduzido em Londrina, em 2011

	Umid.	Dens.	Veloc.	Prof.	Área Mob.	RP-7.5cm	RP-10cm	Fx	Fy
Umidade	1	0.01 ¹	0.02 ²	-0.10 ²	-0.22 ²	-0.75*²	-0.82*²	-0.51*²	0.68*¹
Densidade	0.01 ¹	1	0.05 ²	-0.47*²	-0.23 ²	0.09 ²	0.07 ²	0.09 ²	0.03 ¹
Velocidade	0.02 ²	0.05 ²	1	0.15 ²	0.16 ²	-0.25 ²	-0.15 ²	0.12 ²	0.06 ²
Profundidade	-0.10 ²	-0.47*²	0.15 ²	1	0.79*²	-0.17 ²	-0.02 ²	0.10 ²	-0.01 ²
Área Mob.	-0.22 ²	-0.23 ²	0.16 ²	0.79*²	1	-0.08 ²	0.03 ²	0.06 ²	-0.10 ²
RP-7.5cm	-0.75*²	0.09 ²	-0.25 ²	-0.17 ²	-0.08 ²	1	0.95*²	0.70*²	-0.86*²
RP-10cm	-0.82*²	0.07 ²	-0.15 ²	-0.02 ²	0.03 ²	0.95*²	1	0.77*²	-0.82*²
Fx	-0.51*²	0.09 ²	0.12 ²	0.10 ²	0.06 ²	0.70*²	0.77*²	1	-0.69*²
Fy	0.68*¹	0.03 ¹	0.06 ²	-0.01 ²	-0.10 ²	-0.86*²	-0.82*²	-0.69*²	1

*Correlações significativas a 5% de probabilidade; ¹Coeficiente de correlação de Pearson;

²Coeficiente de correlação de Spearman.

Fonte: Autor

O procedimento experimental adotado proporcionou duas condições de umidade distintas, com variação significativa entre os tratamentos em solo seco e úmido. A faixa de variação da umidade entre a condição seca e úmida foi em média 4,5%, que é muito próxima da “janela” ou intervalo ideal para a operação de plantio. Fora desse intervalo, a qualidade da operação é afetada negativamente.

O efeito esperado da densidade do solo não foi verificado neste experimento. Acredita-se que, como a densidade inicial do solo já era alta e típica das condições de plantio direto, o sobre tráfego com o trator não foi suficiente para o solo responder com a elevação da sua densidade.

Não foi observada diferença significativa entre as leituras de profundidade. A profundidade de operação da haste é, a princípio, regulada pelo implemento, mantendo-se em um valor constante. No entanto, as alterações no relevo podem provocar variações significativas na profundidade durante a operação. No caso deste experimento essas variações não foram significativas, mas a profundidade apresentou correlação significativa com a densidade (-0,47), indicando que as áreas mais densas podem ter contribuído para uma pequena elevação da haste sulcadora, reduzindo a profundidade.

A área de solo mobilizada também não apresentou variação significativa. Como a profundidade e a densidade também não variaram de forma significativa, então o efeito variação da umidade sobre o atrito interno do solo não foi suficiente para que a área mobilizada fosse afetada. Isto é confirmado pela matriz de correlação, que não apontou correlação significativa entre estes parâmetros. Além disso, a variância dos dados de área mobilizada e da profundidade foi aumentada devido a problemas

na determinação dos perfis dos sulcos, que aumentaram a variabilidade entres as leituras das subamostras, também repercutindo nos valores do CV do experimento, com 57,99% para a área de solo mobilizado e 23,09% para a profundidade. Apesar deste efeito não ser observado nos valores médios da Tabela 9, ele pode influenciar os resultados do teste de Tukey, reduzindo à significância da diferença entre às médias. No entanto, foi observada correlação significativa entre a área mobilizada e a profundidade (0,79), confirmando a grande influência da profundidade na área mobilizada, já observada em Mckyes e Ali (1977) e Mckyes e Desir (1984).

A velocidade foi bem controlada, apresentando diferença significativa entre os tratamentos. No entanto, esta não resultou em correlação significativa com a área mobilizada, mostrando que o aumento da inércia das partículas, descrito por Mckyes (1985), não chega a afetar os efeitos de atrito no solo.

Os índices de resistência à penetração analisados referem-se à profundidade média dos tratamentos, uma vez que é esta a faixa relevante para o estudo da frente de falha e da mobilização do solo. Nas Tabelas 8 e 9 pode-se observar que os índices variaram de forma bastante significativa entre os tratamentos em solo seco e úmido, indicando que houve diferença na resistência do solo ao cisalhamento, com correlação negativa significativa com a umidade do solo (-0,75 e -0,78). O fato dessa variação não ter se manifestado na área mobilizada pode significar que o efeito da variação da resistência do solo ao cisalhamento, representada pelos índices de resistência a penetração, foi mais influenciado pela variação da coesão do solo, e não tanto pelo seu atrito interno. É importante lembrar que no modelo da área do solo mobilizada descrito por McKyes, apenas o atrito interno do solo é considerado. A correlação negativa confirma que a resistência do solo ao cisalhamento diminuiu com a presença da umidade, que reduz a sua coesão e atrito interno.

Os resultados da análise de variância para os ensaios conduzidos em Londrina, em 2012, encontram-se descritos na Tabela 11, enquanto que os valores médios encontram-se na Tabela 12 e a matriz de correlações na Tabela 13. Neste ensaio, o pré-processamento dos dados, para a remoção de *outliers*, descartou 17 subamostras, que correspondem a 8,9% do total.

Tabela 11 - Resultados do teste F e coeficientes de variação, para o experimento conduzido em Londrina (solo argiloso), em 2012

Parâmetro	Fonte de Variação	GL	QM	F	p ¹	CV ² (%)
Umidade	Tratamento	7	17,11	24,09	0,0000 **	2,775
	Bloco	2	0,6871	0,9674	0,4041 ns	
	Erro	14	0,7103			
Densidade	Tratamento	7	0,003356	3,983	0,01336 *	2,152
	Bloco	2	0,005851	6,944	0,008034 **	
	Erro	14	0,0008426			
Velocidade	Tratamento	7	7,583	1215	0,0000 **	1,703
	Bloco	2	0,001277	0,2046	0,8174 ns	
	Erro	14	0,006243			
Profundidade	Tratamento	7	157,4	2,206	0,09845 ns	8,383
	Bloco	2	47,45	0,6649	0,5298 ns	
	Erro	14	71,35			
Área Mobilizada	Tratamento	7	399,9	1,787	0,1682 ns	13,42
	Bloco	2	474,2	2,119	0,1571 ns	
	Erro	14	223,8			
RP-10cm	Tratamento	7	4700480	40,87	0,0000 **	10,20
	Bloco	2	114738	0,997516	0,3936 ns	
	Erro	14	115024			
RP-12,5cm	Tratamento	7	3212126	52,55826	0,0000 **	9,964
	Bloco	2	123450	2,020	0,1695 ns	
	Erro	14	61116			

¹*significativo a 5% de probabilidade e **significativo a 1% pelo teste F.

² Coeficientes de variação do experimento.

Fonte: Autor

Tabela 12 - Resultados médios do experimento conduzido em Londrina (solo argiloso), em 2012

Trat.	Umidade (%)	Densidade (g.cm ⁻³)	Velocidade (km.h ⁻¹)	Profund. (cm)	Área Mob. (cm ²)	RP-10cm (MPa)	RP-12,5cm (MPa)
1	32,44 a	1,304 a	3,112 a	10,24 a	11115 a	1627 a	1537 a
2	31,85 a	1,334 ab	6,145 b	11,28 a	12160 a	1508 a	1481 a
3	33,03 a	1,390 b	3,177 a	9,81 a	9628 a	1436 a	1378 a
4	32,63 a	1,365 ab	6,099 b	10,00 a	10902 a	1503 a	1466 a
5	27,15 b	1,313 ab	3,150 a	10,86 a	12841 a	3959 b	3523 b
6	27,53 b	1,352 ab	6,121 b	10,00 a	12077 a	3760 b	3212 b
7	29,08 b	1,338 ab	3,174 a	9,18 a	10700 a	3650 b	3216 b
8	29,27 b	1,396 b	6,144 b	9,24 a	9732 a	4025 b	3586 b

OBS: Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Autor

Tabela 13 - Correlações do ensaio conduzido em Londrina, em 2012

	Umid.	Dens.	Veloc.	Prof.	Área Mob.	RP-10cm	RP-12,5cm	Fx	Fy
Umidade	1	0.07 ¹	-0.09 ²	0.04 ¹	-0.31 ¹	-0.89*¹	-0.90*¹	-0.54*¹	-0.15 ²
Densidade	0.07 ¹	1	0.30 ²	-0.55*¹	-0.70*¹	-0.01 ¹	-0.03 ¹	0.25 ¹	0.20 ²
Velocidade	-0.09 ²	0.30 ²	1	0.02 ²	-0.05 ²	0.11 ²	0.11 ²	0.23 ²	0.07 ²
Profundidade	0.04 ¹	-0.55*¹	0.02 ²	1	0.71*¹	-0.27 ¹	-0.24 ¹	-0.39 ¹	-0.23 ²
Área Mob.	-0.31 ¹	-0.70*¹	-0.05 ²	0.71*¹	1	0.16 ¹	0.19 ¹	-0.09 ¹	-0.24 ²
RP-10cm	-0.89*¹	-0.01 ¹	0.11 ²	-0.27 ¹	0.16 ¹	1	1.00*¹	0.74*¹	0.20 ²
RP-12,5cm	-0.90*¹	-0.03 ¹	0.11 ²	-0.24 ¹	0.19 ¹	1.00*¹	1	0.74*¹	0.25 ²
Fx	-0.54*¹	0.25 ¹	0.23 ²	-0.39 ¹	-0.09 ¹	0.74*¹	0.74*¹	1	0.36 ²
Fy	-0.15 ²	0.20 ²	0.07 ²	-0.23 ²	-0.24 ²	0.20 ²	0.25 ²	0.36 ²	1

*Correlações significativas a 5% de probabilidade; ¹Coeficiente de correlação de Pearson;

²Coeficiente de correlação de Spearman.

Fonte: Autor

Da mesma forma que no ensaio de 2011, pode-se observar que houve variação significativa da umidade entre os tratamentos seco e úmido. A faixa de variação média da umidade teve uma pequena diminuição, caindo para 4,2%.

Neste ensaio, o controle da densidade foi parcialmente bem sucedido, obtendo-se diferença significativa entre os tratamentos 1 e 2 e os tratamentos 3 e 4. No entanto, esse efeito não foi observado de forma clara, nos tratamentos 7 e 8, em relação aos tratamentos 6 e 7. Estes resultados tiveram como consequência a decisão, por parte da equipe envolvida no projeto FINEP/FAPEAGRO, por se alterar o planejamento de Londrina, em 2013, com a remoção do controle da densidade e deste como fator controlado. No entanto, foi observada correlação significativa entre a densidade e a profundidade (-0,55), e a densidade e a área mobilizada (-0,70). Da mesma forma que no ensaio de 2011, a densidade deve ter influenciado a profundidade de operação da haste, tornando-a menor em alguns momentos, com consequente influência na área mobilizada.

A influência direta da densidade na área mobilizada não pôde ser observada. Caso ela ocorresse, seria esperado o aumento da área mobilizada com o aumento da densidade, que elevaria o atrito interno do solo. No entanto, a correlação observada entre estes dois parâmetros foi negativa.

A profundidade não apresentou variação significativa entre os tratamentos, com consequente não variação na área mobilizada, repetindo o que ocorreu no experimento de 2011. Novamente, a profundidade apresentou correlação significativa com a área mobilizada (0,71).

Os índices de resistência à penetração novamente variaram de forma bastante significativa entre os tratamentos em solo seco e úmido, indicando que houve diferença na resistência do solo ao cisalhamento, que foi acompanhada de correlações significativas entre eles e a umidade (-0,89 e -0,90).

Os resultados da análise de variância para os ensaios conduzidos em Umuarama, em 2012, encontram-se descritos na Tabela 14, enquanto os valores médios encontram-se na Tabela 15 e a matriz de correlações na Tabela 16. Neste ensaio, o pré-processamento dos dados, para a remoção de *outliers*, descartou 29 subamostras, que correspondem a 15% do total.

Tabela 14 - Resultados do teste F e coeficientes de variação, para o experimento conduzido em Umuarama (solo arenoso), em 2012

Parâmetro	Fonte de Variação	GL	QM	F	p ¹	CV ² (%)
Umidade	Tratamento	7	7,473	3,770	0,01657 *	11,05
	Bloco	2	3,827	1,931	0,1818 ns	
	Erro	14	1,982			
Densidade	Tratamento	7	0,001254	2,402	0,07722 ns	1,376
	Bloco	2	0,001372	2,629	0,1073 ns	
	Erro	14	0,000522			
Velocidade	Tratamento	7	6,987	1795	0,0000 **	1,405
	Bloco	2	0,004922	1,264	0,3128 ns	
	Erro	14	0,003893			
Profundidade	Tratamento	2	6,748	0,05930	0,9427 ns	9,427
	Bloco	7	427,6	3,758	0,0168 *	
	Erro	14	113,8			
Área Mobilizada	Tratamento	7	6639521	3,260	0,02850 *	18,363
	Bloco	2	1467698	0,7206	0,5037 ns	
	Erro	14	2036778			
RP-10cm	Tratamento	7	180960	1,653	0,2005 ns	17,01
	Bloco	2	16963	0,1550	0,8579 ns	
	Erro	14	109473			
RP-12,5cm	Tratamento	7	221556	1,549	0,2299 ns	17,22
	Bloco	2	119778	0,8374	0,4534 ns	
	Erro	14	143033			

¹*significativo a 5% de probabilidade e **significativo a 1% pelo teste F.

² Coeficientes de variação do experimento.

Fonte: Autor

Tabela 15 - Resultados médios do experimento conduzido em Umuarama (solo arenoso), em 2012

Trat.	Umidade (%)	Densidade (g.cm ⁻³)	Velocidade (km.h ⁻¹)	Profund. (cm)	Área Mob. (cm ²)	RP-10cm (MPa)	RP-12,5cm (MPa)
1	11,14 a	1,670 a	3,083 ab	12,37 a	9022 ab	2263 a	2614 a
2	10,98 a	1,624 a	6,027 d	12,46 a	9713 b	2059 a	2222 a
3	12,00 a	1,688 a	3,113 b	12,32 a	8272 ab	2094 a	2281 a
4	11,19 a	1,667 a	6,012 d	12,33 a	7325 ab	2082 a	2351 a
5	13,85 a	1,660 a	2,913 a	9,55 a	5240 a	1762 a	2145 a
6	14,88 a	1,639 a	5,730 c	11,01 a	8767 ab	1479 a	1651 a
7	14,18 a	1,675 a	2,965 ab	10,23 a	7571 ab	1830 a	2096 a
8	13,73 a	1,660 a	5,680 c	10,25 a	6264 ab	1998 a	2213 a

OBS: Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Autor

Tabela 16 - Correlações do ensaio conduzido em Umuarama, em 2012.

	Umid.	Dens.	Veloc.	Prof.	Área Mob.	RP-10cm	RP-12,5cm	Fx	Fy
Umidade	1	-0.21 ¹	0.33 ²	0.37 ¹	-0.02 ¹	-0.34 ²	-0.45 ²	0.79*¹	0.93*¹
Densidade	-0.21 ¹	1	-0.08 ²	0.02 ¹	-0.06 ¹	0.25 ²	0.28 ²	-0.23 ¹	-0.03 ¹
Velocidade	0.33 ²	-0.08 ²	1	0.62*²	0.69*²	-0.35 ²	-0.34 ²	0.17 ²	0.26 ²
Profundidade	0.37 ¹	0.02 ¹	0.62*²	1	0.74*¹	-0.68*²	-0.60 ²	0.33 ¹	0.36 ¹
Área Mob.	-0.02 ¹	-0.06 ¹	0.69*²	0.74*¹	1	-0.54 ²	-0.51 ²	-0.05 ¹	-0.11 ¹
RP-10cm	-0.34 ²	0.25 ²	-0.35 ²	-0.68*²	-0.54 ²	1	0.96*²	0.00 ²	-0.23 ²
RP-12,5cm	-0.45 ²	0.28 ²	-0.34 ²	-0.60 ²	-0.51 ²	0.96*²	1	-0.10 ²	-0.33 ²
Fx	0.79*¹	-0.23 ¹	0.17 ²	0.33 ¹	-0.05 ¹	0.00 ²	-0.10 ²	1	0.67*¹
Fy	0.93*¹	-0.03 ¹	0.26 ²	0.36 ¹	-0.11 ¹	-0.23 ²	-0.33 ²	0.67*¹	1

*Correlações significativas a 5% de probabilidade; ¹Coefficiente de correlação de Pearson;

²Coefficiente de correlação de Spearman.

Fonte: Autor

Pode-se observar que houve variação significativa da umidade entre os tratamentos seco e úmido, de acordo com o teste F. No entanto, o teste de Tukey não confirma essa observação. Neste experimento, ocorreram problemas na determinação das leituras de umidade nos tratamentos de solo seco, que elevaram a variabilidade das leituras, além da sua perda de precisão, repercutindo no CV experimental, que em média foi três vezes mais elevado que o dos demais ensaios. Além disso, dada a sua granulometria, os solos arenosos possuem uma pequena capacidade de retenção e armazenamento de água, resultando em teores de umidade muito baixos, e menores diferenças de umidade entre as condições seca e úmida.

