

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LIANA DO ROCIO BASTOS DE MORAIS

DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE DO SOLO AO
FLUXO DE ÁGUA E VINHAÇA EM UMA ÁREA DE CANA-DE-AÇÚCAR

CURITIBA
2015

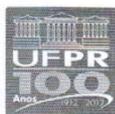
LIANA DO ROCIO BASTOS DE MORAIS

DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE DO SOLO AO
FLUXO DE ÁGUA E VINHAÇA EM UMA ÁREA DE CANA-DE-AÇÚCAR

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Ambiental, no Curso de Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. D.Sc. Robson André Armindo

CURITIBA
2015



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

TERMO DE APROVAÇÃO DE PROJETO FINAL

Liana do Rocio Bastos de Moraes

Determinação do coeficiente de permeabilidade do solo ao fluxo de água e de vinhaça em uma área de cana-de-açúcar

Projeto Final de Curso, aprovado como requisito parcial para a obtenção do Diploma de Bacharel em Engenharia Ambiental no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, com nota 75, pela seguinte banca examinadora:

Orientador(a):

Robson André Armindo
Departamento de Solos e Engenharia Agrícola UFPR

Membro(a) 1:

Agenor Maccari Junior
Departamento de Solos e Engenharia Agrícola UFPR

Membro(a) 2:

Clayton C. Figueiredo
Faculdade Educacional Araucária - FACEAR

Membro(a) 3:

Emílio G. F. Mercuri
Departamento de Engenharia Ambiental UFPR

Curitiba, 02 de julho de 2015

À minha amada mãe, Irene Schiochet Moraes, por ter sido escolhida por Deus para ser a minha primeira e eterna professora, sendo paciente, carinhosa e amiga em todos os momentos dessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ser a luz do meu caminho e minha fortaleza. Aos meus pais, Arilto e Irene, e ao meu namorado, Gustavo, a minha eterna gratidão pelo incentivo diário e por todo esforço realizado para a minha formação profissional.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Robson André Armindo, pela paciência, ensinamentos e por ser um grande mestre.

Agradeço aos professores Emílio Graciliano Ferreira Mercuri e Nelson Luís Dias pela amizade, incentivo e ajuda quando mais precisei.

Agradeço à Aline Mari Huf dos Reis e à Josianne Meyer pela amizade, carinho e paciência.

Agradeço aos integrantes do NAEB – Núcleo de Atividades em Engenharia de Biosistemas pela ajuda disponibilizada. Em especial à Alessandra Calegari da Silva, Clayton Cesaromma Figueiredo e Maria Eliza Turek pela ajuda e ensinamentos.

RESUMO

O conhecimento da permeabilidade de líquidos no solo é de extrema importância para o desenvolvimento de culturas agrícolas. Principalmente, quando o líquido trata-se da água, propriedade definida como permeabilidade hidráulica. Desde o final da década de 70, um resíduo das indústrias de álcool e açúcar, chamado de vinhaça, vem sendo aplicado no solo como biofertilizante pois apresenta alto teor de potássio, nitrogênio e matéria orgânica. Essa utilização surgiu após a proibição do descarte da vinhaça nos corpos hídricos, por causa do seu alto potencial poluidor. Devido a falta de estudos diretamente relacionados ao coeficiente de permeabilidade do solo e ao fluxo de vinhaça e devido à falta de legislação no âmbito federal e estadual torna-se justificável a avaliação do coeficiente de permeabilidade da vinhaça, que é o objetivo central deste trabalho. Foram avaliadas as propriedades físicas e químicas do solo e os coeficientes de permeabilidade do solo ao fluxo de água e de vinhaça para amostras coletadas em uma área de cana-de-açúcar na cidade de Morretes, Paraná, Brazil. As quatro diferentes áreas de manejo: plantio de cana-de-açúcar (SSC), pousio (FLW), mata nativa (NF) e pousio com aplicação de vinhaça (FLV) nas camadas de 0-0,20m e 0,20-0,40m. Todos os solos pertencem à classe textural franco-argilo-arenosa, com densidade de partícula média de 2708 kg m^{-3} e densidade do solo média de 1361 kg m^{-3} . Os coeficientes de permeabilidade do solo ao fluxo de água (K_a) foram: 9,05, 17,86, 305,90, 31,66 e 6,84, 34,81, 172,51, 218,17 mm h^{-1} , respectivamente, para as áreas e camadas. Já os coeficientes de permeabilidade do solo ao fluxo de vinhaça (K_v) foram: 0,59, 2,54, 28,55 e 5,01 mm h^{-1} e 3,43, 3,79, 71,47 e 63,11 mm h^{-1} , respectivamente, para as áreas e camadas. Há baixa correlação linear entre K_a e K_v com coeficiente de determinação (R^2) de 0,34. Esses valores demonstraram que o K_v é menor que K_a e que a viscosidade da vinhaça aliada às modificações que o fluido causa na estrutura do solo são responsáveis por essa diminuição no coeficiente de permeabilidade do solo.

Palavras-Chave: Vinhaça, Fertirrigação, Permeabilidade Hidráulica e Lei de Darcy.

ABSTRACT

Knowledge of the liquid in the soil permeability is a property of paramount importance for the development of agricultural crops and in environmental studies. When the liquid is water, the hydraulic permeability property is evaluated and known, however it is not normal to use other liquids in this determination. Since the late 70's, a residue of alcohol and sugar industries, known as vinasse, is being applied to the soil, as bio-fertilizer, because it has high levels of potassium, nitrogen and organic matter. Its use became more usual after the ban on disposal of vinasse in streams and rivers, because of their high pollution potential. Due to lack of studies related to the vinasse rate through in the soil and the lack of federal and state legislation, this work aims to evaluate the soil permeability coefficient to vinasse movement under four different soil managements. So, soil physical properties and the permeability coefficient to water and vinasse application of samples collected in sugarcane area from Morretes city, Paraná State, Brazil will be evaluated. To determine the physical properties of the soil under four different soil managements: sugarcane crop area (SCC), fallow (FLW), native forest (NF) and fallow with vinasse application (FLV) in layers of 0-0,20m (layer A) and 0,20-0,40m (layer B). The soils belong to the same texture class: sandy clay loam with average particle density of 2708 kg m^{-3} and average soil density of 1361 kg m^{-3} . The permeability of soil to water flow coefficient (K_w) were 9.05, 17.86, 305.90, 31.66 and 6.84, 34.81, 172.51, 218.17 mm h^{-1} , respectively for the areas and layers. The permeability of soil to vinasse flow coefficient (K_v) were 0.59, 2.54, 28.55, 5.01 and 3.43, 3.79, 71.47 and 63.11 mm h^{-1} , respectively for the areas and layers. There is low linear correlation between K_w and K_v with a coefficient of determination (R^2) of 0.34. These values demonstrated that K_v is less than K_w , the kinematic viscosity of vinasse and the modifications that the fluid causes the soil structure are responsible for this reduction in soil permeability coefficient.

Keywords: Vinasse, Fertirrigation, Hydraulic Permeability and Darcy's law.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Diagrama de fluxo do processo de obtenção do álcool, a partir da cana-de-açúcar	15
Figura 02 - Mapa de localização das unidades produtoras de álcool e açúcar do estado do Paraná	18
Figura 03 - Diagrama triangular das classes texturais dos solos	21
Figura 04 - Diagrama do sistema de carga constante para medida da permeabilidade hidráulica em solo saturado.....	27
Figura 05 - Delimitação da área de amostragem	33
Figura 06 - Área de amostragem do solo por manejo	34
Figura 07 - Coleta da amostra de solo	35
Figura 08 - Método do densímetro	35
Figura 09 - Método do balão volumétrico	36
Figura 10 - Permeâmetro de carga constante	37
Figura 11 - Amostra de solo no permeâmetro de carga constante.....	37
Figura 12 - Análise da concentração de fósforo no solo	41
Figura 13 - a) Permeabilidade do solo ao fluxo de água e vinhaça. b) Log K água e Log K vinhaça.....	47
Figura 14 - a) Relação da porosidade com a permeabilidade do solo à água e vinhaça. b) Relação da densidade do solo com a permeabilidade do solo à água e vinhaça.....	48
Figura 15 - a) Relação 1:1 da porosidade (α) com a umidade na saturação (θ_s). b) Relação da porosidade (α) e densidade do solo seco (ρ_s)	49
Figura 16 - a) Relação do teor de argila com a permeabilidade do solo à água e a vinhaça. b) Relação do teor de areia com a permeabilidade do solo à água e a vinhaça.....	49
Figura 17 - Distribuição ao longo dos pontos amostrais da macroporosidade, microporosidade, teor de argila e areia na área avaliada.....	50
Figura 18 - a) Relação da microporosidade e permeabilidade. b) Relação da macroporosidade e permeabilidade	51

Figura 19 - Distribuição ao longo dos pontos amostrais da permeabilidade por uso de solo e camadas	51
Figura 20 - Curva de retenção da água no solo (CRAS)	53
Figura 21 - Curva de retenção da água no solo (CRAS) por uso de solo e camada.	54
Figura 22 - a) Curva de retenção da água no solo (CRAS) na camada de 0-0,20m. b) Curva de retenção da água no solo (CRAS) na camada de 0,20-0,40m	55
Figura 23 - a) Relação 1:1 da umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) de Andrade e Stone (2011) com a umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) por Prevedello (1999). b) Relação 1:1 da umidade no ponto de murchamento permanente (θ_{pmp}) com umidade residual (θ_r).....	56
Figura 24 - a) Distribuição dos pontos amostrais em relação a capacidade de água disponível (CAD) e camadas. b) Distribuição da CAD média em relação aos diferentes usos do solo e camadas	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Composição química média da vinhaça obtida a partir da fermentação de diferentes mostos	16
Tabela 02 – Produção da cana-de-açúcar na safra 2013/2014 em alguns estados brasileiros	16
Tabela 03 – Série histórica da área plantada, produtividade e produção da cana-de-açúcar no estado do Paraná	17
Tabela 04 – Porosidade total por classes de solos	21
Tabela 05 – Classificação dos poros do solo	22
Tabela 06 – Permeabilidade hidráulica (K) para diferentes tipos de solo.....	23
Tabela 07 – Relação entre a permeabilidade hidráulica (K) e a umidade do solo.....	32
Tabela 08 – Composição química do solo da área estudada.....	40
Tabela 09 – Propriedades físicas da vinhaça.....	41
Tabela 10 – Composição química da vinhaça.....	42
Tabela 11 – Fração granulométrica do solo, ρ_s e ρ_p por uso do solo e camada	43
Tabela 12 – Porosidade (α), microporosidade e macroporosidade por uso do solo e camada	45
Tabela 13 – Parâmetros obtidos pelo programa SPLINTEX e permeabilidade hidráulica referente à capacidade de campo.....	53
Tabela 14 – Capacidade de água disponível (CAD) por uso do solo e por camada .	56

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	DEFINIÇÃO	14
2.1.1	VINHAÇA.....	14
2.1.2	COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	14
2.1.3	MAIORES PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL.....	16
2.1.4	LEGISLAÇÃO AMBIENTAL.....	18
2.1.5	TIPOS DE SOLO	20
2.1.6	INFILTRAÇÃO DE LÍQUIDOS NO SOLO.....	23
2.1.7	LEI DE DARCY	24
2.1.8	PERMEABILIDADE HIDRÁULICA.....	25
2.2	MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO.....	26
2.2.1	PERMEÂMETRO DE CARGA CONSTANTE	27
2.2.2	PERMEÂMETRO DE CARGA DECRESCENTE OU VARIÁVEL	28
2.3	FATORES DO SOLO QUE AFETAM A PERMEABILIDADE HIDRÁULICA DO SOLO	29
2.3.1	COMPACTAÇÃO.....	29
2.3.2	POROSIDADE	30
2.3.3	TEXTURA	31
2.3.4	UMIDADE	31
3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	32
3.1	LOCALIZAÇÃO E ETAPAS DO EXPERIMENTO.....	32
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
5.	CONCLUSÃO.....	59
	REFERÊNCIAS.....	61

1. INTRODUÇÃO

Com a presente busca de combustíveis alternativos que tenham menor emissão de gases de efeito estufa, o álcool, obtido a partir de fonte de energia renovável, surgiu como alternativa à utilização de combustíveis fósseis. Porém, a partir da produção de álcool é gerado um resíduo conhecido como vinhaça, a uma proporção de 13 litros de vinhaça para 1 litro de álcool produzido (Paulino et al., 2002; Uyeda, 2009; Almeida et al., 2007; Medina & Brinholi, 1998; Glória & Orlando Filho, 1984).

A vinhaça é perigosa ao meio ambiente pois tem o potencial para contaminar águas superficiais e aquíferos, poluir e salinizar o solo. A partir da década de 80 foi proibido o descarte, direto ou indireto, do resíduo em corpos d'água, devido à degradação do meio aquático pela degradação aeróbia dos compostos causada pelo excesso de matéria orgânica presente na solução, além de fatores como acidez, temperatura elevada, mau odor e coloração marrom.

A solução encontrada pelo setor sucroalcooleiro foi a utilização da vinhaça na fertirrigação, por apresentar nutrientes minerais, como potássio, fósforo, nitrogênio e matéria orgânica. Uma alternativa economicamente favorável, devido à redução do uso de fertilizantes químicos, e alternativamente realizável, já que ambientalmente não é permitido o descarte desse resíduo em cursos d'água sem que o devido tratamento seja realizado.

A taxa de infiltração de água no solo, os projetos de irrigação e drenagem, as perdas de solo por erosão e as perdas de substâncias químicas por lixiviação são dependentes do fluxo de água no solo. Esses processos são influenciados pela permeabilidade hidráulica, um parâmetro do solo que representa a permeabilidade do meio a passagem de água. Por ser função da umidade do solo, o valor máximo da permeabilidade hidráulica ocorre quando o solo está saturado. A equação que melhor representa este parâmetro é a equação de Darcy, onde a permeabilidade hidráulica é a permeabilidade do meio à passagem da água.

A capacidade de infiltração da água em um solo é uma propriedade que depende da granulometria, distribuição do tamanho e poros, umidade antecedente à

chuva, condição superficial do solo e presença de adensamento subsuperficial (Silva et al., 2007).

Devido a essa relação, segundo Uyeda (2009) a vinhaça pode alterar o fluxo de líquidos no solo, por conter alta concentração de matéria orgânica influencia na textura, densidade e estabilidade estrutural do solo. E, por possuir alta concentração de íons, pode diminuir a permeabilidade hidráulica do solo por afetar a composição da solução do solo, no complexo de troca e na expansibilidade.

Desde meados dos anos 50 existem estudos sobre a aplicação de vinhaça no solo, porém esses estudos objetivam avaliar os efeitos da vinhaça sobre a permeabilidade hidráulica do solo. Mas, não avaliam essa permeabilidade ao fluxo desse próprio resíduo.

Com esses resultados seria possível gerenciar melhor a aplicação desse resíduo, evitando assim o risco de contaminação, por meio do escoamento superficial e/ou da percolação profunda em direção aos corpos d'água. Atualmente, não existe legislação federal acerca do limite de vinhaça que possa ser aplicado ao solo. Assim, o solo, os cursos d'água e o lençol freático estão propensos a constante descarga de material altamente fertilizante e que possui potencial poluidor superior ao de esgotos domésticos.

De acordo com a literatura existem diferentes métodos de campo e de laboratório para a obtenção da permeabilidade hidráulica. Diferente dos métodos de campo, o estudo em laboratório aceita a análise de amostras com estrutura indeformada ou em determinados casos a construção de amostras indeformadas a partir do solo deformado, para condições de saturação e não saturação. Para casos de saturação, são utilizados aparelhos simples conhecidos como permeômetros.

O objetivo específico deste trabalho é determinar o coeficiente de permeabilidade do solo ao fluxo de água e de vinhaça não diluída, através de amostras indeformadas previamente saturadas, utilizando-se o método do permeômetro de carga constante. Ademais, além do coeficiente de permeabilidade do solo, outras propriedades físicas e químicas do solo foram determinadas, como: textura, densidade de partículas, densidade de solo seco, porosidade total, microporosidade, macroporosidade, curva de retenção da água no solo, capacidade de água disponível, carbono, potássio, cálcio, magnésio, sódio, alumínio, pH e fósforo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Definição

2.1.1 Vinhaça

Segundo Glória (1975) a partir da produção de açúcar e da utilização do melaço na produção de álcool são gerados resíduos conhecidos como torta de filtro de Oliver, águas residuais, vinhaça e bagaço. Sendo a vinhaça amplamente utilizada nas lavouras canavieiras sem contemplar a variabilidade em sua composição e a elevada concentração de minerais.

Para Silva et al. (2007) a vinhaça, restilo ou vinhoto é o produto líquido residual do processo de destilação da cana-de-açúcar. Segundo Freire & Cortez (2000), esse resíduo conhecido também por vinhoto, restilo, garapão, vinhote, caxixi, mosto, vinasse, stillage, etc., é um poluente corrosivo de cor marrom, característica ácida e que possui temperatura de 107 °C ao sair do processo de destilação.

A partir do ano de 1975 com a criação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool) a produção de etanol passou de 664 milhões de litros na safra de 1976/77 para 11,5 bilhões de litros em 1987/88, segundo a COPERSUCAR (1989).

Atualmente, segundo a União da Indústria de Cana-de-açúcar (UNICA), a produção de safra 2013/2014 foi de 27,5 bilhões de litros de etanol. Considerando-se a relação de 13 litros de vinhaça para cada litro de etanol produzido, foram gerados, apenas por essa produção, aproximadamente 358 bilhões de litros de vinhaça. A vinhaça também é obtida pela indústria açucareira, a partir da fermentação do melaço.

2.1.2 Composição Química

Por definição, a fermentação é a decomposição natural das substâncias expostas à ação da água, do ar e do calor e a destilação é obtida pela condensação dos vapores de álcool que escapam mediante o aquecimento de um mosto fermentado. Como o ponto de ebulição do álcool é menor que o da água presente no mosto, o álcool evapora, dando-se assim a separação da água e o álcool.

