



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATEMÁTICA E ESTATÍSTICA

Vanessa Mayara Souza Pamplona

Índices de Qualidade do Solo para Plantação de Açaí

Orientador: Prof. Edson Marcos Leal Soares Ramos, *Dr.*

Belém
2011

Vanessa Mayara Souza Pamplona

Índices de Qualidade do Solo para Plantação de Açaí

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Matemática e Estatística, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Estatística.

Orientador: **Prof. Edson Marcos Leal Soares Ramos**, *Dr.*

Área de Concentração: **Análise Multivariada**

Belém

2011

Vanessa Mayara Souza Pamplona

Índices de Qualidade do Solo para Plantação de Açaí

Esta Dissertação foi julgada e aprovada, para a obtenção do grau de Mestre em Estatística, no Programa de Pós-Graduação em Matemática e Estatística, da Universidade Federal do Pará.

Belém, 02 Setembro de 2011.

Prof. Giovany de Jesus Malcher Figueiredo, *Dr.*

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Matemática e Estatística da UFPA

Banca Examinadora

Prof. Edson Marcos Leal Soares Ramos, *Dr.*

Universidade Federal do Pará

Orientador

Prof. Robert Wayne Samohyl, *Ph.D.*

Universidade Federal de Santa Catarina

Membro

Profa. Silvia dos Santos de Almeida, *Dra.*

Universidade Federal do Pará

Membro

Prof. Waldenei Travassos de Queiroz, *Dr.*

Universidade Federal Rural da Amazônia

Membro

Profa. Rúbia Gonçalves Nascimento, *Dra.*

Universidade Federal do Pará

Membro

Prof. Valcir João da Cunha Farias, *Dr.*

Universidade Federal do Pará

Membro

Dedico esta dissertação à Deus, meu orientador, minha família, meus amigos, meus colegas de trabalho pela força, apoio, amizade, carinho, incentivo, paciência e confiança, pois sem vocês nada disso teria sido realizado.

Agradecimentos

- ★ À Deus por ter me dado saúde, força, coragem e sempre iluminando meu caminho;
- ★ Ao meu orientador professor Edson Ramos pela orientação neste trabalho, colaboração, paciência, dedicação, confiança, carinho, humildade e pelo apoio nos momentos difíceis, pois sem seu incentivo e apoio este trabalho não seria realizado. Obrigada por fazer parte da minha vida, por ser um homem honesto, um profissional exemplar e um amigo mais que sincero;
- ★ Aos membros da banca examinadora por aceitarem participar da banca de defesa desta dissertação, proporcionando sugestões que servirão para o aprendizado e melhora da pesquisa científica;
- ★ Ao meu grande chefe Aluizio Filho no Centro de Registro de Indicadores Acadêmicos (CIAC) que sempre me apoiou e incentivou a continuar os meus estudos, principalmente pela oportunidade de realizar este curso;
- ★ À minha querida chefe e amiga Maria Dinelly pela amizade, carinho, companherismo, apoio e por sempre me incentivar na busca do crescimento profissional e pessoal;
- ★ Aos meus grandes amigos Márcio Almeida, Monique Gomes e Rafael Gomes pela companhia, convivência, conselhos, amizade, apoio nos momentos difíceis e acima de tudo pela enorme paciência.
- ★ Aos amigos Maura Furtado, Admilson Silva, Edney Pantoja, Ailton Corecha e Gilson Prata pela companhia, amizade, conversas e trocas de informação.
- ★ Ao amigo Wanderson Cunha pela companhia, amizade, conversas, trocas de conhecimento e por ter renunciado tantas vezes seus momentos de lazer nos finais de semana para estudar estatística matemática comigo.
- ★ À minha tia Débora Monteiro e a minha prima Sabrina Rego, pois foram as pessoas da família com quem mais convivi nestes últimos anos e sempre estiveram ao meu lado me aconselhando e incentivando com paciência e dedicação nos momentos difíceis;

- ★ Ao professor Paulo Farias da Universidade Federal Rural da Amazônia, pela grande oportunidade de trabalhar na área agrônômica, pelas suas importantes contribuições na concepção inicial deste trabalho;
- ★ Ao proprietário da Fazenda Barindaua Wilde Colares, por disponibilizar suas propriedades para realização das coletas de solo;
- ★ Aos engenheiros agrônomos Adriano Grama, Francisco Lúcio, Bruno Lima e Fábio Oliveira pelo grande auxílio nos trabalhos de campo, análises e pela amizade conquistada;
- ★ A todos os integrantes do Grupo de Estudos e Pesquisas Estatísticas e Computacionais (GEPEC) representado pela professora Adrilayne Reis e ao Laboratório de Sistemas de Informação e Georreferenciamento (LASIG) representado pela professora Silvia Almeida, pela amizade, pela valiosa experiência acadêmica, pelo apoio e incentivo que sempre recebi;
- ★ As alunas Kelly Nunes, Vanessa Monteiro, Cristiane Pamplona e Pâmela Caldas pela ajuda na obtenção dos dados, pelo apoio, incentivo e amizade;
- ★ A coordenação do Programa de Pós-Graduação em Matemática e Estatística, representado pelo professor Giovany Figueiredo;
- ★ À secretária Carmem Almeida do Programa de Pós-Graduação em Matemática e Estatística, pela amizade, por ser muito prestativa, dedicada e competente;
- ★ À professora Regina Madruga pelo seu incentivo, apoio e por sempre estar disposta a esclarecer as dúvidas geradas no decorrer do curso;
- ★ A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela ajuda financeira por meio da bolsa de estudo;
- ★ A Universidade Federal do Pará, pela oportunidade de crescimento, aprendizado, realização profissional e pessoal, e pelo incentivo à pesquisa;
- ★ E a todos que contribuíram de alguma forma positiva para a realização desta dissertação.

“A classificação é uma atividade conceitual básica dos seres humanos”.

Reis (2001)

Resumo

PAMPLONA, Vanessa Mayara Souza. Índices de Qualidade do Solo para Plantação de Açaí. 2011. Dissertação (Mestrado em Matemática e Estatística), PPGME, UFPA, Belém, Pará, Brasil.

A qualidade do solo pode ser conceituada como a capacidade de esse recurso exercer várias funções, dentro dos limites do uso da terra e do ecossistema, para sustentar a produtividade biológica, manter ou melhorar a qualidade ambiental e contribuir para a saúde das plantas, dos animais e seres humanos. Neste sentido, este trabalho tem por objetivo estabelecer índices de qualidade do solo de plantação de Açaí, a partir de métodos estatísticos multivariados. Inicialmente aplicou-se a técnica estatística multivariada análise fatorial, onde pôde-se estimar os escores fatoriais, com base nos quais pôde-se determinar o índice de qualidade de solo baseado nos dados de atributos químicos (IQSQ), físicos (IQSF) e químicos e físicos conjuntamente (IQSG), para as profundidades do solo de 0 – 5 cm e 25 – 30 cm, respectivamente, em que o principal objetivo foi classificar os solos como bom, regular e ruim, de acordo com o desempenho dos seus atributos. Em seguida, realizou-se a aplicação da técnica análise discriminante com o objetivo de validar os resultados obtidos a partir dos índices construídos com os resultados da análise fatorial, bem como, conhecer os atributos químicos e físicos do solo, que influenciam e estão associados à qualidade do solo de plantação de Açaí. Dessa maneira, dentre os principais resultados pôde-se observar que saturação por base (V) e potencial hidrogeniônico (pH) são os atributos que mais discriminam os grupos, isto é, seus poderes de diferenciação dos grupos é superior, se comparado com os outros atributos químicos, para profundidade de 0 – 5 cm do solo.

Palavras-chave: Qualidade do Solo, Plantação de Açaí, Estatística Multivariada.

Abstract

PAMPLONA, Vanessa Mayara Souza. Soil Quality Indices for Planting Açaí. 2011. Dissertation (Master Science in Mathematics and Statistics), PPGME, UFPA, Belém, Pará, Brazil.

Soil quality can be conceptualized as the ability this resource to perform various functions, within the limits of land use and ecosystem to sustain biological productivity, maintain or improve environmental quality and contribute to the health of plants, animals and humans. In this sense, this work aims to establish indices of soil quality to planting of Açaí by multivariate statistical methods. Initially the multivariate statistical technique of factor analysis was applied, where it was possible to estimate the factor scores, on which it was possible to determine the soil quality index based on data from chemical attributes (CSQI), physical (FSQI) and chemical and physical together (GSQI), for soil depths of 0 – 5 cm and 25 – 30 cm, respectively, where the main objective was to classify the soil as good, regular and bad, according to the performance of their attributes. Then, there was the application of the discriminant analysis technique in order to validate the results obtained from the indices constructed with the results of factor analysis, as well as, to learn about the chemical and physical attributes of soil, which influence and are associated with soil quality for planting Açaí. Thus, among the main results could be seen that base saturation (V) and hydrogenic potential (Hp) are the attributes that best discriminate the groups, that is, their powers of differentiation of the groups is higher compared with the other chemical attributes, to a depth of 0 – 5 cm.

Keywords: Soil Quality, Planting Açaí, Multivariate Statistics.

Índice

Resumo	viii
Abstract	ix
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Figuras	xx
1 Introdução	1
1.1 Aspectos Gerais	1
1.2 Justificativa e Importância	3
1.3 Hipótese Básica da Dissertação	4
1.4 Objetivos	4
1.4.1 Objetivo Geral	4
1.4.2 Objetivos Específicos	4
1.5 Estrutura da Dissertação	4
2 Qualidade e Atributos do Solo	6
2.1 Qualidade do Solo	6
2.2 Atributos do Solo	8
2.2.1 Granulometria	8
2.2.2 Textura	9
2.2.3 Colóides	10
2.2.4 Cargas Elétricas nas Partículas	11

2.2.5	Acidez no Solo	13
2.2.6	Nutrientes Minerais do Solo	14
2.3	Aspectos Gerais sobre o Cultivo de Açaí	15
3	Métodos Estatísticos Multivariados	17
3.1	Introdução	17
3.2	Análise Fatorial	18
3.2.1	Teste de Normalidade de Kolmogorov-Smirnov	19
3.2.2	Transformação de Box-Cox	20
3.2.3	Modelagem da Análise Fatorial	21
3.2.4	Medidas de Ajuste do Modelo	24
3.2.5	Extração dos Fatores Iniciais	27
3.2.6	Rotação de Fatores	28
3.3	Índice de Qualidade do Solo	31
3.4	Análise Discriminante	31
3.4.1	Modelagem da Análise Discriminante	32
3.4.2	Cálculo do Escore de Corte	35
3.4.3	Métodos Computacionais: Simultâneo e <i>Stepwise</i>	35
4	Resultados	38
4.1	Dados	38
4.2	Análise Fatorial - Superfície do Solo (0 - 5 cm)	42
4.3	Análise Fatorial - Profundidade do Solo (25 - 30 cm)	51
4.4	Índice de Qualidade - Superfície do Solo (0 - 5 cm)	60
4.4.1	Índice de Qualidade baseado nos Atributos Químicos - Superfície do Solo (0 - 5 cm)	60
4.4.2	Índice de Qualidade baseado nos Atributos Físicos - Superfície do Solo (0 - 5 cm)	63
4.4.3	Índice de Qualidade do Solo Geral - Superfície do Solo (0 - 5 cm) . . .	66
4.5	Índice de Qualidade - Profundidade do Solo (25 - 30 cm)	70

4.5.1	Índice de Qualidade baseado nos Atributos Químicos - Profundidade do Solo (25 - 30 cm)	70
4.5.2	Índice de Qualidade baseado nos Atributos Físicos - Profundidade do Solo (25 - 30 cm)	73
4.5.3	Índice de Qualidade do Solo Geral - Profundidade do Solo (25 - 30 cm)	76
4.6	Análise Discriminante - Superfície do Solo (0 - 5 cm)	80
4.6.1	Análise Discriminante dos Atributos Químicos e Físicos Individualmente - Superfície do Solo (0 - 5 cm)	80
4.6.2	Análise Discriminante dos Atributos Químicos e Físicos Conjuntamente - Superfície do Solo (0 - 5 cm)	87
4.7	Análise Discriminante - Profundidade do Solo (25 - 30 cm)	93
4.7.1	Análise Discriminante dos Atributos Químicos e Físicos Individualmente - Profundidade do Solo (25 - 30 cm)	93
4.7.2	Análise Discriminante dos Atributos Químicos e Físicos Conjuntamente - Profundidade do Solo de 25-30 cm	101
5	Considerações Finais e Recomendações	108
5.1	Considerações Finais	108
5.2	Recomendações	112
	Anexo	113
	Referências Bibliográficas	114

Lista de Tabelas

2.1	Tipo de Fração Grosseira de acordo com o Diâmetro.	8
2.2	Tipo de Fração Fina de acordo com o Diâmetro.	9
3.1	Equação de Alguns Valores Transformados, para Determinados Valores de λ	21
3.2	Classificação da Aplicação da Análise Fatorial pela Estatística KMO.	25
4.1	Transformações Utilizadas para Normalização dos Dados de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, por Tipo de Atributos e Profundidade.	41
4.2	Resultados do Teste de Normalidade de Kolmogorov-Smirnov para os Dados (Transformados) de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.	43
4.3	Matriz de Correlações de Pearson para os Dados de Atributos Químicos e Físicos, de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.	44
4.4	Resultados da Medida de Kaiser-Meyer-Olkin e do Teste de Esfericidade de Bartlett para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.	45
4.5	Matriz de Correlações Anti-imagem para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.	46

4.6	Autovalor e Percentual de Variância Explicada pelos Fatores para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.	47
4.7	Matriz de Cargas Fatoriais após Rotação Ortogonal pelo Método Varimax para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.	49
4.8	Matriz de Coeficientes de Regressão dos Escores Fatoriais Após a Aplicação da Rotação via o Método Varimax para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.	50
4.9	Resultados do Teste de Normalidade de Kolmogorov-Smirnov para os Dados (Transformados) de Atributos Químicos e Físicos de Solos, Coletados na Fazenda Barindaua, para a Profundidade de 25 – 30 cm.	52
4.10	Matriz de Correlações de Pearson para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, para a Profundidade de 25 – 30 cm.	53
4.11	Resultados da Medida de Kaiser-Meyer-Olkin e do Teste de Esfericidade de Bartlett para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, para a Profundidade de 25 – 30 cm.	54
4.12	Matriz de Correlações Anti-imagem para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, para a Profundidade de 25 – 30 cm.	55
4.13	Autovalor e Percentual de Variância Explicada pelos Fatores para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, para a Profundidade de 25 – 30 cm.	56
4.14	Matriz de Cargas Fatoriais após Rotação Ortogonal pelo Método Varimax para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, para a Profundidade de 25 – 30 cm.	58

