

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

CÂMPUS JABOTICABAL

**MINERALOGIA DA FRAÇÃO ARGILA E ATRIBUTOS
FÍSICOS DE UM ARGISSOLO AMARELO**

Deise Cristina Santos Nogueira

Engenheira Agrônoma

2017

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA- UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**MINERALOGIA DA FRAÇÃO ARGILA E ATRIBUTOS
FÍSICOS DE UM ARGISSOLO AMARELO**

Deise Cristina Santos Nogueira

Orientadora: Profa. Dra. Carolina Fernandes

Coorientadora: Dra. Livia Arantes Camargo

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo)

2017

N778m Nogueira, Deise Cristina Santos
Mineralogia da fração argila e atributos físicos de um Argissolo
Amarelo / Deise Cristina Santos Nogueira. – – Jaboticabal, 2017
x, 30 p. : il. ; 29 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2017
Orientadora: Carolina Fernandes
Banca examinadora: José Eduardo Corá, Adolfo Valente Marcelo
Bibliografia

1. *Caulinita*. 2. Densidade do solo. 3. Resistência à Penetração. I.
Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.442.4

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação –
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

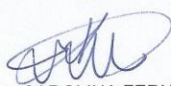
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: MINERALOGIA DA FRAÇÃO ARGILA E ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM
ARGISSOLO AMARELO

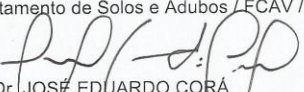
AUTORA: DEISE CRISTINA SANTOS NOGUEIRA

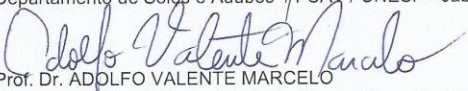
ORIENTADORA: CAROLINA FERNANDES

COORIENTADORA: LIVIA ARANTES CAMARGO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA (CIÊNCIA
DO SOLO), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dra. CAROLINA FERNANDES
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal


Prof. Dr. JOSE EDUARDO CORA
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal


Prof. Dr. ADOLFO VALENTE MARCELO
Ciência em Solo - Laboratório de Análises e Consultoria Agrícola LTDA / São José do Rio Preto, SP

Jaboticabal, 17 de fevereiro de 2017

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Deise Cristina Santos Nogueira – Nasceu no dia 17 de julho de 1984 em Ituverava- SP. cursou Agronomia na Faculdade Doutor Francisco Maeda, de 2002 a 2006. cursou o mestrado no programa de pós graduação em Agronomia (Ciência do Solo) da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal – Unesp entre 2015 e 2016.

“Ninguém é suficientemente perfeito que não possa aprender com o outro e ninguém é totalmente destituído de valores que não possa ensinar algo ao seu irmão”.

São Francisco de Assis

“Always believe in yourself, the rest will follow you.”

John Coyne

DEDICO

Aos meus pais Wilson e Rosa, pelo amor incondicional, pela paciência, pela ternura e pelas palavras tão cheias de amor. A vocês minha eterna gratidão pelo dom da vida e por esse amor tão imenso a mim atribuído.

AGRADECIMENTOS

À espiritualidade maior pela força ofertada durante o caminho para a realização desse trabalho;

Aos meus pais e irmãos pelo incentivo no decorrer do curso e por sempre estarem ao meu lado em todos os momentos;

Ao programa de pós graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade de estudo e aprendizado adquirido;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo durante o período do curso de Mestrado;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Processo nº 2014/14490-2, pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa;

À Usina São Martinho, pela concessão da área para que o presente trabalho fosse realizado e pela mão de obra que nos auxiliou durante a coleta de dados no campo;

À professora Carolina Fernandes, pela orientação, pela transmissão de conhecimentos, pela paciência perante minhas falhas e pela oportunidade de vivenciar uma pós- graduação;

À Lívia Arantes Camargo, pela coorientação, pelo comprometimento e exemplo profissional na realização desse trabalho, pelas palavras de incentivo nos momentos tensos dessa jornada e por toda paciência perante minhas falhas;

Ao professor José Marques Júnior por ter aberto as portas do grupo CSME para a realização das análises mineralógicas do presente trabalho;

Ao meu noivo Daniel pela paciência e compreensão durante os momentos tensos;

Aos amigos do grupo de pesquisa em física do solo- GPFiS, Luma, Nilvan, Carlos, Ludmila, Daniel, Matheus, Camilinha e Mariele o meu muito obrigada pela ajuda na realização desse trabalho;

À Luma Castro de Souza, a você minha amiga serei eternamente grata pela amizade sincera, por sua fé e pelas palavras de incentivo nos momentos de desânimo;

À Ludmila Magalhaes, obrigada minha querida amiga pela amizade sincera e pelo apoio incondicional durante o período do mestrado.

As minhas irmãs paraenses Bruna e Renata pela convivência, pela amizade e pelas palavras de incentivo nos momentos delicados, muito obrigada;

À Mara Moitinho e Daniel de Bortoli, o meu muito obrigada pela ajuda imprescindível nas análises estatísticas e por sempre estarem a disposição para auxiliar nos momentos de dúvida;

As amizades que a pós-graduação me ofertou, Raphael Leone, Nilvan Mello, Andrea Passos, Aline Tito, Esmeralda Ochoa, Priscila Volante, Edimar Soares, Renata (íngrata), Isabela de Paiva e Ana Carla Nogueira;

Aos funcionários do departamento de Solos e Adubos, Claudinha, Maria Inês, Mauro e Gibson pela amizade;

A todos que contribuíram de alguma maneira para a realização desse trabalho;

Muito obrigada!

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	x
ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
3. MATERIAL E MÉTODOS	6
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	9
5. CONCLUSÃO.....	24
6. REFERÊNCIAS.....	25

Mineralogia da fração argila e atributos físicos de um Argissolo Amarelo

RESUMO - Nos solos brasileiros, a caulinita, os óxidos de ferro e os hidróxidos de alumínio são alguns dos minerais encontrados na fração argila influenciando o comportamento dos atributos físicos do solo. O objetivo do presente trabalho foi avaliar a influência dos minerais da fração argila nos atributos físicos de um Argissolo Amarelo, submetido a dois tipos de preparo e cultivado com cana-de-açúcar. As amostras deformadas e indeformadas de solo foram coletadas após oito meses do plantio da cana-de-açúcar, em quatro camadas (0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m) na linha e entrelinha de plantio nas áreas submetidas à escarificação em área total e escarificação na linha da cultura. Através das amostras deformadas determinou-se a textura do solo, ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato (Fe_{DCB}), ferro extraído por oxalato ácido de amônio (Fe_{OAA}) e razão caulinita/(caulinita+gibbsita) $[(Ct/(Ct+Gb))]$. Com as amostras indeformadas determinou-se a densidade do solo (D_s) e a resistência do solo à penetração (RP). Os resultados apresentados pela estatística descritiva demonstraram que houve uma separação das áreas de estudo devido à diferença mineralógica encontrada nessas áreas, sendo a primeira área caracterizada pela maior razão $Ct/(Ct+Gb)$ e a segunda área caracterizada pelos maiores teores de ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato (Fe_{DCB}). Pela análise de componentes principais foi possível observar que o Fe_{DCB} apresentou correlação inversa com a D_s e a RP , a razão $Ct/(Ct+Gb)$ apresentou correlação direta com os atributos físicos D_s e RP . A mineralogia influenciou o comportamento da densidade do solo e resistência do solo à penetração. A área com maior razão caulinita apresentou maiores valores de densidade do solo e de resistência do solo à penetração e a área com maiores teores de óxidos de ferro apresentou menores valores de densidade do solo e de resistência do solo à penetração. O preparo do solo não influenciou o comportamento da densidade do solo e da resistência do solo à penetração.

Palavras-chave: densidade do solo, resistência do solo à penetração, caulinita, óxidos de ferro.

CLAY MINERALOGY AND PHYSICAL ATTRIBUTES OF A YELLOW ULTISOL

ABSTRACT - In Brazilian soils, kaolinite, iron oxides and aluminium hydroxides are some of the minerals found in the clay fraction influencing the behavior of the soil physical attributes. The objective of the present work was to evaluate the influence of minerals of the clay fraction on the physical attributes of a yellow Ultisol under two tillage and sugar cane cultivation. The disturbed and undisturbed samples of soil were collected in the row and interrow in the areas with chiselling in the total area and chiselling in the planting row in four layers (0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60 m) eight months later the sugar cane cultivation. The soil texture, citrate/bicarbonate/dithionite extractable Fe, oxalate/acid/ammonium extractable Fe (Fe_{OAA}) and $\text{Ct} / (\text{Ct} + \text{Gb})$ ratio were evaluated from disturbed samples and bulk density (Bd) and soil penetration resistance (SPR) were evaluated from undisturbed samples. The results presented by the descriptive statistics showed that there was a separation of the study areas due to the mineralogical difference found in these areas, being the first area characterized by the higher ratio $\text{Ct} / (\text{Ct} + \text{Gb})$ and the second area characterized by the higher citrate/bicarbonate/dithionite extractable Fe (Fe_{DCB}). In the principal component analysis, it was observed that the Fe_{DCB} showed an inverse correlation between Bd and SPR. It was also observed that the $\text{Ct} / (\text{Ct} + \text{Gb})$ ratio showed a direct correlation with the physical attributes Bd and SPR. The mineralogy influenced the behavior of the Bd and SPR. The area with higher $\text{Ct} / (\text{Ct} + \text{Gb})$ ratio, showed higher values of Bd and SPR and The area with higher content of iron oxides had lower values of Bd and SPR. The soil tillage didn't influence the behavior of Bd and SPR.