O mosto é o líquido obtido antes do passar processo de fermentação; vinho é o líquido que se obtém da fermentação, total ou parcial, do mosto; e a vinhaça é o resíduo da destilação do vinho (Figura 01). Para Santos (2000) a vinhaça pode ser obtida a partir do mosto de melaço, que é um subproduto da produção de açúcar, chamado melaço; do mosto de caldo, produzido em destilarias que produzem apenas álcool, obtida a partir da fermentação alcoólica do caldo; e do mosto misto, obtido a partir da mistura do mosto de caldo e melaço. A Figura 1 apresenta o fluxo de obtenção do álcool e conseqüente geração da vinhaça.

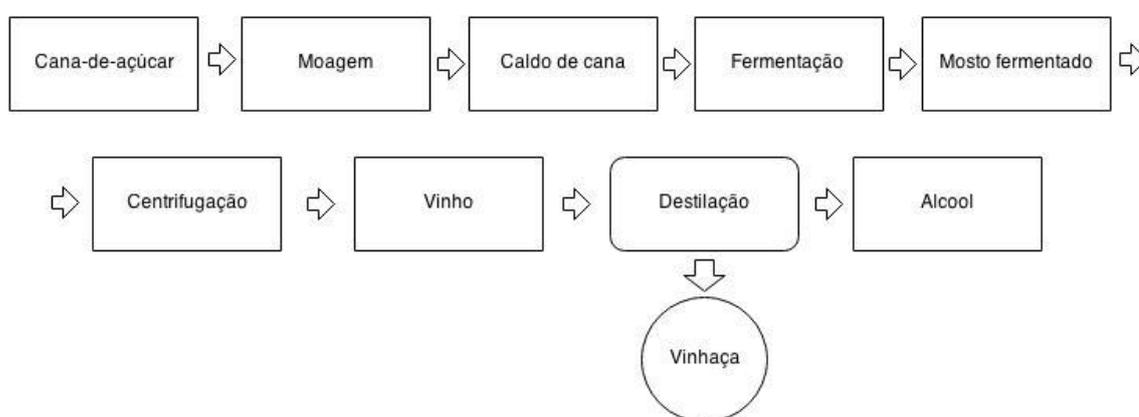


Figura 01 – Diagrama de fluxo do processo de obtenção do álcool, a partir da cana-de-açúcar. Fonte: Adaptado de GLÓRIA (1977).

Segundo Glória et al. (1973) ao analisarem a vinhaça a partir de três tipos de mosto: mosto de melaço, mosto de caldo e mosto misto, concluiu que a vinhaça a partir do mosto de melaço possui aproximadamente quatro vezes mais minerais e matéria orgânica do que a vinhaça de caldo. O valor do pH pode ser considerado o mesmo para os três tipos. Dentre os elementos minerais analisados o potássio foi o elemento mais significativo e a matéria orgânica o elemento que apresenta maior concentração. Para Paulino et al. (2002), Freire & Cortez (2000), Rodella & Ferrari (1977), o potássio é o cátion prevalente e mais significativo na vinhaça.

Confirmando as análises acima, Rosseto (1987) afirma que há diferença na composição química entre a vinhaça de mosto de melaço e a vinhaça de mosto de cana-de-açúcar, tendo a primeira maior concentração de nutrientes. Cerri et al. (1988) citam esses nutrientes, tais como: potássio, cálcio, magnésio, fósforo, manganês e nitrogênio. Entretanto, Pontes (1959) já havia confirmado a

predominância de potássio, cálcio e sódio, nutrientes esses que continuam presentes até a etapa final de destilação.

Tabela 01 – Composição química média da vinhaça obtida a partir da fermentação de diferentes mostos.

Elementos	Vinhaça de mosto		
	de melação	misto	de caldo
N (kg m ⁻³)	0,77	0,46	0,28
P ₂ O ₅ (kg m ⁻³)	0,19	0,24	0,20
K ₂ O (kg m ⁻³)	6,00	3,06	1,47
CaO (kg m ⁻³)	2,45	1,18	0,46
MgO (kg m ⁻³)	1,04	0,53	0,29
SO ₄ (kg m ⁻³)	3,73	2,67	1,32
Matéria orgânica (kg m ⁻³)	52,04	32,63	23,44
Fe (ppm)	80,00	78,00	69,00
Cu (ppm)	5,00	21,00	7,00
Zn (ppm)	3,00	19,00	2,00
Mn (ppm)	8,00	6,00	7,00
pH	4,40	4,10	3,70

Fonte: GLÓRIA E ORLANDO FILHO, 1984

Para Silva et al. (2007) é necessário que se observe a dose de aplicação da vinhaça. Pois, a aplicação de doses elevadas contribui para a salinização do solo, afeta a qualidade da cana para a produção de açúcar e pode contaminar o lençol freático.

2.1.3 Maiores produtores de cana-de-açúcar no Brasil

Segunda a União da Indústria de Cana-de-açúcar (ÚNICA, 2014) o estado de São Paulo representa 56,23% da produção, seguido por Goiás com 9,49%, Minas Gerais com 9,34%, Paraná com 6,46%, Mato Grosso do Sul com 6,35%, Alagoas com 3,31%, Mato Grosso com 2,6%, Pernambuco com 2,3% e os demais estados contribuem com 3,91% do total (Tabela 2).

Tabela 02 – Produção da cana-de-açúcar na safra 2013/2014 em alguns estados brasileiros.

Estado	Produção (mil toneladas)
São Paulo	367.450
Goiás	62.018
Minas Gerais	61.042

Estado	Produção (mil toneladas)
Paraná	42.216
Mato Grosso do Sul	41.496
Alagoas	21.638
Mato Grosso	16.989
Pernambuco	15.070

Fonte: UNICA – União da Indústria de Cana-de-açúcar

Na safra 2013/2014 o Paraná teve uma diminuição na área plantada passando de 601,8 ha para 586,4 ha. Fato esse que não alterou sua produção que de 39.723,5 mil ton para 42.231,0 mil ton (Tabela 3).

Tabela 03 – Série histórica da área plantada, produtividade e produção da cana-de-açúcar no estado do Paraná.

Safra	Área plantada (ha)	Produtividade (kg ha ⁻¹)	Produção (mil ton)
2005/06	410,9	69.365	28.504,9
2006/07	436,0	78.280	34.130,9
2007/08	509,3	84.271	42.918,3
2008/09	524,5	84.271	44.200,1
2009/10	536,0	84.900	45.502,8
2010/11	582,3	74.394	43.321,1
2011/12	611,4	66.269	40.519,5
2012/13	610,8	65.032	39.723,5
2013/14	586,4	72.017	42.231,0
2014/15*	644,7	73.530	47.401,1

*Previsão

Fonte: CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento (2014)

A produção de cana-de-açúcar no estado do Paraná concentra-se principalmente nas regiões noroeste e nordeste do estado (Figura 02). As principais cidades produtoras são Paranavaí, Maringá, Cianorte, Umuarama, Jacarezinho, Londrina e Cornélio Procopio (Tabela 04).



Figura 02 – Mapa de Localização das Unidades Produtoras de Álcool e Açúcar do Estado do Paraná
 Fonte: ALCOPAR – Associação dos Produtores de Bioenergia do Estado do Paraná (2014)

2.1.4 Legislação Ambiental

A preocupação ambiental com o descarte inadequado da vinhaça teve seu início com a Portaria GM nº 323, de 29 de novembro de 1978, que proibiu o descarte do resíduo em corpos hídricos a partir da safra de 1979/1980. Na portaria foi instituído que os produtores deverão apresentar projetos para implantação de sistema adequado de tratamento e/ou utilização da vinhaça, objetivando o controle da poluição hídrica.

A Portaria GM nº 158, de 03 de novembro de 1980 prevê que as destilarias que não possuam áreas para aplicação ou disposição do vinhoto, poderão adotar os mesmos critérios estabelecidos para o lançamento dos demais efluentes líquidos industriais, desde que autorizadas formalmente pelos respectivos órgãos estaduais de controle do meio ambiente e pela Secretaria Especial do Meio Ambiente – SEMA. A autorização será concedida a título precário, após análise da documentação hábil encaminhada pela destilaria interessada, até que sejam definidas as condições tecnicamente viáveis para tratamento ou aproveitamento da vinhaça.

Na esfera estadual, a norma técnica P4.231 de dezembro/2006 da CETESB define a primeira legislação que estabelece critérios e procedimentos para o armazenamento, transporte e aplicação da vinhaça, gerada pela atividade sucroalcooleira no processamento de cana-de-açúcar, no solo do Estado de São Paulo, considerando não apenas efeitos em corpos d'água. O estado de Minas Gerais possui a Deliberação Normativa COPAM nº 164, de 30 de março de 2011,

que prevê normas complementares para usinas de açúcar e destilarias de álcool, referente ao armazenamento e aplicação de vinhaça e águas residuárias no solo agrícola.

No estado do Paraná a Portaria nº 239, de 30 de novembro de 2010, estabelece critérios, prazos e procedimentos para a impermeabilização das lagoas de armazenamento e canais mestres ou primários para transporte da vinhaça, gerada pelas usinas de beneficiamento de cana-de-açúcar para produção de etanol, açúcar e energia elétrica. A partir da publicação desta, as lagoas de armazenamento de vinhaça a serem construídas em cada unidade já deverão ser impermeabilizadas com geomembrana impermeabilizante ou outra técnica de igual ou superior efeito.

O Decreto nº 10068, de 06 de fevereiro de 2014, considerando a necessidade de se dar efetividade ao "princípio da prevenção" e ao "princípio do desenvolvimento sustentável" e considerando a relevância da atividade sucroenergética para o desenvolvimento econômico, social e ambiental do estado do Paraná. Estabelece critérios, prazos e procedimentos para adequação ambiental das usinas de beneficiamento de cana-de-açúcar para produção de etanol, açúcar e energia elétrica. Sendo as usinas de beneficiamento de cana-de-açúcar para produção de etanol, açúcar e energia elétrica responsáveis pela implantação, operação, manutenção e monitoramento do sistema de armazenamento e distribuição de vinhaça.

Os sistemas de armazenamento e distribuição de vinhaça e canais mestres ou primários de uso permanente deverão ser instalados em áreas previamente avaliadas pelo órgão ambiental competente e deverão ser impermeabilizados com geomembrana impermeabilizante ou outra técnica de efeito igual ou superior.

A partir da safra de 2016, os canais principais já instalados em cada unidade produtora ou em áreas destinadas à atividade sucroalcooleira deverão ser impermeabilizados no prazo máximo de três anos.

Apesar de possuir um decreto recente referente ao manejo da vinhaça, em que o estado reconhece que o potencial poluidor do resíduo, ainda não foi implementado na legislação do estado do Paraná critérios para o uso da vinhaça como fertilizante, sendo definido quantidades e critérios para aplicação.

2.1.5 Tipos de solo

Para Forsythe (1975) para saber o grau de coesão e adesão entre partículas de solo é necessário que se conheça sua textura. A textura do solo afeta a taxa de infiltração, a retenção de água, a aeração e a disponibilidade de nutrientes. Para Santos et al. (2010) o conhecimento dessa característica possibilita utilizar fertilizantes de maneira coerente e efetiva.

Prevedello & Armindo (2015) definem a fase líquida como caracterizada pela umidade do solo e representada pela água ou solução do solo que contenha íons H_2PO_4^- , SO_4^- , NO_3^- , Na^+ , K^+ , Cl^- , Ca^{2+} , H^+ , NH_4^+ , etc. O solo é dito saturado quando a fase líquida ocupa todos os poros, caso contrário, a fase líquida ocupa somente parte dos poros, assim, o solo é dito não saturado. Os solos agrícolas são representados pela segunda definição onde o espaço poroso possui fase líquida e gasosa. O equilíbrio entre ambas visando um adequado suprimento de água e ar para plantas constitui-se num dos mais importantes fatores do solo. A capacidade do solo em suprir as raízes da plantas de água, ar, calor e nutrientes, determina a sua fertilidade.

A granulometria do solo é a distribuição de suas partículas constituintes, de natureza inorgânica ou mineral, em classes de tamanho. Segundo o United States Department of Agriculture (USDA), as partículas são conforme seu tamanho, sendo: areia (0,05 a 2 mm), silte (0,002 a 0,05 mm) e argila (< 0,002 mm).

Segundo Lemos & Santos (1996) é raro que um solo seja formado por uma única granulometria. Portanto, surgiram as classes de textura para demonstrar as diferentes associações de areia, silte e argila. Prevedello & Armindo (2015) apresentam o diagrama triangular das classes texturais do solo (Figura 3), que foi desenvolvido pelo United States Department of Agriculture (USDA) e é utilizado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS). Ao realizar a análise textural do solo, obtêm-se os teores de areia, silte e argila. Com esses dados, localiza-se um ponto no diagrama triangular que corresponderá a uma determinada classe textural.

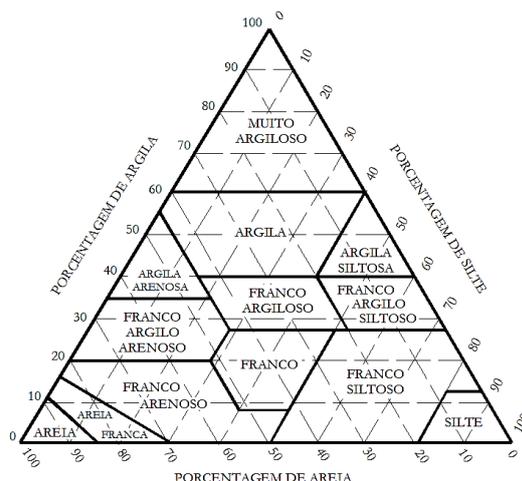


Figura 03 – Diagrama triangular das classes texturais dos solos
 Fonte: PREVEDELLO & ARMINDO (2015)

O solo ao sofrer intemperismo decompõe-se em minerais. A partir da reação dos óxidos de ferro e de alumínio com a sílica é formada a argila. Sendo a relação sílica : alumínio: 2:1 – para solos temperados e 1:1 – para solos tropicais. Os solos tropicais possuem maior temperatura, maior concentração de alumínio, velocidade mais célere na decomposição da matéria orgânica e na absorção de água pelas plantas, e capacidade de troca catiônica (CTC) baixa. Os solos arenosos possuem baixa capacidade de troca catiônica e de concentração de matéria orgânica, o que resulta numa maior lixiviação de cátions.

Prevedello & Armindo (2015) afirmam que o transporte e armazenamento de solução de solo e de ar ocorre dentro dos espaços porosos, que também é ocupado por raízes. A porosidade total, que é a fração volumétrica dos poros no solo difere de solo para solo. Na Tabela 04, apresenta-se o intervalo de porosidade encontrado na superfície de solos cultivados.

Tabela 04 – Porosidade total por classes de solos

Classes de solos	α ($m^3 m^{-3}$)
Arenosos	0,35 – 0,50
Siltosos e francos	0,30 – 0,55
Argilosos	0,40 – 0,65
Humíferos	0,60 – 0,80
Turfosos	0,80 – 0,85

Fonte: PREVEDELLO & ARMINDO (2015).

Além de depender da porosidade total, o armazenamento, disponibilidade e transporte de solução no solo, depende também do diâmetro dos poros (Tabela 05). Onde os macroporos são importantes para drenagem e aeração, os mesoporos para

a redistribuição de água e os microporos, que apresenta uma movimentação lenta, garantindo a sobrevivência de algumas plantas.

Tabela 05 – Classificação dos poros do solo

Classes de poros	Diâmetro ($m \cdot 10^{-6}$)
Macroporos	> 300
Mesoporos	50 – 300
Microporos	< 50

Fonte: PREVEDELLO & ARMINDO (2015)

Segundo Libardi (2005) o potencial mátrico ψ_m está relacionado com a quantidade de água presente no solo. Na medida em que o conteúdo de água no solo diminui, aumenta-se a força com que a água fica retida nos poros do solo, aumentando-se, em outras palavras, o módulo do potencial mátrico $|\psi_m|$. Já o potencial gravitacional ψ_g é o trabalho necessário para manter a água do solo suspensa em determinado ponto em relação à atração da gravidade. Em solo argilosos há um equilíbrio entre a distribuição horizontal de ψ_m e a distribuição de ψ_g , resultando em valores significativos de retenção de água. Já para os solos arenosos, onde a distribuição de ψ_g é maior devido à macroporosidade do solo, obtêm-se baixos valores de retenção de água.

Para Prevedello & Armindo (2015), a superfície específica é a área superficial total das partículas dividida pela sua massa ou pelo seu volume. Para Silva et al. (2004) e Resck (1981), a matéria orgânica, apesar da pequena concentração na maioria dos solos colabora para elevar o valor da superfície específica do solo, beneficiando a capacidade de troca catiônica (CTC), conseqüentemente corrobora para formação de uma matriz que retém água e que fornece elementos nutritivos para as plantas.

Segundo Resk (1981), a capacidade de retenção de água do solo está diretamente relacionada com a superfície específica. Portanto, solos argilosos possuem elevada retenção de água por sua alta superfície específica. Solos arenosos, conseqüentemente, por apresentarem baixa superfície específica, não têm capacidade significativa de retenção. As classes texturais médias, franco-siltoso, franco e franco-argiloso possuem superfície específica intermediária, portanto têm um grau de adsorção de água intermediário. Os dados podem ser confirmados

observando-se os valores da permeabilidade hidráulica (K) avaliados pelo permeâmetro de carga constante para cada tipo de solo (Tabela 06).

Tabela 06 – Permeabilidade hidráulica (K) para diferentes tipos de solo

Tipo de solo	K (mm h ⁻¹)	K (m dia ⁻¹)
Areia	210,06	4,96
Areia franca	61,21	1,45
Franco arenoso	25,91	0,61
Franco	13,21	0,31
Franco siltoso	6,86	0,16
Franco argilo arenoso	4,32	0,10
Franco argiloso	2,29	0,05
Franco argilo siltoso	1,52	0,04
Argila arenosa	1,27	0,03
Argila siltosa	1,02	0,02
Argila	0,51	0,01

Fonte: FERGUSSON & DEBO (1990)

2.1.6 Infiltração de líquidos no solo

Segundo Libardi (2005) define-se infiltração como a entrada de água no solo através da sua superfície, isto é, através da interface solo-atmosfera. É um processo que separa quanto da precipitação (chuva e ou irrigação) flui sobre a superfície do solo e quanto flui abaixo da superfície, esta última tanto vertical como horizontalmente, dependendo do tipo do solo. Para Silva et al. (2007) a capacidade de infiltração da água de um solo é uma propriedade que depende de sua granulometria, distribuição do tamanho de poros, umidade antecedente à chuva, condição superficial do solo e presença de adensamento subsuperficial.