4.15	Matriz de Coeficientes de Regressão dos Escores Fatoriais Após a Aplicação da Rotação via o Método Varimax para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, para a Profundidade de 25 – 30 cm.	59
4.16	Valores dos Escores Fatoriais Originais e Padronizados e Índice de Qualidade do Solo Baseado nos Dados de Atributos Químicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, para a Profundidade de 0 – 5 cm.	61
4.17	Valores dos Escores Fatoriais Originais e Padronizados e Índice de Qualidade do Solo para os Dados de Atributos Físicos de Solos, Coletados na Fazenda Barindaua, para Profundidade de 0 – 5 cm.	64
4.18	Valores dos Escores Fatoriais Padronizados e Índice de Qualidade do Solo Geral Baseado nos Dados de Atributos Químicos e Físicos, de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, para a Profundidade de 0 – 5 cm.	67
4.19	Valores dos Escores Fatoriais Originais e Padronizados e Índice de Qualidade do Solo Baseados nos Dados de Atributos Químicos de Solos, Coletados na Fazenda Barindaua, para a Profundidade de 25 – 30 cm.	71
4.20	Valores dos Escores Fatoriais Originais e Padronizados e Índice de Qualidade do Solo em Relação aos Dados de Atributos Físicos de Solos, Coletados na Fazenda Barindaua, para a Profundidade de 25 – 30 cm.	74
4.21	Valores dos Escores Fatoriais Padronizados e Índice de Qualidade do Solo Geral Baseado nos Dados de Atributos Químicos e Físicos, de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, para a Profundidade de 25 – 30 cm	77
4.22	Resultado do Teste de Igualdade de Médias dos Grupos para Seleção de Atributos Químicos e Físicos Discriminantes de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.	81
4.23	Atributos Químicos e Físicos Incluídos/Excluídos da Análise por Meio do Procedimento Stepwise, Valores de Lambda de Wilks e Estatística F, para os Dados Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.	82

4.24	Autovalor, Percentual de Variância e Correlação Canônica das Funções Discriminantes para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.	83
4.25	Lambda de Wilks e χ^2 das Funções Discriminantes para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.	84
4.26	Coeficientes Padronizados das Funções Discriminantes para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.	84
4.27	Coeficientes de Classificação da Função Discriminante Linear de Fisher para os Dados de Atributos Químicos e Físicos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.	85
4.28	Quantidade e Percentual de Observações Classificadas pelo Procedimento Stepwise nos Três Grupos Determinados para os Dados de Atributos Químicos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.	86
4.29	Quantidade e Percentual de Observações Classificadas pelo Procedimento Stepwise nos Três Grupos Determinados para os Dados de Atributos Físicos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.	87
4.30	Resultado do Teste de Igualdade de Médias dos Grupos para Seleção dos Atributos Químicos e Físicos Discriminantes Conjuntamente, para os Dados de Solo Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para Profundidade de 0 – 5 cm.	88
4.31	Atributos Químicos e Físicos Incluídos/Excluídos da Análise por Meio do Procedimento Stepwise, Valores de Lambda de Wilks e Estatística F, para os Dados Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.	89

4.32	Autovalor, Percentual de Variância e Correlação Canônica das Funções Discriminantes para os Dados de Atributos Químicos e Físicos para a Profundidade de 0 – 5 cm.	90
4.33	Lambda de Wilks e χ^2 das Funções Discriminantes para os Dados de Atributos Químicos e Físicos para Profundidade de 0 – 5 cm.	90
4.34	Coeficientes Padronizados das Funções Discriminantes para os Dados de Atributos Químicos e Físicos para Profundidade de 0 – 5 cm.	91
4.35	Coeficientes de Classificação da Função Discriminante Linear de Fisher para os Dados de Atributos Químicos e Físicos para Profundidade de 0 – 5 cm.	91
4.36	Quantidade e Percentual de Observações Classificadas pelo Procedimento Stepwise nos Três Grupos Determinados para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para Profundidade de 0 – 5 cm.	92
4.37	Resultado do Teste de Igualdade de Médias dos Grupos para Seleção de Atributos Químicos e Físicos Discriminantes, de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.	94
4.38	Atributos Químicos e Físicos Incluídos/Excluídos da Análise por Meio do Procedimento Stepwise, Valores de Lambda de Wilks e Estatística F, para os Dados de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.	96
4.39	Autovalor, Percentual de Variância e Correlação Canônica das Funções Discriminantes para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.	96
4.40	Lambda de Wilks e χ^2 das Funções Discriminantes para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.	97
4.41	Coeficientes Padronizados das Funções Discriminantes para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.	97

4.42	Coeficientes de Classificação da Função Discriminante Linear de Fisher para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.	98
4.43	Quantidade e Percentual de Observações Classificadas pelo Procedimento Stepwise nos Três Grupos Determinados para os Dados de Atributos Químicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.	99
4.44	Quantidade e Percentual de Observações Classificadas pelo Procedimento Stepwise nos Três Grupos Determinados para os Dados de Atributos Físicos de Solos, Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.	101
4.45	Resultado do Teste de Igualdade de Médias dos Grupos para Seleção de Variáveis Discriminantes para os Dados de Atributos Químicos e Físicos Conjuntamente de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.	102
4.46	Atributos Químicos e Físicos Incluídos/Excluídos da Análise por Meio do Procedimento Stepwise, Valores de Lambda de Wilks e Estatística F, para os Dados de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.	103
4.47	Autovalor, Percentual de Variância e Correlação Canônica das Funções Discriminantes para os Dados de Atributos Químicos e Físicos Conjuntamente de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.	103
4.48	Lambda de Wilks e χ^2 das Funções Discriminantes para os Dados de Atributos Químicos e Físicos Conjuntamente de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.	104
4.49	Coeficientes Padronizados das Funções Discriminantes para os Dados de Atributos Químicos e Físicos Conjuntamente de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.	104

4.50	Coeficientes de Classificação da Função Discriminante Linear de Fisher para os Dados de Atributos Químicos e Físicos Conjuntamente de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.	105
4.51	Quantidade e Percentual de Observações Classificadas pelo Procedimento Stepwise nos Três Grupos Determinados para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.	106
1	Valores Críticos de D_c no Teste de Kolmogorov-Smirnov tal que $P(D_{cal} > D_c) = \alpha$	113

Lista de Figuras

3.1	Diagrama de Decisão para Aplicação da Análise Fatorial.	30
3.2	Diagrama de Decisão para Aplicação da Técnica Análise Discriminante. . .	37
4.1	Localização da Fazenda Barindaua no Município de Mojú, Estado do Pará.	39
4.2	Desenho do Plano Amostral para a Coleta de Solos na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009.	40
4.3	Resumo dos Resultados do Índice de Qualidade do Solo Baseado nos Atrib- utos Químicos (IQSQ), Físicos (IQSF) e Químicos e Físicos Conjuntamente (IQSG), para a Profundidade de 0 – 5 cm.	69
4.4	Resumo dos Resultados do Índice de Qualidade do Solo Baseado nos Atrib- utos Químicos (IQSQ), Físicos (IQSF) e Químicos e Físicos Conjuntamente (IQSG), para a Profundidade de 25 – 30 cm.	79
4.5	Resumo dos Resultados da Análise Discriminante Aplicada aos Dados de Atributos Químicos, Físicos e Químicos e Físicos Conjuntamente de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 e 25 – 30 cm.	107

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo, na Seção 1.1 são apresentados os aspectos gerais referentes a qualidade de solo, enquanto que a Seção 1.2 mostra a justificativa e importância deste estudo, na Seção 1.3 pode-se ver a hipótese básica da dissertação, na Seção 1.4 observa-se os objetivos, tanto geral como específicos, já a Seção 1.5 mostra a estrutura da dissertação.

1.1 Aspectos Gerais

O solo é o principal sistema de suporte da vida e do bem-estar humano, pois fornece o substrato para as raízes, retêm água o tempo suficiente para ser utilizada pelas plantas. O solo é considerado um componente vital para os agroecossistemas no qual ocorrem os processos e ciclos de transformações físicas, biológicas e químicas, e quando mal manejado pode degradar todo o ecossistema (STRECK *et al.*, 2002).

Assim, os solos quando submetidos a determinados sistemas de cultivo, tendem a um novo estado de equilíbrio, refletido em diferentes manifestações de seus atributos, as quais podem ser desfavoráveis à conservação da capacidade produtiva destes solos (GOMES, 2011). Para Silva (2008) a ação do homem no sistema solo-água-planta-atmosfera, para a produção de alimentos, tende a ocasionar alterações, muitas vezes positivas, como a melhoria das condições para o desenvolvimento e proteção das plantas, outras vezes negativas, como a degradação do solo e a poluição do ambiente.

Um sério problema que a agricultura, ainda, enfrenta é a perda do solo por erosão, que tem como consequências, além da perda gradativa do potencial produtivo do solo, a degradação dos recursos hídricos (LEONARDO, 2003). No Brasil, a erosão carrega anualmente 500 milhões de toneladas de solo, o que corresponde a uma camada de solo de

15 centímetros numa área de 280.000 hectares. Esse material arrastado pela erosão irá se depositar nas baixadas e nos rios, riachos e lagoas, causando uma elevação de seus leitos e possibilitando grandes enchentes.

Os solos da Amazônia possuem apenas 14% da área ocupada por solos de boa fertilidade, o restante da área correspondente a 86% é constituído por solos de baixa fertilidade, isto é, com reduzida quantidade de nutrientes para as plantas (LIMA, 2011). No entanto ocorre um equilíbrio solo-floresta-solo, onde as plantas vivem da ciclagem de nutrientes, dessa maneira o ciclo de nutrientes entre a floresta e o solo é quase fechado e contínuo, com a maior parte dos nutrientes localizados na própria biomassa, além disso, a intensa radiação solar e água em abundância favorecem a fotossíntese, o que contribui para a formação e manutenção da floresta.

No Pará os solos apresentam-se com certa diversidade, sendo caracterizados especialmente, pela intensiva lixiviação (lavagem do solo pelas águas das chuvas) a que são submetidos (WAGNER; WAGNER, 2011). As derrubadas e queimadas que vêm ocorrendo no Estado, expõem o solo diretamente ao trabalho da erosão pluvial devido aos altos índices de chuvas que caracterizam a região. A ilusão do agricultor paraense de que as queimadas fertilizam o solo, o que inegavelmente ocorre na sua fase imediata, não leva em consideração que os nutrientes se perdem com as chuvas, deixando o solo empobrecido.

Para Souza e Alves (2003), a substituição da vegetação natural, por culturas agrícolas, provoca um desequilíbrio no ecossistema, já que o manejo adotado influenciará os processos físico-químicos e biológicos do solo, podendo modificar suas características e, muitas vezes, propiciando sua degradação. Assim, o conceito de qualidade do solo surgiu no final da década de 70 e durante os 10 anos seguintes esteve muito associado ao conceito de fertilidade (KARLEN *et al.*, 2003). O entendimento atual do conceito de qualidade de solo compreende o equilíbrio entre os condicionantes geológicos, hidrológicos, químicos, físicos e biológicos do solo (BRUGGEN; SEMENOV, 2000; SPOSITO; ZABEL, 2003).

Para Gomes (2011) a qualidade do solo é aceita, frequentemente, como uma característica abstrata que depende, além de seus atributos intrínsecos, de fatores externos, como as práticas de uso e manejo, de interações com o ecossistema e das prioridades socioeconômicas e políticas. De acordo com Santana e Bahia Filho (1998), a avaliação da

qualidade do solo pode ser realizada pelo monitoramento de seus atributos ou características físicas, químicas e biológicas. Neste sentido, este trabalho tem por objetivo estabelecer índices de qualidade do solo de plantação de Açaí, a partir de métodos estatísticos multivariados.

1.2 Justificativa e Importância

O impacto ambiental causado pela intensificação da exploração agrícola nem sempre recebeu a atenção necessária. A ausência de conhecimento aprofundado sobre o ecossistema e/ou planejamento inadequado na utilização das terras levou a um quadro de intensa degradação ambiental, com perda de recursos não-renováveis e da biodiversidade não só no Brasil como em outros países (SHIKI, 1997).

Dumanski e Pieri (2000) estimam que 40% das terras agrícolas do mundo sofrem degradação, enquanto que Gliessman (2000) deixa claro que não só é preciso, mas também perfeitamente possível conciliar produção com a conservação dos recursos naturais dos quais a produção depende. Assim, o estabelecimento de índices de qualidade do solo é útil na tarefa de avaliação de impactos ambientais quando biomas são incorporados ao processo produtivo, seja de forma extensiva ou intensiva (ARAÚJO *et al.*, 2007), sendo um instrumento importante nas funções de controle, fiscalização e monitoramento de áreas destinadas à proteção ambiental.

Dessa forma, este trabalho se justifica pela necessidade do desenvolvimento de novos métodos para avaliação da qualidade do solo, a fim de que possam ser utilizados por instituições de fiscalização e controle ambiental e demais profissionais da área, principalmente, por se tratar da avaliação de solos utilizados para o plantio de uma palmeira nativa da região amazônica e de grande importância socioeconômica devido ao seu enorme potencial de aproveitamento integral de matéria-prima, isto é, o principal aproveitamento é a extração do açaí, mas as sementes (caroços) do açaizeiro são aproveitadas no artesanato e como adubo orgânico. Além disso, a planta fornece o palmito e as suas folhas são utilizadas para cobertura de casas dos habitantes do interior da região.

