



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA
E AMBIENTE.



THIAGO ANTONIO BASSO DO PRADO

IMPACTOS DO MANEJO AGRÍCOLA EM PERFIS DE
LATOSSOLOS E NOS AMBIENTES DE PRODUÇÃO DE
CANA-DE-AÇÚCAR

Março/2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA
E AMBIENTE.



Thiago Antonio Basso do Prado

IMPACTOS DO MANEJO AGRÍCOLA EM PERFIS DE
LATOSSOLOS E NOS AMBIENTES DE PRODUÇÃO
DE CANA-DE-AÇÚCAR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agricultura e Ambiente da UFSCar-CCA para obtenção do título de Mestre em Agricultura e Ambiente.

Orientação: Prof. Dr. Marcio Roberto Soares
Co-orientação: Dr. André César Vitti

Março/2019

Prado, Thiago Antonio Basso do

IMPACTOS DO MANEJO AGRÍCOLA EM PERFIS DE LATOSSOLOS
E NOS AMBIENTES DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR / Thiago
Antonio Basso do Prado. -- 2019.

112 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus
Araras, Araras

Orientador: Orientador: Prof. Dr. Marcio Roberto Soares, Co-orientador:
Dr. André César Vitti

Banca examinadora: Marcio Roberto Soares, José Carlos Casagrande,
Estêvão Vicari Mellis, André César Vitti

Bibliografia

1. Manejo agrícola. 2. Solos. 3. Cana-de-açúcar. I. Orientador. II.
Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

Bibliotecário(a) Responsável: Maria Helena Sachi do Amaral – CRB/8 7083




UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

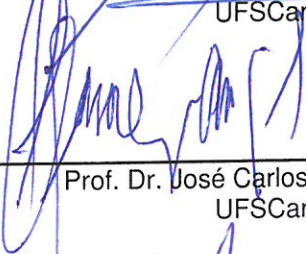
Centro de Ciências Agrárias
Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Thiago Antonio Basso do Prado, realizada em 28/02/2019:



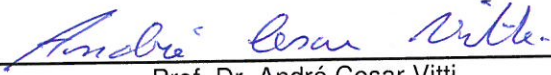
Prof. Dr. Marcio Roberto Soares
UFSCar



Prof. Dr. José Carlos Casagrande
UFSCar



Prof. Dr. Estevão Vicari Mellis
IAC



Prof. Dr. André Cesar Vitti
APTA

Dedico este trabalho ao meu filho Lorenzo, minha esposa Camila, meus pais Hélio e Cleide, minha irmã Thais, meu irmão Hélio e aos meus avós Alceu e Elide.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre me abençoar, iluminar e encher de graças, em cada passo do meu dia-a-dia.

Agradeço a todos da minha amada e especial família, em especial aos meu filho Lorenzo, minha esposa Camila, meus pais Hélio e Cleide, meus irmãos Thaís e Hélio e meus avós Alceu e Elide que são minhas fontes de inspiração e, que além de inspiração, me dão forças e vontade de buscar sempre mais. Sem vocês essa conquista não seria possível. Por isso vos dedico minha eterna gratidão!

Agradeço a meu orientador Prof. Dr. Marcio Roberto Soares e co-orientador Dr André César Vitti, por me conduzirem nessa pesquisa da melhor forma possível, contribuindo com meu crescimento como pessoa e profissional, tornando-se fonte de inspiração profissional e pessoal.

Agradeço ao produtor Paulo de Araújo Rodrigues e funcionários das Fazendas Santa Izabel e Morumbi pela oportunidade de desenvolver esse estudo, bem como, disponibilizar todas as informações solicitadas.

Agradeço também as pessoas que contribuíram de forma direta para o desenvolvimento desse trabalho, em especial, Prof. Dr. José Calos Casagrande, Profa. Dra. Priscilla Loiola, e ao especialista em geoprocessamento do IAC, João Paulo de Carvalho, que contribuíram significativamente para a melhoria na qualidade desse trabalho; aos meus companheiros de mestrado, em especial Ana Lúcia, Juliana, e aos meus irmãos que a vida me deu na República Toca.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente e ao Centro de Ciências Agrárias por acreditar no meu trabalho e por todo suporte dado para o desenvolvimento desse mestrado.

Agradeço por fim a CAPES, pelo suporte financeiro dado durante todo esse tempo. O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“O conhecimento entre as pessoas
cada vez mais deve ser
compartilhado.”

Hélio do Prado

RESUMO

O manejo influencia os atributos químicos do solo e a produtividade agrícola. Essas mudanças levariam à construção da fertilidade do solo e afetariam os parâmetros químicos pedológicos de subsuperfície, a ponto de implicar mudanças da classificação pedológica e potencial produtivo de cana-de-açúcar? A hipótese deste trabalho é que o aprimoramento do manejo provoque alterações nos padrões de fertilidade do solo, inicialmente na camada arável em um curto prazo de tempo, e, posteriormente atinjam a subsuperfície do solo, possibilitando a construção da fertilidade do perfil do solo e aumento de produtividade. O objetivo geral desse trabalho foi avaliar o impacto do manejo agrícola sobre os padrões de produtividade de cana-de-açúcar, nas Fazendas Santa Izabel (melhor ambiente de produção) e Morumbi (ambiente de produção inferior), no período de 1993 a 2018. Para o levantamento de informações das áreas utilizou-se o método da entrevista qualitativa pré-estruturada aplicada ao proprietário e à equipe de gestão das fazendas. Diferentes fases do manejo da cultura da cana-de-açúcar foram identificadas a partir de práticas agronômicas consideradas determinantes para alterações da produtividade. A distinção de fases permitiu o cálculo da produtividade média das fazendas e sua interpretação estatística a partir do número de safras contido em cada fase. Os resultados de produtividade de cada fase e valores médios de Ca, Mg, K, H+Al, Al, SB, CTC_t, V(%), m(%), pH em CaCl₂, P_{RES} e M.O da camada arável foram examinados por gráficos do tipo box-plot e submetidos à análise de variância e, quando significativos pelo teste F ($p < 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Na Fase III de manejo, a produtividade da Fazenda Morumbi foi semelhante à da Fazenda Santa Izabel. Observaram-se mudanças na classificação pedológica de solos em cinco dos 17 pontos analisados na Fazenda Morumbi. Os atributos químicos CTC (Santa Izabel), soma de bases (Santa Izabel) e magnésio (Morumbi e Santa Izabel), na profundidade 0-20cm, atingiram o nível crítico, promovendo a construção da fertilidade do solo. Os manejos quanto as épocas de corte e alocação varietal, juntamente com a melhoria dos ambientes de produção foram os principais fatores que contribuíram para o acréscimo de produtividade das Fazendas Morumbi e Santa Izabel.

Palavras-chaves: *Saccharum* sp.; potencial produtivo; histórico de manejo.

ABSTRACT

The agricultural management influences soil chemical attributes and sugarcane productivity. Are the changes enough to affect the soil fertility and the soil chemicals pedologic parameters to implies changes in the pedologic classification and in the productive potential of sugarcane? It was proposed that the management improvement results alterations in soil fertility patterns, starting at surface layer in a short term and then reached to subsurface. The management improvement can make possible begin the soil fertility and increase the productivity. This study evaluated the agricultural management impact on sugarcane productivity patterns at Santa Izabel farm (better production environment) and Morumbi farm (worst production environment) from 1993 to 2018. To get informations about the farms, the pre-structured qualitative interview method was applied to the owner's farms. Many sugarcane management phases were identified from agronomic practices considered determinants for productivity changes. Different phases allowed the calculation of the average farms productivity and their statistical interpretations from the numbers of harvest in each phase. The results of productivity in each case and average values of Ca, Mg, K, H+Al, Al, SB, CTC, V(%), m(%), ph in CaCl₂, PRES and M.O. from arable layer were examined by graphics as box-plot and submitted to variance analysis. When they were significant by F test ($p < 0,05$), the means were compared by Tukey's test ($p < 0,05$). The productivity at Morumbi and Santa Izabel farms were similar during the III management phase. Were recognized changes in soil pedologic classification in 5 of 17 points analyzed at Morumbi farm. Chemical attributes at depth 0-20 cm as CTC (Santa Izabel), SB (Santa Izabel) and Mg (Morumbi and Santa Izabel) got critical level. starting the soil fertility. The main factors that contributed to increase productivity at Morumbi and Santa Izabel farms were season harvest and varietal allocation managements together with production environments improvements.

Key words: *Saccharum* sp.; productive potential; management history.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. HIPÓTESE E OBJETIVOS	3
2.1. Hipótese	3
2.2. Objetivos gerais.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. Cana-de-açúcar	4
3.1.1. Classificação botânica e anatomia da cana-de-açúcar	4
3.1.2. Aspectos sócio-econômicos atuais da cultura da cana-de-açúcar no Brasil.....	4
3.2. Evolução do manejo agrícola e sua influência na produtividade da cana-de-açúcar.....	5
3.3. Ambientes de produção de cana-de-açúcar	12
3.4. Variação espacial e temporal da fertilidade superficial e subsuperficial do solo	16
4. MATERIAL E MÉTODOS	23
4.1. Caracterização das áreas de estudo.....	23
4.1.1. Clima.....	23
4.1.2. Solo.....	27
4.1.2.1. Avaliação das alterações da fertilidade da camada arável do	46
4.2. Levantamento do histórico do manejo das áreas de cultivo com cana-de-açúcar	47
4.2.1. Divisão da produtividade em Fases de manejo	49
4.3. Forma de análise dos resultados	51
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1. Histórico resumido do manejo das áreas cultivadas com cana-de-açúcar.....	52
5.2. Adversidades climáticas	55
5.3. Histórico de produtividade de cana-de-açúcar	58
5.4. Manejo varietal e época de colheita da cana-de-açúcar	66
5.5. Influência do manejo sobre os padrões pedológicos de subsuperfície	72
5.6. Influência do manejo nos ambientes de produção	82
5.7. Alteração dos padrões de fertilidade da camada arável do solo.....	89
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	102
7. CONCLUSÕES.....	104
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
9. ANEXOS	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área plantada e produtividade de cana-de-açúcar no Brasil, no período de 1981 à 2016.....	5
Figura 2. Produtividade de cana-de-açúcar, em tonelada de cana por hectare, na média de 5 cortes, em ambientes favoráveis, médios e desfavoráveis.....	10
Figura 3. Ilustração demonstrativa do potencial produtivo de um ambiente colhido no início de safra (abril a 15 de junho), meio de safra (16 de junho a 15 de setembro) e final de safra (a partir de 16 de setembro), considerando a classificação de PRADO (2016).....	14
Figura 4. Teores de nutrientes no solo como critério para definir a construção (C), a manutenção (M) ou a reposição da fertilidade; o limite superior do intervalo interpretado como “médio” corresponde ao nível crítico, que deve ser alcançado na construção da fertilidade.....	18
Figura 5. Representação ilustrativa da tendência de distribuição do sistema radicular em função das condições químicas em subsuperfície (80 a 100 cm).....	19
Figura 6. Produtividade agrícola média ($t\ ha^{-1}\ dia^{-1}$) de três ciclos de cana-de-açúcar, obtida a partir de ensaios em diferentes classes de fertilidade subsuperficial de solo.....	21
Figura 7. Comparativo do balanço hídrico mensal entre Guariba-SP e Jaboticabal-SP, para capacidades de água disponível (CAD) de 30, 50 e 100 mm com dados médios de 30 anos.....	25
Figura 8. Mapas de declividade (superiores) e de modelo digital de elevação (inferiores) das Fazendas Santa Izabel e Morumbi.....	28
Figura 9. Ilustração dos pontos de amostragem de solos coletados no ano de 1993 nas Fazendas Morumbi e Santa Izabel.....	33
Figura 10. Ilustração dos limites das Fazendas Morumbi e Santa Izabel inseridos no programa ARCGIS, utilizando imagens de satélite do CBERS4_2017 coletada no dia 12/10/2017.....	38
Figura 11. Ilustração dos mapas, com as localizações dos pontos amostrados em 1993 nas Fazendas Morumbi e Santa Izabel, inseridos no programa ARCGIS.....	39
Figura 12. Ilustração da sobreposição dos mapas, com observações feitas em 1993, nos respectivos limites (coloração vermelha) das Fazendas Morumbi e Santa Izabel, inseridos no programa ARCGIS.....	40
Figura 13. Ilustração da sobreposição dos mapas, com observações feitas em 1993, nos respectivos limites (coloração vermelha) das Fazendas Morumbi e Santa Izabel, e a demarcação dos pontos de amostragem no programa ARCGIS.....	41
Figura 14. Ilustração da representatividade e da localização da área estudada nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi.....	42
Figura 15. Gráfico boxplot dos valores médios de precipitação mensal da Fazenda Morumbi no período de 1990 a 2017; ○ - valores anômalos (outliers).....	55
Figura 16. Comparativo da precipitação média mensal normal (mm) de 1990 a 2017 (coloração amarela) com a precipitação média mensal (mm) dos anos de 1993 (esq.) e 1994 (dir.).....	56
Figura 17. Comparativo da precipitação média mensal normal (mm) de 1990 a 2017 (coloração amarela) com a precipitação média mensal (mm) do ano de 1999.....	57
Figura 18. Comparativo da precipitação média mensal normal (mm) de 1990 a 2017 (coloração amarela) com a precipitação média mensal (mm) do ano de 2013.....	58
Figura 19. Produtividade de cana-de-açúcar das Fazendas Santa Izabel e Morumbi em Fases distintas do manejo da cultura durante o período de 1990 a 2018.....	59

Figura 20. Gráfico boxplot da produtividade de cana-de-açúcar nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi em diferentes Fases de manejo da cultura; ○ - valores anômalos (outliers).....	60
Figura 21. Gráfico boxplot da produtividade de cana-de-açúcar nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi em diferentes fases de manejo da cultura, após a exclusão de valores anômalos de produtividade associados a atipicidades climáticas.....	62
Figura 22. Mapas de solos da área avaliada nas Fazendas Morumbi (esq.) e Santa Izabel (dir.), em 1993 (superior) e em 2018 (inferiores), segundo critérios de SiBCs (2018) e Prado (2016).....	76
Figura 23. Mapas de ambientes de produção dinâmico de 1993 e 2018 para colheitas feitas no início (abril a 15 de junho), meio (16 de junho a 15 de setembro) e final de safra (a partir de 16 de setembro), das Fazendas Morumbi (superior) e Santa Izabel (inferior), segundo a classificação de PRADO (2016), utilizando os mapas de solos feitos pelo critério de SiBCS (2018).....	88
Figura 24. Gráfico boxplot dos teores médios de alumínio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), cálcio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), CTC ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), fósforo (mg dm^{-3}), Acidez potencial - H+Al ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), Saturação por alumínio – m (%), magnésio($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), matéria orgânica (g dm^{-3}), pH em CaCl_2 , potássio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), SB ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) e Saturação de bases – V (%) mensurados de 1994 a 2018, nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi para as diferentes Fases de manejo da cultura; o - valores anômalos (outliers).....	91
Figura 25. Gráfico boxplot dos teores médios de alumínio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), cálcio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), CTC ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), fósforo (mg dm^{-3}), Acidez potencial - H+Al ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), Saturação por alumínio – m (%), magnésio($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), matéria orgânica (g dm^{-3}), pH em CaCl_2 , potássio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), SB ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) e Saturação de bases – V (%) mensurados de 1994 a 2018, nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi para as diferentes Fases de manejo da cultura; após a exclusão dos outliers.....	92
Figura 26. Classificação dos teores médios de acidez potencial – H+Al ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), alumínio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) e saturação por alumínio – m (%), mensurados na profundidade 0-20 cm nas Fazendas Morumbi e Santa Izabel desde 1994 a 2018.....	97
Figura 27. Classificação dos teores médios de fósforo (mg dm^{-3}), pH em CaCl_2 e saturação de bases – V (%), mensurados na profundidade 0-20 cm nas Fazendas Morumbi e Santa Izabel desde 1994 a 2018.....	98
Figura 28. Classificação dos teores médios de cálcio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), CTC ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) e soma de bases – SB ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), mensurados na profundidade 0-20 cm nas Fazendas Morumbi e Santa Izabel desde 1994 a 2018.....	99
Figura 29. Classificação dos teores médios de potássio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), magnésio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) e matéria orgânica (g dm^{-3}), mensurados na profundidade 0-20 cm nas Fazendas Morumbi e Santa Izabel desde 1994 a 2018.....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Indicação de alocação de cultivares de cana-de-açúcar, em função dos ambientes de produção, perfis de respostas das variedades aos diversos ambientes de produção e a época de colheita (baseado na rede experimental do IAC).	11
Tabela 2. Valores médios mensais de temperatura, de precipitação e de balanço hídrico dos municípios de Guariba-SP e de Jaboticabal-SP, coletados no período de 1988 a 2018.	24
Tabela 3. Correlação entre as nomenclaturas de solos utilizadas em 1993 (CAMARGO et al., 1987) e em 2018 (SiBCS, 2018).	32
Tabela 4. Comparação de critérios de interpretação de atributos químicos de amostras de solo de subsuperfície, estabelecidos por SiBCS (2018) e por Prado (2016).	43
Tabela 5. Critérios de classificação dos atributos químicos utilizados para a avaliação da fertilidade do solo.	47
Tabela 6. Práticas de manejo utilizadas no cultivo da cana-de-açúcar nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi durante o período de 1993 a 2018.	54
Tabela 7. Produtividade de cana-de-açúcar em toneladas de colmo por hectare (TCH) em diferentes fases de manejo das Fazendas Santa Izabel e Morumbi no período de 1990 a 2018.	61
Tabela 8. Análise de variância (ANOVA) de produtividade de cana-de-açúcar das Fazendas Santa Izabel e Morumbi, no período de 1993 a 2018.	64
Tabela 9. Produtividade de cana-de-açúcar das Fazendas Santa Izabel e Morumbi, no período de 1993 a 2018, em diferentes Fases de manejo da cultura.	65
Tabela 10. Análise de variância (ANOVA) de produtividade de cana-de-açúcar das Fazendas Santa Izabel e Morumbi, no período de 1993 a 2018, em diferentes Fases de manejo agrícola.	66
Tabela 11. Manejo e percentual de ocorrência das principais variedades de cana-de-açúcar plantadas de 1994 a 2018 nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi.	68
Tabela 12. Percentual de área colhida em função da época de corte (Início, Meio e Final de safra), entre os anos 1994 a 2018, nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi.	70
Tabela 13. Aplicação da matriz em função das épocas de colheita e os ambientes influenciando a produtividade de colmos.	72
Tabela 14. Classificação conforme atributos químicos subsuperficiais de amostras de solo coletadas em 1993 e em 2018, segundo os critérios estabelecidos por SiBCS (2018) e por PRADO (2016), referentes aos pontos que sofreram modificações pedológicas.	73
Tabela 15. Área de ocorrência dos tipos de solos classificados por SiBCS (2018) e PRADO (2016) nas Fazendas Morumbi e Santa Izabel em 1993 e 2018.	77
Tabela 16. Valores médios, máximo, mínimo e desvio padrão das amostras de solo coletadas em 1993 e em 2018 nas camadas superficiais (0-25, 25-50 cm) nas Fazendas Morumbi e Santa Izabel.	78
Tabela 17. Valores médios, máximo, mínimo e desvio padrão das amostras de solo coletadas em 1993 e em 2018 na camada subsuperficial (80-100 cm) nas fazendas Morumbi e Santa Izabel.	79
Tabela 18. Valores médios, máximos e mínimos encontrados nas profundidades 0-20 e 80-100 cm para os Latossolos argilosos eutróficos, distrófico e ácrico, classificados no levantamento pedológico da quadrícula de Ribeirão Preto-SP por OLIVEIRA; PRADO (1987).	80
Tabela 19. Ambientes de produção dinâmico das Fazendas Morumbi e Santa Izabel em 1993 e 2018 e os potenciais produtivos (TCH _s), para colheitas realizadas no início (abril a 15 de junho), meio (16 de junho a 15 de setembro) e final de safra (a partir de 16 de setembro).	83
Tabela 20. Produtividade esperada das Fazendas Morumbi e Santa Izabel em 1993 e 2018, para colheitas realizadas exclusivamente no início (abril a 15 de junho), meio (16 de junho a 15 de	

setembro) ou final de safra (a partir de 16 de setembro), em função do tipo de solo, ambientes de produção e sua área de ocorrência (%).	84
Tabela 21. Produtividade esperada para as Fases 1 (Safras 90/91 a 95/96), 2 (Safras 96/97 a 06/07) e 3 (Safras 07/08 a 18/19) das Fazendas Morumbi e Santa Izabel em 1993 e 2018, em função das épocas de corte.	85
Tabela 22. Comparativo entre as produtividades média real e esperada, bem como os respectivos ambientes de produção, das fazendas Morumbi e Santa Izabel nas Fases I (predomínio dos solos classificados em 1993) e III (predomínio dos solos classificados em 2018).	86
Tabela 23. Valores médios, máximo e mínimo dos atributos químicos analisados em amostras de solo da camada arável coletadas nas Fazendas Morumbi e Santa Izabel entre os anos 1994 e 2018, para as Fases de manejo I, II e III.	89
Tabela 24. Análise de variância (ANOVA) dos teores médios de alumínio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), cálcio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), CTC ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), fósforo (mg dm^{-3}), Acidez potencial - H+Al ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), Saturação por alumínio – m (%), magnésio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), matéria orgânica (g dm^{-3}), pH em CaCl_2 , potássio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), SB ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) e Saturação de bases – V (%) mensurados de 1994 a 2018, nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi para as diferentes Fases de manejo da cultura.....	93
Tabela 25. Efeito dos Fatores “Fazendas” e “Fases de manejo” nos teores médios de alumínio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), fósforo (mg dm^{-3}), Acidez potencial - H+Al ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), magnésio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), matéria orgânica (g dm^{-3}), pH em CaCl_2 , potássio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), e Saturação de bases – V (%) mensurados de 1994 a 2018.....	94
Tabela 26. Análise de variância (ANOVA) da interação entre os Fatores “Fazenda” e “Fases” para os teores médios de cálcio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), CTC ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), Saturação por alumínio – m (%) e soma de bases ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) mensurados de 1994 a 2018.	94
Tabela 27. Efeito dos Fatores “Fazendas” e “Fases de manejo” nos teores médios de cálcio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), CTC ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), Saturação por alumínio – m (%) e Soma de bases ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), mensurados de 1994 a 2018.....	95

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Descrição geral e morfológica feita no Latossolo eutrófico da Fazenda Santa Izabel, em 1993, segundo CAMARGO et al. (1987).....	30
Quadro 2. Descrição geral e morfológica feita no Latossolo ácrico da Fazenda Morumbi, em 1993, segundo CAMARGO et al. (1987).....	31

ANEXOS

Anexo 1. Dados pluviométricos registrados nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi.	109
Anexo 2. Análise química realizada em 1993 na Fazenda Santa Izabel.....	110
Anexo 3. Análise química realizada em 1993 na Fazenda Morumbi.....	112
Anexo 4. Análise química realizada em 2018 na Fazenda Santa Izabel.....	114
Anexo 5. Análise química realizada em 2018 na Fazenda Morumbi.....	116
Anexo 6. Gráfico boxplot dos teores médios de Al, Ca, CTC, P, H+Al e m, mensurados de 1994 a 2018, nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi para as diferentes Fases de manejo da cultura; o - valores anômalos (outliers).....	118
Anexo 7. Gráfico boxplot dos teores médios de Mg, M.O., pH, K, SB e V mensurados de 1994 a 2018, nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi para as diferentes Fases de manejo da cultura; o - valores anômalos (outliers).	119
Anexo 8. Gráfico boxplot dos teores médios de Al, Ca, CTC, P, H+Al e m, mensurados de 1994 a 2018, nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi para as diferentes Fases de manejo da cultura; após a exclusão dos outliers.	120
Anexo 9. Gráfico boxplot dos teores médios de Mg, M.O., pH, K, SB e V mensurados de 1994 a 2018, nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi para as diferentes Fases de manejo da cultura; após a exclusão dos outliers.	121

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas cultivadas no Brasil, principalmente na região Sudeste (CONAB, 2018). Embora o país seja considerado referência mundial em pesquisas e inovações agrícolas, os canaviais apresentam produtividade aquém do seu potencial produtivo (UNICA, 2018).

As variáveis que afetam a produtividade estão ligadas aos fatores clima, planta e solo e atuam de forma simultânea no ambiente.

Segundo VASCONCELOS; GARCIA (2005), dentre os fatores do solo, os atributos físicos e químicos se destacam na influência da produtividade, pois interferem no desenvolvimento radicular das culturas. A densidade do solo e água disponível são os principais representantes dos atributos físicos, e os teores de saturação por bases (V%) e por alumínio (m%), os fatores químicos que influenciam o sistema radicular.

Em relação aos atributos químicos do solo, normalmente é considerado que o desempenho da cana-de-açúcar é afetado apenas pela fertilidade na camada arável (0-40 cm de profundidade), uma vez que a cultura apresenta mais de 70% do sistema radicular nessa camada (OTTO et al., 2009). Porém, por se tratar de uma cultura semi-perene, o potencial de crescimento radicular da cana-de-açúcar permite a exploração de camadas mais profundas do solo, desde que o solo não esteja compactado (impedimento físico) e nem com alta saturação de alumínio (impedimento químico), sendo também imprescindível a conciliação das características de fertilidade subsuperficial com os atributos pedológicos do solo, como a (PRADO, 2016). Como consequência do maior desenvolvimento radicular em profundidade, a capacidade de água disponível (CAD) aumenta, o que favorece a produtividade da cultura.

A análise pedológica do perfil de solo contempla condições morfológicas (textura, estrutura, consistência, profundidade), químicas (soma de bases, capacidade de troca de cátions (CTC), V%, m%, retenção de cátions, CTC da fração argila) e mineralógicas (tipo de mineral de argila) do horizonte subsuperficial, geralmente na profundidade de 80 a 100 cm nos solos muito profundos, pois é admitido que nessa profundidade dificilmente ocorre ação antrópica, na qual o material de origem do solo é o principal responsável pela sua condição química.

Inicialmente, pedólogos relacionaram as características químicas, físicas e hídricas do solo com o potencial produtivo dos canaviais, conhecidos como ambientes de produção de cana-de-açúcar. Com o tempo outros fatores do manejo agrícola passaram a ser considerados por diversas linhas de pesquisa, como as condições climáticas locais, que eram determinantes para a produtividade dos canaviais (JOAQUIM, 1994; PRADO, 2016). Mais recentemente, outros fatores determinantes do manejo agrícola têm sido admitidos na determinação do potencial produtivo da cana-de-açúcar, tais como a alocação varietal e a ocorrência de deficiência hídrica ao longo da safra, surgindo o conceito de ambientes de produção dinâmico, que leva em consideração o potencial produtivo em função da época de corte (PRADO, 2016).

O conceito de ambientes de produção determina o potencial produtivo da cultura, que por sua vez pode ser alterado, por condições climáticas atípicas, ou aprimorado, pela adoção de técnicas de manejo que favorecem a produtividade. O manejo agrícola contribui de forma direta no aumento da produtividade da cana-de-açúcar, por meio de técnicas de preparo de solo, de plantio, de colheita, de manutenção e ampliação da fertilidade do solo, da alocação varietal correta e da otimização da época de colheita, proporcionando melhorias nas condições químicas (uso de adubos e corretivos) e físicas (práticas que mitigam o efeito danoso da compactação e erosão) do solo. Essas melhorias ocorrem já no curto prazo apenas na camada 0-40 cm.

Embora existam muitos trabalhos que confirmem a influência do manejo agrícola na produtividade da cana-de-açúcar e nos atributos químicos do solo, algumas dúvidas ainda permanecem, tais como: (i) as mudanças influenciadas pelo manejo afetariam os parâmetros químicos pedológicos de subsuperfície? (ii) O manejo implicaria na mudança da classificação pedológica e dos ambientes de produção de cana-de-açúcar? (iii) Quanto tempo é necessário para que essas mudanças na fertilidade da camada arável e subsuperficial sejam observadas, em função do aporte de insumos?

2. HIPÓTESE E OBJETIVOS

2.1. Hipótese

A hipótese deste trabalho é que o aprimoramento do manejo agrícola provoque alterações nos padrões de fertilidade do solo, ocorrendo inicialmente mudanças apenas na camada arável em um curto prazo de tempo, e, com o passar do anos as modificações atinjam a subsuperfície do solo, possibilitando a construção da fertilidade do perfil maior do solo. Essa melhoria associada com os conceitos de ambientes de produção, resulte no aumento do sistema radicular e da produtividade da cultura da cana-de-açúcar, permitindo que as Fazendas Morumbi e Santa Izabel apresentassem produtividades de cana-de-açúcar semelhantes.

2.2. Objetivos gerais

O objetivo geral foi avaliar o impacto do manejo agrícola sobre os padrões de produtividade de cana-de-açúcar, cultivada nas Fazendas Santa Izabel (Jaboticabal-SP) e Morumbi (Guariba-SP), no período de 1993 a 2018.

Os objetivos específicos foram: (i) verificar alterações nos parâmetros de fertilidade da camada arável do solo de 1994 a 2018; (ii) verificar alterações pedológicas nos atributos diagnósticos subsuperficiais do solo em 2018; (iii) elaborar mapas de ambiente de produção dinâmicos de cana-de-açúcar atualizados das áreas; (iv) associar as práticas de manejo agrícola com as alterações nos padrões de produtividade da cana-de-açúcar.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Cana-de-açúcar

3.1.1. Classificação botânica e anatomia da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar, classificada taxonomicamente na família Poaceae, gênero *Saccharum*, podendo pertencer às espécies *S. officinarum*, *S. barberi*, *S. robustum*, *S. spontaneum*, *S. sinensis* ou *S. edule*, é uma planta de clima tropical e subtropical. Os colmos, que apresentam formato cilíndrico, são formados por nós e entrenós, sendo que os entrenós mais novos são os mais ativos, passando por divisão celular intensa e rápida. As folhas são alternadas, opostas e presas aos nós dos colmos (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2008).

Por se tratar de uma cultura semi-perene, a cana-de-açúcar tem potencial para desenvolver um padrão de aprofundamento das raízes superior ao observado para a maioria das culturas anuais. Na ausência de impedimentos físicos e químicos no solo, o crescimento do sistema radicular da cana-de-açúcar permite a exploração das camadas mais profundas do solo (superiores a 80 cm), reduzindo a possibilidade de ocorrência de estresses hídricos e nutricionais e ampliando a produtividade. O sistema radicular é dividido em: a) raízes superficiais, de crescimento lateral a partir da região radicular dos toletes, contendo raízes mais finas e com boa ramificação; b) raízes de sustentação, que emergem de brotos jovens, sendo raízes grossas e que crescem em profundidade, podendo atingir até 1,5 metros; c) raízes de cordão, que são formadas por aglomeração de raízes verticais (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2008).

3.1.2. Aspectos sócio-econômicos atuais da cultura da cana-de-açúcar no Brasil

O setor canavieiro é um dos destaques do cenário agrícola brasileiro. Em 2013 o setor sucroenergético gerou PIB de 97,65 bilhões de reais e 181 mil empregos, com projeção de PIB de 330,78 bilhões de reais e de 261 mil empregos em 2030 (CNI, 2017).

A área colhida de cana-de-açúcar na safra 2017/18 foi de 8,73 milhões de hectares, 3,5% menor do que a da safra 2016/17 (CONAB, 2018). A produção foi de 633,26 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, apresentando redução de 3,6% em relação à safra passada. O Estado de São Paulo contribuiu com 55,1% da produção, seguido por Goiás (11,2%), Minas Gerais (10,3%), Mato Grosso do Sul (7,4%), Paraná (5,9%), Mato Grosso (2,5%), Alagoas (2,2%) e Pernambuco (1,7%). De acordo com o histórico de área plantada de cana-de-açúcar (UNICA, 2018), houve um aumento nacional significativo nos últimos anos. Porém, a produtividade dos canaviais brasileiros apresentou valores médios inferiores a 70 toneladas de colmo por hectare (TCH) (Figura 1), considerada baixa a julgar pelo potencial genético das variedades modernas.

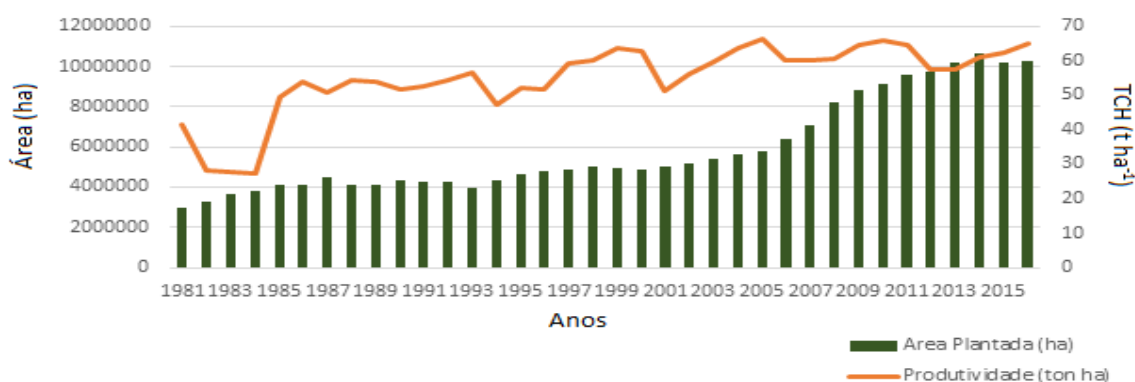


Figura 1. Área plantada e produtividade de cana-de-açúcar no Brasil, no período de 1981 à 2016.

Fonte: Adaptado de UNICA (2018).

3.2. Evolução do manejo agrícola e sua influência na produtividade da cana-de-açúcar

A agricultura moderna, que teve início nos séculos XVIII e XIX, desenvolveu-se intensificadamente depois de passar por duas Revoluções Agrícolas, momento em que se instalou o modelo produtivo que vem sendo praticado, baseado no emprego de insumos e de tecnologias agrícolas e industriais. Este padrão, conhecido por agricultura convencional, intensificou-se após a Segunda Guerra Mundial, culminando, no início da década de 70, com a Revolução Verde, que trouxe um pacote tecnológico e o avanço da

genética, permitindo o uso de variedades geneticamente melhoradas, uso de fertilizantes químicos, agrotóxicos, irrigação e mecanização (PISSINATO, 2014).

O sistema convencional de cultivo, atualmente o mais usado na canavicultura brasileira, caracteriza-se pelo uso de fertilizantes e corretivos, de defensivos e de outros agroquímicos e de mecanização das operações agrícolas. Esse sistema é dividido em três fases principais: a primeira estação seca, na qual são feitos controle de plantas daninhas, instalação ou reforma dos sistemas viário e de conservação do solo e da água e as aplicações de calcário e gesso; a segunda fase ocorre no início da estação chuvosa, propiciando operações mais intensas de preparo do solo, como subsolagem, escarificação e aração; a terceira fase engloba as operações de acabamento e de nivelamento de pré-plantio, picagem de restos culturais, uniformização dos torrões e nivelamento da superfície do solo (STORINO et al., 2008).

A intensidade de revolvimento do solo e de incorporação dos restos culturais pelos arados provocam importante diminuição dos teores de matéria orgânica e, conseqüentemente, da CTC, no pH, na dinâmica dos íons e na agregação do solo (FALLEIRO et al., 2003). Além disso, a camada compactada que normalmente se desenvolve nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar, necessita ser observada se é rompida com o uso desses implementos. A compactação tem sido apontada como uma das principais causas do declínio de produtividade dos canaviais, podendo causar redução drástica na produtividade quando o solo atinge grau de compactação igual ou superior a 75% (SANTOS et al., 2005). Segundo SÁ et al. (2016) a resistência á penetração crítica do solo ao desenvolvimento radicular é de 3,8 Mpa em Latossolos ácidos. A atenuação dos seus efeitos era alcançada pela escarificação no cultivo da entrelinhas das soqueiras ou, mais efetivamente, na ocasião da reforma dos canaviais.

No início da década de 1980, a cana-de-açúcar foi uma das primeiras culturas a testar o herbicida glifosato, com finalidade de reduzir operações de preparo do solo, sistema conhecido como cultivo mínimo (CURY et al., 2014). Atualmente, de maneira equivocada, muitas áreas com cultivo de cana-de-açúcar têm sido consideradas sob plantio direto após a adoção da colheita mecanizada. O plantio direto é o sistema de cultivo que ocorre em solo não revolvido, com controle químico de plantas daninhas, podendo haver cobertura do solo por restos culturais (GONÇALVES, 2006). Nesse sistema, ocorre uso

de sulcadores que realizam, em operação única, o corte da palha, a sulcação e a adubação de plantio (STORINO et al., 2008). O sistema permite acúmulo de matéria orgânica no perfil do solo, com benefícios mais evidentemente observados após vários anos de adoção em substituição ao cultivo convencional. Esses princípios têm sido amplamente atendidos no cultivo de milhares de hectares de grãos no Brasil, mas o plantio direto é um sistema muito pouco utilizado na cultura da cana-de-açúcar (CURY et al., 2014). Dentre os poucos relatos na literatura, JÚNIOR; COELHO (2008) observaram aumentos de até 37% da produtividade da cana-de-açúcar cultivada em Cambissolo eutrófico sob plantio direto, usando leguminosas de cobertura, quando comparada com a cultivada sob preparo convencional do solo com vegetação espontânea incorporada.

Os sistemas baseados no cultivo mínimo e no plantio direto atendem aos princípios da agricultura conservacionista. No sistema de cultivo mínimo, a soqueira de cana-de-açúcar é eliminada com herbicida e, em seguida, é feita a sulcação para o novo plantio em entrelinhas (AGEITEC, 2018). Segundo TAVARES et al. (2010), os sistemas de cultivo mínimo propiciam aumento do diâmetro do colmo e maior produtividade de folhas, aumentando a eficiência fotossintética (estudo realizado em Argissolo Amarelo textura arenosa/média na cidade de Linhares-ES). O preparo reduzido em área de cana crua tem proporcionado incrementos na produtividade da cultura (DIAS, 2001). A aplicação dos conceitos básicos do sistema de plantio direto em cana-de-açúcar é inviabilizada pela agressão mecânica imposta por máquinas e implementos sobre o solo, o que resulta em uma condição de compactação contornada por operações pesadas de preparo do solo na ocasião das reformas (SEKI et al., 2015). Para a cana-de-açúcar, que permanece no mesmo local por vários anos sem que haja movimentação do solo (cana-planta e soqueiras), é praticamente imprescindível a operação de subsolagem, com hastes de 40 cm onde a situação não é tão crítica (ALLEONI; BEAUCLAIR, 1996).

Considerando a qualidade de matéria-prima, o cenário ideal é que a cana-de-açúcar seja colhida crua, limpa e processada o mais rápido possível. Porém, a necessidade de antecipação da limpeza do canavial, favorecendo as operações de cortes, manual e mecanizado, tornou a queima da cana-de-açúcar uma operação vantajosa e necessária, apesar de causar problemas ambientais (RIPOLI; RIPOLI, 2009).

A lei nº 11.241, elaborada em setembro de 2002, determinou que a prática da queima deve ser totalmente extinta no Estado de São Paulo até o ano de 2021, a partir da elaboração de um cronograma gradativo de substituição da colheita de cana-de-açúcar com despalha a fogo, iniciado na safra 2002 (MORAES, 2007). Neste sistema de colheita, as folhas, bainhas, ponteiro, além de quantidade variável de estilhaços de colmo, são cortados, triturados e lançados sobre a superfície do solo, formando uma cobertura de palhada, que varia de 10 a 30 t ha⁻¹ (SOUZA et al., 2005; VITTI, 2003; VITTI et al., 2011). Variações podem ocorrer de 13 t ha⁻¹ ano⁻¹ de matéria seca a até 45 t ha⁻¹ ano⁻¹ de matéria fresca (FIORETTO et al., 2009). Isso implica proteção do solo, manutenção da umidade, em destaque nos anos mais secos, acréscimo de matéria orgânica e condições propícias para a microbiota do solo. Estima-se que, com a despalha a fogo, perdem-se cerca de 10 t ha⁻¹ ano⁻¹ de palhada, que por sua vez contém importantes quantidades de N (40-60 kg ha⁻¹), de S (15-30 kg ha⁻¹) e de C (4.500 kg ha⁻¹) (RESENDE et al., 2006). O desenvolvimento do sistema radicular e a produtividade de cana-de-açúcar são beneficiados com a substituição do sistema de cana queimada para cana sob palhada (AQUINO et al., 2015). Dentre as vantagens da proibição da queima estão a manutenção da umidade do solo, o melhor controle da erosão com proteção do solo, a redução do uso de herbicidas, o aumento da matéria orgânica do solo, a melhoria da matéria-prima e a redução da poluição atmosférica. Algumas desvantagens incluem o maior custo de colheita, o maior dispêndio financeiro no controle de infestação de pragas agrícolas e a dificuldade para obtenção de mão de obra qualificada (AGEITEC, 2017).

Algumas práticas de manejo foram desenvolvidas especificamente para a cana-de-açúcar, com a finalidade de melhorar o desempenho da cultura e de diminuir os impactos negativos associados ao seu cultivo. O uso dos resíduos agroindustriais provenientes do próprio processamento da cana-de-açúcar tem sido prática fundamental para a economia de fertilizantes e para a destinação final adequada de vinhaça e de torta de filtro. A vinhaça possui alto potencial poluente, mas pode ser utilizada na agricultura desde que seja de forma racional e respeitando a norma CETESB P4.231 que vigora no Estado de São Paulo (CORTEZ et al., 1992; SOARES et al., 2014). A aplicação de 70 mm de vinhaça por hectare, misturada com água residuária, alavancou a produtividade entre 8-12% em canaviais de Goiás. A torta de filtro, rica em fósforo, se aplicada com umidade em solos

com baixa fertilidade, na dose de 20 a 30 t ha⁻¹, pode elevar a produtividade em até 20% no ano de aplicação, e de 6 a 8 t ha⁻¹ em soqueira (PRADO, 2016).

O cultivo consorciado com adubo verde tem como objetivo reciclar os nutrientes dos solos e favorecer a fixação do nitrogênio atmosférico por meio do uso de leguminosas. Segundo CRUZ; MAGALHÃES (2013), a rotação da cana-de-açúcar com crotalária contribui com a quebra do ciclo de pragas de solo, fornece matéria-orgânica, fixa nitrogênio atmosférico e eleva a produtividade. A utilização dos citros com cultura antecessora à cana-de-açúcar pode incrementar 10 t ha⁻¹ na produtividade da cana-de-açúcar, devido aos efeitos residuais de fertilizantes (PRADO, 2016).

SOARES; CARDOSO (2007) observaram que a irrigação de salvamento elevou a produtividade da variedade RB845257. A aplicação de lâmina de 80 mm incrementou 24,6 t ha⁻¹ na produtividade de colmos e 4,4 toneladas de pol por hectare. A medida que o solo apresenta maior capacidade de água disponível (CAD), menor será o impacto para a cana-de-açúcar quando submetido ao estresse hídrico quando comparado a solos com baixa CAD. Com isso recomenda-se antecipar a colheita em solos com baixa CAD e deixar para o final de safra a colheita de cana-de-açúcar em solos com alta CAD. Finalmente, o aumento de produtividade de cana-de-açúcar depende da correta escolha varietal (RIDESA, 2010). Os programas de melhoramento genético buscam cada vez mais trabalhar com a classificação das variedades de acordo com seus ciclos produtivos (precoces, médias e tardias) e com as respostas à ambientes desfavoráveis (restritivas) e favoráveis (médias e responsivas). A Figura 2 representa a resposta das variedades IAC SP94-2101, RB83 5486, SP80-1842 e SP81-3250, cujas características varietais são distintas, em ambientes desfavoráveis (rústicas) e favoráveis (médias e responsivas). Nota-se que a variedade IACSP94-2101 é a variedade mais produtiva em ambientes favoráveis e a menos produtiva em ambientes desfavoráveis. A variedade SP81-3250 é a que apresenta melhor resposta de produtividade em ambiente desfavorável, enquanto a SP80-1842 apresenta menor variação de produtividade independentemente do tipo de ambiente.