Dalri et al. (2010) ao aplicarem cinco doses de vinhaça nas doses de 0, 200, 250, 300 e 350 m³ ha⁻¹ em um solo de textura franco arenosa obtiveram a diminuição da taxa de infiltração do solo. Essa diminuição pode causar erosão e aumento do escoamento superficial.

Segundo Uyeda (2009) a vinhaça pode alterar o fluxo de líquidos no solo, por conter alta concentração de matéria orgânica que influencia na textura, densidade e estabilidade estrutural do solo, por possuir alta concentração de íons pode diminuir a permeabilidade hidráulica do solo por afetar a composição da solução do solo, no complexo de troca e na expansibilidade.

Para Meurer et al. (2000) a vinhaça possui elementos que se destacam como contaminantes de águas superficiais e subterrâneas, como fosfato e nitrato. Cunha et al. (1981) ao estudarem a utilização da vinhaça como fertilizante e condicionador de solo, detectaram nitrato e potássio em profundidades superiores a 1 metro, concluindo haver risco de poluição das águas subterrâneas.

2.1.7 Lei de Darcy

Segundo Prevedello & Armindo (2015) em 1856, Henry Darcy realizou uma experiência de infiltração vertical da água em meios porosos. A partir do experimento, Darcy verificou que a densidade de fluxo q_0 é proporcional à área da seção transversal A e, também à diferença entre os potenciais hidráulicos (Δh). Entretanto, q_0 é inversamente proporcional ao comprimento L do meio filtrante. Assim, a Equação ou Lei de Darcy é estabelecida na forma:

$$q_0 = \frac{V}{At} = K \frac{\Delta h}{L} \quad (1)$$

em que: q_0 : densidade de fluxo, $m \ s^{-1}$, K : permeabilidade hidráulica, $m \ s^{-1}$; A : área da seção transversal, m^2 e $\Delta h/L$: gradiente hidráulico, m/m .

Pela equação (1) K é uma propriedade do meio poroso, que demonstra a velocidade que o líquido atravessa o meio. Darcy utilizou duas colunas idênticas, uma com areia grossa e outra com areia fina. O valor de K da primeira deve ser maior que o da segunda, isto é, sob condições de saturação, a areia grossa deve conduzir mais facilmente o líquido. Como o líquido utilizado foi água, Darcy chamou a constante de permeabilidade hidráulica.

Segundo Prevedello & Armindo (2015), a permeabilidade hidráulica é dependente unicamente do meio poroso, fixando-se o fluido nas mesmas condições de regime de fluxo. Assim, um solo muito poroso pode ser muito permeável se esses poros forem grandes e interconectados, tal como se verifica com areias limpas, ou quase impermeáveis se seus poros são muito pequenos, como ocorre em alguns solos argilosos ou em certos materiais vulcânicos. Em geral, solo com baixa

porosidade, não são permeáveis, devido à ligação entre os poros ser mais complicada.

Ainda segundo Prevedello & Armino (2015) alguns parâmetros alteram a permeabilidade hidráulica, como a natureza do solo, a massa específica e a viscosidade do fluido, que são funções da temperatura e pressão. Essa relação é representada por:

$$K = K_e \frac{\rho g}{\eta} \quad (2)$$

em que: K : permeabilidade hidráulica, m s^{-1} ; K_e : permeabilidade específica, m^2 ; ρ : massa específica do fluido, kg m^{-3} ; η : viscosidade dinâmica do fluido, $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$; e g : aceleração da gravidade, m s^{-2} .

2.1.8 Permeabilidade hidráulica

Segundo Lobato et al. (1998) a permeabilidade hidráulica é uma importante propriedade física do solo por ser essencial em projetos de irrigação, disposição de resíduos líquidos e conservação do solo. Os autores avaliaram os efeitos da aplicação de água e vinhaça nas dosagens de 100, 200, 400, 800 e 1000 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ na permeabilidade hidráulica em amostras de Latossolo Roxo distrófico saturado, utilizando infiltrômetro de carga constante e método do perfil instantâneo, respectivamente. Conforme a adição das dosagens de vinhaça houve uma diminuição progressiva da permeabilidade hidráulica. Em termos médios, a permeabilidade hidráulica para as dosagens 100, 200 e 400 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ foi 22% inferior nos tratamentos com vinhaça do que nos tratamentos com água. Nas dosagens 600, 800 e 1000 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, a diminuição foi, em média, de 52%.

Camilotti et al. (2010) verificaram a aplicação anual de lodo de esgoto e vinhaça em amostras Latossolo Vermelho argiloso. A soma das doses de resíduos totalizaram 39 e 51 t ha^{-1} de lodo de esgoto e de 532 e 1064 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ de vinhaça, até o 3º e 4º cortes da cana-de-açúcar. Amostras de solo foram retiradas nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 e 40-50 cm de profundidade, após as colheitas do 3º e

4º cortes. Ao final, verificaram que os índices de matéria orgânica, grau de floculação e permeabilidade hidráulica do solo permaneceram constante.

Uyeda et al. (2013) ao aplicarem vinhaça nas doses de 0, 150, 300 e 450 m³ ha⁻¹ em três tipos de solo saturado: Latossolo Vermelho Escuro, Latossolo Roxo e eutrófico Nitossolo Vermelho, pertencentes a classe textural argilosa. Verificaram a diminuição da permeabilidade hidráulica apenas para o Latossolo Vermelho Escuro. Foi observado aumento nas concentrações de potássio, cálcio e capacidade de troca de cátions (CTC) para doses de vinhaça até 300 m³ ha⁻¹.

Bonini et al. (2014) avaliaram a aplicação de vinhaça em Latossolo Vermelho argiloso, classe textural argilosa, densidade de partícula de 2580 kg m⁻³ e densidade de solo seco de 1400 kg m⁻³. Foram realizadas aplicações com água destilada (testemunha), águas residuária e vinhaça, avaliada a condutividade elétrica, teores de Na, Ca e Mg, e as características dos atributos químicos e físicos após a irrigação com os resíduos citados. A aplicação da vinhaça resultou numa acentuada diminuição da permeabilidade hidráulica do solo. Os autores recomendam o uso racional do resíduo.

2.2 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO

Os métodos de determinação da permeabilidade hidráulica do solo são divididos em métodos de campo e métodos de laboratório. Diferente dos métodos de campo, o estudo em laboratório aceita a análise de amostras com estrutura deformada ou indeformada, para condições de saturação e não saturação.

Segundo Hillel (1971) para solos saturados de estrutura estável a permeabilidade hidráulica é uma característica constante. Situa-se na ordem de magnitude de 10⁻⁴ a 10⁻⁵ mm h⁻¹ em solos arenosos e 10⁻⁶ a 10⁻⁹ mm h⁻¹ em solos argilosos.

Em condições de saturação o estudo das amostras com estrutura deformada ou indeformada é feito por aparelhos simples, conhecidos como permeômetros.

2.2.1 Permeâmetro de carga constante

Segundo Libardi (2005), o permeâmetro de carga constante é indicado para solos com alta permeabilidade (solos arenosos), com permeabilidade hidráulica maior que $2 \cdot 10^{-3} \text{ mm s}^{-1}$. A amostra sempre deve ser o mais indeformada possível, para que seja observada a condição real do campo, obtendo assim resultados mais significativos.

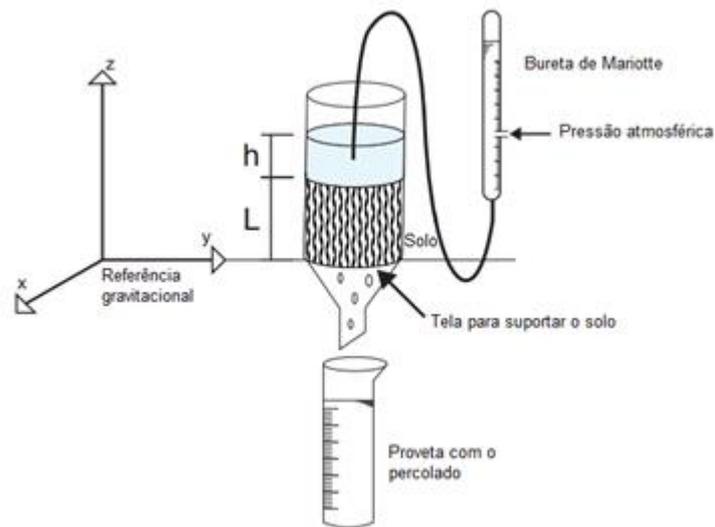


Figura 04 – Diagrama do sistema de carga constante para medida da permeabilidade hidráulica em solo saturado.

Fonte: Adaptado de LIBARDI (2005).

A bureta de Mariotte serve para a manutenção de uma carga constante de líquido. Quando o sistema atinge a condição de regime estacionário é aplicada a equação de Darcy-Buckingham, onde o gradiente de potencial total é $(h + L)/L$,

$$K = \frac{-q_0}{(h + L)/L} \quad (3)$$

em que: q_0 : densidade de fluxo, m s^{-1} ; permeabilidade hidráulica na saturação, m s^{-1} ; h/L : gradiente hidráulico, mm^{-1} .

Sendo

$$q_0 = - \frac{V_A L}{At(h + L)} \quad (4)$$

resulta em

$$K = \frac{V_A L}{A t (h + L)} \quad (5)$$

Para amostras com estrutura deformada é realizado o mesmo estudo com algumas alterações.

2.2.2 Permeâmetro de carga decrescente ou variável

Segundo Libardi (2005), o permeâmetro de carga variável é indicado para solos com baixa permeabilidade (solos argilosos), com permeabilidade hidráulica menores que $2 \cdot 10^{-3} \text{ mm s}^{-1}$. Segue-se o mesmo procedimento de saturação do permeâmetro de carga constante. Ao invés de da bureta de Mariotte é conectado um tubo longo de vidro.

Nesse método, a carga hidráulica no topo da coluna decresce, valendo-se da eq.(1). Nesse caso, a densidade de fluxo instantânea pode ser definida como:

$$q_0 = \frac{d V_A}{A dt} \quad (6)$$

em que: q_0 : densidade de fluxo, $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$, $dV_A/A dt$: vazão de água por unidade de área do solo, m^3 ; A : área da secção transversal da coluna de solo através da qual a água passa, m^2 ; dt : intervalo de tempo durante o qual o volume de água dV_A passa através de A , s.

A partir do funcionamento do experimento, o valor dV_A/dt é negativo, representando o movimento da água para baixo. Retornando valores negativos para q_0 conforme a equação (7).

$$\frac{d V_A}{dt} = - K A \frac{\Delta h}{L} \quad (7)$$

Assumindo-se que $dV_A = A.dH$, em que A : área da secção transversal da amostra, m^2 ; e dH = variação da altura de líquido, m , tem-se que,

$$\frac{dH}{dt} = -K \left(\frac{h}{L} + 1 \right) \quad (9)$$

que integrada modifica-se para

$$K = \frac{L}{\Delta t} \ln \left[\frac{h_{(t=0)} + L}{h_{(t=t)} + L} \right] \quad (10)$$

em que: Δt : intervalo de tempo para a diferença de potencial hidráulico entre os extremos da amostra diminuir de $h_{(t=0)}$ para $h_{(t=t)}$, s ; A : área da secção transversal da coluna de solo, m^2 ; L : comprimento da amostra, m .

2.3 FATORES DO SOLO QUE AFETAM A PERMEABILIDADE HIDRÁULICA

2.3.1 Compactação

Hamdi & Srasra (2012) ao analisar a permeabilidade hidráulica de solos argilosos da Tunísia para uso como forros de aterro constaram que os valores da permeabilidade hidráulica reduziram com o aumento da densidade da amostra para todos os solos. As amostras foram comprimidas mecanicamente por um sistema uniaxial a diferentes pressões para se obter três densidades úmidas.

Para Shafiq et al. (1994) a compactação do solo altera a capacidade do solo de reter água, diminui a taxa de infiltração e permeabilidade hidráulica saturada, e aumenta a resistência à penetração. Foram estudadas as características de compactação de um solo franco-argiloso sob várias cargas de compactação e umidade do solo antecedente. A umidade do solo teve um efeito mais pronunciado do que a carga. A resistência à penetração varia com o conteúdo de água, enquanto a permeabilidade hidráulica saturada diminuiu com o aumento da densidade a granel. Os efeitos da compactação foram mais acentuadas na superfície de 0,1 m, mas eram insignificantes em 0,1-0,2 m de profundidade quando a compactação foi

empregado em níveis de água disponível até 40%. A estreita faixa de umidade do solo adequada para as operações de preparo requer o uso de práticas adequadas para reduzir a variabilidade espacial da umidade do solo superficial.

Francisca & Glatstein (2010) avaliaram a influência das interações biológicas, físicas e químicas sobre a percolação de chorume em solos compactados. A permeabilidade hidráulica de longa duração de misturas silte-bentonita compactada foi medida com água destilada, chorume e solução nutritiva. A permeabilidade hidráulica do solo diminuiu significativamente com o tempo, quando o líquido permeado possui microrganismos. A diminuição da permeabilidade hidráulica foi causada pela redução da porosidade eficaz devido ao entupimento dos poros.

Silva & Kato (1997) ao analisarem o efeito do selamento superficial para três tipos de manejo diferente de um solo com elevada macroporosidade verificaram que os parâmetros físicos hídricos que influenciam na infiltração, principalmente a macroporosidade e a permeabilidade hidráulica saturada, são bem maiores para o solo sem intervenções. A permeabilidade hidráulica é aproximadamente vinte vezes maior do que na área de plantio direto e três vezes maior do que na área de manejo convencional. As áreas de plantio direto e manejo convencional possuem valores próximos de macroporosidade. Ao analisarem a permeabilidade hidráulica de tais solos obtiveram valores de $127,2 \text{ mm h}^{-1}$ na área de plantio direto, e $815,4 \text{ mm h}^{-1}$ na área de manejo convencional. Ressalta-se a influência da macroporosidade na permeabilidade hidráulica, uma vez que essa é fortemente relacionada a drenagem da água no solo.

2.3.2 Porosidade

Para Ellies et al. (1997) a permeabilidade hidráulica de um solo saturado depende da funcionalidade do seu sistema de poros, conseqüentemente da quantia, tamanho, morfologia, continuidade e orientação dos poros. Baseada nessa dependência, a permeabilidade hidráulica apresenta diferentes valores em cada local e também para determinada direção do solo.

Rezende (1979) ao realizar um experimento em solo franco argiloso arenoso com aplicação de doses de vinhaça entre 0 a $420 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, variando a cada $60 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$,

obteve elevação na pressão osmótica da solução do meio, porém não houve alteração significativa na capacidade de retenção de água e na porosidade do solo.

2.3.3 Textura

A permeabilidade hidráulica depende diretamente da estrutura e textura do solo, conseqüentemente do tamanho e geometria dos seus poros. Jarvis & Messing (1995) ao medirem a permeabilidade hidráulica saturada na superfície de seis solos, variando de areia argilosa a argila siltosa, obtiveram valores de permeabilidade hidráulica maior nos solos de textura fina, provavelmente por causa da influência dos macroporos. Provando que a estrutura do solo influencia consideravelmente o fluxo de água e transporte de solutos.

Confirmando o citado acima, para Ellies et al. (1997) elevados valores de permeabilidade hidráulica estão relacionados com áreas que apresentam maior grau de estruturação. Tal estruturação depende da agregação das partículas e da formação de macroporos, fatores que dependem da textura do solo. Portanto, onde encontra-se um alto nível de agregados a distribuição da permeabilidade hidráulica tende a manter-se constante.

O estado do Paraná caracteriza-se por uma heterogeneidade de tipos de solos, pois são diversos os fatores responsáveis por suas formações. A área de amostragem para a realização do experimento localiza-se no litoral do Paraná. Segundo Santos et al. (2013), pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SIBCS), as classes mais encontradas são Neossolos Flúvicos, Cambissolos Flúvicos, Argissolos ou Cambissolos, Gleissolos, Gleissolos Sálícos e Espodossolos.

2.3.4 Umidade

Para Uyeda (2009) a permeabilidade hidráulica de um solo está diretamente relacionada com sua umidade volumétrica (θ). Sendo o valor máximo da permeabilidade hidráulica obtido quando o solo atinge a saturação ($\theta = \theta_s$).

Carvalho et al. (1996) observaram a relação direta entre a permeabilidade hidráulica e a umidade em cada camada do solo, onde há a tendência da permeabilidade aumentar com a profundidade do solo. Para Lobato et al. (1998) ao estudarem a permeabilidade hidráulica com diferentes valores de umidade a partir da infiltração de água ou vinhaça concluíram que não há diferença significativa entre a utilização de ambos para valores de umidade maiores que $0,300 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, mas a permeabilidade com água apresenta valores mais elevados (Tabela 07).

Tabela 07 – Relação entre a permeabilidade hidráulica (K) e umidade do solo (θ)

Umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	Permeabilidade hidráulica (m s^{-1})	
	Água	Vinhaça
0,424	$8,036 \cdot 10^{-6}$	-
0,413	$4,490 \cdot 10^{-6}$	$3,716 \cdot 10^{-6}$
0,380	$7,834 \cdot 10^{-7}$	$6,122 \cdot 10^{-7}$
0,340	$9,437 \cdot 10^{-8}$	$6,881 \cdot 10^{-8}$
0,300	$1,137 \cdot 10^{-8}$	$7,733 \cdot 10^{-9}$
0,250	$8,068 \cdot 10^{-10}$	$5,032 \cdot 10^{-10}$
0,200	$5,730 \cdot 10^{-11}$	$3,270 \cdot 10^{-11}$

Fonte: LOBATO ET AL. (1998)

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para analisar o coeficiente de permeabilidade do solo foi utilizado o permeâmetro de carga constante com carga hidráulica composta de água e vinhaça.