1.3 Hipótese Básica da Dissertação

Parte-se da hipótese que os atributos químicos e físicos determinantes da qualidade do solo para plantação de Açaí, na superfície (profundidade de 0 – 5 cm), são: potássio (K), saturação por base (V) e macroporosidade.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

Estabelecer índices de qualidade do solo de plantação de Açaí, a partir de métodos estatísticos multivariados.

1.4.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, podem-se enumerar:

- i)* A partir da técnica análise fatorial, determinar a qualidade do solo de plantação de Açaí, empregando o Índice de Qualidade do Solo baseado nos Atributos Químicos (IQSQ), Físicos (IQSF) e Químicos e Físicos conjuntamente (IQSG);
- ii)* Com base na técnica análise discriminante validar os resultados obtidos na construção dos IQS's;
- iii)* Conhecer, entre os atributos químicos e físicos do solo, quais influenciam e estão associados a qualidade do solo de plantação de Açaí.

1.5 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividido em 5 capítulos, a saber:

Capítulo 1: Refere-se à introdução do trabalho, onde são abordados os aspectos gerais, justificativa e importância do trabalho, os objetivos, bem como a estrutura do trabalho;

Capítulo 2: Apresenta uma abordagem sobre qualidade e atributos do solo;

Capítulo 3: Mostra as técnicas estatísticas utilizadas para a obtenção dos resultados;

Capítulo 4: Apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação das técnicas apresentados no Capítulo 3;

Capítulo 5: Descreve as considerações finais e recomendações para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Qualidade e Atributos do Solo

Este capítulo apresenta alguns conceitos a respeito da qualidade e atributos do solo, bem como as principais funções de alguns atributos, além disso apresenta algumas considerações sobre o cultivo de Açaí. Neste sentido, a Seção 2.1 aborda alguns conceitos e estudos sobre qualidade do solo, a Seção 2.2 mostra quais são os atributos químicos e físicos do solo, bem como suas principais funções e, a Seção 2.3 faz uma breve abordagem a respeito dos aspectos gerais sobre o cultivo de Açaí.

2.1 Qualidade do Solo

O solo é produto resultante da ação combinada de cinco fatores principais de formação: o clima, os organismos, o material de origem (a rocha), o relevo e o tempo. O clima, os organismos e o relevo agem sobre o material de origem ao longo do tempo, dando origem ao solo. Essa ação formadora de solos se desenvolve por meio de processos de desintegração física e química do material de origem.

De acordo com Silva (2003), cada tipo de solo apresenta diferente comportamento em relação a retenção e permeabilidade de água, disponibilidade de nutrientes e etc. Deve-se, portanto, conhecer as propriedades do solo e suas variações, para que seja adotado o manejo mais adequado ao solo e às culturas, a fim de que ocorra a preservação elevada.

Solos com melhor qualidade, não apenas produzirão mais alimentos e fibra para a crescente população mundial, mas também terão grande papel na estabilidade dos ecossistemas naturais, melhorando a qualidade do ar e da água (GREGORICH *et al.*, 1994). Dessa forma, a qualidade do solo influencia o potencial de uso, a produtividade e a sustentabilidade global do agroecossistema, sendo seu estudo necessário para fornecer informações

sobre o manejo do solo e assegurar a tomada de decisões para uma melhor utilização desse recurso (SPOSITO; ZABEL, 2003).

No final da década de 70, acreditava-se que um solo quimicamente rico era um solo com alta qualidade, isto porque tinha a capacidade de prover a produção agrícola. Entretanto, de acordo com Zilli *et al.* (2003), a percepção de qualidade do solo evoluiu, principalmente na década de 90, e, num entendimento mais amplo, percebe-se que não basta apenas o solo apresentar alta fertilidade, mas, também, deve possuir boa estruturação e abrigar uma alta diversidade de organismos.

Segundo Doran e Parkin (1994), a qualidade do solo pode ser conceituada como a capacidade desse recurso exercer várias funções, dentro dos limites do uso da terra e do ecossistema, para sustentar a produtividade biológica, manter ou melhorar a qualidade ambiental e contribuir para a saúde das plantas, dos animais e humanos. Assim, a qualidade de um solo está relacionada ao seu grau de aptidão a um uso específico, que é dependente das práticas agrícolas adotadas e da composição natural do solo (SILVA, 2008).

Na passagem de sistemas naturais para agrícolas, muitos atributos do solo são alterados, alguns dos quais, por estarem relacionados com processos do ecossistema e serem sensíveis a variações no uso e manejo do solo, indicam alterações na sua qualidade (DORAN; PARKIN, 1996). De maneira geral, é possível obter informações bastante detalhadas sobre propriedades químicas e físicas do solo, enquanto o aspecto biológico é pouco conhecido (D'ANDRÉA *et al.*, 2002).

O estabelecimento de índices de qualidade do solo é útil na tarefa de avaliação de impactos ambientais quando biomas são incorporados ao processo produtivo, seja de forma extensiva ou intensiva (ARAÚJO *et al.*, 2007). Torna-se, assim, um instrumento importante nas funções de controle, fiscalização e monitoramento de áreas destinadas à proteção ambiental.

De acordo com Santana e Bahia Filho (1998), a avaliação da qualidade do solo pode ser realizada pelo monitoramento de seus atributos ou características físicas, químicas e biológicas. Entre estes, têm sido recomendados aqueles atributos ou indicadores que podem sofrer mudanças em médio prazo, tais como densidade e porosidade, estado de

agregação e de compactação, conteúdo de matéria orgânica e nível de atividade biológica (CARVALHO *et al.*, 2004).

Um dos desafios atuais da pesquisa é como avaliar a qualidade de um solo de maneira simples e confiável. Para Araújo *et al.* (2007), ela pode ser medida por meio da quantificação de alguns atributos, ou seja, de propriedades físicas, químicas e biológicas, que possibilitem o monitoramento de mudanças, a médio e longo prazo, no estado da qualidade desse solo.

2.2 Atributos do Solo

A avaliação da qualidade por meio de atributos do solo é bastante complexa devido à grande diversidade de usos, à multiplicidade de inter-relações entre fatores físicos, químicos e biológicos que controlam os processos e aos aspectos relacionados a sua variação no tempo e no espaço (MENDES *et al.*, 2006). Assim, a seguir são mostrados comentários sobre as características existentes no solo, associando-as a itens existentes na análise de solo, conforme apresenta Silva (2003).

2.2.1 Granulometria

A granulometria relaciona, na análise de solo, a proporção existente em relação ao tamanho da partícula da fração ativa, permitindo obter a classe textural do solo. O solo é formado por partículas que possuem diferentes diâmetros, conforme Tabelas 2.1 e 2.2.

i) Fração Grosseira

Tabela 2.1 *Tipo de Fração Grosseira de acordo com o Diâmetro.*

Fração	Diâmetro
Matacão	maior que 20 cm
Calhau	entre 2 cm e 20 cm
Cascalho	entre 2 cm e 2 mm

Fonte: Brady (1989); Vieira e Vieira (1983).

*ii) Fração Fina*Tabela 2.2 *Tipo de Fração Fina de acordo com o Diâmetro.*

Fração	Diâmetro
Areia Grossa	entre 2 e 0,2 mm
Areia Fina	entre 0,2 e 0,02 mm
Silte	entre 0,02 e 0,002 mm
Argila	menor que 0,002 mm

Fonte: Brady (1989); Vieira e Vieira (1983).

Na fração de partículas menores de 2 mm, que predomina nos solos em relação à fração grosseira, distinguem-se três frações granulométricas denominadas: areias, silte e argila. As diversas proporções existentes entre estes componentes influenciam marcadamente na retenção da água e nutrientes e originam a classificação textural do solo. O que determina o teor de areia, silte e argila no solo é a análise granulométrica.

Além disso, a fração menor que 2 mm de diâmetro é empregada na análise de solo, e após secagem, é denominada Terra Fina Seca ao Ar (TFSA), nela ocorrem diversos fenômenos relacionados à retenção de água, nutrientes, trocas gasosas e desenvolvimento da microbiologia do solo.

2.2.2 Textura

Para Leonardo (2003) a textura do solo expressa a sua característica intrínseca, a proporção entre as diferentes partículas granulométricas, sem as quais não há como falar de estruturação do solo. Assim, as classes de textura podem ser: areia, areia franca, franco arenosa, siltosa, franco argilo arenosa, franco argilosa, franco argilo siltosa, argilo arenosa, argilo siltosa, silte e argila. Essas exprimem a distribuição relativa das partículas do solo de acordo com os diâmetros apresentados por Vieira e Vieira (1983).

Os solos mais argilosos retêm água com mais intensidade que solos siltosos e arenosos. Da mesma forma, afirma-se que solos arenosos apresentam permeabilidade acima do desejado

para a maior parte das culturas, permitindo lavagem do solo, sendo muito empregado o termo lixiviação, associado por muitas vezes à perda de nutrientes (BRADY, 1989).

Para Vieira (1975), entende-se por estrutura do solo a agregação de suas partículas individuais em partículas compostas que recebem o nome de agregados. Os agregados possuem espaços livres internamente, de tamanho diminuto suficiente para a ocorrência do fenômeno de capilaridades denominados de microporos. Já os espaços existentes entre agregados de tamanho superior denominam-se macroporos.

A presença de macroporos e microporos no solo possui importância na aeração do solo, e em virtude de ocorrer nos microporos a retenção da solução do solo, fato relevante para a nutrição vegetal, principalmente de nutrientes que adquirem forma aniônica, e de os macroporos permitirem a passagem da água excedente (BLACK, 1967; BRADY, 1989).

2.2.3 Colóides

As parcelas mais ativas do solo são aquelas em estado coloidal, existem dois tipos distintos de matéria coloidal, orgânico e inorgânico, misturados entre si. O tipo orgânico está representado sob a forma de humo, já o inorgânico acha-se presente quase que exclusivamente sob a forma de minerais argilosos das diversas formas.

Em proporção, os colóides inorgânicos existem em maior quantidade que colóides orgânicos no solo. Os colóides orgânicos são formados a partir da decomposição química e biológica dos materiais orgânicos adicionados ao solo (MCBRIDE, 1994; SPOSITO, 1989). Os colóides inorgânicos são formados pelo desgaste das rochas e minerais que compõem o solo, estes absorvem frequentemente substâncias tóxicas do solo, fazendo um papel de desintoxicação de substâncias que, caso contrário, prejudicariam as plantas.

Segundo Lopes (1989) os colóides possuem extrema importância para retenção de elementos nutricionais e posterior fornecimento dos mesmos aos vegetais. Em virtude de possuírem cargas elétricas, atraem íons, sendo na maioria dos casos cargas negativas, realizando retenção de cátions.

2.2.4 Cargas Elétricas nas Partículas

As partículas coloidais possuem carga elétrica, predominando de modo geral as cargas negativas. A existência de cargas negativas nas partículas reveste-se de extrema importância para os vegetais, pois, elementos ionizados positivamente, os cátions serão retidos eletrostaticamente, num fenômeno de troca de cátions, permitindo ao solo reter nutrientes essenciais ao desenvolvimento vegetal e fornecê-los ao vegetais.

Para Wotke e Camargo (1975), a troca iônica é um processo reversível a partir do qual íons retidos na superfície de uma fase sólida são substituídos por quantidade equivalente de outros íons, quer estejam estes em solução numa fase líquida, quer estejam ligados a outra fase sólida, em contato com a primeira. Os íons envolvidos na troca iônica ligam-se à fase sólida eletrostaticamente ou por covalência e, em ambos os casos, esse tipo de união é denominado adsorção iônica.

A força iônica é o mais importante dos fenômenos que ocorrem no solo, principalmente pela sua relevância nos processos de nutrição vegetal (MENDONÇA, 2006). Os íons relacionados a nutrição vegetal mais comumente encontrados no solo são: nitrogênio (NH_4^+ ; NO_3^-), fósforo (PO_4^{--}), potássio (K^+), cálcio (Ca^{++}), magnésio (Mg^{++}), sódio (Na^{++}), hidrogênio (H^+), alumínio (Al^{+++}), cloro/cloreto (Cl^-), enxofre/sulfato (SO_4^{--}).

O solo, além de reter partículas eletrostaticamente, possui mecanismos que promovem retenção de solução que contenha ânions, retraindo, entretanto, somente o necessário, de modo a impedir o encharcamento e permitir aeração necessária ao desenvolvimento da biologia do solo (BLACK, 1967; LOPES, 1989; RAIJ, 1991).

O fenômeno ocorre com todos os íons, que serão passíveis de sofrer adsorção iônica, que tanto pode ser aniônica quanto catiônica, sendo que como ocorrem predominantemente cargas negativas, o fenômeno de adsorção de cátions é mais frequente. Entretanto, os cátions adsorvidos são substituíveis por outros cátions, ou seja, o hidrogênio pode ser substituído pelo potássio e vice-versa, sendo o total de cátions que o solo pode reter chamado de Capacidade de Troca de Cátions (CTC).

A troca catiônica consiste em substituição de um cátion adsorvido na superfície de troca (partículas coloidais) por outro proveniente da solução do solo ou de outra parte

sólida, inclusive da superfície de um pêlo radicular, que se aproxime da área de adsorção. Este processo de permuta é extremamente rápido e a atração é instantânea quando o cátion originalmente adsorvido se encontra na superfície externa das partículas coloidais (WOTKE; CAMARGO, 1975).

A CTC é uma medida da distribuição das cargas elétricas disponíveis na superfície das partículas do solo para a retenção de água e cátions dispersos na solução do solo. Conforme Ronquim (2010), um valor baixo de CTC indica que o solo tem pequena capacidade para reter cátions em forma trocável; nesse caso, não se devem fazer as adubações e as calagens em grandes quantidades de uma só vez, mas sim de forma parcelada para que se evitem maiores perdas por lixiviação.

Os valores de CTC de um solo dependem da classe textural, do tipo de mineral de argila presente e do teor de matéria orgânica (BRADY, 1989). Assim, solos com predominância de argilas silicatadas tendem a apresentar maior CTC do que solos com predominância de óxidos de ferro e alumínio (BOUDOT *et al.*, 1986). De outro modo, solos mais argilosos apresentam maior CTC do que solos arenosos (BRADY, 1989).