Neste ensaio, o controle da densidade não foi bem sucedido, o que se esperava, pois os solos arenosos são pouco suscetíveis à compactação, dada as

suas baixas coesões. Deste modo, o efeito do sobre tráfego do trator, não resultou em elevação na densidade do solo.

A área do solo mobilizada apresentou variação significativa, apesar da profundidade não ter apresentado. O teste de Tukey demonstra que a diferença significativa só ocorre entre a maior e a menor área observadas. No entanto, observa-se na Tabela 15, que o menor valor de área mobilizada ocorre juntamente com a menor profundidade, sendo observada correlação significativa entre a profundidade e a área mobilizada (0,74). Isto confirma a grande influência da profundidade na área mobilizada, observada em Mckyes e Ali (1977) e Mckyes e Desir (1984), também em solo arenoso.

Foram verificadas área de solo mobilizado menores neste experimento, se comparado ao experimento de Londrina, conduzido em 2012. As possíveis razões para isso serão discutidas no capítulo 5.4.2.

Foi observada correlação significativa entre a velocidade e a profundidade (0,62), que também resultou em correlação significativa entre a velocidade e a área mobilizada (0,69). Apesar de estes coeficientes apontarem para uma eventual influência direta da velocidade sobre a área mobilizada, isto não pode ser afirmado com certeza, pois na Tabela 15 pode-se observar que as variações de área mobiliada mais relevantes também vêm acompanhadas de variações de profundidade e não somente de velocidade.

Diferente do que ocorreu nos experimentos em solo argiloso, neste, os índices de resistência à penetração não apresentaram diferença significativa. Esse fato pode ser atribuído à baixa coesão do solo, com consequente baixa resistência ao cisalhamento, acompanhada da pouca variação da umidade, cuja diferença não foi significativa entre os tratamentos. A única correlação significativa foi observada para o índice de resistência à penetração, localizado a 10cm de profundidade, com a profundidade (-0,68), indicando que a haste sulcadora deve ter ficado menos profunda em regiões mais compactadas.

Os resultados a análise de variância para os ensaios conduzidos em Londrina, em 2013, encontram-se descritos na Tabela 17, enquanto os valores médios encontram-se na Tabela 18 e a matriz de correlações na Tabela 19. Neste ensaio, o pré-processamento dos dados, para a remoção de *outliers*, descartou 47 subamostras, que correspondem a 24% do total.

Tabela 17 - Resultados do teste F e coeficientes de variação, para o experimento conduzido em Londrina (solo argiloso), em 2013

Parâmetro	Fonte de Variação	GL	QM	F	p ¹	CV ² (%)
Umidade	Tratamento	5	30,70	36,00	0,0000 **	3,221
	Bloco	3	0,1500	0,1759	0,9110 ns	
	Erro	15	0,8528			
Velocidade	Tratamento	5	19,47	4486	0,0000 **	1,152
	Bloco	3	0,0140	3,234	0,05229 ns	
	Erro	15	0,0043			
Profundidade	Tratamento	5	600,8	5,240	0,005572 **	17,17
	Bloco	3	839,8	7,325	0,002990 **	
	Erro	15	114,6			
Área Mobilizada	Tratamento	5	3339645	4,551	0,01004 **	20,33
	Bloco	3	4338189	5,912	0,007176 **	
	Erro	15	733774			
RP-5cm	Tratamento	5	9972253	29,93	0,0000 **	22,66
	Bloco	3	207666	0,6232	0,6109 ns	
	Erro	15	333220			
RP-7,5cm	Tratamento	5	9915470	37,66	0,0000 **	17,25
	Bloco	3	77545	0,2945	0,8287 ns	
	Erro	15	263272			

¹*significativo a 5% de probabilidade e **significativo a 1% pelo teste F.

² Coeficientes de variação do experimento.

Fonte: Autor

Tabela 18 - Resultados médios do experimento conduzido em Londrina (solo argiloso), em 2013

Trat.	Umidade (%)	Velocidade (km.h ⁻¹)	Profundidade (cm)	Área Mob. (cm ²)	RP-5cm (MPa)	RP-7,5cm (MPa)
1	26,63 a	3,094 a	52,39 ab	3476 ab	3595 a	3878 a
2	31,22 b	3,103 a	71,13 a	4834 ab	1200 b	1549 b
3	26,23 a	6,081 b	46,24 b	3016 b	4242 a	4630 a
4	30,82 b	6,033 b	73,17 a	5168 a	1149 b	1580 b
5	25,63 a	8,002 c	56,25 ab	3747 ab	4088 a	4659 a
6	31,47 b	7,992 c	75,04 a	5039 a	1015 b	1553 b

OBS: Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Autor

Tabela 19 - Correlações do ensaio conduzido em Londrina, em 2013

	Umid.	Prof.	Veloc.	Área Mob.	RP-5 cm	RP-7,5 cm	Fx	Fy
Umidade	1	0.66^{*1}	0.00 ¹	0.50^{*2}	-0.95^{*1}	-0.96^{*1}	0.27 ¹	-0.85^{*1}
Profundidade	0.66^{*1}	1	-0.07 ¹	0.94^{*2}	-0.63^{*1}	-0.61^{*1}	0.38 ¹	-0.28 ¹
Velocidade	0.00 ¹	-0.07 ¹	1	-0.09 ²	0.03 ¹	0.05 ¹	0.36 ¹	-0.08 ¹
Área Mob.	0.50^{*2}	0.94^{*2}	-0.09 ²	1	-0.59^{*2}	-0.55^{*2}	0.36 ²	-0.28 ²
RP-5cm	-0.95^{*1}	-0.63^{*1}	0.03 ¹	-0.59^{*2}	1	0.98^{*1}	-0.26 ¹	0.86^{*1}
RP-7,5cm	-0.96^{*1}	-0.61^{*1}	0.05 ¹	-0.55^{*2}	0.98^{*1}	1	-0.24 ¹	0.87^{*1}
Fx	0.27 ¹	0.38 ¹	0.36 ¹	0.36 ²	-0.26 ¹	-0.24 ¹	1	-0.04 ¹
Fy	-0.85^{*1}	-0.28 ¹	-0.08 ¹	-0.28 ²	0.86^{*1}	0.87^{*1}	-0.04 ¹	1

*Correlações significativas a 5% de probabilidade; ¹Coeficiente de correlação de Pearson;

²Coeficiente de correlação de Spearman.

Fonte: Autor

Neste experimento, como em todos os demais, a variação da umidade foi significativa. O que o diferenciou dos demais é que nele foi observada a única correlação significativa entre a umidade e a área mobilizada, com o valor 0,50.

Ocorreram problemas na regulação da profundidade da haste sulcadora, resultando em variação significativa da profundidade entre os experimentos em solo seco e solo úmido, além de variações significativas entre os blocos e correlação significativa entre a umidade e a profundidade (0,66). Esses problemas também fizeram com que aparecesse correlação significativa entre a umidade e área mobilizada, com um valor positivo (0,50). Esta correlação não se deve ao efeito da variação da umidade do solo, pois um incremento na umidade resultaria em um decaimento do ângulo de atrito interno do solo, o que também reduziria a área mobilizada, com consequente correlação negativa. Por outro lado, a falha na regulação resultou em profundidades menores nos tratamentos com menor umidade. Isto resulta em correlação positiva, pois a diminuição da profundidade também provoca a diminuição da área mobilizada.

Acompanhando o comportamento da profundidade, a área mobilizada também apresentou diferença significativa entre os tratamentos e entre as médias, apresentando correlação significativa com a profundidade (0,94).

Assim como nos demais experimentos conduzidos em solo argiloso, os índices de resistência à penetração apresentaram variações muito significativas, resultado da sua maior coesão e maior influência da umidade em sua resistência ao cisalhamento. Estes índices também apresentaram correlação significativa com a umidade (-0,95 e -0,96). A suas correlações significativas com a profundidade e área

mobilizada foram desconsideradas, dados os problemas com o controle da profundidade.

O menor valor observado nos experimentos conduzidos no IAPAR foi de 18 cm², sendo este valor coerente com a hipótese proposta nesta tese

Os resultados das análises concluídas até o momento concordam com os resultados dos trabalhos de Mckyes e Ali (1977) e Liu et al. (2008) no que diz respeito às relações entre os parâmetros levantados e área de solo mobilizado. Além disso, eles auxiliaram na definição dos parâmetros do modelo proposto por esta pesquisa e para a realização da prova de conceito.

4.2 Estudo da função *AREF*

Para a análise da *AREF* utilizando os dados experimentais, foram seguidos os passos descritos por Sakai; Andrade-Sanches e Upadhyaya (2005). Antes de se analisar o comportamento dos parâmetros da função, foi verificado se o padrão de distribuição dos dados do IAPAR, bem como das diferenças utilizadas para a obtenção dos parâmetros, eram compatíveis com as premissas utilizadas pelos autores.

A distribuição da densidade de probabilidade para todos os dados de força horizontal e vertical adquiridos nas parcelas experimentais se aproximam de uma distribuição normal, da mesma forma que em Araújo et al. (2012), reforçando a hipótese inicial de tratar-se de um processo estocástico normal, o que, segundo Sakai; Andrade-Sanches e Upadhyaya (2005) é consequência dos muitos graus de liberdade para o movimento das partículas do solo. A Figura 38 e a Figura 39 ilustram a distribuição de densidade de probabilidade para as forças horizontal e vertical em uma das parcelas experimentais, sendo que situações muito similares são observadas em todas as demais parcelas, nos demais experimentos.

Figura 38 - Histograma da série temporal de esforços horizontais atuantes na haste sulcadora

Fonte: Autor

Figura 39 - Histograma da série temporal de esforços verticais atuantes na haste sulcadora

Fonte: Autor

Da mesma forma, os gráficos da Figura 40 a Figura 43 apresentam a distribuição de densidade de probabilidade para o tratamento T1 do ensaio realizado em Londrina em 2013, considerando o atraso de tempo (τ) igual a um intervalo de tempo ($\tau = Zt$) entre duas leituras consecutivas usadas para cálculo da diferença entre dois valores da série temporal, para valores de Zt de 0,01, 0,02, 0,05 e 0,1 s respectivamente. Comportamento similar ao descrito por Sakai; Andrade-Sanches e Upadhyaya (2005) foi identificado nos dados adquiridos, ou seja, à medida que se aumentou o valor de τ (atraso de tempo entre duas medições consecutivas de força) a distribuição se espalhou e se achatou, com aumento do desvio padrão. Também

se observou que os dados das diferenças se aproximaram mais a uma distribuição normal típica.

Figura 40 - Histograma da diferença entre dois valores consecutivos espaçados um período de 0,01s, obtidos a partir dos esforços horizontais atuantes na haste sulcadora, referentes a uma parcela do experimento

Fonte: Autor

Figura 41 - Histograma da diferença entre dois valores consecutivos espaçados um período de 0,02s, obtidos a partir dos esforços horizontais atuantes na haste sulcadora, referentes a uma parcela do experimento

Fonte: Autor

Figura 42 - Histograma da diferença entre dois valores consecutivos espaçados um período de 0,05s, obtidos a partir dos esforços horizontais atuantes na haste sulcadora, referentes a uma parcela do experimento

Fonte: Autor

Figura 43 - Histograma da diferença entre dois valores consecutivos espaçados um período de 0,10s, obtidos a partir dos esforços horizontais atuantes na haste sulcadora, referentes a uma parcela do experimento

Fonte: Autor

As matrizes de correlação descritas no capítulo da metodologia e nos resultados dos ensaios também incluem os parâmetros da *AREF* e estão descritas na Tabela 20, para Londrina em 2011 e na Tabela 21 para os demais ensaios.

Nos três primeiros ensaios foram utilizados os dados do Anel Octogonal. Em Londrina e Umuarama, em 2012, não foram utilizadas as leituras de F_y , pois a partir de Umuarama 2013 foi incluído o DME, cujo peso próprio interfere nas leituras do Anel no eixo vertical. No ensaio de Londrina, em 2013, foram utilizados os dados do

DME, de modo a se também analisar o comportamento da *AREF* no eixo vertical neste ensaio.

Tabela 20 - Correlações com os parâmetros da *AREF* para o ensaio conduzido em Londrina, em 2011

		Londrina 2011			
		Fx		Fy	
		α'	β'	α'	β'
<i>Fx</i>	α'	1	-0.17 ¹	0.98*¹	-0.44*²
	β'	-0.17 ¹	1	-0.32 ¹	0.68*²
<i>Fy</i>	α'	0.98*¹	-0.32 ¹	1	-0.60*²
	β'	-0.44*²	0.68*²	-0.60*²	1
<i>Umidade</i>		-0.67*¹	-0.24 ¹	-0.62*²	0.14 ²
<i>Densidade</i>		0.01 ¹	0.17 ¹	0.03 ¹	-0.07 ²
<i>Velocidade</i>		0.37 ²	-0.78*²	0.50*²	-0.73*²
<i>Profundidade</i>		0.03 ²	-0.10 ²	0.03 ²	-0.10 ²
<i>Área Mobilizada</i>		0.09 ²	-0.08 ²	0.09 ²	-0.21 ²
<i>RP-7,5cm</i>		0.67*²	0.48*²	0.53*²	0.18 ²
<i>RP-10cm</i>		0.74*²	0.42 ²	0.61*²	0.07 ²
<i>Fx</i>		0.86*²	0.14 ²	0.81*²	-0.19 ²
<i>Fy</i>		-0.72*¹	-0.24 ¹	-0.64*¹	0.00 ²

*Correlações significativas a 5% de probabilidade; ¹Coefficiente de correlação de Pearson;

²Coefficiente de correlação de Spearman.

Fonte: Autor

Tabela 21 - Correlações com os parâmetros da *AREF* para os ensaios conduzidos em Londrina e Umuarama, em 2012 e 2013

		Londrina 2012		Umuarama 2012		Londrina 2013			
		Fx		Fx		Fx		Fy	
		α'	β'	α'	β'	α'	β'	α'	β'
<i>Fx</i>	α'	1	-0.59*²	1	-0.31 ¹	1	-0.70*²	0.91*²	-0.65*²
	β'	-0.59*²	1	-0.31 ¹	1	-0.70*²	1	-0.58*²	0.90*²
<i>Fy</i>	α'	-	-	-	-	0.91*²	-0.58*²	1	-0.55*¹
	β'	-	-	-	-	-0.65*²	0.90*²	-0.55*¹	1
<i>Umidade</i>		-0.46*¹	0.05 ²	0.30 ¹	0.54 ¹	-0.35 ²	0.77*²	-0.34 ¹	0.82*¹
<i>Densidade</i>		0.30 ¹	-0.09 ²	-0.44 ¹	0.25 ¹	-	-	-	-
<i>Velocidade</i>		0.80*²	-0.67*²	0.76*²	-0.49 ²	0.68*²	-0.35 ²	0.75*¹	-0.42 ¹
<i>Profundidade</i>		-0.17 ¹	-0.35 ²	0.40 ¹	0.11 ¹	-0.28 ²	0.71*²	-0.12 ¹	0.55*¹
<i>Área Mobilizada</i>		0.03 ¹	-0.20 ²	0.35 ¹	-0.26 ¹	-0.27 ²	0.66*²	-0.22 ²	0.56*¹
<i>RP-5cm</i>		-	-	-	-	0.52*²	-0.79*²	0.37 ¹	-0.80*¹
<i>RP-7,5cm</i>		-	-	-	-	0.54*²	-0.85*²	0.40 ¹	-0.83*¹
<i>RP-10cm</i>		0.52*¹	0.10 ²	-0.34 ²	0.09 ²	-	-	-	-
<i>RP-12,5cm</i>		0.53*¹	0.08 ²	-0.34 ²	0.03 ²	-	-	-	-
<i>Fx</i>		0.67*¹	0.13 ²	0.22 ¹	0.68*¹	0.40 ²	0.23 ²	0.50*¹	0.16 ¹
<i>Fy</i>		0.13 ²	0.34 ²	0.32 ¹	0.42 ¹	0.37 ²	-0.60*²	0.43 ¹	-0.65*¹

*Correlações significativas a 5% de probabilidade; ¹Coefficiente de correlação de Pearson;

²Coefficiente de correlação de Spearman.

Fonte: Autor

Os parâmetros da *AREF* apresentaram correlações significativas com a umidade, velocidade de operação, resistência à penetração e médias de força, em todos os ensaios.

Em relação às correlações significativas entre a umidade e os parâmetros da *AREF*, essa influência foi mais predominante no α' , em todos os experimentos com exceção de Londrina em 2013. O α' é o coeficiente apontado por Sakai; Andrade-Sanches e Upadhyaya (2005) para a melhor representação do efeito da umidade. No entanto, no ensaio de Londrina, em 2013, foi observado um comportamento diferente, apresentando correlações significativas para o β' (0,77 e 0,82) em lugar do α' . Neste experimento, as profundidades de trabalho mais rasas resultaram em um comportamento diferenciado, tendo-se em vista a maior influência da compactação, que em sistema de plantio direto é mais superficial, e a consequente maior variação da umidade. A menor profundidade fez com que os parâmetros da *AREF* apresentassem correlações significativas com muitos dos parâmetros mensurados, inclusive entre si. Essas correlações devem ter sido significativamente influenciadas pelas variações de profundidade entre os tratamentos em solo seco e úmido. Trata-se de um efeito indesejável, pois faz com que os valores de α' e β' sofram a influência de muitos fatores, agregando muito ruído aos seus resultados.