3.1 Localização e etapas do experimento

O desenvolvimento deste trabalho foi realizado no Departamento de Solos e Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Utilizando-se o permeâmetro de carga constante disponível no Laboratório do Núcleo de Atividades de Engenharia de Biosistemas (NAEB).

A coleta de amostras foi realizada na propriedade Porto Morretes, localizada no município de Morretes – Paraná, que tem como coordenadas 25°29'49.5" de latitude sul e 48°52'05.6" de longitude oeste e altitude de 800 metros (Figura 05).



Figura 05 – Delimitação da área de amostragem
Fonte: GOOGLE EARTH (2014)

O clima, segundo a classificação de Koppen-Geiger, é do tipo Cfa, ou seja, subtropical úmido. Caracterizado sem estação seca, com temperatura média em todos os meses superior a 18°C, precipitação média no mês mais seco acima de 60 mm.

Segundo Trento Filho (2008), Prado (2003), EMBRAPA (1999) e EMBRAPA (1984) o tipo de solo predominante em Morretes é o Cambissolo, sendo encontrado também Latossolo Vermelho-amarelo, Neossolo Litólico e Planossolo Hidromórfico. Para Silva et al. (2013) o potencial de cultivo agrícola do Cambissolo depende da rocha de origem e do relevo.

A área de amostragem do solo foi dividida entre 4 diferentes usos do solo: plantio de cana-de-açúcar (SSC), pousio de dois anos (FLW), mata nativa (NF) e pousio de três anos com aplicação de vinhaça (FLV) (Figura 6). Como a propriedade desenvolve a agricultura orgânica, duas áreas encontram-se em pousio, que

representa o repouso do solo, objetivando a recuperação natural de suas propriedades.



Figura 06 – Áreas de amostragem do solo com diferentes manejos.
Fonte: O autor.

Para as análises foram coletadas amostras indeformadas de solo, sendo: 29 amostras na profundidade de 0 – 20 cm e 29 amostras na profundidade de 20 – 40 cm, utilizando cilindros metálicos. Sendo 20 pertencentes à área com aplicação de vinhaça, 16 pertencentes à área de pousio, 10 pertencentes à área de mata nativa e 12 pertencentes à área de pousio com aplicação de vinhaça. Em cada ponto, coletaram-se três amostras deformada para análise química do solo.



Figura 07 – Coleta da amostra de solo

Fonte: O autor

Em laboratório foi analisada a textura do solo pelo método do densímetro de Gee & Bauder (1986) onde foi obtida a porcentagem de areia, silte e argila de cada amostra de solo.



Figura 08 – Método do densímetro

Fonte: O autor

A densidade do solo ρ_s foi obtida pelo método do anel volumétrico pela relação entre a massa do solo seco m_s e o volume total V , conforme Prevedello & Armindo (2015), eq. (11).

$$\rho_s = \frac{m_s}{V} \quad (11)$$

em que: ρ_s : densidade do solo, kg m^{-3} ; m_s : massa seca, kg; e V : volume, m^3 .

Posteriormente, foi obtida a densidade de partículas ρ_p pelo método do balão volumétrico, onde é medido o volume V de álcool etílico deslocado pela massa m_s , conforme Prevedello & Armindo (2015), eq. (12).

$$\rho_p = \frac{m_s}{V} \quad (12)$$

em que: ρ_p : densidade de partículas, kg m^{-3} ; m_s : massa seca, kg; e V : volume, m^3 .

Com a obtenção dos valores de ρ_p foi obtida a porosidade total α , dada pela fórmula

$$\alpha = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_p} \quad (13)$$

em que: α : porosidade total, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$; ρ_s : densidade do solo, kg m^{-3} ; e ρ_p : densidade de partículas, kg m^{-3} .



Figura 09 – Imagem de balões volumétricos
Fonte: O autor

Para a análise da permeabilidade hidráulica do solo na saturação, as amostras foram saturadas, monitorando-se suas massas até se tornarem constantes. A permeabilidade foi obtida pelo permeâmetro de carga constante (Figura 10) através do método descrito por Libardi (2005). Foi aplicada água até atingir o fluxo constante e posteriormente foram obtidas as medidas do fluxo, para subsequente comparação com o coeficiente de permeabilidade da vinhaça.



Figura 10 – Permeômetro de carga constante
Fonte: O autor



Figura 11 – Amostra de solo no permeômetro de carga constante
Fonte: O autor

Posteriormente, foi utilizado o permeômetro de carga constante para a determinação do coeficiente de permeabilidade da vinhaça na saturação. Seguindo o mesmo procedimento da análise com água. As amostras foram mantidas em contato com a vinhaça até atingirem o ponto de saturação antes da utilização no permeômetro. Não houve diluição da vinhaça utilizada nas amostras de solo, objetivando assim a manutenção das concentrações dos solutos.

Por último, foram utilizadas 32 amostras de diferentes áreas e profundidades, na panela de Richards com pressão equivalente a 60hPa para a análise da microporosidade e macroporosidade. As amostras saturadas em água de massa m_1 foram colocadas na panela que, sob pressão, retira a água contida nos macroporos. Quando não houve mais saída de água, as amostras medidas à balança, obtendo a massa m_2 . Foram levadas à estufa e posteriormente, medida a massa m_3 . A macroporosidade é dada pela eq.(14).

$$\text{Macroporosidade} = \frac{m_1 - m_2}{V} = \alpha - \text{Microporosidade} \quad (14)$$

em que: m_1 : massa do solo saturado com água, kg; m_2 : massa da amostra após ser submetida a uma tensão de 60 hPa, kg; V : volume inicial da amostra, m^3 ; e α : porosidade total, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$.

A microporosidade é dada pela eq.(15).

$$\text{Microporosidade} = \frac{m_2 - m_3}{V} = \theta_{60} \quad (15)$$

em que: m_2 : massa da amostra após ser submetida a uma pressão de 60hPa, kg; m_3 : massa da amostra seca em estufa, kg; V : volume inicial da amostra, m^3 e θ_{60} : umidade volumétrica correspondente à pressão de 60hPa, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$.

O ajuste das curvas de retenção de água no solo (CRAS) foi encontrado utilizando-se do modelo proposto por van Genuchten (1980), eq. (16), e o programa computacional SPLINTEX, desenvolvido por Prevedello & Loyola (2002).

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)[1 + (\lambda|\psi_m|)^n]^{-(1-1/n)} \quad (16)$$

em que: θ : umidade volumétrica do solo, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$; θ_s : umidade volumétrica na saturação do solo, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$; θ_r : umidade volumétrica residual do solo, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$; ψ_m : potencial matricial da água no solo, hPa^{-1} ; λ (hPa^{-1}) e n : parâmetros de ajuste do modelo.

Segundo Silva et al. (2014) no programa SPLINTEX são utilizados como dados de entrada a porcentagem acumulada da fração granulométrica, densidades do solo e das partículas, umidade volumétrica na saturação e um par de dados da umidade volumétrica correspondente à tensão de 60 hPa. Os dados gerados como resposta pelo SPLINTEX são os parâmetros θ_s , θ_r , λ , n e m da eq. (19).

Para estimar a umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc}), Prevedello (1999) propôs um método baseado na equação de van-Genuchten

(1980), com a restrição de Mualem (1976), onde a equação da permeabilidade hidráulica foi ajustada aos dados da CRAS para cada profundidade.

$$K(\theta)/K = [\theta - \theta_r/\theta_s - \theta_r]^{1/2} \{1 - [1 - (\theta - \theta_r/\theta_s - \theta_r)^{1/m}]^m\}^2 \quad (17)$$

Mas, pelo critério de Prevedello (1999), quando $K(\theta)/K = 1\%$ implica em $\theta = \theta_{cc}$, obtendo-se que

$$0,01 = [\theta_{cc} - \theta_r/\theta_s - \theta_r]^{1/2} \{1 - [1 - (\theta_{cc} - \theta_r/\theta_s - \theta_r)^{1/m}]^m\}^2 \quad (18)$$

Dessa forma, os valores de θ_{cc} foram obtidos por iteração não linear, utilizando-se do método dos mínimos quadrados, valendo-se da função solver do programa Excel.

Andrade e Stone (2011) propuseram uma modificação da eq. (19) para estimar a umidade na capacidade de campo a partir da equação baseada na curva de retenção de água no solo, atributos e dados de textura e matéria orgânica, dada pela eq. (20),

$$\theta_{cc} = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(1 - (1 - p^{1-\gamma/\gamma})\right)^{1/1-\gamma} \quad (19)$$

em que:

$$\gamma = 2,5 + (2/n - 1) \quad (20)$$

A umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) foi obtida pela eq. (17) assumindo $\psi_m = 15000$ hPa.

A capacidade de água disponível (CAD) foi determinada pela eq. (21), considerando a profundidade média da raiz da cana-de-açúcar (z) como 0,4 m.

$$CAD = (\theta_{cc} - \theta_{pmp})z \quad (21)$$

Os atributos químicos do solo foram determinados no Laboratório de Química e Fertilidade do Solo do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola da UFPR.

A determinação do pH CaCl_2 segue a metodologia proposta por Schofield & Taylor (1955). Foram colocados 10 cm^3 de TFSA (Terra Fina Seca ao Ar) no frasco plástico e adicionados 25 ml de CaCl_2 0,01 mol/L, seguido de agitação durante 15 min. Após 30 min foi realizada a leitura em potenciômetro calibrado com solução padrão de pH 6,86 e pH 4,0. Posteriormente, são adicionados 5 ml de SMP para a determinação do pH SMP, seguido de agitação por 15 min. Após uma noite é feita a leitura do pH no potenciômetro calibrado. Os valores de H+Al foram obtidos por meio de tabelas de correspondência com os valores de pH SMP.

A determinação do alumínio foi realizada com 10 cm^3 de TFSA, adicionados a 20 ml de extrato KCl 1 mol/L e 3 gotas de indicador Azul de Bromotimol. Titulada com solução de NaOH 0,02 mol/L até virar para cor de amarelo-cítrico para azul.

A determinação do carbono foi realizada com 1 cm^3 de TFSA em erlenmeyer de 125ml e adicionados 10 ml de solução oxidante de dicromato de sódio. Após 20 min foi feita a diluição para 100 ml e deixado em repouso por uma noite. A leitura do elemento foi realizada no fotocolorímetro no comprimento de onda de 650 nm. Os valores de carbono foram obtidos por tabela de correspondência.

A determinação do fósforo foi realizada com 10 cm^3 de TFSA, 100 ml de solução extratora Mehlich (HCl 0,05 + H_2SO_4 0,025), adicionados 10 ml de solução de molibdato e 1 pitada de ácido ascórbico. Após repouso por 30 min, foram extraídos 5 ml do sobrenadante. A leitura do elemento foi realizada no fotocolorímetro no comprimento de onda de 660 nm.

A determinação de potássio e sódio foi realizada com 10 cm^3 de TFSA adicionados com 100 ml de solução extratora Mehlich (HCl 0,05 + H_2SO_4 0,025). A leitura dos elementos foi realizada por meio de fotometria de chama.

A determinação do cálcio e magnésio foi realizada 10 cm^3 de TFSA em 100 ml de KCl, diluição de 1:25 em cloreto de estrôncio. A leitura dos elementos foi realizada por meio de absorção atômica.

Na tabela 08 são apresentados os valores da composição química do solo para cada tipo de uso de solo e camada.

Tabela 08 – Composição química do solo da área estudada

Uso	Camada (m)	pH	pH	Al	H+Al	Ca	Mg	K	Na	P	C
		CaCl_2	SMP	----- cmolc dm^{-3} -----						kg m^{-3}	
SSC	0-0,20	5,96	6,96	0,04	2,50	4,60	2,23	0,17	0,06	4,08	27,01

Uso	Camada (m)	pH CaCl ₂	pH SMP	Al	H+Al	Ca	Mg	K	Na	P	C
	0,20-0,40	5,11	6,64	0,81	3,23	1,99	1,40	0,07	0,05	0,39	10,57
FLW	0-0,20	5,96	6,91	0,04	2,56	3,95	2,01	0,17	0,02	1,95	31,30
	0,20-0,40	6,01	7,00	0,05	2,40	3,60	1,96	0,10	0,02	0,92	20,23
NF	0-0,20	4,26	5,70	2,14	6,32	0,60	0,46	0,09	0,03	0,12	35,42
	0,20-0,40	4,33	6,03	2,36	5,10	0,40	0,22	0,06	0,03	0,05	28,10
FLV	0-0,20	5,48	6,66	0,07	3,08	3,18	1,60	0,24	0,04	2,19	40,18
	0,20-0,40	5,46	5,46	0,18	2,92	2,83	1,12	0,09	0,04	1,37	28,80

SMP: Shoemaker, Mac lean e Pratt.

Na figura 12 são apresentadas diferentes amostras de solo com reagente para posterior análise da concentração de fósforo no fotocolorímetro.



Figura 12 – Análise da concentração de fósforo no solo
Fonte: O autor

Na tabela 09 são apresentadas as propriedades físicas da vinhaça e da água. A massa específica da vinhaça foi obtida pela razão entre sua massa e volume, já a viscosidade cinemática por meio do copo Ford (1986), valendo-se da eq. (22).

$$\nu = 2,388t - 0,007t^2 - 57,008 \quad (22)$$

em que:

T: temperatura, °C; t: tempo, s e ν : viscosidade cinemática, m² s⁻¹.

Tabela 09 – Propriedades físicas da vinhaça

Líquidos	Massa específica (kg m ⁻³)	Viscosidade cinemática (m ² s ⁻¹)	Temperatura (°C)
Vinhaça	967,60	4,328077 · 10 ⁻⁶	16,2
Água	1000,00	1,06 · 10 ⁻⁶	4,0

Na tabela 10 são apresentados os valores da análise química da vinhaça determinados no Laboratório de Biogeoquímica do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola da UFPR pelo aparelho de espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente.

Tabela 10 – Composição química da vinhaça

Al	Ba	Ca	Co	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Pb	Si	Zn
mg L ⁻¹												
0,8	0,3	161,9	0,1	0,1	11,6	273,4	16,2	4,7	13,5	0,2	24,9	0,3

Nota-se a predominância de potássio, cálcio, silício, magnésio, fósforo e ferro, respectivamente. Em face ao exposto, Freire & Cortez (2000) afirmam que apesar da grande variabilidade na composição química, a vinhaça contém: alta concentração de matéria orgânica e potássio, teores médios de cálcio e sulfato e menores teores de fósforo e magnésio.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 11 apresentam-se a distribuição granulométrica do solo, os valores da densidade de solo seco (ρ_s) e os valores da densidade de partícula (ρ_p) conforme os diferentes usos do solo.

Os dados da análise granulométrica permitiram verificar que as quatro áreas de estudo apresentam textura homogênea ao longo dos perfis avaliados. Conforme a classificação textural adotada por Prevedello & Armindo (2015) encontra-se a classe textural franco-argilo-arenosa para todas as áreas. Nelas nota-se a diminuição do teor de areia e o aumento do teor de argila com a profundidade, exceto para o pousio com aplicação de vinhaça, onde os valores aumentam com a profundidade.

Tabela 11: Fração granulométrica do solo, ρ_s e ρ_p por uso do solo e camada

Uso do Solo	Camada (m)	Frações (%)			ρ_s --- (kg m ⁻³) ---	ρ_p
		Areia	Silte	Argila		
Cana-de-açúcar	0-0,20	52,1	17,0	30,8	1475	2675
	0,20-0,40	40,1	17,7	42,1	1392	2665
Pousio	0-0,20	55,2	20,5	24,3	1450	2703
	0,20-0,40	50,9	21,9	27,2	1487	2751
Mata nativa	0-0,20	52,5	23,6	23,9	1035	2754
	0,20-0,40	50,6	24,2	25,2	1223	2778
Pousio com aplicação de vinhaça	0-0,20	50,9	22,5	26,6	1313	2638
	0,20-0,40	52,3	21,3	26,4	1398	2729

ρ_s : densidade do solo seco; ρ_p : densidade de partícula.

Os valores encontrados para ρ_s variaram de 1035 a 1487 kg m⁻³, sendo considerados dentro da faixa proposta por Mota et al. (2008) e Klein (2008), que cita valores entre 900 a 1800 kg m⁻³, dependentes da textura e da matéria orgânica presente no solo. O menor valor de densidade na camada superficial ocorreu na área de mata nativa, devido à baixa densidade da matéria orgânica, comportamento similar ao relatado por Abrão (2011). Brun (2008) apud Abrão (2011) corrobora ao encontrar elevada concentração de matéria orgânica em Cambissolo Húmico para densidades menores. O plantio de cana-de-açúcar apresenta maior densidade na camada A, valor que pode ser justificado possivelmente pelo manejo do solo. De acordo com a descrição de Reichert et al. (2007), a compactação do solo diminui o

espaço ocupado pelas partículas, resultando no aumento da densidade e microporosidade e diminuição da macroporosidade.

Diante do exposto Abrão (2011) corrobora atribuindo a densidade elevada ao adensamento do solo ocasionado pelos diferentes usos do solo e pelo desenvolvimento de raízes. Machado et al. (2011) ao analisar solos de áreas de mata nativa, pousio e cultivo alegam que a densidade elevada, encontrada nas duas últimas áreas, representa a compactação do solo, justificada também pela diminuição da matéria orgânica.

Os valores encontrados para ρ_p variam de 2638 a 2778 kg m⁻³. Brady (1989) confirma que na maioria dos solos os valores variam entre 2600 a 2750 kg m⁻³. Para Prevedello & Armino (2015) pode-se utilizar ρ_p médio de 2650 kg m⁻³.

Observa-se o aumento gradual de ρ_p com o aumento da profundidade como observado por Abrão (2011) onde os diferentes manejos não influenciaram na densidade de partículas e a densidade aumento diretamente com o aumento da profundidade. A mesma conclusão foi obtida em Cambissolos por Melloni et al. (2008) e Silva et al. (2005). Esse comportamento não é observado apenas no manejo com plantio de cana-de-açúcar, possivelmente pela compactação da camada superior.

Contudo, Melloni et al. (2008) ao compararem mata nativa, eucalipto, araucária implantada e pastagem obtiveram os menores valores de ρ_p na área da mata nativa. Analisando-se a tabela 11, os menores valores de ρ_p estão na área de pousio com aplicação de vinhaça, na primeira camada. Já na segunda, o menor valor foi encontrado na área de plantio de cana-de-açúcar.