A CTC é calculada na análise de solo pelo somatório de Ca^{++} , Mg^{++} , K^{+} , Na^{+} , Al^{+++} e H^{+} , sendo que quando o cálculo não inclui o íon hidrogênio, a CTC recebe a denominação de CTC efetiva (t) e representa a CTC atual do solo, ou seja, a quantidade máxima de retenção de cátions naquele valor atual. A CTC potencial (T) inclui o íon hidrogênio no somatório representando a capacidade de troca de cátions a pH 7, que poderia ser obtida após liberação de sítios de troca anteriormente ocupados pelo hidrogênio.

Para Galvão e Vahl (1996), a grande diferença entre a CTC efetiva e CTC potencial é devida ao íon hidrogênio de grupos carboxílicos, fenólicos e outros, que dissociam quando o potencial de íons de hidrogênio (pH) é aumentado, liberando as cargas negativas para a adsorção de outros cátions.

A soma de bases (S ou SB) de um solo, argila ou húmus refere-se ao número de cargas negativas dos colóides ocupadas por bases. Assim, iniciando pelo valor de S , pode-se

calcular a CTC por

$$S = Ca^{++} + Mg^{++} + K^+ + Na^+, \quad (2.1)$$

$$CTC_{efetiva} = S + Al^{+++} = t, \quad (2.2)$$

$$CTC_{potencial} = S + Al^{+++} + H^+ = T. \quad (2.3)$$

A partir do valor da soma de bases e da capacidade de troca de cátions pode-se determinar o percentual de saturação de bases ($V\%$) a pH 7, isto é, a soma das bases trocáveis expressa em porcentagem de capacidade de troca de cátions, obtido por

$$V\% = \frac{S}{T} \times 100. \quad (2.4)$$

A saturação de bases é um excelente indicativo das condições gerais de fertilidade do solo, assim de acordo com a Ronquim (2010), os solos podem ser divididos de acordo com a saturação de bases: solos eutróficos (férteis) possuem $V\% \geq 50\%$; solos distróficos (pouco férteis) possuem $V\% < 50\%$.

Alguns solos distróficos podem ser muito pobres em Ca^{++} , Mg^{++} e K^+ e apresentar teor de alumínio trocável muito elevado, chegando a apresentar saturação em alumínio ($m\%$) superior a 50% e nesse caso são classificados como solos álicos (muito pobres): Al trocável $= 3 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $m\% \geq 50\%$. A maioria das culturas apresenta boa produtividade quando no solo é obtido valor de $V\%$ entre 50% e 80% e valor de pH entre 6,0 e 6,5.

2.2.5 Acidez no Solo

A acidez no solo é reconhecida como um dos principais fatores que conduzem à baixa produtividade dos cultivos no país. Isso se deve principalmente aos elevados teores de Alumínio e em alguns casos de manganês, bem como devido aos baixos teores de cálcio e magnésio (VAN RAIJ, 1991). Além disso, a aplicação contínua e desordenada de fertilizantes pode também ocasionar a acidez dos solos, a partir de resíduos ácidos. As diversas formas de acidez no solo são representadas a seguir:

a) pH

Representa a acidez ativa do solo. É o índice de concentração de H^+ no solo usado para determinar se um solo é ácido (pH menor que 7), neutro (pH igual a 7) ou

básico (pH maior que 7); além disso controla a solubilidade de nutrientes no solo, exercendo grande influência sobre a absorção dos mesmos pela planta. Dessa maneira, solos ideais para cultivo devem apresentar pH entre 6,0 e 6,5; porém, esta faixa pode ser estendida de 5,5 a 6,8 (MENDONÇA, 2006).

b) Al^{+++}

Conhecido por acidez trocável. Refere-se aos íons H^+ e Al^{+++} que estão retidos na superfície dos colóides por forças eletrostáticas. Porém, a quantidade de hidrogênio trocável, em condições naturais, parece ser pequena, a determinação é conhecida como representante do teor de alumínio trocável.

c) $H^+ + Al^{+++}$

Representa a acidez potencial. Expressa a quantidade de hidrogênio iônico mais o alumínio trocável existente na superfície dos colóides do solo por força eletrostática acrescido do H^+ existente em ligações covalentes em relação às frações do solo.

2.2.6 Nutrientes Minerais do Solo

Os macronutrientes: nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), também chamados de nutrientes principais, são absorvidos pela planta em maior proporção que os micronutrientes: boro (B), zinco (Zn), cobre (Cu), ferro (Fe), molibdênio (Mo), cloro (Cl) e manganês (Mn), também chamados de elementos traço (RONQUIM, 2010). Ambos são constituintes dos minerais e da matéria orgânica do substrato onde a planta cresce e encontram-se também dissolvidos na solução do solo. Assim, a seguir serão evidenciados resumidamente, apenas a título de esclarecimento, as funções principais de alguns destes elementos, conforme Primavesi (2002) e Amaral (1984).

a) Fósforo

Sem o fósforo não existe crescimento vegetal, pois é o responsável pela transferência de energia de substâncias orgânicas. O fósforo geralmente se liga a algum composto no solo e pode ocorrer em forma de humatos, de apatita ou ligado ao ferro e alumínio. Os solos do Brasil de uma maneira geral são carentes deste elemento, e é por este motivo que as fórmulas de adubações normalmente contêm quantidades elevadas de fósforo.

b) Potássio

Quando se nota pelas análises do solo a falta completa de potássio, pode-se concluir que não poderá haver desenvolvimento de vegetal no local de retirada da amostra. A resistência vegetal ao frio, seca e doenças depende em larga escala de um abastecimento suficiente com potássio.

c) Cálcio

A deficiência de cálcio, na parte aérea da planta, é manifestada pela redução de crescimento de tecidos meristemáticos. Atrofiamento, deformidades e clorose nas extremidades e folhas novas, são sintomas. A aplicação de calcário proporciona, em geral, suficiência do nutriente ao solo.

d) Magnésio

Como elemento central da molécula de clorofila exerce importante função no processo da fotossíntese. É móvel na planta e sua deficiência provoca clorose internervural nas folhas. Comumente o suprimento deste nutriente é feito a partir do uso de calcário dolomítico ou magnesiano.

2.3 Aspectos Gerais sobre o Cultivo de Açaí

O açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) é uma palmeira nativa da Amazônia brasileira que se destaca pela grande ocorrência e por produzir importante alimento para as populações locais, além de ser a principal fonte de matéria prima para a agroindústria de palmito do Brasil (NOGUEIRA, 2006). Para Viégas *et al.* (2009), o significado econômico do açaizeiro torna-se mais evidente à medida que a utilização do suco, como fonte alimentar e energética vem ganhando crédito em outros estados brasileiros e no exterior, deixando de ser um produto tipicamente regional.

Veloso *et al.* (2010), afirmam que a demanda e o potencial de mercado do Açaí cresceram de maneira significativa, deixando de possuir uma dimensão regional para ganhar importância nacional e internacional, graças a qualidade nutricional da bebida, resultante da maceração dos seus frutos, denominada de vinho ou suco de Açaí. Para Rogez (2000), o crescimento do mercado do açaizeiro está associado aos benefícios à saúde, que a ciência

vem atribuindo à ingestão desse alimento que apresenta baixo nível de calorias, altas concentrações de vitaminas, fibras, sais minerais e elevado teor de anticianinas.

A espécie desenvolve-se bem em vários tipos de solos, sendo encontrado nas terras firmes e áreas inundáveis, porém não suporta locais permanentemente alagados. A produtividade do açaizeiro, ainda é bastante reduzida, e diversos fatores concorrem para isso, podendo-se destacar a baixa fertilidade e a elevada acidez dos solos onde estão sendo implantados os plantios racionais (FOY, 1974). Para Veloso *et al.* (2010), à medida que os cultivos vão se intensificando, o empobrecimento químico dos solos vai se tornando mais expressivo devido à extração dos nutrientes pelas plantas, exportação pelas colheitas e perdas dos nutrientes do solo via lixiviação, erosão e fixação, reduzindo a disponibilidade para as plantas.

Segundo Homma *et al.* (2006), o plantio do açaizeiro em áreas de terra firme representa excelente alternativa para a recuperação de áreas desmatadas, como também para reduzir a pressão sobre o ecossistema de várzea, muito frágil, evitando sua transformação em bosques homogêneos dessa palmeira. Além disso, a possibilidade de se efetuar adubações, em áreas de terra firme, permite ampliar as possibilidades de aumentar a produção e a produtividade. Nas áreas de várzea, por sofrerem inundação diária, a prática da adubação não é possível, somente os tratos culturais de limpeza e manejo dos perfilhos e a contínua retirada dos frutos.

De acordo, com Viégas *et al.* (2004) e Veloso *et al.* (2010), no estado do Pará, a maioria dos plantios comerciais de açaizeiros são realizados em solos de terra firme, onde na região predominam os Latossolos Amarelos de baixa fertilidade natural e alto teor de alumínio trocável, tornando-se evidente que, para se obter alta produtividade, há necessidade de fornecer nutrientes, a partir de adubação. Dessa forma, a avaliação da qualidade do solo de cultivo do açaizeiro, se reveste de grande importância, pois permitirá o conhecimentos dos atributos que mais influenciam na mesma.

Capítulo 3

Métodos Estatísticos Multivariados

A tecnologia computacional hoje disponível, quase inimaginável apenas duas décadas atrás, tem feito avanços extraordinários na análise de dados. Esse impacto é mais edivente devido a facilidade com que computadores podem analisar grande quantidade de dados complexos, onde uma boa parte dessa crescente compreensão e domínio da análise de dados vem do estudo de estatística e inferência estatística (HAIR *et al.*, 2005). Neste contexto, este capítulo descreve algumas das diversas técnicas multivariadas utilizadas em análise de dados, isto é, a Seção 3.1 descreve uma breve introdução a respeito da Análise Multivariada; a Seção 3.2 fornece um conjunto de informações referente a técnica Análise Fatorial; já o foco da Seção 3.3 é o cálculo do Índice de Qualidade do Solo e a Seção 3.4 mostra a técnica Análise Discriminate.

3.1 Introdução

A análise multivariada, cada vez mais, vem apresentando fundamental importância para a tomada de decisões nos mais variados campos do conhecimento (FÁVERO *et al.*, 2009). Para Mingoti (2005), a estatística multivariada, consiste em um conjunto de métodos aplicados em situações onde várias variáveis são medidas simultaneamente em cada elemento amostral.

De acordo com Pereira (2004), a análise multivariada é um vasto campo do conhecimento que envolve uma grande multiplicidade de conceitos estatísticos e matemáticos, podendo ser entendida como um processo para se atingir um grupo de informações claras e objetivas, voltadas especificamente para uma melhor tomada de decisão. Segundo Hardyck e Petrinovich (1976):

“os métodos de análise multivariada predominarão no futuro e resultarão em drásticas mudanças na maneira como profissionais de pesquisa pensam em problemas e planejam sua pesquisa. Esses métodos tornam possível levantar questões específicas e precisas de considerável complexidade em cenários naturais. Isso viabiliza a condução de pesquisas teoricamente importantes e a avaliação dos efeitos de variações paramétricas que naturalmente ocorrem no contexto em que elas normalmente aparecem.”

Com o crescente desenvolvimento computacional, a análise multivariada passou a ser mais utilizada para a avaliação dos diversos comportamentos e tendências nas mais diferentes áreas do conhecimento. Logo, de um modo geral a análise multivariada refere-se a todos os métodos estatísticos que simultaneamente analisam múltiplas medidas sobre cada indivíduo ou objeto sob investigação (HAIR *et al.*, 2005).

3.2 Análise Fatorial

Para Fávero *et al.* (2009), a análise fatorial (AF) é uma técnica multivariada que busca identificar um número relativamente pequeno de fatores comuns que podem ser utilizados para representar relações entre um grande número de variáveis inter-relacionadas. Mingoti (2005) destaca que a análise fatorial tem como objetivo principal descrever a variabilidade original do vetor aleatório X , em termos de um número menor de m variáveis aleatórias, chamadas de fatores comuns e que estão relacionadas com o vetor original X a partir de um modelo linear.

Segundo Maroco (2007), a análise fatorial é uma técnica de análise exploratória de dados que tem por objetivo descobrir e analisar a estrutura de um conjunto de variáveis inter-relacionadas, de modo a construir uma escala de medida para fatores (intrínsecos) que, de alguma forma (mais ou menos explícita), controla as variáveis originais. A partir das correlações observadas entre as variáveis originais, a AF estima os fatores comuns que são subjacentes às variáveis e não diretamente observáveis (FÁVERO *et al.*, 2009).

Em termos gerais, de acordo com Hair *et al.* (2005), a AF aborda o problema de analisar a estrutura das inter-relações (correlações) entre um grande número de variáveis, definindo

um conjunto de dimensões latentes comuns, chamadas de fatores, que quando interpretadas e compreendidas, descrevem os dados em número muito menor de conceitos do que as variáveis individuais originais. As suposições em AF, de acordo com Pestana e Gageiro (2005), Hair *et al.* (2005) e Ho (2006), são:

- a) **Normalidade e linearidade:** desvios na normalidade e na linearidade podem reduzir as correlações observadas entre as variáveis e, portanto, prejudicar a solução;
- b) **Identificação da existência de *outliers*:** este fenômeno pode distorcer os resultados, uma vez que altera as estimativas das médias e dos desvios padrão;
- c) **Matriz de correlações com valores significativos:** o pesquisador deve garantir que a matriz de correlações apresente um considerável número de correlações com valores superiores a 0,30.

Para Mingoti (2005) é importante destacar a diferença entre a análise fatorial exploratória e a confirmatória. A análise fatorial exploratória buscar encontrar os fatores subjacentes às variáveis originais amostradas. Assim, quando o pesquisador faz essa análise, a princípio, ele não tem noção clara de quantos fatores fazem parte do modelo e nem o que esses representam. Já a análise fatorial confirmatória é frequentemente estudada como um caso particular da técnica de equações estruturais, já que o pesquisador possui algum conhecimento prévio de como as variáveis se comportam e se relacionam e, desta forma, assume que a estrutura dos fatores é conhecida.