As correlações negativas, observadas para os α' nos ensaios realizados em Londrina, mostram uma relação inversa entre este parâmetro e a umidade. Este comportamento coincide com o esperado. O α' está diretamente relacionado ao desvio padrão da série temporal de forças. Portanto, é de se esperar em um solo com maior umidade que a amplitude das flutuações da força seja menor, tendo-se em vista a menor coesão do solo e a sua menor resistência ao cisalhamento.

Não foram observadas correlações significativas com a umidade no experimento de Umuarama, sendo que neste ocorreram problemas na determinação dos valores deste parâmetro.

Os ensaios também mostraram grande influência da velocidade nos parâmetros da *AREF*, com correlações entre 0,5 e 0,8. Tal fato ocorre, pois a velocidade de operação define o período de tempo entre os ciclos do movimento das forças de corte do solo. Mas, conforme observado por Sakai; Andrade-Sanches e Upadhyaya (2005), isto não implica em alteração do perfil de corte do solo promovido pela haste sulcadora, cujo período espacial (ciclos.m^{-1}) não se altera com a variação da velocidade. Isto também pode ser observado nas matrizes de

correlação dos experimentos, na qual não se observa correlação significativa entre a área de solo mobilizada e a velocidade, com exceção do ensaio de Londrina, em 2013, no qual ocorreram problemas com o controle da profundidade de operação. No entanto, a alteração no período de tempo entre os ciclos faz com que os valores de α' e β' da *AREF* se alterem com a velocidade.

Na condição de solo argiloso, em Londrina, o índice de resistência à penetração apresentou correlação significativa com os parâmetros da *AREF*, mostrando que eles são influenciados pelo comportamento de resistência do solo ao cisalhamento. Essa observação justifica a influência da umidade sobre α' e β' , pois ela define tanto a coesão do solo quanto o seu atrito interno.

Da mesma forma, observa-se não haver correlação significativa entre a resistência à penetração e os parâmetros da *AREF* para a condição de solo arenoso, representada pelo ensaio de Umuarama. Neste caso, à baixa coesão, característica em solos arenosos, resultou em uma leitura da resistência a penetração pouco sensível às variações de umidade do experimento.

No ensaio de Londrina, realizado em 2013, também foram observadas correlações significativas entre o β' e as leituras de profundidade do sulco e área mobilizada (0,71 e 0,55). No entanto, esse efeito foi resultante do problema no controle da profundidade de operação da haste, resultando em sulcos mais rasos e com muita variação, interferindo nos resultados da *AREF*.

A correlação com os valores médios de força não se manteve significativa em todos os experimentos. Os valores médios de força, também são fortemente influenciados pelo comportamento de resistência do solo ao cisalhamento, razão da existência de correlação significativa com os parâmetros da *AREF*. No entanto, trata-se de parâmetros sem grande significado para a análise da *AREF*, tendo-se em vista que esta reflete o comportamento dinâmico do solo, e não o estático.

A análise da distribuição espacial dos parâmetros da *AREF* possibilitou verificar não só a relação de cada parâmetro com os parâmetros do solo, mas também a informação resultante da análise conjunta de α' e β' . Nesta primeira análise foram combinados os ensaios de Londrina e Umuarama realizados em 2012, sendo utilizados dados provenientes do Anel Octogonal, sensor comum aos dois ensaios. Estes ensaios representam condições de solo muito distintas, um solo muito argiloso e outro muito arenoso, tornando os resultados mais abrangentes.

O ensaio de Londrina, realizado em 2011, não foi aproveitado devido à falta de precisão nas leituras da área de solo mobilizado. No ensaio realizado em Londrina, em 2013, foram utilizados os dados do DME, e o planejamento experimental foi alterado, sendo este ensaio analisado separadamente.

A Figura 44, apresenta os parâmetros da *AREF* representando cada uma das 48 parcelas avaliadas nos experimentos, 24 para cada tipo de solo, enquanto que a Figura 45 apresenta os seus valores médios.

Figura 44 - Distribuição dos parâmetros da *AREF* para os ensaios de Londrina 2012 (Argiloso) e Umuarama 2012 (Arenoso)

OBS. Os rótulos das legendas representam: S=seco, U=úmido, N=Normal ou sem sobre tráfego, C=compactado ou com sobre tráfego, 3=3kmh, 6=6kmh.

Fonte: Autor

Pode-se observar na Figura 44 que os pontos descritos pelos valores de β' e α' formam aglomerados, segundo os tratamentos, mas com alguma sobreposição entre eles, principalmente no solo arenoso. Essa característica dificulta o aproveitamento destes parâmetros como entradas em uma lógica computacional, em especial as Redes Neurais Artificiais (ANN), pois ocorrem situações onde uma mesma entrada resulta em duas saídas diferentes. Apesar de não impossibilitar o seu uso, ela reduz o desempenho do seu algoritmo de treinamento. Este efeito é bastante agravado, quando se considera como série temporal para o cálculo da *AREF* menores

conjuntos de dados, como o intervalo de 3 m representado por cada subamostra. Nesta situação, diferente de uma parcela que possui 24 m, representada no gráfico, a variabilidade dos parâmetros da *AREF* aumenta significativamente, formando aglomerados com elevada sobreposição entre os diferentes tratamentos. Por outro lado, comportamento médio de cada tratamento mostra a ocorrência de padrões muito importantes.

No ensaio de Londrina (argiloso) a maior resistência do solo ao cisalhamento provoca variações mais sensíveis nos parâmetros da *AREF*, resultando em pontos mais espaçados na Figura 45.

Figura 45 - Distribuição dos valores médios da função *AREF* para os ensaios de Londrina 2012 (Argiloso) e Umuarama 2012 (Arenoso)

OBS. Os rótulos dos pontos representam: S=seco, U=úmido, N=Normal ou sem sobre tráfego, C=compactado ou com sobre tráfego, 3=3kmh, 6=6kmh.

Fonte: Autor

O aumento da velocidade eleva a variabilidade das leituras de força, devido à ação inercial das partículas do solo que estão sendo mobilizadas, bem como o aumento da energia envolvida dado o aumento das forças de reação, além da elevação das frequências temporais envolvidas no mecanismo de falha do solo e das vibrações provenientes da ferramenta e de todo o implemento. Ao mesmo tempo, a manutenção da mesma taxa de aquisição do “datalogger” reduz o número de leituras envolvidas nos cálculos da *AREF*, na medida em que a velocidade

aumenta, com consequente aumento nos valores calculados para os seus desvios padrões.

A umidade influencia a resistência do solo ao cisalhamento e, consequentemente, a amplitude das flutuações nas leituras de força, influenciando os valores dos desvios padrões calculados pela *AREF*. Da mesma forma a densidade também influencia a resistência do solo ao cisalhamento. Como resultado, observa-se um padrão na distribuição dos pontos em ambos os ensaios, sendo este padrão relacionado aos fatores controlados em cada tratamento.

Pode-se observar que o efeito da velocidade resulta em diferentes faixas para os valores de α' , bem como em uma redução em todos os valores de β' .

Quanto ao efeito da umidade, este também define diferentes faixas para o α' , e uma redução nos valores médios de β' nos tratamentos com umidade mais elevada, com a diferença do efeito da umidade sobre os parâmetros da *AREF* ser bem menor que o da velocidade. O efeito da densidade resultou no mesmo comportamento para os tratamentos em solo argiloso e arenoso úmido, diferindo nos tratamentos em solo arenoso seco.

A razão da divergência no padrão de comportamento dos tratamentos com densidades diferentes, na condição de solo arenoso seco, observados na Figura 45, pode ser explicada se for levado em consideração a forma como foi simulado o efeito da densidade nos tratamentos. Esta se fez com o tráfego do trator com a sua roda passando por sobre a parcela. Em solos argilosos, esse tráfego pode elevar o nível de compactação do solo, dado a sua maior coesão. No entanto, em solos arenosos, nos quais a coesão é menor, o tráfego pode não necessariamente elevar a densidade do solo. Nestes solos, efeito do tráfego associado ao formato do pneu (com travas), pode eventualmente provocar o efeito oposto, quebrando a estrutura do solo e reduzindo a sua resistência ao cisalhamento nas camadas mais superficiais.

No ensaio realizado em Londrina, em 2013, a Figura 46 e a Figura 47 apresentam a distribuição dos valores dos parâmetros da *AREF* para todas as 24 parcelas do experimento. Cada parcela é representada por um ponto descrevendo um par de valores de β' e α' . O gráfico da Figura 46 apresenta os dados obtidos a partir dos esforços na direção horizontal, enquanto que o gráfico da Figura 47 apresenta os dados obtidos a partir dos esforços na direção vertical.

Figura 46 - Distribuição dos parâmetros da AREF, obtidos a partir dos esforços horizontais atuantes na haste, em função da umidade do solo e velocidade de operação

OBS. Os rótulos das legendas representam: U1=úmido, U2=seco, V1=3km.h⁻¹, V2=6km.h⁻¹, V3=8km.h⁻¹. As setas indicam o efeito do aumento da velocidade nos parâmetros da AREF.

Fonte: Autor

Figura 47 - Distribuição dos parâmetros da AREF, obtidos a partir dos esforços verticais atuantes na haste, em função da umidade do solo e velocidade de operação

OBS. Os rótulos das legendas representam: U1=úmido, U2=seco, V1=3km.h⁻¹, V2=6km.h⁻¹, V3=8km.h⁻¹. As setas indicam o efeito do aumento da velocidade nos parâmetros da AREF.

Fonte: Autor

Os padrões de comportamento dos parâmetros da *AREF* neste ensaio diferem dos observados nos ensaios de Londrina e Umuarama, em 2012, dadas as profundidades mais rasas, bem como as diferenças no planejamento experimental, que não tem mais a densidade como um fator controlado.

O efeito da velocidade de elevar o α' e reduzir o β' é análogo ao observado anteriormente, ocorrendo pelos mesmos motivos. Pode-se observar a orientação dos pontos definida pela velocidade de operação, sendo essa observação mais nítida nos dois agrupamentos da Figura 46 e no agrupamento de solo úmido da Figura 47.

No que se refere o efeito da umidade, a maior variabilidade das leituras não permite uma distinção entre os valores de α' para as diferentes umidades. A razão disto deve-se aos problemas no controle da profundidade, que ocorreram neste ensaio. O efeito da umidade pode ser observado no β' , formando dois agregados, um para cada condição de umidade do solo.

Também se pode observar menor dispersão entre os pontos para a condição de solo úmido em relação ao solo seco, o que pode ser explicado pelo comportamento da coesão que aumenta com a redução da umidade, fazendo com que o solo falhe em blocos maiores, resultando em maior variabilidade da série temporal dos esforços atuantes na haste em ambas as direções, horizontal e vertical.

A análise da *AREF* demonstra haver um grande potencial de uso desta função como ferramenta para a análise das condições de resistência do solo ao cisalhamento. A distribuição espacial dos seus parâmetros fornece mais informações do que o índice de resistência à penetração. A prova disso é a capacidade de se distinguir entre os diferentes tratamentos de umidade e densidade em solo argiloso. A *AREF* também foi capaz de distinguir o efeito da umidade no ensaio de Umuarama (arenoso), situação na qual o índice de resistência à penetração não apresentou correlação significativa.

No entanto, os padrões de comportamento dos parâmetros da *AREF* são resultados obtidos de forma experimental, o que limita a sua aplicação. A *AREF* ainda carece de estudos mais aprofundados de modo a se estabelecer relações mais sólidas com a teoria de mecânica dos solos. Devido a isso, e ao fato da área mobilizada do solo ser influenciada apenas pelo ângulo de atrito interno, e não pela resistência ao cisalhamento, seu uso como entrada para o modelo em lógicas

computacionais foi descartado. No entanto, os resultados da sua análise forneceram informações relevantes ao processo de construção do modelo.

4.3 Modelo *fuzzy*

4.3.1 Modelo de predição do ângulo de atrito interno do solo

O modelo foi construído com base no conhecimento especialista, obtido a partir da teoria de mecânica dos solos e da análise de trabalhos da literatura. A definição das funções de pertinência considerou os fundamentos da teoria de mecânica dos solos, bem como o comportamento dos dados de experimentos descritos na literatura. Estes experimentos apresentaram grande variabilidade e valores que a princípio parecem contraditórios. Isto foi resultado da complexidade do comportamento mecânico do solo, que torna a resistência ao cisalhamento dependente de vários fatores tais como, tamanho de partículas (representado de forma aproximada pelo teor de argila), presença de água, densidade, formato das partículas, composição mineral, teor de matéria orgânica, dentre outros. Além disso, os trabalhos não utilizaram as mesmas metodologias para a determinação do ângulo de atrito interno do solo. Neste sentido, pequenas diferenças como o método de extração da água durante a aplicação da carga normal, ou a velocidade de aplicação da carga, dentre outros, podem também provocar variações.

Diante disto, a modelagem do ângulo de atrito interno do solo apresenta incertezas e ambiguidades, tornando-a uma boa candidata à modelagem *fuzzy*. Neste sentido, os resultados dos experimentos descritos na literatura serviram como um referencial indicando, não os valores exatos, mas as tendências que estes apresentam.

Os melhores resultados encontrados na literatura, relacionando o ângulo de atrito interno do solo com o teor de argila, são os de Silva e Carvalho (2007) e Silva et al. (2004), e são apresentados na Figura 48 e Figura 49. Observam-se as relações entre os efeitos de diferentes teores de argila sobre o ângulo de atrito interno do solo, em diferentes condições de umidade.

Figura 48 - Resultados experimentais descrevendo a relação entre o ângulo de atrito interno do solo e o teor de argila, em diferentes condições de umidade (descritas em g.g^{-1})

Fonte: Silva e Carvalho (2007)

Figura 49 - Resultados experimentais descrevendo a relação entre o ângulo de atrito interno do solo e o teor de argila, em diferentes condições de umidade (descritas em g.g^{-1})

Fonte: Silva et al. (2004)

O trabalho de Silva e Carvalho (2007) apresentou resultados quase lineares nos ensaios com os dois maiores teores de umidade. A condição com menor linearidade ocorreu na umidade de $0,07 \text{ g.g}^{-1}$, que corresponde a uma situação de solo muito seco, abaixo do limite adequado para o plantio. O trabalho de Silva et al. (2004) apresentou resultados não lineares, mas com um comportamento diferente, no qual as amostras com teor intermediário de argila apresentaram maior ângulo de

atrito interno, o que pode ter sido efeito da densidade, que também foi maior nestas amostras.

O que se pôde observar de comum aos dois trabalhos foi a não ocorrência de regiões de saturação e a tendência de uma maior taxa de variação do ângulo de atrito interno do solo nos menores teores de argila.

Para representar essa tendência, se fez o uso de funções de pertinência triangulares, uma vez que se trata de um fenômeno físico contínuo. As funções apresentam maior concentração nos menores teores de argila, para representar a não linearidade observada. A Figura 50 mostra essas funções. Nela, pode-se observar a função de pertinência que representa a condição média, identificada pela letra M, deslocada para os valores mais baixos, apresentando pertinência 1 para o teor de argila de 40%. As funções para as condições baixa (B) e alta (A) apresentam pertinência 1 nos limites do universo de discurso, evitando que a resposta do modelo se deforme nas situações mais externas.

Figura 50 - Funções de pertinência para o teor de argila do solo

Fonte: Autor

As relações entre teor de argila, umidade e ângulo de atrito interno estão representadas na Figura 51 e na Figura 52, também obtidas com os dados de Silva e Carvalho (2007) e Silva et al. (2004). Observa-se a grande variabilidade dos

resultados, o que ocorre também nos outros trabalhos da literatura (Tabela 26, anexo).

Figura 51 - Resultados experimentais descrevendo a relação entre a umidade e o ângulo de atrito interno do solo, em diferentes teores de argila (descritos em percentuais)

Fonte: Silva e Carvalho (2007)

Figura 52 - Resultados experimentais descrevendo a relação entre a umidade e o ângulo de atrito interno do solo, em diferentes teores de argila (descritos em percentuais)

Fonte: Silva et al. (2004)

No trabalho de Silva e Carvalho (2007) observam-se menores ângulos de atrito interno nos solos mais argilosos, o que os autores atribuem ao revestimento das partículas de areia com argila, que neste caso agiu como lubrificante reduzindo o atrito. Nestes experimentos as amostras foram coletadas em um mesmo local, em

horizontes diferentes. Os teores de argila aumentaram gradativamente nos horizontes mais profundos.

No trabalho de Silva et al. (2004) foram coletadas amostras de solo de diferentes locais, sob diferentes sistemas de cultivo. No entanto, este trabalho apresentou maior semelhança no comportamento das diferentes amostras de solo. Também pôde-se observar uma maior influência da umidade sobre o ângulo de atrito interno na amostra de solo mais argiloso, concordando com o descrito pela teoria de mecânica dos solos. Nestes experimentos, todas as amostras foram coletadas à profundidade entre 0 e 5 cm.

Nestes trabalhos, nota-se a tendência à ocorrência de uma região de saturação, na qual a taxa de variação do ângulo de atrito interno do solo em função da densidade reduz sensivelmente, ocorrendo nos intervalos inferior e superior do universo de discurso da umidade. Para representar essa tendência foram utilizadas funções de pertinência trapezoidais nesses intervalos. No intervalo central, no qual a variação é maior e não há regiões estacionárias, foi utilizada uma função de pertinência triangular.