Key words: bulk density, soil penetration resistance, Kaolinite, iron oxides.

1. INTRODUÇÃO

O solo é um corpo natural que apresenta características distintas devido à interação dos seus fatores de formação como: material de origem, clima, organismos, relevo e tempo. Os minerais do solo representam a sua fração sólida e sua composição esta diretamente relacionada com a composição química do material de origem, as condições climáticas que atuam sobre esse material e a sua posição na paisagem.

A composição mineralógica dos Argissolos apresenta proporções variadas de óxidos de ferro (ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato e ferro extraído por oxalato ácido de amônio), gibbsita e caulinita, que por sua vez apresentam relação com os atributos físicos, pois, a mineralogia é um dos fatores que influenciam o comportamento dos atributos físicos (REYNOLDS et al., 2002).

Dessa maneira a identificação e a caracterização dos minerais devem ser adotadas como ferramenta para a melhor compreensão do comportamento dos atributos físicos.

Cortez 2013 indicou zonas específicas de manejo baseando-se na relação entre os minerais da fração argila e os atributos físicos do solo encontrados no seu estudo. Esse autor ressaltou que áreas com maior concentração de caulinita por apresentarem maiores valores de resistência do solo à penetração necessitam de manejo mais adequado visto que são mais propensas à compactação.

A densidade do solo e a resistência do solo à penetração são atributos físicos que refletem a condição estrutural dos solos. Na literatura vários autores já reportaram a relação entre os minerais e os atributos físicos do solo. Camargo, Marques Júnior e Pereira (2013) encontraram em uma área côncava caulinitica maiores valores de Ds e RP, quando comparada a uma área convexa oxídica. Ramos et al. (2015), estudando os horizontes de duas toposequências encontraram no horizontes caulinitico maior valor de Ds, quando comparado ao horizonte com predomínio de óxido de ferro. Ajayi et al. (2009) ao estudarem a relação entre os minerais da fração argila e os atributos físicos de cinco Latossolos, atribuíram ao predomínio da caulinita na fração argila de um Latossolo Amarelo distrocoeso os maiores valores de densidade do solo, quando comparado aos demais Latossolos,

que apresentaram domínio de gibbsita na fração argila e apresentaram menores valores de Ds.

Ao contrário de solos cauliniticos, solos com predomínio de óxidos de ferro na fração argila apresentam menores valores de densidade e resistência à penetração. Estudos realizados por Wu et al. (2016), encontraram correlação inversa entre ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato (Fe_{DCB}) e densidade do solo em um Argissolo, indicando que ambientes com alto teor de Fe_{DCB} apresentam menores valores de densidade do solo. Botula et al. (2015) também encontraram correlação inversa entre densidade do solo e ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato (Fe_{DCB}) em um Argissolo. Segundo esses autores, o Fe_{DCB} é considerado um agente cimentante das partículas do solo dessa maneira promove maior agregação no solo e conseqüentemente densidade menor.

O conhecimento dos minerais que predominam a fração argila auxilia no melhor entendimento sobre o comportamento dos atributos físicos, neste sentido trabalha-se com a hipótese de que solos com predomínio de caulinita na fração argila apresentam maiores valores de densidade do solo e maiores valores de resistência do solo à penetração. O objetivo do presente trabalho foi avaliar a influência dos minerais da fração argila no comportamento dos atributos físicos em um Argissolo Amarelo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Os solos presentes na paisagem refletem a interação dos seus fatores de formação (material de origem, clima, tempo, relevo e organismos) (GUIDIN et al., 2006a). De acordo com esses autores, a maneira distinta em que fenômenos físicos e químicos atuam no material de origem resulta em transformações contínuas promovendo a caracterização mineralógica dos solos. Os solos apresentam três fases distintas: a líquida, a gasosa e a sólida. A parte sólida dos solos é representada por minerais inorgânicos (45%) e pela matéria orgânica (5%) (SPARKS, 1995). Segundo Ajayi et al. (2009), os minerais da fração argila são compostos naturais inorgânicos que apresentam propriedades físicas, químicas e cristalográficas definidas que influenciam o comportamento das propriedades físicas e químicas dos diferentes tipos de solos.

Nos Argissolos desenvolvidos a partir de arenitos pertencentes ao grupo Bauru, a mineralogia é representada pelos minerais caulinita, óxidos de ferro e gibbsita (COELHO; VIDAL TORRADO, 2003).

A caulinita é um mineral do tipo 1:1 pertencente ao grupo dos filossilicatos (MELO; WYPYCH, 2016). A sua formação é favorecida em ambientes com grande concentração de silício (Si) que ao se recombinar com o alumínio da solução do solo propicia a formação da caulinita (ANTONELLO et al., 1983).

A gibbsita é um óxi-hidróxido de alumínio que se forma em ambientes onde a concentração de sílica é próxima a zero (GUIDIN et al., 2006b).

Os óxidos de ferro apresentam-se sob duas formas; o ferro que representa a totalidade dos óxidos pedogenéticos (ferro extraído pelo ditionito-citrato-bicarbonato) e o ferro que representa os óxidos pedogenéticos de baixa cristalinidade (ferro extraído pelo oxalato-ácido-amônio) (NETO et al., 2008).

O solo necessita apresentar condições físicas adequadas para desempenhar sua função no sistema produtivo. A estrutura do solo por ser responsável pela disponibilidade de ar e água às raízes das plantas, ao suprimento de nutrientes e a resistência mecânica à penetração do sistema radicular é considerada um atributo de grande importância (CORREA, 2002).

A densidade do solo e a resistência do solo à penetração são atributos que refletem a condição estrutural do solo, a redução do volume poroso e aumento da massa de sólidos nesse volume de solo altera a estrutura do solo, ocasionando aumento da densidade do solo e da resistência do solo à penetração (BUSHER et al., 1997).

De acordo com Reynolds et al. (2002), os minerais da fração argila são um dos fatores que influenciam o comportamento dos atributos físicos, pois esses minerais participam da formação estrutural dos solos.

A presença de caulinita na fração argila favorece a formação de uma estrutura em blocos devido ao arranjo face a face desse mineral no solo (Emerson, 1959; Resende, 1985), em consequência a essa estrutura em blocos, solos cauliniticos apresentam alta densidade do solo, maior proporção de poros pequenos e baixa permeabilidade (FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999).

Souza, Marques Júnior e Pereira (2009), ao estudarem a variabilidade espacial das propriedades físicas e mineralógicas de um Latossolo em diferentes paisagens, observaram que a densidade do solo e a resistência do solo à penetração foram maiores na área I ($1,46 \text{ Kg dm}^{-3}$, $5,12 \text{ MPa}$) em relação a área II ($1,40 \text{ Kg dm}^{-3}$, $4,31 \text{ MPa}$). De acordo com esses autores a área I apresentou-se mais caulinitica em relação à área II promovendo assim maiores valores de densidade do solo e resistência do solo à penetração em relação à área II.

Ramos et al. (2015), estudando a mineralogia da fração argila e a gênese de fragipãs em duas toposequências de solo na região do Rio de Janeiro, encontraram valor de densidade do solo maior na toposequência I ($1,78 \text{ g cm}^{-3}$) em relação a toposequência II ($1,42 \text{ g cm}^{-3}$). De acordo com os autores, a mineralogia caulínica encontrada na toposequência I conferiu ao solo maior valor de densidade, quando comparado ao solo da toposequência II.

Silva, Barros e Vilas Boas (2006), estudando o efeito da compactação no crescimento e nutrição do eucalipto em um Latossolo Vermelho Amarelo e num Latossolo Amarelo, encontraram no Latossolo Amarelo maiores valores de densidade do solo ($1,22 \text{ Kg dm}^{-3}$) em relação ao Latossolo Vermelho Amarelo ($1,12 \text{ Kg dm}^{-3}$). Esses autores afirmaram que a maior densidade do solo encontrada no Latossolo Amarelo é atribuída a presença da caulinita na fração argila nesse solo.

Em contrapartida aos efeitos que a caulinita promove nos atributos físicos do solo, a presença dos óxidos de ferro confere aos solos melhoria nos seus atributos físicos, pois, segundo Resende (1985), os óxidos de ferro promovem uma desorganização na estrutura da caulinita resultando na formação de uma estrutura mais granular no solo. Segundo Beutler et al. (2002), essa estrutura granular promove aumento na formação de poros grandes resultando na redução da densidade do solo e consequentemente da resistência do solo à penetração. Segundo Wang et al. (2016), os óxidos de ferro são importantes no processo de agregação das partículas do solo, pois são considerados agentes cimentantes destas partículas.

Guidin et al. (2006b), estudando as relações entre a mineralogia da fração argila e as propriedades físicas de um Latossolo Bruno ácrico húmico e um Latossolo Vermelho distroférico húmico, observaram que houve redução da densidade do solo no Latossolo Bruno ácrico húmico. De acordo com esses autores, essa redução da densidade do solo observada para o Latossolo Bruno ácrico húmico foi resultante do aumento nos teores de ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato para este solo.

Botula et al. (2015) ao realizar a predição da densidade do solo pelo uso de uma função de pedotransferência em Latossolo, Nitossolo, Argissolo e Neossolos, encontraram correlação inversa entre densidade do solo e ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato nos solos em estudo. De acordo com esses autores, a melhoria na agregação dos solos promovida pela presença dos óxidos de ferro (ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato) devido a sua ação cimentante resulta no aumento da porosidade e consequentemente redução da densidade do solo.