3.2.1 Teste de Normalidade de Kolmogorov-Smirnov

De acordo com Fávero *et al.* (2009) o teste de Kolmogorov-Smirnov é um teste de aderência que compara a distribuição de frequência acumulada de um conjunto de valores observados da amostra com uma distribuição esperada ou teórica. Neste trabalho, a partir do teste de Kolmogorov-Smirnov pretende-se determinar se uma amostra é proveniente de uma população com distribuição normal. O teste de Kolmogorov-Smirnov é utilizado quando a média e o desvio padrão da população são conhecidos.

Assim, considere que $F_{esp}X$ é uma função de distribuição esperada (normal) de frequências relativas acumuladas da variável X , em que $F_{esp}X \sim N(\mu, \sigma)$, e $F_{obs}X$ a distribuição

de frequências relativas acumuladas observada da variável X , deseja-se testar $F_{obs}X = F_{esp}X$ contra a alternativa de que $F_{obs}X \neq F_{esp}X$. A estatística do teste é,

$$D_{cal} = \max\{|F_{esp}(X_i) - F_{obs}(X_i)|; |F_{esp}(X_i) - F_{obs}(X_{i-1})|\}, i = 1, \dots, n, \quad (3.1)$$

em que $F_{esp}(X_i)$ é a frequência relativa acumulada esperada na categoria i , $F_{obs}(X_i)$ é a frequência relativa acumulada observada na categoria i e $F_{obs}(X_{i-1})$ é a frequência relativa acumulada observada na categoria $i - 1$.

Quando se utiliza o teste de Kolmogorov-Smirnov estimando-se os parâmetros a partir de uma amostra em vez de inferir os verdadeiros valores da população, perde-se poder explicativo. Para resolver esse problema, Lilliefors (1967) efetuou uma correção ao teste de Kolmogorov-Smirnov (correção de Lilliefors), que deve ser utilizada para comparar a distribuição de frequência relativa acumulada observada com distribuição esperada ou teórica cujos parâmetros foram estimados a partir da amostra (MAROCO, 2007).

O procedimento para aplicação do teste é apresentado a seguir:

- i)* Fixar a hipótese nula H_0 e a hipótese alternativa H_1 . A hipótese nula H_0 afirma que a amostra provém de uma distribuição $N(\mu, \sigma)$. A hipótese alternativa H_1 afirma que a amostra não provém de uma distribuição $N(\mu, \sigma)$;
- ii)* Fixar o nível de significância α do teste;
- iii)* Calcular o valor real da estatística de Kolmogorov-Smirnov, conforme mostra a Equação (3.1);
- iv)* Decisão: se o valor da estatística pertencer à região crítica, isto é, $D_{cal} > D_c$, rejeita-se H_0 . Caso contrário, não rejeita-se H_0 . Os valores críticos da estatística de Kolmogorov-Smirnov encontram-se na Tabela 1 do anexo.

3.2.2 Transformação de Box-Cox

Uma das suposições mais frequentes em análise multivariada é que variáveis mensuráveis seguem distribuição normal. Mas o que fazer quando a hipótese de normalidade é rejeitada? Para tentar contornar esse problema pode-se realizar a transformação de

Box-Cox, que consiste em transformar os dados de acordo com a expressão,

$$y_{(\lambda)} = \frac{y^\lambda - 1}{\lambda}, \quad (3.2)$$

em que λ é o parâmetro a ser estimado dos dados, sendo que λ varia entre $(-1, 1)$.

Tabela 3.1 *Equação de Alguns Valores Transformados, para Determinados Valores de λ .*

λ	Equação
-1,0	$\frac{1}{y} + 1$
-0,5	$\frac{\frac{1}{\sqrt{y}} - 1}{-0,5}$
0,0	$\ln y$
0,5	$\frac{\sqrt{y} - 1}{0,5}$
1,0	y

Fonte: Oliveira *et al.* (1997).

3.2.3 Modelagem da Análise Fatorial

O desenvolvimento da AF resulta do trabalho de Charles Spearman, que, em 1904, publicou o texto intitulado “*General intelligence, objectively determined and measured*” (FÁ-VERO *et al.*, 2009). De maneira geral, Spearman (1904) mostra que o modelo de análise fatorial considera que p variáveis observáveis $(X_1, X_2, X_3, \dots, X_p)$, extraídas de uma população com vetor de média μ e matriz de covariância Σ , são linearmente dependentes de algumas variáveis não observáveis $F_1, F_2, F_3, \dots, F_m$, denominadas de fatores comuns, e de p fontes adicionais de variação $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots, \varepsilon_p$, denominadas de erros ou fatores específicos (JOHNSON; WICHERN, 2007). Assim, o modelo de análise fatorial é, portanto,

apresentado da seguinte forma,

$$\begin{aligned} X_1 &= \mu_1 + a_{11}F_1 + a_{12}F_2 + \dots + a_{1m}F_m + \varepsilon_1, \\ X_2 &= \mu_2 + a_{21}F_1 + a_{22}F_2 + \dots + a_{2m}F_m + \varepsilon_2, \\ &\vdots \\ X_p &= \mu_p + a_{p1}F_1 + a_{p2}F_2 + \dots + a_{pm}F_m + \varepsilon_p; \end{aligned} \quad (3.3)$$

em que o coeficiente a_{ij} é denominado de *loading* ou carga fatorial, e representa o peso da variável i no fator j , ou seja, o grau de correlação entre as variáveis originais e os fatores. Sem perda de generalidade, pode-se centrar e reduzir as variáveis X_i , efetuando a padronização de X como $z_i = \frac{(X_i - \mu_i)}{\sigma_i}$, e o modelo fatorial pode ser escrito, de uma forma genérica, conforme Fávero *et al.* (2009), como

$$X_i = a_{i1}F_1 + a_{i2}F_2 + \dots + a_{im}F_m + \varepsilon_i, \quad (i = 1, \dots, p). \quad (3.4)$$

Neste caso, X_i representa as variáveis padronizadas, a_{ij} as cargas fatoriais, F_m os fatores comuns e os ε_i os fatores específicos. Entretanto, de acordo com Maroco (2007), o modelo anterior assume as seguintes premissas:

- i)* Os fatores comuns (F_k) são independentes (ortogonais) e igualmente distribuídos, com média 0 e variância 1 ($k = 1, \dots, m$);
- ii)* Os fatores específicos (ε_i) são independentes e igualmente distribuídos, com média 0 e variância ψ_i ($i = 1, \dots, p$);
- iii)* F_k e ε_i são independentes.

O termo ψ_i representa a variância de (ε_i), ou seja, $Var(\varepsilon_i) = \psi_i$. Se as três premissas anteriores forem verificadas, considera-se o modelo como fatorial ortogonal, caso contrário, se F_k e ε_i estiverem correlacionados, o modelo fatorial será oblíquo. Os fatores podem ser estimados por combinação linear das variáveis, da seguinte forma:

$$\begin{aligned} F_1 &= d_{11}X_1 + d_{12}X_2 + \dots + d_{1m}X_i, \\ F_2 &= d_{21}X_1 + d_{22}X_2 + \dots + d_{2m}X_i, \\ &\vdots \\ F_m &= d_{m1}X_1 + d_{m2}X_2 + \dots + d_{mi}X_i; \end{aligned} \quad (3.5)$$

em que F_m são os fatores comuns, d_{mi} os coeficientes dos escores fatoriais e X_i as variáveis originais. O escore fatorial resulta da multiplicação dos coeficientes d_{mi} pelo valor das variáveis originais. Na existência de mais de um fator, o escore fatorial corresponderá às coordenadas da variável em relação aos eixos (fatores). Retornando à Equação (3.4), sua variância é dada por

$$\begin{aligned} Var(X_i) &= Var(a_{i1}F_1 + a_{i2}F_2 + \dots + a_{im}F_m + \varepsilon_i) = 1 \\ &= 1 = a_{i1}^2 Var(F_1) + a_{i2}^2 Var(F_2) + \dots + a_{im}^2 Var(F_m) + \psi_i \\ &= a_{i1}^2 + a_{i2}^2 + \dots + a_{im}^2 + \psi_i. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Portanto, observa-se que a variância de X_i pode ser decomposta em duas partes: comunalidade (h_i^2) e variância específica (ψ_i). Sendo a comunalidade ($h_i^2 = a_{i1}^2 + a_{i2}^2 + \dots + a_{im}^2$) uma estimativa de X_i que é explicada pelos fatores comuns; e ψ_i chamada de especificidade de X_i , pois não está ligada ao fator comum. Logo, a comunalidade é um índice da variabilidade total explicada por todos os fatores para cada variável (FÁVERO *et al.*, 2009). Assim:

$$Var(X_i) = h_i^2 + \psi_i, \quad (i = 1, 2, \dots, p). \quad (3.7)$$

Em notação matricial, o modelo fatorial apresentado por meio da Equação (3.3) pode ser expresso, de acordo com Maroco (2007), por

$$X - \mu = \Lambda F + \varepsilon, \quad (3.8)$$

em que,

$$(X - \mu)_{p \times 1} = \begin{bmatrix} X_1 - \mu_1 \\ X_2 - \mu_2 \\ \vdots \\ X_p - \mu_p \end{bmatrix} \text{ representa o vetor das } p \text{ variáveis padronizadas;} \quad (3.9)$$

$$F_{p \times 1} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_p \end{bmatrix} \text{ representa o vetor de fatores comuns;} \quad (3.10)$$

$$\varepsilon_{p \times 1} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_p \end{bmatrix} \text{ representa o vetor de fatores específicos;} \quad (3.11)$$

e

$$\Lambda_{p \times m} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{p1} & a_{p2} & \dots & a_{pm} \end{bmatrix} \text{ representa a matriz dos pesos fatoriais.} \quad (3.12)$$

3.2.4 Medidas de Ajuste do Modelo

Para que a utilização da AF seja adequada, o pesquisador, após ter verificado a normalidade e a linearidade dos dados, deve efetuar os seguintes passos: *(i)* analisar a matriz de correlação; *(ii)* realizar o teste do critério de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO); *(iii)* aplicar o teste de Bartlett e *(iv)* analisar a matriz anti-imagem.

i) Análise da Matriz de Correlações

Como a AF é baseada nas correlações entre as variáveis, deve-se avaliar a viabilidade da aplicação da técnica a partir da matriz de correlação, pois está mede a associação linear entre as variáveis X e Y , por meio do coeficiente de correlação de Pearson, obtido por

$$r_{xy} = \frac{\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n}}{\sqrt{\left[\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n} \right] \left[\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} \right]}}, \quad (3.13)$$

em que, $-1 \leq r \leq 1$, $r = -1$ indica relação linear negativa perfeita, e $r = 1$ indica relação linear positiva perfeita. Quando $r = 0$ indica que não há relação linear entre as variáveis.

Então, o primeiro passo é um exame visual das correlações, identificando as que são estatisticamente significativas. De acordo com Hair *et al.* (2005), se a inspeção visual não revela um número substancial de correlações maiores que 0,30, então a AF provavelmente

é inapropriada. Além disso, é de se esperar que as variáveis que apresentam alta correlação tendem a compartilhar o mesmo fator (FÁVERO *et al.*, 2009).

ii) Medida de Kaiser-Meyer-Olkin

De acordo com Maroco (2007) a estatística de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) é uma medida de homogeneidade das variáveis, que compara as correlações simples com as correlações parciais observadas entre as variáveis. Esta medida é obtida por

$$KMO = \frac{\sum_{i \neq j} \sum r_{ij}^2}{\sum_{i \neq j} \sum r_{ij}^2 + \sum_{i \neq j} \sum a_{ij}^2}, \quad (3.14)$$

em que, r_{ij} é o coeficiente de correlação entre variáveis a_{ij} é o coeficiente de correlação parcial.

A estatística KMO, cujos valores variam de 0 a 1, avalia a adequação da amostra quanto ao grau de correlação parcial entre as variáveis, que deve ser pequeno. Fávero *et al.* (2009) destaca que o valor de KMO próximo de 0 indica que a AF pode não ser adequada, pois existe uma correlação fraca entre as variáveis. Por outro lado, quanto mais próximo de 1 o seu valor, mais adequada é a utilização da técnica.

Apesar de não existir um teste rigoroso para os valores de KMO, de uma forma geral, estes podem ser adjetivados conforme a Tabela 3.2 (SHARMA, 1996; PESTANA; GAGEIRO, 2005; FÁVERO *et al.*, 2009).

Tabela 3.2 *Classificação da Aplicação da Análise Fatorial pela Estatística KMO.*

Valor de KMO	Recomendação à AF
0,90 – 1,00	Excelente
0,80 – 0,90	Boa
0,70 – 0,80	Média
0,60 – 0,70	Razoável
0,50 – 0,60	Mau mas ainda aceitável
0,00 – 0,50	Inaceitável

iii) Teste de Esfericidade de Bartlett

Outro modo de determinar a adequação da AF examina a matriz de correlação inteira. De acordo com Hair *et al.* (2005), o teste de esfericidade de Bartlett fornece a probabilidade estatística de que a matriz de correlação tenha correlações significantes entre pelo menos algumas variáveis.

Fávero *et al.* (2009) destaca que utiliza-se este teste com o intuito de avaliar a hipótese de que a matriz das correlações pode ser a matriz identidade (determinante igual a 1), conforme apresenta a Matriz (3.15).

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.15)$$

Se a matriz de correlações for igual à matriz identidade, isso significa que as inter-relações entre as variáveis são iguais a 0 e, neste caso, deve-se reconsiderar a utilização da análise fatorial. Assim, as hipóteses testadas são: H_0 : a matriz de correlações é uma matriz identidade contra H_1 : a matriz de correlações não é uma matriz identidade.

iv) Matriz Anti-imagem

A matriz de correlações anti-imagem contém os valores negativos das correlações parciais e é uma forma de obter indícios a cerca da necessidade de eliminação de determinada variável do modelo. Pode-se calcular uma Medida de Adequação da Amostra, ou Measure of Sampling Adequacy (MSA), para cada variável de forma similar à estatística KMO a partir de (FÁVERO *et al.*, 2009),

$$MSA = \frac{\sum_{i \neq j} r_{ij}^2}{\sum_{i \neq j} r_{ij}^2 \sum_{i \neq j} a_{ij}^2}, \quad (3.16)$$

em que, r_{ij} é o coeficiente de correlação entre variáveis a_{ij} é o coeficiente de correlação parcial.