Dessa forma, os diferentes tipos de uso do solo não alteram significativamente os valores de ρ_p corroborando com Abrão (2011) e Brady (1989) que afirmam que a densidade de partícula é dependente do material de formação do solo e, portanto, se os solos pertencem à mesma classe, não ocorrerá variação significativa de ρ_p .

A tabela 12 apresenta os valores de porosidade (α), microporosidade, macroporosidade, coeficiente de permeabilidade do solo ao fluxo de água e de vinhaça (K) para os diferentes usos de solo: plantio de cana-de-açúcar (SSC), pousio (FLW), mata nativa (NF) e pousio com aplicação de vinhaça (FLV).

Tabela 12: Porosidade total (α), microporosidade, macroporosidade e coeficiente de permeabilidade (K) por uso do solo, camada e líquidos

Uso	Camada (m)	α	Microporosidade ($m^3 m^{-3}$)	Macroporosidade	K ($m s^{-1} \times 3,6 \times 10^{-6}$)	
					Água	Vinhaça
SSC	0-0,20	0,5369	0,4588	0,0781	9,04	0,59
	0,20-0,40	0,5862	0,5187	0,0675	6,84	3,43
FLW	0-0,20	0,5064	0,4274	0,0791	17,86	2,54
	0,20-0,40	0,4683	0,4027	0,0656	34,81	3,79
NF	0-0,20	0,6237	0,4884	0,1353	305,90	28,55
	0,20-0,40	0,5570	0,3766	0,1803	172,51	71,47
FLV	0-0,20	0,5759	0,4541	0,1218	31,66	5,01
	0,20-0,40	0,5261	0,4145	0,1116	218,17	63,11

A porosidade total apresentou valores que variam entre 0,47 a 0,62 $m^3 m^{-3}$. Dentro dos valores encontrados para solos arenosos (0,35 a 0,50 $m^3 m^{-3}$) e solos siltosos e francos (0,30 a 0,55 $m^3 m^{-3}$) descritos por Prevedello & Armindo (2015).

Nota-se que os valores de α diminuem com a profundidade. Fato observado por Abrão (2011) onde são encontrados valores inversamente proporcionais, a diminuição de α acontece simultaneamente com o aumento da densidade do solo, demonstrando alta interdependência. Exceto a porosidade na área de plantio de cana-de-açúcar que apresentou aumento dos valores com a profundidade. Esse comportamento pode ser justificado pelo adensamento e compactação do solo.

A microporosidade variou de 0,46 a 0,49 na camada A e de 0,38 a 0,50 $m^3 m^{-3}$ na camada B. Nota-se a que a variável diminui da camada superior para a inferior, exceto na área de plantio de cana-de-açúcar. Torres et al. (2011) obteve maiores valores de microporosidade para a mata nativa. De face ao exposto, Streck et al. (2004) e Hillel (1998) corrobora afirmando que a redução na porosidade, tamanho e continuidade dos poros ocorre devido à compactação do solo.

A macroporosidade variou de 0,07 a 0,14 $m^3 m^{-3}$. Os maiores valores encontram-se na área de mata nativa. Santos et al. (2011) avaliando mata nativa, pastagem degradada e sistema integração lavoura-pecuária após implantado em pasto degradado também obteve maior macroporosidade na área de mata nativa. Contudo, Silva et al. (2005) ao avaliar o efeito de três diferentes tipos de manejo sob plantio de cana-de-açúcar, em área irrigada, área não irrigada, área com aplicação de vinhaça e mata nativa, observaram maiores valores de macroporosidade para a área com aplicação de vinhaça, sendo justificado possivelmente pelo melhor desenvolvimento do sistema radicular da planta nesse manejo.

Os valores encontrados para área de plantio e pousio encontram-se abaixo dos parâmetros ideais de oxigenação do solo, podendo afetar o desenvolvimento vegetal. Corroboram Abrão (2011) e Baver et al. (1972) afirmando que para condições ideais de oxigenação a macroporosidade varia entre 0,10 a 0,16 m³ m⁻³. Para Bertol et al. (2001) a diminuição nos volumes de macroporosidade está relacionada com a alteração da estrutura do solo durante o processo produtivo, ocasionando também o aumento da microporosidade e da densidade do solo. Silva et al. (2005) alegam que a diminuição de poros de maior diâmetro em áreas de cultivo representa a maior compactação destes solos, resultantes do tráfego de máquinas agrícolas nas atividades de cultivo de cana-de-açúcar.

Segundo Dorner & Horn (2009) para a avaliação da qualidade do solo, além de ser avaliada sua formação também se deve avaliar a capacidade em transmitir fluidos. Pela tabela 11 verifica-se que os valores de permeabilidade do solo ao fluxo de água e vinhaça apresentam elevada dispersão, a mesma conclusão é apresentada por Abrão (2011) que alega ser comum a ocorrência de altos coeficientes de variação (>70%) entre os valores de permeabilidade do solo para o mesmo fluido.

Porém, os valores também apresentam considerável discrepância entre si conforme o uso do solo, o que contraria Abrão (2011) e Reichert et al. (2007) que afirmam não haver diferença significativa entre os diversos tratamentos, devido à elevada variação do parâmetro.

Os valores de permeabilidade do solo, tanto para água quanto para vinhaça, apresentaram maiores taxas na área de mata nativa, pela elevada macroporosidade. Apresentaram, também, as menores taxas na área de plantio de cana-de-açúcar, possivelmente pela diminuição da macroporosidade causada pela compactação do solo, acarretando em menor drenagem. Corroborando ao exposto, Torres et al. (2011) ao estudar as propriedades físicas do solo em quatro diferentes tratamentos obtiveram altos valores de permeabilidade na área mata nativa, concluindo que poros abertos por raízes são responsáveis pelo fluxo elevado.

A permeabilidade do solo ao fluxo da vinhaça foi entre 2 e 15 vezes menor do que ao fluxo de água para os tratamentos avaliados. Resultados que se justificam pela viscosidade da vinhaça ser maior que a da água e, pela sua composição química que altera a estrutura do solo. Uyeda et al. (2013) ao avaliar a aplicação de

vinhaça no solo verificou que o aumento das doses de vinhaça levou à diminuição dos valores de permeabilidade em um Latossolo Vermelho. Segundo o mesmo autor, o íon potássio, por se tratar de um cátion monovalente tem a capacidade de promover a dispersão das partículas de argila, podendo levar a obstrução dos poros do solo e, assim, afetar a permeabilidade. Contudo, Lobato et al. (1998) alega que a diminuição na permeabilidade está relacionada possivelmente a acumulação dos sólidos em suspensão no líquido ao longo do perfil formando uma camada de alta impedância hidráulica.

Os menores valores de permeabilidade foram obtidos na área de plantio de cana-de-açúcar, possivelmente justificado pela maior compactação do local. Para Mesquita & Morais (2004), valores inferiores de permeabilidade representam a degradação desse meio, relacionada à existência de compactação, diminuição e descontinuidade dos poros. Na Figura 13 são apresentados os dados de permeabilidade do solo ao fluxo de água (K_a) e de vinhaça (K_v). Observa-se que ambos os valores apresentam correlação (R^2) baixa de 0,34 e 0,38. Esse comportamento era esperado baseado na alta dispersão dessa propriedade física.

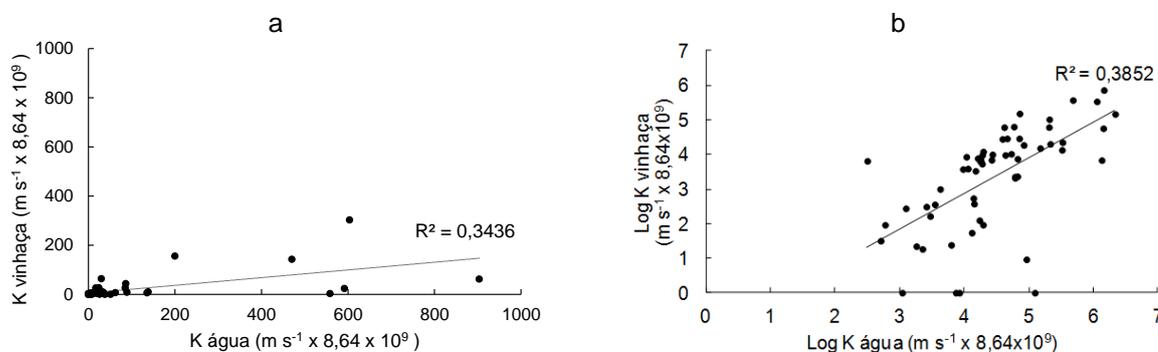


Figura 13 – a) Permeabilidade do solo ao fluxo de água e vinhaça. b) Log K água e Log K vinhaça.

A grande variabilidade da permeabilidade dificulta a comparação estatística entre os diferentes usos do solo. Corroborando com o exposto, Cadima et al. (1980) afirma que a alta discrepância entre os valores influencia nas médias de permeabilidade que representem a área e que possam ser confiáveis para sua utilização em estudos. Silva, Okura e Freire (1982) ao estudarem as propriedades físicas da vinhaça obtiveram significativa redução nos valores de permeabilidade.

Considerando a Figura 13 pode-se concluir que a eq. (2) não pode ser utilizada para estimativa da permeabilidade do solo ao fluxo de vinhaça (K_v), partindo

dos dados de permeabilidade com água (K_a), pois a equação assume que a permeabilidade do solo para ambos fluidos possui relação linear.

Observa-se na Figura 14a os dados da porosidade total (α), permeabilidade do solo à água (K_a) e à vinhaça (K_v). Houve um ligeiro aumento nos valores de K com a porosidade, apesar do baixo coeficiente de determinação. Klein & Libardi (2002) obtiveram diminuição nos valores de permeabilidade do solo com o aumento da densidade, a redução na porosidade total e variação do diâmetro dos poros.

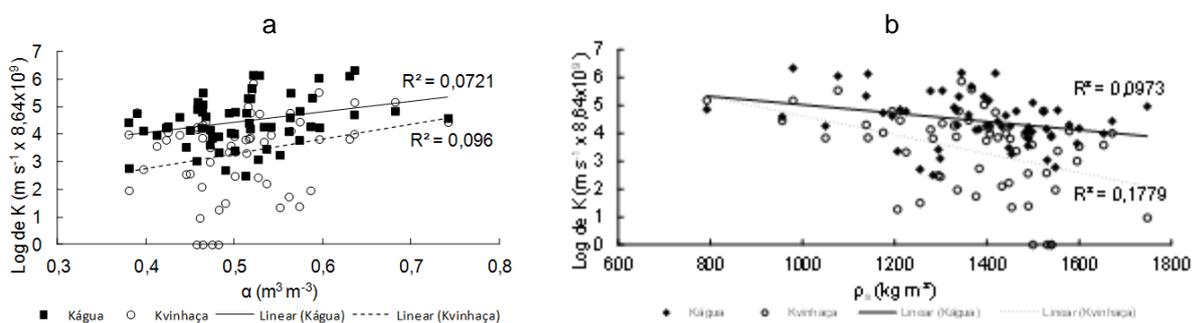


Figura 14 – a) Relação da porosidade com a permeabilidade do solo à água e à vinhaça. b) Relação da densidade do solo com a permeabilidade do solo à água e à vinhaça.

Observa-se na Figura 14b, apesar da baixa correlação, que a densidade do solo afeta negativamente a permeabilidade. A tendência de que a densidade aumente, também aumenta a microporosidade do solo, dificultando mais a permeabilidade. Dalbianco (2009) ao estudar a variabilidade da permeabilidade hidráulica de uma microbacia hidrográfica rural observou os mesmos resultados, verificando que o aumento da densidade está relacionado com a redução da porosidade total, macroporosidade, teor de carbono orgânico, grau de floculação, a permeabilidade ao ar e água do solo saturado. Para Hakansson et al. (1988) apud Dalbianco (2009) a densidade, porosidade total, tamanho e continuidade dos poros são afetados pela compactação do solo, afetando a permeabilidade hidráulica.

Na Figura 15 são apresentadas as relações da porosidade com a umidade na saturação e a relação da porosidade e densidade do solo seco. Observa-se na Fig. 15a baixa correlação entre as propriedades, sendo que os dados obtidos deveriam ser próximos, pois a umidade volumétrica na saturação (θ_s) representa o total do espaço poroso preenchido por água. Na saturação todos os poros estão preenchidos por água, representando a capacidade total de retenção do solo, a mesma dedução foi utilizada por Santos (2005). Vários autores, dentre eles

Prevedello & Armindo (2015) e Libardi (2005) descrevem que a porosidade total (α) pode ser determinada utilizando-se dos valores da densidade de solo seco (ρ_s) e a densidade de partícula (ρ_p).

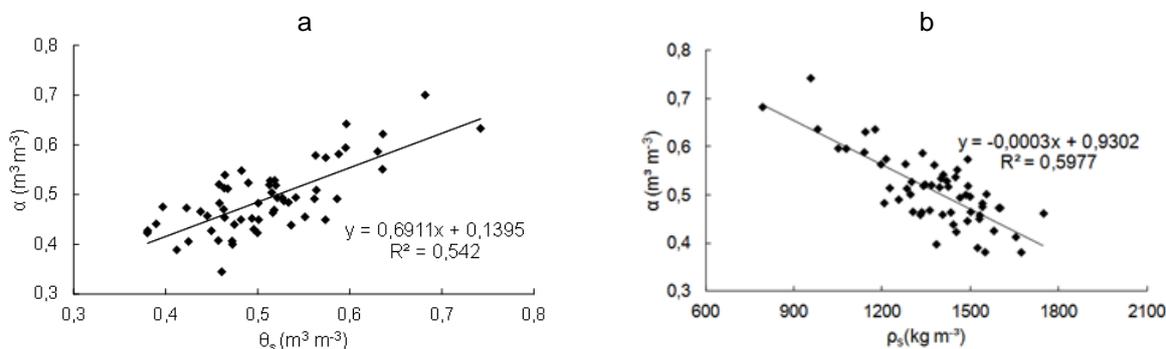


Figura 15- a) Relação 1:1 da porosidade (α) com a umidade na saturação (θ_s). b) Relação da porosidade (α) e densidade do solo seco (ρ_s).

Nota-se na Fig. 15b a correlação inversa da densidade de solo seco (ρ_s) com a porosidade total (α), mostrando que maiores valores de densidade apresentam porosidades reduzidas, sendo o comportamento esperado.

Na Figura 16 observa-se a baixa correlação entre os teores de argila e de areia com a permeabilidade. A Figura 16a, apesar da baixa correlação, apresenta o comportamento esperado. Pois o aumento do teor de argila acarreta na diminuição da permeabilidade, visto que a microporosidade é maior e ocorre uma maior retenção. Segundo Dalbianco (2009) a microporosidade está relacionada diretamente com a disponibilidade e retenção de água no solo.

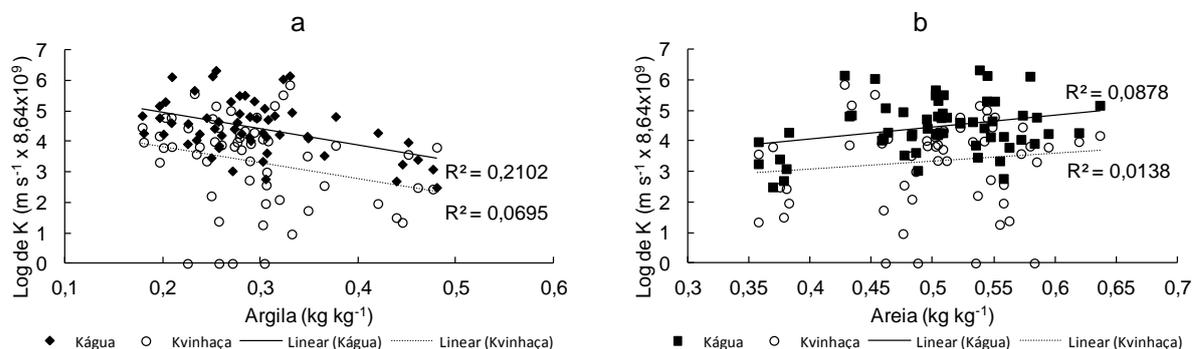


Figura 16 – a) Relação do teor de argila com a permeabilidade do solo à água e à vinhaça. b) Relação do teor de areia com a permeabilidade do solo à água e à vinhaça.

Nota-se na Figura 16b o comportamento inverso da Figura 15a. Pois o aumento do teor de areia acarreta no aumento da permeabilidade. Face ao exposto, Mesquita (2001) afirma que a redução da macroporosidade resulta na diminuição da

permeabilidade hidráulica. Paiva (2000) ao estudar o Argissolo Acizentado onde ocorre maior teor de areia e macroporos obteve permeabilidade hidráulica elevada.

Na Figura 17 apresentam-se as correlações da fração de argila com a microporosidade para as camadas de profundidade de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m e as correlações da fração de areia com a macroporosidade para as camadas de profundidade de 0-0,20 m e de 0,20-0,40 m.