Cortez 2013, indicou zonas de manejo específico para um Latossolo Vermelho eutrófico e para um Latossolo Vermelho eutroférico a partir da relação observada entre a resistência à penetração e a concentração de caulinita na fração argila. De acordo com esse autor, a caulinita por promover aumento nos valores da resistência à penetração potencializa a compactação nesse solo, que necessita de um manejo mais específico devido a suas particularidades.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo está localizada no município de Monte Alto, no sudeste do estado de São Paulo próximo às coordenadas geográficas 21°15'23" latitude sul e entre 48° 25' 52" longitude oeste, com altitude média de 735 m. Na figura 1 esta apresentado o mapa da área experimental.

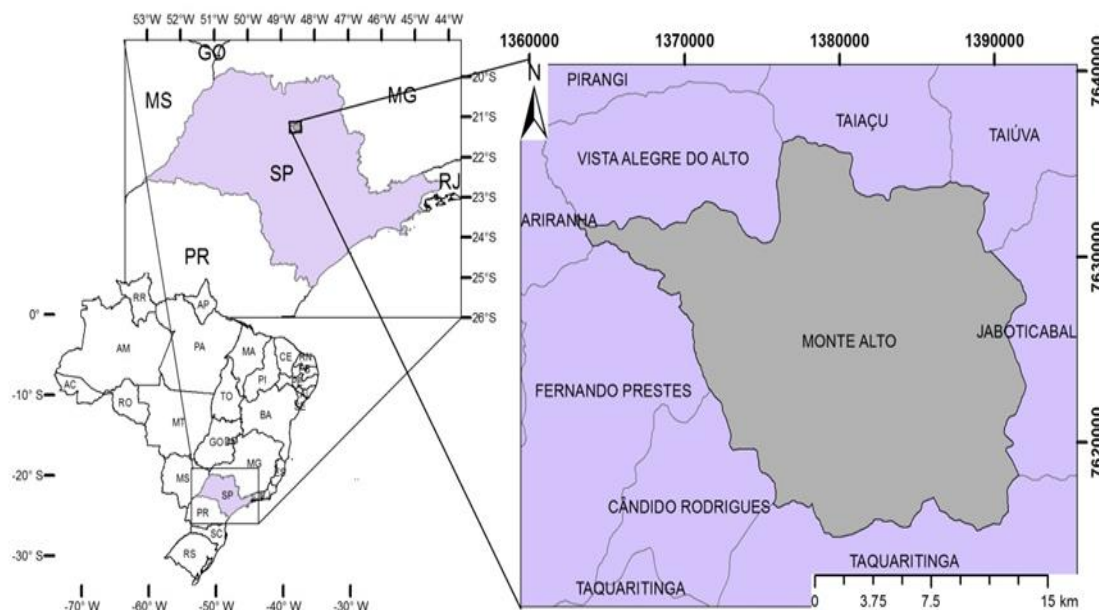


Figura 1. Distribuição geográfica da área experimental, Argissolo Amarelo localizado no município de Monte Alto, estado de São Paulo.

O clima da região segundo a classificação de *Köppen* é Aw, tipo mesotérmico com inverno seco, com temperatura do mês mais quente superior a 22 ° C e a do mês mais frio superior a 18° C. A precipitação média anual é de 1.400 mm, com concentração de chuvas no período de outubro a março e relativa seca entre abril e setembro.

O solo da área é um Argissolo Amarelo e o material de origem foi mapeado como arenito Vale do Rio do Peixe antigo grupo Bauru Formação Adamantina (IPT,1981). O cultivo de cana-de-açúcar ocorre há mais de vinte anos na área e a colheita é realizada mecanicamente em cana crua desde 2004.

Uma área de 8,99 hectares e 1,1 % de declividade foi delimitada para a coleta de 32 amostras de solo espaçadas a aproximadamente 132 m nas posições de maior e menor altitude da área (total de 64 amostras) para captar a maior variabilidade da mineralogia da fração argila do solo (BRITO et al., 2006; CAMARGO et al., 2014)

Na área foi realizado o preparo do solo, que consistiu em escarificação na linha de plantio com revolvimento do solo somente na linha de plantio da cana-de-açúcar preservando dessa maneira a entrelinha de plantio em uma metade da área de estudo e escarificação em área total com revolvimento do solo na linha e entrelinha de plantio da cana-de-açúcar na outra metade da área de estudo.

O plantio da cana-de-açúcar foi realizado com plantadora que possui potência de 220 cv e peso de 10.540 kg. Foi realizada a operação de quebra lombo um mês após o plantio através de cultivador que foi acoplado ao trator com potência de 182 cv.

Coletaram-se amostras deformadas e indeformadas de solo nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40 a 0,60 m na linha (distante 0,20m da touceira) e na entrelinha do plantio da cana-de-açúcar (distante 0,75 m da touceira). As amostras deformadas foram coletadas com auxílio de um trado tipo holandês e a partir dessas amostras determinou-se a textura do solo (Claessen, 1997) e os minerais da fração argila. A identificação dos minerais da fração argila iniciou-se com a separação da argila pelo método da centrifugação (JACKSON, 1985). A remoção dos óxidos de ferro da fração argila foi realizada de acordo com Mehra e Jackson (1960). Os teores de ferro extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato (Fe_{DCB}) foram determinados de acordo com a metodologia de Mehra e Jackson (1960) e os teores de ferro extraídos por oxalato ácido de amônio (Fe_{OAA}) foram determinados de acordo com a metodologia proposta por (CAMARGO et al., 1986). Para a determinação de caulinita e gibbsita foi usado o difratômetro de Raio X, em lâminas confeccionadas com material sem orientação (em pó), modelo Mini-Flex II- Rigaku, empregando-se cátodo de cobre com filtro de níquel e radiação $K\alpha$ (20mA, 30Kv). A velocidade de varredura empregada foi de $2^\circ 2\theta$ /minuto para a caracterização da Ct e Gb. A razão Caulinita/(Caulinita+Gibbsita) $[(Ct/(Ct+Gb))]$ foi calculada com base na área do pico da Ct (001) e da Gb (002) dos difratogramas.

As amostras indeformadas foram coletadas com auxílio de um amostrador tipo Uhland utilizando-se anéis volumétricos (0,05x 0,05 m). A partir dessas amostras determinou-se a densidade do solo (Ds) (Claessen, 1997) e a resistência do solo à penetração (RP) (TORMENA et al., 1998).

Os dados foram primeiramente submetidos à estatística descritiva através do programa Mini Tab 16 e posteriormente considerando a estrutura de dependência contida no conjunto de variáveis aplicou-se a análise de componentes principais (ACP) com o programa Statistic 7.0. Os componentes principais são novas variáveis latentes (autovetores) formadas por combinação linear das variáveis originais autovalores da matriz de covariância (HAIR et al., 2009). O uso da estatística multivariada vem auxiliar no entendimento da relação entre a mineralogia e os atributos físicos do solo, pois, com o uso da análise multivariada é possível explicar o máximo de intercorrelação entre as variáveis assim como demonstrar quais delas contribuem mais para a caracterização e alteração do solo (PRAGANA et al., 2012). Inicialmente foi realizada a padronização dos dados (média nula e variância unitária) e em seguida foi gerado os componentes principais. Para a interpretação dos resultados foram considerados os dois primeiros componentes principais (CP1 e CP2). De acordo com Hair et al. (2009), o primeiro componente principal é responsável pela retenção do maior número de variância original enquanto o segundo componente principal retém o restante dessa variância.

Para a interpretação dos resultados apresentados em cada componente principal, observou-se o sinal e o peso que cada variável apresenta no componente. Valores acima de 0,60 foram considerados com relevância. Esse peso adotado para a interpretação dos resultados esta de acordo com a literatura, pois Santi et al. (2012) ao estudar o comportamento dos atributos físicos e químicos através da ACP afirmaram que variáveis com peso acima ou igual a 0,50 são altamente significativas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com os resultados das análises mineralógicas (Tabela 1) observou-se que a área de maior altitude (área I) foi caracterizada pela maior razão caulinita/ (caulinita+gibbsita) ($Ct/(Ct+Gb)$) e menores teores de Fe_{DCB} e de Fe_{OAA} e a área de menor altitude (área II) foi caracterizada pela menor razão caulinita/ (caulinita+gibbsita) ($Ct/(Ct+Gb)$) e maiores teores de Fe_{DCB} e de Fe_{OAA} . Estes resultados são explicados pela influência da posição da paisagem nos minerais da fração argila (BRITO et al., 2006; CAMARGO et al., 2008; CAMARGO; MARQUES JÚNIOR; PEREIRA, 2013; CAMARGO et al., 2014).

Na área I os teores de argila apresentaram média de $261,57 \text{ g kg}^{-1}$ e os teores de areia apresentaram média de $807,13 \text{ g kg}^{-1}$, enquanto na área II os teores apresentaram médias de $248,98 \text{ g kg}^{-1}$ para argila e média igual a $798,10 \text{ g kg}^{-1}$ para a areia (Tabela 1). Observa-se que, nas duas áreas, ocorreu o aumento nos teores de argila e a diminuição dos teores de areia em profundidade (Tabela 2). Estes resultados estão de acordo com o aumento característico da argila em profundidade que ocorre nos Argissolos. Este aumento é atribuído à mobilização e perda de argila das camadas mais superiores nos Argissolos (SANTOS et al., 2013).

A densidade do solo (D_s) e a resistência do solo à penetração (RP) apresentaram médias entre $1,86 \text{ Mg m}^{-3}$ e $4,13 \text{ MPa}$ na área I e $1,82 \text{ Mg m}^{-3}$ e $3,61 \text{ MPa}$ na área II (Tabelas 2 e 3).