Na Figura 53 estão descritas as duas funções de pertinência trapezoidais, representando as condições baixa (B) e alta (A), bem como a função de pertinência triangular, representando a condição média (M). Pode-se observar que as funções não estão centralizadas dentro do universo de discurso, concentrando-se no intervalo inferior deste, o que reproduz o observado nos dados experimentais.

Figura 53 - Funções de pertinência para a umidade do solo

Fonte: Autor

A análise dos trabalhos da literatura indica que o aumento da densidade eleva o ângulo de atrito interno do solo. Efeito similar ocorre no gráfico espaço - estado da *AREF* (Figura 45) para a condição de solo argiloso, onde se pode observar o aumento da resistência do solo ao cisalhamento com o aumento da densidade. No entanto, os ensaios não permitem visualizar de forma quantitativa como essa relação se processa. O que pode se observar em Silva e Carvalho (2007) e Silva et al. (2004) é que a influência da densidade é menor se comparada a da umidade ou do teor de argila. Deste modo, foi escolhida uma abordagem mais conservadora, dividindo-se o universo de discurso da umidade duas funções de pertinência triangulares igualmente espaçadas. Estas funções estão descritas na Figura 54, representando as condições de baixa (B) e alta (A) densidades, com pertinências 1 no início e no final do universo de discurso, respectivamente.

Figura 54 - Funções de pertinência para a densidade do solo

Fonte: Autor

A definição das funções de pertinência para o parâmetro de saída (ângulo de atrito interno do solo) resultou da própria formulação das regras, feita a partir do conhecimento da teoria de mecânica dos solos, e do entendimento a cerca da relevância de cada parâmetro de entrada na definição do parâmetro de saída. Para a representação adequada das regras entendeu-se como necessárias 5 funções de pertinência, sendo estas triangulares e igualmente espaçadas. As 5 funções de pertinência, que dividem o universo de discurso do parâmetro de saída, estão representadas na Figura 55. Foram adotados como valores linguísticos: baixo (B), médio baixo (MB), médio (M), médio alto (MA) e alto (A).

Figura 55 - Funções de pertinência para o ângulo de atrito interno do solo

Fonte: Autor

As regras foram obtidas pela combinação dos conjuntos *fuzzy* dos parâmetros de entrada. Para cada combinação foi definido um determinado ângulo de atrito interno do solo. As regras para a condição de solo arenoso com alta umidade não foram definidas, visto tal condição não ocorrer no campo.

O modelo utilizou 8 regras descritas a seguir e resumidas na Tabela 22.

A formulação das regras teve por base o conhecimento teórico em mecânica dos solos, deste modo:

1. Se a umidade é baixa e a densidade é alta, então o ângulo de atrito é alto.

Esta regra apoia-se no fato de que diferentes tipos de solo (arenoso a argiloso) apresentam comportamento similar em relação ao atrito do solo em condições de baixa umidade, uma vez que é a pressão interna exercida pela água e o seu efeito de lubrificação que reduzem o atrito e alteram o comportamento dos diferentes tipos de solo. Além disso, quando a densidade é alta, o contato entre as partículas é maior, elevando o atrito. Como consequência, esta regra descreve a condição mais elevada do ângulo de atrito interno.

2. *Se a umidade é baixa e a densidade é baixa, então o ângulo de atrito é médio alto.*

Esta regra segue as mesmas razões da regra 1 no que se refere à umidade, com a diferença de que a menor densidade reduz a quantidade de partículas próximas, e consequentemente o contato entre as mesmas, resultando na redução do atrito em relação a condição descrita pela regra 1.

3. *Se a umidade é média e a densidade é alta, então o ângulo de atrito é médio alto.*

Na condição descrita por esta regra, a elevação no teor de umidade faz com que o atrito entre as partículas de solo diminua, com consequente redução no atrito em relação à regra 1. Aqui o aumento da umidade ainda não é o suficiente para se diferenciar os diferentes teores de argila. A condição de umidade média, também descreve o teor de umidade mais elevado presente nos solos arenosos.

4. *Se a umidade é média e a densidade é baixa, então o ângulo de atrito é médio.*

Esta condição é similar à descrita na regra 3, com a diferença que a redução na densidade reduz o efeito do atrito.

5. *Se o teor de argila é médio, a umidade é alta e a densidade é alta, então o atrito é médio.*

Quando a umidade é alta, o teor de argila passa a reduzir ângulo de atrito interno de forma mais significativa. Neste sentido, um solo com teor de argila médio apresenta um ângulo de atrito interno mais elevado do que um solo com teor de argila alto, porém menor que o observado na condição de umidade média. Como a densidade mais alta eleva o atrito, a condição descrita por esta ainda mantém um ângulo de atrito médio.

6. *Se o teor de argila é alto, a umidade é alta e a densidade é alta, então o ângulo de atrito é médio baixo.*

Condição é similar à observada na regra 5, com a diferença de que o maior teor de argila reduz o ângulo de atrito interno do solo, tendo-se em vista que as partículas menores (argilas) tem o seu atrito reduzido por dois mecanismos, a pressão interna exercida pela água, e o seu efeito lubrificante.

7. *Se o teor de argila é médio, a umidade é alta e a densidade é baixa, então o ângulo de atrito é médio baixo.*

Situação similar a observada na regra 5, com a diferença de que a redução na densidade faz com que o ângulo de atrito interno do solo diminua.

8. *Se o teor de argila é alto, a umidade é alta e a densidade é baixa, então o ângulo de atrito é baixo.*

Esta é a situação na qual a água exerce maior influência, no que diz respeito à redução do atrito entre as partículas do solo. A presença de partículas menores, a menor densidade e maior umidade, conferem a menor condição de ângulo de atrito interno descrita pelo modelo.

Tabela 22 - Regras para o ângulo de atrito interno do solo

		Teor de argila					
		Baixo (B)		Médio (M)		Alto (A)	
Densidade		Baixo (B)	Alto (A)	Baixo (B)	Alto (A)	Baixo (B)	Alto (A)
Umidade	Baixa (B)	MA	A	MA	A	MA	A
	Média (M)	M	MA	M	MA	M	MA
	Alta (A)	-	-	MB	M	B	MB

Fonte: Autor

Nas regras, foi escolhido o operador “e” do tipo produto, uma vez que este considera as pertinências dos conjuntos de todos os parâmetros envolvidos na regra, não apenas o parâmetro cujo conjunto apresenta a menor pertinência. É justamente o que ocorre neste fenômeno, uma vez que se trata de uma soma de contribuições.

Foi escolhida uma implicação utilizando os valores mínimos para definição da área a ser considerada pela agregação.

Foi utilizada a agregação do tipo soma, que soma o efeito de todas as regras, mesmo quando estiverem associadas ao mesmo conjunto *fuzzy* de saída, garantindo que a contribuição de cada uma seja sempre considerada no pelo modelo.

Foi utilizada a defuzzificação do tipo centroide, que considera a união das contribuições das regras, e não apenas um resultado em um ou mais valores máximos.

4.3.2 Modelo para a predição da área de solo mobilizado

O modelo foi construído com base na análise de trabalhos da literatura especializada em mecânica dos solos, na representação do modelo analítico de Mckyes e Ali (1977), e na análise dos experimentos.

A definição das funções de pertinência levou em consideração a relação existente entre os parâmetros de entrada e a área de solo mobilizado.

O modelo analítico descreve relações lineares entre o ângulo de atrito interno do solo (ϕ) e a área de solo mobilizado para aproximadamente metade do universo de discurso (entre 35° e 45°) do primeiro. Este intervalo foi definido considerando-se $\delta=0,6875\phi$, ou seja, na metade do intervalo (0,5 a 0,875, ou $1/2$ a $7/8$) descrito por Mckyes (1985) como o esperado para ferramentas metálicas. Na Figura 56 é mostrado o gráfico em curvas de nível representando este comportamento. Nele, pode-se observar que só existem curvas de nível na parte superior do gráfico, que é o intervalo representado pelo modelo analítico. Para esta situação, a divisão do universo de discurso foi realizada utilizando funções de pertinência triangulares, que descrevem bem o intervalo linear, tendo-se em vista que trata-se de um fenômeno físico. O intervalo entre 25° e 35° não apresenta relação linear com a mobilização do solo, devido à provável mudança no mecanismo de falha do solo, como indicado por Hettiaratchi; Witney e Reece (1966). Para representar essa não linearidade, nesta região as funções de pertinência foram distribuídas de forma não equidistante concentrando-se mais no intervalo inferior do universo de discurso. As funções apresentam as suas laterais posicionadas no centro da função de pertinência vizinha, proporcionando uma transição contínua entre as regras. Na Figura 57 são

mostradas as funções de pertinência para o ângulo de atrito interno do solo com os respectivos valores linguísticos: (MB) muito baixo, (B) baixo, (M) médio e (A) alto. Nesta figura pode se observar a concentração das funções de pertinência MB, B e M na metade inferior do universo de discurso.

Figura 56 - Relação entre o ângulo de atrito interno do solo (ϕ), a profundidade de operação (d) e a área de solo mobilizado (A)

Fonte: Calculado a partir do modelo apresentado por Mckyes e Ali (1977)

Figura 57 - Funções de pertinência para o ângulo de atrito interno do solo

Fonte: Autor

De forma similar a que ocorre com ϕ , o modelo analítico também descreve relações lineares entre o ângulo de atrito solo - ferramenta (δ) e a área de solo mobilizado (A), sendo, neste caso, para um intervalo menor. As relações lineares ocorrem em menos de metade do seu universo de discurso, em outras palavras, aproximadamente o intervalo entre 28° e 40° . Na Figura 58 pode-se observar esse intervalo, o qual é representado pelas curvas de nível. Portanto, o intervalo entre $12,5^\circ$ e 28° não apresenta relação linear com a mobilização do solo, tendo-se em vista a provável mudança no mecanismo de falha do solo. A fim de representar essa não linearidade, as funções de pertinência também foram distribuídas com maior concentração no intervalo inferior. A Figura 59 mostra as funções de pertinência para o ângulo de atrito interno do solo, nas quais a distância entre os valores de δ com pertinência 1, em cada uma das funções, diminuí na medida em que estes aproximam-se do início do universo de discurso.

Foram adotados os seguintes valores linguísticos para o ângulo de atrito solo - ferramenta: (MB) Muito baixo, (B) baixo, (M) médio e (A) alto.

Figura 58 - Relação entre o ângulo de atrito solo ferramenta (δ), a profundidade de operação (d) e a área de solo mobilizado (A)

Fonte: Autor

Figura 59 - Funções de pertinência para o ângulo de atrito solo ferramenta

Fonte: Autor

A relação entre a profundidade de operação (d) e a área de solo mobilizado (A) é do tipo não linear, com ordem superior a 1, mas inferior a 2, sendo maior quando os ângulos de atrito interno do solo e solo - ferramenta são maiores. Na Figura 60 a superfície representa o comportamento da área de solo mobilizado em função da profundidade e do ângulo de atrito interno do solo, no qual pode se observar a não linearidade da relação entre A e d , ao longo de todos os valores de ϕ . Portanto, as funções de pertinência devem apresentar um pequeno agrupamento na região superior do universo de discurso de modo a representar esse efeito.

Como o efeito de não linearidade observado não é tão intenso, se comparado ao esperado para os outros parâmetros de entrada, neste, o universo de discurso foi dividido em três funções de pertinência. A Figura 61 mostra as funções de pertinência para o ângulo de atrito interno do solo, nas quais foram adotados os seguintes valores linguísticos: (B) baixo, (M) médio e (A) alto. Nela, pode se observar o deslocamento da função de pertinência, que representa a condição de profundidade média (M), em direção ao limite superior do universo de discurso, representando a não linearidade observada.

Figura 60 - Relação entre a profundidade de operação (d), o ângulo de atrito solo ferramenta (δ), e a área de solo mobilizado (A), considerando: $w = 2,4\text{cm}$, $\alpha = 24^\circ$ e $\delta = (7/8)\phi$

Fonte: Autor

Figura 61 - Funções de pertinência para a profundidade da haste

Fonte: Autor

O universo de discurso da área de solo mobilizado descreve um intervalo entre 18 e 603 cm^2 , sendo que os seus valores concentram-se no intervalo inferior. O modelo analítico de Mckyes descreve mais da metade de seus valores de área

abaixo de 200 cm^2 , sendo que os experimentos conduzidos no IAPAR, tanto em solo arenoso quanto argiloso, descrevem um intervalo ainda menor. Deste modo, as funções de pertinência deste parâmetro apresentaram maior concentração neste intervalo.

O universo de discurso foi subdividido em quatro funções de pertinência, de modo a proporcionar maior granularidade do modelo no intervalo inferior, região em que se concentram os valores de área. A Figura 62 mostra as funções de pertinência para o ângulo de atrito interno do solo, nas quais foram adotados os seguintes valores linguísticos: (MB) muito baixo, (B) baixo, (M) médio e (A) alto. Nesta figura, as funções representativas das condições, muito baixa, baixa e média, concentram-se no primeiro quarto do universo de discurso.

Figura 62 - Funções de pertinência para a área de solo mobilizado

Fonte: Autor

- *Formulação das Regras:*

O modelo analítico proposto por Mckyes descreve a profundidade de operação como o parâmetro de maior influência na mobilização do solo, seguido dos atritos solo - ferramenta e interno do solo. A grande influência da profundidade da haste

sobre a área de solo mobilizado também foi verificada nos experimentos de campo, confirmando o modelo analítico.

Considerando-se o modelo analítico no intervalo relacionado às hastes sulcadoras utilizadas em plantio direto, não há interação significativa entre os parâmetros de atrito e a área de solo mobilizado. Por outro lado, o aumento da profundidade intensifica a influência dos ângulos de atrito sobre a área mobilizada, tendo em vista que também se intensifica o efeito da inclinação do plano de falha, descrito por β , na mobilização do solo. Uma das possíveis abordagens para formulação das regras se baseia na relação entre a profundidade e os ângulos de atrito (solo - ferramenta e interno do solo), na forma de dois conjuntos de regras. Cada um dos conjuntos de regras descreve a interação entre a profundidade e um dos ângulos de atrito, sendo área de solo mobilizado obtida pela agregação dos consequentes dos dois conjuntos de regras.

A elaboração das regras partiu do modelo analítico proposto por Mckyes para os valores das funções de pertinência iguais a 1, para cada regra. O valor de área resultante de cada combinação foi então atribuído a um dos conjuntos *fuzzy* do parâmetro de saída, ou seja, a área de solo mobilizado. Das 24 regras, resultantes das combinações entre os conjuntos *fuzzy* da profundidade e dos ângulos de atrito, em 13 regras se obteve os valores de área a partir do modelo analítico. Para as outras 11 regras o modelo analítico não resultou um valor de área factível.

As 13 regras obtidas foram:

1. Se o ϕ é baixo e a profundidade é baixa, então a área é muito baixa;
2. Se o ϕ é médio e a profundidade é baixa, então a área é muito baixa;
3. Se o ϕ é alto e a profundidade é baixa, então a área é baixa;
4. Se o ϕ é médio e a profundidade é média, então a área é média;
5. Se o ϕ é alto e a profundidade é média, então a área é média;
6. Se o ϕ é médio e a profundidade é alta, então a área é alta;
7. Se o ϕ é alto e a profundidade é alta, então a área é alta;
8. Se o δ é médio e a profundidade é baixa, então a área é muito baixa;
9. Se o δ é alto e a profundidade é baixa, então a área é baixa;
10. Se o δ é médio e a profundidade é média, então a área é média;
11. Se o δ é alto e a profundidade é média, então a área é alta;
12. Se o δ é médio e a profundidade é alta, então a área é alta;
13. Se o δ é alto e a profundidade é alta, então a área é alta.

Nas 11 regras, não obtidas pelo modelo analítico, a minimização do adimensional N_γ , do modelo proposto por Mckyes e Ali (1977), não converge para valores factíveis de inclinação da frente de falha. Hettiaratchi; Witney e Reece (1966) acreditam que o mecanismo de falha do solo pode se modificar nestes casos, devido aos baixos ângulos de ataque das ferramentas.

Os resultados experimentais dos ensaios conduzidos por Mckyes e Desir (1984), bem como de ensaios conduzidos no IAPAR, permitiram observar que, nestes casos, a mobilização do solo descreve valores de área de solo mobilizado mais baixos que os descritos pelo modelo analítico de Mckyes. A partir daí pôde-se supor que valores de área poderiam ser considerados para a formulação das regras, não representadas pelo modelo analítico.

Deste modo, cada uma destas 11 regras foi elaborada estimando-se as prováveis áreas de solo mobilizado para cada situação, tomando como referência os valores de área descritos pelo modelo analítico para valores de ângulo de ataque da ferramenta (α) próximos da região não descrita pelo modelo.

As 11 regras, bem como cada região estimada, foram:

1. *Se o φ é muito baixo e a profundidade é baixa, então a área é muito baixa;*

A região com as prováveis áreas é mostrada na Figura 63, juntamente com os valores de área correspondentes ao intervalo que ainda é representado pelo modelo analítico. Pode-se observar que, neste caso, a região situa-se um pouco antes do intervalo ainda descrito pelo modelo analítico. Os baixos valores de φ e da profundidade resultam em baixos valores de área.