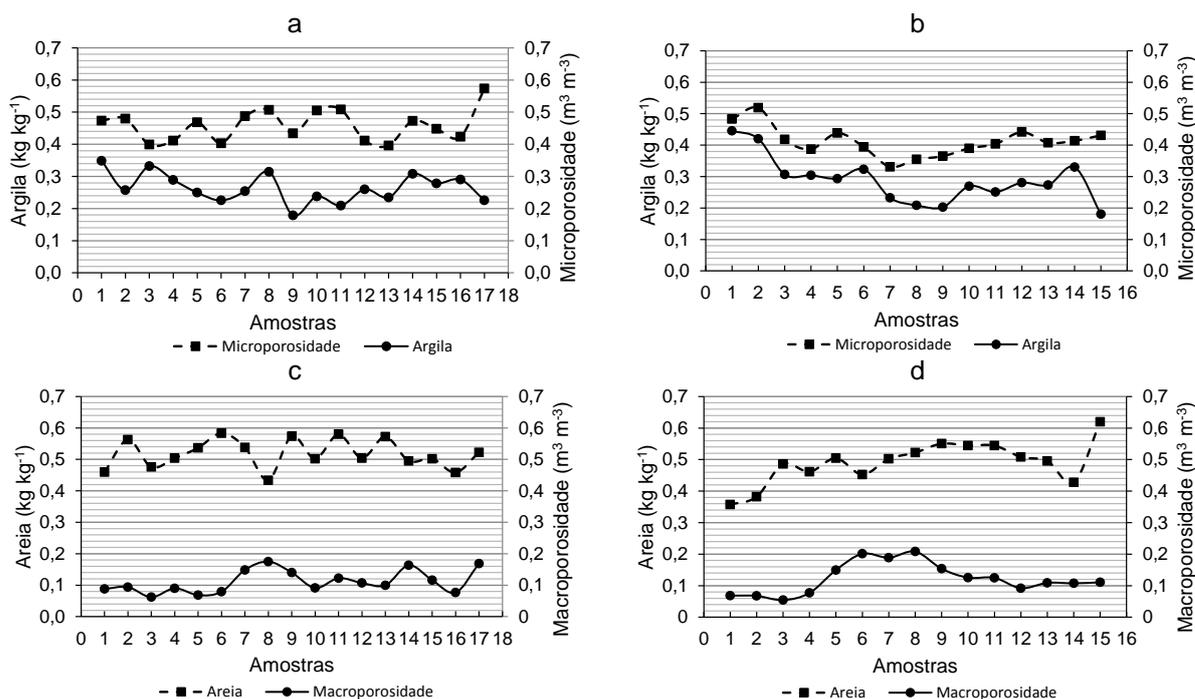


Figura 16 – Distribuição ao longo dos pontos amostrais da macroporosidade, microporosidade, teor de argila e areia na área avaliada. a) Argila e microporosidade (0-0,20m). b) Argila e microporosidade (0,20-0,40m). c) Areia e macroporosidade (0-0,20m). d) Areia e macroporosidade (0-0,40m).

Observa-se na Figura 17ab que o teor de argila e a microporosidade apresentam comportamento semelhante. Paiva et al. (2000) ao avaliar Latossolo Amarelo Argissólico e Argissolo Amarelo obteve para maiores teores de argila, maiores valores de microporosidade e conseqüentemente, valores baixos para a macroporosidade.

Observa-se na Figura 17cd o comportamento similar entre o teor de areia e a macroporosidade. Bartels et al. (2013) ao estudar a caracterização físico-hídrica de sedimentos depositados no Arroio Pelotas obteve baixa porosidade total e microporosidade, porém alta macroporosidade e, conseqüentemente alta permeabilidade hidráulica, visto que os sedimentos são constituídos predominantemente por areia.

Na Figura 18 são apresentados os valores de macroporosidade e microporosidade pela permeabilidade.

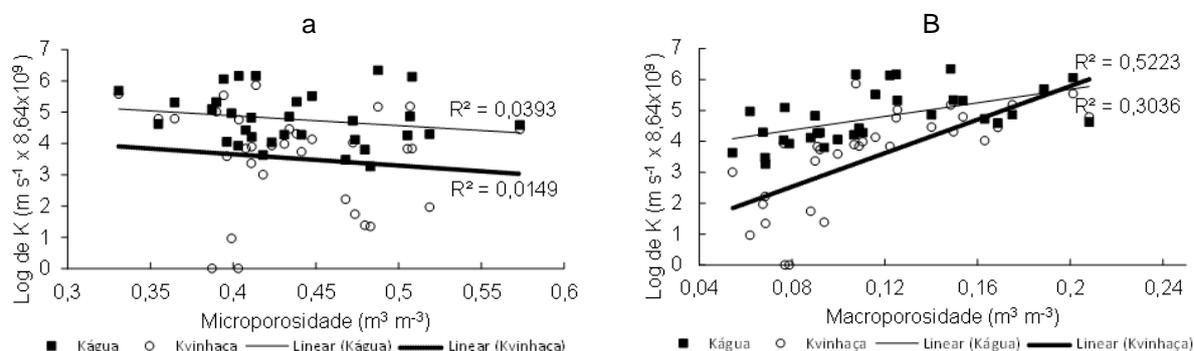
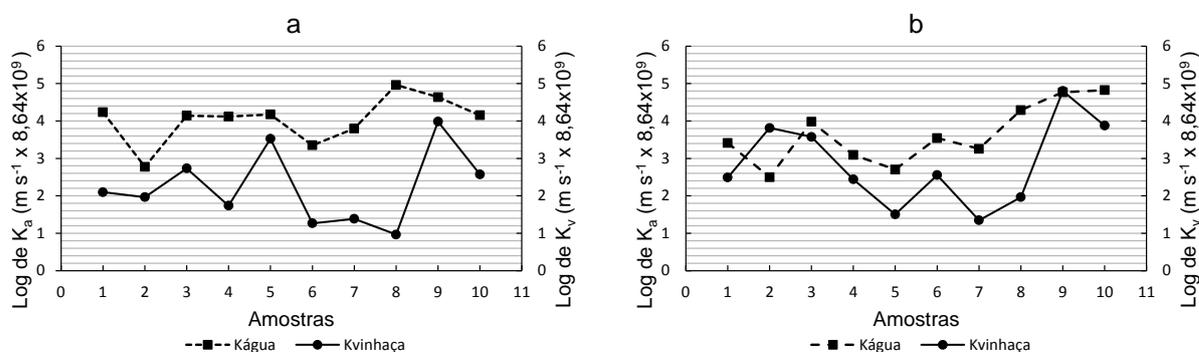


Figura 18 – a) Relação da microporosidade e permeabilidade do solo à água e vinhaça. b) Relação da macroporosidade e permeabilidade do solo à água e vinhaça.

Nota-se na Figura 18ab que as correlações de K_a e K_v foram maiores com a macroporosidade do que a microporosidade. Com o aumento da macroporosidade ocorre uma maior drenagem e conseqüentemente o aumento da permeabilidade. Corroborando com o exposto, Dalbianco (2009) afirma que a microporosidade influencia negativamente e que a macroporosidade e a porosidade total influenciam positivamente na capacidade do solo de transmitir o fluido, para diferentes usos do solo. No mesmo estudo, o autor alega que a diminuição da macroporosidade explica os valores reduzidos de permeabilidade, pois a correlação entre os parâmetros foi elevada.

Na Figura 19 é apresentado o comportamento da permeabilidade do solo à água (K_a) e vinhaça (K_v) conforme o uso do solo: cana-de-açúcar (SCC), pousio (FLW), mata nativa (NF) e pousio com aplicação de vinhaça (FLV), e por camadas.



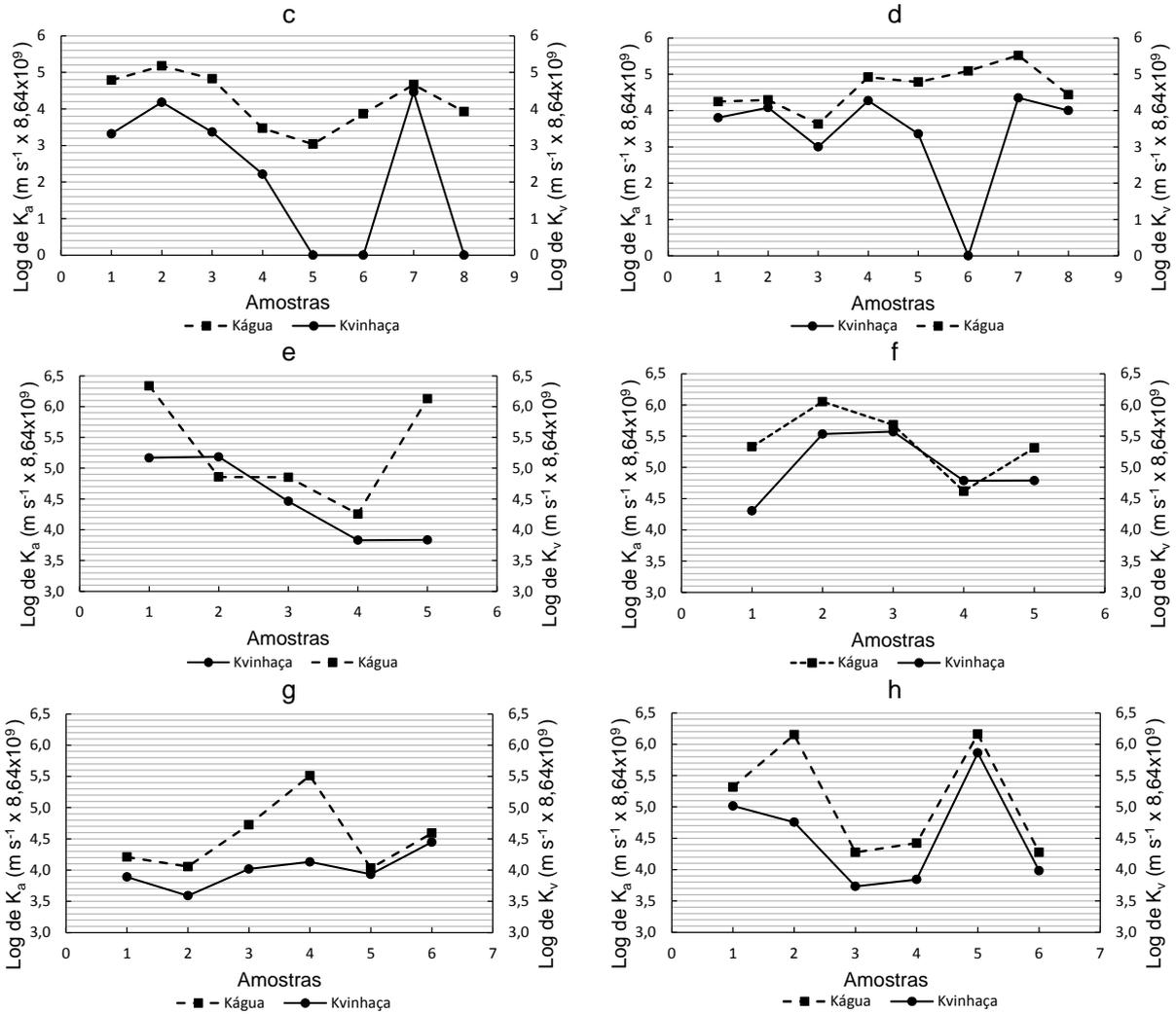


Figura 19 – Distribuição ao longo dos pontos amostrais da permeabilidade por uso de solo e camadas. a) SSC (0-0,20 m.) b) SSC (0-0,40 m.) c) FLW (0-0,20 m.) d) FLW (0,20-0,40 m.) e) NF (0-0,20 m.) f) NF (0,20-0,40 m.) g) FLW (0-0,20 m.) h) FLV (0,20-0,40 m.).

Confirma-se pelos gráficos a alta variabilidade dos coeficientes de permeabilidade do solo aos usos do solo e aos fluidos. Apesar de em alguns pontos a permeabilidade do solo à vinhaça ter comportamento similar ao da água com valores menores, também se encontram pontos onde a permeabilidade do solo à vinhaça é zero.

Na figura 20 apresentam-se as curvas de retenção de água no solo (CRAS) para as diferentes amostras obtidas pelo programa SPLINTEX.

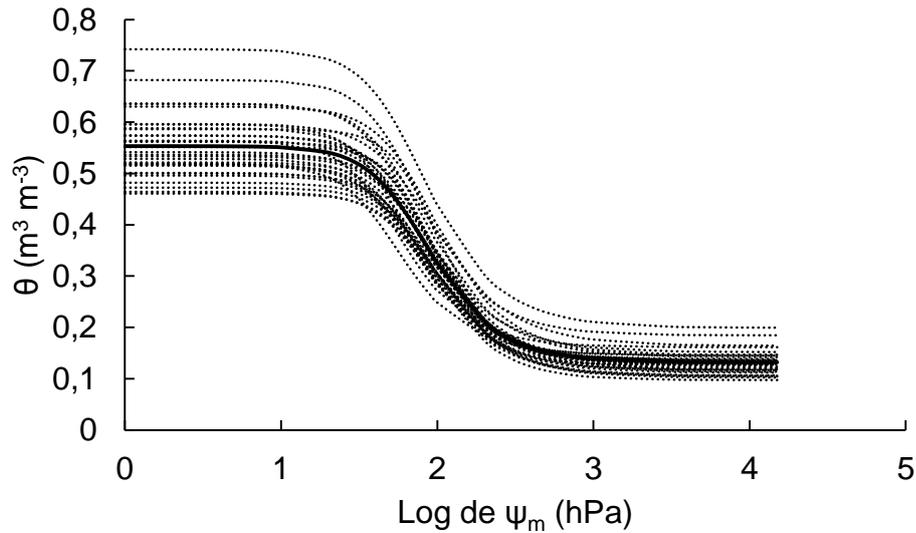


Figura 20 – Curva de retenção da água no solo (CRAS)

Nota-se que apesar de se tratar do mesmo solo ocorre variação entre as CRAS. Corrobora Hillel (2004) afirmando que a CRAS é dependente da estrutura do solo e distribuição do tamanho dos poros na faixa de tensão de 0-1000 hPa.

Na tabela 13 estão apresentados os parâmetros da CRAS de van-Genuchten (1980) e da permeabilidade hidráulica (K_a) simulados pelo SPLINTEX, a partir dos dados de entrada.

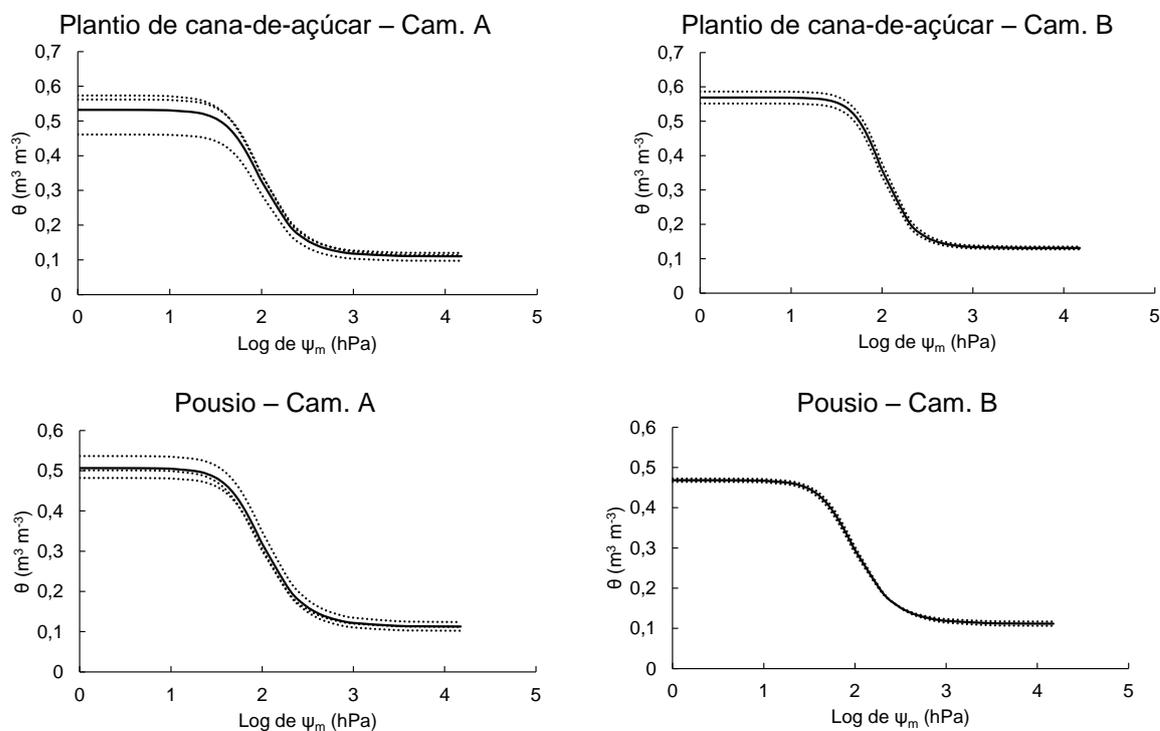
Tabela 13: Parâmetros obtidos pelo SPLINTEX para cada amostra por uso do solo e camada e valores de permeabilidade hidráulica referente à capacidade de campo [$K(\theta_{cc})$].