Os maiores valores de D_s e RP foram encontrados na área I. Esses resultados demonstram a relação direta existente entre esses atributos uma vez que quando o valor da D_s foi maior o valor da RP também aumentou. A área I foi caracterizada pela maior razão $Ct/(Ct+Gb)$ e menores teores de Fe_{DCB} e Fe_{OAA} quando comparada à área II (Tabela 1). Segundo Ferreira, Fernandes e Curi (1999) solos cauliniticos apresentam estrutura em blocos que ao se acomodar no solo formam placas que se ajustam face a face formando um plasma mais denso. Dessa maneira, solos cauliniticos apresentam maiores valores de D_s (Centurion et al., 2007) e consequentemente maiores valores de RP.

Em contrapartida na área II observou-se menores valores de D_s e RP (Tabelas 2 e 3). Essa área apresentou maiores teores de óxidos de ferro quando

comparada à área I (Tabela 1). Os óxidos de ferro são considerados agentes cimentantes sendo importantes no processo de agregação do solo, dessa maneira o aumento nos teores desses minerais ocasiona um arranjo mais casualizado das partículas refletindo em uma estrutura mais granular (RESENDE, 1985). Essa estrutura granular promove aos solos menores valores de Ds e RP quando comparados a solos com maior presença de caulinita (AJAYI et al., 2009).

Tabela 1. Estatística descritiva, EPM (erro padrão da média), DP (desvio padrão), Mín (mínimo), Máx (máximo), CV (coeficiente de variação) dos atributos estudados.

Atributo	Média	EPM	DP	Mín.	Máx	CV(%)	Média	EPM	DP	Mín.	Máx	CV(%)
	Área I						Área II					
	Prof. 0,00-0,10 m						Prof.0,00-0,10 m					
Argila (g kg ⁻¹)	117	2	7	110	129	6	145	3	10	129	157	7
Silte (g kg ⁻¹)	76	5	14	48	91	19	57	4	12	37	68	21
Areia(g kg ⁻¹)	807	5	13	790	836	2	798	4	10	781	810	1
Fe _{DCB} (g kg ⁻¹)	17	0,22	0,61	16	18	4	20	1	3	16	23	14
Fe _{OAA} (g kg ⁻¹)	0,71	0,13	0,36	0,43	1	51	0,92	0,11	0,31	0,64	2	33
Ct/Ct+Gb	0,74	0,03	0,07	0,62	0,83	10	0,56	0,02	0,06	0,46	0,65	11
	Prof. 0,10-0,20 m						Prof. 0,10-0,20 m					
Argila(g kg ⁻¹)	138	5	14	116	161	10	157	5	14	136	176	9
Silte (g kg ⁻¹)	92	10	27	48	122	30	86	5	14	67	108	16
Areia(g kg ⁻¹)	770	12	35	741	836	5	757	3	9	746	770	1
Fe _{DCB} (g kg ⁻¹)	18	0,73	2	14	20	12	20	1	3	16	25	17
Fe _{OAA} (g kg ⁻¹)	0,64	0,07	0,18	0,40	0,91	28	0,87	0,09	0,25	0,50	1	28
Ct/Ct+Gb	0,79	0,01	0,03	0,74	0,84	4	0,60	0,02	0,06	0,54	0,73	10
	Prof. 0,20-0,40 m						Prof. 0,20-0,40 m					
Argila (g kg ⁻¹)	186	6	16	160	205	9	189	5	14	161	206	8
Silte (g kg ⁻¹)	75	10	28	43	119	37	80	8	22	62	120	28
Areia (g kg ⁻¹)	738	5	15	710	758	2	731	6	17	694	748	2
Fe _{DCB} (g kg ⁻¹)	19	0,60	2	16	22	9	22	1	3	19	27	13
Fe _{OAA} (g kg ⁻¹)	0,58	0,04	0,12	0,38	0,74	20	0,84	0,14	0,38	0,33	2	45
Ct/Ct+Gb	0,81	0,02	0,05	0,74	0,87	7	0,61	0,04	0,12	0,43	0,84	19
	Prof. 0,40-0,60 m						Prof. 0,40-0,60 m					
Argila (g kg ⁻¹)	262	7	19	231	290	7	249	6	17	222	272	7
Silte (g kg ⁻¹)	53	9	26	11	96	49	58	8	23	30	97	39
Areia (g kg ⁻¹)	685	8	24	644	707	3	693	6	16	661	709	2
Fe _{DCB} (g kg ⁻¹)	24	1	4	19	29	15	24	0,96	3	21	28	11
Fe _{OAA} (g kg ⁻¹)	0,56	0,63	0,18	0,40	0,84	32	0,69	0,09	0,25	0,38	1	36
Ct/Ct+Gb	0,77	0,02	0,06	0,68	0,86	8	0,55	0,03	0,08	0,40	0,65	15

Tabela 2. Estatística descritiva, EPM (erro padrão da média), DP (desvio padrão), Mín (mínimo), Máx (máximo), CV (coeficiente de variação) da densidade do solo (Mg m^{-3}).

Prof (m)	Média	EPM	DP	Mín.	Máx.	CV (%)	Média	EPM	DP	Mín.	Máx.	CV (%)
Área I							Área II					
Escarificação na linha de plantio							Escarificação na linha de plantio					
Na linha da cultura							Na linha da cultura					
0,00-0,10	1,64	0,09	0,12	1,56	1,73	7,34	1,49	0,03	0,04	1,47	1,52	2,42
0,10-0,20	1,84	0,08	0,11	1,76	1,92	6,15	1,64	0,02	0,03	1,62	1,66	1,80
0,20-0,40	1,80	0,09	0,14	1,70	1,90	7,70	1,67	0,04	0,06	1,63	1,71	3,69
0,40-0,60	1,77	0,10	0,14	1,67	1,87	8,06	1,75	0,07	0,09	1,69	1,82	5,26
Na entrelinha da cultura							Na entrelinha da cultura					
0,00-0,10	1,67	0,09	0,13	1,58	1,77	7,88	1,30	0,34	0,48	0,96	1,63	36,64
0,10-0,20	1,88	0,04	0,05	1,84	1,92	2,91	1,76	0,08	0,12	1,68	1,84	6,54
0,20-0,40	1,85	0,04	0,06	1,81	1,89	3,25	1,84	0,03	0,05	1,81	1,87	2,49
0,40-0,60	1,72	0,09	0,14	1,62	1,82	8,17	1,72	0,02	0,03	1,70	1,74	1,72
Escarificação em área total							Escarificação em área total					
Na linha da cultura							Na linha da cultura					
0,00-0,10	1,71	0,01	0,02	1,70	1,72	1,02	1,77	0,00	0,00	1,76	1,77	0,28
0,10-0,20	1,84	0,00	0,00	1,83	1,84	0,20	1,82	0,07	0,10	1,75	1,89	5,51
0,20-0,40	1,77	0,00	0,00	1,77	1,78	0,17	1,78	0,10	0,14	1,68	1,87	7,63
0,40-0,60	1,82	0,07	0,10	1,75	1,89	5,28	1,80	0,05	0,07	1,75	1,85	4,04
Na entrelinha da cultura							Na entrelinha da cultura					
0,00-0,10	1,68	0,03	0,04	1,65	1,71	2,28	1,71	0,00	0,01	1,71	1,71	0,30
0,10-0,20	1,89	0,00	0,00	1,89	1,89	0,05	1,86	0,02	0,03	1,84	1,88	1,79
0,20-0,40	1,89	0,03	0,05	1,86	1,93	2,59	1,74	0,10	0,14	1,64	1,84	8,06
0,40-0,60	1,86	0,08	0,11	1,78	1,94	6,11	1,79	0,07	0,10	1,72	1,87	5,64

Tabela 3. Estatística descritiva, EPM (erro padrão da média), DP (desvio padrão), Mín (mínimo), Máx (máximo), CV (coeficiente de variação) da resistência do solo à penetração (MPa)

Prof (m)	Média	EPM	DP	Mín.	Máx.	CV (%)	Média	EPM	DP	Mín.	Máx.	CV (%)
Área I						Área II						
Escarificação na linha de plantio						Escarificação na linha de plantio						
Na linha da cultura						Na linha da cultura						
0,0-0,10	1,66	0,16	0,23	1,50	1,82	13,63	0,79	0,33	0,47	0,46	1,12	59,07
0,10-0,20	3,09	0,89	1,26	2,20	3,98	40,73	1,28	0,05	0,07	1,23	1,33	5,52
0,20-0,40	2,69	0,96	1,36	1,73	3,65	50,47	1,36	0,16	0,23	1,20	1,52	16,64
0,40-0,60	2,00	0,68	0,96	1,33	2,68	47,61	2,19	0,96	1,36	1,23	3,15	61,99
Na entrelinha da cultura						Na entrelinha da cultura						
0,0-0,10	2,30	0,21	0,29	2,10	2,51	12,74	1,46	0,42	0,59	1,04	1,87	40,34
0,10-0,20	3,98	0,89	1,26	3,09	4,87	31,57	2,68	0,38	0,54	2,30	3,06	20,05
0,20-0,40	3,08	0,04	0,05	3,05	3,12	1,63	3,61	0,60	0,85	3,01	4,21	23,50
0,40-0,60	1,78	0,74	1,05	1,04	2,52	59,10	2,27	0,46	0,64	1,81	2,72	28,41
Escarificação em área total						Escarificação em área total						
Na linha da cultura						Na linha da cultura						
0,0-0,10	1,97	0,11	0,16	1,86	2,08	7,90	1,96	0,72	1,02	1,24	2,68	51,95
0,10-0,20	2,96	0,18	0,25	2,78	3,13	8,38	2,30	0,75	1,06	1,55	3,05	46,12
0,20-0,40	1,65	0,59	0,83	1,06	2,23	50,29	1,93	0,34	0,48	1,59	2,27	24,91
0,40-0,60	1,96	0,58	0,81	1,38	2,53	41,59	1,90	0,25	0,35	1,65	2,14	18,28
Na entrelinha da cultura						Na entrelinha da cultura						
0,0-0,10	2,15	0,03	0,04	2,12	2,18	1,97	2,30	0,45	0,64	1,85	2,75	27,67
0,10-0,20	3,66	0,51	0,72	3,15	4,17	19,71	2,80	0,43	0,61	2,37	3,23	21,72
0,20-0,40	2,79	0,59	0,83	2,20	3,38	29,91	2,13	0,02	0,02	2,11	2,14	1,00
0,40-0,60	4,13	1,11	1,56	3,03	5,24	37,79	2,08	0,53	0,74	1,55	2,60	35,78