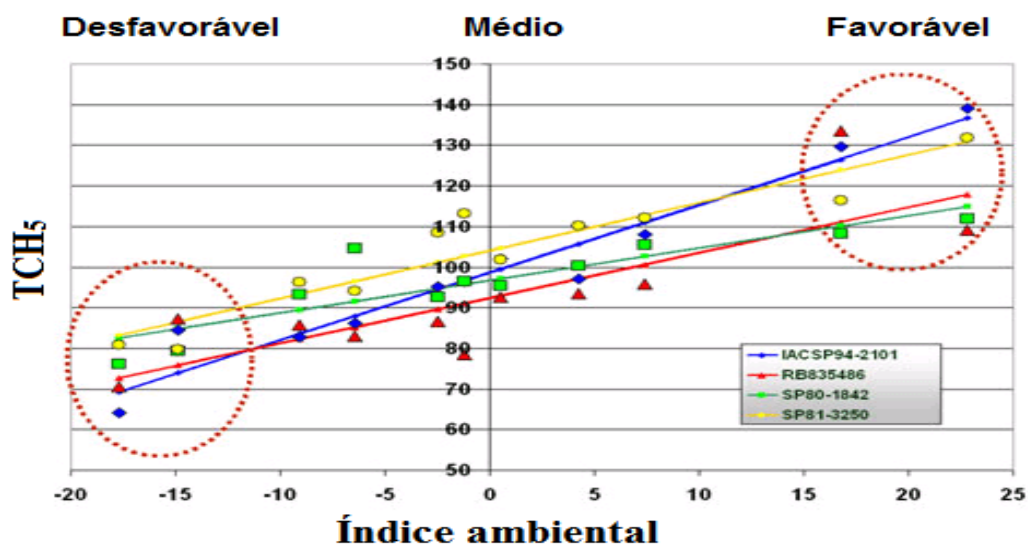


Figura 2. Produtividade de cana-de-açúcar, em tonelada de cana por hectare, na média de 5 cortes, em ambientes favoráveis, médios e desfavoráveis.
Fonte: PROCANA (IAC).

Considerando a época de plantio das variedades, recomenda-se que o plantio ocorra de janeiro a março, para sistema de cana de 18 meses, de outubro a novembro em sistemas de ano convencional, de abril a junho para plantio de outono, caso não se tenha déficit hídrico para prejudicar o brotamento, e de junho a setembro para plantio de cana de ano de inverno, desde que haja irrigação para compensar a seca (LANDELL et al., 2014).

Em relação a época de colheita, deve ser levado em consideração a obtenção da máxima produção de açúcar e álcool, tornando necessário analisar dois aspectos: volume de cana colhida e qualidade da matéria prima (LANDELL; BRESSIANI, 2008). Segundo os autores, nesse período que a cana-de-açúcar passa no campo, a planta estará submetida a três estações bem distintas (outono, inverno e primavera). As características de cada estação refletirão diretamente na qualidade e na quantidade de matéria-prima, sendo o outono muito favorável para o parâmetro tonelada de cana por hectare (TCH). Porém, a cana-de-açúcar colhida nessa época será prejudicada no quesito teor de sacarose (POL), pois as condições climáticas que a cana-de-açúcar foi submetida desde o plantio não são favoráveis a maturação neste período (estresse hídrico e temperatura mais amena). No inverno, a TCH é favorável e o POL muito favorável, enquanto na primavera a cana-de-açúcar colhida apresenta um cenário desfavorável a TCH e pode apresentar tanto cenário

desfavorável como favorável para POL, em funções da condição climática daquele ano.

Sendo assim, (LANDELL et al., 2014) recomendaram a colheita em função dos ambientes de produção e do tipo de variedade (Tabela 1).

Tabela 1. Indicação de alocação de cultivares de cana-de-açúcar, em função dos ambientes de produção, perfis de respostas das variedades aos diversos ambientes de produção e a época de colheita (baseado na rede experimental do IAC).

Variedades	AMBIENTE PRODUÇÃO	PERÍODO DE SAFRA								
		OUTONO			INVERNO			PRIMAVERA		
		abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
IAC87-3396	B2 - E2									
IAC91-1099	A2 - D1									
IACSP93-3046	A2 - D1									
IACSP95-5000	A1 - D2									
IACSP95-5094	A1 - C1									
IACSP97-4039	C1 - E2									
RB855156	C1 - D2									
RB855453	A2 - C2									
RB867515	B2 - E1									
RB92579	A1 - D2									
RB966928	A2 - D1									
CTC2	A1 - C1									
CTC4	B2 - D2									
CTC9	B1 - C2									
CTC15	B1 - E1									
CTC20	A1 - C2									

Fonte: Boletim IAC n° 200 (AGUIAR et al., 2014).

Outra prática utilizada para a redução do custo em reformas de canavial é a meiosi (Método Interrotacional Ocorrendo Simultaneamente). Nesse sistema, o canavial está em rotação simultânea com adubo verde ou leguminosa. No plantio, a cana-de-açúcar é plantada em duas linhas, mantendo um espaçamento de oito linhas entre as próximas linhas de cana, onde é plantada a espécie desejada. Desta forma, a cana-de-açúcar plantada servirá de material propagativo para o plantio do restante da área, e a espécie cultivada nos espaços vazios é incorporada ao solo (NETO, 2013).

Atualmente, LANDELL; BRESSIANI (2010) desenvolveram o conceito de “terceiro eixo” para colheita de cana-de-açúcar, onde os canaviais de 1º, 2º e 3º cortes devem ser colhidos até meados de julho na região Centro-Sul do Brasil, iniciando as colheitas em ambientes de produção mais restritivos e finalizando nos ambientes

favoráveis. Nas colheitas posteriores, o planejamento para a colheita deverá ocorrer por 12 meses e meio a 13 meses após o último corte, tardiando assim um mês a colheita de cada ambiente. Segundo DUARTE; KANTHACK (2017), o terceiro eixo, associado ao manejo varietal, visa minimizar os impactos causados pelo déficit hídrico em canaviais de até três cortes.

3.3. Ambientes de produção de cana-de-açúcar

Nos levantamentos pedológicos prestados aos produtores rurais até o ano de 1993, os pedólogos classificavam os tipos de solos das propriedades, buscavam determinar seu potencial produtivo e recomendar o manejo adequado para cada tipo de solo. JOAQUIM et al. (1994), com base nas condições químicas de subsuperfície de solos e nas diferentes texturas, foram os pioneiros ao associar os conhecimentos de Pedologia com a produtividade de cana-de-açúcar, qualificando literalmente os ambientes de produção em A, B, C, D e E. Os autores verificaram que as produtividades de cana-de-açúcar decresceram dos solos de maior para os de menor potencial de fertilidade, na seguinte ordem: eutróficos > distróficos > ácidos > álicos.

Outros estudos sobre ambientes de produção de cana-de-açúcar foram feitos por PRADO (2008), DEMATTÊ; DEMATTÊ (2009), MAZZA (2010) e MONTEIRO (2012).

PRADO (2008) associou as condições químicas pedológicas com a influência climática nos estudos de ambientes de produção de cana-de-açúcar. A partir de 2015, o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) passou a considerar a influência do clima nos ambientes de produção, empregando o conceito de ambientes edafoclimáticos, considerando pelo menos 30 anos de dados climáticos referentes ao tempo. Segundo PEREIRA et al (2002), o tempo é definido como as condições climáticas em um determinado local durante um momento específico e clima é a condição climática média que ocorre em determinado local.

A colheita de cana-de-açúcar, realizada entre abril a novembro, é um fator determinando no potencial produtivo do ambiente, onde a antecipação do corte diminui o tempo que a cultura fica submetida ao déficit hídrico, aumentando assim a produtividade do ambiente (LANDELL et al., 2003).

Sendo assim, PRADO (2016) estabeleceu o conceito de ambientes de produção dinâmicos, implementando a régua de ambientes de produção dinâmicos (canto inferior da Figura 3), atribuindo notas de 0 a 10 para ambientes que variam desde o ambiente G2, caracterizado por produtividades médias de cinco cortes (TCH₅) até 50 t ha⁻¹, até o ambiente A+12, com TCH₅ mínima de 150 t ha⁻¹. Essa ferramenta, que tem sido apropriada para medir o potencial produtivo dos solos do Brasil, admite que o produtor realiza o manejo básico da área, evitando que ocorra uma condição desfavorável para o desenvolvimento da planta, como falta de nutrientes no solo ou competição com outras espécies, e considera que a adoção de práticas de manejo consideradas avançadas (sua ausência não significa que ocorrerá uma adversidade para o desenvolvimento da cultura) resulte em aumento do potencial produtivo do solo.

A Figura 3 ilustra a forma dinâmica do potencial produtivo dos ambientes de produção em relação a época de corte da cana-de-açúcar. Nota-se que a mesma área, se for colhida no início de safra (área a esquerda), apresentará maior potencial produtivo em relação a colheita feita no meio de safra (área central), que supera a produtividade do corte no final de safra (área a direita) devido ao menor tempo em que a cultura fica submetida ao efeito do déficit hídrico.

Ambientes de Produção Dinâmicos de Cana-de-Açúcar

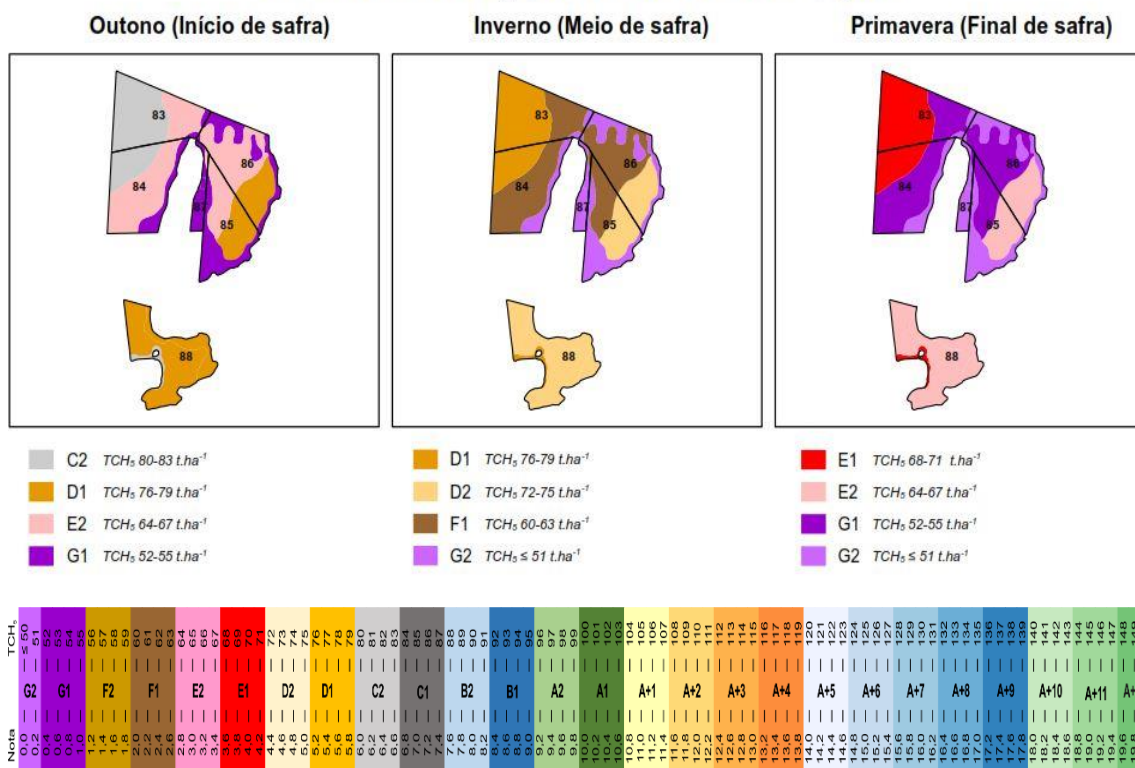


Figura 3. Ilustração demonstrativa do potencial produtivo de um ambiente colhido no início de safra (abril a 15 de junho), meio de safra (16 de junho a 15 de setembro) e final de safra (a partir de 16 de setembro), considerando a classificação de PRADO (2016).

Segundo a definição de PRADO (2016), o manejo básico considera as boas práticas agrícolas em relação ao preparo e conservação do solo, calagem, adubação de macro e micronutrientes de acordo com os boletins técnicos, controle fitossanitário de plantas daninhas, pragas e doenças, plantio e colheita nas épocas corretas e, finalmente, a escolha da variedade de cana-de-açúcar de acordo com o ambiente de produção, e o manejo avançado altera o ambiente de produção qualificado no manejo básico, levando em consideração a utilização de mudas pré-brotadas (MPB) de cana-de-açúcar, a elevada população de plantas/ha, a irrigação plena e semiplena, a aplicação de vinhaça, torta de filtro, cama de frango, e a influência positiva do efeito residual de nutrientes deixados pelas culturas antecessoras para a nutrição da cana-de-açúcar.

O conceito de ambientes de produção dinâmicos proposto por PRADO (2016) é mais detalhado do que os de DEMATTÊ; DEMATTÊ (2009), MAZZA (2010) e MONTEIRO (2012), pois considera subdivisões dos ambientes de produção A, B, C, D,

E, F e G e as mudanças nos valores de TCH5 devido a redução da deficiência hídrica de acordo com a época de colheita (início, meio e final de safra). DEMATTÊ; DEMATTÊ (2009) consideraram os ambientes A, B, C, D e E e, recentemente, modificaram o sistema de classificação pela inclusão dos ambientes F e G. MAZZA (2010) adotou os ambientes A, AB, BA, B, C, D e E, enquanto MONTEIRO (2012) considerou os ambientes de produção P1, P2, P3, P4, P5, P6 e P7. As informações detalhadas dos critérios adotados nas diversas tabelas de ambientes de produção de cana-de-açúcar são de domínio reservado do Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) e de DEMATTÊ; DEMATTÊ (2009), MAZZA (2010) e MONTEIRO (2012), o que impossibilita a comparação entre os sistemas de classificação.

MARIN; CARVALHO (2012) avaliaram a variabilidade espacial e temporal da produtividade da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo durante 16 safras agrícolas e observaram que os fatores referentes aos ambientes de produção explicaram 58% da produtividade agrícola, sendo 43% referente aos fatores climáticos e 15% referente ao solo.

3.4. Variação espacial e temporal da fertilidade superficial e subsuperficial do solo

O Brasil apresenta alta diversidade de material de origem (CURI et al., 2017), que é classificado como um dos fatores de formação dos solos com influência sobre as características físicas e químicas dos solos (KÄMPF; CURI, 2012). Como consequência, é possível verificar a ocorrência de solos variando desde baixa a alta fertilidade natural. Em geral, como no Brasil predomina solos altamente intemperizados, apresentam baixos valores de bases em superfície (LOPES, 1983, SOUSA; LOBATO, 2004, JÚNIOR et al, 2007) e em subsuperfície (PRADO, 1998).

Nos primórdios da agricultura primeiramente foram cultivados os solos de alta fertilidade, que permitiram o desenvolvimento das civilizações e a criação de riquezas em diversos locais do mundo (RAIJ, 2011). Porém, devido a alta demanda em produção, foi preciso produzir em áreas de baixa fertilidade. Para isso, foi preciso intensificar pesquisas que possibilitassem um melhor entendimento da fertilidade do solo visando o aumento da eficiência produtiva nas áreas de baixa fertilidade.

No levantamento feito por LOPES (1983) nos solos do cerrado no horizonte superficial dos solos (0 a 20 cm de profundidade), foi observado, em uma densidade amostral de 518 pontos, que os solos apresentavam baixos teores de cálcio (96% dos pontos amostrados), magnésio (90%), potássio (85%), CTC (97%) e alto teor de alumínio (91%). MALAVOLTA; KLIEMANN (1985) compararam características superficiais de alguns atributos químicos dos solos do cerrado com solos de outras regiões do país, onde constatou que os valores médios de pH, cálcio, magnésio e potássio no cerrado foram baixos e inferiores as demais regiões brasileiras, nomeando o estudo como “desordens nutricionais no Cerrado”. Sendo assim, o Cerrado se tornou um centro de desenvolvimento de pesquisa no quesito fertilidade do solo.

A variabilidade espacial dos atributos químicos se tornou uma importante linha de pesquisa nesse contexto, onde diversos estudos foram realizados e alguns pontos foram constatados. A variabilidade espacial dos atributos químicos do solo é maior em camadas superficiais dos solos (VEIGA et al., 2012; SANTOS et al., 2018). ZANÃO JÚNIOR et al. (2010) também mostraram que a variação dos teores de fósforo (P), cálcio (Ca), potássio (K), magnésio (Mg) e enxofre (S) em Latossolos distrófico textura argilosa foi

maior na camada de 0-10 cm comparada com a da camada 10-20 cm. Isso se deve principalmente em pela ação dos fertilizantes, corretivos e restos culturais, que no geral, atuam até os 40 cm de profundidade (GARGANTINI et al., 1982).

A dependência espacial dos atributos químicos é alta e não apresenta um padrão. Segundo COELHO (2005), a capacidade de troca catiônica (CTC) e a soma de bases apresentam variabilidade moderada, com coeficiente de variação de 15 a 35%, enquanto os teores de matéria orgânica e de fósforo apresentam alta variabilidade, com coeficiente de variação superior a 35%. Resultado semelhante também foi observado por CHIBA et al. (2010), que verificou incremento de 32% no teor médio de matéria orgânica da camada 0-20 cm de um Latossolo Vermelho eutroférico após dois anos de cultivo sob sistema plantio direto, porém não corroboraram com VEIGA et al. (2012), onde notaram redução nos teores de matéria orgânica, soma de bases, saturação de bases, potássio, cálcio e magnésio até a profundidade 30 cm ao avaliarem os efeitos da aplicação de dejetos líquidos de suínos (50, 100 e 200 m³ ha⁻¹ por ano) no comportamento dos nutrientes de um Latossolo distrófico, até 60 cm de profundidade em um período de 9 anos, sob influência do plantio direto e da rotação de culturas. Essa alta variabilidade dos atributos químicos varia em função do manejo utilizado e está relacionada a ampla variação do pH em distâncias muito pequenas. BRADY; WEIL (2013) explicam a alta variabilidade do pH pela ação do sistema radicular das plantas, que podem liberar substâncias que alteram o valor de pH rizosférico em relação a massa do solo, sendo que o pH está diretamente ligado a disponibilidade dos nutrientes no solo e dos fertilizantes.

De acordo com RESENDE et al. (2016), a atividade antrópica é determinante na variação dos atributos do solo, sendo que os de fertilidade apresentam diferentes suscetibilidades às alterações de acordo com o manejo agrícola. A obtenção de ambientes propícios ao pleno desenvolvimento das culturas ocorreu, dentre outros fatores, pela disseminação de práticas de correção da acidez do solo e de aplicação de fertilizantes para elevar a disponibilidade de nutrientes. Esse conjunto de técnicas agronômicas compõe o manejo de “construção da fertilidade do solo”, que normalmente ocorre em solos inicialmente ácidos e pobres em nutrientes. Solos de fertilidade construída distinguem-se pelo histórico de manejo, em que aplicações sucessivas de corretivos, condicionadores, fertilizantes, subprodutos agroindustriais e materiais orgânicos de natureza diversa

possibilitam efeitos residuais cumulativos. Segundo LACERDA et al. (2015), solos com fertilidade construída necessitam de ajustes de manejo de adubação para maior eficiência, sendo fundamental o monitoramento da disponibilidade de nutrientes. Com isso, vários atributos de fertilidade superam padrões considerados muito baixos, baixos ou médios e alcançam os níveis críticos, a partir dos quais produtividades relativas superiores a 90% podem ser alcançadas (Figura 4).

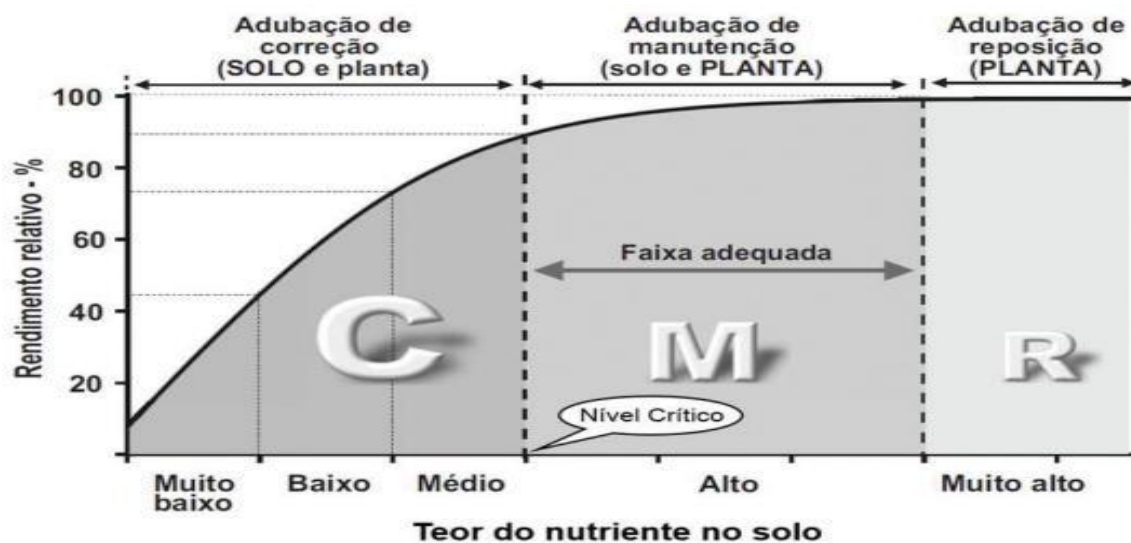


Figura 4. Teores de nutrientes no solo como critério para definir a construção (C), a manutenção (M) ou a reposição da fertilidade; o limite superior do intervalo interpretado como “médio” corresponde ao nível crítico, que deve ser alcançado na construção da fertilidade.

Fonte: Resende et al. (2016).

A busca para alcançar o nível crítico deve ser feita para todos os nutrientes do solo, pois a deficiência de um dos nutrientes prejudicará o crescimento e desenvolvimento vegetal, de modo que esse nutriente se torna o fator limitante para a produção agrícola, conforme constatado por Liebig na primeira metade do século XVIII, que formulou assim “Lei do mínimo” (RAIJ, 2011).

Embora todos os nutrientes afetem de forma direta a produção agrícola, existem alguns elementos que podem interferir de forma indireta na produtividade, como o cálcio (VASCONCELOS; CASAGRANDE, 2008; PRADO, 2016) e alumínio (VITORELLO et al., 2005; VASCONCELOS; CASAGRANDE, 2008; MALVESTITI et al., 2012), que afetam diretamente o desenvolvimento do sistema radicular.

O decréscimo da produtividade de cana-de-açúcar tem sido estreitamente relacionado com as condições químicas subsuperficiais do solo, que definem o padrão de desenvolvimento do sistema radicular (PRADO, 2014). A Figura 5 representa ilustrativamente a tendência de distribuição do sistema radicular em função das condições químicas em subsuperfície (80 a 100 cm). O ciclo da cana-de-açúcar pode variar de 5 a 7 anos e, dependendo do manejo, o desenvolvimento radicular em maior profundidade é fundamental para o acréscimo de produtividade em solos de baixa fertilidade e de baixa retenção de umidade (BALL-COELHO et al., 1992; DEMATTÊ, 2005).

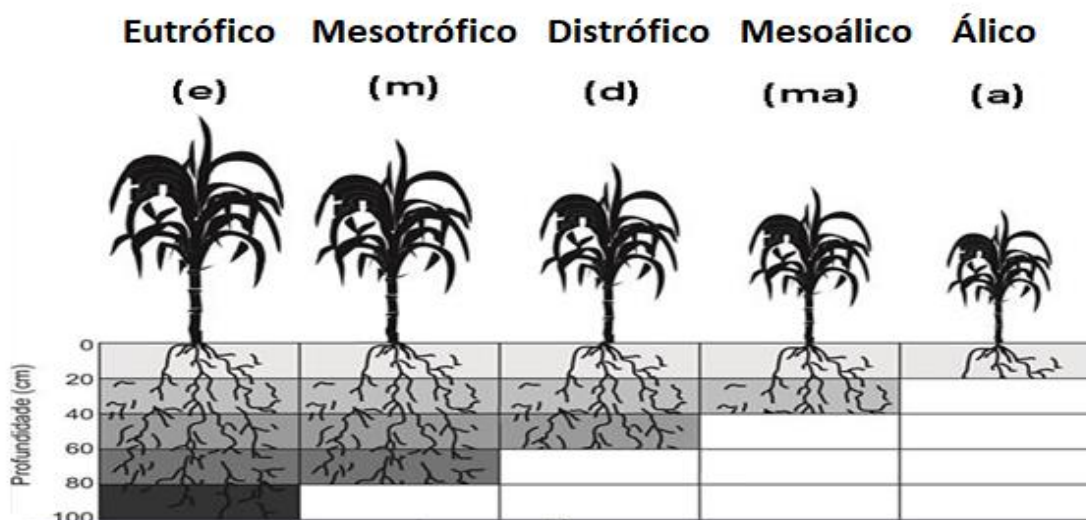


Figura 5. Representação ilustrativa da tendência de distribuição do sistema radicular em função das condições químicas em subsuperfície (80 a 100 cm).
Fonte: (PRADO, 2014).

Quando os solos apresentam condições químicas favoráveis abaixo da camada arável (eutrófico e mesotrófico), observa-se, dentre outros aspectos, que os teores de cálcio (Ca) são altos e os teores de alumínio (Al) são baixos (PRADO,2016). Nestes casos, a produtividade da cana-de-açúcar tende a ser maior do que em solos com condições químicas desfavoráveis em subsuperfície (distrófico, mesoálico e álico). Tratam-se de condições químicas propícias para o desenvolvimento de sistema radicular mais amplo e mais profundo. O maior volume de raízes nas camadas mais profundas resulta em ampliação do volume de solo explorado para a absorção de água e de nutrientes. A profundidade efetiva do sistema radicular (H, equação 1) tende a aumentar e a influenciar de forma positiva a capacidade de água disponível (CAD) do solo, calculada pela seguinte

equação:

$$CAD (mm) = \left\{ \frac{CC\% - PMP\%}{100\%} \right\} ds * 10 \left(\frac{mm}{cm} \right) * H (cm) \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que:

CAD: capacidade de água disponível (mm de água cm⁻¹ de solo)

CC: umidade na capacidade de campo com base no peso seco

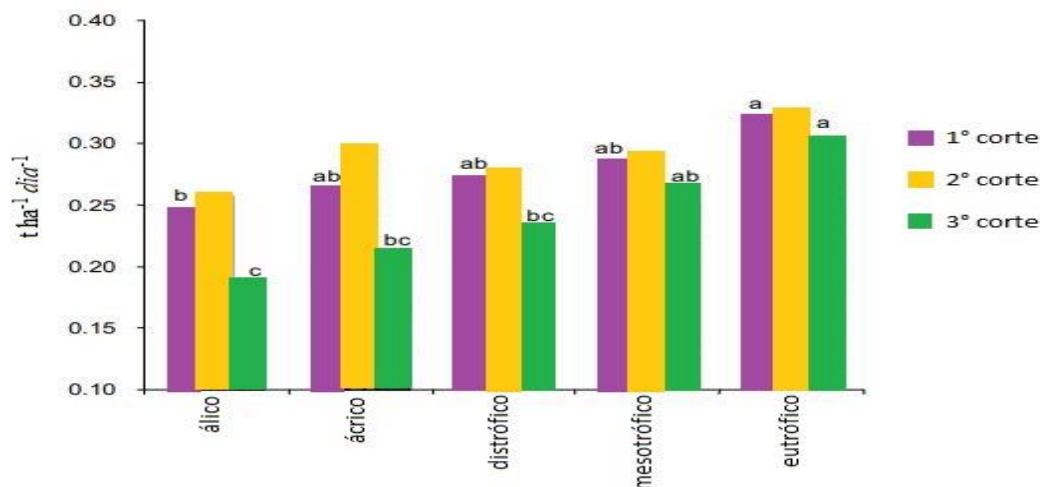
PMP: umidade no ponto de murcha com base no peso seco

ds: densidade do solo (kg m⁻³)

H: profundidade efetiva atingida pelo sistema radicular no perfil de solo (cm), que é dependente das condições químicas e da compactação do solo.

A cana-de-açúcar é uma planta de alto consumo de água, necessitando de 116 toneladas de água para produzir uma tonelada de massa seca (BUSO, 2006). Quando o sistema radicular da cana-de-açúcar fica concentrado nos primeiros 40 cm de solo, a cultura suporta um estresse hídrico de apenas 8 dias. Se a profundidade explorada for ampliada para 1,10 m, a cultura pode suportar o estresse hídrico por 22 dias (BUSO, 2006).

De acordo com LANDELL et al. (2003), a fertilidade subsuperficial, normalmente apresenta relação direta com a longevidade do canavial, com maiores quedas de produtividade a partir do terceiro corte, mais expressivas nos solos de baixa fertilidade subsuperficial (LANDELL et al., 2003). Os autores observaram padrões de produtividade de cana-de-açúcar, medida em tonelada por hectare por dia (t ha⁻¹ dia⁻¹), em função dos cortes e das características subsuperficiais (Figura 6). Diferenças significativas foram observadas para condições químicas subsuperficiais extremas, ou seja, entre os solos eutrófico e álico. Os efeitos das práticas de calagem e de adubação equalizaram a produtividade no segundo corte, independentemente das classes de fertilidade subsuperficial. No terceiro corte, os atributos químicos de subsuperfície foram determinantes, sendo que a produtividade da cana-de-açúcar em solos eutróficos foi significativamente superior à dos solos distrófico, ácrico e álicos.



Letras diferentes para o mesmo corte indicam diferença significativa de produtividade, pelo teste de Duncan ($p < 0,05$) em função das condições químicas subsuperficiais.

Figura 6. Produtividade agrícola média ($t\ ha^{-1}\ dia^{-1}$) de três ciclos de cana-de-açúcar, obtida a partir de ensaios em diferentes classes de fertilidade subsuperficial de solo. Fonte: Adaptado de LANDELL et al. (2003).

DIAS et al. (1999) relacionaram o rendimento da cana-de-açúcar com atributos químicos, físicos e hídricos superficiais (0-30 cm) e subsuperficiais (30-150 cm) de Argilossolos, Latossolo e Neossolo Quartzarênico com fatores climáticos (classificação climática e balanço hídrico dos municípios de Valparaíso-SP, Estrela D'Oeste-SP, Araçatuba-SP e Clementina-SP) e verificaram maior relação entre os teores de Ca dos horizontes diagnósticos subsuperficiais com a produtividade da cana-de-açúcar, pelo procedimento “stepwise” da análise de regressão múltipla.

Diferentemente da variação espacial do solo, que é abordada de forma satisfatória pela pesquisa e existem vários métodos para quantificá-la, a variação temporal é uma questão mais difícil e menos resultados estão disponíveis, principalmente em horizontes subsuperficiais.

Deve-se considerar que algumas propriedades químicas do solo são mais vulneráveis à variação temporal do que outras e que o período de observação deve ser longo o suficiente para contemplar fenômenos lentos e eventos raros.

Normalmente admite-se que a fertilidade do solo sofre declínio com os cultivos ao longo do tempo. Trata-se de uma constatação que se aplica, particularmente, a solos com alta fertilidade natural, principalmente na zona temperada. Nos solos ácidos dos

trópicos, é possível que uma situação diferente ocorra, uma vez que a maioria dos solos é cultivada a partir de uma condição de fertilidade considerada baixa a muito baixa, sendo determinante na trajetória agrícola do Brasil a superação das condições químicas limitantes dos solos.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Caracterização das áreas de estudo

O estudo foi realizado a partir de informações das Fazendas Santa Izabel (SI) e Morumbi (M), localizadas, respectivamente, em Jaboticabal-SP (21° 15' 17'' S e 48° 19' 20'') e em Guariba-SP (21° 21' 36'' S e 48° 13' 42''). As propriedades apresentam área total de 1140 (SI) e 522 (M) hectares e estão geograficamente distanciadas por 15 km.

4.1.1. Clima

As fazendas Santa Izabel e Morumbi pertencem ao mesmo zoneamento agroclimático. Os valores médios mensais de temperatura (T, °C), de precipitação (P, mm) e de balanço hídrico da região de Guariba-SP e Jaboticabal-SP (Tabela 2 e Figura 7), foram coletados nas redes do INMET, IAC, IAPAR, DAEE/SP e ESALQ/USP e disponibilizados pelo ¹Núcleo de Monitoramento Agroclimático (NURMA) da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), adotando-se o método de THORNTHWAITE & MATHER (1955) para capacidades de água disponível (CAD) de 100 mm (representando Latossolo eutrófico), 50 mm (Latosolo distrófico) e de 30 mm (Latosolo ácrico), com a evapotranspiração potencial (ETP) estimada pelo método de THORNTHWAITE (1948).

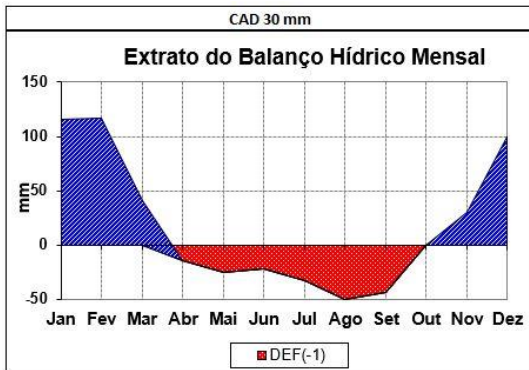
¹ www.esalq.usp.br/departamentos/leb/nurma.html

Tabela 2. Valores médios mensais de temperatura, de precipitação e de balanço hídrico dos municípios de Guariba-SP e de Jaboticabal-SP, coletados no período de 1988 a 2018.

Guariba-SP								
Mês	Temperatura (°C)	Precipitação (mm)	CAD 30 mm		CAD 50 mm		CAD 100 mm	
			DEF ⁽⁻¹⁾	EXC	DEF ⁽⁻¹⁾	EXC	DEF ⁽⁻¹⁾	EXC
Janeiro	24,5	239	0,0	115,7	0,0	115,7	0,0	115,7
Fevereiro	24,6	230	0,0	116,4	0,0	116,4	0,0	116,4
Março	24,2	157	0,0	41,2	0,0	41,2	0,0	41,2
Abril	22,3	51	-14,3	0,0	-9,8	0,0	-5,5	0,0
Maiο	20,1	33	-25,4	0,0	-19,9	0,0	-12,4	0,0
Junho	18,9	27	-22,4	0,0	-19,1	0,0	-13,1	0,0
Julho	18,8	18	-32,8	0,0	-29,8	0,0	-22,2	0,0
Agosto	20,8	19	-49,8	0,0	-47,5	0,0	-38,8	0,0
Setembro	22,4	42	-43,2	0,0	-42,3	0,0	-37,1	0,0
Outubro	23,3	120	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Novembro	23,7	152	0,0	30,1	0,0	10,7	0,0	0,0
Dezembro	24,0	220	0,0	99,8	0,0	99,0	0,0	71,2
Jaboticabal-SP								
Mês	Temperatura (°C)	Precipitação (mm)	CAD 30 mm		CAD 50 mm		CAD 100 mm	
			DEF ⁽⁻¹⁾	EXC	DEF ⁽⁻¹⁾	EXC	DEF ⁽⁻¹⁾	EXC
Janeiro	24,7	250	0,0	124,6	0,0	124,6	0,0	124,6
Fevereiro	24,8	219	0,0	103,5	0,0	103,5	0,0	103,5
Março	24,4	170	0,0	52,2	0,0	52,2	0,0	52,2
Abril	22,5	59	-10,0	0,0	-6,7	0,0	-3,6	0,0
Maiο	20,3	37	-21,1	0,0	-16,0	0,0	-9,7	0,0
Junho	19,2	28	-21,9	0,0	-18,2	0,0	-12,1	0,0
Julho	19,1	18	-33,7	0,0	-30,1	0,0	-21,9	0,0
Agosto	21,1	15	-55,5	0,0	-52,7	0,0	-42,6	0,0
Setembro	22,7	43	-44,5	0,0	-43,6	0,0	-38,1	0,0
Outubro	23,6	121	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Novembro	23,9	159	0,0	33,5	0,0	14,1	0,0	0,0
Dezembro	24,3	214	0,0	90,5	0,0	90,5	0,0	65,4

Fonte: Núcleo de Monitoramento Agroclimático (NURMA).

Guariba-SP



Jaboticabal-SP

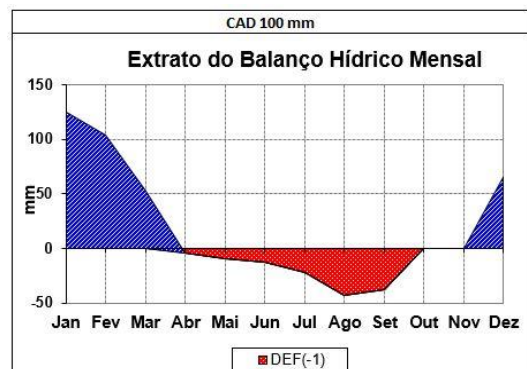
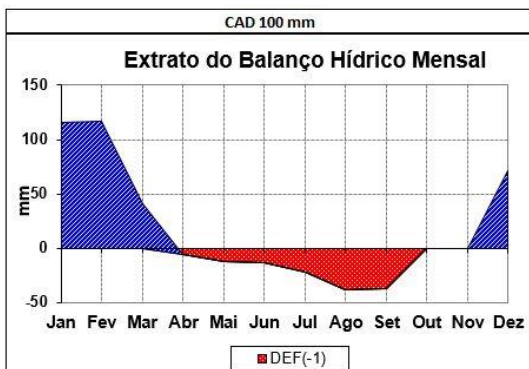
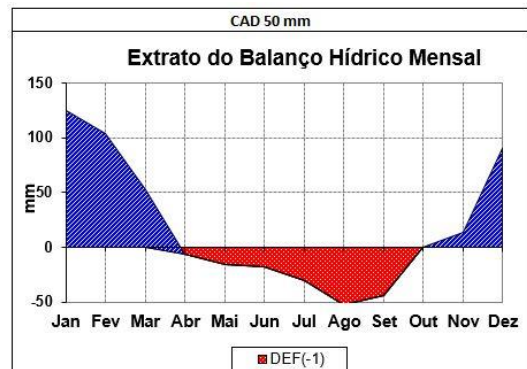
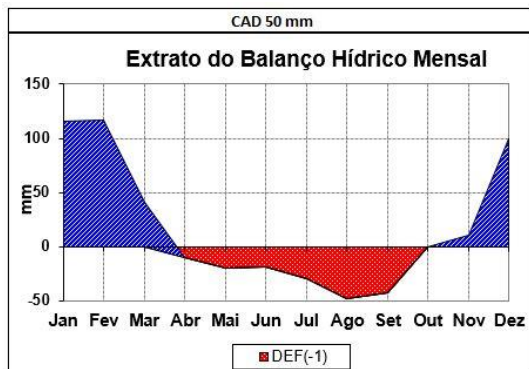
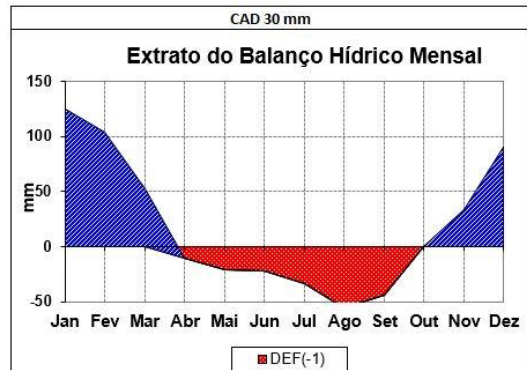


Figura 7. Comparativo do balanço hídrico mensal entre Guariba-SP e Jaboticabal-SP, para capacidades de água disponível (CAD) de 30, 50 e 100 mm com dados médios de 30 anos.

Fonte: Núcleo de Monitoramento Agroclimático (NURMA).

4.1.1.1. Eliminação das adversidades climáticas

As Fazendas Santa Isabel e Morumbi estão localizadas na mesma zona agroclimática, de modo que, sob condições normais, o fator clima não foi considerado variável que definiu variações de produtividade entre as duas fazendas.

A determinação do potencial produtivo em função dos conceitos de ambientes de produção considera que determinado ambiente vai apresentar sua respectiva produtividade sempre que prevalecer as condições climáticas normais da área, desconsiderando a influência das condições de tempo.

Como nos conceitos de ambientes de produção não são considerados interferência das adversidades climáticas no potencial produtivo do ambiente, foi avaliado dados de pluviosidade, disponibilizados pelos produtores e gerentes das Fazendas Santa Isabel e Morumbi (Anexo 1), coletados em pluviômetros instalados nas propriedades no período de 1990 a 2018.

A partir dessas informações, foi determinado os valores de precipitação mensal médio normal, através da média mensal dos últimos 28 anos (1990 a 2018) e comparado com os valores de precipitação mensal média de cada ano. Esses dados foram submetidos a análise estatística, conforme detalhado no tópico 4.3. Para a análise, foi necessário considerar as médias de precipitação (mm mês^{-1}) dos dois anos de duração da safra agrícola em campo.

A identificação de atipicidades climáticas relacionadas ao regime de chuvas foi utilizada para identificar a ocorrência de valores atípicos de produtividade da cana-de-açúcar para identificação de adversidades climáticas, que foram desconsideradas nesse estudo.

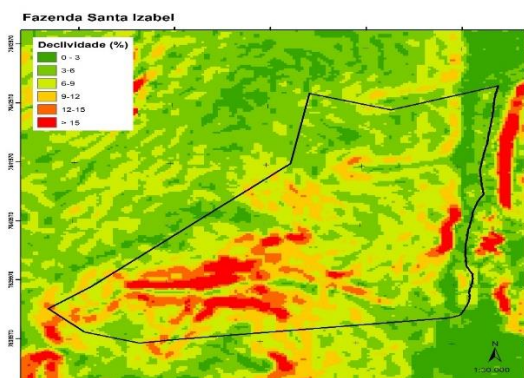
4.1.2. Solo

4.1.2.1. Levantamento de solo para fins de classificação

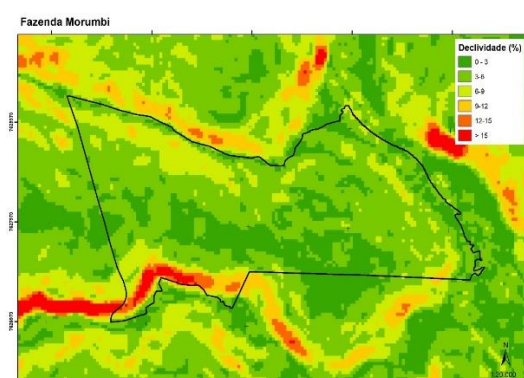
O primeiro levantamento de solo para fins de classificação, em nível detalhado, foi realizado em 1993. Na Fazenda Santa Izabel (SI), foram coletados 59 pontos (n=59), com densidade amostral de um ponto para cada 19 ha. A densidade amostral na Fazenda Morumbi (M) foi de um ponto a cada 15 ha, com coleta de 34 pontos (n=34). Algumas ordens de solos foram observadas nas propriedades, porém, a ordem predominante e comum em ambas fazendas foram Latossolos de textura argilosa, se diferenciando apenas pelas condições químicas em superfície e subsuperfície (80 a 100 cm de profundidade). Essas áreas predominantes foram definidas como o ponto de interesse nesse estudo, onde a densidade amostral foi de um ponto a cada 22 e 18 hectares nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi, com 39 e 17 pontos coletados na área de interesse, respectivamente.

Os pontos de amostragem foram previamente selecionados usando como critério primário as mínimas variações da topografia, observadas por mapas altimétricos das áreas. Para aumentar a representatividade da área, pontos complementares foram feitos no campo após observações da paisagem. Os mapas de declividade e de modelo de elevação digital das fazendas Santa Izabel e Morumbi (Figura 8) foram elaborados com as informações de BRASIL (2008) e usados como critérios no preparo de mapas de solos e ambientes de produção dinâmicos das fazendas.