Figura 63 - Área estimada quando ϕ é MB e d é B ($\phi=25^\circ$, $\delta=26,25^\circ$, $d=5\text{cm}$)

Fonte: Autor

2. Se o ϕ é muito baixo e a profundidade é média, então a área é baixa;

A região é mostrada na Figura 64, juntamente com os valores de área correspondentes ao intervalo que ainda é representado pelo modelo analítico. Aqui, a região situa-se um pouco mais distante intervalo descrito pelo modelo analítico, aumentando-se um pouco a região. A maior profundidade resultou em uma área de solo mobilizada um pouco maior, em relação à regra 1.

Figura 64 - Área estimada quando ϕ é MB e d é M ($\phi=25^\circ$, $\delta=26,25^\circ$, $d=10,5\text{cm}$)

Fonte: Autor

3. Se o φ é baixo e a profundidade é média, então a área é média;

A região com as prováveis áreas, bem como os valores de área correspondentes ao intervalo que ainda é representado pelo modelo analítico, são mostrados na Figura 65. Neste caso, a região situa-se próxima do intervalo descrito pelo modelo analítico, tornando-se menor, uma vez que a incerteza também se reduz. O φ mais elevado, em relação à regra 2, resultou em um aumento na área de solo mobilizado.

Figura 65 - Área estimada quando φ é B e d é M ($\varphi=29^\circ$, $\delta=26,25^\circ$, $d=10,5\text{cm}$)

Fonte: Autor

4. Se o φ é muito baixo e a profundidade é alta, então a área é média;

A região com as prováveis áreas, e o intervalo de áreas ainda representadas pelo modelo analítico, são mostrados na Figura 66. Neste caso, φ é muito baixo, menor do que na regra 3, e a região é um pouco maior, mas a alta profundidade faz com que a área mantenha-se como média.

Figura 66 - Área estimada quando φ é B e d é B ($\varphi=23,6^\circ$, $\delta=26,25^\circ$, $d=15\text{cm}$)

Fonte: Autor

5. Se o φ é baixo e a profundidade é alta, então a área é média;

A região com as prováveis áreas é mostrada na Figura 67, juntamente com o intervalo de valores de área de solo mobilizado ainda representados pelo modelo analítico. Apesar do φ apresentar um valor maior em relação à regra 4, e a profundidade ser alta, a área de solo mobilizado mantém-se abaixo da metade do seu universo de discurso, o que faz com que o seu valor linguístico se mantenha como médio.

As áreas de solo mobilizado mais elevadas ocorrem em um intervalo no qual o modelo analítico já consegue representar o fenômeno. Portanto, o valor linguístico de área de solo mobilizado alta, só corre nas 13 regras obtidas a partir do modelo analítico.

Figura 67 - Área estimada quando ϕ é B e d é B ($\phi=29^\circ$, $\delta=26,25^\circ$, $d=15\text{cm}$)

Fonte: Autor

6. Se o δ é muito baixo e a profundidade é baixa, então a área é muito baixa;

A região com as prováveis áreas é mostrada na Figura 68, podendo-se observar que o intervalo ainda representado pelo modelo encontra-se mais distante desta região. Esta maior distância eleva a incerteza, aumentando a região. Além disso, a baixa profundidade faz com que esta ainda represente mobilizações muito baixas.

Figura 68 - Área estimada quando δ é MB e d é B ($\phi=35^\circ$, $\delta=12,5^\circ$, $d=5\text{cm}$)

Fonte: Autor

7. Se o δ é baixo e a profundidade é baixa, então a área é muito baixa;

Na Figura 69 pode-se observar que a região com as prováveis áreas encontra-se próxima do intervalo de valores de área descritos pelo modelo analítico. Nesta situação, a incerteza é menor, resultando em uma região reduzida, sendo que os valores descritos por esta região representam mobilizações muito baixas, que são resultado de δ e d baixos.

Figura 69 - Área estimada quando δ é B e d é B ($\varphi=35^\circ$, $\delta=19^\circ$, $d=5\text{cm}$)

Fonte: Autor

8. Se o δ é muito baixo e a profundidade é média, então a área é baixa;

Na Figura 70 é mostrada a região com os prováveis valores de área mais distante do intervalo representado pelo modelo analítico, fazendo com que esta seja maior. O baixo ângulo de atrito solo - ferramenta e o valor médio de profundidade resultam em prováveis valores de área classificados como baixos.

Figura 70 - Área estimada quando δ é MB e d é M ($\varphi=35^\circ$, $\delta=12,5^\circ$, $d=10,5\text{cm}$)

Fonte: Autor

9. Se o δ é baixo e a profundidade é média, então a área é baixa;

A região com as prováveis áreas é mostrada na Figura 71. Esta se encontra próxima do intervalo descrito pelo modelo analítico. Os valores de área estimados a mantém como (baixa), dada à profundidade de operação (média) representada pela regra.

Figura 71 - Área estimada quando δ é B e d é M ($\varphi=35^\circ$, $\delta=19^\circ$, $d=10,5\text{cm}$)

Fonte: Autor

10. Se o δ é muito baixo e a profundidade é alta, então a área é média;

Esta regra descreve uma condição de profundidade mais elevada, apesar de tratar de um ângulo de atrito solo ferramenta baixo. Nesta situação, o intervalo de áreas descrito também se eleva. Na Figura 72, é possível se observar a elevação dos valores de área descritos pelo eixo vertical, elevando os prováveis valores de área descritos pela região em destaque. Deste modo, tem-se como consequente o conjunto de área média.

Figura 72 - Área estimada quando δ é MB e d é A ($\phi=35^\circ$, $\delta=12,5^\circ$, $d=15\text{cm}$)

Fonte: Autor

11. Se o δ é baixo e a profundidade é alta, então a área é média.

A região com as prováveis áreas é mostrada na Figura 73, juntamente com o intervalo representado pelo modelo analítico. O eixo vertical do gráfico também descreve um intervalo de áreas mais elevado, devido a maior profundidade avaliada pela regra. Portanto, os valores de área inferidos por esta regra também são médios.

Figura 73 - Área estimada quando δ é B e d é A ($\phi=35^\circ$, $\delta=19^\circ$, $d=15\text{cm}$)

Fonte: Autor

Nas regras, foi escolhido o operador “e” do tipo produto, que considera as pertinências dos conjuntos de todos os parâmetros envolvidos na regra, não apenas o parâmetro cujo conjunto apresenta a menor pertinência.

Foi escolhida implicação utilizando os valores mínimos para definição da área a ser considerada pela agregação. Deste modo, evita-se a perda de granulometria nas situações em que todas as regras implicam no mesmo conjunto *fuzzy* de saída.

Foi utilizada a agregação do tipo “soma”, que soma o efeito de todas as regras, mesmo quando estiverem associadas ao mesmo conjunto *fuzzy* de saída, garantindo que a contribuição de cada uma seja sempre considerada pelo modelo.

Foi utilizada a defuzzificação do tipo centroide, que considera a união das contribuições das regras, e não apenas um resultado em um valor máximo.

4.4 Prova de conceito

A prova de conceito foi dividida em duas partes. Na primeira é avaliada a aplicação prática do modelo proposto para a predição do ângulo de atrito interno do solo. Na segunda é avaliada a aplicação prática do modelo para a predição da área de solo mobilizado por uma haste sulcadora estreita no sistema de plantio direto.

4.4.1 Modelo de predição do ângulo de atrito interno do solo

Conforme descrito no capítulo 3.4, os dados experimentais, extraídos da literatura, apresentaram grande variabilidade entre si, o que determinou que o modelo de predição do ângulo de atrito interno do solo apresentasse comportamentos distintos e dependentes de cada experimento. Na Tabela 23 são apresentados os resultados experimentais (observados) e preditos pelo modelo.

Tabela 23 - Resultados para o modelo de predição de ângulo de atrito interno do solo, incluindo parâmetros de entrada e saída, com valores observados e preditos

Fonte	Caso	Entradas			Saída	
		Argila (g.kg ⁻¹)	Umid. (g.g ⁻¹)	Dens. (g.g ⁻¹)	Predit. (°)	Obser. (°)
Braida et al. (2007a)	1	155	0,09	1,36	41.8	35,4
	2	155	0,14	1,36	40.7	34,9
	3	155	0,21	1,36	38.5	32,5
Carvalho et al. (2010)	4	270	0,24	1,38	37.4	30,6
	5	280	0,26	1,35	36.3	29,2
Silva e Carvalho (2007)	6	295	0,07	1,26	41.3	42,3
	7	295	0,12	1,26	41.3	40,0
	8	295	0,19	1,26	38.5	36,1
	9	295	0,24	1,26	36.5	35,8
	10	361	0,07	1,51	43.4	37,2
	11	361	0,12	1,51	43.4	36,5
	12	361	0,19	1,51	40.5	34,6
	13	361	0,24	1,51	38.2	34,2
	14	452	0,07	1,35	41.7	34,6
	15	452	0,12	1,35	41.7	33,4
	16	452	0,19	1,35	39.1	33,0
	17	452	0,24	1,35	36.6	31,4
Silva et al. (2004)	18	420	0,05	1,12	40.8	41
	19	420	0,16	1,12	38.8	39
	20	420	0,27	1,12	33.6	34
	21	420	0,38	1,12	31.9	33
	22	460	0,05	1,21	41.1	42
	23	460	0,16	1,21	39.2	41
	24	460	0,27	1,21	34.1	36
	25	460	0,38	1,21	32.2	35
	26	533	0,05	0,96	40.2	44
	27	533	0,16	0,96	38.0	42
	28	533	0,27	0,96	32.1	35
	29	533	0,38	0,96	30.1	31

O modelo superestimou os valores absolutos de ângulo de atrito interno do solo para os ensaios de Braida et al. (2007a), Carvalho et al. (2010) e Silva e Carvalho (2007), e subestimou os de Silva et al. (2004). Tal comportamento é resultado das grandes diferenças entre os resultados dos trabalhos. Tais diferenças resultam provavelmente da influência de outros parâmetros não considerados, tais como o tipo de solo, teor de matéria orgânica e mineralogia. No entanto, não foram encontrados trabalhos na literatura capazes de prover as informações suficientes para tal.

Os resultados do modelo apresentaram os seguintes valores para as métricas de erro:

- APE = 10,81 %
- RMSE = 4,525
- R = 0,43

O erro percentual médio (APE) que descreve o erro relativo dos resíduos foi relativamente pequeno, tendo-se em vista todas as fontes de variação existentes. Como esperado, o RMSE descreve um erro mais pronunciado, compatível com a incerteza e variação existente entre os dados dos diferentes trabalhos.

O coeficiente de correlação (R) apresentou um valor baixo, que é resultante das diferentes tendências de superestimar e subestimar de cada experimento, uma vez que o coeficiente avaliou as dispersões dos diferentes experimentos como um todo. No entanto, se os experimentos forem considerados de forma separada, as correlações assumem valores maiores.

Os resultados obtidos pelo modelo seguem as mesmas tendências dos resultados obtidos experimentalmente, considerando-se os resultados o que pode ser observado na Figura 74.

comprovando que o modelo proposto apresenta a capacidade de representação do fenômeno.

Figura 74 - Gráfico comparativo dos resultados de ângulo de atrito interno do solo, observados experimentalmente, e preditos pelo modelo

Fonte: Autor

Na Figura 74 confirma-se o observado na tabela, a superestimativa nos trabalhos entre os casos 1 a 17, que correspondem aos trabalhos de Braida et al. (2007a), Carvalho et al. (2010) e Silva e Carvalho (2007), excetuando-se o caso 6, que corresponde a um dos ensaios de Silva e Carvalho (2007). Também pode ser observada a subestimativa, nos casos 18 a 29, que correspondem aos ensaios de Silva et al. (2004).

4.4.2 Modelo de predição da área de solo mobilizado

O modelo foi testado com os dados obtidos nos experimentos realizados no campo experimental do IAPAR em Londrina - PR, no ano de 2012, e em Umuarama - PR, no ano de 2012. Não foram utilizados os experimentos conduzidos em Londrina, em 2011 e em 2013. No primeiro, problemas na obtenção dos valores experimentais de área de solo mobilizado comprometeram a confiabilidade destas leituras. No segundo, não foram coletados os valores de densidade do solo, bem como ocorreram problemas no controle da profundidade de operação.

Conforme discutido no capítulo 4.1, os valores de área de solo mobilizado observados experimentalmente apresentaram boa correlação com a profundidade, o que coincide com as observações do modelo analítico. No entanto, os ensaios em solo arenoso apresentaram valores de área inferiores aos ensaios em solo argiloso, o que a princípio não concorda com a teoria, tendo-se em vista que seria esperado

maior atrito interno do solo nestas condições, com consequente maior mobilização. Um ponto a ser considerado é a presença do disco de corte que pré-cisalha o solo à frente da haste sulcadora em aproximadamente metade da profundidade desta. Este pré-cisalhamento reduz o trabalho realizado pela ferramenta podendo também reduzir a área de solo mobilizado. Em solos arenosos é possível uma propagação bem mais pronunciada das falhas a partir do ponto de penetração do disco, dada a menor coesão. Não se tem disponível a informação quantitativa de quanto poderia ser essa redução da área, mas não se pode descartar a possibilidade desse efeito ser mais intenso em solos mais arenosos.

Outra possibilidade é que o solo da área experimental utilizada em Umuarama apresente um formato de partículas, ou outro fator, que diminua o seu ângulo de atrito interno, e o atrito entre ele e a ferramenta. Nesta situação a área de solo mobilizado pode realmente reduzir e diferir do normalmente esperado. No entanto, a única forma de confirmar esta hipótese é com a determinação experimental do ângulo de atrito interno deste solo específico, avaliando a sua resposta em função da umidade e densidade.

Uma observação muito importante foi relatada por Mckyes e Desir (1984) em seus experimentos. Nestes observou-se que o modelo analítico havia superestimado as áreas observadas em 15%, mais um valor constante de 120 cm^2 , que correspondia a 25% da média das áreas de solo mobilizado obtidas no experimento (500 cm^2). A razão disto deve-se às diferenças entre o perfil realmente cisalhado, e o escavado e medido, além de erros resultantes das aproximações do modelo analítico e erros experimentais. Em seu experimento, os autores utilizaram ferramentas com larguras entre 6 e 20 cm. Nos ensaios do IAPAR a ferramenta é bem mais estreita, com 2,4 cm de largura. Nesta situação, a contribuição da largura na área mobilizada é menor com o consequente aumento da contribuição das áreas laterais, fazendo com que o modelo possa superestimar ainda mais o valor da área mobilizada. A representação geométrica dos planos de ruptura do solo, que correspondem a esta situação, é apresentada na Figura 6 b.

O modelo foi simulado para a predição dos valores de área de solo mobilizado utilizando 23 casos para a condição de solo arenoso, que correspondem às 24 parcelas do experimento conduzido em Umuarama, menos uma parcela que foi descartada devido a problemas durante a sua execução, que resultaram na não realização das leituras dos perfis nesta parcela. Também foram utilizados outros 24

casos para a condição de solo argiloso, que correspondem às 24 parcelas do experimento conduzido em Londrina, em 2012.

Conforme descrito na metodologia, os valores de ângulo de atrito interno do solo e do atrito solo - ferramenta não foram obtidos durante os experimentos. O ângulo de atrito interno do solo foi estimado pelo modelo descrito no capítulo 5.3.1. O ângulo de atrito solo - ferramenta foi estimado, considerando-se como sendo 0,5 do ângulo de atrito interno do solo, o que está dentro da faixa descrita por Mckyes (1985) para ferramentas metálicas.

Os resultados destas simulações encontram-se descritos na Tabela 24 para os dados de Umuarama e na Tabela 25 para os dados de Londrina.

Tabela 24 - Resultados para o modelo de predição da área de solo mobilizado, utilizando os dados do experimento conduzido em Umuarama, em 2012, incluindo parâmetros de entrada e saída, com valores observados e preditos

Caso	Fatores do Ensaio ¹	Umid. (%)	Densid. (g.cm ⁻³)	d (cm)	ϕ (°)	δ (°)	Área Predita (cm ²)	Área Observada (cm ²)
1	S-N-3	10.62	1.68	12.26	43.24	21.62	284.47	98.51
2	S-N-3	11.84	1.70	11.80	43.19	21.60	267.53	84.63
3	S-N-3	10.97	1.63	13.05	43.30	21.65	311.04	87.51
4	S-N-6	11.41	1.59	14.35	43.34	21.67	352.39	118.20
5	S-N-6	11.97	1.64	12.32	43.28	21.64	286.81	112.30
6	S-N-6	9.57	1.64	10.72	43.29	21.65	213.67	60.89
7	S-C-3	12.44	1.69	12.65	42.80	21.40	296.41	81.36
8	S-C-3	10.91	1.70	11.92	43.20	21.60	272.24	86.24
9	S-C-3	12.65	1.68	12.37	42.63	21.32	286.48	80.57
10	S-C-6	11.16	1.65	11.75	43.27	21.63	265.65	67.42
11	S-C-6	12.65	1.67	13.39	42.65	21.32	319.03	83.75
12	S-C-6	9.77	1.68	11.86	43.22	21.61	269.82	68.58
13	U-N-3	11.69	1.64	8.29	43.29	21.64	173.76	55.45
14	U-N-3	15.97	1.65	8.88	41.15	20.57	179.33	33.40
15	U-N-3	13.88	1.69	11.48	41.89	20.95	251.21	68.37
16	U-N-6	16.13	1.59	11.41	41.12	20.56	246.86	85.99
17	U-N-6	15.49	1.68	10.87	41.28	20.64	221.18	84.74
18	U-N-6	13.02	1.65	10.75	42.39	21.19	215.32	92.29
19	U-C-3	15.25	1.67	10.39	41.36	20.68	197.07	77.01
20	U-C-3	14.29	1.68	10.24	41.71	20.86	195.55	78.96
21	U-C-3	12.99	1.68	10.06	42.39	21.20	193.56	71.17
22	U-C-6	15.07	1.66	10.81	41.42	20.71	218.08	72.00
23	U-C-6	14.76	1.66	9.69	41.53	20.77	189.21	53.28

OBS: O teor de argila para o solo de Umuarama é de 7%, em todos os casos da tabela.