Na camada de 0,00- 0,10 m, o plano bidimensional formado pelos componentes principais 1 e 2 correspondeu a 79% da variabilidade contida no conjunto das variáveis originais (CP1 49% e CP2 30 %) (Tabela 4). Os preparos do solo (escarificação em área total e escarificação localizada na linha de plantio) não apresentaram diferenças entre si, pois, não houve separação entre esses preparos e (Figura 2). Observa-se que na área I (maior razão caulinita) os preparos ficaram bem próximos, provavelmente devido à mineralogia encontrada nessa área (Figura 2).

Observou-se que no CP1 houve a formação de um processo com participação das variáveis razão caulinita/(caulinita+gibbsita) ($Ct/(Ct+Gb)$), ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato (Fe_{DCB}), teor de argila e teor de areia. As variáveis teor de areia e razão $Ct/(Ct+Gb)$ apresentaram uma correlação inversa com teor de argila e Fe_{DCB} . A correlação inversa encontrada entre as variáveis pode ser atribuída ao ambiente de formação da caulinita e do Fe_{DCB} e também da participação do Fe_{DCB} na formação da caulinita. De acordo com Dress, Wilding e Smeck(1989), na fração areia é comum a presença do mineral quartzo. Ao sofrer intemperismo o quartzo libera para a solução do solo o silício (Si) que ao se recombinar com o alumínio dessa mesma solução promove a formação da caulinita (ANTONELLO et al., 1983). Em ambientes com altas concentrações de Si (313 g kg^{-1}), Ghidin et al. (2006a) encontraram acréscimos nos teores de Ct (574 g kg^{-1}). No processo de intemperismo da argila, minerais menos resistentes são liberados mais facilmente para a solução do solo, dessa maneira na fração argila ficam concentrados minerais mais resistentes a esse processo como os óxidos de ferro (LEPSCH, 2011). Santos et al. (2010) observaram em um Latossolo aumento nos teores de Fe_{DCB} ($6,9 \text{ g kg}^{-1}$) com o aumento nos teores de argila (566 g kg^{-1}). Em ambientes com maiores concentrações de ferro a caulinita encontra maiores dificuldades para se formar, pois, a maior presença de óxidos de ferro na fração argila promove uma desordem na estrutura da caulinita uma vez que o ferro evita o ajuste face a face desse mineral (RESENDE et al.,1997). Segundo Camargo et al. (2014), a presença de óxidos de ferro previne a formação de caulinita mais cristalinizada, dessa maneira a presença de óxidos de ferro no solo dificulta a formação da caulinita o que justifica a correlação inversa encontrada entre essas variáveis no presente estudo.

Tabela 4. Correlações entre as variáveis resistência do solo à penetração (RP), razão caulinita/(caulinita+gibbsita) ($Ct/(Ct+Gb)$), ferro extraído pelo ditionito – citrato - bicarbonato (Fe_{DCB}), teor de argila, teor de areia, índice de estabilidade de agregados (IEA) e densidade do solo (Ds)

Variáveis	CP1 (49%)	CP2 (30%)
Prof 0,00-0,10 m		
RP	-0,17	-0,85
$Ct/(Ct+Gb)$	0,67	-0,44
Fe_{DCB}	-0,95	0,11
Argila	-0,85	-0,09
Areia	0,91	0,23
Ds	0,03	-0,89
Prof 0,10-0,20 m		
	CP1 (66%)	CP2(15%)
RP	-0,87	-0,32
$Ct/(Ct+Gb)$	-0,65	-0,53
Fe_{DCB}	0,87	-0,29
Argila	0,89	-0,30
Areia	-0,74	0,49
Ds	-0,83	-0,32
Prof 0,20-0,40 m		
	CP1(50%)	CP2 (26%)
RP	-0,30	-0,85
$Ct/(Ct+Gb)$	-0,53	0,49
Fe_{DCB}	0,85	-0,03
Argila	0,87	-0,14
Areia	-0,86	0,33
Ds	-0,65	-0,69
Prof 0,40-0,60 m		
	CP1(52 %)	CP2 (20%)
RP	-0,75	-0,36
$Ct/(Ct+Gb)$	-0,31	-0,77
Fe_{DCB}	0,81	-0,11
Argila	0,70	-0,63
Areia	-0,81	0,18
Ds	-0,81	-0,20

Observou-se correlação positiva entre densidade do solo (Ds) e resistência do solo à penetração (RP) no CP 2 (Tabela 4). A Ds e a RP são atributos que refletem a qualidade estrutural do solo, dessa maneira a relação positiva entre essas duas variáveis é resultado da compactação e da mudança estrutural promovida no solo (Bussher et al., 1997), pois em solos mais densos o sistema radicular encontra maior resistência para penetrá-lo (RICHART et al., 2005). Analisando a Figura 3, nota-se

que a Ds e RP não se associaram as áreas em estudo na camada de 0,00-0,10 m indicando que o comportamento dessas variáveis não pode ser atribuído à mineralogia das áreas. O tráfego das máquinas que foram utilizadas nas operações de plantio e quebra lombo e ausência de revolvimento do solo pode ter ocasionando um aumento nos valores da Ds e da RP uma vez que essas operações promovem pressões sobre o solo ocasionando uma mudança na sua estrutura. De acordo com Tormena et al. (2002) em camadas superficiais o efeito cumulativo do tráfego de máquinas e posterior ausência de revolvimento do solo resultam na compactação dessas camadas. Outro fator que pode ter ocasionado o aumento nos valores da Ds e da RP é a força de coesão entre as partículas do solo, pois, de acordo com Lambe e Whitman (1979) com o aumento da densidade ocorre uma aproximação das partículas do solo o que pode favorecer a coesão entre essas partículas. No período amostral o sistema radicular das plantas já estava desenvolvido e pode ter influenciado o processo de coesão entre as partículas, pois ao absorver água, as raízes promovem secamento ao seu redor favorecendo o aumento nas forças de coesão entre as partículas do solo (ZONTA et al., 2006). Ao estudar o comportamento da densidade do solo em dois Argissolos Amarelos, Moreau et al. (2006) observaram elevados valores desse atributo nesses solos ($1,45 \text{ kg dm}^{-3}$ e $1,62 \text{ kg dm}^{-3}$). Esses autores atribuíram esses elevados valores de densidade do solo ao caráter coeso apresentado pelos Argissolos em estudo.

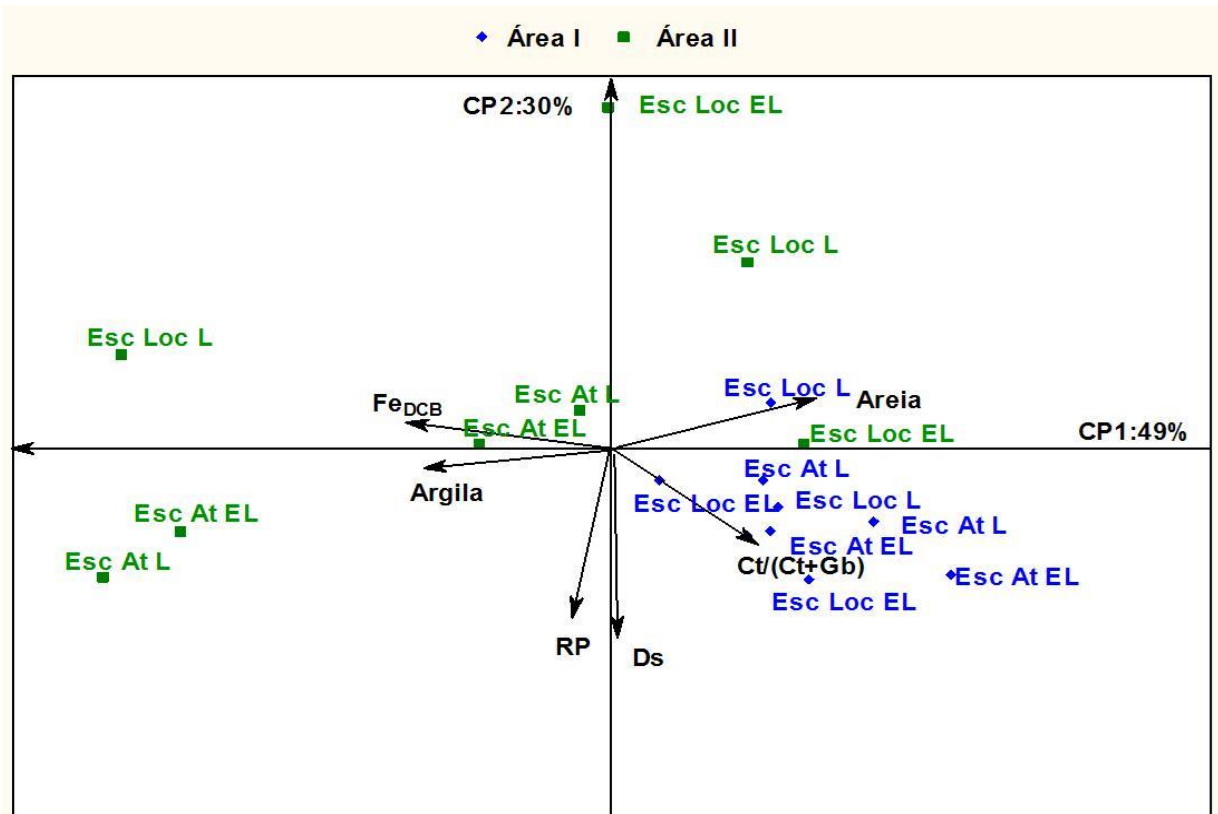


Figura 2. Gráfico dos componentes principais CP1 e CP2 na camada de 0,00-0,10 m contendo as variáveis: Resistência do solo à penetração (RP), densidade do solo (Ds), teor de argila, teor de areia, razão caulinita/(caulinita+gibbsita) (Ct/(Ct+Gb) e ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato (Fe_{DCB}).