Segundo Hair *et al.* (2005), o pesquisador deve primeiro analisar os valores do MSA

para cada variável individualmente e excluir as que se encontram no domínio inaceitável. Quanto maiores forem os valores do MSA, melhor será a utilização da AF. Cabe observar que, por vezes, a baixa correlação de determinada variável com as demais não necessariamente implica a sua eliminação, uma vez que esta variável pode representar um fator isoladamente.

3.2.5 Extração dos Fatores Iniciais

Nesta etapa, é determinado o número de fatores comuns necessários para descrever adequadamente os dados. Assim, as decisões devem ser tomadas com relação (i) ao método de extração dos fatores e (ii) ao número de fatores selecionados para representar a estrutura latente dos dados.

i) Método de Extração

Há, basicamente, dois métodos principais que podem ser utilizados para a obtenção de fatores: Análise de Componentes Principais (ACP) e Análise de Fatores Comuns (AFC).

Para Hair *et al.* (2005), a escolha do método de extração depende do objetivo do pesquisador. Assim, a ACP é usada quando o objetivo é resumir a maior parte da informação original (variância) a um número mínimo de fatores para propósito de previsão. Em contraste, a AFC é usada principalmente para identificar fatores ou dimensões latentes que reflitam o que as variáveis têm em comum.

A ACP considera a variância total dos dados, ao contrário da AFC, cujos fatores são estimados com base na variância comum. Conforme visto anteriormente, a variância pode ser decomposta em três termos: comum, específica e erro. A variância comum, também chamada de comunalidade, é aquela compartilhada entre as variáveis, a variância específica é aquela ligada à variável individual e o termo do erro representa a variância ligada a fatores aleatórios.

Além da ACP e AFC, Reis (2001) destaca os seguintes métodos:

a) Máxima verossimilhança: indicado quando se trata de uma amostra de indivíduos

retirados de uma população normal e se pretende explicar a estrutura latente da matriz de correlações;

- b) **Mínimos quadrados ordinários e generalizados (OLS e GLS):** objetivos semelhantes aos do método do Item (*a*);
- c) **Alpha:** parte do pressuposto de que as variáveis em estudo constituem uma amostra do universo de variáveis existentes e de que os indivíduos compõem toda a população.

ii) Critérios para o Número de Fatores a Extrair

Quando um grande conjunto de variáveis é transformado em fatores, o primeiro método extrai as combinações de variáveis que explicam o maior montante de variância possível e então segue para as combinações que explicam montantes cada vez menores de variância (HAIR *et al.*, 2005). Neste sentido, o pesquisador deve decidir quantos fatores reter, baseado nos seguintes critérios:

- a) **Critério da raiz latente (critério de Kaiser):** escolhe-se fatores que têm autovalores (*eigenvalues*) maiores que 1, isto é, todos os fatores com autovalores menores que 1 são considerados insignificantes e descartados. Os autovalores mostram a variância explicada por cada fator;
- b) **Critério *a priori*:** é um método simples, quando aplicado, o pesquisador já sabe quantos fatores extrair antes de empreender a análise fatorial;
- c) **Critério do gráfico Scree:** é utilizado para identificar o número ótimo de fatores que podem ser extraídos antes que a quantia de variância única comece a dominar a estrutura de variância comum;
- d) **Critério do percentual de variância:** consiste em escolher, como número de fatores, um número mínimo necessário para que o percentual de variância explicada alcance o nível satisfatório desejado, de acordo com o critério do pesquisador.

3.2.6 Rotação de Fatores

As soluções de fatores não-rotacionados extraem fatores na ordem de sua importância, o primeiro fator tende a ser um fator geral com quase toda a variável com carga signi-

ficante, e explica a quantia maior de variância; o segundo fator e os seguintes são então baseados na quantia residual de variância. Então, o efeito final de rotacionar a matriz fatorial é redistribuir a variância dos primeiros fatores para os últimos com o objetivo de atingir um padrão fatorial mais simples e teoricamente mais significativo (HAIR *et al.*, 2005).

Os métodos de rotação podem ser ortogonais ou oblíquos. Os métodos ortogonais produzem fatores que não estão correlacionados entre si, chamados de fatores ortogonais, sendo interpretados a partir de suas cargas (*loadings*). Na rotação oblíqua, os fatores estão correlacionados e, para a interpretação da solução, torna-se necessária a consideração simultânea das correlações e das cargas.

Para os métodos rotacionais ortogonais, merecem destaque o Varimax, o Quartimax e o Equamax, descritos a seguir, de acordo com Hair *et al.* (2005); Reis (2001) e Fávero *et al.* (2009).

i) Quartimax

Este método se concentra em rotacionar o fator inicial de modo que uma variável tenha carga alta em um fator e cargas tão baixas quanto possível em todos os outros fatores. Neste método, muitas variáveis podem ter carga alta no mesmo fator, pois o método busca minimizar o número de fatores necessários para explicar uma variável.

ii) Varimax

Este método busca minimizar o número de variáveis que têm altas cargas em um fator, assim para cada fator existe apenas alguns pesos significativos e todos os outros sejam próximos de zero.

iii) Equamax

Já este método congrega características dos métodos Quartimax e Varimax, ou seja, seu objetivo é simplificar linhas e colunas simultaneamente (simplificação dos fatores e das variáveis).

Os métodos de rotação oblíqua mais conhecidos são o Direct Oblimin e Promax, nesses métodos as comunalidades são preservadas, porém os fatores gerados apresentam-se mais

fortemente correlacionados. Vale destacar que a rotação não afeta a qualidade de ajuste do modelo fatorial, as communalidades e o total da variância explicada pelos fatores. Entretanto, o percentual de variância explicada em cada fator muda após rotação.

A Figura 3.1 apresenta o diagrama de decisão para melhor entendimento da aplicação da técnica análise fatorial.

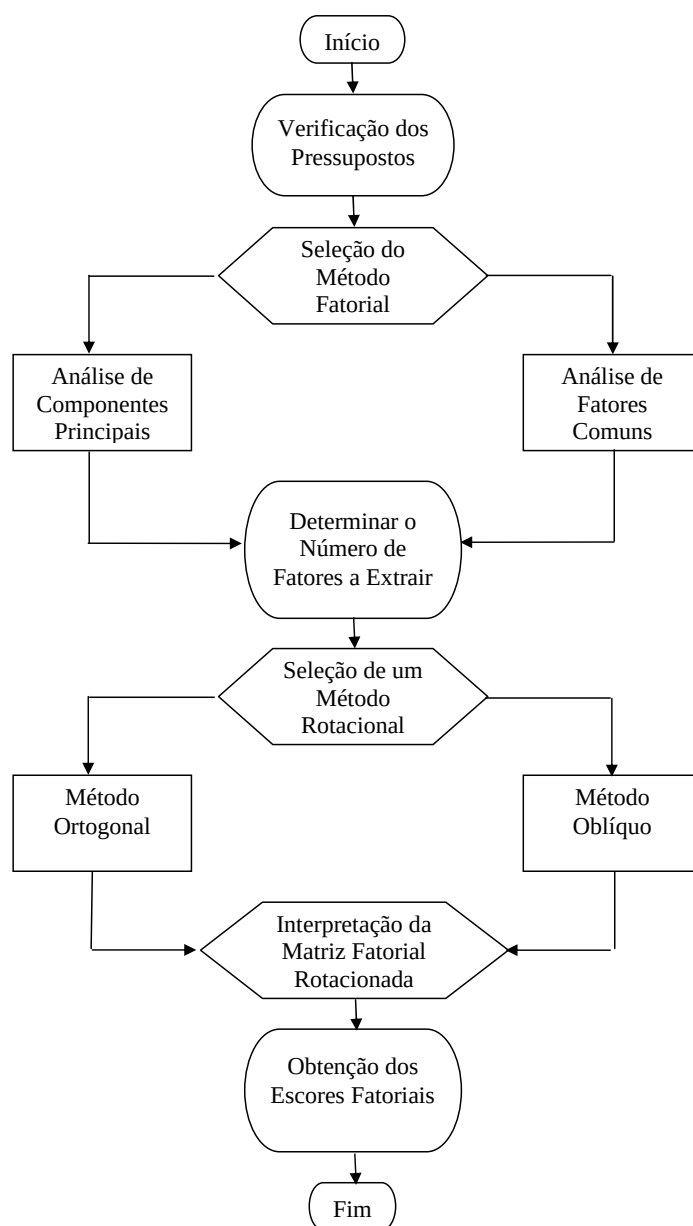


Figura 3.1 *Diagrama de Decisão para Aplicação da Análise Fatorial.*

3.3 Índice de Qualidade do Solo

O Índice de Qualidade do Solo (IQS) é definido como uma combinação dos escores fatoriais e a proporção da variância explicada por cada fator em relação a variância explicada por cada fator em relação a variância comum. Dessa forma, o IQS adaptado de Carvalho *et al.* (2007), é dado por,

$$IQS = \sum_{j=1}^q \left(\frac{\lambda_j}{\sum_j \lambda_j} F P_{ij} \right), \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (3.17)$$

em que λ_j é a variância explicada por cada fator, $\sum_j \lambda_j$ é a soma total da variância explicada pelo conjunto de fatores comuns e $F P_{ij}$ é o escore fatorial padronizado. O escore fatorial é padronizado para se obter valores positivos dos escores originais e permitir a classificação dos solos, uma vez que os valores do IQS estão situados entre zero e um. Podendo ser obtido pela seguinte fórmula,

$$F P_i = \left(\frac{F_i - F_{min}}{F_{max} - F_{min}} \right); \quad (3.18)$$

em que F_{min} e F_{max} são, respectivamente, os valores mínimo e máximo observados para os escores fatoriais associados aos solos.

Para facilitar a interpretação dos resultados, foram estabelecidos os seguintes intervalos de valores do IQS, agrupando os solos conforme seu grau de qualidade: valores do IQS igual ou superior a 0,70 são considerados bons; valores situados entre 0,35 e 0,69 são regulares; valores inferiores a 0,35 são considerados ruins (SANTANA, 2007).

3.4 Análise Discriminante

A análise discriminante (AD) é uma técnica multivariada utilizada quando a variável dependente é categórica, ou seja, qualitativa (não métrica) e as variáveis independentes são quantitativas (métricas).

O objetivo principal da AD é identificar as variáveis que discriminam os grupos e, assim, elaborar previsões a respeito de uma nova observação, identificando o grupo mais

adequado a que ela deverá pertencer, em função de suas características. Para alcançar esse objetivo, a AD gera funções discriminantes (combinações lineares das variáveis) que ampliam a discriminação dos grupos descritos pelas variáveis dependentes (FÁVERO *et al.*, 2009).

Quando o pesquisador estiver interessado em estudar somente dois grupos de variáveis dependentes, a técnica é chamada de Análise Discriminante Simples. No entanto, em muitos casos, há o interesse na discriminação entre mais de dois grupos, sendo a técnica, assim, denominada de Análise Discriminante Múltipla (MDA).

Os objetivos principais desses dois tipos de análises são parecidos: (i) identificar as variáveis que melhor discriminam dois ou mais grupos; (ii) utilizar estas variáveis para desenvolver funções discriminantes que representem as diferenças entre os grupos; (iii) fazer uso das funções discriminantes para o desenvolvimento de regras de classificação de futuras observações nos grupos.

3.4.1 Modelagem da Análise Discriminante

Antes de iniciar a modelagem da AD propriamente dita, é pertinente esclarecer os pressupostos inerentes a esta técnica. As suposições em AD, de acordo Hair *et al.* (2005) e Fávero *et al.* (2009), são:

- a) **Normalidade multivariada das variáveis explicativas:** a violação desse pressuposto poderá causar distorções nas avaliações do pesquisador.
- b) **Homogeneidade das Matrizes de variância e covariância:** este pressuposto é verificado por meio da estatística Box's M, que pode ser sensível ao tamanho da amostra.

A AD é uma técnica bastante robusta à violação desses pressupostos, desde que a dimensão do menor grupo seja superior ao número de variáveis em estudo e que as médias dos grupos não sejam proporcionais às suas variâncias. Além desses pressupostos, é pertinente ressaltar que a inexistência de *outliers*, a presença de linearidade das relações e a ausência de problemas relacionados a multicolinearidade das variáveis explicativas também são consideradas pressupostos da AD.

Hair *et al.* (2005), destaca que é essencial definir o tamanho correto da amostra que será estudada, já que esta técnica é muito sensível à proporção do tamanho da amostra em relação ao número de variáveis preditoras. Assim, como regra geral, utiliza-se no mínimo 20 observações para cada variável explicativa, mesmo que o número final das variáveis preditoras a serem incluídas no modelo seja reduzido (método *stepwise*).

Apresentados os pressupostos, pode-se começar os passos para a composição das funções discriminantes. Portanto, esta etapa consiste na seleção da variável dependente (categórica) e das variáveis explicativas (métricas). A AD permite o conhecimento das variáveis que mais se destacam na discriminação dos grupos, a partir de testes estatísticos, como o lambda de Wilks, a correlação canônica, o qui-quadrado e o *eigenvalue*.

O lambda de Wilks, que varia de 0 a 1, propicia a avaliação da existência de diferenças de médias entre os grupos para cada variável. Os valores elevados desta estatística indicam ausência de diferenças entre os grupos, e sua expressão é dada por

$$\Lambda = \frac{SQ_{dg}}{SQT}, \quad (3.19)$$

em que SQ_{dg} representa a soma dos erros (dentro dos grupos) e SQT , a soma dos quadrados total.

Com a seleção das variáveis discriminantes (explicativas) para formação dos grupos, o próximo passo é a identificação das funções discriminantes. Desta forma, a função geral discriminante pode ser representada pela seguinte equação linear,

$$Z_n = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n, \quad (3.20)$$

em que Z é a variável dependente, α é o intercepto, X_i são as variáveis explicativas e β_i são os coeficientes discriminantes para cada variável explicativa.