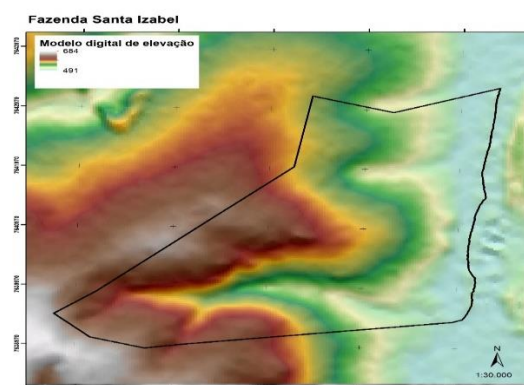
(a.1)



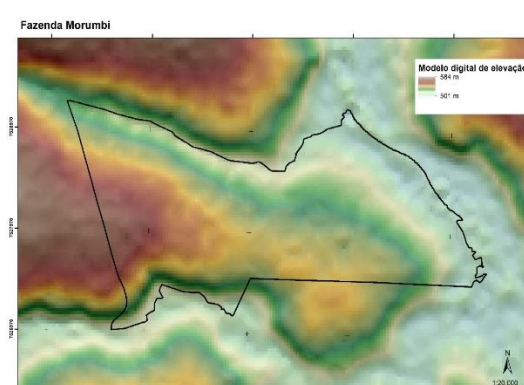
(a.2)



(b.1)



(b.2)



a.1 – Mapa de declividade Fazenda Santa Izabel; a.2 – Mapa de declividade Fazenda Morumbi, b.1 – Mapa de modelo digital de elevação (MDE) Fazenda Santa Izabel; b.2 – Mapa de modelo digital de elevação (MDE) Fazenda Morumbi

Figura 8. Mapas de declividade (superiores) e de modelo digital de elevação (inferiores) das Fazendas Santa Izabel e Morumbi.

Fonte: Brasil (2008).

Para cada ponto, foram coletadas três amostras com o trado holandês, nas profundidades 0-25 cm, 25-50 cm e 80-100 cm. As amostras de solo, coletadas em 1993, foram analisadas no laboratório da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz” da Universidade de São Paulo (ESALQ-USP), em Piracicaba-SP. Foram analisados os parâmetros usualmente utilizados para fins de levantamento: pH em CaCl₂, teores de matéria orgânica M.O.), de cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), fósforo (P) (método da resina trocadora de íons) e acidez potencial (H+Al pelo método SMP). Os resultados das análises das amostras de solo das Fazendas Santa Izabel e Morumbi estão nos Anexos

2 e 3.

De acordo com o levantamento de 1993, a Fazenda Morumbi apresentou predomínio de Latossolos quimicamente desfavoráveis (distrófico e ácrico), com área aproximada de 308 hectares (59 % da área total), enquanto na Fazenda Santa Izabel predominou Latossolos quimicamente favoráveis (eutrófico), com 865 hectares (76% da área total).

Após a classificação dos solos mediante as tradagens, foram abertas trincheiras em cada tipo de solo. Os Quadro 1 e Quadro 2 apresentam as descrições gerais e morfológicas das trincheiras feitas no Latossolo eutrófico, da Fazenda Santa Izabel, e Latossolo ácrico, da Fazenda Morumbi.

Quadro 1. Descrição geral e morfológica feita no Latossolo eutrófico da Fazenda Santa Izabel, em 1993, segundo CAMARGO et al. (1987).

<p>A. Descrição geral</p> <p>Classificação pedológica: Latossolo Roxo eutrófico A moderado textura argilosa</p> <p>Localização: Fazenda Santa Izabel</p> <p>Situação: terço superior</p> <p>Declive: 5%</p> <p>Altitude: 590m</p> <p>Material de origem: produto de intemperização de basalto</p> <p>Pedregosidade: não pedregosa</p> <p>Rochosidade: não rochosa</p> <p>Erosão: não aparente</p> <p>Drenagem: acentuadamente drenado</p> <p>Cobertura vegetal original: mata</p> <p>Cobertura vegetal atual: cana-de-açúcar</p> <p>Clima: Aw</p>
<p>B. Descrição morfológica</p> <p>A1 0 - 30cm, bruno avermelhado escuro (2,5 YR 3/3 úmido); argila arenosa; granular pequena fraca; muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição gradual e plana.</p> <p>AB 30 - 68cm, bruno avermelhado (2,5Y 4/4 úmido); argila arenosa; subangular média fraca; muito friável; ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição difusa e plana.</p> <p>BA 68 – 112cm, vermelho escuro (2,5YR 3/4 úmido); argila arenosa; subangular média fraca; muito friável; ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição difusa e plana.</p> <p>BW1 112 – 137cm, vermelho escuro (2,5YR 3/5 úmido); argila arenosa; subangular média fraca; muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição difusa e plana.</p> <p>BW2 137 – 160cm, vermelho escuro (2,5YR 3/6 úmido); argila arenosa; subangular média fraca; muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso.</p> <p>BW3 160 – 200cm, vermelho escuro (2,5YR 3/7 úmido); argila arenosa, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso.</p>

Quadro 2. Descrição geral e morfológica feita no Latossolo ácrico da Fazenda Morumbi, em 1993, segundo CAMARGO et al. (1987).

A. Descrição geral

Classificação pedológica: Latossolo Roxo ácrico A moderado textura argilosa

Localização: Fazenda Morumbi

Situação: terço médio

Declive: 5%

Altitude: 525m

Material de origem: produto de intemperização de basalto

Pedregosidade: não pedregosa

Rochosidade: não rochosa

Erosão: não aparente

Drenagem: acentuadamente drenado

Cobertura vegetal original: cerrado

Cobertura vegetal atual: cana-de-Açúcar

Clima: Aw

B. Descrição morfológica

A1 0 - 30cm, vermelho (2,5 YR 4/2 úmido); argila arenosa; granular pequena fraca; friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição difusa e plana.

AB 30 - 58cm, bruno avermelhado (2,5Y 4/3 úmido); argila arenosa; subangular média fraca; friável; ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição difusa e plana.

BA 58 – 81cm, bruno avermelhado (2,5YR 4/4 úmido); argila arenosa; subangular média fraca; muito friável; ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição difusa e plana.

BW1 81 – 124cm, bruno avermelhado escuro (25YR 3/4 úmido); argila arenosa; subangular média fraca; muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição difusa e plana.

BW2 124 – 160cm, bruno avermelhado escuro (2,5YR 3/5 úmido); argila arenosa; subangular média fraca; muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso.

BW3 160 – 200cm, vermelho escuro (2,5YR 3/6 úmido); argila arenosa, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso.

A classificação dos solos em 1993 seguiu os critérios estabelecidos por CAMARGO et al. (1987). No presente estudo realizado em 2018, a classificação foi feita de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS, 2018). A Tabela 3 apresenta a correlação entre ambas nomenclaturas. Em 1993, essa condição química pedológica não era adotada oficialmente na classificação de CAMARGO et al. (1987). Entretanto, o caráter ácrico de horizontes Bw de Latossolos foi adotada em 1999, no lançamento do Sistema de Classificação dos Solos (SiBCS,1999).

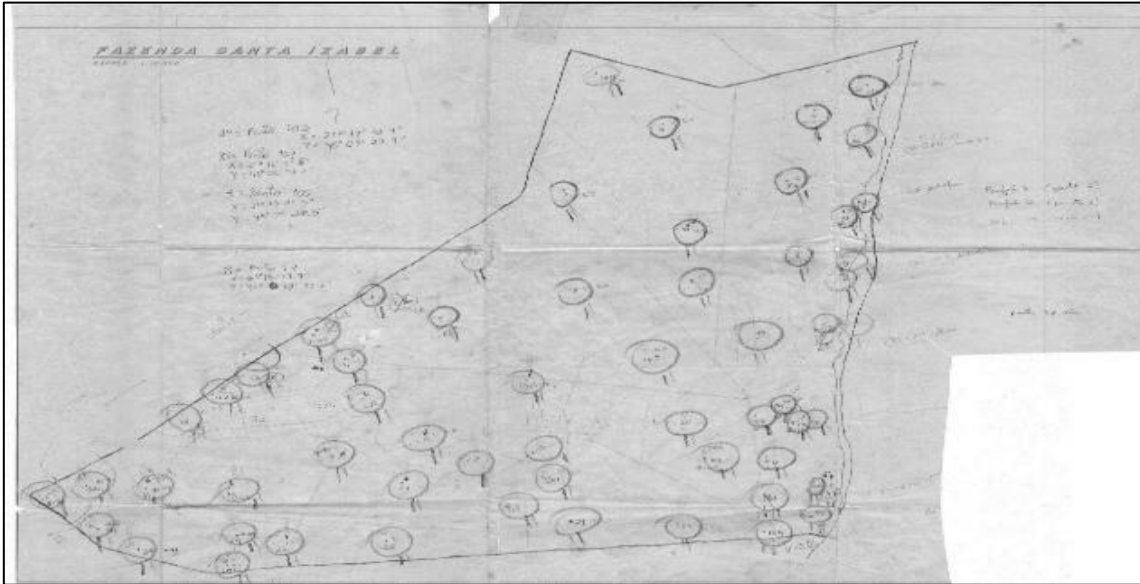
Tabela 3. Correlação entre as nomenclaturas de solos utilizadas em 1993 (CAMARGO et al., 1987) e em 2018 (SiBCS, 2018).

CAMARGO et al. (1987)	SiBCS (2018)
Latossolo Roxo eutrófico (LRe)	Latossolo Vermelho eutroférico (LVef)
Latossolo Roxo distrófico (LRd)	Latossolo Vermelho distroférico (LVdf)
NA	Latossolo Vermelho acriférico (LVwf)

NA: não adotado

A localização dos pontos amostrados no levantamento pedológico de 1993 não foram determinados pelos Sistemas de Posicionamento Global (GPS) pois ainda não havia uso dessa ferramenta na agricultura. Sendo assim, os pontos de amostragem previamente estabelecidos eram indicados nos mapas das propriedades (Figura 9).

Santa Izabel



Morumbi

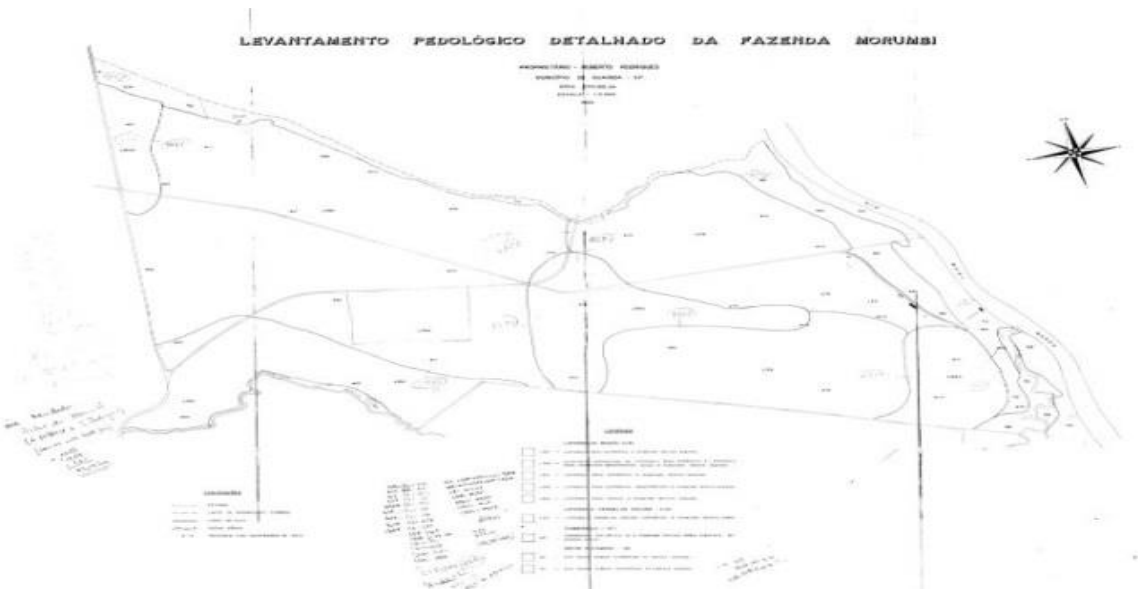
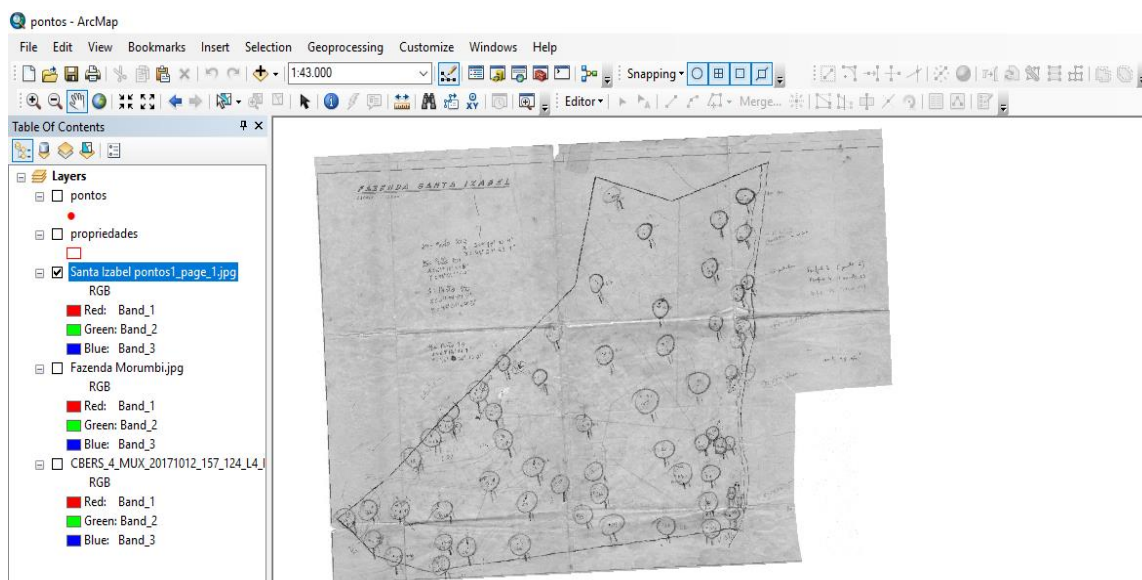


Figura 9. Ilustração dos pontos de amostragem de solos coletados no ano de 1993 nas Fazendas Morumbi e Santa Izabel.

Para atender o objetivo geral desse trabalho, buscou-se realizar a amostragem no ano de 2018 nos mesmos pontos da amostragem de 1993. Para isso, foi utilizado o programa ARCGIS (2011), para obter as coordenadas geográficas de cada ponto. A primeira etapa foi desenhar o limite georreferenciado das propriedades. Para isso utilizou-se o programa SICAR, cujo banco de dados é abastecido pelo INCRA, com auxílio da imagem de satélite CBERS4_2017, coletada no dia 12/10/2017. Os limites georreferenciados das fazendas (coloração vermelha) foram inseridos no ARCGIS (Figura 10). A próxima etapa foi a inserção dos mapas com observações feitas em 1993 no ARCGIS (

Santa Izabel



Morumbi

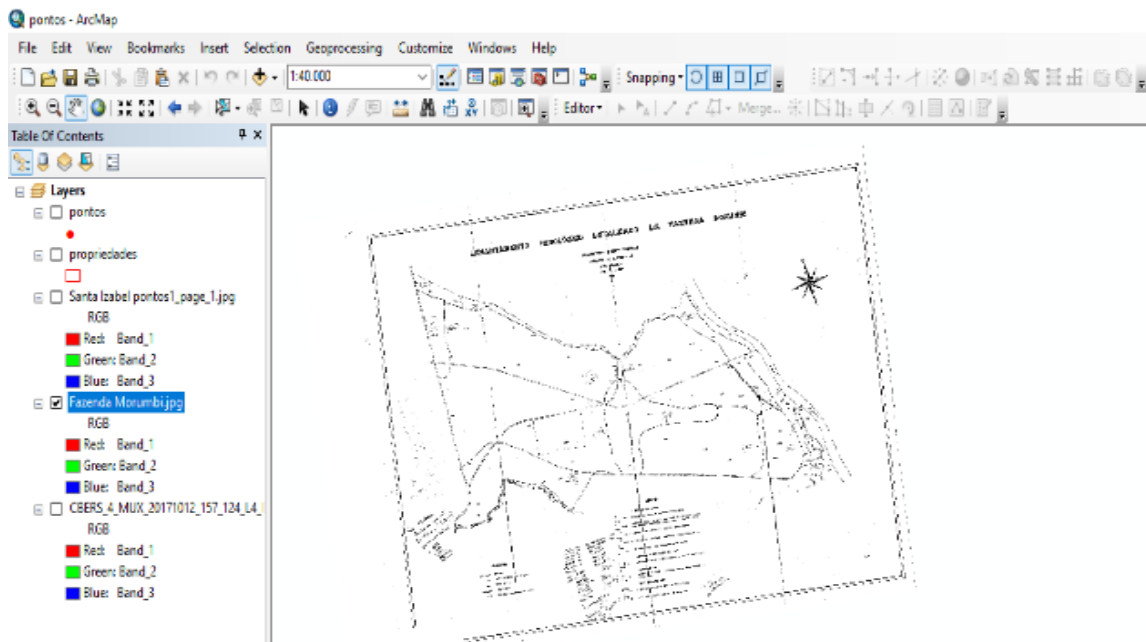
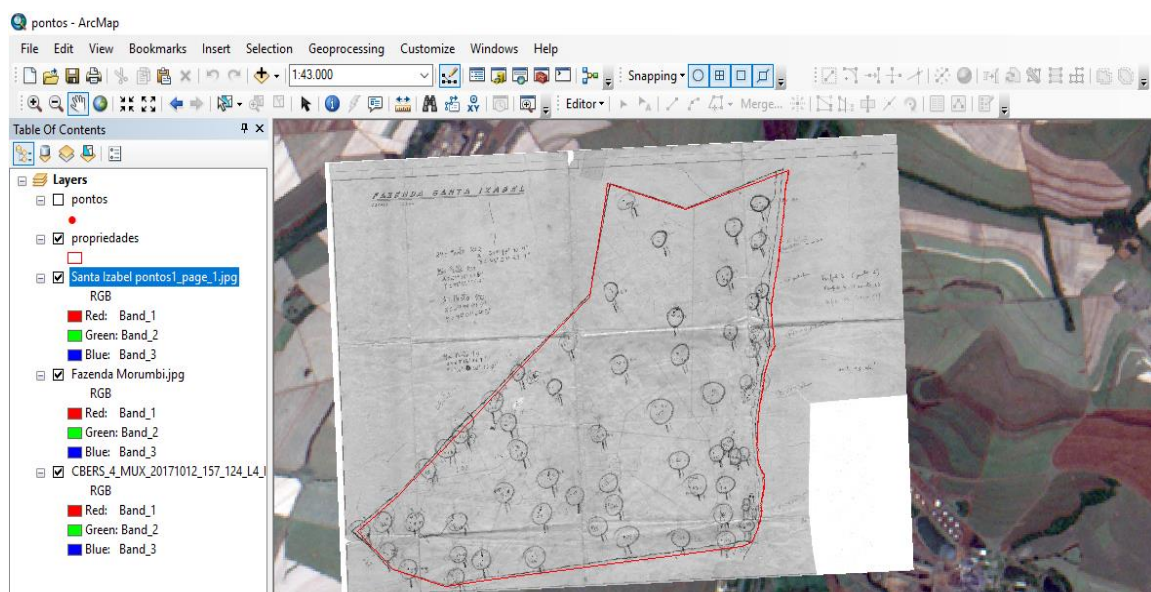


Figura 11). Os mapas escaneados das Fazendas Santa Izabel e Morumbi com as observações feitas em 1993 não estavam georreferenciados, como consequência, ao serem inseridos no ARCGIS, sua posição não coincidia com os limites georreferenciados das fazendas. Utilizando a ferramenta georeferencing no ARCGIS, foi possível colocar as imagens sem coordenadas na posição correta, conectando as margens do limite das imagens com as margens respectivas dos limites georreferenciados (Santa Izabel



Morumbi

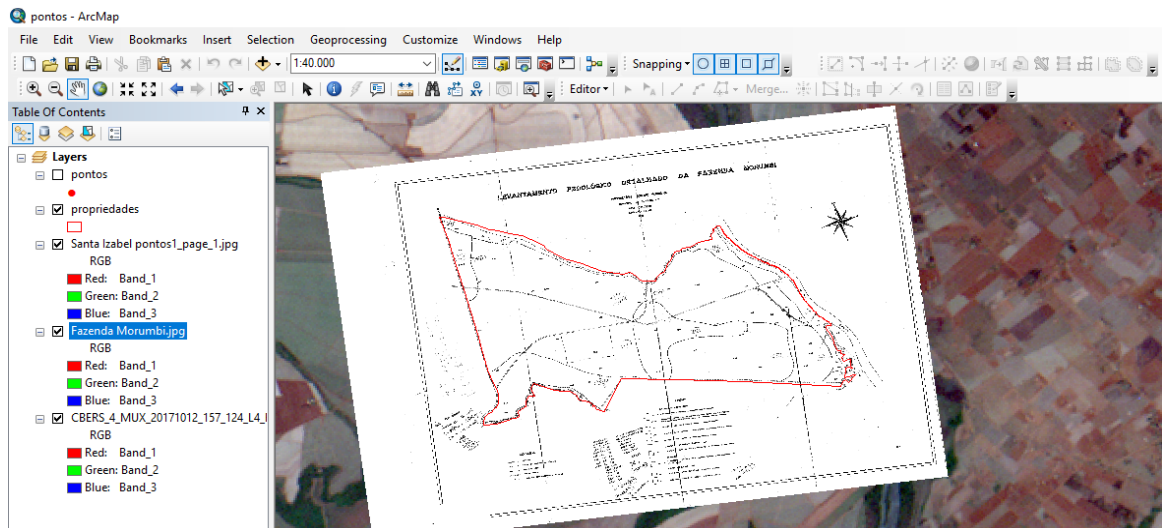
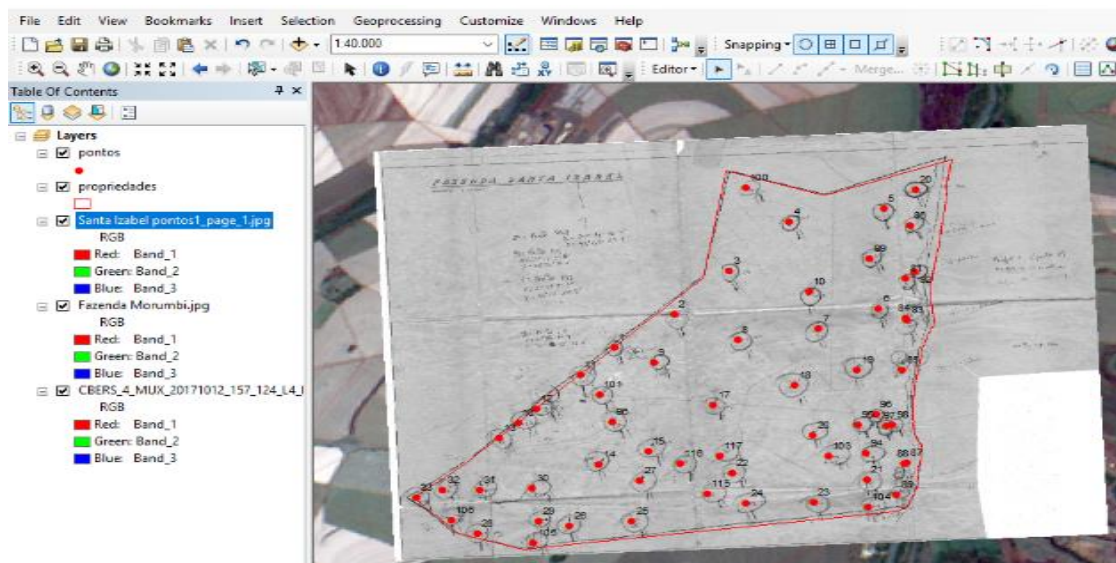


Figura 12). Com os mapas georeferenciados, foram adicionados pontos nos locais apontados nos mapas de 1993, obtendo assim as coordenadas geográficas dos pontos (Santa Izabel



Morumbi

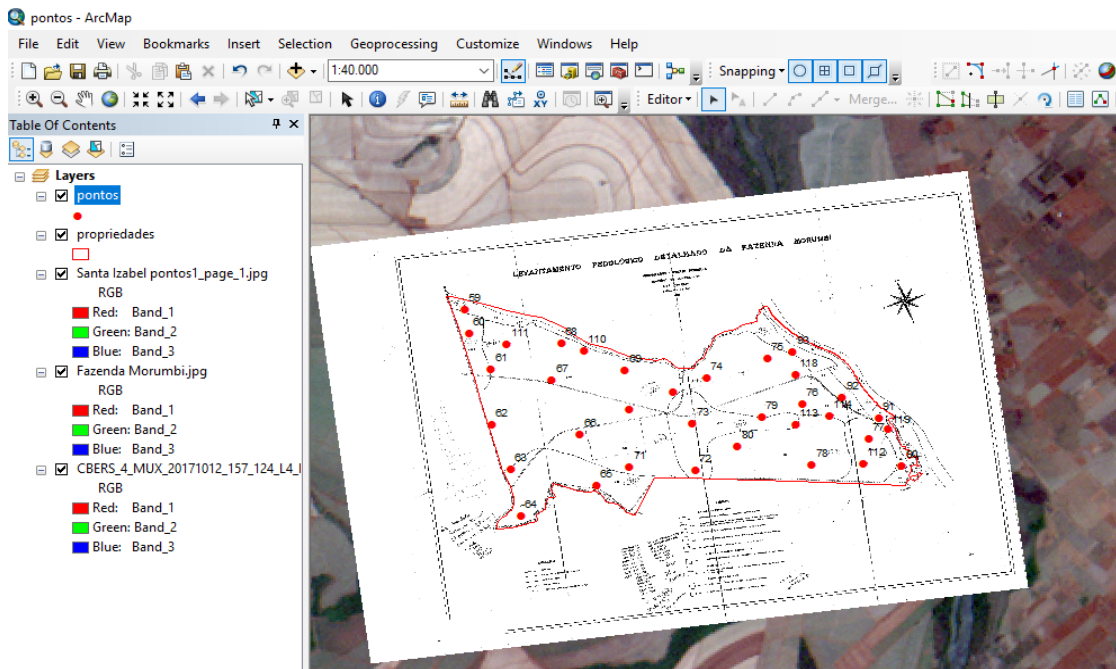
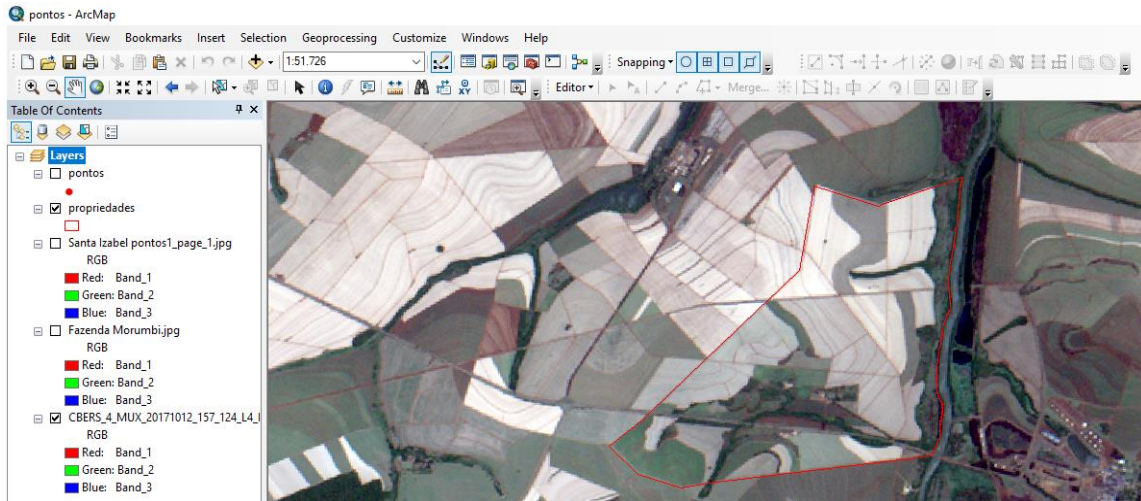


Figura 13).

Santa Izabel



Morumbi

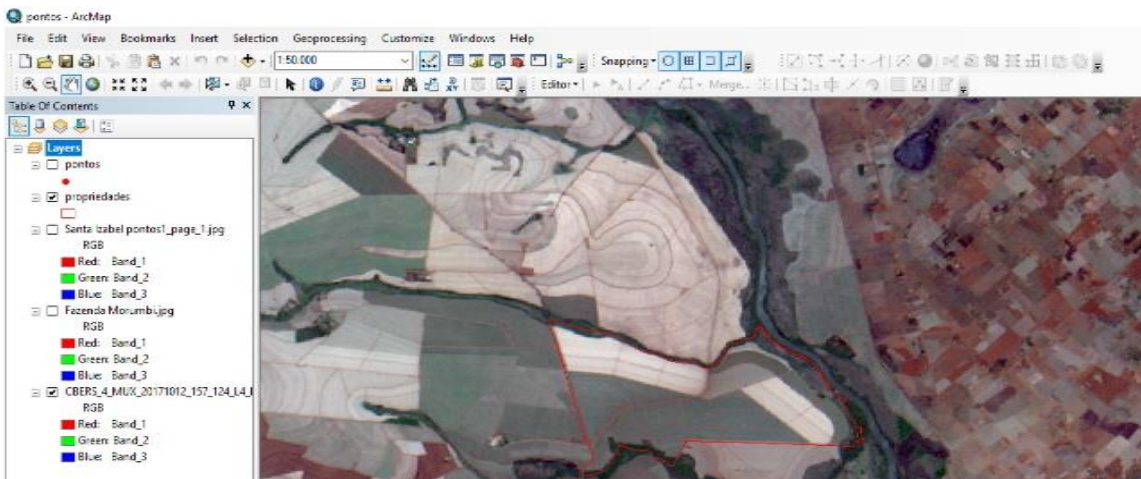
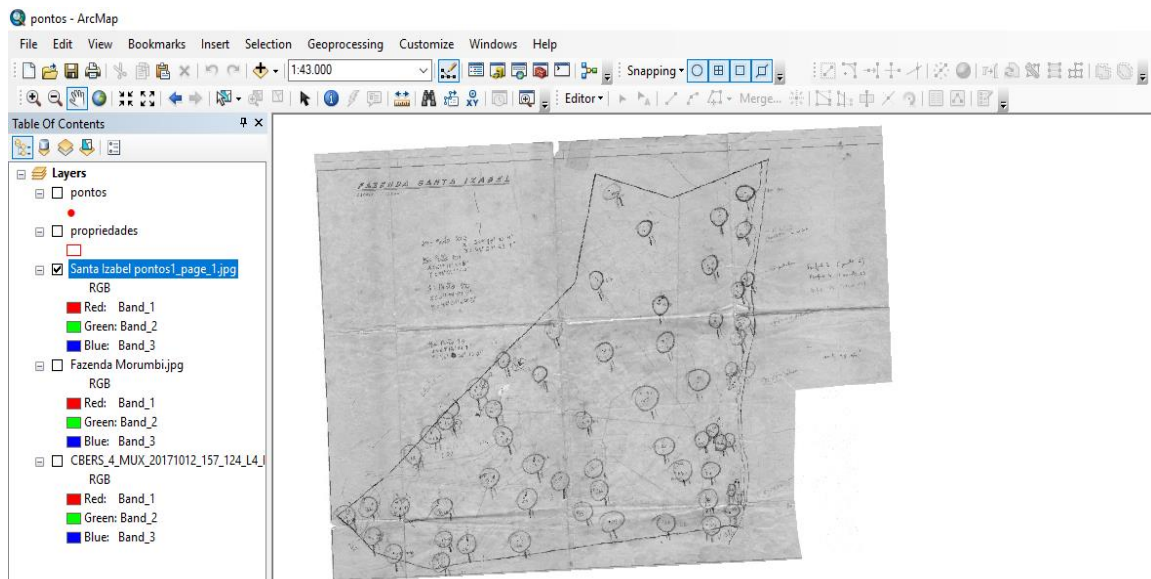


Figura 10. Ilustração dos limites das Fazendas Morumbi e Santa Izabel inseridos no programa ARCGIS, utilizando imagens de satélite do CBERS4_2017 coletada no dia 12/10/2017.

Fonte: SICAR (2017).

Santa Izabel



Morumbi

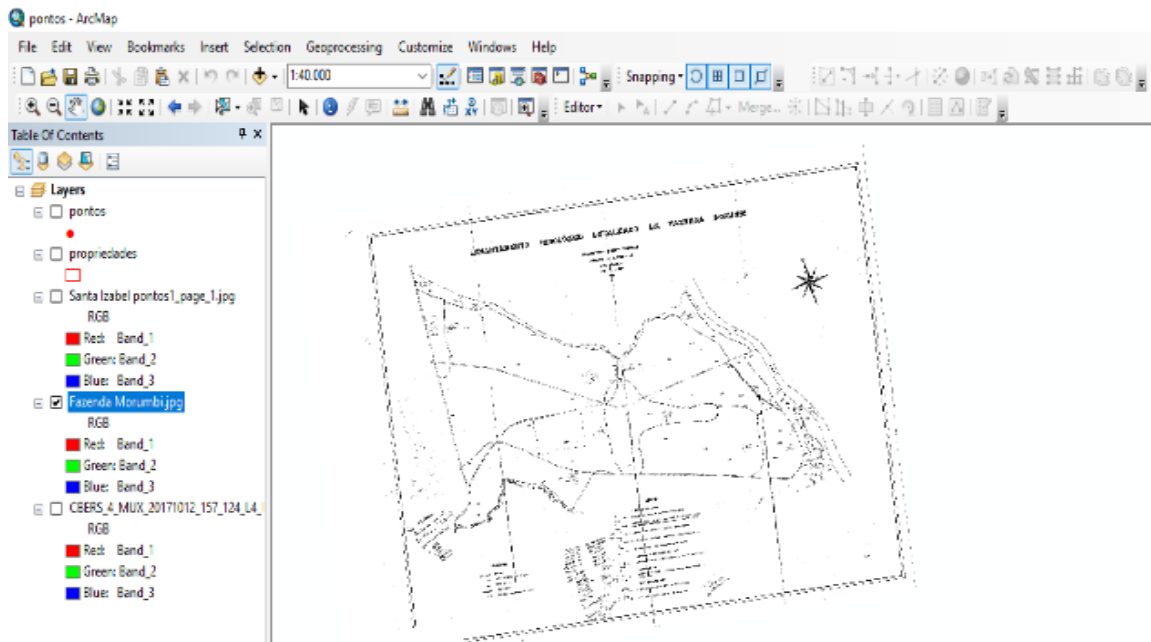
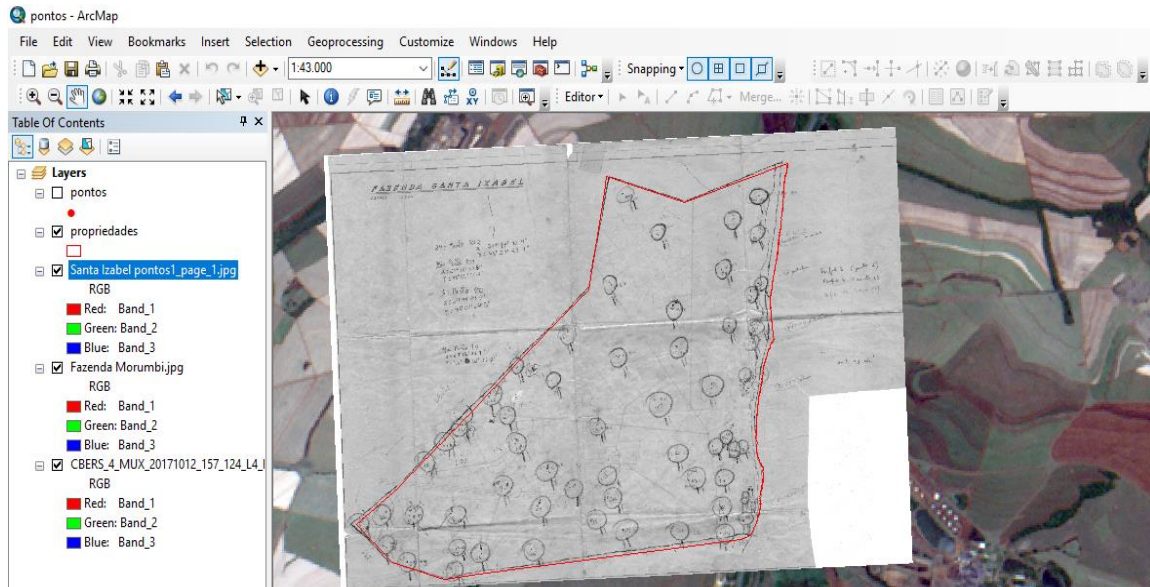


Figura 11. Ilustração dos mapas, com as localizações dos pontos amostrados em 1993 nas Fazendas Morumbi e Santa Izabel, inseridos no programa ARCGIS.

Santa Izabel



Morumbi

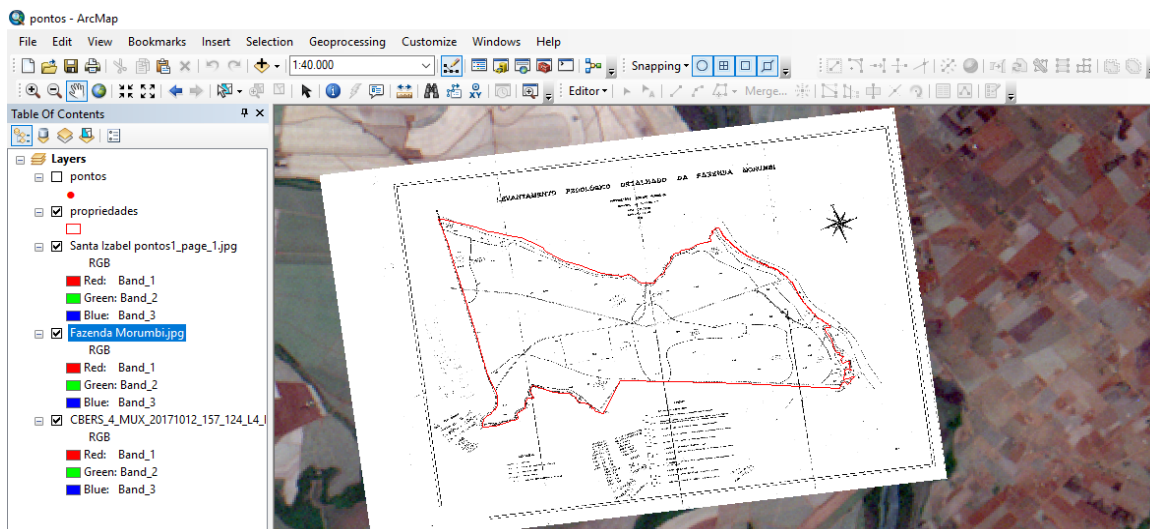
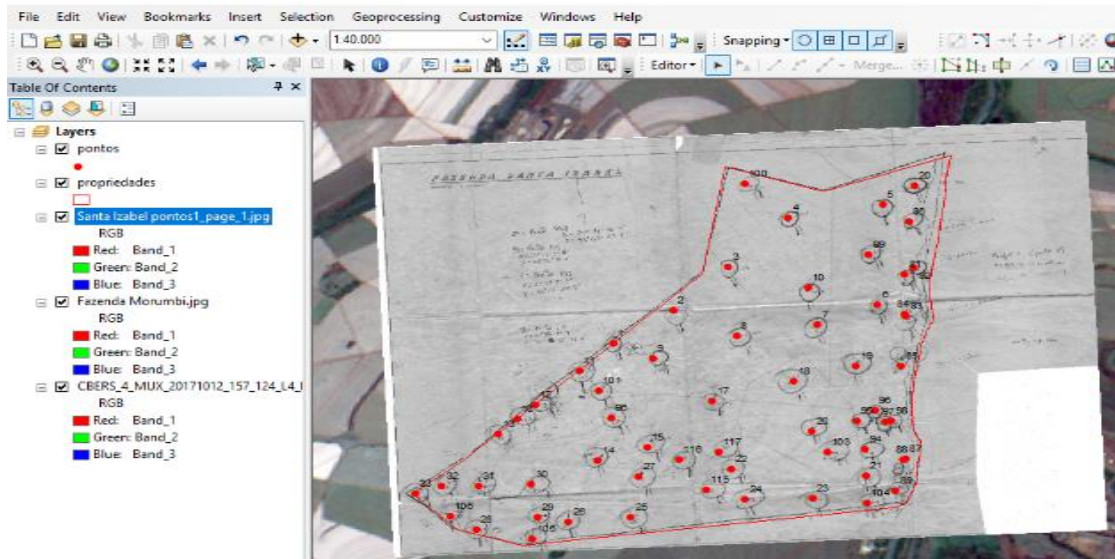


Figura 12. Ilustração da sobreposição dos mapas, com observações feitas em 1993, nos respectivos limites (coloração vermelha) das Fazendas Morumbi e Santa Izabel, inseridos no programa ARCGIS.

Santa Izabel



Morumbi

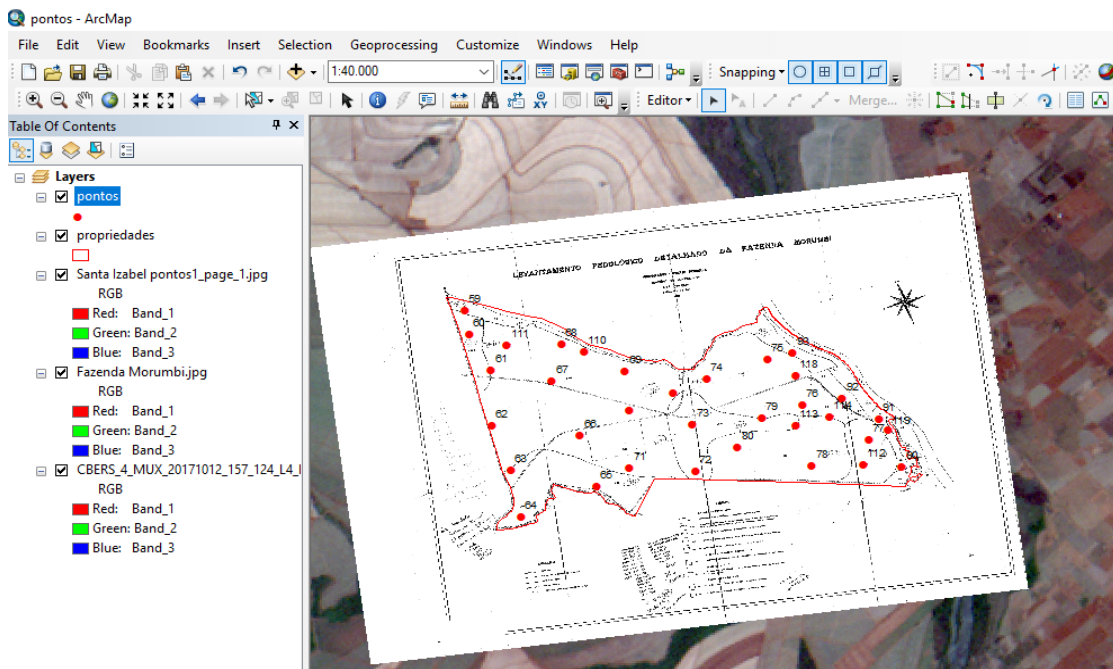


Figura 13. Ilustração da sobreposição dos mapas, com observações feitas em 1993, nos respectivos limites (coloração vermelha) das Fazendas Morumbi e Santa Izabel, e a demarcação dos pontos de amostragem no programa ARCGIS.

A Figura 14 mostra a localização da área de ocorrência de Latossolos distrófico e ácrico na Fazenda Morumbi e Latossolos eutrófico na Fazenda Santa Izabel, local determinado para atender os objetivos desse estudo.



Figura 14. Ilustração da representatividade e da localização da área estudada nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi.

Com as coordenadas geográficas, em 2018 coletaram-se amostras de solo praticamente no mesmo local de amostragem feitos em 1993, em 17 pontos da Fazenda Morumbi e 11 pontos da Fazenda Santa Izabel, nas profundidades de 0-25 cm, de 25-50 cm e de 80-100 cm. Antes de depositar as amostras de solo nas embalagens devidamente identificadas, eliminaram-se as porções de solo das laterais e do topo do trado, que poderiam conter material de outras camadas.

As amostras de solos coletadas em 2018 foram enviadas para o laboratório DMLAB, em Ribeirão Preto (SP), para execução das análises dos mesmos parâmetros e com a mesma metodologia realizadas em 1993.

Para avaliar se houve mudanças na classificação pedológica dos pontos coletados em 1993, principalmente devido a possíveis alterações químicas em subsuperfície, os atributos químicos das amostras coletadas nas profundidades de 80-100 cm foram interpretados segundo os critérios estabelecidos por SiBCS (2018). Adicionalmente,

optou-se pela interpretação conforme os critérios de PRADO (2016), que subdividiu o caráter distrófico de SiBCS (2018) pela adoção das classes mesotrófico e mesoálico (Tabela 4).