Legenda: Escarificação localizada na linha (Esc Loc L), Escarificação localizada na entrelinha (Esc Loc EL), Escarificação em área total na linha (Esc At L), Escarificação em área total na entrelinha (Esc At EL).

Analisando a Tabela 4, na camada de 0,10-0,20 m observou-se que os componentes principais explicaram 81% da variabilidade total dos dados (CP1 66% e CP2 15 %). Nessa camada houve a formação de um processo em CP1 com a participação da RP, razão Ct/(Ct+Gb), Fe_{DCB}, teor de argila, teor de areia e Ds sendo essas variáveis as que apresentaram maiores poderes discriminantes (Tabela 4). A Ds e RP apresentaram correlação direta com Ct/(Ct+Gb) e teor de areia, porém, Ds e RP correlacionaram-se inversamente com teor de argila e Fe_{DCB}. Observando a figura 3 nota-se que RP, Ds, razão Ct/(Ct+Gb) e teor de areia se associaram a área I do presente estudo; observa-se também que não houve separação dessas variáveis quanto ao sistema de preparo do solo (escarificação localizada na linha de plantio e

escarificação em área total) indicando que o comportamento dessas variáveis não pode ser atribuído ao sistema de preparo do solo.

A área I do presente estudo apresentou maior razão $Ct/(Ct+Gb)$ (Tabela 1) resultando em maiores valores de RP e Ds. A correlação positiva entre caulinita e os atributos Ds e RP é decorrente da estrutura formada pela caulinita nos solos, pois, o arranjo face a face da caulinita promove a formação de uma estrutura em forma de blocos refletindo em solos mais compactos. Essa estrutura formada pela caulinita reflete em solos com maiores densidades e resistência à penetração quando comparados a solos oxídicos (EMERSON, 1959; RESENDE 1985). Ramos et al. (2015) ao estudarem a relação entre a mineralogia de diferentes horizontes e os atributos físicos encontraram em horizonte caulínítico maiores valores de Ds. Camargo, Marques Júnior e Pereira (2013) ao estudarem a mineralogia de um Argissolo encontraram correlação direta entre RP e razão $Ct/(Ct+Gb)$. Estudando um Latossolo Amarelo caulínítico, Silva, Barros e Vilas Boas (2006) encontraram neste solo maior adensamento em relação ao Latossolo Vermelho oxídico, e atribuíram esse adensamento à facilidade que a caulinita apresenta em se modelar quando submetida a altas pressões. Maiores valores de RP e Ds (5,12 MPa; 1,46 kg dm⁻³) foram encontrados na área com maior razão $Ct/(Ct+Gb)$ quando comparada a uma área com predomínio de gibbsita (4,31 MPa, 1,46 kg dm⁻³) (SOUZA, MARQUES JÚNIOR e PEREIRA et al., 2009). A correlação inversa entre Ds, RP e Fe_{DCB} é atribuída a estrutura granular que os óxidos de ferro conferem aos solos, pois essa estrutura favorece a formação de poros maiores refletindo em menores valores de Ds (Beutler et al., 2002) e consequentemente RP.

Ao analisar a influência dos minerais da fração argila no comportamento dos atributos físicos, Guidin et al. (2006b) observaram que o aumento nos teores de Fe_{DCB} foram acompanhados pela redução da Ds em um Latossolo Bruno ácrico. Botula et al. (2015) encontraram correlação negativa entre Fe_{DCB} e Ds em diferentes solos na região do Congo (Latosolo, Nitossolo, Argissolo, Neossolo). De acordo com esses autores o Fe_{DCB} influencia o desenvolvimento estrutural dos solos devido a sua ação cimentante por isso ele está intimamente relacionado ao comportamento da Ds. Camargo, Marques Júnior e Pereira (2013), ao estudarem a correlação espacial entre os minerais da fração argila de um Argissolo, encontraram correlação

correlação inversa com teor de argila e Fe_{DCB} porém observou-se uma correlação direta com o teor de areia.

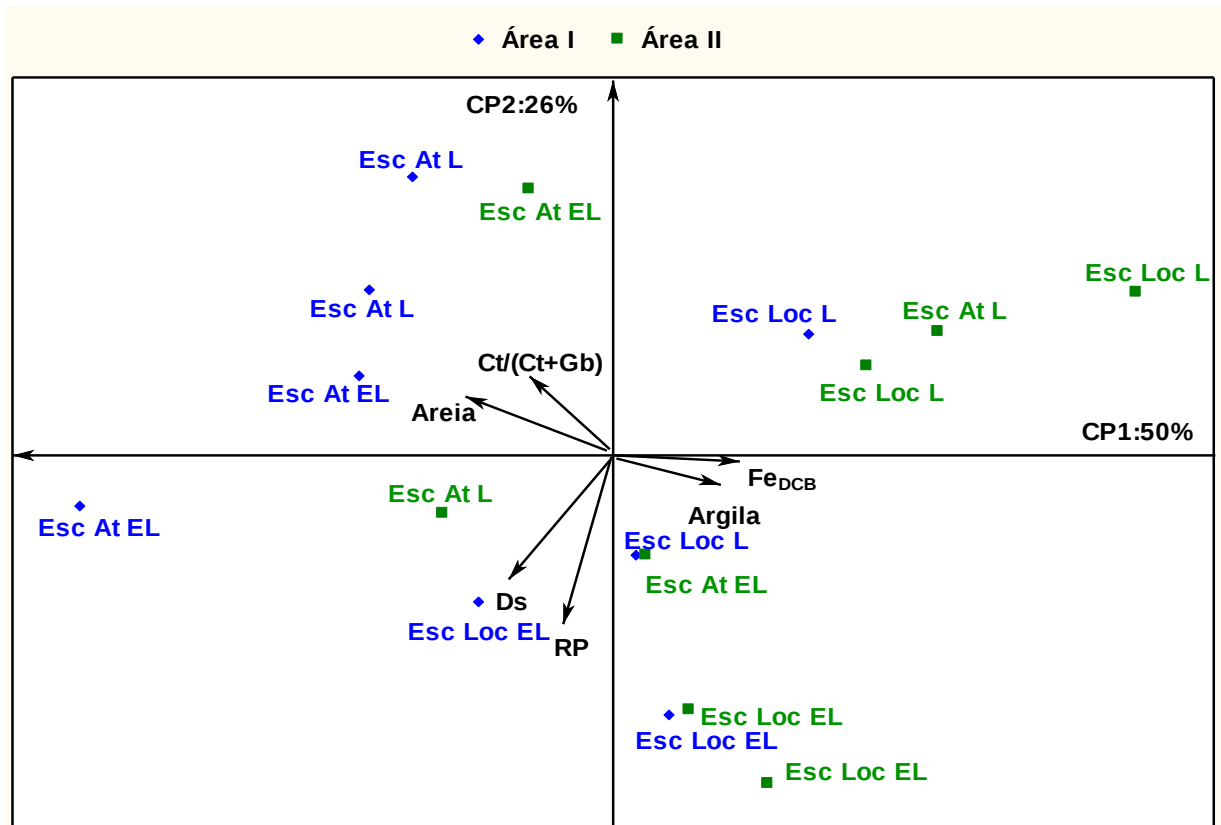


Figura 4. Gráfico dos componentes principais CP1 e CP2 na camada de 0,20-0,40 m contendo as variáveis: Resistência do solo à penetração (RP), densidade do solo (Ds), teor de argila, teor de areia, razão caulinita/(caulinita+gibbsita) ($Ct/(Ct+Gb)$) e ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato (Fe_{DCB}).

Legenda: Escarificação localizada na linha (Esc Loc L), Escarificação localizada na entrelinha (Esc Loc EL), Escarificação em área total na linha (Esc At L), Escarificação em área total na entrelinha (Esc At EL).