¹Nomenclatura: 1ª letra (S=seco, U=úmido), 2ª letra (N=normal, C=com sobre tráfego), 3º número (3=3km.h⁻¹, 6=6km.h⁻¹).

Fonte: Autor

Tabela 25 - Resultados para o modelo de predição da área de solo mobilizado, utilizando os dados do experimento conduzido em Londrina, em 2012, incluindo parâmetros de entrada e saída, com valores observados e preditos

Caso	Fatores do Ensaio ¹	Umid. (%)	Densid. (g.cm ⁻³)	d (cm)	ϕ (°)	δ (°)	Área Predita (cm ²)	Área Observada (cm ²)
1	U-N-3	32.05	1.34	10.75	30.30	15.15	188.74	116.00
2	U-N-3	32.33	1.32	10.14	30.19	15.09	176.46	102.88
3	U-N-3	32.94	1.25	9.83	29.93	14.96	172.39	114.55
4	U-N-6	30.74	1.35	11.65	30.33	15.17	210.25	133.04
5	U-N-6	32.23	1.33	11.49	30.23	15.11	206.12	117.26
6	U-N-6	32.59	1.33	10.70	30.23	15.12	186.58	114.48
7	U-C-3	33.14	1.39	10.50	30.51	15.26	181.02	108.27
8	U-C-3	33.66	1.40	8.77	30.53	15.27	165.00	80.40
9	U-C-3	32.29	1.38	10.15	30.48	15.24	177.85	100.16
10	U-C-6	32.26	1.42	9.24	30.64	15.32	170.11	96.63
11	U-C-6	32.81	1.37	9.77	30.40	15.20	174.24	107.02
12	U-C-6	32.83	1.31	10.99	30.16	15.08	194.65	123.42
13	S-N-3	27.98	1.30	10.75	32.39	16.19	195.51	114.70
14	S-N-3	27.00	1.35	9.53	33.45	16.72	172.95	121.34
15	S-N-3	26.49	1.29	12.31	33.60	16.80	255.04	149.19
16	S-N-6	27.53	1.42	8.79	33.34	16.67	165.89	97.92
17	S-N-6	27.73	1.32	10.40	32.69	16.34	182.60	128.36
18	S-N-6	27.34	1.32	10.80	33.01	16.51	198.65	136.02
19	S-C-3	29.16	1.38	9.20	31.52	15.76	171.67	85.91
20	S-C-3	28.94	1.32	9.16	31.51	15.76	171.27	111.01
21	S-C-3	29.14	1.31	9.18	31.24	15.62	171.09	124.08
22	S-C-6	29.70	1.41	9.63	31.02	15.51	174.91	79.97
23	S-C-6	30.83	1.38	9.45	30.45	15.22	171.46	118.55
24	S-C-6	27.28	1.40	8.65	33.44	16.72	163.95	93.44

OBS: O teor de argila para o solo de Londrina é de 83%, em todos os casos da tabela.

¹Nomenclatura: 1ª letra (S=seco, U=úmido), 2ª letra (N=normal, C=com sobre tráfego), 3º número (3=3km.h⁻¹, 6=6km.h⁻¹).

Fonte: Autor

A característica de se superestimar os valores de área foi confirmada nos resultados obtidos pelo modelo *fuzzy* utilizando os dados dos experimentos. No experimento conduzido em Umuarama, em 2012, mostrado na Figura 74, o efeito de superestimativa, observado em Mckyes e Desir (1984), também têm repercussão no modelo *fuzzy*, pois parte das suas regras tomam por base o modelo analítico. Além disso, somam-se os efeitos dos valores de área mais baixos observados experimentalmente e descritos no início deste capítulo.

No experimento conduzido em Londrina, em 2012, o comportamento de superestimar os valores de área de solo mobilizado foi menos intenso. Neste

experimento, além do efeito observado em Mckyes e Desir (1984), também se deve considerar uma possível redução da área observada experimentalmente, uma vez que também há a presença do disco de corte à frente da haste. Por outro lado, a maior coesão deste solo, que é muito argiloso, tende a reduzir o efeito de cisalhamento do disco, com uma menor propagação das trincas no interior do solo, se comparado a um solo arenoso, o que faz com que a redução de área observada experimentalmente seja menos pronunciada.

Como resultado, as duas primeiras métricas de erro (APE e RMSE) descreveram grandes variações:

- Umuarama 2012
 - APE = 226,15 %
 - RMSE = 173,98
 - R = 0,70
- Londrina 2012
 - APE = 66,69 %
 - RMSE = 73,15
 - R = 0,72

O Erro percentual médio (APE) permite observar que o modelo superestimou os valores de área para os dados de Umuarama em 226%, sendo este efeito muito menor para os dados de Londrina, 67%. O RMSE também acompanhou o mesmo efeito observado com o APE.

É importante lembrar que os valores do ângulo de atrito interno do solo, são estimados pelo modelo secundário, o que também repercutiu na estimativa do ângulo de atrito solo-ferramenta. Como consequência, há o efeito combinado destes dois modelos na estimativa da área de solo mobilizado. Portanto, caso o modelo secundário superestime o valor do ângulo de atrito interno do solo para uma determinada condição de teor de argila, umidade e densidade, isto também irá resultar em aumento nos valores de área de solo mobilizado estimados pelo modelo principal. No entanto, este efeito deve ser atenuado dentro do modelo principal, uma vez que a profundidade da ferramenta é o parâmetro de maior relevância, em não os ângulos de atrito. No caso dos dados observados no experimento de Umuarama, este efeito pode ter contribuído na superestimativa da área de solo mobilizado, uma vez que já foi observado que a mobilização do solo foi menor do que a normalmente

esperada para esta condição. Logo, há a possibilidade do ângulo de atrito interno do solo, estimado pelo modelo secundário, ser maior do que o da situação real do solo na ocasião do experimento, com consequente repercussão no modelo principal.

O coeficiente de correlação (R) descreve a existência de correlação significativa entre os valores observado e previsto, indicando a capacidade do modelo de representar a tendência dos dados experimentais.

Na Figura 75 são comparados os valores de área de solo mobilizado, observados no experimento de Umuarama, e previstos pelo modelo *fuzzy*. Neste gráfico, para compensar o efeito de superestimativa do modelo *fuzzy*, foi aplicado um ganho, multiplicando os valores preditos por uma constante, de modo a igualar a média destes à dos valores observados no experimento.

Figura 75 - Comparação entre o resultado observado e o previsto (escalonado) pelo modelo, para os dados do experimento conduzido em Umuarama (solo arenoso), em 2012

Fonte: Autor

Pode-se observar no gráfico que o modelo *fuzzy* -faz uma melhor representação das tendências dos dados experimentais nos 6 primeiros casos, que correspondem aos tratamentos realizados em solo mais seco e sem o sobre tráfego com o trator. Nos seis casos seguintes, que correspondem à condição de solo seco com sobre tráfego do trator, o modelo também reproduz as tendência dos dados experimentais, mas mantendo valores os preditos um pouco mais elevados.

A maior variação entre as tendências ocorre no caso 14, que corresponde ao tratamento em solo na condição úmida, a 3 km.h⁻¹ e sem sobre tráfego do trator. No

entanto, esta variação não ocorre nos casos 13 e 15, que correspondem aos outros dois blocos (repetições) do mesmo tratamento. Portanto, o mais provável é que se trate de variações devido a imprecisões inerentes à fase experimental.

Nos casos 18, 19, 20 e 21, o modelo apresenta uma tendência com menos variações, não copiando as variações observadas no experimento. Estes casos correspondem a ensaios na condição de solo úmido, com diferentes velocidades e condições de tráfego. No entanto, todos os últimos 12 casos simulados pelo modelo correspondem à condição úmida, sendo que nos demais o modelo chegou a reproduzir as tendências observadas experimentalmente.

Pode-se observar na Tabela 24 que partir do 13º caso, que corresponde à condição de solo úmido, as profundidades de operação foram, em média, mais baixas. Nestas situações o modelo *fuzzy* respondeu predizendo valores de área mais baixos, o que é aderente com a teoria de mecânica dos solos, pois se espera que os atritos internos do solo sejam menores. No entanto, os dados experimentais não seguiram essa tendência, descrevendo valores médios de área de solo mobilizado mais elevados. Conforme descrito anteriormente há a presença do disco de corte a frente da ferramenta, além disso, a estrutura do solo é complexa, com vários elementos, como mineralogia, formado das partículas, matéria orgânica, dentre outros. Todos estes fatores agregam variabilidade ao solo e sua mobilização e explicam as diferenças observadas.

Na Figura 76 são comparados os valores de área de solo mobilizado, observados no experimento de Londrina, e previstos pelo modelo *fuzzy*. Neste gráfico, também foi aplicado um ganho para compensar o efeito de superestimativa do modelo *fuzzy*, igualando a média dos valores preditos à dos observados.

Figura 76 - Comparação entre o resultado observado e o previsto (escalonado) pelo modelo, para os dados do experimento conduzido em Londrina (solo argiloso), em 2012

Fonte: Autor

O modelo *fuzzy* mostrou melhores resultados para os dados em solo argiloso, se comparados ao em solo arenoso, pois a menor superestimativa dos dados experimentais resulta em melhores métricas de erro.

Neste experimento, o modelo representou melhor as tendências nos primeiros casos até o 13º, começando a mesclar casos com pior representação a partir deste. O que há em comum aos 12 primeiros casos é condição de umidade do solo, que corresponde aos ensaios na condição úmida.

Na condição seca, que corresponde aos 12 últimos casos, a presença de fraturas (pré-cisalhamentos) no solo é bem maior. Essas fraturas induzem a ruptura do solo nas superfícies descritas por elas. Além disso, os agregados encontram-se mais heterogêneos, apresentando regiões com maior resistência ao cisalhamento, dado o efeito da compactação. Como resultado o solo quebra de forma mais irregular, com a presença de grandes torrões. Esse comportamento pode resultar em áreas de solo mobilizado maiores e mais irregulares. Isto poderia explicar o modelo *fuzzy* subestimar as tendências dos 12 últimos tratamentos, se comparados aos 12 primeiros. No entanto, há outro fator a ser considerado, que os ângulos de atrito do solo são estimados por um segundo modelo *fuzzy*, conforme discutido anteriormente esta estimativa também agrega incertezas, e estas também podem repercutir no modelo de predição da área de solo mobilizado.

As maiores variações entre as tendências do modelo *fuzzy* e do experimento em Londrina ocorrem no 8º e no 22º caso. Da mesma forma que observado no ensaio de Umuarama, estes casos correspondem a blocos (repetições) de dois tratamentos distintos, e os outros 2 blocos destes tratamentos não descrevem as mesmas variações. Portanto, estas variações também podem ser atribuídas a variações experimentais.

Nos dois experimentos, os dados observados apresentam maior dispersão se comparados com os dados preditos pelo modelo. A provável razão para este comportamento pode ser atribuída à própria variabilidade dos experimentos, sendo que outros parâmetros, além dos representados pelo modelo, exercem influência.

4.5 Considerações finais

A análise dos resultados dos ensaios conduzidos durante a pesquisa permitiu verificar que foi possível representar duas condições distintas de umidade e densidade para os solos argilosos. Para os solos arenosos foram observadas diferenças pouco distintas entre os tratamentos, como menor diferenciação em relação à umidade e sem efeito sobre a densidade. Estas diferenças contribuíram para que o modelo representasse melhor as tendências observadas no ensaio conduzido em solo argiloso, tendo-se em vista que este tipo solo é mais sensível a estes fatores.

Também foi verificado que a velocidade não influenciou a área de solo mobilizado, demonstrando que a velocidade não precisa ser considerada dentro do fenômeno de mobilização do solo. O efeito inercial associado à movimentação das partículas de solo, e consequentemente a velocidade de operação, influencia significativamente apenas os esforços atuantes na ferramenta, e não os seus planos de falha.

Foi verificado que a profundidade exerceu grande influência sobre a área de solo mobilizado, em todos os ensaios, concordando com o representado pelo modelo analítico.

Os valores de área de solo mobilizado, observados no ensaio conduzido em Umuarama (solo arenoso), em 2012, foram inferiores aos observados no ensaio conduzido Londrina (solo argiloso) no mesmo ano, sendo que as condições de

profundidade de operação foram similares. Uma das razões é o efeito do disco de corte situado à frente da ferramenta, que pré-cisalha o solo podendo reduzir a mobilização promovida pela haste sulcadora. Outra pode ser um comportamento de atrito interno atípico para o solo de Umuarama.

Os valores dos ganhos aplicados aos gráficos das Figuras 75 e 76 tiveram por objetivo apenas melhorar a visualização das tendências entre os valores observados e preditos. No entanto, uma vez que o modelo proposto foi capaz de reproduzir a tendência dos dados observados experimentalmente, também pode ser considerada à inclusão de um ganho na saída do modelo *fuzzy*, de modo melhorar sua capacidade de representação, minimizando o efeito de superestimativa dos valores de áreas de solo mobilizado. Conforme discutido anteriormente, o efeito de superestimativa se deve a uma soma de fatores, como a herança do modelo analítico, bem como o efeito resultante a ação do disco de corte à frente da haste sulcadora. Esses efeitos estão bem representados nos resultados do ensaio em solo argiloso, sendo que no solo arenoso há indícios de outros efeitos que não necessariamente irão ocorrer em outros ensaios neste mesmo tipo de solo. Portanto, o valor de ganho para a saída do modelo *fuzzy* pode estimado a partir das métricas de erro para o ensaio em solo argiloso, que apresentam $APE = 66,67\%$ e $RMSE = 73,15$. Deste modo, podem ser adotados valores de ganho entre 0,6 e 0,7, na saída do modelo *fuzzy*, para melhorar a estimativa da área de solo mobilizado.

A função do erro autorregressivo *AREF* mostrou ser mais sensível as variações das condições do solo se comparada aos índices de resistência a penetração. Além disso, ela permitiu se distinguir entre os diferentes tratamentos, e consequentemente entre as diferentes condições de umidade, velocidade e densidade. A *AREF* mostrou intervalos claros para os seus parâmetros distinguindo entre os ensaios argiloso e arenoso, bem como entre os tratamentos no solo argiloso. No entanto, o uso da *AREF* é vinculado aos resultados experimentais, não possuindo um referencial teórico sólido. Devido a isto, a generalização de suas observações é limitada, inviabilizando o seu emprego em conjunto com o modelo *fuzzy* proposto nesta tese.

5 CONCLUSÕES

A construção do conhecimento especialista, necessário para a elaboração dos modelos *fuzzy* foi resultado do estudo de um conjunto de trabalhos bibliográficos, associados a análise de dados experimentais, tanto bibliográficos quanto de ensaios conduzidos durante o desenvolvimento da pesquisa.

É característica da área agrícola a dificuldade na obtenção de dados experimentais precisos e repetitivos, com consequências na construção de um conhecimento mais quantitativo do que qualitativo. Tal fato implica em uma maior dificuldade em se formalizar modelos mais abrangentes e completos.

A representação obtida pelos modelos *fuzzy* ampliou o grau de compreensão do fenômeno da mobilização do solo, particularizado para o estudo de ferramentas estreitas no sistema de plantio direto. O modelo proposto possibilitou a representação da mobilização do solo em novas situações não contempladas pelo modelo analítico existente. A contribuição conceitual da pesquisa está na construção de um modelo computacional, que também contemplou a definição da lógica computacional mais apropriada, sendo este modelo implementado e o seu desempenho averiguado por meio da prova de conceito. Além disso, disponibilizou recursos para a otimização de operações envolvendo ferramentas de cultivo e o monitoramento de parâmetros mecânicos do solo, através do desenvolvimento de soluções computacionais.

As análises realizadas por meio da prova de conceito possibilitaram avaliar o comportamento prático dos modelos *fuzzy* propostos. Pôde-se verificar que o modelo proposto para a predição da área de solo mobilizado reproduziu as tendências dos dados observados experimentalmente. Isto confirma a hipótese considerada para a formulação das regras nas situações não representadas pelo modelo analítico existente.

No experimento em solo argiloso este modelo representou melhor as tendências observadas, bem como apresentou menor superestimativa dos valores de área. Neste caso, foi observada maior diferenciação dos valores de umidade e densidade entre os tratamentos. Além disso, nos solos argilosos, os parâmetros de atrito interno do solo e atrito solo - ferramenta sofreram maior influência da umidade.

Esses fatores combinados permitiram que o modelo proposto estimasse melhor a área de solo mobilizado.