Tabela 4. Comparação de critérios de interpretação de atributos químicos de amostras de solo de subsuperfície, estabelecidos por SiBCS (2018) e por Prado (2016).

Critérios	SiBCS (2018)					PRADO (2016)						
	V ⁽¹⁾	m ⁽¹⁾	Al ⁽²⁾	RC ⁽³⁾	T ⁽³⁾	V ⁽¹⁾	SB ⁽²⁾	Ca ⁽²⁾	m ⁽¹⁾	Al ⁽²⁾	RC ⁽³⁾	T ⁽³⁾
Eutrófico	≥ 50			> 1,5		≥ 50	≥ 1,5	≥ 1,0				
Mesotrófico			----NU----			≥ 50	1,2-1,5	≥ 1,0				
Mesotrófico			----NU----			25-49	≥ 1,2	≥ 1,0			< 0,3	
Distrófico	< 50	< 50		> 1,5		< 50	< 1,2	< 1,0	< 50		< 0,3	
Ácrico				≤ 1,5*				< 1,0		0,0-0,3	≤ 1,5*	
Mesoálico			----NU----					< 1,0	15-49	0,3-0,6		
Álico		≥ 50		> 1,5				< 1,0	≥ 50	0,4-4,0		
Alítico		≥ 50	≥ 4,0	> 1,5	≥ 20			< 1,0	≥ 50	> 4,0		≥ 20
Alumínico		≥ 50	≥ 4,0	> 1,5	< 20			< 1,0	≥ 50	> 4,0		< 20

(1) Porcentagem; (2) cmol_c kg⁻¹ de solo; (3) cmol_c kg⁻¹ de argila; *para atender ao caráter ácrico, é necessário também que o pH em KCl seja maior ou igual a 5,0 ou que o valor de ΔpH (pH KCl – pH H₂O) seja positivo; NU – não utiliza o critério; V – saturação por bases; m – saturação de alumínio; Al – alumínio, RC – retenção de cátions, T – atividade de argila, SB – soma de bases, Ca – cálcio.

Embora no ano de 1993 o ácrico ainda não tivesse sido adotado como critério de classificação pedológica de solos pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, devido as especificações desse caráter, existiam trabalhos que os utilizavam (OLIVEIRA; PRADO, 1987), sendo o critério de classificação apenas apresentar valor de retenção de cátions (RC) igual ou inferior a 1,5 cmol_c kg⁻¹ de solo, onde segundo os autores solos que atendiam esse requisito tendiam a apresentar valores de ΔpH nulo ou negativo (pH em KCl ≥ pH em água). Esse critério foi usado no primeiro levantamento das fazendas, e como observado na Tabela 4, atualmente para o solo ser considerado além de atender ao critério do RC, o valor de ΔpH deve ser nulo ou negativo ou pH ≥ 5,0. Dessa forma, após avaliação dos resultados, para os solos que apresentaram valores de RC inferiores a 1,5 cmol_c kg⁻¹ de solo foram solicitados análises de pH em água e KCl.

Nas duas épocas de estudo (1993 e 2018), o teor de argila foi estimado no campo pelo pesquisador que fez o levantamento pedológico em 1993, através da sensação de pegajosidade ao tato da amostra de solo molhada, procedimento de rotina adotado no AMBICANA do IAC, projeto que qualifica os ambientes de produção voltados para a cultura da cana-de-açúcar. A Sociedade Brasileira de Ciência do Solo aponta que a determinação do teor de argila pelo método do tato é eficaz e que deve ser feita (por profissional com experiência atestada) mesmo quando é feita análise granulométrica de solo em laboratório, de modo a identificar e corrigir inconsistências em análises por erro de execução ou por imperfeições metodológicas (KER et al., 2012).

Após a classificação dos solos, foram elaborados mapas seguindo os critérios de SiBCs (2018) e de PRADO (2016) e os respectivos mapas de ambientes de produção dinâmicos de cana-de-açúcar, com os critérios de classificação de ambientes estabelecidos pelo AMBICANA (PRADO, 2016). Com os resultados do mapeamento, foi possível determinar o potencial produtivo dos solos para colheitas feitas no início (abril a 15/06), meio (16/06 a 15/09) e final de safra (a partir de 16/09).

4.1.2.2. Determinação do potencial produtivo esperado das fazendas

A classificação dos ambientes de produção foi baseada no modelo proposto pelo PRADO (2016), no programa do Instituto Agrônomo de Campinas (ProCana – Ambicana), para uma média de 5 cortes. Os Latossolos distróficos textura argilosa, Latossolos ácidos textura argilosa e Latossolos eutróficos são enquadrados nos ambientes C2-D1 (dependendo das condições químicas superficiais e subsuperficiais), D2 e B1-C2, respectivamente, quando colhidos no meio de safra (16 de junho a 15 de setembro), com respectivo potencial produtivo de 81-77, 81 e 99-92 toneladas de colmo por hectare (TCH). No início de safra (abril a 15 de junho), o seu potencial produtivo aumenta para 85-86 (Latossolo distrófico), 81 (Latossolo ácido) e 99-92 (Latossolo eutrófico) toneladas de colmo por hectare, se enquadrando respectivamente nos ambientes C1, C2 e A2-B2. Considerando a colheita no final de safra (a partir de 16 de setembro), a produtividade esperada é de 72 t ha⁻¹ no Latossolo distrófico (D2), 57 t ha⁻¹ no Latossolo ácido (F2) e 80 t ha⁻¹ no Latossolo eutrófico (C2).

A determinação do potencial produtivo da fazenda foi dividida em duas etapas:

Etapa 1 – Influência do tipo de solo na produtividade de cada fazenda:

- Calculou-se qual o potencial produtivo em função dos tipos de solos que prevalecem nas fazendas e suas áreas de ocorrência (Detalhado no tópico 5.6). Como na Morumbi foram constatados dois tipos de solos e na Santa Izabel apenas um tipo, as equações que representam o potencial de produtivo em função do tipo de solo foram:

Morumbi:

$$Is-p = \frac{PPld \times Ald}{100} + \frac{PPlw \times Alw}{100}$$

Santa Izabel:

$$Is-p = \frac{PPle \times Ale}{100}$$

onde:

Is-p = Influência do tipo de solo na produtividade

PPld = Potencial produtivo do Latossolo distrófico na média de 5 cortes (TCH₅)

Ald = Área de ocorrência (%) do Latossolo distrófico

PPlw = Potencial produtivo do Latossolo ácido na média de 5 cortes (TCH₅)

Alw = Área de ocorrência (%) do Latossolo ácido

PPle = Potencial produtivo do Latossolo eutrófico na média de 5 cortes (TCH₅)

Ale = Área de ocorrência (%) do Latossolo eutrófico

Etapa 2 – Influência da época de corte e do tipo de solo na produtividade:

- Como abordado nesse trabalho, a época de colheita influencia diretamente o potencial produtivo do ambiente, tornando esse sistema dinâmico. Foi estimado a influência da época de corte e do tipo de solo na produtividade através da relação do percentual médio de áreas colhidas no início (abril a 15 de junho), meio (16 de junho a 15 de setembro) e final de safra (a partir de 16 de setembro) para cada Fase de manejo e de cada fazenda (Detalhado no tópico 5.4) com a influência do tipo de solo na produtividade (Is-p) de cada fazenda calculados na Etapa 1, obtendo assim a produtividade esperada para cada Fase de manejo, da seguinte forma:

$$I_{ec+s-p} = \frac{I_{s-p} \times A_i}{100} + \frac{I_{s-p} \times A_m}{100} + \frac{I_{s-p} \times A_f}{100}$$

onde:

I_{ec+s-p} = Influência da época de corte e do tipo de solo na produtividade

I_{s-p} = Influência do tipo de solo na produtividade

A_i = Área colhida no início de safra (%)

A_m = Área colhida no meio de safra (%)

A_f = Área colhida no final de safra (%)

4.1.2.1. Avaliação das alterações da fertilidade da camada arável do solo

Foram disponibilizados os resultados das análises para fins de fertilidade do solo, feitas de 1994 a 2018 nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi. Diferentemente da amostragem feita para fins de levantamento a partir da avaliação pedológica (descrita no tópico 4.1.2.1), a amostragem para fins de fertilidade do solo não foi pontual e ocorreu na camada superficial do solos (0-20 cm). Os talhões das propriedades foram divididos em grids de diferentes tamanhos, que variavam em cada ano, onde foram coletadas uma amostra central e sub-amostras dentro de cada grid. As sub-amostras foram homogeneizadas para a composição da amostra representativa de cada talhão, minimizando a alta variabilidade espacial dos solos.

Os teores de P, Ca, Mg, K e M.O. e os valores de capacidade de troca de cátions total (CTC_t), de soma de bases (SB) e de saturação por bases (V%), cuja exigência pelas plantas é elevada, atingem o nível crítico quando classificados em “alto” ou “muito alto”,

enquanto os atributos do solo que normalmente indicam condições prejudiciais às plantas, tais como o teor de Al e o valor de saturação por Al (m%), ou que representam menor disponibilidade dos nutrientes, tais como os valores de pH, atingem seu nível crítico quando classificados em “baixos” ou “muito baixos”. Os critérios para classificação foram estabelecidos segundo RAIJ et al. (1997), TOMÉ JR. (1997) e ALVAREZ et al. (1999) (Tabela 5).

Tabela 5. Critérios de classificação dos atributos químicos utilizados para a avaliação da fertilidade do solo.

Classe	Ca ^A	Mg ^A	K ^A	Al ^B	H+Al ^C	SB ^C	CTC _t ^C	V ^A	m ^B	pH ^A	MO ^B	P _{res} ^A
Muito baixo			≤ 0,07		≤ 1,0	≤ 0,6	≤ 1,6	≤ 25		> 6,0		≤ 6
Baixo	≤ 0,3	≤ 0,4	0,08-0,15	≤ 0,4	1,1-2,5	0,7-1,8	1,7-4,3	26-50	≤ 15	5,6-6,0	< 15	7-15
Médio	0,4-0,7	0,5-0,8	0,16-0,30	0,5-1,5	2,6-5,0	1,9-3,6	4,4-8,6	51-70	16-34	5,1-5,5	15-25	16-40
Alto	> 0,7	> 0,8	0,31-0,60	> 1,5	5,1-9,0	3,7-6,0	8,7-15,0	71-90	35-50	4,4-5,0	> 25	41-80
Muito alto			> 0,60		> 9,0	> 6,0	> 15,0	> 90	> 50	≤ 4,3		> 80

A – Raij et al. (1997), B - Tomé Jr. (1997), C - Alvarez et al. (1999), Ca – cálcio (cmol_c dm⁻³), Mg – magnésio (cmol_c dm⁻³), K – potássio (cmol_c dm⁻³), Al – alumínio (cmol_c dm⁻³), H+Al – Hidrogênio + Alumínio - acidez potencial (cmol_c dm⁻³), SB – soma de bases (cmol_c dm⁻³), CTC_t – capacidade de troca catiônica total (cmol_c dm⁻³), V – saturação por bases (%), m – saturação por alumínio (%), pH – pH em CaCl₂, MO – matéria orgânica (g dm⁻³), P_{res} – fósforo extraído por resina trocadora de ânions (mg dm⁻³)

4.2. Levantamento do histórico do manejo das áreas de cultivo com cana-de-açúcar

Para o levantamento de informações sobre o histórico de manejo das Fazendas Santa Izabel e Morumbi no período de 1993 a 2018, utilizou-se o método da entrevista qualitativa pré-estruturada (SOARES et al., 2009), aplicada ao proprietário e à equipe de gestão das fazendas, versando sobre os seguintes itens:

- a) Sistemas de cultivos: convencional, cultivo mínimo, plantio direto, rotação de culturas, adubação verde (consorciado e/ou rotacionado);
- b) Técnicas de preparo e de conservação do solo: (i) operações - aração, gradagem, subsolagem; (ii) frequência;
- c) Plantio: (i) sistemas - convencional, mudas pré-brotadas (MPB), método interrotacional ocorrendo simultaneamente (meiosi); (ii) profundidade de sulcação; (iii) distanciamento entre linhas; iv) tipos de espaçamento - uniforme, duplo alternado e combinado; v) épocas

- cana de ano e meio (cana de 18 meses), cana de ano (cana de 12 meses) e plantio de inverno;

d) Variedades: (i) instituição de pesquisa de origem – Planalsucar/RIDESA (RB), Copersucar (SP)/Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) e Instituto Agronômico de Campinas (IAC); (ii) maturação - tardio, médio, precoce e super precoce; (iii) exigência de solos (muito exigentes, exigentes, pouco exigentes e não exigentes); (iv) tolerância à seca e exigência em água; (v) brotação e perfilhamento; (vi) complementares – aptidão para colheita mecanizada, resposta a maturadores, resistência à pragas e doenças;

e) Uso de corretivos, condicionadores e fertilizantes: (i) natureza – calcário, gesso, fertilizantes minerais simples e formulados e fertilizantes organominerais; (ii) doses e frequência de aplicação;

f) Uso de fontes alternativas de nutrientes: (i) origem - vinhaça, torta de filtro (*in natura*, compostada e/ou enriquecida), cinza de caldeira e da queima do bagaço, lodo de esgoto, esterco (bovinos, aves, suínos), glutamato monossódico (agifer); (ii) doses e frequência de aplicação;

g) Colheita: (i) corte – manual, semi-mecanizado e mecanizado; (ii) despalha – manual, fogo e mecanizada (manutenção de palhada no campo); época de colheita;

h) Número de cortes: número de ciclos de cana-soca;

i) Longevidade e reformas de canaviais;

j) Produtividade ($t\ ha^{-1}$): ciclos de cana-planta e de cana-soca;

k) Ocorrência de pragas e doenças: tipos de pragas, ano de ocorrência, nível de dano econômico.

4.2.1. Divisão da produtividade em Fases de manejo

A produtividade em toneladas de colmos por hectare (TCH) foi considerada a informação quantitativa central a ser avaliada. Este trabalho examinou informações qualitativas e quantitativas originadas dos registros mantidos pela equipe de gerência das propriedades (banco de dados), de forma que não houve resultados provenientes de experimentos com maior rigor científico. Dessa forma, houve dificuldades para estabelecer médias de produtividade para cada ano-safra, em função da ausência de repetições. Optou-se pela subdivisão do período total em estudo (1990 a 2018), que conteve 29 safras de cana-de-açúcar (n total =29).

Diferentes fases do manejo da cultura da cana-de-açúcar foram identificadas a partir de práticas agronômicas consideradas determinantes para alterações da produtividade. Os fatores relevantes utilizados na distinção das fases foram comuns às Fazendas Santa Izabel e Morumbi, uma vez que as propriedades foram submetidas simultaneamente à adoção de práticas inovadoras de manejo ao longo dos anos. A seleção dos eventos para o estabelecimento das fases foi tecnicamente subsidiada à luz do conhecimento agrônomo. A distinção de fases permitiu o cálculo da produtividade média das fazendas e sua interpretação estatística a partir do número n de safras contido em cada fase.

De acordo com o histórico do manejo das Fazendas Santa Izabel e Morumbi (Tópico 5.1), admitiu-se que as propriedades apresentaram três momentos distintos de condução dos canaviais, que resultaram em mudanças na produtividade:

- Fase I: safras 90/91, 91/92, 92/93, 93/94, 94/95 e 95/96 (n = 6 safras).
- Fase II: safras 96/97, 97/98, 98/99, 99/00, 00/01, 01/02, 02/03, 03/04, 04/05, 05/06 e 06/07 (n = 11 safras).
- Fase III: safras 07/08, 08/09, 09/10, 10/11, 11/12, 12/13, 13/14, 14/15, 15/16/, 16/17, 17/18, 18/19 (n = 12 safras).

A substituição do uso dos arados de disco e de aiveca pelo uso do subsolador, além da extinção da colheita com despalha a fogo, foram práticas agronômicas que determinaram o fim da Fase I e o início da Fase II, a partir da safra 96/97.

A partir da safra 07/08, houve a adoção dos conceitos de ambientes de produção na definição das épocas de colheita associado ao manejo varietal, o que pode ter determinado o final da Fase II e o início da Fase III. Na fase III, a alocação varietal mais adequada teve efeito determinante nos acréscimos de produtividade. Além disso, trata-se de período de importante desfrute dos benefícios da colheita mecanizada sem queima por um período considerado associado a interação de diversas práticas agrícolas como o controle de pragas.

A eliminação de adversidades climáticas quanto a precipitação média mensal normal, detalhada no tópico 4.1.1.1, resultou na desconsideração das produtividades das safras coincidentes aos anos atípicos, gerando uma nova divisão de Fases de manejo, onde esses valores foram submetidos a análise estatística, conforme detalhado no tópico 4.3.

4.3. Forma de análise dos resultados

Os resultados de produtividade de cada fase e de precipitação média (mm ano^{-1}) foram submetidos à análise estatística exploratória e ao diagnóstico de influência global (COOK, 1975), que permite a detecção de valores influentes (outliers) e sua exclusão fundamentada do conjunto de dados. A técnica por box-plot (diagramas de caixas) considerou o primeiro quartil (Q1, valor inferior acima do qual estão contidos 75% do dados), o segundo quartil (Q2, que representa a mediana) e o terceiro quartil (Q3, valor superior abaixo do qual estão contidos 75% do dados) possibilitando a identificação de outliers, que não pertencem à população.

Os outliers foram identificados e excluídos, permitindo a distribuição normal dos resultados e evitando o comprometimento da análise estatística da produtividade de cana-de-açúcar. A distribuição normal foi avaliada pelo teste de normalidade de Shapiro-Wilk (1965), a 5% de significância. Os resultados de produtividade da cana-de-açúcar foram submetidos à análise de variância. Havendo significância estatística a 5% pelo teste F, as médias de produtividade foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os valores médios de Ca, Mg, K, H+Al, Al, SB, CTC_t, V(%), m(%), pH em CaCl₂, P_{RESINA} e M.O., descritos nas análises de solos da camada arável de 1994 a 2018, foram agrupados conforme a classificação proposta por RAIJ et al. (1997), TOMÉ JR. (1997) e ALVAREZ et al. (1999) e examinados por gráficos do tipo box-plot. Adicionalmente, os resultados foram submetidos à análise de variância e, quando significativos pelo teste F ($p < 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). A avaliação dos atributos químicos de fertilidade do solo possibilitou a determinação do tempo necessário para que cada atributo atingisse o nível crítico (valor acima do qual produtividades relativas acima de 90% são alcançadas).

Todos os procedimentos estatísticos foram feitos usando o software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2017).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Histórico resumido do manejo das áreas cultivadas com cana-de-açúcar

A Tabela 6 foi obtida de acordo com o levantamento de banco de dados e da entrevista e relaciona o tipo de manejo utilizado em cada ano-safra, no período de 1993 a 2018. Os manejos utilizados nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi no período de 1993 a 2018 foram similares, com priorização de conceitos técnicos associados, principalmente, com métodos sustentáveis quanto ao manejo varietal e épocas de corte em função dos ambientes de produção de cada fazenda.

Inicialmente, o preparo de solo foi convencional, com uso de arados de disco seguido de arados de aiveca. Nos últimos 20 anos, foi adotada a subsolagem, a minimização das operações com grades e as práticas de preparo reduzido, usando rotacionamento com soja. Há aproximadamente 10 anos, teve início a retirada das soqueiras com eliminador em função da incidência de pragas de solo (*Sphenoforus* sp). Porém, a frequência dessa prática diminuiu devido ao tratamento das soqueiras, que aumentou a longevidade dos canaviais, geralmente com mais de oito cortes nos últimos anos.

No período considerado, de 1993 a 2018, o plantio de cana-de-açúcar foi praticamente manual, mudando para mecanizado somente em 2017. Nos últimos cinco anos, foram utilizadas mudas pré-brotadas na formação de viveiros no sistema cantosi, com 50 cm de espaçamento entre plantas na linha. De 1993 a 1998, o espaçamento das entrelinhas adotado foi de 1,35 m, mudando para 1,50 m a partir desse período. O plantio nas fazendas predominou de fevereiro a abril, conhecido como cana de ano e meio.

As variedades utilizadas foram originadas dos Programas de Melhoramento Genético da UFSCar, do IAC e do CTC. A princípio, o parâmetro primordial para a definição das variedades foi a curva de maturação. A partir de 2007, o conceito de ambientes de produção, incluindo o recente critério do “terceiro eixo” do Centro de Cana do IAC, passou a ser utilizado. Com isso, a colheita das soqueiras passou a ser feita em função da deficiência hídrica, com colheita antecipada em solos mais ressecados e uso de variedades super precoces, como a RB 85-5156, que na fazenda Morumbi na safra 2017/2018 tem um percentual de aproximadamente 50% (Tabela 11 no tópico 5.4). A

aplicação de maturadores, visando o manejo da colheita, foi praticamente suprimida, sendo utilizada apenas nos anos onde as chuvas se prolongaram mais nos períodos de colheita ou de pré-colheita.

A calagem foi feita pelo método da saturação por bases do IAC. As práticas de gessagem e de fosfatagem ocorreram com aplicação em área total, com posterior adoção da distribuição com taxa variável, em 1999. Com frequência trienal desde 1993, os produtores realizaram calagem e gessagem nas áreas (Tabela 6) nas ocasiões da reforma do canavial e dos segundo, quinto e oitavo cortes. A quantidade de calcário aplicada variou em função das análises de solos, onde os produtores buscavam elevar a saturação por bases (V) entre 60 a 70%. A quantidade de gesso aplicada variou de 0,5 a 1,5 t ha⁻¹.

A reposição de nutrientes foi feita com base nas recomendações do Boletim 100, levando em consideração a produtividade esperada e a extração e exportação de nutrientes pelas plantas, seguindo os resultados das análises de solos e de tecido vegetal (Raij et al. 1997). Foram utilizados fertilizantes minerais e vinhaça *in natura*. Houve eventual adição de torta de filtro, esterco bovino ou cama de frango, com aplicação baseada nas análises de solo e nas produtividades obtidas e esperada. A partir de 2015 não houve mais adição de vinhaça. As aplicações foram feitas uma única vez nos ciclos de cana-soca e no plantio, com adoção recente de parcelamento.

A colheita mecanizada ocorre desde 1992, sendo que desde 1997 mais de 90% da cana-de-açúcar passou a ser colhida mecanicamente e sem despalha a fogo.

Com a colheita de cana crua, houve aumento da infestação por *Maharnava* sp., *Diatraea saccharalis* e *Sphenoforus* sp. Houve relato de incidência de ferrugens alaranjada em ambas propriedades, ocasionando a substituição das variedades susceptíveis.

Tabela 6. Práticas de manejo utilizadas no cultivo da cana-de-açúcar nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi durante o período de 1993 a 2018.

Manejo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1993	X	X			X			X		X		X		X				X	X	X		X	
1994	X	X			X			X		X		X		X				X	X	X		X	
1995	X	X			X			X		X		X		X				X	X	X		X	
1996	X	X			X			X		X		X		X				X	X	X		X	
1997			X		X			X		X		X		X				X	X	X		X	X
1998			X		X			X		X		X		X				X	X	X		X	X
1999			X		X			X		X	X		X				X	X	X	X		X	X
2000			X		X			X		X	X		X				X	X	X	X		X	X
2001			X		X			X		X	X		X				X	X	X	X		X	X
2002			X		X			X		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
2003			X		X			X		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
2004			X		X			X		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
2005			X		X			X		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
2006			X		X			X		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
2007			X		X	X		X		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
2008			X		X	X		X		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
2009			X		X	X		X		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
2010			X		X	X		X		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
2011			X		X	X		X		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
2012			X		X	X		X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
2013			X		X	X		X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
2014			X		X	X		X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
2015			X		X	X		X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
2016			X		X	X		X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
2017			X		X	X	X	X		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
2018			X		X	X	X	X		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X

1-Arado de disco; 2-Arado de aiveca; 3-Subsolador; 4-Preparo reduzido; 5-Rotação com soja; 6-Eliminação de soqueira; 7-Plantio mecanizado; 8-Plantio manual; 9- Plantio com MPB; 10-Espaçamento 1,35 m; 11-Espaçamento 1,50 m; 12-Cana de ano e meio; 13-Uso de maturadores; 14-Calagem; 15-Gessagem; 16-Fosfatagem; 17-Aplicação em taxa variável; 18-Fertilizante mineral; 19-Vinhaça; 20-Aplicação única; 21-Aplicação parcelada; 22-Colheita mecanizada; 23-colheita sem despalha a fogo.

5.2. Adversidades climáticas

A precipitação pluviométrica é considerada fator determinante para a produtividade da cana-de-açúcar. No período de 1990 a 2017, houve eventos de precipitação inconsistentes com a normal climática, cujos valores foram considerados estatisticamente anômalos ou outliers por não obedecerem ao padrão do conjunto de dados ou da população ao qual eles pertencem. Os outliers (Figura 15) identificados nas safras 95/96, 97/98, 02/03, 07/08, 09/10, 10/11, 11/12, 12/13 e 17/18 foram desconsiderados da avaliação da produtividade das Fazendas Santa Izabel e Morumbi, por significarem ou excesso de chuva (estatisticamente superior a precipitação média mensal normal - 95/96 – 668 mm em fevereiro de 1995; 97/98 – 155 mm em junho de 1997; 02/03 – 106 mm em agosto de 2002; 07/08 - 162 mm em julho de 2007; 09/10 - 204 mm em agosto de 2009; 10/11 – 446 mm em março de 2011; 11/12 – 264 mm em outubro de 2011; 12/13 - 180 mm em junho de 2012) ou déficit hídrico (estatisticamente inferior a precipitação média mensal normal - 17/18 – 69 mm em dezembro de 2017).

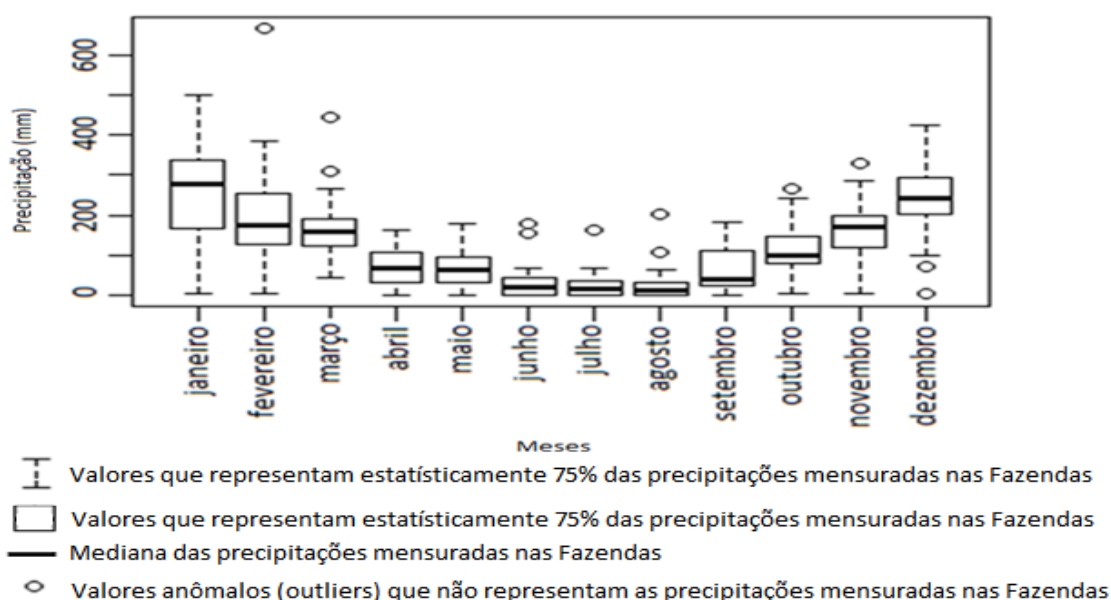


Figura 15. Gráfico boxplot dos valores médios de precipitação mensal da Fazenda Morumbi no período de 1990 a 2017; ○ - valores anômalos (outliers).

As precipitações mensais das Safras 93/94, 98/99 e 13/14, embora não tenham sido identificadas como outliers (Figura 15), apresentaram valores que influenciaram a resposta da cultura quanto a produtividade, sendo desconsideradas desse estudo.

A Safra 93/94 apresentou chuvas abaixo da média histórica em novembro de 1993 (72 mm) e em fevereiro de 2014 (50 mm) (Figura 16), épocas caracterizadas como chuvosas na região, refletindo negativo na produtividade da cana-de-açúcar (Figura 20 apresentada no tópico 5.3). De acordo com PIRES et al. (2008), a redução de umidade de água no solo dificulta a absorção de água pela cultura, principalmente nas horas de maior demanda atmosférica, onde a planta perde mais água do que extrai do solo, afetando os processos de expansão e divisão celular, translocação da seiva entre o sistema radicular e as folhas, causando redução na produção de fotoassimilados e da fotossíntese pelo fechamento dos estômatos. A deficiência hídrica afeta a cana-de-açúcar em todos os estádios de desenvolvimento, principalmente no estabelecimento da cultura e no início de desenvolvimento vegetativo, por reduzir o desenvolvimento do sistema radícula e a emissão e sobrevivência dos perfilhos, afetando diretamente a produtividade.

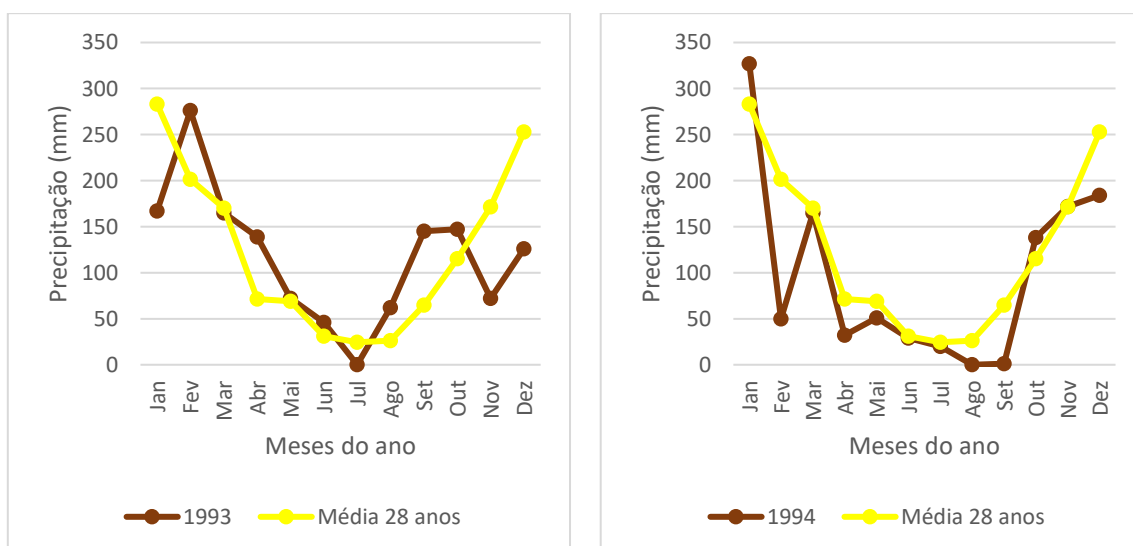


Figura 16. Comparativo da precipitação média mensal normal (mm) de 1990 a 2017 (coloração amarela) com a precipitação média mensal (mm) dos anos de 1993 (esq.) e 1994 (dir.).

Ocorreu chuva acima da média histórica em janeiro de 1999 (499 mm) (Figura 17), com valor bem próximo ao limite superior de detecção de outliers (Figura 15). O desempenho da Safra 98/99 foi atribuído à este evento de precipitação, devido à dificuldade de associar o aumento de produtividade ao manejo varietal ou do solo. A resposta da cana-de-açúcar para umidade do solo é maior nos períodos vegetativos e início da formação da produção, pois ocorre redução da atividade foliar e a planta apresenta menor resposta a radiação solar (PIRES et al., 2008).

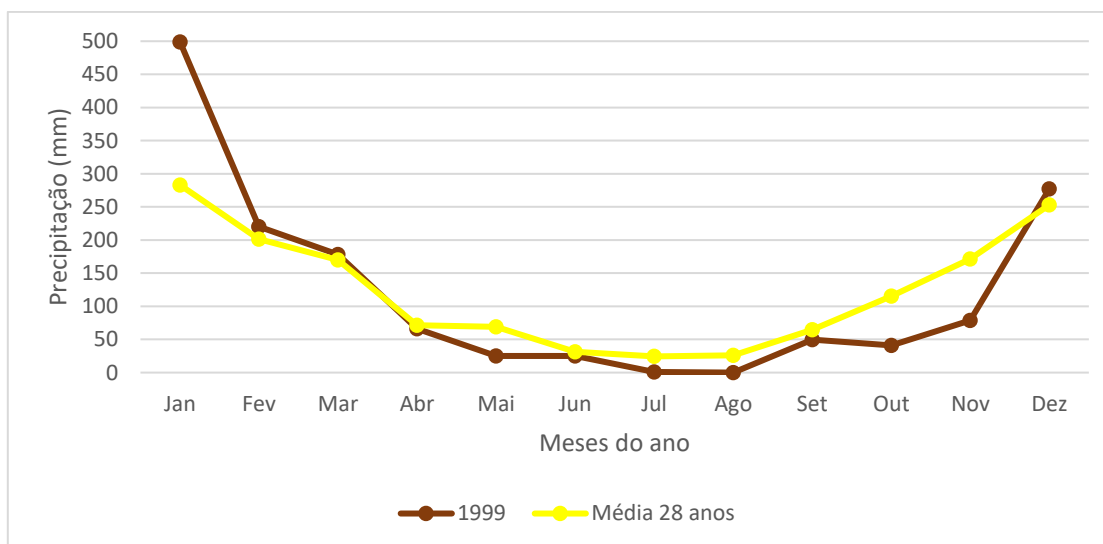


Figura 17. Comparativo da precipitação média mensal normal (mm) de 1990 a 2017 (coloração amarela) com a precipitação média mensal (mm) do ano de 1999.

Em 2013 (Safra 13/14) também houve ocorrência de chuvas acima da média histórica nos meses de março (239 mm), maio (126 mm), junho (65 mm), setembro (125 mm), novembro (285 mm) e dezembro (426 mm) (Figura 18). Entretanto, o aumento significativo no potencial produtivo da cultura se deveu mais à distribuição regular do que à quantidade de precipitação, pois a safra foi caracterizada pela diminuição das adversidades normalmente ocasionadas pelo típico período seco.

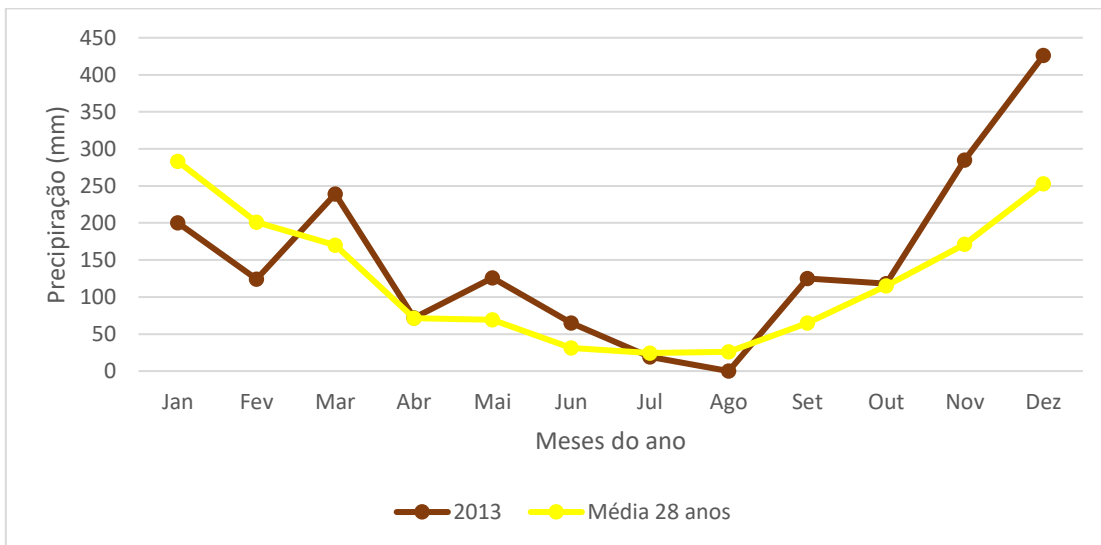


Figura 18. Comparativo da precipitação média mensal normal (mm) de 1990 a 2017 (coloração amarela) com a precipitação média mensal (mm) do ano de 2013.

Dessa forma, as médias de produtividade de cada fase foram calculadas a partir das seguintes safras: Fase I - 90/91, 91/92, 92/93 e 94/95 (n = 4); Fase II - 96/97, 99/00, 00/01, 01/02, 03/04, 04/05, 05/06 e 06/07 (n = 8); Fase III - 08/09, 14/15, 15/16/, 16/17, 18/19 (n = 5).

5.3. Histórico de produtividade de cana-de-açúcar

A Figura 19 apresenta a produtividade de cana-de-açúcar das Fazendas Santa Izabel e Morumbi, no período de 1990 a 2018, referente às safras 90/91 a 18/19.

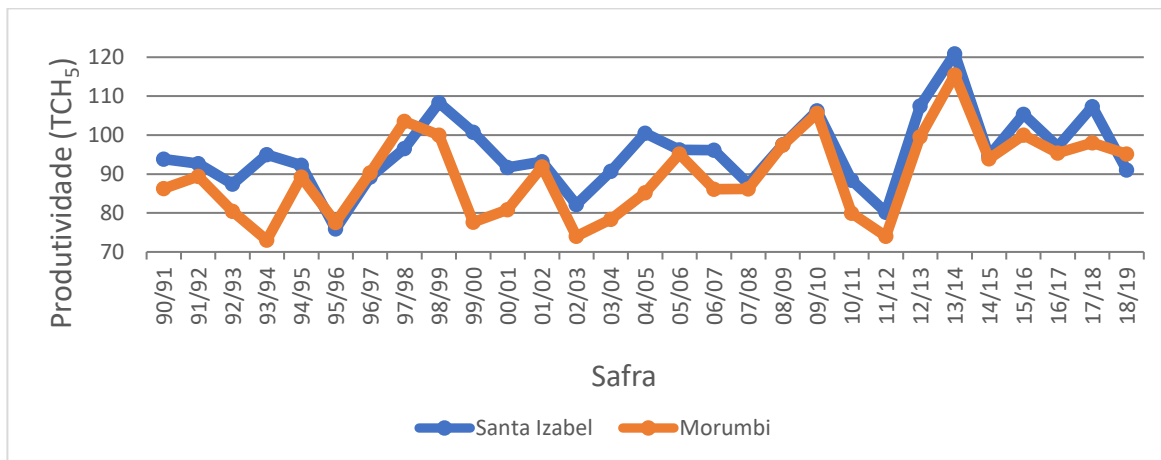
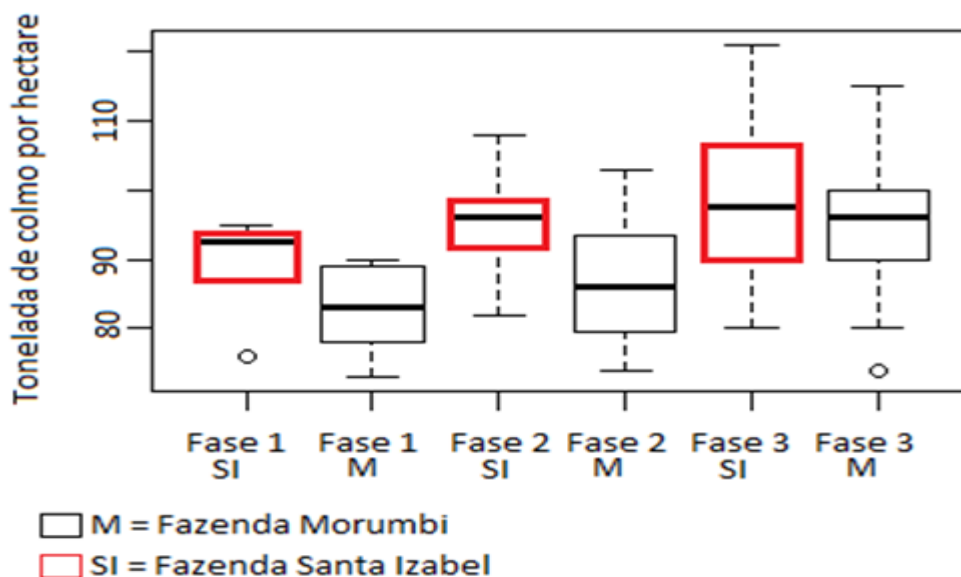


Figura 19. Produtividade de cana-de-açúcar das Fazendas Santa Izabel e Morumbi em Fases distintas do manejo da cultura durante o período de 1990 a 2018.

A Figura 20 contém informações de produtividade de cana-de-açúcar das Fazendas Santa Izabel e Morumbi nas diferentes fases de manejo. Notou-se o aumento gradativo da produtividade com a evolução das fases, sobretudo da Fazenda Morumbi, que na Fase III se assemelhou à da Fazenda Santa Izabel. Nas Fases I, II e III as diferenças das médias de produtividades foram de 6, 9 e 1 t ha⁻¹ de colmo. Foram identificados dois resultados anômalos considerados outliers, relacionados à baixa produtividade da Fazenda Santa Izabel, durante a Fase I (Safra 95/96), e da Fazenda Morumbi, durante a Fase III (Safra 11/12).



Fase I - safras 90/91, 91/92, 92/93, 93/94, 94/95, 95/96; Fase II - safras 96/97, 97/98, 98/99, 99/00, 00/01, 01/02, 02/03, 03/04, 04/05, 05/06, 06/07; Fase III - safras 07/08, 08/09, 09/10, 10/11, 11/12, 12/13, 13/14, 14/15, 15/16/, 16/17, 17/18, 18/19.

Figura 20. Gráfico boxplot da produtividade de cana-de-açúcar nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi em diferentes Fases de manejo da cultura; ○ - valores anômalos (outliers).

De maneira geral, as produtividades da Fazenda Santa Isabel estiveram acima das da Fazenda Morumbi, em função, principalmente, do tipo de solo predominante. O Latossolo Vermelho eutrófico típico textura argilosa horizonte A moderado contribuiu para a criação de melhores ambientes de produção quando comparados com os da Morumbi, em cuja área predominam Latossolos Vermelho distrófico típico textura argilosa horizonte A moderado e Latossolo Vermelho ácrico típico textura argilosa horizonte A moderado.

Esclarece-se que o menor potencial produtivo da Fazenda Morumbi em relação a Fazenda Santa Izabel se deveu ao fato de o solo da Fazenda Morumbi apresentar limitação química para o desenvolvimento radicular em maiores profundidades, o que não ocorreu na Fazenda Santa Izabel. Portanto o desenvolvimento da cana-de-açúcar foi mais prejudicado na Fazenda Morumbi se comparada a Fazenda Santa Isabel, que apresenta menores capacidade de água disponível (CAD) e fertilidade do solo.

Solos que apresentam menores CAD e baixos níveis de fertilidade do solo são os mais afetados pela deficiência hídrica (PRADO et al., 2011; PRADO et al, 2011). Estes são os principais fatores que podem explicar que na Fazenda Morumbi a produtividade média nas três fases de manejo foi de 89 t ha⁻¹ de colmo (

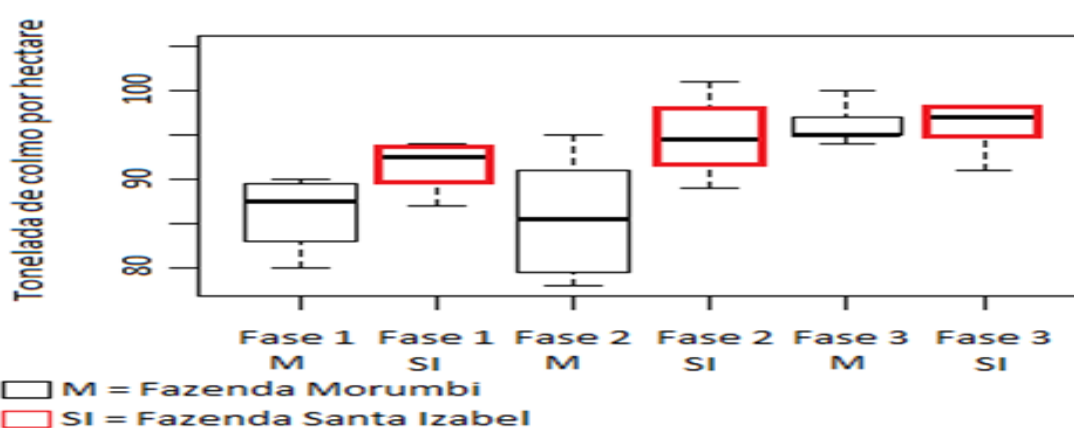
Tabela 7), apresentando maiores quedas de produtividade, principalmente em anos de adversidades climáticas (Figura 19). Os valores médios dos atributos de fertilidade do solo em profundidade da Fazenda Morumbi também foram mais restritivos ao desenvolvimento do sistema radicular (Anexo 2 e 3). Durante o período da Fase I, fazia-se pouco uso de manejo nos canaviais e as colheitas predominavam no meio de safra (Tabela 12). Na fase III, o manejo foi mais intensificado e as produtividades foram semelhantes na safra 16/17 (

Tabela 7) mesmo apresentando deficiência hídrica.