Fávero *et al.* (2009), afirmam que é importante ressaltar que esta função discriminante é diferente da função discriminante linear de Fisher, uma vez que, enquanto a primeira é utilizada como um meio de facilitar a interpretação dos parâmetros das variáveis explicativas, a função discriminante linear de Fisher é utilizada para classificar as observações nos grupos, assim os valores das variáveis explicativas de uma observação são inseridos nas funções de classificação e, conseqüentemente, um escore de classificação é calculado para cada grupo, para aquela observação.

Dadas as p variáveis e g grupos, é possível estabelecer $m = \min(g - 1; p)$ funções discriminantes que são combinações lineares das p variáveis, de modo que a função linear de Fisher seja dada por

$$Z_n = W_1X_1 + W_2X_2 + \dots + W_nX_n, \quad (3.21)$$

em que W_i representa o vetor de pesos das variáveis para as funções discriminantes e são estimados de modo que a variabilidade dos escores da função discriminante seja máxima entre os grupos e mínima dentro dos grupos (MAROCO, 2007).

Em termos matriciais, Sharma (1996) apresenta a função discriminante como,

$$\xi = X'\gamma, \quad (3.22)$$

em que $X'_{(p \times 1)}$ é a transposta da matriz com p variáveis e γ representa o vetor de pesos das variáveis. A soma dos quadrados totais dos escores ξ pode ser definido como $\xi'\xi = (X'\gamma)'(X'\gamma) = \gamma'XX'\gamma$, sendo $XX' = T$ a matriz da soma dos quadrados e produtos cruzados totais da matriz X com p variáveis.

Fazendo $T = B + W$, em que B e W representam, respectivamente, as matrizes das somas dos quadrados entre os grupos e dentro dos grupos, a soma dos quadrados totais para a função discriminante pode agora ser escrita como (MAROCO, 2007),

$$\xi'\xi = \gamma'T\gamma = \gamma'(B + W)\gamma = \gamma'B\gamma + \gamma'W\gamma. \quad (3.23)$$

Uma vez que $\gamma'B\gamma$ e $\gamma'W\gamma$ são, respectivamente, a soma dos quadrados entre os grupos e dentro dos grupos para a função ξ , a obtenção da função discriminante resume-se, segundo Maroco (2007), a encontrar o vetor γ , de modo que

$$\lambda = \frac{\gamma'B\gamma}{\gamma'W\gamma}, \quad (3.24)$$

seja máximo.

Sharma (1996) explica que o problema dessa maximização apresenta solução quando,

$$(W^{-1}B - \lambda I) = 0, \quad (3.25)$$

sob a restrição $|W^{-1}B - \lambda I| = 0$.

3.4.2 Cálculo do Escore de Corte

Após a função discriminante ser definida, será calculado o escore discriminante da variável dependente (Z) para cada observação, isto é, os escores serão calculados de maneira a propiciar a definição do escore crítico que determinará a forma por meio da qual será classificada uma observação em determinado grupo (FÁVERO *et al.*, 2009).

Segundo Hair *et al.* (2005), o escore de corte é o critério em relação ao qual o escore discriminante de cada objeto é comparado para determinar em qual grupo o objeto deve ser classificado. Para os grupos de mesma dimensão amostral (tamanho), o cálculo do escore de corte é

$$f = \frac{\bar{d}_1 + \bar{d}_2}{2}, \quad (3.26)$$

em que $\bar{d}_1$ e $\bar{d}_2$ representam as médias das funções discriminantes (centróides) nos grupos 1 e 2, respectivamente. Já para os grupos de tamanhos diferentes, têm-se

$$f = \frac{n_1 \bar{d}_1 + n_2 \bar{d}_2}{n_1 + n_2}, \quad (3.27)$$

em que n_1 e n_2 são os tamanhos dos grupos 1 e 2, respectivamente. Sharma (1996) destaca que o valor do corte selecionado é aquele que minimiza o número de classificação incorreta.

3.4.3 Métodos Computacionais: Simultâneo e *Stepwise*

Dois métodos computacionais podem ser utilizados para determinar uma função discriminante: o método simultâneo e o método *stepwise*. A estimação simultânea considera a inclusão de todas as variáveis explicativas conjuntamente no modelo, mesmo quando uma ou mais delas não forem significativas.

Já o procedimento *stepwise*, por outro lado, é utilizado quando o pesquisador deseja avaliar a significância estatística das variáveis por meio da inclusão passo a passo apenas das variáveis significantes. Este procedimento oferece diversos métodos de seleção (inclusão ou exclusão de variáveis) discriminantes na função discriminante e, entre eles, merecem destaque o método de lambda de Wilks, o D^2 de Mahalanobis, o Smallest F ratio (Razão F entre os grupos), o V de Rao e o método Unexplained Variance, que são descritos, conforme Maroco (2007), Sharma (1996) e Fávero *et al.* (2009), a seguir:

i) Lambda de Wilks

Esta estatística propicia a inclusão ou exclusão de variáveis de acordo com o seu valor lambda, podendo ser obtido conforme Equação (3.19).

ii) D^2 de Mahalanobis

Quando existem mais de dois grupos e as variáveis apresentam correlações significativas entre si, a inclusão da covariância ou correlação entre as variáveis na análise pode conduzir a uma maior separação entre os grupos. A distância de Mahalanobis entre duas variáveis i e j é

$$D = \sqrt{(X_i - X_j)'S^{-1}(X_i - X_j)}. \quad (3.28)$$

iii) Razão F entre os grupos

É a conversão da distância de Mahalanobis em uma razão F entre os grupos, sua expressão para dois grupos a e b é dada, por

$$F_{ab} = \frac{(n - p - g)n_a n_b}{p(n - p)(n_a - n_b)} D^2, \quad (3.29)$$

em que, n é a dimensão da amostra, p é o número total de variáveis explicativas e g é o número de grupos.

iv) V de Rao

Esta estatística é baseada na distância de Mahalanobis e busca maximizar a distância entre os centróides dos grupos e o centróide central, sendo obtida por

$$V = -(n - g) \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p w_{ij}^{-1} (t_{ij} - w_{ij}), \quad (3.30)$$

em que, w_{ij} e t_{ij} representam os elementos genéricos da matriz W e T , respectivamente. O uso do V de Rao, ao contrário do lambda de Wilks, não procura maximizar a homogeneidade dentro dos grupos, considerando somente a maximização da heterogeneidade entre os grupos.

v) Unexplained Variance

Este método adiciona somente as variáveis que minimizam a soma da variação não explicada entre os grupos.

A Figura 3.2 apresenta o diagrama de decisão para melhor entendimento da aplicação da técnica análise discriminante.

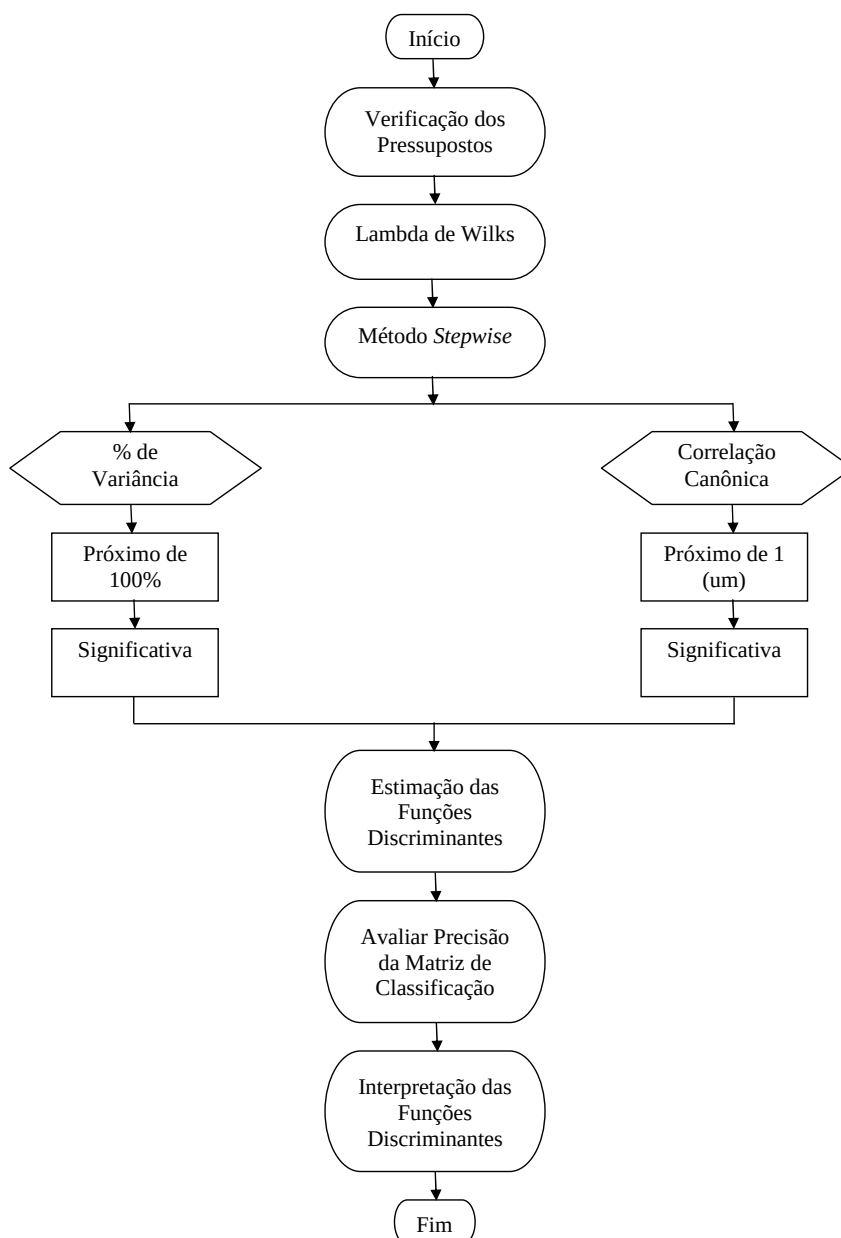


Figura 3.2 *Diagrama de Decisão para Aplicação da Técnica Análise Discriminante.*

Capítulo 4

Resultados

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação das técnicas apresentadas no Capítulo 3. Inicialmente na Seção 4.1 é mostrada a descrição dos dados. Na Seção 4.2 pode-se observar os resultados da análise fatorial aplicada aos dados de atributos químicos e físicos do solo, para profundidade de 0 – 5 cm, enquanto que a Seção 4.3 mostra os resultados da análise fatorial aplicada aos dados de atributos químicos e físicos do solo, para profundidade de 25 – 30 cm. As Seções 4.4 e 4.5 apresentam a construção dos índices de qualidade do solo baseados nos dados de atributos químicos e físicos do solo, para profundidade de 0 – 5 cm e 25 – 30 cm, respectivamente. Já as Seções 4.6 e 4.7 apresentam a aplicação da análise discriminante aos dados de atributos químicos e físicos do solo, para profundidade de 0 – 5 cm e 25 – 30 cm, respectivamente.

4.1 Dados

Os dados foram coletados, no ano de 2009, na fazenda Barindaua situada no município de Mojú, região nordeste do estado do Pará, conforme pode ser visto na Figura 4.1. As coordenadas geográficas da área são 02°48'34" de latitude Sul e 49°27'02" de longitude Oeste de Greenwich. O relevo é plano a suave ondulado.

De forma geral o solo da área em estudo foi classificado como latossolo amarelo distrófico, apresentando textura média. O clima está incluído ao tipo Ami, da classificação de Köppen. A temperatura média anual é de 26 °C, a precipitação pluviométrica média anual é em torno de 2.202 mm, sendo o mês abril, mês considerado como o de maior pluviosidade, e novembro, o menos chuvoso, tendo umidade relativa do ar acima de 80%.

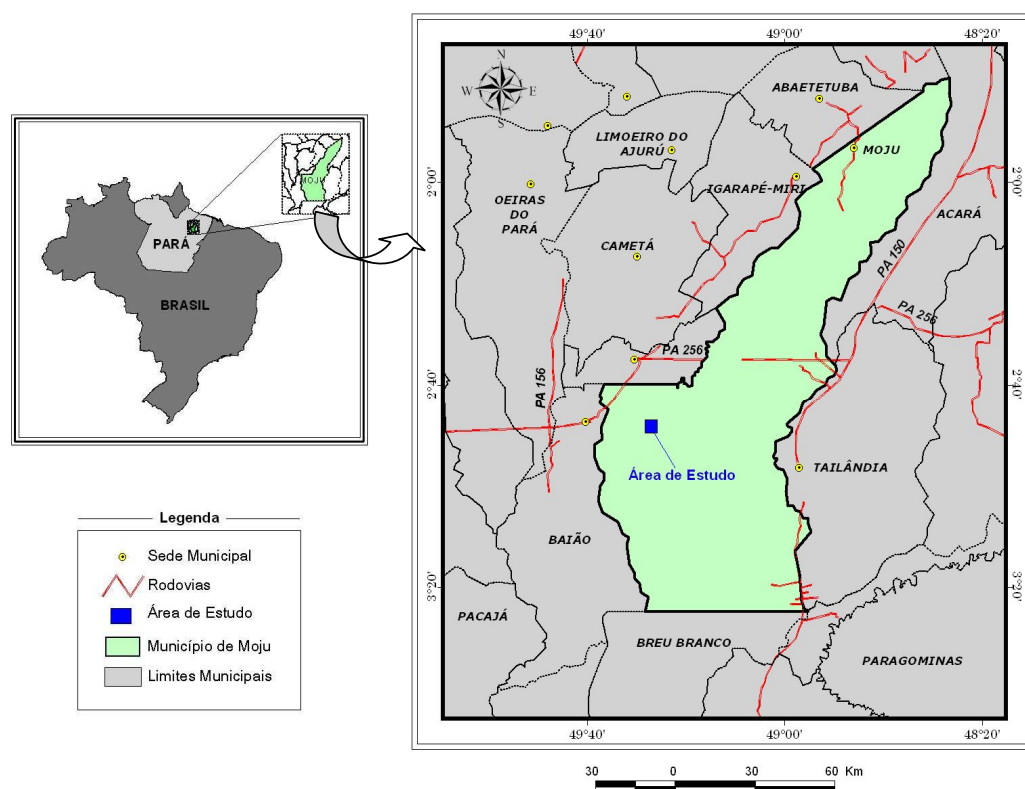


Figura 4.1 *Localização da Fazenda Barindaua no Município de Moju, Estado do Pará.*

O estudo é desenvolvido em uma área particular de plantio de Açaí, e o sistema avaliado foi uma parcela com açaizeiros irrigados (AIR), com quatro anos de idade, de terra firme, cultivar BRS-Pará. Esta parcela demarca um total de 10,8 ha (260 x 415 m) e 6.800 plantas, contendo 68 linhas, onde cada linha possui 100 plantas com espaçamento de 4,0 m entre plantas e 4,0 m entre linhas, onde foram distribuídos aleatoriamente 48 pontos amostrais nas entrelinhas dos açaizeiros, conforme mostra a Figura 4.2, sendo que 3 observações foram consideradas perdidas durante análise no laboratório. Em cada ponto amostral, os dados foram coletados em duas profundidades, isto é, o solo foi coletado na profundidade de 0 – 5 cm (superfície) e na profundidade de 25 – 30 cm.