As diferenças entre os resultados observados e preditos podem ser atribuídas a vários fatores, tais como, a influência do disco de corte à frente da haste, a diferença entre o ângulo de atrito interno do solo, estimado pelo modelo *fuzzy* secundário, e a situação real de campo, bem como a outros erros experimentais, não havendo incoerência com a teoria da mecânica dos solos.

As métricas estatísticas apresentaram níveis de erro considerados elevados, o que se deve a uma soma de efeitos. Um deles é a característica do modelo de superestimar os valores de área de solo mobilizado, sendo este efeito herança do modelo analítico, o qual aproxima a geometria da superfície de falha do solo à uma reta. Outro efeito, que é muito importante, resulta da diferença entre a área de solo cisalhado, a qual também faz parte da mobilização do solo, e a área de solo que chegou a ter a sua estrutura reorganizada sofrendo uma mobilização passível de ser medida experimentalmente. O efeito do disco de corte, bem como a superestimativa do ângulo de atrito interno do solo, também podem elevar os valores dos erros das métricas.

Conclui-se, portanto, que a modelagem *fuzzy* foi capaz representar a área de solo mobilizado por uma haste sulcadora estreita, pois apesar do efeito de superestimativa observado, este pode ser compensado por meio da inclusão de um ganho na saída do modelo. O modelo proposto foi capaz de contemplar situações não representadas pelos modelos analíticos, as quais envolvem o uso de ferramentas estreitas e com pequenos ângulos de ataque, como é o caso das hastes sulcadoras utilizadas no sistema de plantio direto.

O modelo *fuzzy* proposto para a predição do ângulo de atrito interno do solo foi capaz de reproduzir as tendências dos dados observados experimentalmente, e apresentou um erro percentual médio de 10,81%. Neste modelo, a prova de conceito utilizou dados bibliográficos, sendo observada grande variabilidade entre os dados dos diferentes autores.

Estes resultados foram possíveis graças ao conhecimento especialista, proveniente da teoria de mecânica do solo, o qual foi incorporado ao modelo, tornando possível tratar a variabilidade que existe entre os resultados dos diferentes trabalhos presentes na literatura.

As dificuldades enfrentadas durante a execução dos experimentos, a grande variabilidade do solo, e os erros associados aos métodos de medição, acabaram por implicar em muitas retomadas de decisão e mudanças nos procedimentos, tanto experimentais, quando na própria definição do modelo computacional mais adequado. Ao mesmo tempo em que essas dificuldades demandaram um longo processo, envolvendo várias interações, elas acabaram por resultar trabalhos paralelos, como é o caso do estudo da função do erro autorregressivo (*AREF*), iniciado com o intuito de esta ser aproveitada como entrada para o modelo computacional proposto. A *AREF* não pôde ser aproveitada para o modelo de representação da mobilização do solo, mas trouxe como frutos o desenvolvimento de um novo método para a determinação em tempo real de parâmetros do solo, como a umidade, a partir de séries temporais de leituras de sensores mecânicos (células de carga medindo os esforços atuantes na haste sulcadora), associando a *AREF* às lógicas computacionais. Este estudo está disponível em Johann et al. (2016).

5.1 Trabalhos futuros

Os modelos propostos nesta pesquisa contribuirão para o desenvolvimento de novos trabalhos relacionados com a automação de processos (sistemas *on-the-go*) abrangendo a otimização de operações de cultivo, bem como para o estudo da mobilização do solo promovida por ferramentas estreitas com baixos ângulos de ataque.

Estes modelos também poderão contribuir no desenvolvimento de *softwares* na área de agricultura de precisão, pois abrem a possibilidade para a predição da mobilização do solo, bem como do seu ângulo de atrito interno, a partir de bancos de dados contendo informações de propriedades do solo.

Os resultados desta pesquisa apontaram diversas demandas para futuros trabalhos, dentre elas:

- A realização de estudos aprofundando o conhecimento da área de solo mobilizado por ferramentas com ângulos de ataque mais baixos, permitindo refinar o modelo proposto nesta tese.

- A realização de novos experimentos em diferentes tipos de solo, para ampliar a validação do modelo *fuzzy* proposto para a representação da área de solo mobilizado pela ferramenta.
- O estudo de novos métodos para se determinar o perfil do solo e, portanto, a área de solo mobilizado, que sejam capazes de mensurar não somente o solo visivelmente mobilizado, mas também as fraturas e pequenas movimentações provocadas pela ferramenta. Neste sentido, estudos utilizando sensores como radares de solo podem ser interessantes.
- A realização de ensaios para a determinação da resistência do solo ao cisalhamento e, portanto, do seu ângulo de atrito interno, em diferentes tipos de solo, com diferentes condições de umidade, densidade e teor de matéria orgânica, seguindo-se uma mesma metodologia para todos.
- A realização de estudos para se quantificar o atrito entre solo e ferramenta para diferentes tipos de solo, em sistema de plantio direto.
- Novos estudos aprofundando o conhecimento da função do erro autorregressivo, relacionando-a solidamente com a teoria da mecânica dos solos.

Os modelos *fuzzy* propostos nesta tese abrem a possibilidade para novos trabalhos fazendo o emprego dos mesmos, tais como:

- Desenvolvimento de algoritmos de *software* para sistemas de controle em tempo real (*on-the-go*), visando a automação dos componentes de acabamento do sulco em semeadoras diretas. Neste caso, também são necessários novos estudos, para relacionar o parâmetro de área de solo mobilizado com a regulação ideal para cada componente de acabamento de sulco (disco aterradora e roda compactadora) de modo a se obter um melhor contato entre o solo e a semente.
- Estudar o uso dos valores de umidade do solo, preditos pela *AREF* em conjunto com as lógicas computacionais, com entradas para o modelo *fuzzy* de predição do ângulo de atrito interno do solo.
- Desenvolvimento de ferramentas computacionais (*softwares*) para o processamento de bancos de dados relacionados a mapas eletrônicos georreferenciados descrevendo propriedades físicas do solo, conjuntamente com dados obtidos por meio de instrumentação eletrônica embarcada em implementos agrícolas, com o objetivo de avaliar o potenciais problemas de

erosão do solo relacionados às operações de cultivo. Estudos envolvendo o uso conservacionista do solo, bem como de problemas de erosão, relacionados às propriedades mecânicas do solo e a ação das ferramentas de ataque ao solo, durante as operações de cultivo.

Os dados provenientes dos experimentos conduzidos durante do desenvolvimento da tese, bem como o seu processamento e análise, incluindo o estudo da função do erro autorregressivo (*AREF*), abrem a possibilidade para novos estudos envolvendo outros enfoques computacionais, como a mineração de dados e métodos de aprendizado supervisionado. Dentre eles, pode-se citar:

- As máquinas de vetores de suporte, que possibilitam o reconhecimento de padrões, bem como análise dos dados, por meio de classificação dos dados e regressão.
- O *Rotation forest*, que é um método para gerar classificadores baseados na extração de características, fazendo uso de várias análises de componentes principais, conjuntamente com árvores de decisão.

Esses métodos não fazem o uso do conhecimento especialista, e portando não apresentam os paradigmas relacionados a ele. Esta quebra de paradigma abre a possibilidade para a identificação de novos padrões de comportamento, podendo eventualmente ampliar o entendimento do fenômeno e da própria variabilidade relacionados à mobilização do solo no sistema de plantio direto.

Com esta pesquisa também espera-se ampliar o uso das lógicas computacionais em estudos nas áreas de mecânica e conservação dos solos, máquinas agrícolas, de desenvolvimento de *software* e de automação e controle.

REFERÊNCIAS

ARATANI, R. G. et al. Desempenho de semeadoras-adubadoras de soja em Latossolo Vermelho muito argiloso com palha intacta de milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 517–522, jun. 2006. DOI:10.1590/S1415-43662006000200037

ARAÚJO, A. G. **Estimativa e classificação da compactação do solo pelo tráfego de máquinas agrícolas através da modelagem nebulosa**. 2004. 224p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3141/tde-06012005-170624/publico/ModeloNebulosoCompactaSolo.pdf>>. Acesso em: 7 out. 2015.

ARAUJO, A. G.; CASÃO JUNIOR, R.; SIQUEIRA, R. Mecanização do Plantio Direto - Problemas e Soluções. **Informe da Pesquisa**, v. 137, jan. 2001. 15 p.

ARAÚJO, A. G. et al. Estimativa de propriedades físicas do solo a partir dos esforços atuantes em hastes sulcadoras de semeadores diretas - Resultados preliminares do método da função de distribuição de erro autorregressivo. In: Congresso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola, X e Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, XLI. CLIA/CONBEA 2012 Londrina, 2005, Jaboticabal. **Anais...** Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2012. CD-ROM

BABUŠKA, R. **Fuzzy Systems, Modeling and Identification**. Department of Electrical Engineering, Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 1996. 30p. Disponível em: <<http://www.dcsc.tudelft.nl/~rbabuska/transp/fuzzmod.pdf>> Acesso em: 14 mar. 2016.

BÁRDOSSY, A.; DUCKSTEIN, L. **Fuzzy rule-based modeling with applications to geophysical, biological and engineering systems**. Boca Raton: CRC Press, Inc., 1995. 232 p.

BRAIDA, J. A. *et al.* Coesão e atrito interno associados aos teores de carbono orgânico e de água de um solo franco arenoso. **Ciência Rural**, v. 37, n. 6, p. 1646–1653, 2007a. DOI:10.1590/S0103-84782007000600022

BRAIDA, J. A. *et al.* Resistência inter e intra-agregados em ensaios de cisalhamento direto de um nitossolo vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 2, p. 379–386, abr. 2007b. DOI:10.1590/S0100-06832007000200020

CALEGARI, A. Plantas de Cobertura. In: CASÃO JUNIOR, RUYJUNIOR, R. C.; SIQUEIRA, R.; MEHTA, T. R.; PASSINI, J. J. (Ed.). **Sistema de Plantio Direto com Qualidade**. Foz do Iguaçu: ITAIPU Binacional, 2006. p. 55–73.

CARVALHO, R. de C. R. *et al.* Soil shear strength under non-irrigated and irrigated short duration grazing systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 631–638, jun. 2010. DOI:10.1590/S0100-06832010000300004

CASÃO JUNIOR, R.; SIQUEIRA, R. Máquinas para Manejo de Vegetações e Semeadura em Plantio Direto. In: CASÃO JÚNIOR, R.; SIQUEIRA, R.; MEHTA, Y. R.; PASSINI, J. J. (Ed.). **Sistema Plantio Direto com Qualidade**. Foz do Iguaçu: ITAIPU Binacional, 2006. p. 85–126.

CEPIK, C. T. C.; TREIN, C. R.; LEVIEN, R. Força de tração e volume de solo mobilizado por haste sulcadora em semeadura direta sobre campo nativo, em função do teor de água no solo, profundidade e velocidade de operação. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 2, p. 447–457, ago. 2005. DOI:10.1590/S0100-69162005000200018

CHANEY, K.; HODGSON, D. R.; BRAIM, M. A. The effects of direct drilling, shallow cultivation and ploughing on some soil physical properties in a long-term experiment on spring barley. **The Journal of Agricultural Science**, v. 104, n. 01, p. 125, fev. 1985. DOI:10.1017/S0021859600043069

CHOI, Y. S.; LEE, K. S.; PARK, W. Y. Application of a neural network to dynamic draft model. **Agricultural and Biosystems Engineering**, v. 1, n. 2, p. 67–72, 2000.

CONTE, O. et al. Demanda de tração, mobilização de solo na linha de semeadura e rendimento da soja, em plantio direto. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 44, n. 10, p. 1254–1261, 2009. DOI:10.1590/S0100-204X2009001000007

CORRÊA, A. N.; TAVARES, M. H. F.; URIBE-OPAZO, M. A. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e seus efeitos sobre a produtividade do trigo. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 30, n. 1, p. 81, 30 jul. 2009. DOI:10.5433/1679-0359.2009v30n1p81

CORTEZ, J. W. et al. Comportamento da cultura do sorgo em função do tipo de rodas compactadoras e cargas verticais impostas na operação de semeadura. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 2, p. 461–469, ago. 2006. DOI:10.1590/S0100-69162006000200014

GIASSON, E. et al. Decision trees for digital soil mapping on subtropical basaltic steeplands. **Scientia Agricola**, v. 68, n. 2, p. 167–174, abr. 2011. DOI:10.1590/S0103-90162011000200006

GODWIN, R. J. An extended octagonal ring transducer for use in tillage studies. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 20, n. 4, p. 347–352, dez. 1975. DOI:10.1016/0021-8634(75)90071-2

GODWIN, R. J. A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces. **Soil and Tillage Research**, v. 97, n. 2, p. 331–340, dez. 2007. DOI:10.1016/j.still.2006.06.010

GODWIN, R. J.; O'DOGHERTY, M. J. Integrated soil tillage force prediction models. **Journal of Terramechanics**, v. 44, n. 1, p. 3–14, jan. 2007. DOI:10.1016/j.jterra.2006.01.001

GODWIN, R. J.; SPOOR, G. Soil failure with narrow tines. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 22, n. 3, p. 213–228, set. 1977. DOI:10.1016/0021-8634(77)90044-0

GODWIN, R. J.; SPOOR, G.; SOOMRO, M. S. The effect of time arrangement on soil forces and disturbance. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 30, n. April, p. 47–56, jan. 1984. DOI:10.1016/S0021-8634(84)80005-0

GOH, A. T. C. Back-propagation neural networks for modeling complex systems. **Artificial Intelligence in Engineering**, v. 9, n. 3, p. 143–151, jan. 1995. DOI:10.1016/0954-1810(94)00011-S

GRAF, F.; FREI, M.; BOLL, A. Effects of vegetation on the angle of internal friction of a moraine. **Forest, Snow and Landscape Research**, v. 82, n. 1, p. 61–77, 2009. Disponível em: <<http://www.issw.ch/dienstleistungen/publikationen/pdf/9698.pdf>>. Acesso em: 7 out. 2015.

GROTTA, D. C. C. et al. Cultura do milho em diferentes profundidades de deposição de adubo sobre duas culturas de cobertura. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 6, n. 2, p. 65 – 71, 2006. Disponível em: <<http://eduep.uepb.edu.br/rbct/sumarios/pdf/culturamilho.pdf>>. Acesso em 7 out. 2015.

GUO, W.; RAGE, U. K.; NINOMIYA, S. Illumination invariant segmentation of vegetation for time series wheat images based on decision tree model. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 96, p. 58–66, ago. 2013. DOI:10.1016/j.compag.2013.04.010

HETTIARATCHI, D. R. P.; REECE, A. R. Symmetrical three-dimensional soil failure. **Journal of Terramechanics**, v. 4, n. 3, p. 45–67, jan. 1967. DOI:10.1016/0022-4898(67)90126-7

HETTIARATCHI, D. R. P.; WITNEY, B. D.; REECE, A. R. The calculation of passive pressure in two-dimensional soil failure. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 11, n. 2, p. 89–107, jun. 1966. DOI:10.1016/S0021-8634(66)80045-8

HEUVELINK, G. B. M.; WEBSTER, R. Modelling soil variation: Past, present, and future. **Geoderma**, v. 100, n. 3-4, p. 269–301, 2001. DOI:10.1016/S0016-7061(01)00025-8

HUANG, Y. et al. E. Development of soft computing and applications in agricultural and biological engineering. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 71, n. 2, p. 107–127, maio 2010. DOI:10.1016/j.compag.2010.01.001

JAIN, R.; JAIN, P. K.; BHADARIA, S. S. Computational Approach To Predict Soil Shear Strength. **International Journal of Engineering Science and Technology Vol. 2(8), 2010, 3874-3885**, v. 2, n. 8, p. 3874–3885, 2010.

JANA, R. B.; MOHANTY, B. P.; SHENG, Z. Upscaling Soil Hydraulic Parameters in the Picacho Mountain Region Using Bayesian Neural Networks. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 2, p. 463–473, 2012. DOI:10.13031/2013.41396

JAYASURIYA, H. P. W.; SALOKHE, V. M. A Review of Soil-tine Models for a Range of Soil Conditions. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 79, n. 1, p. 1–13, maio 2001. DOI:10.1006/jaer.2000.0692

JOHANN, A. L. **Projeto construção e avaliação de uma servo-válvula dosadora para sistemas de aplicação de fertilizantes líquidos a taxas variáveis**. 2004. 135 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?down=vtls000375904>>. Acesso em: 7 out. 2015.

JOHANN, A. L. et al. Desenvolvimento do projeto de um perfilógrafo eletrônico micro-processado. In: Congresso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola, X e Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, XLI. CLIA/CONBEA, Londrina. **Anais...** Londrina: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2012. CD-ROM.

JOHANN, A. L. et al. Soil moisture modeling based on stochastic behavior of forces on a no-till chisel opener. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 121, p. 420–428, fev. 2016. DOI:10.1016/j.compag.2015.12.020

KAMPHUIS, C. et al. Decision-tree induction to detect clinical mastitis with automatic milking. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 70, n. 1, p. 60–68, jan. 2010. DOI:10.1016/j.compag.2009.08.012

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1979. 262 p.