Tabela 7. Produtividade de cana-de-açúcar em toneladas de colmo por hectare (TCH) em diferentes fases de manejo das Fazendas Santa Izabel e Morumbi no período de 1990 a 2018.

Safra	Fase de manejo	Produtividade (TCH)	
		Fazenda Santa Izabel	Fazenda Morumbi
90/91	I	94	86
91/92		93	89
92/93		87	80
94/95		92	89
Média		92	86
Desvio Padrão	3	4	
96/97	II	89	90
99/00		101	78
00/01		92	81
01/02		93	92
03/04		91	78
04/05		100	85
05/06		96	95
06/07		96	86
Média	95	86	
Desvio Padrão	4	6	
08/09	III	98	97
14/15		95	94
15/16		105	100
16/17		97	95
18/19		91	95
Média	97	96	
Desvio Padrão	5	2	

A Figura 21 ilustra a produtividade de cana-de-açúcar nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi após a exclusão dos valores anômalos de produtividade e, sobretudo, de precipitação. Similarmente ao observado na Figura 20, notou-se a mesma tendência no aumento gradativo da produtividade em ambas as propriedades com a evolução das fases de manejo, mesmo após a exclusão dos outliers.



Fase I - safras 90/91, 91/92, 92/93, 94/95; Fase II - safras 96/97, 99/00, 00/01, 01/02, 03/04, 04/05, 05/06, 06/07; Fase III - safras 08/09, 14/15, 15/16/, 16/17, 18/19.

Figura 21. Gráfico boxplot da produtividade de cana-de-açúcar nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi em diferentes fases de manejo da cultura, após a exclusão de valores anômalos de produtividade associados a atipicidades climáticas.

Os resultados de produtividade apresentaram distribuição normal ($p = 0.85$) pelo teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância. A análise de variância (ANOVA) atestou que as diferentes fases de manejo provocaram diferenças significativas ($\text{Pr}(> F) < 0,01$) na produtividade. A ANOVA também indicou haver diferenças significativas ($\text{Pr}(> F) < 0,01$) de produtividade atribuídas às propriedades. A produtividade da cana-de-açúcar não pode ser explicada pela interação entre os fatores “Fases de manejo” e “Fazendas” (

Tabela 8).

Tabela 8. Análise de variância (ANOVA) de produtividade de cana-de-açúcar das Fazendas Santa Izabel e Morumbi, no período de 1993 a 2018.

Fontes de variação	Grau de liberdade	Fc	Pr(>F)
Fases**	2	7,9893	0,001114
Fazendas	1	13,1981	0,001798
Fases*Fazendas	2	2,2873	0,120199
Resíduo	28		
Total	33		

CV = 5,17%

*: Interação Fases de manejo e Fazendas; **: Fases de manejo

As fases I e II não diferiram estatisticamente, mas apresentaram produtividades médias menores do que na Fase III (Tabela 9). Apesar de a subsolagem e o cultivo mínimo serem práticas agronômicas com potencial para aumento da produtividade das plantas (CRUZ, 2003; JÚNIOR; COELHO, 2008; TAVARES et al., 2010; FERNANDES et al., 2012), diferenças significativamente maiores de produtividade foram observadas com o início da Fase III, a partir da safra 07/08. É possível admitir que os efeitos das práticas adotadas a partir da Fase II passaram a produzir efeitos efetivamente significativos somente a partir da adoção dos conceitos de ambientes de produção, que envolveram uma série de critérios como a seleção varietal, e sua alocação no zoneamento edafoclimático mais apropriado, e a definição das épocas de plantio e colheita. Trata-se do início de um período a partir do qual houve uma conduta mais aproximada do pleno conceito de “manejo agrícola” ou de “manejo agrônômico”, em que os conhecimentos isolados sobre clima, solo e planta passaram a ser contemplados de forma integrada, em um período de expansão e de acesso de tecnologias voltadas para o controle fitossanitário, a construção e manutenção da fertilidade do solo, o aprimoramento fitotécnico, sobretudo dos aspectos relacionados ao plantio e colheita, e, principalmente, do melhoramento genético.

Tabela 9. Produtividade de cana-de-açúcar das Fazendas Santa Izabel e Morumbi, no período de 1993 a 2018, em diferentes Fases de manejo da cultura.

Fator “Fases de manejo”	
Tratamentos	Médias
Fase I	88,8 b
Fase II	90,2 b
Fase III	96,7 a

Fator “Fazendas”	
Tratamentos	Médias
Santa Izabel	94,7 a
Morumbi	88,8 b

Médias seguidas por letras iguais não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)

Optou-se pela análise de variância da produtividade da cana-de-açúcar em função dos fatores “safras” e “Fazendas” em cada fase (I, II e III) de manejo agrícola (Tabela 10). Observou-se que as produtividades durante as Fases I e II, entre as Fazendas Morumbi e Santa Izabel, foram estatisticamente diferentes. Porém, na fase III (a partir da safra 2008/09), a produtividade da Fazenda Morumbi foi considerada similar à da Fazenda Santa Izabel, ou seja, a produtividade da Fazenda Morumbi aumentou ao longo das safras em resposta às práticas de manejo adotadas.

Tabela 10. Análise de variância (ANOVA) de produtividade de cana-de-açúcar das Fazendas Santa Izabel e Morumbi, no período de 1993 a 2018, em diferentes Fases de manejo agrícola.

Fase I			
Variáveis	Grau de liberdade	Fc	Pr(>F)
Safras	3	7,651	0,06
Fazendas	1	15,940	0,03*
Resíduo	3		
Fase II			
Variáveis	Grau de liberdade	Fc	Pr(>F)
Safras	7	0,719	0,663
Fazendas	1	9,697	0,02*
Resíduo	7		
Fase III			
Variáveis	Grau de liberdade	Fc	Pr(>F)
Safras	4	5,076	0,07
Fazendas	1	0,476	0,53
Resíduo	4		

Fc: Valor de F calculado; * Nível de significância 0.01

5.4. Manejo varietal e época de colheita da cana-de-açúcar

A Tabela 11 apresenta as três principais variedades plantadas de 1994 a 2018, com os respectivos percentuais de ocorrência individual e total nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi.

A alocação varietal se destacou como outro importante fator de manejo agrícola que influenciou o aumento de produtividade da cana-de-açúcar. Existem variedades de cana-de-açúcar com baixa restrição quanto a exigência em ambientes (RB 82-5336), as

que não apresentam restrição a ambientes (RB 72-454 e RB 78-5148) e as recomendadas para ambientes favoráveis (RB 76-5418 e RB 80-6043) (DAROS et al., 2015). De acordo com manejo varietal (Tabela 11), entre os anos de 1994 e 1999, embora ambas as fazendas apresentassem diferentes tipos de ambientes de produção, utilizavam-se um percentual significativo de mesmas variedades para ambas propriedades, com predomínio de NA 56-79 e RB 72-454, (pouco exigentes em ambientes; colheita no final de safra), RB 76-5418 (ambientes de alto potencial produtivo; colheita no início e no meio de safra), RB 78-5148 (sem exigência por ambientes; colheita no meio para final de safra), RB 80-6043 (alta restrição quanto a exigência em ambientes; colheita no meio de safra), RB 82-5336 (baixa restrição quanto a exigência em ambiente; colheita no início de safra), RB 83-5089 (média a baixa exigência em ambientes; colheita no final de safra), SP 71-1406, SP 71-6163 e SP 80-1842). No período que antecedeu o CONSECANA, não se levava em consideração o parâmetro de açúcar teoricamente recuperado (ATR). Além disso, havia menos opções de variedades lançadas e pouca ênfase era dada ao manejo varietal.

Isso indica que em vários talhões das propriedades a alocação varietal não era adequada. Como na Fazenda Morumbi havia o predomínio da variedade RB 80-6043 até o ano 2001 (período que contempla até metade da Fase II de manejo) (Tabela 11), classificada por DAROS et al. (2015) como uma variedade de alta restrição quanto a exigência em ambientes. De acordo com esse manejo foi possível deduzir que a alocação varietal da Fazenda Morumbi estava incorreta, pois a mesma apresentava características de ambientes desfavoráveis (PRADO, 2016). Na Fase III, que se diferenciou estatisticamente das demais fases de manejo, como mostrado no tópico 5.3, houve predomínio da RB 85-5156, uma variedade com baixa exigência a ambientes favoráveis que apresenta melhor desempenho quando colhida no início de safra devido sua alta precocidade (DAROS et al., 2015).

Tabela 11. Manejo e percentual de ocorrência das principais variedades de cana-de-açúcar plantadas de 1994 a 2018 nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi.

Ano	Morumbi		Santa Izabel	
	Variedades (% de ocorrência)	Total (%)	Variedades (% de ocorrência)	Total (%)
94	RB 72-454 (30%), RB 78-5148 (18%), NA 56-79 (17)	65	SP 71-6163 (37%), RB 72-454 (26%), RB 76-5418 (17%)	80
95	RB 72-454 (34%), RB 78-5148 (17%), NA 56-79 (14%)	65	RB 72-454 (38%), SP 71-6163 (30%), RB 76-5418 (13%)	81
96	RB 72-454 (29%), RB 78-5148 (29%), RB 83-6043 (18%)	76	RB 72-454 (38%), SP 71-6163 (14%), RB 83-5089 (9%)	61
97	RB 83-6043 (35%), RB 72-454 (27%), RB 78-5148 (24%)	86	RB 72-454 (33%), RB 83-5486 (15%), RB 82-5336 (10%)	58
98	RB 80-6043 (43%), RB 78-5148 (26%), SP 79-1011 (12%)	81	RB 83-5486 (18%), RB 72-454 (17%), RB 82-5336 (16%)	51
99	RB 80-6043 (31%), RB 72-454 (29%), RB 78-5148 (13%)	73	RB 83-5486 (19%), RB 82-5336 (16%), RB 83-5054 (10%)	45
00	RB 80-6043 (27%), RB 72-454 (25%), RB 85-5536 (17%)	69	RB 82-5336 (17%), RB 84-5257 (11%), RB 83-5486 (10%)	38
01	RB 85-5536 (19%), RB 80-6043 (18%), RB 72-454 (15%)	52	RB 82-5336 (53%), RB 83-5089 (25%), RB 72-454 (13%)	91
02	RB 72-454 (23%), RB 85-5536 (19%), SP 81-3250 (15%)	57	RB 84-5257 (13%), RB 85-5156 (13%), RB 83-5486 (11%)	37
03	SP 81-3250 (24%), RB 72-454 (21%), RB 85-5113 (13%)	58	RB 83-5486 (13%), RB 85-5156 (13%), RB 85-5453 (9%)	35
04	SP 81-3250 (24%), SP 80-3280 (21%), RB 85-5113 (19%)	64	RB 85-5156 (15%), RB 83-5486 (14%), RB 85-5453 (10%)	39
05	SP 81-3250 (25%), SP 80-3280 (25%), RB 85-5113 (20%)	70	RB 85-5156 (16%), RB 85-5453 (15%), RB 83-5486 (10%)	41
06	SP 80-3280 (26%), RB 85-5113 (17%), SP 83-2847 (14%)	57	RB 85-5453 (18%), RB 85-5156 (15%), RB 72-454 (7%)	40
07	SP 80-3280 (26%), RB 86-7515 (21%), SP 83-2847 (21%)	77	RB 85-5453 (23%), RB 85-5156 (16%), SP 89-1115 (12%)	51
08	SP 83-2847 (27%), SP 80-3280 (26%), RB 86-7515 (21%)	74	RB 85-5453 (24%), SP 89-1115 (19%), RB 85-5156 (14%)	57
09	SP 83-2847 (40%), SP 91-1049 (17%), RB 86-7515 (17%)	74	SP 89-1115 (20%), RB 85-5453 (19%), RB 85-5156 (14%)	53
10	SP 83-2847 (40%), SP 91-1049 (20%), RB 86-7515 (14%)	74	SP 89-1115 (21%), RB 85-5156 (15%), RB 85-5453 (14%)	50
11	SP 83-2847 (36%), SP 91-1049 (18%), RB 92-5744 (15%)	69	SP 87-365 (20%), RB 85-5453 (18%), RB 85-5156 (17%)	55
12	SP 83-2847 (24%), RRB 92-5744 (17%), SP 91-1049 (16%)	57	RB 85-5453 (22%), SP 87-365 (20%), RB 85-5156 (14%)	56
13	RB 83-5054 (27%), RB 85-5156 (22%), SP 83-2847 (15%)	64	SP 87-365 (21%), RB 85-5453 (16%), RB 85-5156 (12%)	49
14	RB 85-5156 (30%), RB 83-5054 (29%), SP 91-1049 (14%)	73	SP 87-365 (21%), RB 85-5453 (16%), RB 96-6928 (12%)	49
15	RB 85-5156 (52%), RB 83-5054 (25%), SP 91-1049 (12%)	89	RB 85-5453 (16%), SP 87-365 (14%), RB 96-6928 (14%)	44
16	RB 85-5156 (47%), RB 83-5054 (19%), SP 91-1049 (12%)	78	SP 87-365 (15%), RB 96-6928 (13%), CTC 4 (12%)	40
17	RB 85-5156 (53%), RB 83-5054 (13%), SP 91-1049 (12%)	78	RB 96-6928 (18%), CTC 4 (14%), SP 87-365 (14%)	46
18	RB 85-5156 (84%), RB 96-5902 (9%)	93	RB 96-6928 (17%), IAC SP 91-1099 (11%), CTC 4 (10%)	38

Na determinação do ambiente de produção, considera-se a adoção de boas práticas agronômicas, cuja ausência ou prática de forma inadequada implicam condições desfavoráveis para o desenvolvimento da cultura, como falta de nutrientes (preparo do solo, correção e adubação realizados de forma indevida), competição com outras espécies (presença de pragas, doenças ou plantas daninhas), problemas com condições climáticas adversas (erro na época de plantio e colheita) e alocação varietal inadequada (PRADO, 2016). Em ambas fazendas foram praticados manejos avançados que, de acordo com a definição de PRADO (2016), são técnicas que potencializam a produtividade do ambiente. O manejo com a aplicação de vinhaça, rotação de cultura, adição de fertilizantes orgânicos (torta de filtro e cama de frango) e o balanço da alocação varietal colaboraram para que as Fazendas Morumbi e Santa Izabel produzissem acima do seu potencial produtivo.

A época de colheita tem sido fator de manejo importante para o aumento da produtividade da cana-de-açúcar (Tabela 12). A medida que a colheita é antecipada para o início de safra (abril a 15 de junho), o tempo em que a cana-de-açúcar fica submetida ao estresse hídrico é menor e, conseqüentemente, o seu potencial produtivo aumenta em relação a colheita realizada no meio de safra (16 de junho a 15 de setembro). Quando a colheita é feita no final de safra (a partir de 16 de setembro), a cultura passa por todo o período de estresse hídrico do ano, provocando redução do potencial produtivo, sem contar que irá apresentar menor período de condições favoráveis para o seu desenvolvimento. O grande motivo da cana-de-açúcar ser colhida no início da safra é que a mesma terá maior tempo de condições favoráveis para se desenvolver, que para a para a região Centro-Sul os melhores períodos é de setembro/outubro a março/abril). PRADO et al. (2015) verificaram incremento de 14% na produção de cana-de-açúcar e de 5 t ha⁻¹ de colmo com a antecipação da colheita para o início de safra em ambientes desfavoráveis e adicionando parte dos ambientes favoráveis para o meio e final de safra.

Tabela 12. Percentual de área colhida em função da época de corte (Início, Meio e Final de safra), entre os anos 1994 a 2018, nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi.

Ano	Época de colheita					
	Fazenda Santa Izabel			Fazenda Morumbi		
	Início de safra	Meio de safra	Final de safra	Início de safra	Meio de safra	Final de safra
1994	35	65	0	7	93	0
1995	9	70	21	0	69	31
1996	15	71	14	0	65	35
1997	12	67	21	0	36	64
1998	28	59	13	0	75	25
1999	23	60	17	0	76	24
2000	27	50	23	0	100	0
2001	17	55	28	0	83	17
2002	49	51	0	11	89	0
2003	57	43	0	19	81	0
2004	23	64	13	23	66	11
2005	28	59	13	24	51	25
2006	51	40	9	2	88	10
2007	54	46	0	31	69	0
2008	44	56	0	13	36	51
2009	21	63	16	0	44	56
2010	47	53	0	0	45	55
2011	34	66	0	24	76	0
2012	12	88	0	39	61	0
2013	38	55	7	0	89	11
2014	53	40	7	52	48	0
2015	16	74	10	70	30	0
2016	44	56	0	71	29	0
2017	24	76	0	64	36	0
2018	26	74	0	67	33	0

No período de 1994 a 1998, mais do que 75% do canavial da Fazenda Santa Izabel foi colhido no início e no meio de safra. Na Fazenda Morumbi, a colheita no início de safra não era praticada, sendo realizada no meio e final de safra, respectivamente, em cerca de 70 e de 30% da área (Tabela 12). A colheita realizada no final de safra em solos considerados desfavoráveis, como os ácricos (baixa CAD), cultivado na Fazenda Morumbi, resulta em potencial produtivo comprometido, como o ocorrido no ano de 1994 (Figura 16 no tópico 5.2), em que houve precipitação de apenas 50 mm e período de estiagem de seis meses. Entre 2014 e 2018, mais de 60% da área da Fazenda Morumbi passou a ser colhida no início de safra, o que contribuiu em grande parte do aumento de produtividade. Atualmente as produtividades estão bem próximas entre as fazendas (Figura 19 e Tabela 7).

A matriz que envolve épocas de corte e ambientes de produção com atributos a fertilidade está representada pela Tabela 13. Exemplificando, a safra agrícola na região Centro Sul do Brasil normalmente ocorre entre abril a novembro e nesse período ocorre deficiência hídrica, que pode prejudicar a brotação e desenvolvimento da cultura ao longo da safra e dos ciclos agrícolas consecutivos. A colheita da cana-de-açúcar em outono (início da safra) apresenta pouca influência da deficiência hídrica (< 50 mm) se comparada com a colhida na primavera (final de safra), com deficiência hídrica que pode ultrapassar os 500 mm em regiões mais secas. Para solos favoráveis (+2) a queda na produtividade foi em torno de 15% na colheita no final de safra. Nos desfavoráveis, como o Ácrico (-2) essa queda chegou a 30% (Tabela 13). Ressalta-se que além da queda na produtividade, provavelmente haverá redução da longevidade dos canaviais.

Ambientes desfavoráveis, como aqueles com solos de capacidade de água disponível (CAD) e fertilidades baixas, deve-se evitar ao máximo a colheita no final de safra, principalmente com cultivares que apresentam crescimento lento. A situação pode piorar ainda mais se ocorrer impedimentos que prejudiquem o desenvolvimento do sistema radicular em profundidade. Não se deve realizar o plantio de cultivares responsivos em ambientes restritivos.

Tabela 13. Aplicação da matriz em função das épocas de colheita e os ambientes influenciando a produtividade de colmos.

Ambientes	Épocas de colheita		
	Ciclo de outono (início de safra)	Ciclo de inverno (Meio de safra)	Ciclo de primavera (Final de safra)
	----- Produtividade de Colmo no terceiro corte (t ha ⁻¹)** -----		
Eutrófico (+2)*	109	93,5	90,4
Mesotrófico (+1)	100	102	91,3
Distrófico (0)	84,1	82,6	71,9
Ácrico (-2)	86,3	67,3	60,9

*Quanto mais positivo mais favorável o ambiente de produção; **: Fonte: Centro de Cana – IAC – Projeto CAIANA com 6.948 dados observados.

5.5. Influência do manejo sobre os padrões pedológicos de subsuperfície

Com os resultados das análises químicas de amostras de solo coletadas em 1993 e em 2018 nas Fazendas Morumbi e Santa Izabel (Anexos 2, 3, 4 e 5), observaram-se mudanças na classificação pedológica de solos (Tabela 14), devido a alterações de atributos subsuperficiais (80 a 100 cm de profundidade) em cinco dos 17 pontos analisados. Seguindo os critérios estabelecidos por SiBCS (2018): ponto 66 - de distrófico para eutrófico; ponto 71 - de ácrico para distrófico; ponto 72 - de ácrico para eutrófico; ponto 73 - de ácrico para eutrófico; ponto 113 - de ácrico para distrófico. De acordo com os critérios de PRADO (2016), os pontos 66, 72 e 113 apresentaram a mesma classificação de SiBCS (2018), havendo a ocorrência das classes intermediárias definidas por PRADO (2016) aos seguintes pontos: 68 - de distróficos para mesotróficos; 71 - de ácrico para mesotrófico. Não houve nenhum ponto analisado em 2018 que apresentou retenção de cátions (RC) inferior a 1,6 cmol_c kg⁻¹ de solo, descartando assim a possibilidade de ocorrência de Latossolos ácricos (Anexos 4 e 5).

Tabela 14. Classificação conforme atributos químicos subsuperficiais de amostras de solo coletadas em 1993 e em 2018, segundo os critérios estabelecidos por SiBCS (2018) e por PRADO (2016), referentes aos pontos que sofreram modificações pedológicas.

Ponto	Ano	P _{res}	M.O.	pH	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	CTC	V	m	Argila	RC*
66	1993	2	16	4,8	0,11	0,5	0,2	2,6	0,1	0,9	3,5	24	11	60	1,7
	2018	3	12	5,3	0,08	1,1	0,6	1,8	0,0	1,8	3,6	50	1	60	3,0
68	1993	3	15	4,7	0,08	0,6	0,2	2,5	0,3	0,9	3,4	26	22	58	2,1
	2018	4	17	5,1	0,04	1,2	0,5	1,9	0,0	1,7	3,6	47	2	58	2,9
71	1993	5	20	5,5	0,03	0,4	0,2	2,3	0,1	0,6	2,9	22	7	58	1,2
	2018	3	14	5,6	0,04	1,1	0,4	1,6	0,0	1,5	3,1	49	2	58	2,6
72	1993	4	19	4,8	0,05	0,2	0,1	2,4	0,1	0,4	2,7	13	22	60	0,8
	2018	4	13	5,7	0,07	1,0	0,5	1,0	0,0	1,5	2,5	60	3	60	2,5
73	1993	5	18	4,7	0,05	0,3	0,2	2,8	0,1	0,5	3,3	16	16	60	1,0
	2018	2	11	5,6	0,04	0,7	0,3	1,0	0,0	1,1	2,1	52	2	60	1,8
113	1993	2	10	4,9	0,04	0,3	0,1	1,8	0,2	0,4	2,3	19	25	58	1,0
	2018	3	12	4,7	0,09	0,6	0,2	1,4	0,4	0,9	2,3	39	28	58	2,2
Média	1993	4	16	4,9	0,06	0,4	0,2	2,4	0,2	0,6	3,0	20	17	59	1,3
	2018	3	13	5,3	0,06	1,0	0,4	1,5	0,1	1,4	2,9	50	6	59	2,5

P_{res} - Fósforo (mg dm⁻³), M.O. - Matéria orgânica (g dm⁻³), K - Potássio (cmol_c dm⁻³), Ca- Cálcio (cmol_c dm⁻³), Mg - Magnésio (cmol_c dm⁻³), H+Al - acidez potencial (cmol_c dm⁻³), Al – Alumínio (cmol_c dm⁻³), SB - Soma de bases (cmol_c dm⁻³), CTC - Capacidade de Troca de Cátions (cmol_c dm⁻³), V - Saturação de bases (%), m - Saturação por alumínio (%), Argila – (%), RC - Retenção de cátions (cmol_c kg⁻¹ de solo).

A mudança da classificação dos atributos químicos em subsuperfície só ocorreu nos pontos onde uma série de fatores atuaram simultaneamente.

A adição de fertilizantes, corretivos e resíduos da agroindústria foram as práticas de manejo que alteraram as propriedades químicas ao longo do perfil de solo (80 a 100 cm), ocasionando a classificação de solos anteriormente ácidos em recentemente eutróficos e mesotróficos. O pouco tamponamento desses solos ácidos também contribuíram para essa mudança, onde em um pequeno aumento de bases levaram essa mudança.

Ao comparar a Figura 8, que apresenta a declividade da Fazenda Morumbi, com a Figura 14, que contém a localização da área de estudo, e a Figura 22, que mostra a localização da mancha do Latossolo ácrico, é possível observar que os solos ácricos, que por definição são bem drenados (PRADO, 2016), estão localizados em topografias tipicamente planas (igual ou inferior a 3% de declividade). Esses fatores contribuem para a mobilidade de elementos químicos em maiores profundidades. Os pontos que sofreram modificação em sua classificação química estão em um local plano, onde ocorre predomínio de declividade inferior a 3% na área alterada (Figura 8 apresentada no tópico 4.1.2.1). Isso permite que a água oriunda das precipitações e da fertirrigação tenha fluxo preferencialmente vertical, favorecendo a lixiviação ao longo perfil e proporcionando maior concentração dos nutrientes em subsuperfície, havendo poucas perdas por escoamento superficial.

Outro aspecto muito importante a ser considerado é que solos ácricos apresentam baixa CTC em profundidade (os pontos alterados, como observado no Anexo 3, apresentavam $CTC < 3,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), o que lhes confere baixo poder tampão e os tornam mais sujeitos a modificações químicas, o que possibilita alterações na sua classificação de distrófico para eutrófico ou mesotrófico, e ácrico para distrófico, eutrófico ou mesotrófico, principalmente para baixos teores de CTC, ou seja, inferior a $3,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Em geral, a retenção de cátions (RC) dos solos ácricos aumentaram para valores próximos a $2,2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de solo.. Os solos ácricos, por natureza, apresentam propriedades físicas que favorecem o desenvolvimento do sistema radicular, principalmente quando as condições de soma de bases são aprimoradas, aumentando assim a CAD do solo. PRADO (1998) descreveu solos ácricos como solos muito porosos, o que favorece a circulação de ar, potencializando a respiração das raízes, e com microagregação muito forte, devido ao alto grau de flocculação, o que possibilita a infiltração e percolação de água de forma livre no perfil do solo. Nesse caso apresenta baixa retenção de água.

No caso particular do cálcio, um dos fatores avaliados na classificação pedológica dos solos (Tabela 4), houve aumento de seus teores em subsuperfície (80 a 100 cm). Os teores de cálcio encontrados em 2018, quando comparados aos de 1993, apresentaram diferenças suficientes para atender ao critério mínimo estipulado na Tabela 4 e para alterar a classificação pedológica dos pontos classificados como eutrófico (SiBCS, 2018,

PRADO, 2016) e mesotrófico (PRADO, 2016).

A localização geográfica dos pontos indicou a formação de uma mancha representativa na área da Fazenda Morumbi, que apresentou modificação dos atributos subsuperficiais do solo (Figura 22). A Tabela 15 apresenta a área, em hectares e porcentagem, de cada tipo de solo classificado em 1993 e 2018, segundo as classificações de SiBCS (2018) e PRADO (2016). O classificação química mesotrófico, apresentada apenas por PRADO (2016) e classificada por SiBCS (2018) como distrófico, pode ser associada ao caráter eutrófico, formando uma área da mancha (89,09 ha) de Latossolo quimicamente favorável, que superou a área da mancha de Latossolo quimicamente favorável definida segundo SiBCs (2013) em 10% e apresentou área da mancha de Latossolo distrófico inferior em 10%.

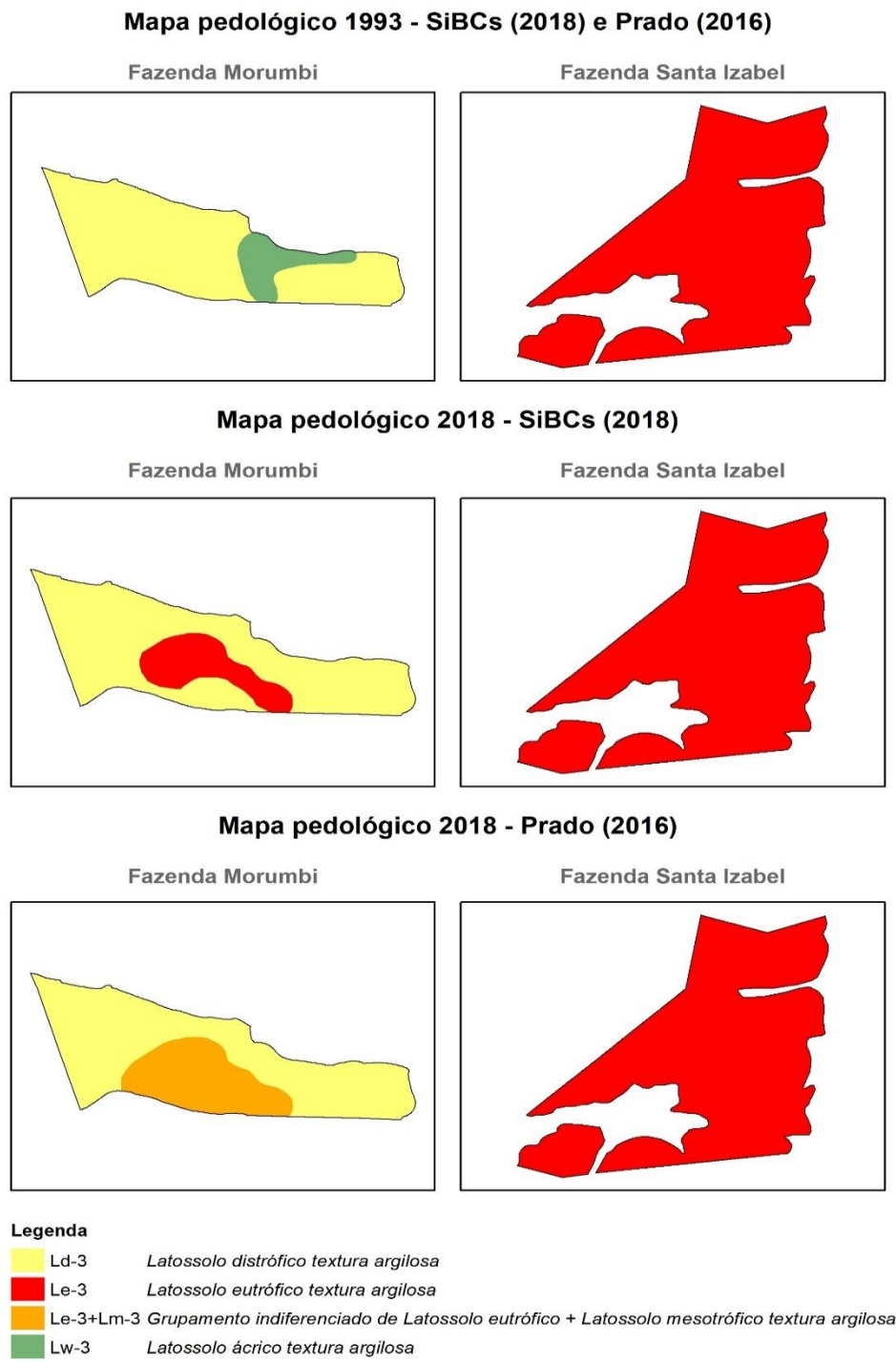


Figura 22. Mapas de solos da área avaliada nas Fazendas Morumbi (esq.) e Santa Izabel (dir.), em 1993 (superior) e em 2018 (inferiores), segundo critérios de SiBCs (2018) e Prado (2016).

Tabela 15. Área de ocorrência dos tipos de solos classificados por SiBCS (2018) e PRADO (2016) nas Fazendas Morumbi e Santa Izabel em 1993 e 2018.

Fazenda	Solo	Área (ha)	Área (%)
1993 - SiBCS (2018), PRADO (2016)*			
Santa Izabel	Le-3	866,16	100
Morumbi	Ld-3	269,31	87
Morumbi	Lw-3	39,38	13
2018 - SiBCS (2018)			
Santa Izabel	Le-3	866,16	100
Morumbi	Ld-3	251,18	81
Morumbi	Le-3	57,51	19
2018 - PRADO (2016)			
Santa Izabel	Le-3	866,16	100
Morumbi	Ld-3	219,60	71
Morumbi	Le-3+Lm-3	89,09	29

* A classificação feita em 1993 não apresentou diferença entre os critérios de SiBCS (2018) e PRADO (2016); Ld – Latossolo distrófico; Lw – Latossolo ácrico; Le – Latossolo eutrófico; Lm – Latossolo mesotrófico.

As Tabela 16 e 17 apresentam os valores médios, máximo, mínimo e desvio padrão das amostras de solo coletadas nas fazendas Morumbi e Santa Izabel em 1993 e em 2018, nas camadas superficiais (0-25, 25-50 cm) e subsuperficial (80-100 cm).

Tabela 16. Valores médios, máximo, mínimo e desvio padrão das amostras de solo coletadas em 1993 e em 2018 nas camadas superficiais (0-25, 25-50 cm) nas Fazendas Morumbi e Santa Izabel.

A.Q.	Morumbi*								Santa Izabel*							
	1993				2018				1993				2018			
	Md	Mx	Mn	D.P.	Md	Mx	Mn	D.P.	Md	Mx	Mn	D.P.	Md	Mx	Mn	D.P.
0-25 cm																
P _{res}	29	68	13	17	46	157	16	33	30	61	12	16	33	49	15	12
M.O.	25	31	20	3	25	32	17	5	29	34	21	4	30	36	24	4
pH	5,1	6,1	4,2	0,4	5,2	5,6	4,5	0,3	5,0	5,4	4,3	0,4	5,4	6,3	4,3	0,6
K	0,2	0,4	0,1	0,1	0,2	0,8	0,1	0,2	0,4	0,8	0,2	0,2	0,3	0,6	0,1	0,2
Ca	1,7	3,5	0,6	0,8	3,4	6,3	1,4	1,3	3,3	4,6	1,5	1,0	5,0	6,9	2,3	1,4
Mg	0,7	1,5	0,2	0,4	1,3	2,0	0,4	0,5	1,0	1,4	0,5	0,4	1,7	3,4	0,5	0,8
H+Al	3,2	5,8	1,5	1,0	2,2	4,0	1,5	0,6	4,0	5,8	2,8	1,0	2,9	4,7	1,7	0,9
Al	0,3	1,2	0,1	0,3	0,0	0,3	0,0	0,1	0,3	1,5	0,1	0,4	0,2	0,7	0,1	0,2
SB	2,6	4,9	1,1	1,1	4,9	8,4	1,9	1,8	4,7	6,3	2,3	1,3	7,0	9,5	3,1	1,9
CTC	5,8	7,6	4,5	0,9	7,1	11,0	3,9	1,7	8,7	11,0	6,7	1,1	9,9	12,0	7,8	1,2
V	44	77	16	15	68	80	40	12	53	68	29	12	69	84	40	13
m	12	52	1	13	2	13	0	3	6	38	1	11	4	19	1	5
25-50 cm																
Pres	18	45	6	10	23	100	3	26	22	38	9	10	13	23	6	5
M.O.	25	33	21	4	18	24	15	3	30	36	22	4	20	26	13	4
pH	5,1	6,3	4,3	0,6	5,2	5,8	4,5	0,4	5,1	5,6	4,4	0,4	5,2	5,6	4,8	0,3
K	0,2	0,4	0,1	0,1	0,1	0,4	0,0	0,1	0,4	0,8	0,2	0,2	0,1	0,3	0,0	0,1
Ca	1,8	5,0	0,4	1,3	1,9	3,8	0,5	1,0	3,2	6,6	1,5	1,3	3,8	6,5	2,1	1,3
Mg	0,7	1,7	0,2	0,5	0,8	2,5	0,3	0,5	0,9	1,7	0,5	0,4	1,2	1,9	0,5	0,4
H+Al	3,1	4,7	1,5	1,0	1,9	3,2	1,0	0,5	3,7	5,5	2,5	1,0	2,7	3,5	2,1	0,5
Al	0,3	1,2	0,1	0,3	0,1	0,3	0,0	0,1	0,2	1,2	0,1	0,3	0,1	0,2	0,1	0,0
SB	2,7	7,0	0,8	1,8	2,8	6,6	0,9	1,5	4,5	9,1	2,4	1,7	5,0	8,7	2,9	1,7
CTC	5,9	8,5	4,3	1,1	4,7	7,6	2,9	1,4	8,2	12,0	6,3	1,4	7,8	11,0	5,3	1,7
V	44	83	16	21	57	87	27	15	54	78	30	13	64	78	47	9
m	14	53	1	17	4	26	0	7	5	33	1	9	3	7	1	2

* Densidade amostral de 17 pontos na Fazenda Morumbi e 11 pontos na Fazenda Santa Izabel; A.Q. - Atributo químico; D.P. - Desvio Padrão; Md - Teor médio; Mx - Teor máximo; Mn - Teor mínimo; P_{res} - Fósforo (mg dm⁻³), M.O. - Matéria orgânica (g dm⁻³), K - Potássio (cmol_c dm⁻³), Ca - Cálcio (cmol_c dm⁻³), Mg - Magnésio (cmol_c dm⁻³), H+Al - acidez potencial (cmol_c dm⁻³), Al - Alumínio (cmol_c dm⁻³), SB - Soma de bases (cmol_c dm⁻³), CTC - Capacidade de Troca de Cátions (cmol_c dm⁻³), V - Saturação de bases (%), m - Saturação por Alumínio (%)

Tabela 17. Valores médios, máximo, mínimo e desvio padrão das amostras de solo coletadas em 1993 e em 2018 na camada subsuperficial 80-100 cm) nas fazendas Morumbi e Santa Izabel.

A.Q.	Morumbi*								Santa Izabel*							
	1993				2018				1993				2018			
	Md	Mx	Mn	D.P.	Md	Mx	Mn	D.P.	Md	Mx	Mn	D.P.	Md	Mx	Mn	D.P.
80-100 cm																
Pres	3	5	2	1	3	4	2	1	7	13	4	3	7	13	4	3
M.O.	18	26	10	4	12	17	10	2	17	21	13	2	13	15	10	2
pH	5,0	5,5	4,6	0,3	5,2	5,9	4,6	0,4	5,6	6,1	4,4	0,5	5,5	5,9	5,2	0,3
K	0,09	0,34	0,03	0,08	0,05	0,12	0,01	0,03	0,14	0,42	0,05	0,11	0,05	0,11	0,02	0,03
Ca	0,6	0,9	0,2	0,2	0,8	1,2	0,5	0,2	2,3	3,3	1,4	0,6	2,6	4,3	1,8	0,8
Mg	0,3	0,5	0,1	0,1	0,4	0,6	0,2	0,1	0,6	1,0	0,3	0,2	0,8	1,3	0,5	0,2
H+Al	2,4	3,3	1,8	0,4	1,6	2,8	1,0	0,4	2,1	3,1	1,5	0,5	2,2	2,8	2,0	0,2
Al	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,4	0,0	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0	0,1	0,4	0,1	0,1
SB	0,9	1,6	0,4	0,4	1,2	1,8	0,8	0,3	3,1	3,9	2,1	0,6	3,5	5,7	2,6	1,0
CTC	3,3	4,3	2,3	0,4	2,8	3,8	2,1	0,5	5,2	6,0	4,3	0,6	5,8	7,9	4,9	1,0
V	28	44	13	9	43	60	26	9	60	72	40	9	60	72	53	6
m	13	25	5	6	5	28	1	7	2	4	1	1	3	14	2	4

* Densidade amostral de 17 pontos na Fazenda Morumbi e 11 pontos na Fazenda Santa Izabel; A.Q. - Atributo químico; D.P. - Desvio Padrão; Md - Teor médio; Mx - Teor máximo; Mn - Teor mínimo; P_{res} - Fósforo (mg dm⁻³), M.O. - Matéria orgânica (g dm⁻³), K - Potássio (cmol_c dm⁻³), Ca - Cálcio (cmol_c dm⁻³), Mg - Magnésio (cmol_c dm⁻³), H+Al - acidez potencial (cmol_c dm⁻³), Al - Alumínio (cmol_c dm⁻³), SB - Soma de bases (cmol_c dm⁻³), CTC - Capacidade de Troca de Cátions (cmol_c dm⁻³), V - Saturação de bases (%), m - Saturação por Alumínio (%)

Os valores dos atributos químicos matéria-orgânica (M.O.), soma de bases (SB), alumínio (Al), capacidade de troca de cátions (CTC), saturação de bases (V%) e saturação de alumínio (m%) mensurados tanto em superfície quanto em subsuperfície, de maneira geral, foram semelhantes aos valores encontrados no levantamento pedológico da quadrícula de Ribeirão Preto (região próxima à área de estudo) feitos por OLIVEIRA; PRADO (1987). A Tabela 18 apresenta os valores médios, máximos e mínimos desses atributos encontrados nas profundidades 0-20 e 80-100 cm para os Latossolos argilosos eutróficos, distrófico e ácrico, classificados por OLIVEIRA; PRADO (1987) respectivamente como Latossolo Roxo unidade Ribeirão Preto, Latossolo Roxo unidade Barão Geraldo e Latossolo Roxo unidade Capão da Cruz. Nesse estudo, foram avaliados 27 (eutrófico), 10 (distrófico) e 42 (ácrico) pontos, na profundidade 0-20 cm e 82 (eutrófico), 43 (distrófico) e 103 (ácrico) pontos, na camada 80-100 cm.

Tabela 18. Valores médios, máximos e mínimos encontrados nas profundidades 0-20 e 80-100 cm para os Latossolos argilosos eutróficos, distrófico e ácrico, classificados no levantamento pedológico da quadrícula de Ribeirão Preto-SP por OLIVEIRA; PRADO (1987).

Atributo	Valores	Le		Ld		Lw	
		0-20 cm	80-100 cm	0-20 cm	80-100 cm	0-20 cm	80-100 cm
M.O.	Média	41	17	52	17	33	15
	Máximo	77	34	110	52	60	24
	Mínimo	17	7	22	9	22	9
SB	Média	5,3	3,8	7,9	1,2	2,0	0,4
	Máximo	9,5	10,0	21,7	2,6	11,7	1,0
	Mínimo	0,7	1,2	2,0	0,2	0,0	0,0
Al	Média	0,2	0,1	0,2	0,3	0,6	0,2
	Máximo	1,0	0,4	0,8	2,2	1,8	0,8
	Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CTC	Média	NI	8,3	NI	6,6	NI	4,2
	Máximo	NI	22,3	NI	17,7	NI	10,1
	Mínimo	NI	4,1	NI	1,6	NI	1,0
V	Média	55	70	66	29	27	14
	Máximo	93	96	95	49	85	59
	Mínimo	10	50	23	5	1	1
m	Média	5	2	5	22	32	29
	Máximo	58	13	28	87	98	97
	Mínimo	0	0	0	0	0	0

M.O. - Matéria orgânica, SB - Soma de bases, Al - Alumínio, CTC - Capacidade de Troca de Cátions, V - Saturação de bases, m - Saturação por Alumínio; NI – Não informado; Le – Latossolo eutrófico; Ld – Latossolo distrófico; Lw – Latossolo ácrico

Os teores de matéria orgânica são mais altos nas camadas superficiais (0-25 e 25-50 cm) em relação as camadas subsuperficiais (80-100cm) em função do maior volume radicular em superfície (OTTO et al, 2009). Segundo os critérios de classificação dos atributos químicos para avaliação da fertilidade do solo (Tabela 5 descrita no tópico 4.1.2.1), os valores médios, máximo e mínimos de matéria orgânica das fazendas Morumbi e Santa Izabel foram classificados como altos e médios, com exceção dos valores mínimos encontrados na Fazenda Santa Izabel na profundidade 25-50 cm, em 2018, classificado como baixo (Tabela 16). Na profundidade 80 a 100 cm, os teores foram classificados como médios e baixo, exceto para valores máximos de matéria orgânica encontrados na Fazenda Morumbi, no ano de 1993 (Tabela 17). Nota-se que o comportamento da matéria orgânica de 1993 e 2018 foi semelhante entre as Fazendas Morumbi e Santa Izabel, com valores praticamente constantes na profundidade 0 a 25 cm (25 g dm^{-3} na Fazenda Morumbi em

ambos os anos avaliados e 29 e 30 g dm⁻³ em 1993 e 2018 na Fazenda Santa Izabel) e redução dos teores nas profundidades 25 a 50 cm (25 para 18 g dm⁻³ na Morumbi e 30 para 20 g dm⁻³ na Santa Izabel) e 80 a 100 cm (18 para 12 g dm⁻³ na Morumbi e 17 para 13 g dm⁻³ na Santa Izabel).