Amostra	Área	Camada (m)	α (h Pa^{-1})	n	m	θ_s ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	θ_r ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	$K(\theta_{cc})$ (mm/h)	R^2
1	SSC	0-0,20	0,0128	2,6320	0,6201	0,5669	0,1200	0,0520	0,9973
2	SSC	0-0,20	0,0138	2,4491	0,5917	0,5827	0,1136	0,0241	0,9962
3	SSC	0,20-0,40	0,0122	3,0536	0,6725	0,5584	0,1272	0,0071	0,9985
4	SSC	0-0,20	0,0126	2,6218	0,6186	0,4654	0,0974	0,3642	0,9977
5	SSC	0,20-0,40	0,0116	2,9965	0,6663	0,5925	0,1351	0,0774	0,9935
6	FLW	0-0,20	0,0142	2,4631	0,5940	0,5069	0,1118	0,2606	0,9977
7	FLW	0,20-0,40	0,0127	2,5073	0,6012	0,4770	0,1063	0,0168	0,9978
8	FLW	0-0,20	0,0128	2,4270	0,5880	0,5437	0,1238	0,0115	0,9963
9	FLW	0,20-0,40	0,0138	2,5333	0,6053	0,4684	0,1168	0,4921	0,9979
10	NF	0-0,20	0,0127	2,5030	0,6005	0,4897	0,1022	0,0323	0,9942
11	NF	0-0,20	0,0157	2,3870	0,5811	0,6448	0,1419	8,4049	0,9965
12	NF	0,20-0,40	0,0167	2,4459	0,5912	0,5948	0,1283	0,8417	0,9978
13	NF	0-0,20	0,0162	2,5330	0,6052	0,6876	0,1845	0,2864	0,9976
14	NF	0,20-0,40	0,0193	2,6225	0,6187	0,6013	0,1449	4,4796	0,9976
15	NF	0-0,20	0,0157	2,3867	0,5810	0,5815	0,1518	0,2755	0,9967
16	NF	0,20-0,40	0,0223	2,5252	0,6040	0,5271	0,1465	1,8507	0,9961
17	NF	0-0,20	0,0141	2,3422	0,5730	0,6038	0,1640	0,0698	0,9966

Amostra	Área	Camada (m)	α (h Pa ⁻¹)	n	m	θ_s (m ³ m ⁻³)	θ_r (m ³ m ⁻³)	K(θ_{cc}) (mm/h)	R ²
18	NF	0,20-0,40	0,0219	2,5457	0,6072	0,5712	0,1614	0,1596	0,9946
19	NF	0-0,20	0,0131	2,4777	0,5964	0,6402	0,1460	5,1542	0,9935
20	NF	0,20-0,40	0,0170	2,5591	0,6092	0,5261	0,1384	0,7882	0,9936
21	FLV	0-0,20	0,0153	2,4471	0,5914	0,5246	0,1303	0,0629	0,9971
22	FLV	0,20-0,40	0,0158	2,4369	0,5896	0,5223	0,1044	0,8075	0,9969
23	FLV	0-0,20	0,0141	2,4899	0,5984	0,5041	0,1053	0,0436	0,9949
24	FLV	0,20-0,40	0,0158	2,4536	0,5924	0,5358	0,1173	5,5077	0,9962
25	FLV	0-0,20	0,0166	2,4941	0,5991	0,6428	0,1360	0,2094	0,9979
26	FLV	0,20-0,40	0,0140	2,4344	0,5892	0,5394	0,1207	0,0741	0,9976
27	FLV	0-0,20	0,0152	2,4388	0,5900	0,5708	0,1329	1,2693	0,9976
28	FLV	0,20-0,40	0,0152	2,4611	0,5937	0,5232	0,1275	0,1029	0,9976
29	FLV	0-0,20	0,0136	2,5191	0,6030	0,5049	0,1340	0,0425	0,9979
30	FLV	0,20-0,40	0,0146	2,6697	0,6254	0,5254	0,1365	5,8016	0,9971
31	FLV	0-0,20	0,0160	2,3934	0,5822	0,7527	0,1992	0,1499	0,9956
32	FLV	0,20-0,40	0,0143	2,3260	0,5701	0,5496	0,1167	0,0729	0,9977

SSC: plantio de cana-de-açúcar, FLV: pousio de três anos, NF: mata nativa e FLV: pousio de dois anos com aplicação de vinhaça.

Na figura 21 apresentam-se as curvas de retenção de água no solo (CRAS) de acordo com as respectivas áreas de manejo e camada do solo.



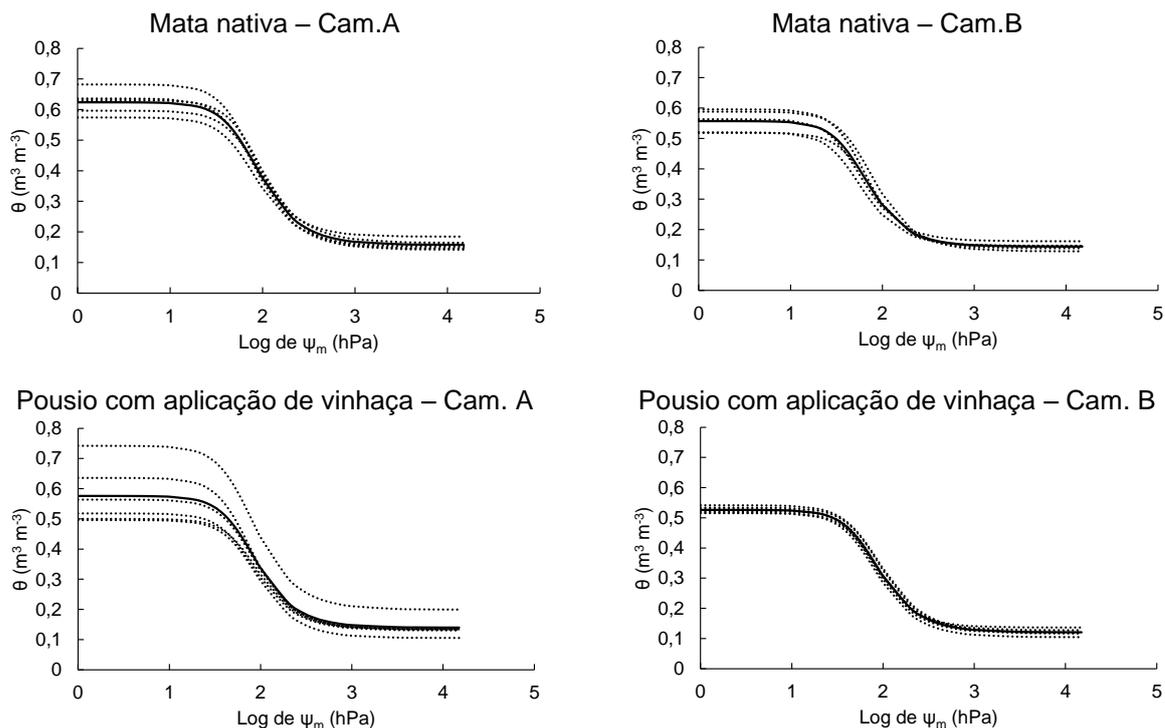


Figura 21 – Curva de retenção da água no solo (CRAS) por uso de solo e camada. Cam A: 0-0,20 m. Cam B: 0,20-0,40 m.

Na figura 22 apresentam-se as curvas de retenção de água no solo (CRAS) de acordo com a média de cada área de manejo e camada do solo.

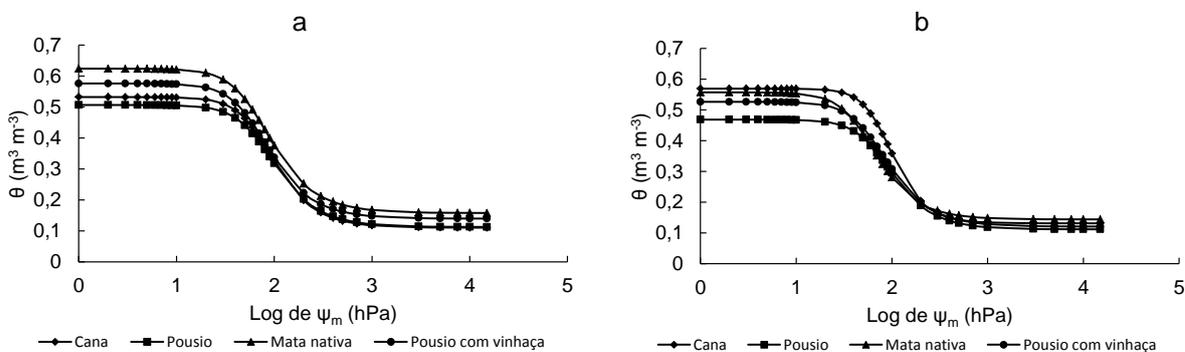


Figura 22 – a) Curva de retenção da água no solo (CRAS) na camada de 0-0,20m. b) Curva de retenção da água no solo (CRAS) na camada de 0,20-0,40m.

Nota-se nas Figuras 21 e 22 que a retenção de água varia conforme os sistemas de manejo do solo e por camadas, indicando que os atributos físicos do solo influenciam o volume de água retido nas diferentes tensões. Corroborando Machado et al. (2008) ao obter diferentes CRAS do Latossolo Vermelho distrófico sob o uso de mata nativa, pousio e diferentes culturas.

A área de mata nativa apresenta a maior retenção na camada de 0-0,20m juntamente com a área de pousio com aplicação de vinhaça. Na camada de 0,20-

0,40 m o cultivo de cana-de-açúcar e a mata nativa apresentam maior retenção. Contudo, para as mesmas camadas, Silva et al. (2005) encontrou valores significativamente maiores de retenção de água nas áreas de manejo de sequeiro, irrigado e vinhaça, em relação ao manejo sob mata nativa.

Na Figura 23 apresentam-se a relação 1:1 da umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) de Andrade e Stone (2011) com a umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) por Prevedello (1999), e a relação 1:1 da umidade no ponto de murchamento permanente (θ_{pmp}) com umidade residual (θ_r).

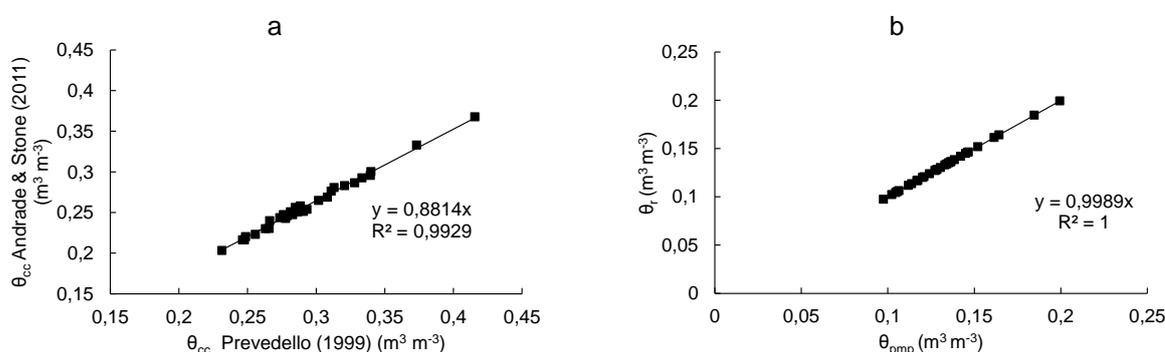


Figura 23 - a) Relação 1:1 da umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) de Andrade e Stone (2011) com a umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) por Prevedello (1999). b) Relação 1:1 da umidade no ponto de murchamento permanente (θ_{pmp}) com umidade residual (θ_r).

Nota-se pela Figura 23a que apesar dos diferentes métodos de obtenção do θ_{cc} eles apresentam alta coeficiente de determinação (R^2) de 0,99.

Considerando-se que a umidade volumétrica no ponto de murchamento permanente (θ_{pmp}) é igual a umidade volumétrica na tensão de 15000 hPa, observa-se pela Figura 23b que θ_r e θ_{pmp} são muito próximos, considerando o coeficiente de determinação (R^2) de 1.

Na tabela 14 são apresentados os valores para a capacidade de água disponível (CAD) conforme o uso do solo e por camada.

Tabela 14 - CAD por uso do solo e por camada.

Uso do solo	Camada (m)	CAD (mm)
Cana-de-açúcar	0-0,20	31,70
	0,20-0,40	28,86
Pousio	0-0,20	30,60
	0,20-0,40	27,17
Mata nativa	0-0,20	36,69
	0,20-0,40	31,28
Pousio com aplicação de vinhaça	0-0,20	33,94
	0,20-0,40	31,60

CAD: Capacidade de água disponível

Na Figura 24 é apresentada a capacidade de água disponível (CAD) por ponto amostral, uso do solo e camadas.

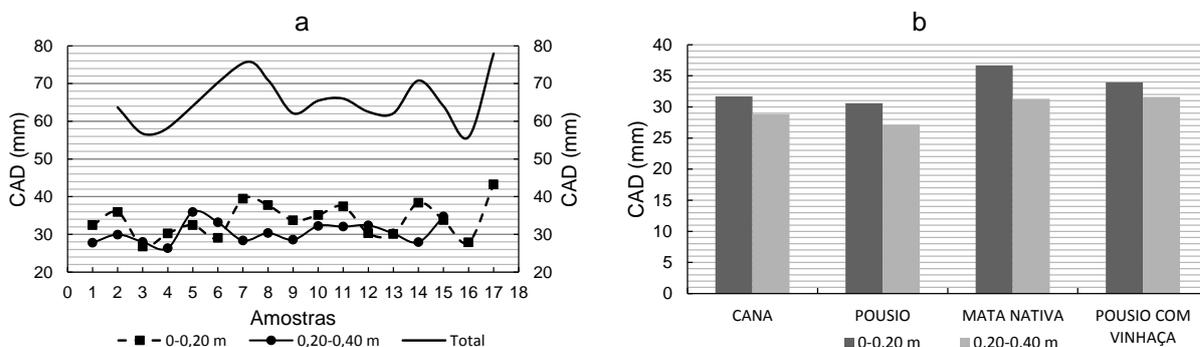


Figura 24 – a) Distribuição dos pontos amostrais em relação a capacidade de água disponível (CAD) e camadas. b) Distribuição da CAD média em relação aos diferentes usos do solo e camadas.

Na Figura 24a apresentam-se as diferentes CAD para cada ponto amostral e camada. Os maiores valores de CAD média ocorreram na área de mata nativa e pousio com vinhaça, respectivamente, com média de 65 mm. Esses valores se referem as áreas que possuem os maiores valores de microporosidade. Face ao exposto, corrobora Zolin et al. (2011) ao estudar o comportamento de Latossolo com plantio de cana-de-açúcar com aplicação de vinhaça por diferentes anos na profundidade de 0-0,20 m e 0,20-0,50 m obtiveram CAD média de 60 mm. Para Koffler & Donzelli (1987) aponta características físicas positivas para o desenvolvimento da cana-de-açúcar, entre elas: profundidade do solo superior a um metro, infiltração rápida do horizonte superficial e CAD maior que 50 mm.

Na figura 24b nota-se que o manejo altera a CAD do solo. A maior CAD é encontrada na área de mata nativa. Contrariando Klein & Libardi (2000) que obtiveram menor retenção de água no solo de mata nativa comparado ao solo sob plantio direto. Porém, Cunha et al. (2010) em experimentos sob preparo convencional encontraram menores valores de CAD na camada de 0-10-0,20m e não variaram na camada superficial.

Silva et al. (2015) ao avaliar métodos de estimativa da evapotranspiração da cana-de-açúcar obtiveram o valor de evapotranspiração médio pelo método do balanço hídrico igual a $145,5 \text{ mm mês}^{-1}$, equivalente a $4,8 \text{ mm dia}^{-1}$.

Portanto, considerando a capacidade de água disponível como 65 mm e a evapotranspiração de $4,8 \text{ mm dia}^{-1}$, o solo é capaz de fornecer água para a planta, em média, sem a ocorrência de chuva ou irrigação, por 13 dias.

5. CONCLUSÃO

Com base nas condições em que esse trabalho foi realizado e diante dos resultados obtidos, conclui-se que:

- O coeficiente de permeabilidade do solo ao fluxo de vinhaça é reduzido drasticamente em comparação com o coeficiente de permeabilidade do solo ao fluxo de água.
- O solo analisado tem capacidade de reter parte da vinhaça, diminuindo, assim, a quantidade de resíduo que pode atingir o lençol freático. Entretanto, a vinhaça não pode ser aplicada de forma indiscriminada no solo.
- O coeficiente de permeabilidade do solo ao fluxo da vinhaça não pode ser estimado a partir do coeficiente de permeabilidade do solo ao fluxo da água, visto que os coeficientes não apresentam correlação linear significativa.
- A curva de retenção de água no solo (CRAS), na camada de 0-0,20 m, apresenta maior retenção na área de mata nativa, seguida pelas áreas de pousio com aplicação de vinhaça, plantio de cana-de-açúcar e pousio. Apresentando o mesmo comportamento encontrado para os valores de capacidade de água disponível (CAD).
- A curva de retenção de água no solo (CRAS), na camada de 0,20-0,40 m, apresenta maior retenção na área de plantio de cana-de-açúcar (SSC), seguida pelas áreas de mata nativa (NF), pousio com aplicação de vinhaça (FLV) e pousio (FLW). Apresentando comportamento diferente do encontrado para os valores de capacidade de água disponível (CAD).
- O plantio de cana-de-açúcar pode ficar até 13 dias sem irrigação utilizando-se apenas da capacidade de água disponível (CAD) no solo.
- Recomenda-se a não aplicação de vinhaça no solo com intensidade de precipitação maior que $0,59 \text{ mm h}^{-1}$ para área SSC, $2,59 \text{ mm h}^{-1}$ para a área FLW e de $5,0 \text{ mm h}^{-1}$ para a área FLV, a fim de não proporcionar escoamento superficial que seria potencial poluidor de corpos d'água.
- Respeitada a recomendação anterior, recomenda-se também que a aplicação de vinhaça seja realizada em períodos secos, a fim de evitar que a CAD do solo não seja atingida em seu valor máximo em chuvas de curta duração, evitando-se assim

que ocorra a percolação da vinhaça presente no solo em direção a possíveis lençóis freáticos. Para a área estudada, considerando-se por exemplo uma umidade volumétrica inicial de $0,22 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e desprezando-se a evapotranspiração, os valores de lâmina para completar a CAD das áreas de manejo seriam de 10,3 mm para SSC, 8,22 mm para FLW e de 14,8 mm para FLV, respectivamente. Os valores de densidade de fluxo, referentes a permeabilidade na capacidade de campo $K(\theta_{cc})$, após uma chuva de baixa intensidade e longa duração, de $0,11 \text{ mm h}^{-1}$ para SSC, $0,20 \text{ mm h}^{-1}$ para FLW e $1,18 \text{ mm h}^{-1}$ para FLV resultariam em tempos de 93 h, 41 h e 12 h para início de percolação abaixo da zona radicular, ocorrendo assim risco de contaminação do lençol freático apenas para a área FLV.