Na camada de 0,40-0,60 m, os componentes principais explicaram 72 % (CP1 52% e CP2 20%) da variabilidade do conjunto das variáveis (Tabela 6). Observou-se que no CP1 as variáveis mais discriminantes foram RP, Fe_{DCB}, teor de argila, teor de

areia e Ds. Houve a formação de um processo onde Ds, RP e teor de areia correlacionaram-se diretamente, contudo, RP e Ds correlacionaram-se inversamente com Fe_{DCB} . Na figura 5 é possível observar que RP, Ds e teor de areia estão associadas à área I (maior razão $Ct/(Ct+Gb)$ e menores teores de óxidos de ferro), dessa maneira a correlação direta encontrada para essas variáveis pode ser explicada pelas características encontradas nesse ambiente. Segundo Lepsh (2011) a areia apresenta pequena quantidade de cargas o que dificulta o processo de floculação acarretando a formação de solos com estrutura mais fraca. De acordo com Duiker et al. (2003) a fração areia apresenta uma área superficial menor e de baixa atividade quando comparada a fração argila. Dessa maneira, solos arenosos se desagregam mais facilmente ocasionando a redução do seu volume poroso e aumento da massa de sólidos nesse volume resultando no aumento da sua densidade e consequentemente aumento da sua resistência à penetração. Os menores teores de óxidos de ferro encontrados na área I também podem ter colaborado para uma estrutura mais fraca visto que estes óxidos bem como os óxidos de alumínio são considerados agentes cimentantes (Botula et al., 2015) e a sua presença promove a formação de solos mais estruturados. Segundo Bayer et al. (2001) o predomínio de caulinita e baixos teores de óxidos de ferro resultam na formação de uma estrutura fraca. Dessa maneira os maiores teores de areia em adição aos menores teores de óxidos de ferro propiciaram a formação de uma estrutura fraca que refletiu nos maiores valores de Ds e RP nessa camada. Estudos realizados por Luciano et al. (2012) demonstraram que solos com maior teor de areia (821 g kg^{-1}) apresentaram maiores valores de Ds ($1,4 \text{ g cm}^{-3}$) quando comparados a solos mais argilosos (teor de argila = 517 g kg^{-1} ; Ds = $0,8 \text{ g cm}^{-3}$). Stolf et al. (2011), verificaram que o aumento do teor de areia (655 g kg^{-1}) foi acompanhado pelo aumento nos valores de Ds ($1,85 \text{ Mg m}^{-3}$). Igualmente a camada anterior observou-se correlação inversa entre Ds, RP e Fe_{DCB} .

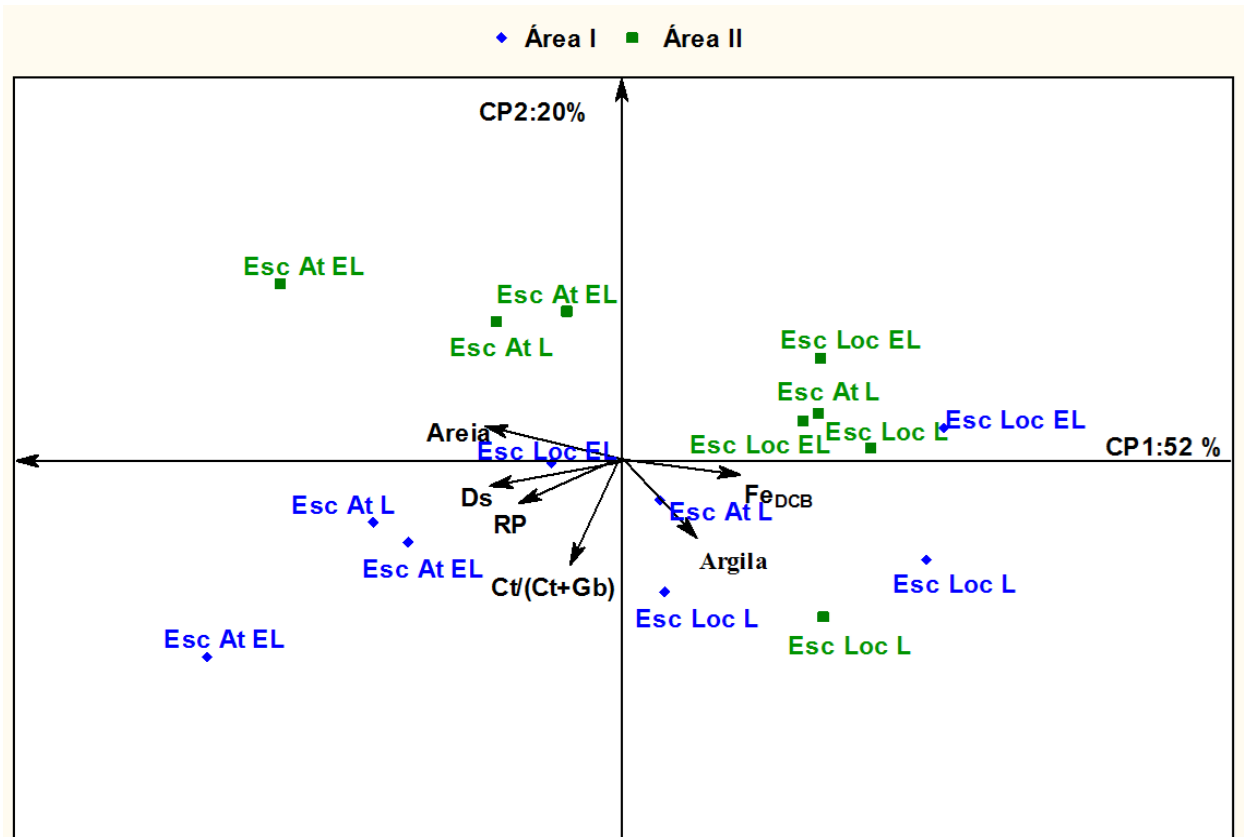


Figura 5. Gráfico dos componentes principais CP1 e CP2 na camada de 0,40-0,60 m contendo as variáveis: Resistência do solo à penetração (RP), densidade do solo (Ds), teor de argila, teor de areia, razão caulinita/(caulinita+gibbsita) ($Ct/(Ct+Gb)$) e ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato (Fe_{DCB}).

Legenda: Escarificação localizada na linha (Esc Loc L), Escarificação localizada na entrelinha (Esc Loc EL), Escarificação em área total na linha (Esc At L), Escarificação em área total na entrelinha (Esc At EL).

Os gráficos apresentados nas figuras 2, 3, 4 e 5 demonstraram que não houve uma separação entre as áreas com escarificação na linha de plantio e escarificação em área total, assim como para os locais de amostragem, na linha e na entrelinha de plantio, pois, nota-se que a separação das áreas foi atribuída às diferenças mineralógicas encontradas entre elas.

Os resultados apresentados demonstram que o comportamento dos atributos Ds e RP foram influenciados pela mineralogia das áreas não sendo, portanto influenciados pela escarificação do solo.

Os minerais da fração argila apresentam características que refletem as condições de formação do solo, não sofrendo assim interferência de ações

antrópicas. Os resultados apresentados no presente trabalho evidenciam que nem sempre as mudanças promovidas nos atributos físicos podem ser atribuídas exclusivamente ao manejo do solo, pois, neste trabalho essas alterações foram atribuídas à mineralogia da fração argila.

Dessa maneira a caracterização mineralógica dos solos deve ser adotada para o melhor entendimento do comportamento dos atributos físicos assim como na adoção de práticas agrícolas que visem à melhoria da condição física dos solos e consequentemente da sua qualidade.

Nesse contexto, a área I que apresentou maior razão $Ct/(Ct+Gb)$ necessita de um monitoramento mais frequente e adoção de práticas que visem à melhoria da sua qualidade física, visto que essa área já apresenta uma pré-disposição ao processo de compactação devido a sua mineralogia.

5. CONCLUSÕES

A mineralogia influenciou o comportamento da densidade do solo e resistência do solo à penetração.

A área com maior razão caulinita apresentou maior densidade do solo e maior resistência do solo à penetração.

A área com maiores teores de óxidos de ferro apresentou menor densidade do solo e menor resistência do solo à penetração.

O preparo do solo não influenciou o comportamento da densidade do solo e da resistência do solo à penetração.

6. REFERÊNCIAS

AJAYI, A. E.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURI N; GONTIJO I; ARAUJO JUNIOR, C. F.; VASCONCELOS JUNIOR, A. I. Relation of strength and mineralogical attributes in Brazilian latosols. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.102, p.14–18, 2009. doi:10.1016/j.still.2008.05.013.

ANTONELLO, L., L.; MOLLER, R., M., F.; MONIZ, A., C.; DURIEZ, M., A. **Mineralogia de argilas de horizontes B de Latossolos do Sudeste e Sul do Brasil**. Rio de Janeiro: Empresa Brasileira de pesquisa agropecuária – Serviço nacional de levantamento e Conservação de solos; 1983.

BAYER, C.; MARTIN NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PILLON, C., N, SANGOI, L. Changes in soil organic matter fractions under subtropical no-till cropping systems. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 65, n. 5, p.1473-1478, 2001.

BEUTLER, A., N.; CENTURION, J., F.; SOUZA, Z.,M.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C.,G. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n., p. 829-834, 2002.

BOTULA, Y., D.; NEMES, A.; RANST, E., V.; MAFUKA, P.; PUE, J.; CORNELIS, W., M. Hierarchical Pedotransfer Functions to Predict Bulk Density of Highly Weathered Soils in Central Africa. **Soil Science Society of America Journal**, Madison; v.79, p. 476-486, 2015. doi:10.2136/sssaj2014.06.0238.

BRITO, L., F.; SOUZA, Z., M.; MONTANARI, R; MARQUES JÚNIOR, J; CAZETTA DA; CALZAVARA, S., A.; OLIVEIRA, L. Influência de formas do relevo em atributos físicos de um Latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, p.1749-1755, 2006.

BUSSCHER, W., J.; BAUER, P., J.; CAMP, C., R.; SOJKA, R., E. Correction of cone index for soil water content differences in a Coastal Plain soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 43, p. 205-217, 1997. doi:10.1016/S0167-1987(97)00015-9.