Os níveis de potássio diminuíram no perfil de solo, ao longo do tempo. Isso foi constatado nos seguintes pontos: 60, nas profundidades 20-40 e 80-100 cm; 61, nas profundidades de 0-20, 20-40 e 80-100 cm; 62, nas profundidades de 0-20, 20-40 e 80-100 cm; 63, nas profundidades de 0-20, 20- e 80-100 cm, 66, na profundidade de 80-100 cm, 67, na profundidade de 20-40 e 80-100 cm, 68, nas profundidades de 0-20, 20-40 e 80-100 cm; 69, nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm; 70, nas profundidades de 20-40 cm, 73 e 78, na profundidade de 80-100 cm, 80, nas profundidades de 0-20, 20-40 e 80-100 cm; e 111, nas profundidades de 0-20, 20-40 e 80-100 cm. Essa redução pode estar relacionada a lixiviação de K pelo sulfato acrescentado pela gessagem (SOUZA; RITCHEY, 1986; CAIRES et al.,1998), em destaque para solos bem drenados, bem como a não aplicação da vinhaça que aporta uma quantidade considerada do elemento nos últimos ciclos de reforma.

5.6. Influência do manejo nos ambientes de produção

A contribuição significativa do manejo para o aumento de produtividade em ambas as fazendas fica evidenciada na avaliação do potencial produtivo dos solos através dos conceitos de ambientes de produção dinâmico de cana-de-açúcar. Como não foi feita nenhuma análise pedológica durante esse tempo de estudo, não foi possível determinar em qual Fase de produtividade houve a mudança pedológica dos solos. Desta forma, a avaliação do potencial produtivo da Fazenda Morumbi foi realizada para os solos predominantes em 1993 (Latosolos distrófico e ácrico) e em 2018 (Latosolos distrófico e eutrófico).

Os ambientes de produção são dinâmicos, sendo o potencial produtivo do ambiente influenciado diretamente pela época de colheita da cultura. De acordo com a classificação dos ambientes de produção proposto pelo programa do Instituto Agrônomo de Campinas (ProCana – Ambicana), para uma média de 5 cortes, os Latossolos distróficos textura argilosa, Latossolos ácricos textura argilosa e Latossolos eutróficos são enquadrados nos ambientes C2-D1 (dependendo das condições químicas superficiais e subsuperficiais), D2 e B1-C2, respectivamente, quando colhidos no meio de safra (16 de junho a 15 de setembro), com respectivo potencial produtivo de 81-77, 81 e 99-92 t ha⁻¹ de colmo. No início de safra (abril a 15 de junho), o seu potencial produtivo aumentou para 85-86 (Latosolo distrófico), 81 (Latosolo ácrico) e 99-92 (Latosolo eutrófico) t ha⁻¹ de colmo, se enquadrando respectivamente nos ambientes C1, C2 e A2-B2. Considerando a colheita no final de safra (a partir de 16 de setembro), a produtividade esperada foi de 72 t ha⁻¹ no Latossolo distrófico (D2), 57 t ha⁻¹ no Latossolo ácrico (F2) e 80 t ha⁻¹ no Latossolo eutrófico (C2) (Tabela 19).

Tabela 19. Ambientes de produção dinâmico das Fazendas Morumbi e Santa Izabel em 1993 e 2018 e os potenciais produtivos (TCH₅), para colheitas realizadas no início (abril a 15 de junho), meio (16 de junho a 15 de setembro) e final de safra (a partir de 16 de setembro).

Solo	Início de Safra	TCH ₅	Meio de Safra	TCH ₅	Final de Safra	TCH ₅
Ambiente de Produção Dinâmico – 1993						
Morumbi						
Latossolo distrófico	C1	85	D1	77	E2	65
Latossolo ácrico	C2	81	D2	73	F1	61
Santa Izabel						
Latossolo eutrófico	B1	93	C1	85	D1	77
Ambiente de Produção Dinâmico – 2018						
Morumbi						
Latossolo distrófico	C1	86	C2	81	E1	70
Latossolo eutrófico	B2	90	C2	83	D2	75
Santa Izabel						
Latossolo eutrófico	A2	99	B1	95	C1	87

A associação do potencial que cada mancha de solo encontrada nas Fazendas têm para produzir com suas respectivas áreas de ocorrência (Figura 22), permitem a determinação do potencial produtivo esperado, na média de cinco cortes, para cada fazenda, caso elas fossem exclusivamente colhidas no início, meio ou final de safra. O potencial esperado das Fazendas Morumbi e Santa Izabel, no início de safra, foi de 84,5 e 93 t ha⁻¹ (1993) e de 86,6 e 99 t ha⁻¹ (2018). Para o meio de safra, a produtividade esperada seria respectivamente 76,5 e 85 t ha⁻¹ (1993) e 81,4 e 95 t ha⁻¹ (2018) e no final de safra de 64,5 e 77 t ha⁻¹ (1993) e 71 e 87 t ha⁻¹ (2018) (Tabela 20).

Tabela 20. Produtividade esperada das Fazendas Morumbi e Santa Izabel em 1993 e 2018, para colheitas realizadas exclusivamente no início (abril a 15 de junho), meio (16 de junho a 15 de setembro) ou final de safra (a partir de 16 de setembro), em função do tipo de solo, ambientes de produção e sua área de ocorrência (%).

Solo	Ambiente	Época de Corte	TCH ₅	Área (%)	TCH Esperada	Ambiente
Morumbi - 1993						
Latossolo ácrico	C2	Início de safra	81	13	10,5	
Latossolo distrófico	C1		85	87	74,0	
Potencial Produtivo da Fazenda Morumbi - Início de Safra					84,5	C1
Latossolo ácrico	D2	Meio de safra	73	13	9,5	
Latossolo distrófico	D1		77	87	67,0	
Potencial Produtivo da Fazenda Morumbi - Meio de Safra					76,5	D1
Latossolo ácrico	F1	Final de safra	61	13	7,9	
Latossolo distrófico	E2		65	87	56,6	
Potencial Produtivo da Fazenda Morumbi - Final de Safra					64,5	E2
Morumbi - 2018						
Latossolo eutrófico	B2	Início de safra	90	19	17,1	
Latossolo distrófico	C1		86	81	69,7	
Potencial Produtivo da Fazenda Morumbi - Início de Safra					86,8	C1
Latossolo eutrófico	C2	Meio de safra	83	19	15,8	
Latossolo distrófico	C2		81	81	65,6	
Potencial Produtivo da Fazenda Morumbi - Meio de Safra					81,4	C2
Latossolo eutrófico	D2	Final de safra	75	19	14,3	
Latossolo distrófico	E1		70	81	56,7	
Potencial Produtivo da Fazenda Morumbi - Final de Safra					71,0	E1
Santa Izabel - 1993						
Latossolo eutrófico	B1	Início de safra	93	100	93	B1
Latossolo eutrófico	C1	Meio de safra	85	100	85	C1
Latossolo eutrófico	D1	Final de safra	77	100	77	D1
Santa Izabel - 2018						
Latossolo eutrófico	A2	Início de safra	99	100	99	A2
Latossolo eutrófico	B1	Meio de safra	95	100	95	B1
Latossolo eutrófico	C1	Final de safra	87	100	87	C1

A interação do percentual de área colhida nas fazendas no início, meio e final de safra (Tabela 12 apresentada no tópico 5.4), e seu potencial produtivo para cada época de corte determinou a estimativa de produtividade esperada para cada fazenda foram descritos na Tabela 20. Em média, as áreas colhidas das safras correspondentes à Fase I (Safras 90/91 a 95/96), no início de safra, foram de 2% na Fazenda Morumbi e de 20% na Fazenda Santa Izabel. Para o meio de safra, foram respectivamente de 76% e de 69% e, no final de safra, de 22% e de 11%. Na Fase II (Safras 96/97 a 06/07), a Fazenda Morumbi apresentou áreas colhidas, respectivamente no início, meio e final de safra, de 7%, 74% e

19%, enquanto na Fazenda Santa Isabel de 32%, 55% e 13%. Na Fase 3 (Safras 07/08 a 18/19), ocorreu a antecipação da colheita, com áreas de 36%, 50% e 14% (início, meio e final de safra na Morumbi) e de 35%, 65% e 3% (Santa Isabel no início, meio e final de safra).

Conseqüentemente, a produtividade esperada (TCH₅), nas Fazendas Morumbi e Santa Isabel, considerando os solos predominantes (Latosolos distrófico e ácrico e Latossolo eutrófico nas Fazendas Morumbi e Santa Isabel) no ano de 1993, foram respectivamente de 74 e 85,7 t ha⁻¹ (Fase 1), 74,8 e 86,5 t ha⁻¹ (Fase 2) e 77,7 e 87,6 t ha⁻¹ (Fase 3). Para os solos predominantes em 2018 (Latosolos distrófico e eutrófico na Morumbi e Latossolo eutrófico na Santa Isabel), os valores foram de 79,2 e 94,9 t ha⁻¹ (Fase 1), 79,8 e 95,2 t ha⁻¹ (Fase 2) e 81,9 e 96,2 t ha⁻¹ (Fase 3) (Tabela 21).

Tabela 21. Produtividade esperada para as Fases 1 (Safras 90/91 a 95/96), 2 (Safras 96/97 a 06/07) e 3 (Safras 07/08 a 18/19) das Fazendas Morumbi e Santa Isabel em 1993 e 2018, em função das épocas de corte.

Época de Corte	Potencial Produtivo	Fase 1		Fase 2		Fase 3	
		Área colhida (%)	TCH ₅ Esperada	Área colhida (%)	TCH ₅ Esperada	Área colhida (%)	TCH ₅ Esperada
Morumbi - 1993							
Início	84,5	2	1,7	7	5,9	36	30,4
Meio	76,5	76	58,1	74	56,6	50	38,2
Final	64,5	22	14,2	19	12,3	14	9,0
Prod. Esperada			74,0 (D2)		74,8 (D2)		77,7 (D1)
Morumbi - 2018							
Início	86,8	2	1,7	7	6,1	36	31,2
Meio	81,4	76	61,8	74	60,2	50	40,7
Final	71,0	22	15,6	19	13,5	14	9,9
Prod. Esperada			79,2 (D1)		79,8 (D1)		81,9 (C2)
Santa Isabel - 1993							
Início	93	20	18,6	32	29,76	35	32,55
Meio	85	69	58,65	55	46,75	62	52,7
Final	77	11	8,47	13	10,01	3	2,31
Prod. Esperada			85,7 (C1)		86,5 (C1)		87,6 (C1)
Santa Isabel - 2018							
Início	99	20	19,8	32	31,68	35	34,65
Meio	95	69	65,55	55	52,25	62	58,9
Final	87	11	9,57	13	11,31	3	2,61
Prod. Esperada			94,9 (B1)		95,2 (B1)		96,2 (A2)

O manejo usado nas Fazendas Morumbi e Santa Izabel foi o principal fator de contribuição para o aumento do potencial produtivo dos ambientes de produção das áreas de estudo. Isso ficou evidenciado na comparação da produtividade média real nas Fases I (predomínio de solos levantados em 1993) e III (solos levantados em 2018) com a produtividade esperada das mesmas. Em ambas as propriedades Morumbi e Santa Izabel, a produtividade média real foi superior a produtividade esperada, sendo na Fase I de 12 e 6 t ha⁻¹ e na Fase 3 de 14 e 1 t ha⁻¹, respectivamente (Tabela 22). Esses resultados corroboram a ideia proposta por PRADO (2016), em que a utilização de manejos avançados potencializam a produtividade dos ambientes de produção. Embora em 1993, o manejo básico das fazendas não fosse praticado da forma mais adequada, principalmente nos quesitos época de colheita e alocação varietal, o uso de práticas consideradas avançadas (vinhaça, rotação de cana-de-açúcar com soja, torta de filtro, dentre outros), fizeram com que a produtividade real fosse superior a produtividade esperada. O uso desses resíduos tem benefícios positivos principalmente em solos ácidos, pois aportam quantidades de nutrientes na forma organomineral. Sua liberação mais gradual aumenta a eficiência por apresentar menores perdas, uma vez que esses solos apresentam boa drenagem e baixa retenção de cátions.

Tabela 22. Comparativo entre as produtividades média real e esperada, bem como os respectivos ambientes de produção, das fazendas Morumbi e Santa Izabel nas Fases I (predomínio dos solos classificados em 1993) e III (predomínio dos solos classificados em 2018).

TCH₅ Média	Fase 1	Ambiente	Fase 3	Ambiente
Morumbi				
Esperada	74	C2	82	C2
Real	86	C1	96	A2
Diferença*	12		14	
Santa Izabel				
Esperada	86	B2	96	B2
Real	92	B1	97	A2
Diferença*	6		1	

* Diferença = TCH₅ média real – TCH₅ Média Esperada

As Figuras 23 e 24 apresentam os mapas de ambientes de produção para colheitas feitas no início (abril a 15 de junho), meio (16 de junho a 15 de setembro) e final de safra

(a partir de 16 de setembro), nas Fazendas Morumbi e Santa Izabel, segundo a classificação de PRADO (2016), utilizando como base os mapas de solos feitos pelo critério de SiBCs (2018).

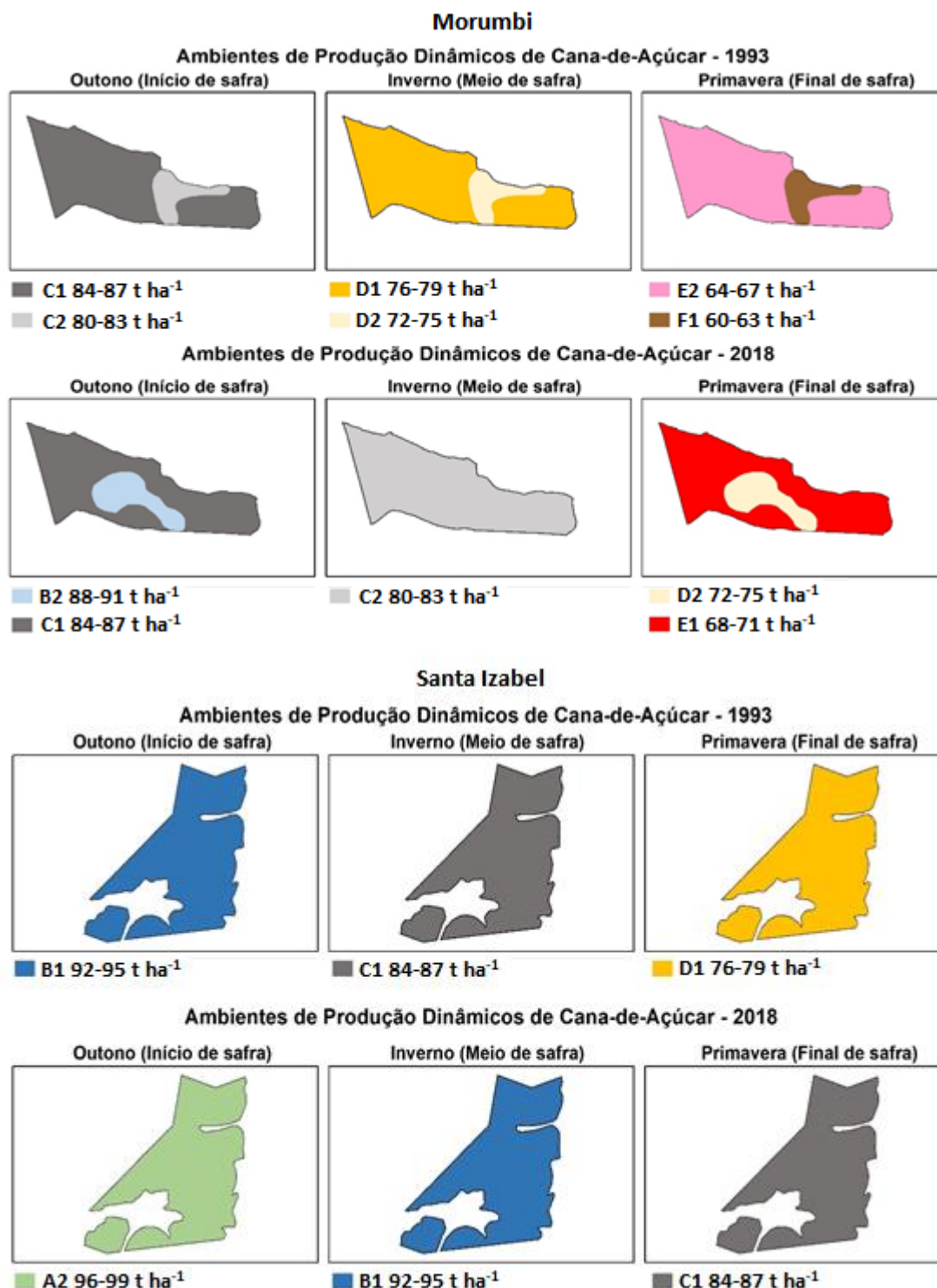


Figura 23. Mapas de ambientes de produção dinâmico de 1993 e 2018 para colheitas feitas no início (abril a 15 de junho), meio (16 de junho a 15 de setembro) e final de safra (a partir de 16 de setembro), das Fazendas Morumbi (superior) e Santa Izabel (inferior), segundo a classificação de PRADO (2016), utilizando os mapas de solos feitos pelo critério de SiBCS (2018).

5.7. Alteração dos padrões de fertilidade da camada arável do solo

A Tabela 23 apresenta os valores médios, máximo e mínimo dos atributos químicos analisados em amostras de solo coletadas na camada arável (0 a 20 cm), nos anos de 1994 a 2018, nas Fazendas Morumbi e Santa Izabel entre os anos 1994 e 2018, para as Fases de manejo I, II e III, com a indicação do número de análises disponibilizada em cada fase.

Tabela 23. Valores médios, máximo e mínimo dos atributos químicos analisados em amostras de solo da camada arável coletadas nas Fazendas Morumbi e Santa Izabel entre os anos 1994 e 2018, para as Fases de manejo I, II e III.

Atributos	Fase I*			Fase II**			Fase III***		
	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo
Morumbi									
Al	0,2	0,7	0,0	0,1	1,4	0,0	0,0	0,3	0,0
Ca	1,6	3,9	0,8	1,8	6,3	0,7	2,6	9,5	0,7
CTC	5,1	7,6	3,1	5,5	10,0	3,3	6,4	12,0	4,0
H+Al	2,9	5,5	1,3	2,7	5,8	1,1	2,7	5,1	1,0
K	0,20	0,20	0,03	0,22	0,62	0,02	0,26	0,88	0,06
m	8	30	0	5	42	0	1	21	0,0
Mg	0,5	1,1	0,2	0,8	3,3	0,2	0,9	3,6	0,3
MO	26	33	21	27	45	13	23	37	14
P	16	47	4	17	122	1	30	196	4
pH	5,0	6,0	4,5	5,0	6,1	4,1	5,2	7,1	4,4
SB	2,2	5,2	1,1	2,8	8,0	1,3	3,7	10,7	1,1
V	44	70	23	50	84	22	58	90	27
Santa Izabel									
Al	0,2	0,7	0,0	0,1	1,6	0,0	0,0	0,7	0,0
Ca	2,6	4,1	1,2	2,4	13,9	0,4	3,9	10,8	0,9
CTC	8,6	11,4	5,3	7,7	19,0	2,9	9,5	22,0	4,1
H+Al	4,8	7,2	2,2	3,8	12,1	1,2	3,8	8,8	1,8
K	0,40	0,90	0,13	0,49	3,00	0,01	0,50	2,81	0,00
m	5	24	0	4	43	0	1	26	0
Mg	0,8	1,6	0,2	1,0	7,2	0,2	1,3	4,8	0,3
MO	34	42	20	32	62	15	28	44	15
P	17	36	7	20	203	4	27	163	2
pH	4,9	5,7	4,4	5,0	6,8	4,0	5,1	6,2	4,1
SB	3,8	6,1	2,0	3,9	17,7	0,9	5,7	18,1	1,8
V	44	70	22	51	92	15	59	86	20

*composto por 27 análises; **composto por 453 análises; ***composto por 558 análises; Al - alumínio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), Ca - cálcio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), CTC_t - capacidade de troca catiônica total ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), H+Al - Hidrogênio + Alumínio - acidez potencial ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), K - potássio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), m - saturação por alumínio (%), Mg - magnésio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), MO - matéria orgânica (g dm^{-3}), P_{res} - fósforo resina (mg dm^{-3}), pH - CaCl_2 , SB - soma de bases ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), V - saturação por bases (%).

A análise por boxplot dos teores médios para cada Fase de manejo (Figura 24 e Anexos 6 e 7) indica a presença de outliers em todos atributos químicos. Com a eliminação desses outliers, apenas a variável matéria orgânica na Fase II de manejo da fazenda Santa Izabel continuou apresentando valores que não representaram estatisticamente os teores obtidos nas análises de 1994 a 2018 (Figura 25 e Anexos 8 e 9).

Apenas os atributos alumínio e soma de bases (SB) não foram considerados normais pelo teste de normalidade de Shapiro-Wilk a 5 % de significância por apresentarem valor-p < 0,01 e valor-p = 0,04 respectivamente.

A Tabela 24 apresenta os resultados da análise de variância dos atributos químicos mensurados de 1994 a 2018. Segundo GOMES; GARCIA (2002), valores de coeficientes de variação inferiores a 10% indicam homogeneidade da população amostral. Sendo assim os atributos que apresentaram população homogênea foram matéria-orgânica (CV = 9.19%), pH (CV = 3.53%) e saturação de bases (CV = 9.28%). Os valores mais heterogêneos foram os de alumínio (CV = 59,68%) e os de saturação por alumínio (CV = 45,70%).

Notou-se que os atributos que não apresentaram diferença estatística foram o teor de potássio ($\text{Pr}(> F) = 0,07$), para variável “Fases de manejo”, e alumínio ($\text{Pr}(> F) = 0,06$), saturação por alumínio ($\text{Pr}(> F) = 0,17$), fósforo ($\text{Pr}(> F) = 0,25$), pH ($\text{Pr}(> F) = 0,24$) e saturação por bases ($\text{Pr}(> F) = 0,56$) na variável “Fazendas”. Considerando as interações entre as variáveis “Fases de manejo” e “Fazendas”, apenas os atributos cálcio ($\text{Pr}(> F) < 0,01$), CTC ($\text{Pr}(> F) = 0,02$), saturação por alumínio ($\text{Pr}(> F) = 0,02$), e soma de bases ($\text{Pr}(> F) = 0,04$) apresentaram diferença estatística (Tabela 24).

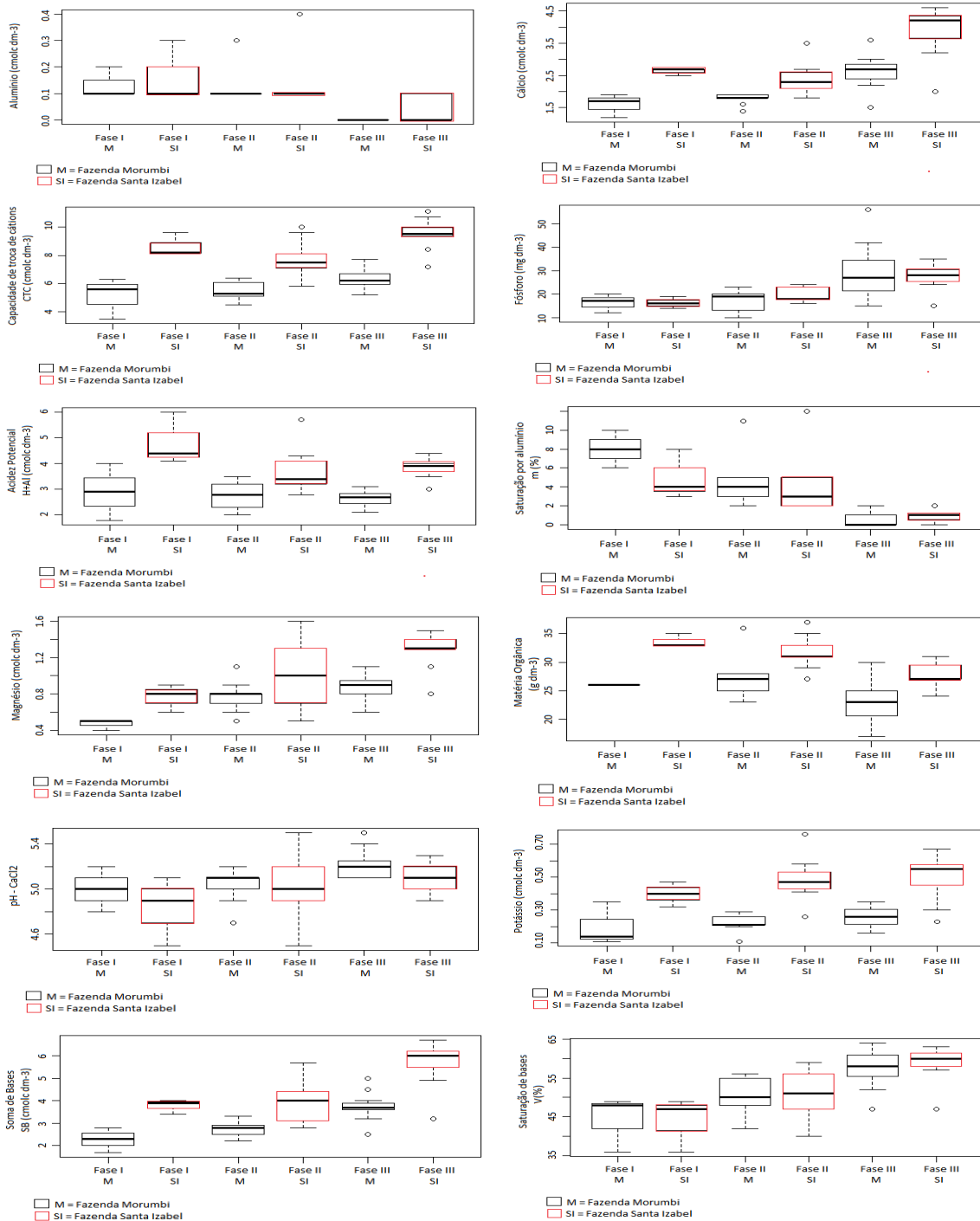


Figura 24. Gráfico boxplot dos teores médios de alumínio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), cálcio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), CTC ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), fósforo (mg dm^{-3}), Acidez potencial - H+Al ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), Saturação por alumínio - m (%), magnésio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), matéria orgânica (g dm^{-3}), pH em CaCl_2 , potássio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), SB ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) e Saturação de bases - V (%) mensurados de 1994 a 2018, nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi para as diferentes Fases de manejo da cultura; o - valores anômalos (outliers).

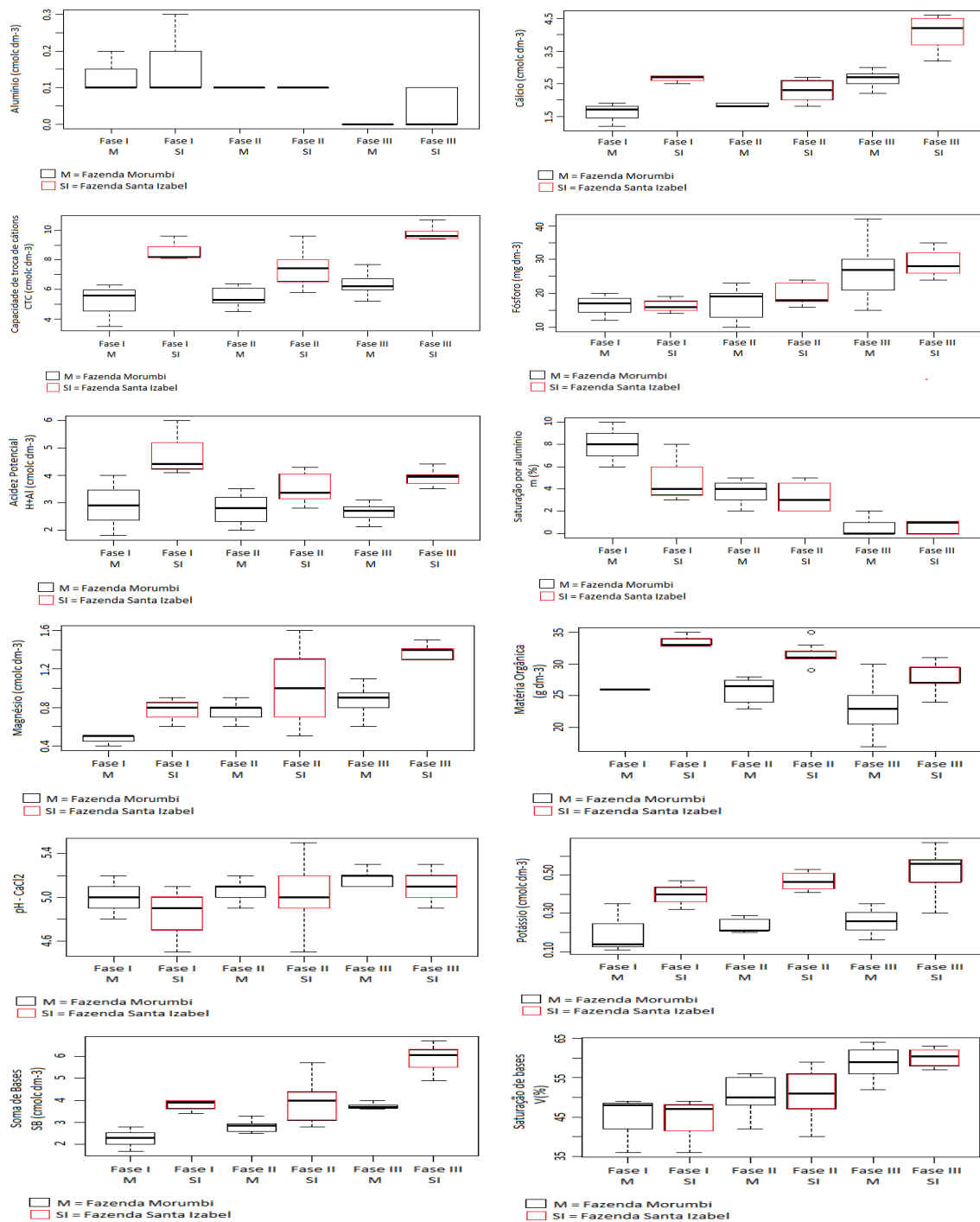


Figura 25. Gráfico boxplot dos teores médios de alumínio (cmol_c dm⁻³), cálcio (cmol_c dm⁻³), CTC (cmol_c dm⁻³), fósforo (mg dm⁻³), Acidez potencial - H+Al (cmol_c dm⁻³), Saturação por alumínio – m (%), magnésio (cmol_c dm⁻³), matéria orgânica (g dm⁻³), pH em CaCl₂, potássio (cmol_c dm⁻³), SB (cmol_c dm⁻³) e Saturação de bases – V (%) mensurados de 1994 a 2018, nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi para as diferentes Fases de manejo da cultura; após a exclusão dos outliers.

Tabela 24. Análise de variância (ANOVA) dos teores médios de alumínio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), cálcio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), CTC ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), fósforo (mg dm^{-3}), Acidez potencial - H+Al ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), Saturação por alumínio - m (%), magnésio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), matéria orgânica (g dm^{-3}), pH em CaCl_2 , potássio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), SB ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e Saturação de bases - V (%) mensurados de 1994 a 2018, nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi para as diferentes Fases de manejo da cultura.

Fontes de variação	Alumínio			Cálcio			CTC			H+Al		
	GL	Fc	Pr(>F)	GL	Fc	Pr(>F)	GL	Fc	Pr(>F)	GL	Fc	Pr(>F)
Fases	2	35.919	0.00000	2	82.161	0.00000	2	17.304	0.00001	2	4.432	0.01862
Fazendas	1	3.673	0.06286	1	98.963	0.00000	1	116.082	0.00000	1	57.277	0.00000
Fases*Fazendas	2	1.053	0.35890	2	10.063	0.00037	2	4.113	0.02438	2	2.763	0.07579
Resíduo	38			34			37			38		
Total	43			39			42			43		
	CV = 59.68%			CV = 11.81%			CV = 12.07%			CV = 15.84%		
Fontes de variação	K			m			Mg			M.O.		
	GL	Fc	Pr(>F)	GL	Fc	Pr(>F)	GL	Fc	Pr(>F)	GL	Fc	Pr(>F)
Fases	2	2.811	0.07338	2	68.389	0.00000	2	15.477	0.00001	2	11.509	0.00013
Fazendas	1	92.077	0.00000	1	1.899	0.17644	1	33.333	0.00000	1	52.206	0.00000
Fases*Fazendas	2	0.468	0.62998	2	4.092	0.02481	2	1.290	0.28779	2	0.728	0.48971
Resíduo	36			37			36			37		
Total	41			42			41			42		
	CV = 23.76%			CV = 45.70%			CV = 21.34%			CV = 9.19%		
Fontes de variação	P			pH			SB			V		
	GL	Fc	Pr(>F)	GL	Fc	Pr(>F)	GL	Fc	Pr(>F)	GL	Fc	Pr(>F)
Fases	2	20.175	0.00000	2	3.656	0.03557	2	41.198	0.00000	2	28.687	0.00000
Fazendas	1	1.336	0.25495	1	1.426	0.24009	1	101.399	0.00000	1	0.331	0.56845
Fases*Fazendas	2	0.212	0.81032	2	0.279	0.75809	2	3.310	0.04824	2	0.076	0.92706
Resíduo	38			37			35			38		
Total	43			42			40			43		
	CV = 23.84%			CV = 3.53%			CV = 14.07%			CV = 9.28%		

* Interação entre as Fontes de variação “Fases de manejo” e “Fazendas”, GL = Grau de liberdade, Fc = Valor de F calculado, CV = Coeficiente de variação

O efeito dos fatores “Fazendas” e “Fases de manejo” sobre os teores médios dos atributos químicos que apresentaram interações entre as fontes de variação semelhante e significativa foram detalhados respectivamente na Tabelas 25 e 26.

Tabela 25. Efeito dos Fatores “Fazendas” e “Fases de manejo” nos teores médios de alumínio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), fósforo (mg dm^{-3}), Acidez potencial - H+Al ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), magnésio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), matéria orgânica (g dm^{-3}), pH em CaCl_2 , potássio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), e Saturação de bases – V (%) mensurados de 1994 a 2018.

Fator "Fazendas"								
Tratamentos	Al	H+Al	K	Mg	M.O.	P	pH	V
Morumbi	0.05 a	2.71 b	0.24 b	0.78 b	24.5 b	21.5 a	5.10 a	53.0 a
Santa Izabel	0.08 a	3.90 a	0.50 a	1.15 a	30.0 a	23.4 a	5.03 a	53.1 a
Fator "Fases de manejo"								
Tratamentos	Al	H+Al	K	Mg	M.O.	P	pH	V
Fase I	0.15 a	3.87 a	0.30 a	0.62 b	29.8 a	16.3 b	4.92 b	44.2 c
Fase II	0.10 b	3.10 b	0.36 a	0.92 a	28.5 a	18.3 b	5.04 ab	50.3 b
Fase III	0.02 c	3.26 b	0.39 a	1.11 a	25.5 b	28.0 a	5.13 a	58.4 a

Médias seguidas por letras iguais em coluna não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Tabela 26. Análise de variância (ANOVA) da interação entre os Fatores “Fazenda” e “Fases” para os teores médios de cálcio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), CTC ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), Saturação por alumínio – m (%) e soma de bases ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) mensurados de 1994 a 2018.

Fator "Fazendas"												
FV	Cálcio			CTC			m			SB		
	GL	Fc	Pr(>F)	GL	Fc	Pr(>F)	GL	Fc	Pr(>F)	GL	Fc	Pr(>F)
Fases	2	82.160	0	2	17.304	0	2	68.388	0	2	41.198	0
Faz.: Fase I	1	15.677	<0.001	1	24.380	0	1	10.061	0.0030	1	10.695	0.0024
Faz.: Fase II	1	7.224	0.0111	1	21.551	0	1	0.745	0.3935	1	20.157	0.0001
Faz.: Fase III	1	95.698	0	1	81.386	0	1	0.015	0.9006	1	61.287	0
Resíduo	34			37			37			35		
Total	39			42			42			40		
Fator "Fases de manejo "												
FV	Cálcio			CTC			m			SB		
	GL	Fc	Pr(>F)	GL	Fc	Pr(>F)	GL	Fc	Pr(>F)	GL	Fc	Pr(>F)
Fazendas	1	98.963	0	1	116.082	0	1	1.899	0.1764	1	101.399	0
Fases: Faz. M	2	17.885	0	2	4.031	0.0261	2	52.102	0	2	9.4763	<0.001
Fases: Faz. SI	2	74.338	0	2	17.385	0	2	20.378	0	2	35.032	0
Resíduo	34			37			37			35		
Total	39			42			42			40		

Analisando os resultados apresentados pelos efeitos das interações entre os Fatores “Fazendas” e “Fases de manejo” (Tabela 27), foi possível verificar que os teores médios de cálcio, CTC e SB apresentaram diferença significativa entre as Fazendas Morumbi e Santa Izabel nas Fases de manejo I, II e III, enquanto a saturação de alumínio apresentou diferença entre as Fazendas Morumbi e Santa Izabel apenas na Fase I, apresentando teores médios semelhantes nas Fases II e III.

Tabela 27. Efeito dos Fatores “Fazendas” e “Fases de manejo” nos teores médios de cálcio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), CTC ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), Saturação por alumínio – m (%) e Soma de bases ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), mensurados de 1994 a 2018.

Fator "Fazendas"				
Atributos	Fazenda	Fase I	Fase II	Fase III
Cálcio	Morumbi	1.6 b	1.8 b	2.6 b
	Santa Izabel	2.6 a	2.3 a	4.1 a
CTC	Morumbi	5.1 b	5.4 b	6.4 b
	Santa Izabel	8.6 a	7.4 a	9.9 a
m	Morumbi	8.0 a	3.8 a	0.6 a
	Santa Izabel	5.0 b	3.3 a	0.7 a
SB	Morumbi	2.3 b	2.8 b	3.7 b
	Santa Izabel	3.8 a	3.9 a	5.9 a
Fator "Fases de manejo"				
Atributos	Fases	Morumbi	Santa Izabel	
Cálcio	I	1.6 b	2.6 b	
	II	1.8 b	2.3 b	
	III	2.6 a	4.1 a	
CTC	I	5.1 a	8.6 ab	
	II	5.4 a	7.4 b	
	III	6.4 a	9.9 a	
m	I	8.0 a	5.0 a	
	II	3.8 b	3.3 b	
	III	0.6 c	0.7 c	
SB	I	2.3 b	3.8 b	
	II	2.8 b	3.9 b	
	III	3.7 a	5.9 a	

Médias seguidas por letras iguais em coluna não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os teores médios de cálcio e de soma de bases só apresentaram diferença significativa na Fase III, em relação as demais fases, nas Fazendas Morumbi e Santa Izabel. Em relação a CTC, na Fazenda Morumbi, os teores médios de CTC foram semelhantes nas três Fases de manejo. Porém, na Santa Izabel, a Fase I não se diferenciou das demais fases, mas houve diferença estatística entre as Fases II e III. Isso ocorreu devido ao aumento desses atributos na camada superficial de solo em decorrência da fertilização dos solos. O comportamento dos teores médios de saturação por alumínio foi semelhante entre as fazendas, ocorrendo diferença estatística em todas as Fases de Manejo, devido ao aperfeiçoamento na práticas de correção do solo.

Em geral, ao longo dos anos, houve aumento nos valores médios de cálcio, CTC, fósforo, magnésio, soma de bases e saturação de bases e redução nos valores médios de

acidez potencial (H+Al), alumínio, matéria orgânica e saturação por alumínio, permanecendo constantes os valores de pH e de potássio.

O aumento das bases, e conseqüentemente da soma de bases, CTC e saturação de bases, e a redução dos teores de H+Al, alumínio e saturação por alumínio eram esperados, devido ao uso de corretivos e de fertilizantes nas áreas. Muitas pesquisas que avaliaram nutrientes no solo para diversas culturas constataram aumento dos teores das bases com o passar do tempo, principalmente nas camadas superficiais de solo (SANTOS; TOMM, 1998; FALLEIRO et al., 2003; CHIBA et al., 2010; ZANÃO JÚNIOR et al., 2010; CAMPOS et al., 2011; PAULETTI et al., 2014). A partir da adoção de práticas como colheita mecanizada sem despalha a fogo, rotação de culturas e plantio direto havia a expectativa de aumento nos teores de matéria orgânica do solo. Entretanto, observou-se diminuição da matéria orgânica ao longo do tempo, o que não corrobora a maioria dos trabalhos que mostraram que sistemas de cultivo com menor manejo do solo apresentam maior disponibilidade de matéria orgânica (HOFFMANN et al., 2018). Estes estudos, com maior frequência, mostraram o comportamento da matéria orgânica no perfil do solo em amostras das camadas de 0-10 e/ou 10 a 20 cm, apontando maiores teores de matéria orgânica na primeira camada mais superficial (SANTOS; TOMM, 1998; RODRIGUES et al., 2007; ZALAMENA, 2008; MARTINS, 2009; ZANÃO JÚNIOR et al., 2010), diferentemente deste estudo que avaliou a camada arável mais espessa (0-20 cm), o que pode ter subestimado os resultados. VEIGA et al. (2012) também avaliaram teores de matéria orgânica em profundidades maiores, verificando decréscimo a 30 cm de profundidade em um período de 9 anos sob plantio direto e rotação de culturas. Os teores de potássio sofreram um acréscimo devido a aplicação da vinhaça e de seu poder residual, com diminuição observada após a opção de cessar a aplicação do subproduto a partir de 2015 (Tabela 6).

Considerando o conceito de fertilidade construída, elevados valores de acidez potencial (H+Al), de alumínio trocável e de saturação por alumínio ocorrem concomitantemente com a baixa quantidade de bases trocáveis, o que limita o desenvolvimento da cultura e afeta a produtividade. Para que estes atributos atinjam o nível crítico, é necessário a diminuição dos seus valores, segundo os critérios apresentados na Tabela 5. Critérios de classificação dos atributos químicos utilizados para a avaliação

da fertilidade do solo.. O alumínio e a saturação por alumínio sempre apresentaram valores dentro da classe “baixo” nas duas propriedades, não sendo considerados fatores limitantes a produção. Porém, os teores de H+Al não atingiram o nível crítico, se mostrando um fator limitante para alto rendimento relativo da cultura (Figura 26).