KIRCHNER, K.; TÖLLE, K.-H.; KRIETER, J. The analysis of simulated sow herd datasets using decision tree technique. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 42, n. 2, p. 111–127, fev. 2004. DOI:10.1016/S0168-1699(03)00119-4

KWEON, G. Delineation of site-specific productivity zones using soil properties and topographic attributes with a fuzzy logic system. **Biosystems Engineering**, v. 112, n. 4, p. 261–277, ago. 2012. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2012.04.009

LI, H. et al. State-Space Description of Field Heterogeneity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, n. 2, p. 585–592, 2002. DOI:10.2136/sssaj2002.5850

LIMA, T. C. B. **Desenvolvimento de um sistema de custo reduzido para geração de sinal de correção diferencial, em tempo real, para gps**. 2006. 184 p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2006. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?down=vtls000386512>>. Acessado em: 7 out. 2015.

LIU, J. et al. Steady-State Models for the Movement of Soil and Straw During Tillage with a Single Sweep. **Transactions of the ASABE**, v. 51, n. 3, p. 781–789, 2008. DOI:10.13031/2013.24514

MAMDANI, E. H. Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis. **IEEE Transactions on Computers**, v. C-26, n. 12, p. 1182–1191, dez. 1977. DOI:10.1109/TC.1977.1674779

MARAKOĞLU, T.; ÇARMAN, K. Fuzzy knowledge-based model for prediction of soil loosening and draft efficiency in tillage. **Journal of Terramechanics**, v. 47, n. 3, p. 173–178, jun. 2010. DOI:10.1016/j.jterra.2009.10.001

MCKYES, E. **Soil cutting and tillage (developments in agricultural engineering)**. Amsterdam: Elsevier Science Ltd, 1985. 217 p.

MCKYES, E.; ALI, O. S. The cutting of soil by narrow blades. **Journal of Terramechanics**, v. 14, n. 2, p. 43–58, jun. 1977. DOI:10.1016/0022-4898(77)90001-5

MCKYES, E.; DESIR, F. L. Prediction and field measurements of tillage tool draft forces and efficiency in cohesive soils. **Soil and Tillage Research**, v. 4, n. 5, p. 459–470, set. 1984. DOI:10.1016/0167-1987(84)90053-9

MION, R. L.; BENEZ, S. H. Esforços em ferramentas rompedoras de solo de semeadoras de plantio direto. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 5, p. 1594–1600, out. 2008. DOI:10.1590/S1413-70542008000500036

MOLIN, J. P. Agricultura de precisão. Parte I: O que é e estado da arte em sensoriamento. **Engenharia Agrícola**, v. 17, n. 2, p. 97–107, 1997.

MORIMOTO, T. et al. Dynamic Optimization Using Neural Networks and Genetic Algorithms for Tomato Cool Storage to Minimize Water Loss. **Transactions of the ASAE**, v. 46, n. 4, 2003. DOI:10.13031/2013.13938

MUZILLI, O. Manejo do solo em sistema de plantio direto. In: JUNIOR, R. C.; SIQUEIRA, R.; MEHTA, T. R.; PASSINI, J. J. (Ed.). **Sistema de Plantio Direto com Qualidade**. Foz do Iguaçu: ITAIPU Binacional, 2006. p. 9–27.

PAPADOPOULOS, A.; KALIVAS, D.; HATZICHRISTOS, T. Decision support system for nitrogen fertilization using fuzzy theory. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 78, n. 2, p. 130–139, set. 2011. DOI:10.1016/j.compag.2011.06.007

PAYNE, P. C. J.; TANNER, D. W. The relationship between rake angle and the performance of simple cultivation implements. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 4, n. 4, p. 312–325, 1959.

PIETERSMA, D. et al. Induction and evaluation of decision trees for lactation curve analysis. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 38, n. 1, p. 19–32, jan. 2003. DOI:10.1016/S0168-1699(02)00105-9

PLASSE, R.; RAGHAVAN, G. S. V.; MCKYES, E. Simulation of Narrow Blade Performance in Different Soils. **Transactions of the ASAE**, v. 28, n. 4, p. 1007–1012, 1985. DOI:10.13031/2013.32378

RAHMAN, A. et al. Prediction of Energy Requirement of a Tillage Tool in a Soil Bin using Artificial Neural Network. In: ASABE Annual International Meeting, 2011 Louisville, Kentucky. **Anais...** St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2011. Disponível em: <<http://elibrary.asabe.org/abstract.asp?JID=5&AID=37744&CID=loui2011&T=1>>. Acesso em: 7 out. 2015. DOI:10.13031/2013.37744

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2a. ed. Barueri: Editora Manole, 2012. 487 p.

ROCHA, W. W. et al. Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos na região de Lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 2, p. 297–303, jun. 2002. DOI:10.1590/S0100-06832002000200002

ROSA, D. P. da. **Comportamento dinâmico e mecânico do solo sob níveis diferenciados de escarificação e compactação**. 2007. 122 p. Dissertação (Mestrado) - Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, 2007. Disponível em: <http://cascavel.ufsm.br/tede/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=906>. Acesso em: 7 out. 2015.

ROUL, A. K. et al. Predicting the draught requirement of tillage implements in sandy clay loam soil using an artificial neural network. **Biosystems Engineering**, v. 104, n. 4, p. 476–485, dez. 2009. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2009.09.004

SAKAI, K.; ANDRADE-SANCHES, P.; UPADHYAYA, S. K. Periodicity and stochastic hierarchical orders of soil cutting force data detected by an auto-regressive error distribution function (AREF). **Transactions of the ASAE**, v. 48, n. 6, p. 2039–2046, 2005. DOI:10.13031/2013.20080

SANTO, A. C. E. et al. Desenvolvimento de um dispositivo para medição de esforços em hastes de semeadoras de plantio direto. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 2, p. 288–298, abr. 2010. DOI:10.1590/S0100-69162010000200011

SCALÉA, M. **Plantio direto**. Passo Fundo: Aldeia Norte Editora, 2007. 112 p.

SHAW, I. S.; SIMÕES, M. G. **Controle e modelagem fuzzy**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher: FAPESP, 1999. 112 p.

SILVA, A. J. N. da; CARVALHO, F. G. de. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 853–862, out. 2007. DOI:10.1590/S0100-06832007000500003

SILVA, R. B. et al. Resistência ao cisalhamento de um latossolo sob diferentes uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p. 165–173, fev. 2004. DOI:10.1590/S0100-06832004000100016

SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactibility: A review of some practical aspects. **Soil and Tillage Research**, v. 16, n. 1-2, p. 179–201, abr. 1990. DOI:10.1016/0167-1987(90)90029-D

SOARES, T. A. **Rodas compactadoras e aterradoras na qualidade de acabamento de semeadura direta**. 2009. 95 p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2009. Disponível em: < http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/100852/soares_ta_dr_jabo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acessado em: 7 out. 2015.

TAKAGI, T.; SUGENO, M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v. SMC-15, n. 1, p. 116–132, jan. 1985. DOI:10.1109/TSMC.1985.6313399

TERZAGHI, K. General Wedge Theory of Earth Pressure. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, v. 106, n. 1, p. 68–80, 1941.

TORMENA, C. A. et al. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 6, p. 1023–1031, dez. 2004. DOI:10.1590/S0100-06832004000600011

VARGENS, J. M.; TANSCHKEIT, R.; VELLASCO, M. M. B. R. Previsão de produção agrícola baseada em regras linguísticas e lógica fuzzy. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, v. 14, n. 2, p. 114–120, jun. 2003. DOI:10.1590/S0103-17592003000200003

VASCONCELOS, R. F. B. et al. Limites de consistência e propriedades químicas de um latossolo amarelo distrocoeso sob aplicação de diferentes resíduos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 639–648, jun. 2010. DOI:10.1590/S0100-06832010000300005

YOUNG, S. C.; JOHNSON, C. E.; SCHAFER, R. L. Quantifying Soil Physical Condition for Tillage Control Applications. **Transactions of the ASAE**, v. 31, n. 3, p. 0662–0667, 1988. DOI:10.13031/2013.30763

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 338–353, jun. 1965. DOI:10.1016/S0019-9958(65)90241-X

ZHANG, H. Organic matter incorporation affects mechanical properties of soil aggregates. **Soil and Tillage Research**, v. 31, n. 2-3, p. 263–275, ago. 1994. DOI:10.1016/0167-1987(94)90085-X

ZHANG, J.; KUSHWAHA, R. L. A modified model to predict soil cutting resistance. **Soil and Tillage Research**, v. 34, n. 3, p. 157–168, jun. 1995. DOI:10.1016/0167-1987(95)00466-6

ZHANG, Z. X.; KUSHWAHA, R. L. Applications of neural networks to simulate soil-tool interaction and soil behavior. **Canadian Agricultural Engineering**, v. 41, n. 2, p. 119–125, 1999. Disponível em: <http://csbe-scgab.ca/docs/journal/41/41_2_119_ocr.pdf>. Acesso em: 7 out. 2015.

ZIMMERMANN, H.-J. **Fuzzy set theory - and its applications**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2001. ISBN:978-94-010-3870-6. DOI:10.1007/978-94-010-0646-0

ZORLUER, I. et al. Application of a fuzzy rule-based method for the determination of clay dispersibility. **Geoderma**, v. 160, n. 2, p. 189–196, dez. 2010. DOI:10.1016/j.geoderma.2010.09.017

ANEXO

Tabela 26 - Dados detalhados dos ensaios descrevendo valores do ângulo de atrito interno do solo, em diferentes trabalhos da literatura

<i>Fonte</i>	<i>Solo</i>	<i>Argila (g.kg⁻¹)</i>	<i>Umidade (g.g⁻¹)</i>	<i>Densidade (kg.m⁻³)</i>	<i>Âng. de atrito Interno (°)</i>
Braida et al. (2007a)	Argissolo Vermelho Amarelo arênico	155	0,09	1,36	35,4
		155	0,14	1,36	34,9
		155	0,21	1,36	32,5
Carvalho et al. (2010)	Latossolo Vermelho distrófico (LVAd)	270	0,24	1,38	30,6
			(Cap.Campo)		
		280	0,26	1,35	29,2
Rocha et al. (2002)	Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd)	310	0,29	1,31	11,3
	Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (PVAd)	370	0,28	1,29	7,8
	Cambissolo Háplico Tb distrófico típico (CXbd)	396	0,25	1,19	8,97
	Latossolo Vermelho distróférico (LVdf)	570	0,21	1,15	23,75
	Latossolo Vermelho distrófico (LVd)	570	0,22	1,12	6,3
Silva e Carvalho (2007)	Latossolo Amarelo coeso típico	295	0,07	1,26	42,3
		295	0,12	1,26	40
		295	0,19	1,26	36,1
		295	0,24	1,26	35,8
		361	0,07	1,51	37,2
		361	0,12	1,51	36,5
		361	0,19	1,51	34,6
		361	0,24	1,51	34,2
		452	0,07	1,35	34,6
		452	0,12	1,35	33,4
		452	0,19	1,35	33
		452	0,24	1,35	31,4

Continua

Conclusão

Fonte	Solo	Argila (g.kg^{-1})	Umidade (g.g^{-1})	Densidade (kg.m^{-3})	Âng de atrito Interno ($^{\circ}$)
Silva et al. (2004)	Latosolo Vermelho distrófico	420	0,05	1,12	41
		420	0,16	1,12	39
		420	0,27	1,12	34
		420	0,38	1,12	33
		460	0,05	1,21	42
		460	0,16	1,21	41
		460	0,27	1,21	36
		460	0,38	1,21	35
		533	0,05	0.96	44
		533	0,16	0.96	42
		533	0,27	0.96	35
		533	0,38	0.96	31
(BRAIDA et al., 2007b)	Nitrosolo Vermelho distrófico	787	0,294	-	27,9
Marakoğlu e Çarman (2010)	Clay loam	350	0,142	-	31,85

Figura 77 - Situação experimental em que ocorre e limitação do modelo de McKyes, bem como a área de solo mobilizado observada experimentalmente nesta situação

OBS. Parâmetros utilizados: $\phi=29,8^{\circ}$, $\delta=25,2^{\circ}$, $w=6,3\text{cm}$, $d=10\text{cm}$.

Fonte: Adaptado de McKyes e Desir (1984)

Figura 78 - Situação experimental em que ocorre e limitação do modelo de McKyes, bem como a área de solo mobilizado observada experimentalmente nesta situação

OBS. Parâmetros utilizados: $\phi=29,8^{\circ}$, $\delta=25,2^{\circ}$, $w=6,3\text{cm}$, $d=25\text{cm}$.

Fonte: Adaptado de McKyes e Desir (1984)

Figura 79 - Situação experimental em que ocorre e limitação do modelo de McKyes, bem como a área de solo mobilizado observada experimentalmente nesta situação

OBS. Parâmetros utilizados: $\phi = 36^\circ$, $\delta = 23,3^\circ$, $w = 6,3$ cm, $d = 25$ cm.

Fonte: Adaptado de McKyes e Desir (1984)

Figura 80 - Situação experimental em que ocorre e limitação do modelo de McKyes, bem como a área de solo mobilizado observada experimentalmente nesta situação

OBS. Parâmetros utilizados: $\phi = 33,1^\circ$, $\delta = 22,1^\circ$, $w = 6,3$ cm, $d = 25$ cm.

Fonte: Adaptado de McKyes e Desir (1984)

Figura 81 - Situação experimental em que ocorre e limitação do modelo de McKyes, bem como a área de solo mobilizado observada experimentalmente nesta situação

OBS. Parâmetros utilizados: $\phi = 29,8^\circ$, $\delta = 25,2^\circ$, $w = 12.5$ cm, $d = 25$ cm.

Fonte: Adaptado de McKyes e Desir (1984)

Figura 82 - Situação experimental em que ocorre e limitação do modelo de McKyes, bem como a área de solo mobilizado observada experimentalmente nesta situação

OBS. Parâmetros utilizados: $\phi = 33,1^\circ$, $\delta = 22,1^\circ$, $w = 12.5$ cm, $d = 25$ cm.

Fonte: Adaptado de McKyes e Desir (1984)

GLOSSÁRIO

- **Ângulo de ataque da ferramenta:** Ângulo geométrico descrito entre a superfície horizontal do solo e a superfície da parte da ferramenta que efetivamente rompe o solo.
- **Ângulo de atrito interno do solo:** Parâmetro que quantifica o atrito entre as partículas do solo. Ele representa a inclinação da reta que relaciona a tensão de cisalhamento de uma porção do solo em com a tensão normal à esta porção, obtida a partir de ensaios de cisalhamento em amostras de solo.
- **Ângulo de atrito solo-ferramenta:** Parâmetro que quantifica o atrito entre o solo e a superfície da ferramenta. Ele representa a inclinação de uma reta que descreve a relação entre a tensão de atrito ao longo da interface solo-ferramenta e a tensão normal exercida pelo solo sobre a superfície da ferramenta.
- **Aterramento:** operação realizada durante a semeadura que consiste na colocação de solo no sulco de plantio após a deposição de fertilizantes e sementes.
- **Efeito de borda:** Efeito provocado por uma ferramenta de ataque ao solo sobre a porção do solo compreendida lateralmente a esta ferramenta, desconsiderando-se a porção do solo situada exatamente à sua frente.
- **Empolamento:** Expansão volumétrica do solo que ocorre devido à sua ruptura e movimentação, durante a passagem da ferramenta (haste sulcadora). Quando a ferramenta escava o solo, que se encontra em certo grau de compactação, esse se expande, aumentando o seu volume e ao mesmo tempo diminuindo a sua densidade.
- **Falha do solo:** Falha do solo por cisalhamento, ruptura do solo.
- **Fechamento do sulco:** aterramento.
- **Ferramenta de ataque ao solo:** Dispositivo integrante de semeadora agrícola cuja função é romper o solo para abertura do sulco para deposição de fertilizante e sementes.
- **Ferramentas de cultivo:** Ferramenta empregada nas operações de cultivo do solo. Elas são responsáveis pela mobilização do solo, por isso também são consideradas como ferramentas de ataque ao solo.

- **Haste sulcadora estreita:** Ferramenta de ataque ao solo empregada em semeadoras diretas com formato parabólico e largura inferior a 30mm.
- **Implemento agrícola:** nome atribuído a uma máquina ou equipamento utilizado em operações agrícolas. Geralmente opera acoplando a um trator agrícola, sendo acionado e tracionado por este.
- **Limites de consistência do solo (Limites de Atteberg):** São limites empíricos que avaliam a natureza do solo. Eles dividem-se em: limite de contração, onde o solo passa de sólido (rígido) para o semi-sólido (solo solto); limite de plasticidade, onde o solo passa de semi-sólido para plástico (pastoso); e limite de liquidez, onde o solo passa de plástico para líquido.
- **Modelagem fuzzy:** modelar um fenômeno utilizando a teoria dos conjuntos *fuzzy* e a lógica *fuzzy*.
- **Modelagem nebulosa:** Modelagem *fuzzy*.
- **Multi layer perceptron:** Rede neural que utiliza um neurônio do tipo “perceptron” e é composta de múltiplas camadas de neurônios.
- **RBF – Radial basis function:** Função matemática que representa a distancia de um determinado ponto no espaço em relação ao seu centro. A rede neural do tipo função base radial combina duas camadas, uma com neurônios do tipo “perceptron” e outra com neurônios dotados de uma função base radial em conjunto com uma função de ativação gaussiana.
- **Rede neural artificial:** Representação matemática simplificada do funcionamento de um neurônio biológico.
- **Semeadora direta:** implemento agrícola utilizado na operação de semeadura em sistema de plantio direto. Realiza as operações de: rompimento da palha, abertura do sulco, deposição de adubo e de semente e aterramento do sulco.