CAMARGO, L., A.; MARQUES JÚNIOR, J; PEREIRA, G., T. Mineralogy of the clay fraction of alfisols in two slope curvatures. Iv - spatial correlation with physical properties. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 2, p. 307-316, 2013. doi: 10.1590/S0100-06832013000200002 .

CAMARGO, L., A.; MARQUES JÚNIOR, J; PEREIRA, G., T.; BAHIA, A., S., R., S. Clay mineralogy and magnetic susceptibility of Oxisols in geomorphic surfaces. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 71, n. 3, p. 244-256, 2014. doi: 10.1590/S0103-90162014000300010.

CAMARGO, L., A.; MARQUES JÚNIOR, J; PEREIRA, G., T.; HORVAT, R., A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas do relevo. II - correlação espacial entre mineralogia e agregado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2279-2288, 2008. doi: /10.1590/S0100-06832008000600007.

CAMARGO, O., A.; MONIZ, A., C.; JORGE, J., A.; VALADARES, J., M., A., S. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC. Campinas: **Instituto Agrônomo de Campinas**; 1986.

CENTURION, J., F.; FREDDI, O., S.; ARATANI, R., G.; METZNER, A., F., M.; BEUTLER, A., N.; ANDRIOLI, I. Influência do cultivo da cana-de-açúcar e da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos Vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p.199-209, 2007. doi: 10.1590/S0100-06832007000200002.

CLAESSEN, M., E., C. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997.

COELHO, M., R.; VIDAL-TORRADO, P. Caracterização e gênese de perfis plínticos desenvolvidos de arenito do grupo Bauru II – Mineralogia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 495-507, 2003. doi: 10.1590/S0100-06832003000300011.

CORRÊA, J., C. Efeito de sistemas de cultivo na estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho-Amarelo em Querência, MT. **Pesquisa Agropecuária**, Brasília, v. 37, n. 2, p. 203-209, 2002.

CORTEZ, L. A. **Subsolagem em profundidade variada com base no mapeamento de áreas de manejo específico**. 2013. 57 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal). Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2013.

DREES, L., R; WILDING, L., P.; SMECK, N., E. **Silica in soils: Quartz and disordered silica polymorphs**. 2. ed. Madison: Soil Science Society of America; 1989.

DUIKER, S. W.; RHOTON, F., E.; TORRENT, J.; SMECK, N., E.; LAL, R. Iron (hydr) oxide crystallinity effects on soil aggregation. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 67, p. 606–611, 2003.

EMERSON W., W. The structure of soil crumbs. **European Journal of Soil Science**, Grã Bretanha, v. 10, n. 2, p. 235-244, 1959.

FERREIRA, M., M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 507-514, 1999. doi: 10.1590/S0100-06831999000300003.

GHIDIN, A., A.; MELO, V., F.; LIMA, V., C.; LIMA, J., M., J., C. Topossequência de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. II – Relação entre mineralogia da fração argila e propriedades físicas dos solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 307-319, 2006b. doi: 10.1590/S0100-06832006000200011.

GHIDIN, A., A.; MELO, V., F.; LIMA, V., C.; LIMA, J., M., J. Topossequências de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. I – mineralogia da fração argila. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, b, v. 30, n. 2, p. 293-306, 2006a. doi: 10.1590/S0100-06832006000200010.

HAIR, J., F.; BLACK, W., C.; BABIN, B., J.; ANDERSON, R., E.; TATHAM, R., L. **Análise Multivariada de dados**. Porto Alegre, Bookman, 2009.

HILLEL, D. 1998. **Environmental soil physics**. Academic Press, San Diego. Instituto de pesquisas tecnológicas do estado de São Paulo, **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. Escala - 1:1.000.000. São Paulo. IPT, 1981. 94p.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo 1981**. São Paulo. 94p.

JACKSON, M., L. **Soil chemical analysis: advanced course**. Madison: University of Wisconsin, 1985.

LAMBE T., W.; WHITMAN, R., V. **Soil mechanics**, SI version. New York: John Wiley, 1979.

LEPSCH, IF. **19 lições de pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

LUCIANO, R., V.; ALBUQUERQUE, J., A.; COSTA, A; BATISTELLA, B.; WARMLING, M., T., R. Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 2, p.1733-1744, 2012. doi: 10.1590/S0100-06832012000600007.

MEHRA, O., P.; JACKSON, M., L. **Iron oxide removal from soils and clay by a dithionite citrate system bulfered with sodium bicarbonate**. Clays and Clay Minerals, New York, 1960, p. 317-327.

MELO, V., F.; WYPYCH, F. Caulinita e Halóisita. In _____ (Ed). **Química e Mineralogia do solo, Parte I conceitos básicos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p. 428-479.

MENON, M.; JIA, X; LAIR, G., J.; FARAJ, P., H.; BLAUD, A. Analysing the impact of compaction of soil aggregates using X-ray microtomography and water flow simulations. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 150, p. 147–157, 2015. doi: /10.1016/j.still.2015.02.004

MOREAU, A., M., S., S; KER, J., C; COSTA, L., M; GOMES, F., H. Caracterização de solos de duas topossequências em tabuleiros costeiros do sul da Bahia. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, vol. 30, nº. 6, p.1007-1019, 2006. doi: 10.1590/S0100-06832006000600010.

NETO, L., F., S.; INDA, A., V.; BAYER, C.; DICK, D., P.; TONIN, A., T. Óxidos de ferro em Latossolo tropicais e subtropicais brasileiros em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p.1873-1881, 2008. doi: 10.1590/S0100-06832008000500008.

PRAGANA, R., B.; RIBEIRO, M., R.; NÓBREGA, J., C., A.; RIBEIRO FILHO, M., R.; DA COSTA, J., A. Qualidade física de Latossolos Amarelos sob plantio direto na região do Cerrado piauiense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 5, p.1591-600, 2012. doi: 10.1590/S010006832012000500023.

RAMOS, M., R.; MELO, V., F.; UHLMANN, A; DEDECEK, R., A.; CURCIO, G., R. Clay mineralogy and genesis of fragipan in soils from Southeast Brazil. **Catena**, Cremlingen, v. 135, n. p.22–28, 2015. doi: 10.1016/j.catena.2015.06.016.

RESENDE, M. **Aplicações de conhecimentos pedológicos à conservação de solos**. Informativo Agropecuário. 1985; p. 3-18.

RESENDE, M; CURI, N; REZENDE, S., B; CORRÊA, G., F. **Pedologia: Base para distinção de ambientes**. Viçosa: NEPUT; 1997.

REYNOLDS, W., D.; BOWMAN, B., T.; BRURY, C., F.; TAN, C., S.; LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, Amsterdam, v. 110, p. 131-146, 2002.

RICHART, A; TAVARES FILHO, J; OSMAR RODRIGUES BRITO, OR; LLANILLO, RF; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. Semina: **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005.

SANTI, L., A; AMADO, T., J., C.; MAURÍCIO ROBERTO CHERUBIN MR; MARTIN, T., N.; PIRES, J., L.; FLORA, L., P., D.; BASSO, C., J. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. **Pesquisa agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 9, p.1346-1357, 2012.

SANTOS, A., C.; PEREIRA, M., G.; ANJOS, L., H., C.; BERNINI, T., A.; COOPER, M; NUMMER, A., R.; FRANCELINO, M., R. Gênese e classificação de solos numa topossequência no ambiente de mar de morros do médio Vale do Paraíba do sul, RJ. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 4, p.1297-1314, 2010. doi: 10.1590/S0100-06832010000400027.

SANTOS, H., G; JACOMINE, P., K.; ANJOS, L., H., C.; OLIVEIRA, V., A.; LUMBRERAS, J., F.; COELHO, M., R.; ALMEIDA, J., A.; CUNHA, T., J., F.; OLIVEIRA, J., B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. Brasília. DF: Embrapa, 2013.

SILVA, S., R.; BARROS, N., F.; VILAS BOAS, J., E., B. Crescimento e nutrição de eucalipto em resposta à compactação de Latossolos com diferentes umidades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 5, p. 759-768, 2006. doi: 10.1590/S0100-06832006000500001.

SOUZA, Z., M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G., T. Spatial variability of the physical and mineralogical properties of the soil from the areas with variation in landscape shapes. **Brazilian Archives Biology and Technology**, Curitiba, v. 52, n. 2, p. 305-316, 2009. doi: 10.1590/S1516-89132009000200007.

SPARKS, L., D., 1995. Environmental Soil Chemistry. Academic Press Inc., San Diego, CA, 267 pp.

STOLF, R.; THURLER, A., M.; BACCHI, O., O., S.; REICHARD, T., K. Method to estimate soil macroporosity and microporosity based on sand content and bulk density . **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 447-459, 2011. doi: 10.1590/S0100-06832011000200014.

TORMENA, C., A; BARBOSA, M., C; COSTA, A., C., S.; GONÇALVES, A., C., A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 4, p. 795-801, 2002.

TORMENA, C., A; SILVA, A., P; LIBARDI, P., L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, a, v. 22, n. 4, p. 573-581, 1998.

WANG, J., G.; YANG, W.; YU, B.; LI, Z., X.; CAI, C., F.; MA, R., M. Estimating the influence of related soil properties on macro- and micro-aggregate stability in Ultisols of south-central China. **Catena**, Cremlingen, v. 137, p. 545–553, 2016. doi:10.1016/j.catena.2015.11.001.

WU, X.; CAI, C.; WANG, J.; WEI, Y.; WANG, S. Spatial variations of aggregate stability in relation to sesquioxides for zonal soils, South-central China. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.157, p. 11–22, 2016. doi: .still.2015.11.005.

ZONTA, E.; BRASIL, F.; GOI, S., R.; ROSA, M., M., T. **O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2006.