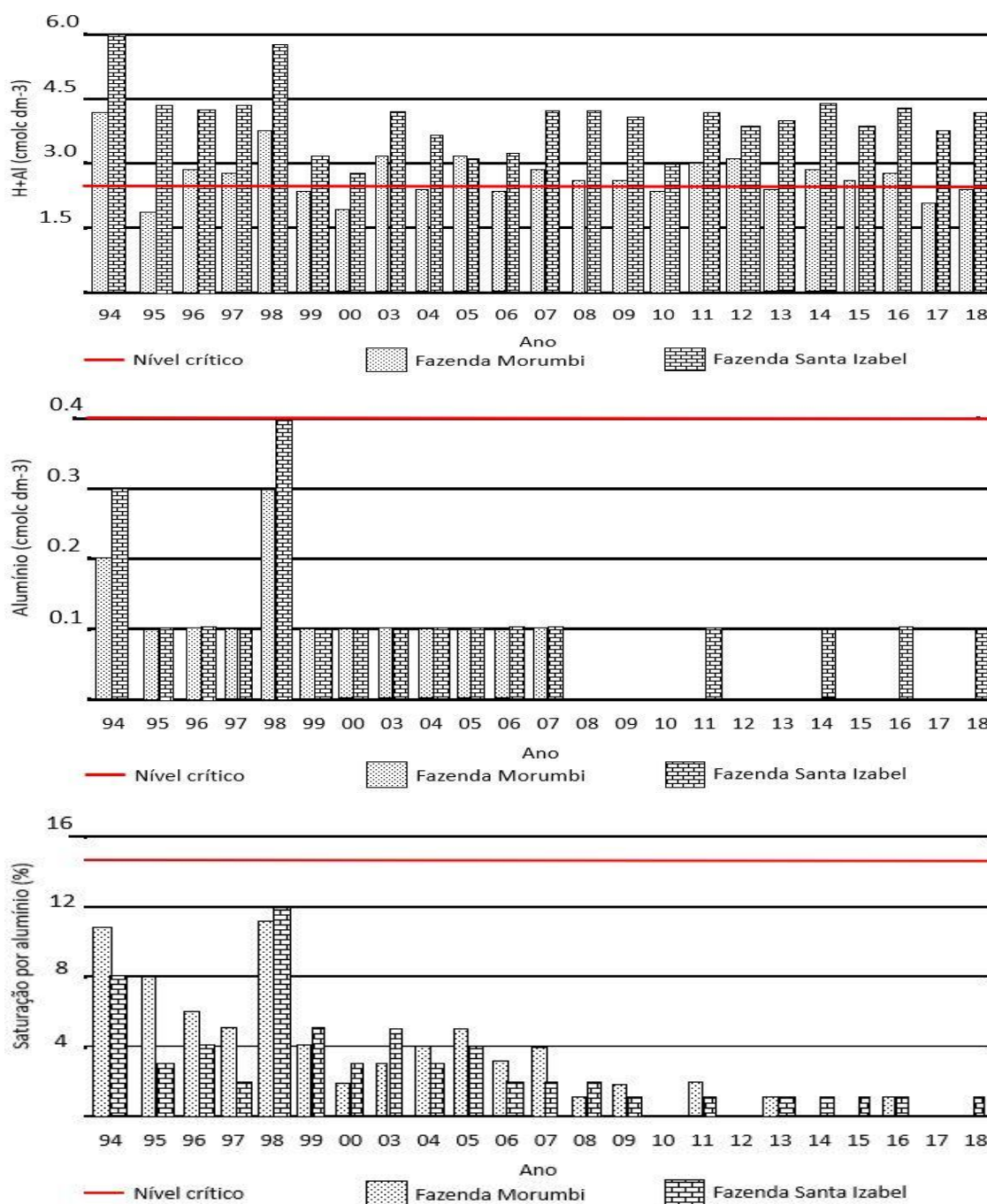


Figura 26. Classificação dos teores médios de acidez potencial – H+Al (cmol_c dm⁻³), alumínio (cmol_c dm⁻³) e saturação por alumínio – m (%), mensurados na profundidade 0-20 cm nas Fazendas Morumbi e Santa Izabel desde 1994 a 2018.

Os teores de fósforo, e os valores de pH e de saturação de bases não atingiram o nível crítico em nenhuma das propriedades (Figura 27), sendo considerados fatores limitantes para o rendimento relativo.

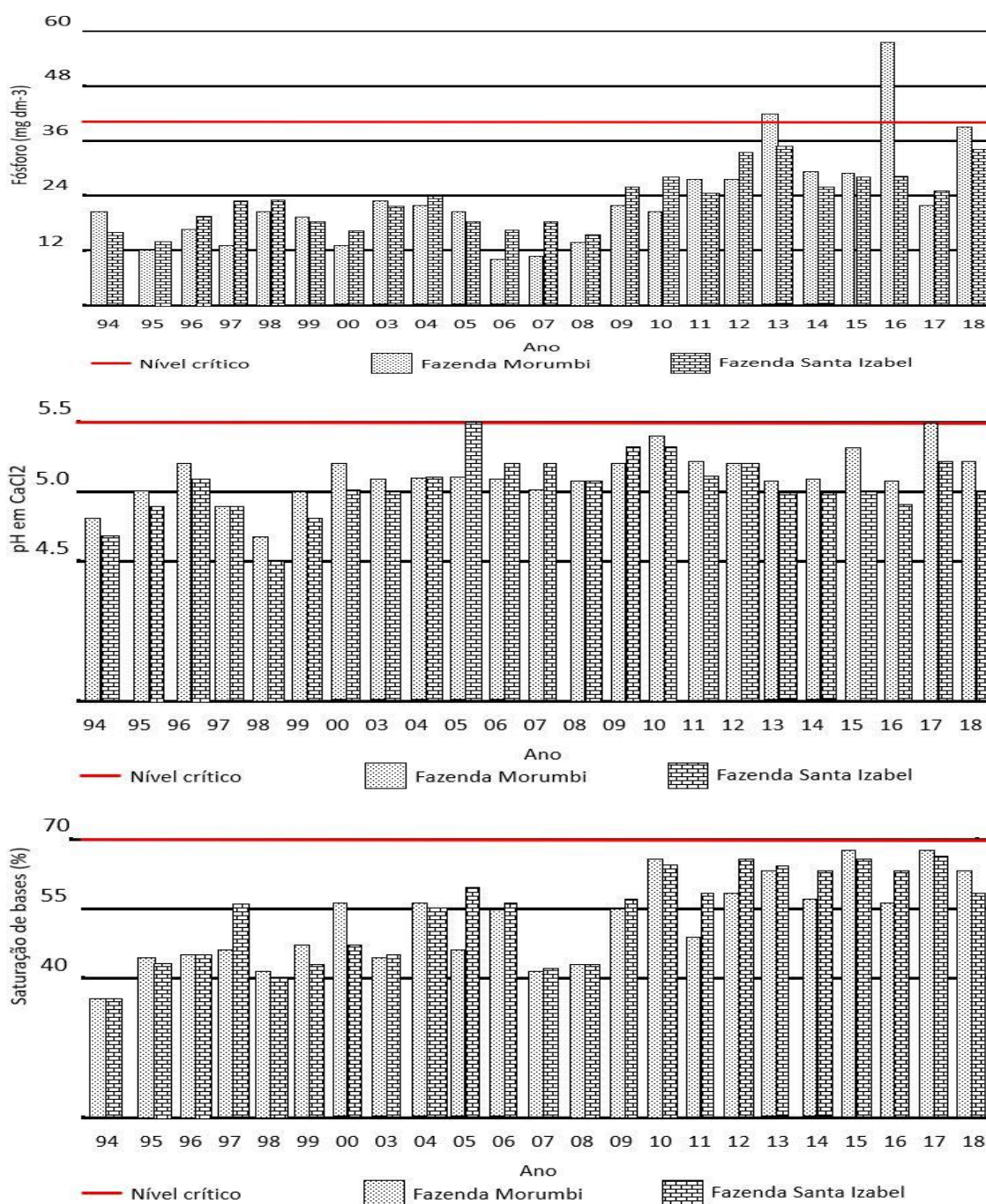


Figura 27. Classificação dos teores médios de fósforo (mg dm⁻³), pH em CaCl₂ e saturação de bases – V (%), mensurados na profundidade 0-20 cm nas Fazendas Morumbi e Santa Izabel desde 1994 a 2018.

Os teores de soma de bases atingiram o nível crítico a partir de 2009, na Fazenda Santa Izabel, e de 2012 na Fazenda Morumbi. Para o cálcio, o nível crítico sempre foi atingido em ambas propriedades, enquanto a CTC só foi observada na Fazenda Santa Izabel a partir de 2011 (Figura 28).

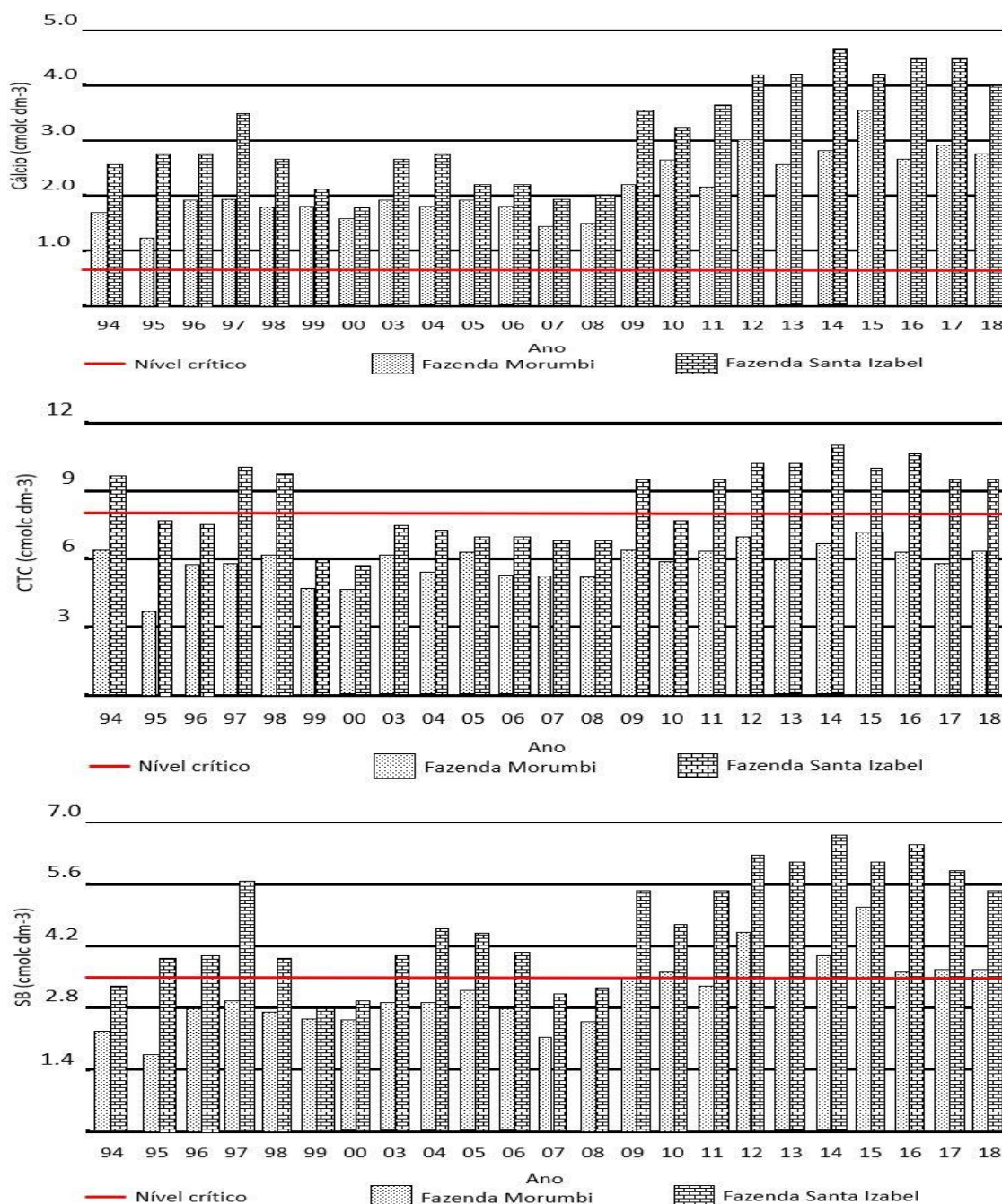


Figura 28. Classificação dos teores médios de cálcio (cmol_c dm⁻³), CTC (cmol_c dm⁻³) e soma de bases – SB (cmol_c dm⁻³), mensurados na profundidade 0-20 cm nas Fazendas Morumbi e Santa Izabel desde 1994 a 2018.

Os teores de matéria orgânica e de potássio sempre estiveram acima do nível crítico na Fazenda Santa Izabel. Na Morumbi, o teor de matéria orgânica esteve acima do nível crítico desde 1994. Porém, observou-se oscilação dos seus valores, que ficaram abaixo do nível crítico desde 2010. Mesmo com a aplicação de vinhaça, os teores de potássio sempre estiveram abaixo do nível crítico. Os teores de magnésio atingiram o nível crítico em 2009 em ambas propriedades, mas passaram a estar abaixo deste valor a partir de 2016 na Fazenda Morumbi (Figura 29).

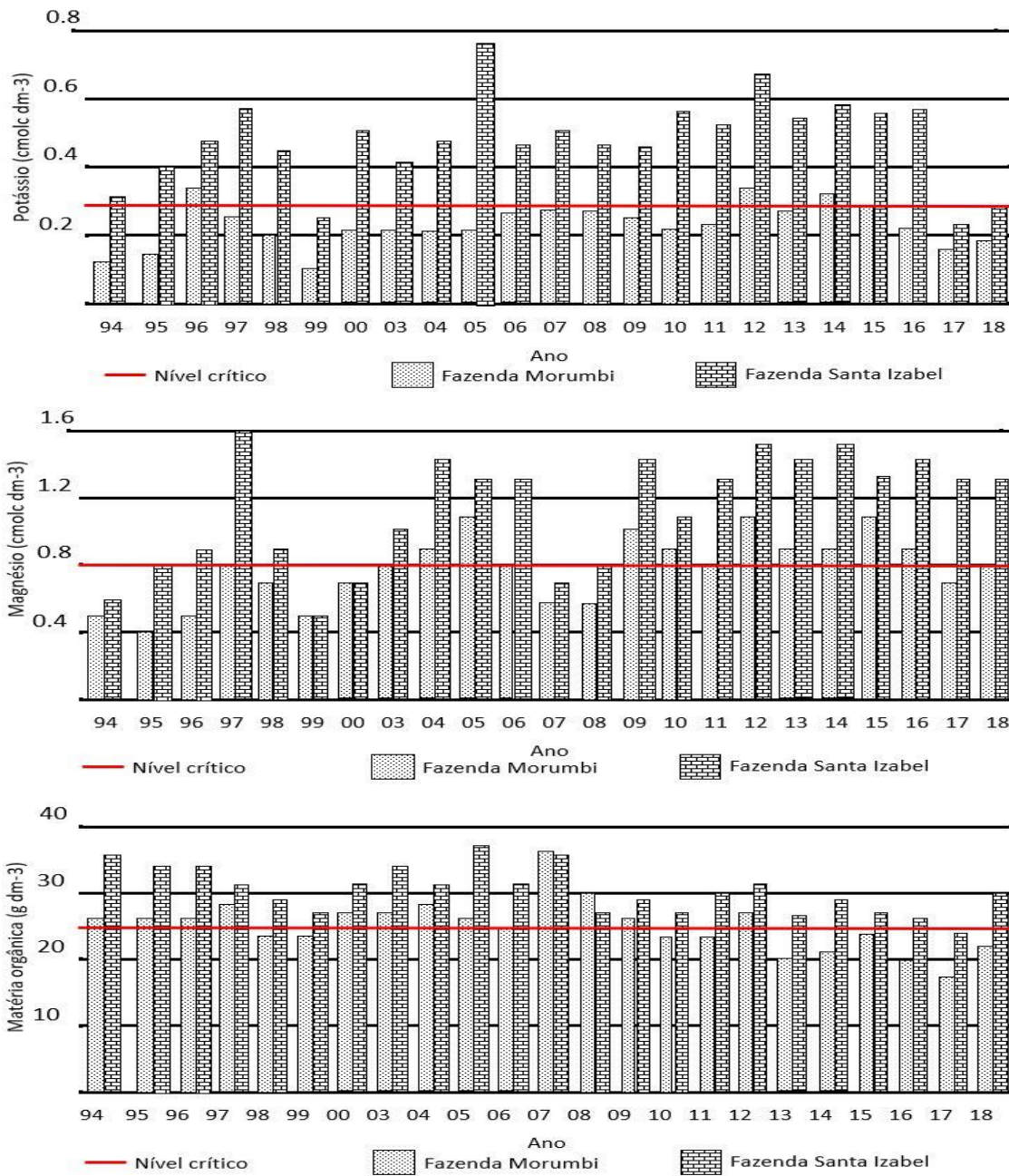


Figura 29. Classificação dos teores médios de potássio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), magnésio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) e matéria orgânica (g dm^{-3}), mensurados na profundidade 0-20 cm nas Fazendas Morumbi e Santa Izabel desde 1994 a 2018.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na camada superficial (0-20 cm), a CTC (Santa Izabel), a soma de bases (Santa Izabel) e o teor de magnésio (Morumbi e Santa Izabel, na profundidade 0-20cm, atingiram o nível crítico, sendo indicativos da construção da fertilidade do solo. Os teores médios de cálcio, de alumínio e de saturação por alumínio sempre estiveram acima do nível crítico. Porém, como não foram fatores limitantes para a produtividade, não foi possível relacionar esses atributos com a melhoria na produtividade das propriedades.

Os atributos de fertilidade do solo que se comportaram como limitantes para a produção na Fazenda Morumbi foram CTC, soma de bases (SB) e os teores de magnésio e de matéria orgânica. A acidez potencial (H+Al), o teor de fósforo, o pH e a saturação de bases (V) foram considerados fatores limitantes em ambas as propriedades. Contudo, os valores médios de H+Al, P, V, SB e Mg, embora não tenham atingido o nível crítico, tiveram aumento em função do manejo, com a possibilidade de alcançar com o tempo o nível crítico. Em situação oposta se encontra o teor de K, que tenderá a se tornar um fator limitante em vista da suspensão da aplicação de vinhaça em 2015 e a considerável queda nos teores de 2017 e 2018. O objetivo de formar banco de dados tem essa finalidade de comparar a ascensão ou decréscimo dos nutrientes ao longo do ciclos agrícolas da cana-de-açúcar em função do manejo quanto o aporte de nutrientes quer via corretivos ou fertilizante.

Apesar de não ter sido observada melhorias significativas nos atributos químicos de subsuperfície de 1993 a 2018, quando comparada às da camada superficial, o aumento nos teores de Ca em subsuperfície (camada de 80-100 cm) implicou condição mais favorável ao desenvolvimento radicular, promovendo de forma indireta vantagens em relação a produtividade e a longevidade do canavial. Essa pouca variabilidade em subsuperfície se deve a baixa interferência antrópica, por isso que utiliza a camada de 80-100 cm para diagnosticar os atributos químicos pedológicos. Solos pouco tamponados como os ácidos tiveram em alguns pontos essas alterações nos atributos químicos pedológicos passando de Latossolo ácido para distrófico, mesotrófico e até mesmo eutrófico com pequena elevação de bases.

O conjunto de todas as melhorias diretas e indiretas que o manejo proporcionou foi essencial para o aumento de produtividades nas fazendas, promovendo a equiparidade das produtividades das propriedades. Ao manejar os canaviais tem que levar em consideração os fatores de produtividade, em destaque para a alocação varietal, épocas de plantio e corte em função dos ambientes de produção. Devido a ausência de repetições quanto às informações de produtividade, a divisão de Fases de manejo em função do histórico das fazendas foi determinante para o desenvolvimento dessa pesquisa, ficando evidenciado a importância de elaborar um histórico de manejo das fazendas e de aprimorar constantemente a interpretação das informações. Trata-se de uma prática técnica ainda subutilizada no setor agrícola, sendo de suma importância a conscientização dos produtores em relação a esse acompanhamento.

7. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos foi possível obter as seguintes conclusões:

O levantamento de informações sobre o histórico de cultivo da cana-de-açúcar nas Fazendas Morumbi e Santa Izabel mostrou que houve importantes mudanças na adoção de práticas de manejo do solo e de tratamentos culturais, além da maior atenção na seleção de variedades e na alocação varietal. Este conjunto de práticas agronômicas conduziu as propriedades à adequação cada vez mais intensa aos conceitos de ambiente de produção.

O conhecimento dos históricos de manejo realizados ao longo dos ciclos agrícolas permitiu a visualização das fases de manejos agrícola aprimorado, o que foi decisivo nos ganhos de produtividade e nos atributos químicos do solo.

Os manejos varietal associados com as épocas de colheita em função dos ambientes de produção contribuíram de forma positiva para o aumento do potencial produtivo do solo especialmente na fazenda Morumbi.

O potencial produtivo das Fazendas Morumbi (M) e Santa Izabel (SI) aumentou ao longo do período de 1993 (74 t ha⁻¹ - M e 86 t ha⁻¹ - SI) a 2018 (86 t ha⁻¹ - M e 96 t ha⁻¹ - SI), com destaque para a produtividade de cana-de-açúcar na Fazenda Morumbi, que, desde 2008, passou a apresentar produtividade semelhante à da Fazenda Santa Izabel (92 t ha⁻¹ - M e 97 t ha⁻¹ - SI).

Houve a construção da fertilidade do solo, sobretudo da camada arável para a CTC e soma de bases na Fazenda Santa Izabel e teor de magnésio em ambas as propriedades, e variações de atributos químicos de subsuperfície que resultaram em mudanças na classificação pedológica (ácrico para eutrófico e distrófico e distrófico para eutrófico), associadas à adoção de um conjunto de práticas de manejo do solo. Entretanto, o aumento da produtividade nas propriedades foi atribuído a um conjunto mais amplo de medidas agronômicas, que integrou o manejo do solo, a alocação varietal e o ajuste da época de colheita da cana-de-açúcar.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGEITEC – AGÊNCIA EMBRAPA DE INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_93_22122006154841.html. Acesso em: 04/06/2017.
- AGEITEC – AGÊNCIA EMBRAPA DE INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_85_22122006154841.html. Acesso em: 21/12/2018.
- AGUIAR, A. T. E.; GONÇALVES, C.; PATERNIANI, M. E. A. G. Z.; TUCCI, M. L. S.; CASTRO, C. E. F. Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas (**Boletim IAC, nº 200**). Campinas, 7ª ed., 452p. 2014.
- ALLEONI, L. R. F.; BEAUCLAIR, E. G. F. Efeito do tipo de sulcador em diversos parâmetros de crescimento e na produtividade da cana-de-açúcar. **STAB-Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 14, n. 3, p. 24-27, 1996.
- ALVAREZ V., H. H.; de NOVAIS, R. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª aproximação, editores – **Viçosa/MG**, p. 25-32. 1999.
- AQUINO, G. S.; MEDINA, C. C.; PORTEIRA JUNIOR, A. L.; SANTOS, L. O.; CUNHA, A. C. B.; KUSSABA, D. A. O.; SANTOS JUNIOR, J. H.; ALMEIDA, L. F., SANTIAGO, A. D. Sistema radicular e produtividade de soqueiras de cana-de-açúcar sob diferentes quantidades de palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.50, n.12, p. 1150-1159, dez. 2015.
- ARCGIS DESKTOP: Release 10. Redlands, CA: **Environmental Systems Research Institute (ESRI)**, 2011.
- BALL-COELHO, B. SAMPAIO, E. V. S. B.; TIESSEN, H. STEWART, J. W. B. Root dynamic in plant ratoon crops of sugar cane. **Plant and Soil**, v. 142, p. 297-305, 1992.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. Elementos da natureza e propriedades dos solos; tradução técnica: Igo Fernando Lepsch. Porto Alegre-RS: **Bookman**, 3 ed. 686p. 2013.
- BRASIL. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Topodata: banco de dados geomorfométricos do Brasil. **Variáveis geomorfométricas locais**. São José dos Campos, 2008.
- BUSO, P. H. M. Estudo do sistema radical de cana-de-açúcar no plantio em gema e tolete. Dissertação de Mestrado – **Universidade Federal do Paraná**. Curitiba, 2006, 73f.
- CAIRES, E. F.; CHUEIRI, W. A.; MADRUGA, E. F.; FIGUEIREDO, A. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 27-34, 1998.
- CAMARGO, M. N.; KLAMT, E.; KAUFFMAN, J. H. Sistema brasileiro de classificação de solos. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, n. 1, p. 11-13, jan/abr. 1987.
- CAMPOS, L. P.; LEITE, L. F. C.; MACIEL, G. A.; IWATA, B. F.; NÓBREGA, J. C. A. Atributos químicos de um Latossolo Amarelo sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.46, n.12, p. 1681-1689, dez. 2011.
- CHIBA, M. K.; VIEIRA, S. R.; GONZÁLEZ, A. P.; DECHEN, S. C. F.; MARIA, I. C. Alterations and spatial variability of soil fertility in successive years under no tillage system. **Bragantia**, Campinas, v. 69, Suplemento, p. 29-38, 2010.

- CNI – **Confederação Nacional da Indústria**. O setor sucroenergético em 2030: dimensões, investimentos e uma agenda estratégica / Marcos Fava Neves; Felipe Gerardi; Rafael Bordonal Kalaki; Renata Gali. Brasília. CNI, 100p. 2017.
- COELHO, A. M. Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e culturas. O autor, Sete Lagoas: **EMBRAPA Milho e Sorgo**, n. 46, 60p. 2005.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. v.4, Safra 2017/18, n.4. Quarto levantamento, Brasília, p. 1-73, abr. 2018.
- COOK, R. D. Detection of influential observation in linear regression. **Technometrics**, Rochester, v. 19, n. 1, p. 15-18, 1977.
- CORTEZ, L.; MAGALHÃES, P. HAPP, J. Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização. **Revista Brasileira de Energia**, v.2, p. 111-146, 1992.
- CRUZ, D. M. Plantio direto e preparo reduzido ganham terreno. **Jornal Cana**, p.34, mar. 2003.
- CRUZ, M. R. O.; MAGALHÃES, M. M. Rotação de culturas e efeito sobre os custos na reforma de canal na região da Alta Paulista. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v.9, n.7, p. 92-109, 2013.
- CURI, N., KER, J. C.; NOVAIS, R. F.; VIDAL-TORRADO, P.; SCHAEFER, C. E. G. R. Pedologia – Solos dos biomas brasileiros. Viçosa, MG: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 1ed., 597p. 2017.
- CURY, T.N.; DE MARIA, I.C.; BOLONHEZI, D. Biomassa radicular da cultura de cana-de-açúcar em sistema convencional e plantio direto com e sem calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 6, p. 1929-1938, 2014.
- DAROS, E.; OLIVEIRA, R. A.; BARBOSA, G. V. S. 45 anos RB de cana-de-açúcar: 25 anos de Ridesa. Curitiba: **Graciosa**, 1ed., 156 p. 2015.
- DEMATTE, J. L. I. Cultura da cana-de-açúcar: recuperação e manutenção da fertilidade dos solos. **Encarte Informações Agrônomicas Potafos**, n. 111, p. 1-24, 2005.
- DEMATTE, J. L. I.; DEMATTE, J. A. M. Ambientes de produção como estratégia de manejo na cultura da cana-de-açúcar. **IPNI: International Plant Nutrition Institute**. Piracicaba, n. 127, p. 10-18, 2009.
- DIAS, F. L. F. Sistemas de preparo de solo em área de colheita mecanizada de cana crua. 2001. 83 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, **Universidade Estadual Paulista**, Jaboticabal, 2001.
- DIAS, F. L. F.; MAZZA, J. A.; MATSUOKA, S.; PERECIN, D.; MAULE, R. F. Produtividade da cana-de-açúcar em relação a clima e solos da região noroeste do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 627-634, 1999.
- DUARTE, A. P.; KANTHACK, R. A. D. Tecnologias desenvolvidas pela APTA na região do médio Paranapanema. Campinas: **Instituto Agrônomo**, 252p. 2017.
- EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro: **EMBRAPA-CNPS; EMBRAPA-SPI**, 412p. 1999.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA E AGROPECUÁRIA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5 ed. Brasília-DF: **Embrapa Solos**. 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1094003/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>.

- FALLEIRO, R. M. SOUZA, C. M.; SILVA, C. S. W.; SEDIYAMA, C. S.; SILVA, A. A.; FAGUNDES, J. L. Influência dos sistemas de preparo nas propriedades químicas e físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 1097-1104, 2003.
- FERNANDES, A. L. T.; SANTINATO, F.; SANTINATO, R. Utilização da subsolagem na redução da compactação do solo para a produção de café cultivado no cerrado mineiro. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v. 8, n. 15, p. 1648-1657, 2012.
- FIORETTO, R. A.; CARNEIRO, C. E. A.; PAVAN, M. A.; FIORETTO, C. C.; BÜLL, L. T. The role of sugar cane straw on soil reaction. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, p. 2069-2074, 2009.
- GAGANTINI, H.; MELLO, F. A. F.; ARZOLLA, S. Efeitos da calagem no pH de perfis de solos de cerrado. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, 53 Piracicaba, v. 39, n. 2, p. 1141-1158, 1982. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/aesalq/v39n2/28.pdf> . Acesso em: 27 dez. 2018.
- GOMES, F. P.; GARCIA, C. H. Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais. Piracicaba: **FEALQ**, 305p. 2002.
- GONÇALVES, N. H. Manejo do solo para a implantação da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. DE S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. de. (Org.). **Atualizações em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: Ed. dos Autores, p. 93-103, 2006.
- HOFFMANN, R. B.; MOREIRA, E. E. A.; HOFFMANN, G. S. S.; ARAÚJO, N. S. F. Efeito do manejo do solo no carbono da biomassa microbiana. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, Curitiba, v.1, n.1, p.168-178. jul./set. 2018.
- JOAQUIM, A. C.; BELLINARO, I. F.; DOVXCNZELLI, J.L.; QUADROS, A. C.; BARATA, M.Q.F. Potencial e manejo de solos cultivados com cana-de-açúcar In: **SEMINÁRIO COPERSUCAR DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA**, 6., 1994, Piracicaba. Anais... Piracicaba: Copersucar, p.1-9, 1994.
- JÚNIOR, G. B. M.; VILELA, L.; SOUSA, D. M. G. Cerrado: uso eficiente de corretivos e fertilizantes em pastagens. Planaltina, DF: **Embrapa Cerrados**, 224p. 2007.
- JÚNIOR, J. B. D.; COELHO, F. C. A cana-de-açúcar e, sistema de plantio direto comparado ao sistema convencional com e sem adubação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.6, p. 576-583, 2008.
- KÄMPF, N.; CURI, N. Formação e evolução do solo (Pedogênese). In: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. Pedologia – Fundamentos. Viçosa, MG: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 1ed., P. 207-302, 2012.
- KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. Pedologia – Fundamentos. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 1ª ed. 343p. 2012.
- LACERDA, J. J. J.; RESENDE, A. V.; NETO, A. E. F.; HICKMANN, C.; CONCEIÇÃO, O. P. Adubação, produtividade e rentabilidade da rotação entre soja e milho com fertilidade construída. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 9, Brasília, set. 2015.
- LANDELL, M. G. A.; BRESSIANI, J. A. Melhoramento genético, caracterização e manejo varietal. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. De.; LANDELL, M. G. A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico, 2008. cap.2, p. 47-56, 2008.

- LANDELL, M. G. A.; BRESSIANI, J. A. Melhoramento genético, caracterização e manejo varietal. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. De.; LANDELL, M. G. A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, p. 101-156, 2010.
- LANDELL, M. G. A.; PRADO, H.; VASCONCELOS, A. C. M.; PERECIN, D.; ROSSETTO, R.; BIDÓIA, M. A. P.; SILVA, M. & XAVIER, M. A. **Oxisol subsurface related to sugarcane productivity**. Scientia Agrícola, v.60, n.4 p741-745, 2003.
- LANDELL, M. G. A.; XAVIER, M. A.; GARCIA, J. C.; PRADO, H.; AZANIA, C. A. M.; SCARPARI, M. S.; DINARDO-MIRANDA, L. L.; ANJOS, I. A.; SILVA, D. N.; BIDÓIA, M. A. P.; BRANCALIÃO, S. R.; ROSSETTO, R.; VITTI, A. C. Cana-de-açúcar. In: AGUIAR, A. T. E.; GONÇALVES, C.; PATERNIANI, M. E. A. G. Z.; TUCCI, M. L. S. A.; CASTRO, C. E. F. **Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas (Boletim IAC nº 200)**, Campinas: Instituto Agrônomo, 7ª ed, 452 p. 2014.
- LOPES, A. S. Solos sob “cerrado”: características, propriedades e manejo. Piracicaba-SP: Instituto da Potassa & Fosfato, Instituto Internacional da Potassa. 162p. 1983.
- MALVESTITI, J. A.; SOARES, M. R.; CASAGRANDE, J. C.; OLIVEIRA, M. S. Desenvolvimento radicular de variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) submetidas ao alumínio em solução. In: FertBio 2012, 2012, Maceió/AL. **Anais da FertBio 2012**, 2012.
- MARIN, F. R.; CARVALHO, G. L. Spatio-temporal variability of sugarcane yield efficiency in the state of São Paulo, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.2, p. 149-156, fev. 2012.
- MARTINS, C. M. Atributos de solos e sua relação com o processo de desertificação no semi-árido de Pernambuco, 94 f., 2009. Dissertação (mestrado em Ciência do Solo), **Universidade Federal Rural de Pernambuco**. Departamento de Agronomia, 2009.
- MAZZA, J. A.; FERNANDES, M. M. Q.; BARBIERI, D. M. **Mapa de solos e Ambientes de produção de cana-de-açúcar da Bunge** – Unidade Monte Verde. 2010.
- MONTEIRO, L. A. Modelagem agrometeorologia como base para a definição de ambientes de produção para a cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. 2012. Tese (Mestrado em Ciências) – **Física do Ambiente Agrícola**, Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2012.
- MORAES, M. A. F. D. Indicadores do mercado de trabalho do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar do Brasil no período de 1992-2005. **Estudos Econômicos**, São Paulo, v.37, n.4, out-dez, 2007.
- NETO, W. C. R. Meios para produção de cana-de-açúcar. **Informativo da Produção de Leite**, Viçosa, ed.294, out, 2013.
- OLIVEIRA, J. B.; PRADO, H. Levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo: quadrícula de Ribeirão Preto. Memorial Descritivo. Campinas: **Instituto Agrônomo**, (Boletim, 7), 133p. 1987.
- OTTO, R.; FRANCO, H. C. J. ; FARONI, C. E. ; VITTI, A. C. ; TRIVELIN, P. C. O. Fitomassa de raízes e da parte aérea da cana-de-açúcar relacionada à adubação nitrogenada de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira (1977. Impressa)**, v. 44, p. 398-405, 2009.

- PAULETTI, V.; PIERRI, L.; RANZAN, T.; BARTH, G.; MOTTA, A. C. V. Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 495-505. 2014.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: **Editora Agropecuária**, 1 ed. v. 1, 478p. 2002.
- PISSINATO, B. A cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo entre 1950 e 2010: evolução histórica da área e da produtividade. 161p. 2014. Dissertação (Mestrado) – **Economia Aplicada**, Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2014.
- PRADO, H. **Pedologia fácil - Aplicações na agricultura**. 2. ed. rev. ampl. Piracicaba: O Autor, 145 p. 2008.
- PRADO, H. **Pedologia fácil: aplicações em solos tropicais**. Piracicaba: **O Autor**, 5. ed. 271 p. 2016.
- PRADO, H. Solos tropicais – potencialidades, limitações, manejo e capacidade de uso. 2 ed. revisada e ampliada, Jaboticabal: **FUNEP**, 231p. 1998.
- PRADO, H. A. B.; PRADO, T. A. B.; VITTI, A. C.; PRADO, H. Eficiência da matriz de colheita nos diferentes ambientes de produção de cana-de-açúcar. In: CONGRESO SUELOS 2015 – POR EL MANEJO SOSTENTABLE DEL SUELO, 2015, Havana-Cuba, **Instituto de Suelos**, 2015.
- PRADO, R. C.; VITTI, A. C.; PRADO, H.; GAVA, G. J. C.; PRADO, T. A. B.; GIRIO, L. A. S. Influência dos ambientes de produção: Nitossolos Háplicos e Latossolos Amarelos na produtividade de cana-de-açúcar. In: XXXIII Congresso Brasileiro de Ciências do Solo, 2011. Uberlândia/MG. **Anais do Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, 2011.
- PRADO, T. A. B. Ambientes de produção de cana-de-açúcar e capacidade de uso das terras do Centro de Ciências Agrárias, da Universidade Federal de São Carlos, Araras-SP. 2014. 81p. Trabalho de Conclusão de Curso – **Universidade Federal de São Carlos – SP**, 2014.
- PRADO, T. A. B.; VITTI, A. C.; PRADO, H. Produtividade de cana-de-açúcar nos ambientes de produção: Nitossolos e Latossolos Vermelhos da região de Piracicaba. In: XXXIII Congresso Brasileiro de Ciências do Solo, 2011. Uberlândia/MG. **Anais do Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, 2011.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A Language and environment for statistical computing**. Vienna, R Foundation for Statistical Computing. Disponível em:< <https://www.r-project.org/>> . Acesso em: 01 mai.2017.
- RAIJ, B. V. Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. Piracicaba, SP: International Plant Nutrition Institute, 420 p. 2011
- RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, I. A.; FURLANI, A. M. C. Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. **Boletim técnico, IAC**, Campinas/SP, n. 100, 285 p. 1997.
- RESENDE, A. V.; FONTOURA, S. M. V.; BORGHI, E.; SANTOS, F. C.; KAPPES, C.; JUNIOR, A. O.; BORIN, A. L. D. C. Solos de fertilidade contruída: características, funcionamento e manejo. **Informações Agronômicas**, n. 156, dez. 2016.

- RESENDE, A. S.; XAVIER, R. P.; OLIVEIRA, O. C.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M.; Long-term effects of pre-harvest burning and nitrogen and vinasse applications on yield of sugar cane and soil carbon and nitrogen stocks on a plantation in Pernambuco, N. E. Brazil. **Plant and Soil**, v. 281, n. 1-2, p. 339-351; 2006.
- RIDESA – Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro. **Catálogo Nacional de variedades “RB” de cana-de-açúcar**. Disponível em: <http://canaufv.com.br/catalogo/catalogo-2010.pdf>. Acesso em: 29/05/2017.
- RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. Ventajas del acercamiento del residuo para quema y producción de vapor. **Técnicaña**, v. 21, p. 22-24, 2009.
- RODRIGUES, G. B.; MALTONI, K. L. CASSIOLATO, A. M. R. Dinâmica da regeneração do subsolo de áreas degradadas dentro do bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.1, p.73-80, 2007.
- SÁ, M. A. C.; SANTOS JUNIOR, J. D. G.; FRANZ, C. A. B.; REIN, T. A. Qualidade física do solo e produtividade da cana-de-açúcar com uso da escarificação entre linhas de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 51. n.9. p.1610-1622, set. 2016.
- SANTOS, E. L. E.; SEIDEL, E. J.; PAZINI, J. B.; OLIVEIRA, M. S.; NETO, E. A.; BARBOSA, I. C. Some aspects about the spatial dependence index for variability of soil attributes. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 48, n. 6, 7p. 2018.
- SANTOS, G. A. dos.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; FURTINI NETO, A. E. Diferentes graus de compactação e fornecimento de fósforo influenciado no crescimento de plantas de milho (*Zea mays* L.) cultivadas em solos distintos. **Ciências e Agrotecnologia**, v.29. p. 740-752. 2005.
- SANTOS, H. P.; TOMM, G. O. Rotação de culturas para cevada após dez anos: efeitos na fertilidade do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.28, n.4, p.573-580, 1998.
- SCARPARI, M. S.; BEAUCLAIR, E. G. F. Anatomia e botânica. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. De.; LANDELL, M. G. A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. cap.2, p. 47-56, 2008.
- SEKI, A. S.; SEKI, F. G.; JASPER, S. P.; SILVA, P. R. A.; BENEZ. S. H. Efeito de práticas de descompactação do solo em áreas sob sistema plantio direto. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 46, n. 3, p. 460-468, jul-set, 2015.
- SHAPIRO, S. S.; WILK, M. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, p. 591-611, 1965.
- SICAR – **SISTEMA NACIONAL DE CADASTRO AMBIENTAL RURAL**. Disponível em: <http://www.car.gov.br/publico/imoveis/index>. Acesso em: 12/10/2017.
- SOARES, M. R.; CASAGRANDE, J. C.; NICOLOSO, R. S. Uso da vinhaça da cana-de-açúcar como fertilizante: eficiência agrônômica e impactos ambientais. In: PALHARES, J. C. P.; GEBLER, L. (Ed.). **Gestão ambiental na agropecuária**. Brasília: Embrapa, cap. 4. P. 145-198, 2014.
- SOARES, M. R. S.; CASAGRANDE, J. C.; SOSSAI, J. N.; MOTA, E. P.; DONADON, J. R.; NETO, L. H. M. M.; MILAN, B.; CRUGER, F. F.; ROUVÊA, R. J. P.; SANTOS, J. P. A. Levantamento do consumo de fertilizante e utilização da análise de solo por pequenos e médios produtores agrícolas da região de Araras-SP. **Revista Ciência em Extensão**, v. 5, n. 1, p.56, 2009.

- SOARES, R. A. B.; CARDOSO, H. R. Irrigação de salvamento em cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; FERNANDES, C.; PINTO, A. S. Expansão e renovação de canavial. **Piracicaba**: cp. 2, p. 281-293. 2007.
- SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Cerrado: correção do solo e adubação. Brasília, DF: **Embrapa Informação Tecnológica**, 2 ed. 416p. 2004.
- SOUZA, D. M. G.; RITCHEY, K. D. Uso de gesso no solo de cerrado. In: Seminário sobre o uso de fosfogesso na agricultura, 1., Brasília, 1986. Anais. Brasília, **Embrapa-DDT**, p. 119-144, 1986.
- SOUZA, J. M.; PRADO, R. M.; PAIXÃO, A. C. S.; CESARIN, L. G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 3, p. 271-278, mar. 2005.
- STORINO, M.; FILHO, A. P.; KURACHI, S. A. H. Aspectos operacionais de preparo de solo. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. De.; LANDELL, M. G. A. **Cana-de- açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. cap.25, p. 547-572, 2008.
- TAVARES, O. C. H.; LIMA, E.; ZONTA E.. Crescimento e produtividade da cana planta cultivada em diferentes sistemas de preparo do solo e de colheita. **Acta Scientiarum**. Agronomy Maringá, v. 32, n. 1, p. 61-68, 2010.
- TOMÉ JR, J. B. Manual para interpretação de análise de solo. Guaíba-RS: **Agropecuária**, 247 p. 1997.
- UNICA – **União da Indústria de Cana-de-açúcar**. Disponível em: www.unicadata.com.br. Acesso em: 15/07/2018.
- VASCONCELOS, A. C. M.; CASAGRANDE, A. A. Fisiologia do sistema radicular. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. De.; LANDELL, M. G. A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008, p. 79-100, 2008.
- VASCONCELOS, A. C. M.; GARCIA, J. C. Desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar. **Encarte do Informações Agronômicas (Potafos)**, nº 110, p. 1-5, jun. 2005.
- VEIGA, M.; PANDOLFO, C. M.; JUNIOR, A. A. B.; SPAGNOLLO, E. Chemical attributes of a Hapludox soil after nine years of pig slurry application. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 12, p.1766-1773, dez. 2012.
- VITORELLO, V. A.; CAPALDI, F. R.; STEFANUTO, V. A. Recent advances in aluminium toxicity and resistance in higher plants. **Brazilian Journal Plant Physiology**, v. 17, p. 129-143, 2005.
- VITTI, A. C. Adubação nitrogenada da cana-de-açúcar (soqueira) colhida mecanicamente sem a queima prévia: manejo e efeito na produtividade. 2003. 114p. Tese (Doutorado) – **Universidade de São Paulo**, Piracicaba, 2003.
- VITTI, A. C.; FRANCO, H. C. J.; FERREIRA, D. A.; OTTO, R.; FORTES, C.; FARONI, C.E. Nitrogênio proveniente da adubação nitrogenada e de resíduos culturais na nutrição da cana- planta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 287-293, 2011.

- ZALAMENA, J. Impacto do uso da terra nos atributos químicos e físicos de solos do rebordo do Planalto-RS. Santa Maria, 79 f. 2008. Dissertação (mestrado) – **Universidade Federal de Santa Maria**, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, RS, 2008.
- ZANÃO JÚNIOR, L. A.; LANA, R. M. Q.; GUIMARÃES, E. C.; PEREIRA, J. M. A. Variabilidade espacial dos teores de macronutrientes em Latossolos sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 389-400. 2010.

9. ANEXOS

Anexo 1. Dados pluviométricos registrados nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi.