REFERÊNCIAS

- ABRÃO, S. F. **Alterações físicas e químicas de um Cambissolo Húmico em povoamento de *Pinus taeda* L. com diferentes rotações**. 97f. Tese (Mestrado em Silvicultura) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.
- ALCOPAR - **Mapa de Localização das Unidades Produtoras de Álcool e Açúcar do Estado do Paraná**. <<http://www.alcopar.org.br>>. Acesso em: 21/09/2014.
- ALMEIDA, B. A. D. L.; BARRETO, G. F. B.; GONÇALVES, C. N. **Resíduos da agroindústria canavieira no Estado de Minas Gerais: usos e conservação ambiental**. Informe Agropecuário, v. 28, p. 96-100, 2007.
- ANDRADE, R.S. & STONE, L.F. **Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 15, p. 111-116, 2011.
- BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soil structure: classification and genesis**. In: BAVAR, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. Soil Physics, New York: John Wiley, p.130-177, 1972.
- BARTELS, G. K.; STRIEDER, G.; LIMA, L.; SILVA, R.; CALDEIRA, M.; SILVEIRA, C.; DUBOW, M.; DAL PRÁ, M.; SUZUKI, L. **Caracterização físico-hídrica de sedimentos depositados no Arroio Pelotas**. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013, Bento Gonçalves. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre: ABRH, 2013. p. 1-8.
- BERTOL, I.; BEUTLER, J.F.; LEITE, D.; BATISTELA, O. **Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetado pelo tipo de manejo do solo**. Scientia Agrícola, Piracicaba, v. 58, n. 3, p. 555-560, 2001.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J.; SOUZA, Z.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C. **Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 26, p. 829-834, 2002.
- BONINI, M. A.; SATO, L. M.; BASTOS, R. G.; SOUZA, C. F. **Alterações nos atributos químicos e físicos de um Latossolo Vermelho irrigado com água residuária e vinhaça**. Revista Biociências, v. 20, p. 56-63, 2014.
- BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. 7. ed. Rio de Janeiro: F. Bastos, 898 p., 1989.
- BRANDÃO, V. S. CECILIO, R. A. PRUSK, F. F.; SILVA, D. D. **Infiltração de Água no Solo**. Viçosa, MG: UFV, 2006. 47p. Universidade Federal de Viçosa, 2006.
- BRITO, A.S. **Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da permeabilidade ao ar em função dos conteúdos de água e ar no solo**. 144f.

Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

BRUN, E. J. **Matéria orgânica do solo em plantios de *Pinus taeda* e *P. elliottii* em duas regiões do Rio Grande do Sul**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

CADIMA, A.; LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K. **Variabilidade espacial da condutividade hidráulica em um Latossolo Vermelho-Amarelo textura média, no campo**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 4, n. 2, p. 63-66, 1980.

CAMARGO, O. A.; VALADARES, J. N. S.; GERALDO, R. N. **Características químicas e físicas de solo que recebeu vinhaça por longo tempo**. Instituto Agrônomo, Campinas, 30p., 1983.

CAMILOTTI, F.; ANDRIOLI, I.; MARQUES, M. O.; SILVA, A. R.; TASSO JÚNIOR, L. C.; NOBILE, F. O. **Atributos físicos de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar após aplicações de lodo de esgoto e vinhaça**. Engenharia Agrícola, v.26, n.3, p.738-747, 2006.

CARVALHO, H. O. G. **Física dos solos**. Campina Grande. UFPB, 173p, 2000.

CARVALHO, L. A. **Condutividade hidráulica do solo no campo: as simplificações do método do perfil instantâneo**. 98f. Tese (Mestrado em solos e nutrição de plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

CARVALHO, L. G. ; SAMPAIO, S. C.; SILVA, A. M. **Determinação da condutividade hidráulica “in situ” de um Latossolo Roxo distrófico**. Engenharia Rural, n. 7, p. 1-97, 1996.

CERRI, C. C.; POLO, A.; ANDREAUX, F.; LOBO, M. C.; EDUARDO, B. P. **Resíduos orgânicos da agroindústria canieira: 1. Características físicas e químicas**. STAB, Açúcar, Álcool e Subprodutos, v.6, n.3, p.34-37, 1988.

CINTRA, F. L. D. **Disponibilidade de água no solo para porta-enxertos de citros em ecossistema de tabuleiro costeiro**. 90f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

CONAB. **Série histórica da área plantada, produtividade e produção da cana-de-açúcar no estado do Paraná**. Disponível em <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&&Pagina_objcmsconteudos=2#A_objcmsconteudos>. Acesso em: 20/06/2015.

COPERSUCAR – **Proálcool: fundamentos e perspectivas**. São Paulo. Copersucar. 1989.

CUNHA, E. Q.; STONE, L.F.; MOREIRA, J.; FERREIRA, E.; DIDONET, A. **Atributos físicos do solo sob diferentes preparos e coberturas influenciados pela**

distribuição dos poros. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 4, n.11, 2010.

CUNHA, R. C. A.; COSTA, A. C. S.; MASET FILHO, B.; CASARINI, D. C. P. **Effects of irrigation with vinasse and dynamics of its constituents in the soil: I – physical and chemical aspects.** Water Science Technology, v. 19, n. 8, p. 155-165, 1981.

DALBIANCO, L. **Variabilidade espacial e estimativa da condutividade hidráulica e caracterização físico-hídrica de uma microbacia hidrográfica rural.** 2009. 116 f. Tese (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

DALRI, B. A.; CORTEZ, G. E. P.; RIUL, L. G. S.; ARAÚJO, J. A. C.; CRUZ, R. L. **Influência da aplicação de vinhaça na capacidade de infiltração de um solo de textura franco arenosa.** Irriga, v. 4, p. 344-352, 2010.

DORNER, J.; HORN, R. **Direction-dependent behaviour of hydraulic and mechanical properties in structured soils under conventional and conservation tillage.** Soil & Tillage Research, Amsterdam, v. 102, n. 2, p. 225-232, 2009.

ELLIES, A.; GREZ, R.; RAMIREZ, C. **La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta par el diagnostico de la estructura del suelo.** Agro Sur, v.5, p.51-56, 1997.

EMBRAPA. **Bancos de Dados Climáticos do Brasil.** Embrapa - Monitoramento por Satélite. Disponível em <<http://www.bdclima.cnpm.embrapa.br/resultados>>. Acesso em: 20/06/2015.

EMBRAPA; IAPAR. **Levantamento de reconhecimento dos solos o Estado do Paraná.** TOMO II. Londrina, 1984.

EMBRAPA; Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** Rio de Janeiro, 412 p., 1999.

FERGUSON, B. K.; DEBO, T. N. **Hydraulic conductivity for different types of soil.** In: Georgia Stormwater Management Manual. Volume 2: Technical Handbook. Atlanta Regional Commission, 844p., 2001.

FERNANDES, B.; GALLOWAY, H. M.; BRONSON, R. D.; MANNERING, J. V. **Condutividade hidráulica do solo saturado, em três sistemas de manejo.** Revista Ceres, v.30, p. 232-241.1983.

FRANCISCA, F. M.; GLATSTEIN, D. A. **Long term hydraulic conductivity of compacted soils permeated with landfill leachate.** Applied Clay Science, v. 49, p. 187-193, 2010.

FREIRE, W. J.; CORTEZ, L. A. B. **Vinhaça de cana-de-açúcar.** Guaíba: Agropecuária, 203p., 2000.

FORSYTHE, W. **Física de suelos. Manual de laboratório.** Costa Rica, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, 212p., 1975.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. **Particle-size analysis.** In: J. H. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 1* (2 ed.). Agron. Monogr., v. 9, p. 383-411, 1986.

GLÓRIA, N. A. **Utilização agrícola da vinhaça.** Brasil Açucareiro, Piracicaba, v. 86, n. 5, p.11-17, 1975.

GLORIA, N. A.; MAGRO, J. A. **Adubação de soqueira de cana-de-açúcar com vinhaça complementada com nitrogênio e fósforo.** Brasil Açucareiro, Piracicaba, v. 90, p. 31-34, 1977.

GLÓRIA, N. A.; ORLANDO FILHO, J. **Aplicação de vinhaça: um resumo e discussões sobre o que foi pesquisado.** Álcool Açúcar, n.16, p.32-39, 1984.

GLÓRIA, N. A.; SANTANA, A. G.; BIAGI, E. **Composição dos resíduos de usina de açúcar e destilarias.** Brasil Açucareiro, v. 81, p. 78-87, 1973.

GOOGLE. Google Earth website. **Delimitação da área de amostragem.** Disponível em <<http://earth.google.com>>. Acesso em: 20/06/2015.

HAMDY, N.; SRASRA, E. **Hydraulic conductivity study of compacted clay soils used as landfill liners for an acidic waste.** Waste Management. v. 33, p. 60-66, 2012.

HILLEL, D. **Soil and Water – Physical principles and processes.** New York: Academic Press, 287p., 1971.

HILLEL, D. **Environmental soil physics.** San Diego: Academic Press, 771 p.,1998.

HILLEL, D. **Introductions to environmental soil physics.** New York: Academic Press, 511p., 2004.

IAPAR – Instituto Agrônomo do Paraná. **Cartas climáticas do Estado do Paraná.** Londrina, 1994.

JARVIS, N. J.; MESSING, I. **Near-saturated hydraulic conductivity in soils of contrasting texture measured by tension infiltrometers.** Soil Science Society of American Journal, v.59, p.27-34, 1995.

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

KLEIN, V. A. **Física do solo.** Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 212p., 2008.

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

KOFFLER, N. F.; DONZELI, P. L. **Avaliação dos solos brasileiros para a cultura da cana-de-açúcar**. In: Cana-de-açúcar. Cultivo e utilização. Fundação Cargill, v. 1, p. 19-41, 1987.

LEMOS, R. C.; SANTOS, R. D. dos. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 2ed. Campinas, SBCS/SNLCS, 45p., 1984.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. EDUSP, São Paulo, 335p., 2005.

LOBATO, E. J. V.; LIBARDI, P. L.; CAMARGO, O. A. **Condutividade hidráulica de amostras remoldadas de um Latossolo Roxo distrófico tratado com água/vinhaça**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.22, n.2, p.181-188, 1998.

LOGSDON, S. D.; ALLMARAS, R.R.; WU, L.; SWAN J.B.; RANDALL G.W. **Macroporosity and its relation to saturated hydraulic conductivity under different tillage practices**. Soil Science Society of America Journal, p. 1096-1101, 1990.

MACHADO, M. L.; TORMENA, C.; FIDALSKI, J.; SCAPIM, C. **Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, p. 495-502, 2008.

MEDINA, C. C.; BRINHOLI, O. **Uso de resíduos agroindustriais nas produções de cana-de-açúcar, açúcar e álcool**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 33, p. 1821-1825, 1998.

MELLONI, R.; MELLONI, E. G. P.; ALVARENGA, I.; VIEIRA, F. **Avaliação da qualidade de solos sob diferentes coberturas florestais e de pastagem no sul de Minas Gerais**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, n. 6, p. 2461-2470, 2008.

MESQUITA, M. G. B. F. **Caracterização estatística da condutividade hidráulica saturada do solo**. 2001. Tese (Doutorado em Agronomia), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. **A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo**. Ciência Rural, Santa Maria, v. 34, n.3, p. 963-969, 2004.

MEURER, E. J.; BISSANI, C. A.; SELBACH, P. A. **Poluentes do solo e do ambiente**. In: MEURER, E. J. (ed.). **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre:Genesis, v.1, p.151-168, 2000;

MOTA, J. C. A.; JUNIOR, R. N. A.; FILHO, J. A.; LIBARDI, P. L.. **Algumas propriedades físicas e hídricas de três solos na Chapada do Apodi, RN, cultivados com melão**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, n. 1, p. 49-58, 2008.

MUALEM, Y. **A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media.** Water Resources Research, 12:513-522, 1976.

PAIVA, A.Q.; SOUZA, L.S.; RIBEIRO, A.C.; COSTA, L.M. **Propriedades físico-hídricas de solos de uma topossequência de tabuleiro do Estado da Bahia.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 35, p. 2295-2302, 2000.

PAULINO, A. F.; MEDINA, C. C.; ROBAINA, C. R. P.; LAURANI, R. A. **Produções agrícola e industrial de cana-de-açúcar submetida a doses de vinhaça.** Ciências Agrárias, v.23, p.145-150, 2002.

PONTES, J. F. **A “calda” e seus principais elementos minerais.** Brasil Açucareiro, v. 53, n. 1, p. 11-15, 1959.

PRADO, H. **Solos do Brasil.** 3ª ed. Piracicaba-SP, 275p., 2003.

PREVEDELLO, C. L.; ARMINDO, R. A. **Física do solo com problemas resolvidos.** 2ª ed. Rev. e Amp, Curitiba, 2015.

PREVEDELLO, C. L. **Novo método para estimativa da umidade do solo na condição de capacidade de campo.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos. , v.4, p.23-28, 1999.

PREVEDELLO, C.L. & LOYOLA, J.M.T. **Modelo para estimar as propriedades hidráulicas de meios porosos a partir da curva granulométrica.** In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, São Paulo, 2002. Anais. São Paulo, ABMS, 2002. p.467-472.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: processos de aplicações.** Barueri:Manole, 478 p., 2004.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. **Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação.** In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa: SBCS, 2007. v. 5. p. 49-134.

RESCK, D. V. S. **Parâmetros físicos dos solos da região dos cerrados.** Brasília, EMBRAPA-DID, 17p., 1981.

REZENDE, J. O. **Consequências da aplicação de vinhaça sobre algumas propriedades físicas de um solo.** 112f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1979.

RODELLA, A. A.; FERRARI, S. E. **A composição da vinhaça e efeitos de sua aplicação como fertilizante na cana-de-açúcar.** Brasil Açucareiro, Rio de Janeiro, v.90, n.7, p.380-387, 1977.

ROSSETO, A. J. **Utilização agrônômica dos subprodutos e resíduos da indústria açucareira e alcooleira.** In: Paranhos, S. B. (ed.). Cana-de-açúcar: cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargill, v. 2, p. 435-504, 1987.

SANTOS, M. B. D. **Proposta metodológica para o planejamento do uso agrícola da vinhaça, considerando seus aspectos ambientais, por meio de sistemas de informação geográfica.** 123f. Tese (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2000.

SANTOS, R. A. **Propriedades de retenção de água por espaços porosos não homogêneos: Experimentos de laboratório e simulação computacional.** 117f. Tese (Mestrado em Física) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2005.

SANTOS, G. A.; PEREIRA, A. B.; KORNDÖRFER, G. H. **Uso do sistema de análises por infravermelho próximo (NIR) para análises de matéria orgânica e fração argila em solos e teores foliares de silício e nitrogênio em cana-de-açúcar.** Bioscience, p. 100-108, 2010.

SANTOS, J. L. S.; MADARI, B.; COSTA, A.; FERNANDES, E.; MACHADO, P. **Avaliação dos parâmetros físicos do solo em sistema integração lavoura-pecuária implantado em pasto degradado.** In: XXXII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Uberlândia, 2011.

SCHOFIELD, R.K.; TAYLOR, A.N. **The measurement of soil pH.** Soil Society of America Proceedings, Madison, v. 19, p. 164-167, 1955.

SHAFIQ, M.; HASSAN, A.; AHMAD, N.; RASHID, A. **Crop yields and nutrient uptake by rainfed wheat and mungbean as affected by tillage, fertilization, and weeding.** Journal of Plant Nutrition, London, v. 17, n. 4, p. 561-577, 1994.

SHAINBERG, I; LEVY, G. J. **Infiltration and seal formation processes.** In: AGASSI, M. Soil erosion, conservation, and rehabilitation. New York: Marcel Dekker, p. 1-22, 1995.

SILVA, V. P. R.; GARCEZ, S.; SILVA, B.; ALBUQUERQUE, M.; ALMEIDA, R. **Métodos de estimativa da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar em condições de sequeiro.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.19, p.411-417, 2015.

SILVA, A. C.; ARMINDO, R. A.; REIS, A. M. H.; GONÇALVES, L.; FIGUEIREDO, C. C.; SILVA, E. T. **Validação da curva de retenção de água no solo simulada pelo modelo pedotransferência – SPLINTEX.** In: III Seminário dos Impactos da Agricultura nos Recursos Hídricos e II Fórum de Geo-Bio-Hidrologia, 2014, Santa Maria. III Seminário dos Impactos da Agricultura nos Recursos Hídricos e II Fórum de Geo-Bio-Hidrologia, 2014.

SILVA, C. A.; MADEIRA, L. M.; BOAVENTURA, R. A. **Photo-oxidation of cork manufacturing wastewater.** Chemosphere, Los Angeles, v. 55, n. 1, p. 19-26, 2004.

SILVA, J. N. A.; CABEDA, M.; LIMA, J. **Efeito de sistemas de uso e manejo nas propriedades físico-hídricas de um Argissolo Amarelo de tabuleiro costeiro.** Revista Brasileira de Ciências do Solo, v. 29, p. 833-842, 2005.

SILVA, C. L.; KATO, E. **Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 32, n. 2, p. 213-220, 1997.

SILVA, E. L.; OKURA, M. N.; FREIRE, J. T. **Determinação das propriedades físicas do vinhoto e propriedades de transporte no sistema solo-vinhoto: estudos preliminares.** In: Jornada científica da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 21p., 1982.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V.; CARVALHO, F. G. **Matéria orgânica e propriedades físicas de um Argissolo Amarelo coeso sob sistemas de manejo com cana-de-açúcar.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.10, p.759-585, 2006.

SILVA, M. A. S.; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. **Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 108-114, 2007.

SILVA, V.; FAGUNDES, M. C.; LIMA, M. R.; LIMA, V. C.; TAVARES, A. K. **Conhecendo os principais solos do litoral do Paraná.** Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Matinhos, 32p., 2013.

STRECK, E. V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre-RS: EMATER/RS; UFRGS, 107p., 2002.

TORRES, J. L. R.; FABIAN, A.; PEREIRA, M. **Alterações dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo.** Ciência Agrotécnica, v. 35, n. 3, p. 437-455, 2011.

TRENTO FILHO, A. J. **Produção de cana-de-açúcar e qualidade da cachaça de Morretes, PR.** 91f. Tese (Pós-graduação em Produção Vegetal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

ÚNICA – **Relatório de Acompanhamento da Safra 2014/2015.** <<http://www.unicadata.com.br>>. Acesso em: 23/10/2014.

UYEDA, C. A. **Influência da aplicação de vinhaça na condutividade hidráulica do solo saturado e no escoamento superficial.** 70p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

UYEDA, C. A.; MIRANDA, J. H.; DUARTE, S. N.; MEDEIROS, P. R. F.; DIAS, C. T. S. **Avaliação dos efeitos da aplicação de vinhaça em características físico-químicas de diferentes solos.** Engenharia Agrícola, v. 33, p. 1-10, 2013.

VAN GENUCHTEN, M.T. **A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.** Soil Science Society American Journal, 44:892-898, 1980.

ZOLIN, C. A.; PAULINO, J.; BERTONHA, A.; FREITAS, P. S. L.; FOLEGATTI, M. V. **Estudo exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo. II. Características do Solo.** Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental, v.15, n.3, p.22-28, 2011.