Ano	Precipitação Pluviométrica (mm)																									
	Jan		Fev		Mar		Abr		Mai		Jun		Jul		Ago		Set		Out		Nov		Dez		Total	
	SI	M	SI	M	SI	M	SI	M	SI	M	SI	M	SI	M	SI	M	SI	M	SI	M	SI	M	SI	M	SI	M
1990	318	336	129	185	222	266	79	83	69	74	0	0	11	18	61	29	22	33	75	98	109	131	238	255	1333	1508
1991	265	269	96	173	323	311	174	163	18	33	2	0	6	35	0	0	73	0	87	160	29	78	289	243	1362	1465
1992	232	168	188	140	276	248	82	96	52	62	0	0	15	31	21	21	111	151	125	192	243	181	140	161	1483	1451
1993	160	167	286	276	72	165	106	139	53	72	43	46	1	0	42	62	92	145	102	147	101	72	119	126	1174	1417
1994	206	327	91	50	97	165	25	32	57	51	27	29	12	20	0	0	2	1	95	138	120	172	180	184	910	1169
1995	183	130	528	668	170	175	47	31	47	31	15	21	23	35	0	0	34	26	99	96	145	128	169	211	1460	1551
1996	191	216	107	129	112	119	31	128	50	62	14	19	1	0	15	21	112	129	120	96	259	232	264	370	1275	1521
1997	285	228	111	127	65	74	24	26	64	55	162	155	14	13	0	0	37	35	92	89	323	329	186	186	1361	1317
1998	108	83	182	164	113	163	45	61	91	71	0	0	5	3	44	33	24	28	157	129	128	79	322	236	1219	1050
1999	622	499	263	220	187	178	48	66	32	25	20	25	2	1	0	0	68	50	75	41	107	79	276	277	1699	1460
2000	379	338	249	191	124	187	14	6	2	29	1	2	37	32	59	63	100	109	31	8	204	259	153	100	1353	1324
2001	194	82	94	52	106	95	59	56	117	82	1	10	3	2	46	28	31	38	150	93	194	175	224	231	1219	944
2002	323	371	335	252	102	108	0	8	51	57	0	0	10	13	60	106	88	79	100	105	131	100	244	425	1444	1624
2003	388	487	81	58	81	130	71	71	89	69	6	34	13	11	7	12	15	9	102	141	50	192	290	221	1193	1435
2004	242	372	284	341	92	136	128	91	96	155	27	26	32	50	0	0	68	36	153	150	153	198	224	204	1499	1759
2005	233	462	139	128	152	151	31	101	106	97	26	44	49	58	0	0	57	75	106	58	62	125	230	270	1191	1569
2006	159	293	311	386	159	169	14	6	0	0	8	13	2	6	20	38	40	42	150	242	130	116	309	271	1302	1582
2007	529	415	212	138	191	196	35	54	116	121	0	3	96	162	0	0	0	0	67	80	157	117	231	211	1634	1497
2008	386	333	394	300	84	99	124	140	70	62	6	1	0	0	17	21	8	5	42	74	146	178	273	355	1550	1568
2009	246	289	334	307	260	247	79	41	57	35	65	55	33	34	139	204	137	182	154	123	233	275	436	350	2173	2142
2010	273	267	189	207	109	86	90	119	10	11	8	19	1	1	0	0	136	141	46	50	141	137	246	235	1249	1273
2011	243	276	112	175	309	446	74	110	3	3	32	52	0	0	19	32	3	14	201	264	209	183	166	293	1371	1848
2012	238	275	140	54	82	44	145	149	80	120	135	180	23	32	0	0	81	66	75	93	223	153	192	242	1414	1408
2013	278	200	98	124	242	239	38	72	89	126	39	65	30	19	0	0	124	125	80	118	230	285	207	426	1455	1799
2014	39	110	38	106	129	127	41	25	6	18	0	0	43	41	0	0	59	66	35	53	168	210	235	327	793	1083
2015	160	157	203	305	233	157	56	74	124	178	5	0	41	67	4	5	122	169	126	152	224	273	196	320	1494	1857
2016	375	467	162	253	61	142	0	0	111	138	74	65	0	0	60	36	14	23	88	155	150	181	104	281	1199	1741
2017	187	309	115	126	80	139	40	48	79	96	9	10	0	0	24	23	30	38	87	80	133	160	89	69	873	1098

Anexo 2. Análise química realizada em 1993 na Fazenda Santa Izabel.

Ponto	Prof (cm)	P resina (mg dm ⁻³)	M.O (g dm ⁻³)	pH CaCl ₂	K	Ca	Mg (cmol dm ⁻³)	H+Al	Al	SB	CTC	V	m %	Argila	RC* cmol _c kg ⁻¹ argila
3	0-25	19	33	4,3	0,24	3,5	0,67	4,7	0,3	4,4	9,1	48	6	57	8,9
3	25-50	10	34	4,7	0,75	2,8	0,72	3,4	0,1	4,2	7,7	55	2	58	7,4
3	80-100	4	20	5,5	0,42	2,3	0,66	1,6	0,1	3,4	5,0	67	1	59	5,9
17	0-25	14	28	5,0	0,42	3,3	1,32	3,6	0,3	5,1	8,7	58	5	56	9,6
17	25-50	9	27	5,1	0,68	2,9	1,20	3,3	0,2	4,8	8,1	60	3	57	8,8
17	80-100	4	19	5,7	0,29	2,3	1,03	2,0	0,2	3,6	5,6	64	4	60	6,3
18	0-25	12	27	5,1	0,20	2,5	1,04	2,9	0,2	3,8	6,7	56	4	55	7,3
18	25-50	13	26	5,1	0,27	2,6	1,13	2,9	0,1	4,0	6,9	58	2	56	7,3
18	80-100	4	21	5,9	0,09	2,4	0,98	1,6	0,1	3,4	5,1	68	3	59	5,9
21	0-25	27	26	4,3	0,30	1,5	0,56	5,8	1,5	2,3	8,1	29	38	54	7,0
21	25-50	18	28	4,4	0,26	1,5	0,59	5,5	1,2	2,4	7,9	30	33	55	6,5
21	80-100	7	17	4,4	0,08	2,1	0,77	2,1	0,1	3,0	5,1	58	2	58	5,3
25	0-25	32	31	5,4	0,26	4,6	1,13	2,8	0,2	6,0	8,8	68	2	57	10,9
25	25-50	31	33	5,5	0,34	3,9	0,86	2,6	0,1	5,1	7,7	66	1	58	9,0
25	80-100	12	15	6,1	0,07	3,3	0,56	1,5	0,2	3,9	5,4	72	4	60	6,8
95	0-25	61	29	5,2	0,53	3,9	1,40	4,7	0,1	5,9	10,6	56	1	53	11,3
95	25-50	38	31	5,1	0,49	3,5	1,08	4,7	0,1	5,0	9,7	52	1	55	9,3
95	80-100	4	18	5,4	0,16	1,4	0,45	3,1	0,1	2,1	5,1	40	2	59	3,7
99	0-25	30	34	4,7	0,47	2,6	0,52	5,1	0,2	3,6	8,6	41	4	52	7,3
99	25-50	27	32	4,7	0,23	2,6	0,51	5,1	0,1	3,4	8,4	40	3	54	6,5
99	80-100	5	16	5,4	0,05	1,6	0,37	2,3	0,1	2,1	4,3	48	2	58	3,8
100	0-25	26	34	4,8	0,70	2,9	0,70	4,5	0,1	4,3	8,8	49	2	57	7,7
100	25-50	18	36	4,9	0,29	3,2	0,56	4,0	0,1	4,0	8,0	50	2	58	7,1
100	80-100	8	16	5,8	0,06	2,3	0,29	1,8	0,1	2,6	4,4	59	4	60	4,5
101	0-25	48	29	5,3	0,28	4,6	1,44	3,3	0,1	6,3	9,6	66	1	52	12,3

Ponto	Prof (cm)	P resina (mg dm ⁻³)	M.O (g dm ⁻³)	pH CaCl ₂	K	Ca	Mg (cmol dm ⁻³)	H+Al	Al	SB	CTC	V	m %	Argila	RC* cmol _c kg ⁻¹ argila
101	25-50	31	30	5,2	0,17	3,3	1,00	3,4	0,1	4,5	7,9	57	1	53	8,7
101	80-100	7	18	5,8	0,07	2,2	0,66	2,0	0,1	2,9	5,0	59	2	55	5,5
102	0-25	46	29	5,2	0,57	4,5	1,10	3,3	0,1	6,2	9,4	65	1	53	11,9
102	25-50	33	30	5,6	0,77	6,6	1,70	2,5	0,1	9,1	11,6	78	1	55	16,7
102	80-100	10	18	5,6	0,14	2,9	0,68	2,3	0,1	3,7	6,0	62	1	58	6,6
106	0-25	15	21	5,3	0,80	2,2	0,57	3,6	0,1	3,5	7,2	50	3	58	6,2
106	25-50	17	22	5,4	0,61	1,9	0,65	3,1	0,1	3,2	6,3	51	2	59	5,6
106	80-100	13	13	6,1	0,12	3,0	0,60	2,3	0,1	3,7	6,0	62	1	60	6,3

Anexo 3. Análise química realizada em 1993 na Fazenda Morumbi.

Ponto	Prof (cm)	P resina (mg dm ⁻³)	M.O (g dm ⁻³)	pH CaCl ₂	K	Ca	Mg (cmol dm ⁻³)	H+Al	Al	SB	CTC	V	m	Argila %	RC* cmol _c kg ⁻¹ argila
60	0-25	19	26	5,1	0,24	1,2	0,47	3,1	0,2	1,9	5,0	39	9	47	4,5
60	25-50	6	22	4,6	0,30	0,7	0,31	3,8	0,7	1,4	5,2	26	34	48	4,4
60	80-100	4	16	5,3	0,34	0,9	0,30	2,0	0,1	1,6	3,6	44	6	50	3,4
61	0-25	28	25	5,7	0,36	1,7	1,00	2,0	0,1	3,1	5,1	60	2	57	5,6
61	25-50	11	23	5,1	0,31	1,3	0,55	2,8	0,1	2,1	4,9	43	5	58	3,8
61	80-100	2	26	5,4	0,15	0,9	0,30	2,3	0,2	1,3	3,6	37	10	60	2,5
62	0-25	23	20	5,5	0,18	1,7	0,68	2,4	0,1	2,6	4,9	52	2	53	5,1
62	25-50	30	28	6,3	0,15	4,6	1,66	1,5	0,1	6,4	7,9	81	1	55	11,8
62	80-100	3	20	5,0	0,15	0,6	0,29	2,0	0,2	1,1	3,1	35	12	59	2,2
63	0-25	61	27	4,9	0,34	1,4	0,47	3,1	0,4	2,2	5,3	42	14	54	4,8
63	25-50	20	31	5,9	0,22	3,0	1,29	2,0	0,1	4,5	6,5	69	1	55	8,4
63	80-100	3	21	5,0	0,14	0,8	0,35	2,4	0,3	1,3	3,7	35	16	58	2,8
66	0-25	13	28	5,0	0,22	1,6	0,53	2,8	0,3	2,4	5,1	46	10	57	4,7
66	25-50	18	29	5,2	0,35	2,6	1,19	2,8	0,2	4,1	6,9	60	5	58	7,4
66	80-100	2	16	4,8	0,11	0,5	0,22	2,6	0,1	0,9	3,5	24	11	60	1,7
67	0-25	20	28	5,0	0,11	1,5	0,58	3,4	0,4	2,2	5,6	39	14	55	4,7
67	25-50	10	24	4,5	0,06	0,8	0,32	4,2	0,9	1,1	5,4	21	43	56	3,6
67	80-100	3	18	5,0	0,04	0,6	0,19	2,4	0,1	0,9	3,2	26	11	59	1,7
68	0-25	62	23	4,7	0,23	1,2	0,40	4,0	0,7	1,9	5,9	32	26	51	5,1
68	25-50	11	21	4,3	0,11	0,7	0,21	4,5	1,2	1,1	5,5	19	53	53	4,3
68	80-100	3	15	4,7	0,08	0,6	0,23	2,5	0,3	0,9	3,4	26	22	58	2,1
69	0-25	25	24	6,1	0,20	3,5	1,19	1,5	0,1	4,9	6,4	77	1	57	8,8
69	25-50	24	26	6,2	0,39	5,0	1,57	1,5	0,1	7,0	8,5	83	1	57	12,5
69	80-100	3	14	5,0	0,05	0,8	0,54	2,1	0,2	1,4	3,5	40	13	58	2,8
110	0-25	68	23	5,6	0,19	2,8	1,45	2,8	0,1	4,4	7,2	62	2	54	8,3

Ponto	Prof (cm)	P resina (mg dm ⁻³)	M.O (g dm ⁻³)	pH CaCl ₂	K	Ca	Mg (cmol dm ⁻³)	H+Al	Al	SB	CTC	V	m	Argila %	RC* cmol _c kg ⁻¹ argila
110	25-50	27	21	5,2	0,12	1,3	0,88	3,3	0,1	2,3	5,6	42	4	54	4,4
110	80-100	2	15	5,1	0,05	0,6	0,21	2,5	0,1	0,9	3,4	26	5	55	1,8
111	0-25	16	21	5,3	0,15	3,0	1,45	2,9	0,2	4,6	7,6	61	3	57	8,4
111	25-50	14	23	5,3	0,15	1,5	0,60	2,8	0,1	2,3	5,1	45	4	57	4,2
111	80-100	2	15	5,3	0,05	0,5	0,23	2,4	0,1	0,8	3,1	25	6	58	1,6
70	0-25	21	31	4,9	0,07	1,6	0,47	3,8	0,5	2,1	5,9	35	18	54	4,8
70	25-50	18	33	4,9	0,11	1,4	0,52	3,8	0,3	2,1	5,9	35	11	54	4,4
70	80-100	5	20	4,6	0,04	0,5	0,26	2,8	0,2	0,8	3,6	23	19	55	1,8
71	0-25	20	28	5,3	0,07	2,2	0,79	2,6	0,1	3,1	5,7	54	2	53	6,0
71	25-50	17	23	5,5	0,05	2,3	0,82	2,5	0,1	3,2	5,7	56	2	54	6,1
71	80-100	5	20	5,5	0,03	0,4	0,22	2,3	0,1	0,6	2,9	22	7	58	1,2
72	0-25	19	30	4,2	0,17	0,6	0,30	5,8	1,2	1,1	6,9	16	52	59	3,9
72	25-50	10	28	4,4	0,11	0,4	0,24	4,2	0,5	0,8	5,0	16	37	59	2,2
72	80-100	4	19	4,8	0,05	0,2	0,11	2,4	0,1	0,4	2,7	13	22	60	0,8
73	0-25	26	26	5,0	0,22	1,2	0,73	3,0	0,2	2,2	5,2	42	6	57	4,2
73	25-50	22	28	4,9	0,07	1,2	0,73	3,4	0,2	2,0	5,5	37	7	58	3,8
73	80-100	5	18	4,7	0,05	0,3	0,22	2,8	0,1	0,5	3,3	16	16	60	1,0
78	0-25	23	25	4,9	0,14	1,3	0,43	3,3	0,2	1,9	5,1	37	10	54	3,9
78	25-50	20	26	5,6	0,13	2,0	0,63	2,5	0,1	2,8	5,3	52	3	54	5,4
78	80-100	4	20	5,3	0,04	0,7	0,41	2,3	0,1	1,2	3,4	34	8	55	2,4
80	0-25	18	24	4,8	0,38	1,2	0,58	4,7	0,2	2,1	6,8	31	9	54	4,3
80	25-50	7	21	4,8	0,14	1,0	0,42	4,7	0,2	1,6	6,3	25	11	56	3,2
80	80-100	2	16	5,1	0,04	0,7	0,30	3,3	0,2	1,1	4,3	24	13	57	2,3
113	0-25	33	23	4,8	0,11	0,9	0,24	3,3	0,6	1,2	4,5	27	31	55	3,3
113	25-50	45	24	4,8	0,07	1,0	0,31	2,9	0,3	1,4	4,3	32	18	56	3,0
113	80-100	2	10	4,9	0,04	0,3	0,10	1,8	0,2	0,4	2,3	19	25	58	1,0

Anexo 4. Análise química realizada em 2018 na Fazenda Santa Izabel.

Ponto	Prof (cm)	P resina (mg dm ⁻³)	M.O (g dm ⁻³)	pH CaCl ₂	K	Ca	Mg	H+Al (cmol dm ⁻³)	Al	SB	CTC	V	m %	Argila	RC* cmol _c kg ⁻¹ argila
3	0-25	49	31	6,3	0,19	5,6	3,38	1,7	0,1	9,2	10,9	84	1	57	16,3
3	25-50	13	24	5,2	0,04	4,1	0,96	3,3	0,1	5,1	8,4	61	2	58	9,0
3	80-100	9	13	5,5	0,02	2,5	0,48	2,0	0,1	3,0	5,0	60	2	59	5,3
17	0-25	27	36	5,5	0,32	6,1	2,05	2,7	0,1	8,5	11,2	76	1	56	15,4
17	25-50	10	22	5,3	0,13	4,3	1,61	3,4	0,1	6,1	9,5	64	2	57	10,9
17	80-100	4	12	5,2	0,04	2,6	1,07	2,8	0,1	3,7	6,5	57	3	60	6,3
18	0-25	15	26	5,6	0,21	5,8	1,81	2,6	0,1	7,9	10,5	75	1	55	14,5
18	25-50	6	17	5,6	0,07	3,7	1,46	2,3	0,1	5,2	7,5	69	1	56	9,5
18	80-100	5	11	5,9	0,05	2,8	1,05	2,1	0,1	3,9	6,0	65	2	59	6,8
21	0-25	26	25	5,5	0,14	5,4	1,50	2,3	0,2	7,1	9,4	75	2	54	13,5
21	25-50	8	13	4,9	0,03	2,1	0,78	2,4	0,2	2,9	5,3	55	6	55	5,6
21	80-100	7	10	5,2	0,02	2,1	0,63	2,2	0,1	2,8	5,0	56	2	58	5,0
25	0-25	26	31	4,6	0,22	3,8	1,20	4,4	0,3	5,2	9,6	54	6	57	9,6
25	25-50	13	25	5,2	0,07	4,9	1,42	2,9	0,1	6,4	9,3	69	1	58	11,2
25	80-100	7	14	5,3	0,03	3,1	1,01	2,4	0,1	4,2	6,6	63	2	60	7,2
95	0-25	34	29	5,7	0,63	6,9	1,99	2,4	0,1	9,5	11,9	80	1	53	18,1
95	25-50	15	26	5,5	0,33	6,5	1,86	2,4	0,1	8,7	11,1	78	1	55	16,0
95	80-100	5	15	5,7	0,09	4,3	1,26	2,2	0,1	5,7	7,9	72	2	59	9,8
99	0-25	42	26	4,3	0,34	2,3	0,45	4,7	0,7	3,1	7,8	40	19	52	7,3
99	25-50	11	17	4,8	0,07	2,5	0,54	3,5	0,2	3,1	6,6	47	7	54	6,1
99	80-100	5	13	5,2	0,03	1,9	0,62	2,3	0,4	2,6	4,9	53	14	58	5,2
100	0-25	46	33	5,1	0,37	4,0	1,26	3,2	0,1	5,7	8,9	64	2	57	10,2
100	25-50	10	21	5,1	0,06	2,8	0,96	2,5	0,1	3,9	6,4	61	2	58	6,9
100	80-100	10	15	5,3	0,04	2,2	0,61	2,0	0,1	2,9	4,9	59	2	60	5,0
101	0-25	18	33	5,6	0,46	4,5	2,26	2,5	0,1	7,3	9,8	74	1	52	14,2

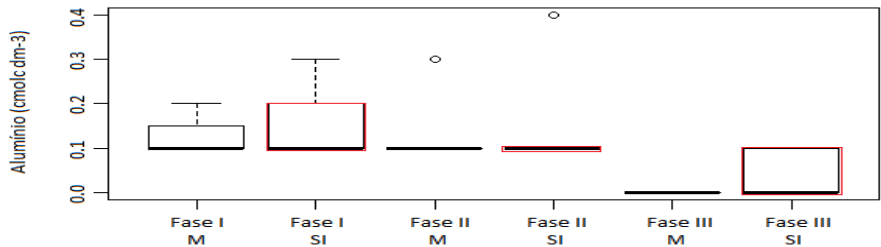
Ponto	Prof (cm)	P resina (mg dm ⁻³)	M.O (g dm ⁻³)	pH CaCl ₂	K	Ca	Mg	H+Al (cmol dm ⁻³)	Al	SB	CTC	V	m %	Argila	RC* cmol _c kg ⁻¹ argila
101	25-50	23	22	5,2	0,17	3,3	1,24	2,5	0,1	4,7	7,2	65	2	53	9,1
101	80-100	6	12	5,6	0,11	1,8	0,84	2,2	0,1	2,8	5,0	56	3	55	5,3
102	0-25	45	32	5,7	0,15	6,4	1,54	2,7	0,2	8,1	10,8	75	2	53	15,7
102	25-50	17	17	5,6	0,05	4,8	1,05	2,1	0,1	5,9	8,0	74	2	55	10,9
102	80-100	13	13	5,9	0,03	3,5	0,73	2,0	0,1	4,3	6,3	68	3	58	7,6
106	0-25	33	24	5,1	0,48	4,0	1,26	2,9	0,4	5,7	8,6	66	6	58	10,5
106	25-50	12	17	5,0	0,08	2,5	0,99	2,6	0,1	3,5	6,1	58	3	59	6,1
106	80-100	7	13	5,2	0,06	1,9	0,86	2,4	0,1	2,8	5,2	54	3	60	4,8

Anexo 5. Análise química realizada em 2018 na Fazenda Morumbi.

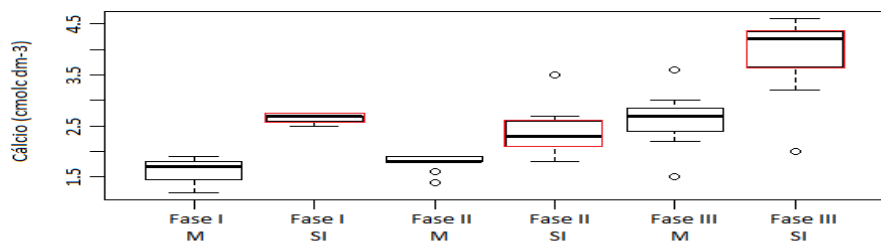
Ponto	Prof (cm)	P resina (mg dm ⁻³)	M.O (g dm ⁻³)	pH CaCl ₂	K	Ca	Mg	H+Al (cmol dm ⁻³)	Al	SB	CTC	V	m %	Argila	RC* cmol _c kg ⁻¹ argila
60	0-25	32	26	5,2	0,35	3,0	1,26	1,8	0,0	4,6	6,4	72	0	47	9,8
60	25-50	26	18	5,0	0,19	1,0	0,57	1,9	0,0	1,7	3,6	48	2	48	3,5
60	80-100	2	12	5,1	0,12	0,5	0,21	1,5	0,0	0,8	2,3	36	3	50	1,6
61	0-25	52	25	4,6	0,22	1,9	0,97	4,0	0,1	3,1	7,1	43	4	57	5,6
61	25-50	6	16	4,5	0,07	0,5	0,26	2,4	0,3	0,9	3,3	27	26	58	2,1
61	80-100	2	13	5,2	0,07	0,8	0,26	1,6	0,1	1,1	2,7	41	7	60	2,0
62	0-25	20	24	5,4	0,05	3,4	1,33	1,7	0,0	4,8	6,5	74	0	53	9,1
62	25-50	8	18	5,3	0,02	1,9	0,86	1,8	0,0	2,8	4,6	61	0	55	5,1
62	80-100	2	13	5,3	0,01	0,8	0,56	1,5	0,0	1,4	2,9	47	1	59	2,4
63	0-25	21	27	4,9	0,18	2,8	1,09	2,3	0,1	4,1	6,4	64	1	54	7,8
63	25-50	6	15	4,6	0,04	1,2	0,53	2,2	0,2	1,7	3,9	44	10	55	3,5
63	80-100	2	12	5,0	0,03	0,8	0,35	1,7	0,0	1,2	2,9	41	4	58	2,1
66	0-25	65	28	5,6	0,59	4,6	1,87	1,7	0,0	7,0	8,7	80	0	57	12,3
66	25-50	22	21	5,4	0,40	2,6	0,96	1,8	0,0	4,0	5,8	69	0	58	6,9
66	80-100	3	12	5,3	0,08	1,1	0,59	1,8	0,0	1,8	3,6	50	1	60	3,0
67	0-25	47	32	5,2	0,16	4,4	1,64	2,8	0,0	6,2	9,0	69	0	55	11,3
67	25-50	20	16	5,0	0,03	1,6	0,58	2,3	0,0	2,2	4,5	49	1	56	3,9
67	80-100	3	13	4,6	0,02	0,7	0,29	2,8	0,2	1,0	3,8	26	13	59	2,0
68	0-25	39	32	5,1	0,09	4,2	1,31	2,1	0,0	5,6	7,7	73	0	51	11,0
68	25-50	6	19	4,6	0,04	1,1	0,53	3,2	0,2	1,7	4,9	35	11	53	3,6
68	80-100	4	17	5,1	0,04	1,2	0,48	1,9	0,0	1,7	3,6	47	2	58	2,9
69	0-25	19	18	5,4	0,11	3,1	0,88	1,6	0,0	4,0	5,6	72	0	57	7,0
69	25-50	6	15	5,1	0,09	1,7	0,62	1,8	0,0	2,4	4,2	57	1	57	4,2
69	80-100	2	10	4,9	0,08	0,5	0,27	2,0	0,1	0,8	2,8	29	11	58	1,6
110	0-25	157	29	5,6	0,10	6,3	2,03	2,2	0,0	8,4	10,6	79	0	54	15,6

Ponto	Prof (cm)	P resina (mg dm ⁻³)	M.O (g dm ⁻³)	pH CaCl ₂	K	Ca	Mg	H+Al (cmol dm ⁻³)	Al	SB	CTC	V	m %	Argila	RC* cmol _c kg ⁻¹ argila
110	25-50	60	20	5,2	0,05	3,4	1,06	2,2	0,0	4,5	6,7	67	0	54	8,3
110	80-100	4	12	5,1	0,02	0,9	0,35	1,7	0,0	1,2	2,9	42	1	55	2,2
111	0-25	53	30	5,6	0,14	5,3	1,66	1,9	0,0	7,1	9,0	79	0	57	12,5
111	25-50	23	21	5,4	0,07	3,1	0,81	2,2	0,0	4,0	6,2	65	1	57	7,0
111	80-100	2	11	5,9	0,03	0,8	0,27	1,7	0,0	1,1	2,8	39	3	58	1,9
70	0-25	22	20	5,0	0,21	2,5	0,67	2,1	0,1	3,4	5,5	62	2	54	6,5
70	25-50	8	15	5,4	0,05	1,8	0,59	1,4	0,1	2,4	3,8	63	2	54	4,6
70	80-100	3	12	5,6	0,04	0,9	0,47	1,3	0,0	1,4	2,7	52	2	55	2,5
71	0-25	38	25	5,4	0,11	2,8	1,36	2,2	0,0	4,2	6,4	66	1	53	7,9
71	25-50	25	24	5,4	0,10	2,9	0,96	2,0	0,0	3,9	5,9	66	1	54	7,2
71	80-100	3	14	5,6	0,04	1,1	0,39	1,6	0,0	1,5	3,1	49	2	58	2,6
72	0-25	35	25	5,5	0,27	4,2	1,74	2,0	0,1	6,2	8,2	76	1	59	10,7
72	25-50	100	23	5,8	0,31	3,8	2,54	1,0	0,1	6,6	7,6	87	2	59	11,4
72	80-100	4	13	5,7	0,07	1,0	0,47	1,0	0,0	1,5	2,5	60	3	60	2,5
73	0-25	74	25	5,4	0,76	3,6	1,68	2,4	0,0	6,0	8,4	71	0	57	10,5
73	25-50	4	15	5,4	0,12	1,1	0,55	1,1	0,0	1,8	2,9	62	2	58	3,1
73	80-100	2	11	5,6	0,04	0,7	0,32	1,0	0,0	1,1	2,1	52	2	60	1,8
78	0-25	37	22	5,4	0,38	3,4	1,15	1,6	0,0	4,9	6,5	75	1	54	9,1
78	25-50	53	16	5,7	0,14	2,7	0,67	1,4	0,0	3,5	4,9	71	1	54	6,5
78	80-100	4	10	5,4	0,04	0,7	0,35	1,4	0,0	1,1	2,5	44	1	55	2,0
80	0-25	16	18	4,5	0,19	1,4	0,37	2,9	0,3	1,9	4,8	40	13	54	4,1
80	25-50	3	15	4,9	0,06	0,9	0,32	2,0	0,1	1,2	3,2	38	5	56	2,3
80	80-100	2	12	5,0	0,03	0,5	0,21	1,8	0,1	0,8	2,6	30	7	57	1,6
113	0-25	49	17	5,1	0,15	1,6	0,58	1,5	0,1	2,4	3,9	61	5	55	4,5
113	25-50	10	15	5,1	0,11	1,5	0,55	1,3	0,1	2,1	3,4	62	3	56	3,9
113	80-100	3	12	4,7	0,09	0,6	0,23	1,4	0,4	0,9	2,3	39	28	58	2,2

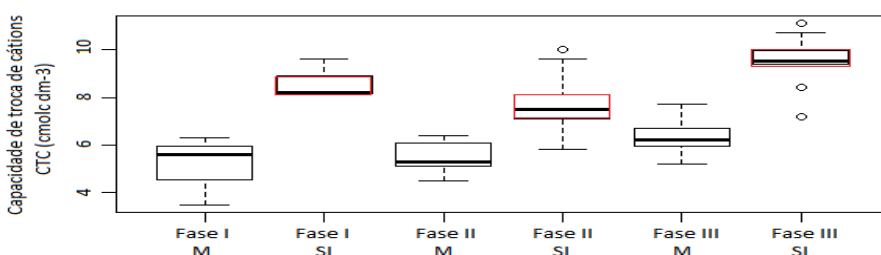
Anexo 6. Gráfico boxplot dos teores médios de Al, Ca, CTC, P, H+Al e m, mensurados de 1994 a 2018, nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi para as diferentes Fases de manejo da cultura; o - valores anômalos (outliers).



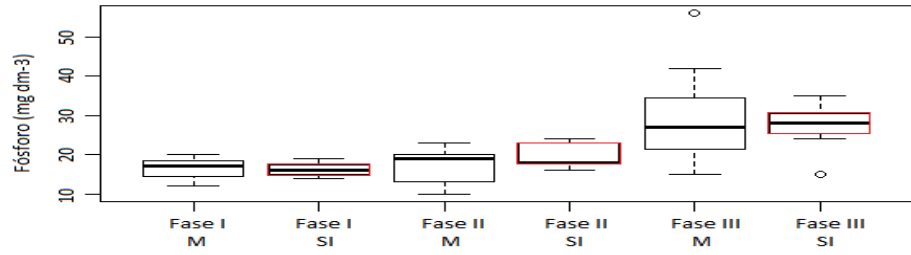
□ M = Fazenda Morumbi
 □ SI = Fazenda Santa Izabel



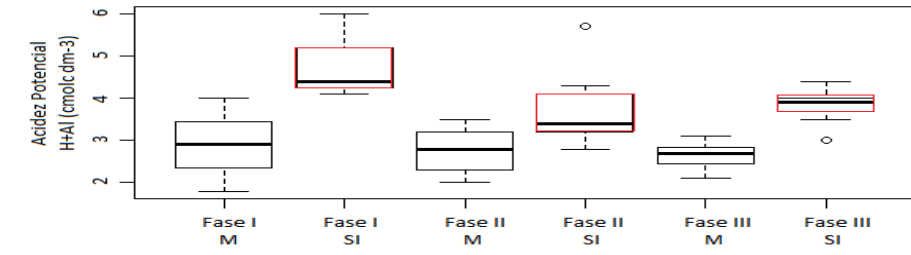
□ M = Fazenda Morumbi
 □ SI = Fazenda Santa Izabel



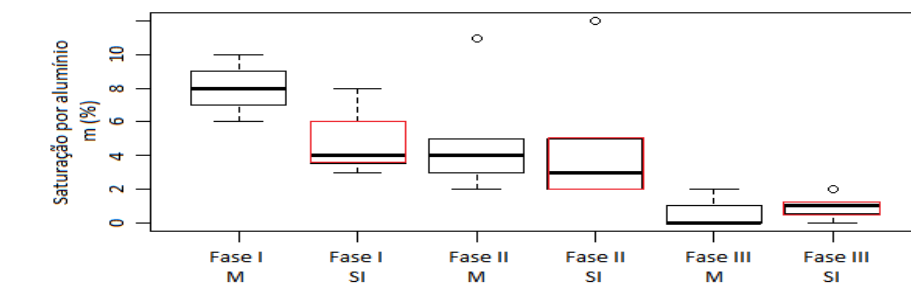
□ M = Fazenda Morumbi
 □ SI = Fazenda Santa Izabel



□ M = Fazenda Morumbi
 □ SI = Fazenda Santa Izabel

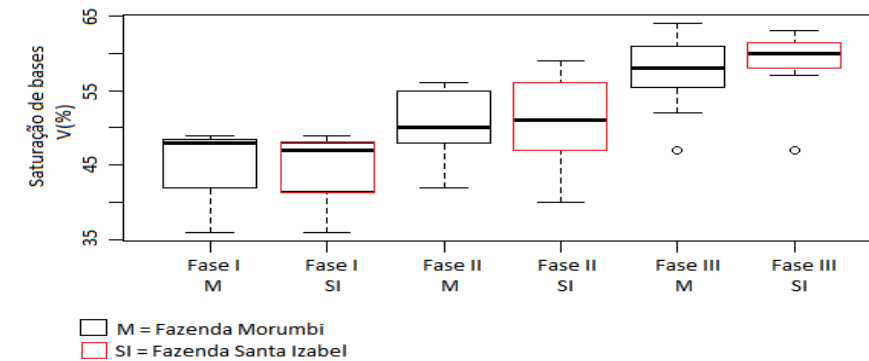
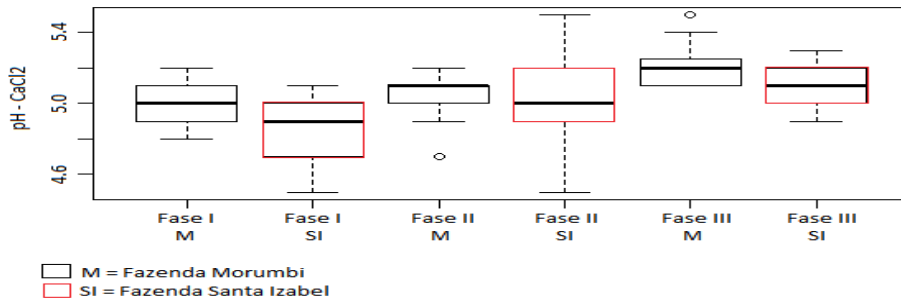
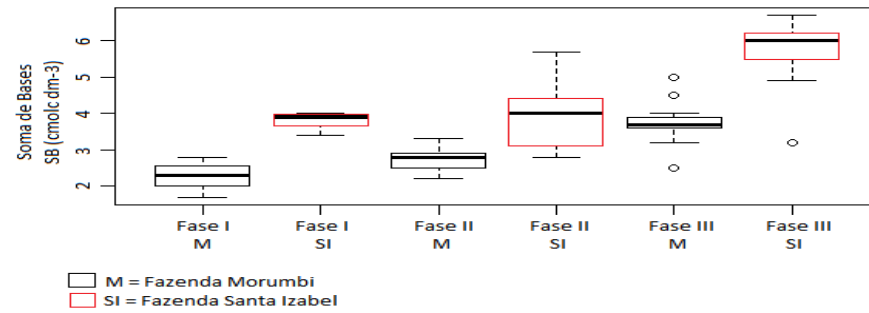
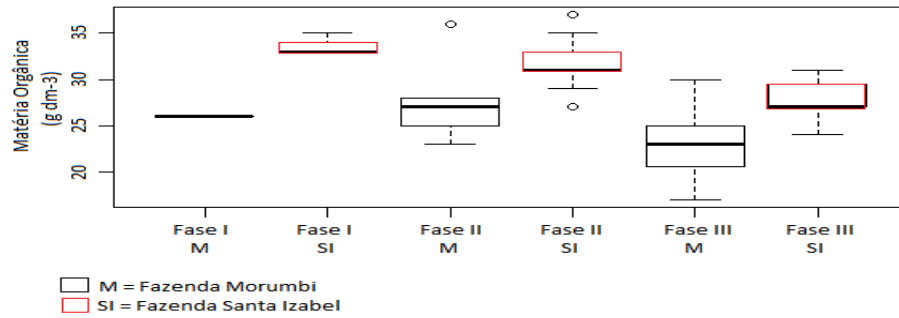
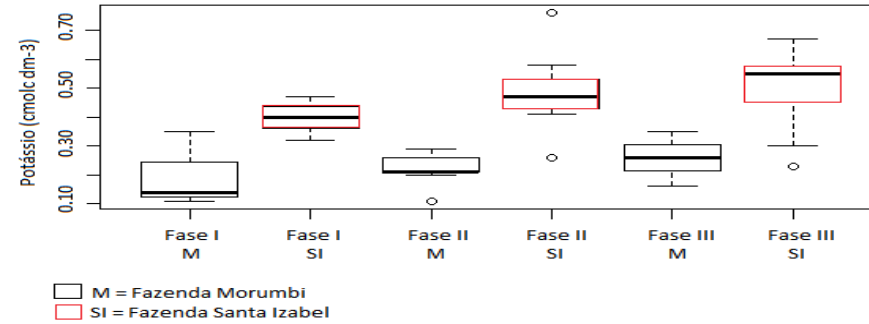
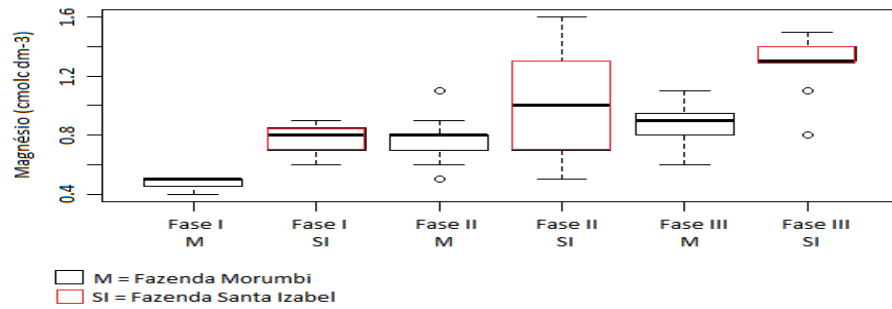


□ M = Fazenda Morumbi
 □ SI = Fazenda Santa Izabel

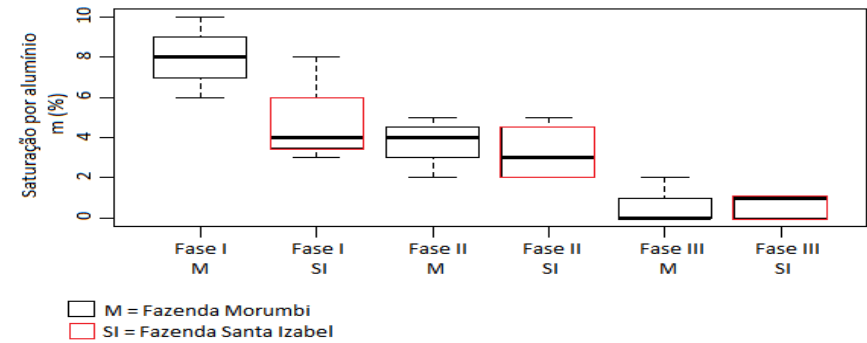
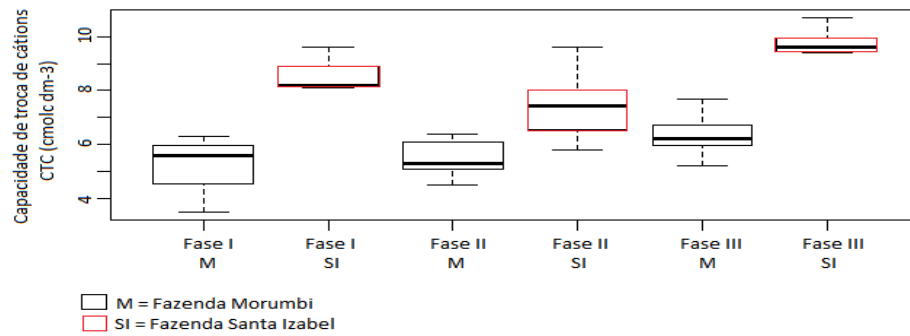
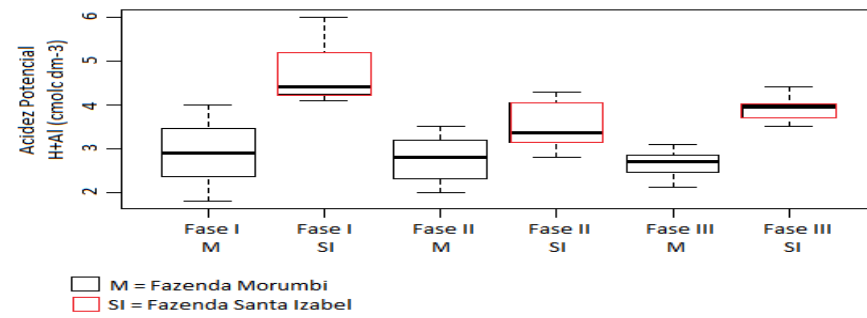
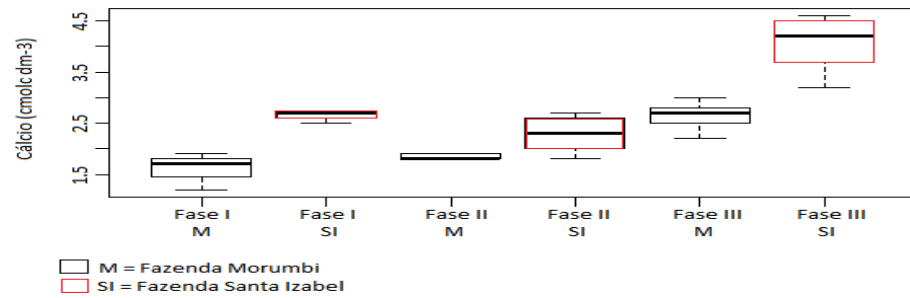
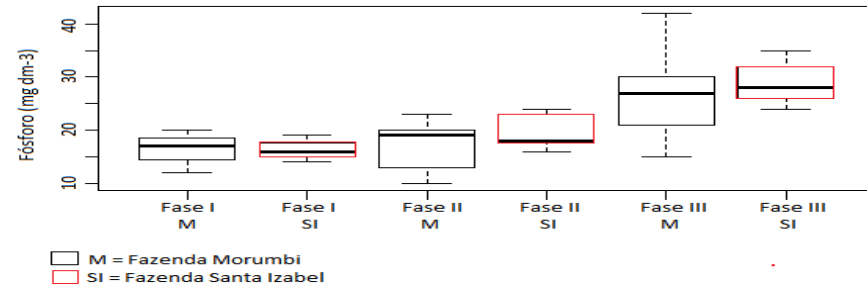
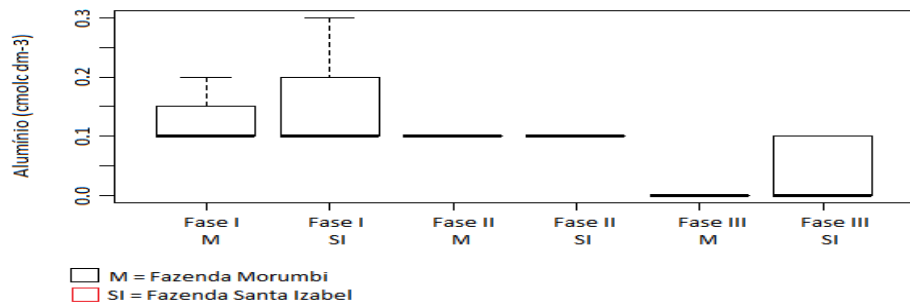


□ M = Fazenda Morumbi
 □ SI = Fazenda Santa Izabel

Anexo 7. Gráfico boxplot dos teores médios de Mg, M.O., pH, K, SB e V medidos de 1994 a 2018, nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi para as diferentes Fases de manejo da cultura; o - valores anômalos (outliers).



Anexo 8. Gráfico boxplot dos teores médios de Al, Ca, CTC, P, H+Al e m, mensurados de 1994 a 2018, nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi para as diferentes Fases de manejo da cultura; após a exclusão dos outliers.



Anexo 9. Gráfico boxplot dos teores médios de Mg, M.O., pH, K, SB e V mensurados de 1994 a 2018, nas Fazendas Santa Izabel e Morumbi para as diferentes Fases de manejo da cultura; após a exclusão dos outliers.