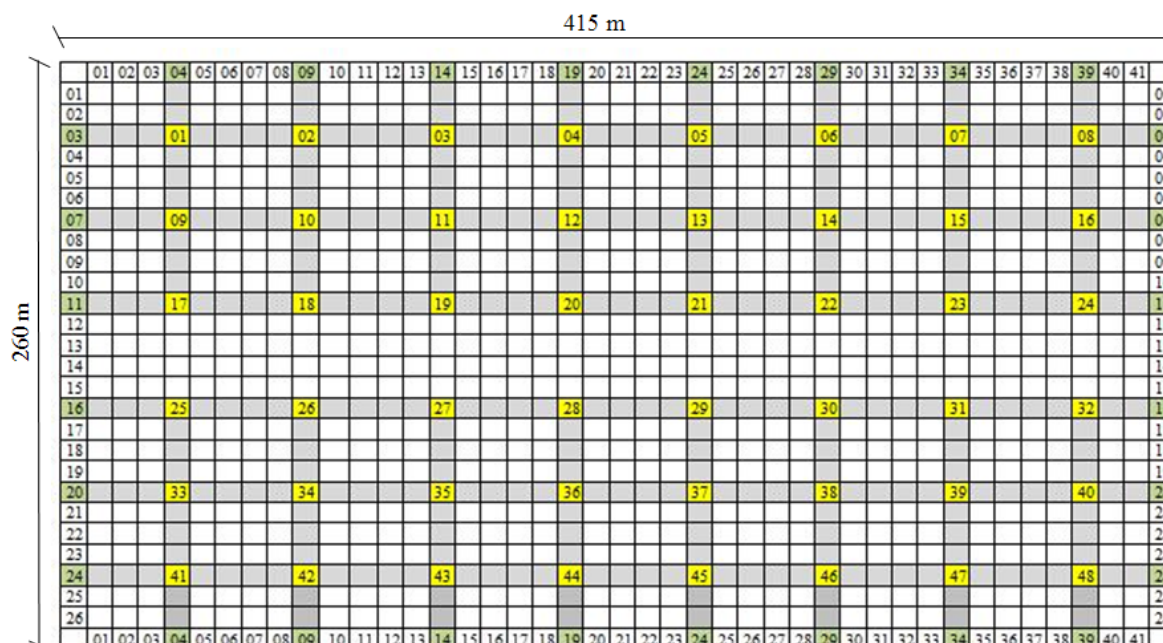


Figura 4.2 *Desenho do Plano Amostral para a Coleta de Solos na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009.*

Para a análise estatística multivariada foram utilizados os seguintes atributos: **i) Químicos:** potencial hidrogeniônico (pH), matéria orgânica (MO), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al), acidez potencial (H+Al) e saturação de bases (V); **ii) Físicos:** areia, argila, silte, densidade (Ds), resistência a penetração (RP), umidade volumétrica (UV), porosidade total (ptotal), macroporosidade (macro) e microporosidade (micro).

Na aplicação das técnicas estatísticas multivariadas utilizadas neste trabalho, é necessário que o pressuposto de que dados provêm de uma distribuição normal seja atendido, para isso foi necessário realizar algumas transformações nos valores de alguns atributos químicos e físicos em estudo, conforme pode ser visto na Tabela 4.1. Dessa maneira, após as devidas transformações realizadas pode-se verificar que todos os atributos apresentaram normalidade nos seus dados, estes resultados serão apresentados nas próximas seções.

Tabela 4.1 *Transformações Utilizadas para Normalização dos Dados de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, por Tipo de Atributos e Profundidade.*

Tipo de Atributo	Atributo	Unidade	Profundidade (cm)	
			0 - 5	25 - 30
Químico	Potencial Hidrogeniônico (pH)		-	$(\text{Log}_{10} \text{ pH})^{0,5*}$
	Matéria Orgânica (MO)	g/kg^{-1}	$\frac{MO-\bar{X}}{S} = \frac{MO-28,36}{12,81}$	$\text{Log}_{10} \text{ MO}$
	Fósforo (P)	mg/dm^{-3}	$\text{Log}_{10}(P^{0,5*})$	$\text{Log}_{10} P$
	Potássio (K)	$cmolc/dm^{-3}$	$\text{Log}_{10} K$	$ \text{Log}_{10} K $
	Cálcio (Ca)	$cmolc/dm^{-3}$	-	$\text{Log}_{10} Ca$
	Magnésio (Mg)	$cmolc/dm^{-3}$	$\text{Log}_{10} Mg$	$Mg^{0,5*}$
	Alumínio (Al)	$cmolc/dm^{-3}$	-	-
	Acidez Potencial (H+Al)	$cmolc/dm^{-3}$	-	-
Físico	Saturação de Bases (V)	%	-	$\text{Log}_{10} V$
	Areia	%	$\text{Log}_{10} \text{ Areia}$	-
	Argila	%	$\text{Log}_{10} \text{ Argila}$	-
	Silte	%	-	-
	Densidade (Ds)	g/cm^{-3}	$\text{Log}_{10} Ds$	-
	Resistência a Penetração (RP)	Mpa	$\text{Log}_{10} RP$	$RP^{0,5*}$
	Umidade Volumétrica (UV)	cm^3/cm^{-3}	UV^2	$UV^{-0,5*}$
	Porosidade Total (ptotal)	cm^3/cm^{-3}	$ \text{Log}_{10} P_{total} $	-
	Macroporosidade (macro)	cm^3/cm^{-3}	-	$\text{Log}_{10} \text{ Macro}$
	Microporosidade (micro)	cm^3/cm^{-3}	$Micro^2$	-

Nota: (*) Aplicação da Transformação Box-Cox (OLIVEIRA *et al.*, 1997), (-) Não foi preciso aplicar nenhuma transformação, pois os valores originais dos atributos apresentam distribuição normal.

4.2 Análise Fatorial - Superfície do Solo (0 - 5 cm)

Para a utilização da análise fatorial, inicialmente deve-se verificar a existência de *outliers* (valores discrepantes) e se os dados apresentam distribuição viesada (FÁVERO *et al.*, 2009). Entretanto, os *softwares* estatísticos não dispõem de um teste estatístico para avaliar a normalidade multivariada, mas apenas univariada. Porém, Hair *et al.* (2005) afirmam que apesar de a normalidade univariada não garantir a normalidade multivariada, se todas as variáveis atendem a essa condição, então quaisquer desvios da normalidade multivariada geralmente são inócuos.

A Tabela 4.2 apresenta os resultados do teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov para os dados (transformados) dos atributos químicos e físicos de solos coletados na fazenda Barindaua, no ano de 2009, para a profundidade de 0 – 5 cm. As hipóteses testadas são: H_0 : O atributo é normalmente distribuído e H_1 : O atributo não é normalmente distribuído. Nela, observa-se que todos os atributos químicos e físicos apresentam distribuição normal ($p > 0,05$), para um nível de significância de 5%.

Tabela 4.2 *Resultados do Teste de Normalidade de Kolmogorov-Smirnov para os Dados (Transformados) de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaia, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.*

Tipo	Atributo	Estatística	<i>p</i>	Resultado
Químico	Potencial Hidrogeniônico (pH)	0,10	0,20	Normal
	Matéria Orgânica (MO)	0,07	0,20	Normal
	Fósforo (P)	0,13	0,07	Normal
	Potássio (K)	0,08	0,20	Normal
	Cálcio (Ca)	0,12	0,08	Normal
	Magnésio (Mg)	0,10	0,20	Normal
	Alumínio (Al)	0,13	0,07	Normal
	Acidez Potencial (H+Al)	0,12	0,09	Normal
	Saturação de Bases (V)	0,12	0,16	Normal
Físico	Areia	0,11	> 0,15	Normal
	Argila	0,11	0,19	Normal
	Silte	0,08	0,20	Normal
	Densidade (Ds)	0,11	0,15	Normal
	Resistência a Penetração (RP)	0,11	0,20	Normal
	Umidade Volumétrica (UV)	0,11	0,17	Normal
	Porosidade Total (ptotal)	0,09	> 0,15	Normal
	Macroporosidade (macro)	0,07	0,20	Normal
	Microporosidade (micro)	0,11	> 0,15	Normal

Após verificar o comportamento das distribuições dos atributos químicos e físicos que, aparentemente, seguem distribuição normal multivariada, a próxima etapa consiste na geração da matriz de correlações. Assim inicialmente gerou-se a matriz de correlações com todos os atributos, onde pôde-se verificar em relação aos atributos químicos, que matéria orgânica e magnésio não apresentam correlações significativas com os demais atributos químicos, assim optou-se por eliminar esses atributos da análise fatorial. O mesmo ocorreu

com os atributos físicos silte e resistência a penetração, pois não apresentam correlações significativas com os demais atributos físicos. Logo, por meio da matriz de correlações da Tabela 4.3, pode-se observar a existência de um considerável número de correlações com valores absolutos superiores a 0,30, o que permite dar continuidade à aplicação da técnica análise fatorial.

Tabela 4.3 *Matriz de Correlações de Pearson para os Dados de Atributos Químicos e Físicos, de Solos Coletados na Fazenda Barindaú, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.*

		pH	P	K	Ca	Al	H+Al	V
Químico	pH	1,00						
	P	0,50	1,00					
	K	0,45	0,54	1,00				
	Ca	0,90	0,56	0,40	1,00			
	Al	-0,74	-0,24	-0,29	-0,70	1,00		
	H+Al	-0,73	-0,21	-0,10	-0,65	0,66	1,00	
	V	0,89	0,44	0,32	0,89	-0,72	-0,87	1,00
		Areia	Argila	Ds	UV	ptotal	macro	micro
Físico	Areia	1,00						
	Argila	-0,89	1,00					
	Ds	-0,02	0,07	1,00				
	UV	-0,16	0,12	-0,16	1,00			
	ptotal	0,00	0,03	0,98	-0,12	1,00		
	macro	0,25	-0,26	-0,65	-0,42	-0,62	1,00	
	micro	-0,25	0,21	-0,46	0,68	0,00	-0,38	1,00

Nota: pH = potencial hidrogeniônico, P = fósforo, K = potássio, Al = alumínio, Ca = cálcio,

H+Al = acidez potencial, V = saturação de bases, Ds = densidade, UV = umidade volumétrica,

ptotal = porosidade total, macro = macroporosidade e micro = microporosidade.

Na Tabela 4.4 são apresentados os resultados da estatística de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) e do teste de esfericidade de Bartlett. Este último é utilizado com o objetivo

de verificar a hipótese de a matriz de correlações ser a matriz identidade. Enquanto que a estatística KMO, que varia entre 0 e 1, compara as correlações simples com as parciais observadas entre os atributos. Assim, a partir da Tabela 4.4 pode-se verificar que o valor da estatística KMO dos atributos químicos (0,79) e físicos (0,54), indica a adequação da amostra a análise fatorial. Além disso, o nível de significância do teste de esfericidade de Bartlett ($p = 0,00$) conduz a rejeição da hipótese de a matriz de correlações ser a matriz identidade. Estes resultados respaldam o emprego da análise fatorial para a extração de fatores e a estimação dos escores fatoriais.

Tabela 4.4 *Resultados da Medida de Kaiser-Meyer-Olkin e do Teste de Esfericidade de Bartlett para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.*

Tipo	Medida	Valor
Químico	KMO	0,79
	Teste de Esfericidade de Bartlett	χ^2 289,94
		p 0,00
Físico	KMO	0,54
	Teste de Esfericidade de Bartlett	χ^2 426,17
		p 0,00

A matriz anti-imagem de correlações apresenta os valores negativos das correlações parciais entre os atributos. Neste tipo de matriz, os valores da diagonal principal também representam uma medida de adequação dos dados à análise fatorial, conhecida por Medida de Adequação da Amostra (MSA), para cada variável em análise. Então, com base na Tabela 4.5, pode-se observar que o MSA é superior a 0,50 para todos os atributos químicos, isto é, os valores do MSA para cada atributo químico individualmente encontram-se em domínio aceitável para aplicação da técnica. Já em relação aos atributos físicos, macroporosidade e microporosidade apresentam o resultado de 0,44 e 0,42, respectivamente. Entretanto, a decisão de eliminação destes atributos não será tomada agora, uma vez que eles podem apresentar elevados valores de comunalidades e de cargas fatoriais.

Tabela 4.5 *Matriz de Correlações Anti-imagem para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.*

		pH	P	K	Ca	Al	H+Al	V
Químico	pH	0,90 ^a						
	P	0,00	0,79 ^a					
	K	-0,30	-0,39	0,69 ^a				
	Ca	-0,40	-0,31	0,19	0,77 ^a			
	Al	0,21	-0,24	0,12	0,21	0,91 ^a		
	H+Al	0,09	-0,04	-0,28	-0,45	-0,20	0,70 ^a	
	V	-0,21	0,00	-0,11	-0,58	-0,07	0,77	0,76 ^a
		Areia	Argila	Ds	UV	ptotal	macro	micro
Físico	Areia	0,53 ^a						
	Argila	0,88	0,52 ^a					
	Ds	-0,18	-0,18	0,51 ^a				
	UV	-0,01	0,00	0,19	0,80 ^a			
	ptotal	0,14	0,22	-0,51	-0,35	0,77 ^a		
	macro	-0,11	-0,04	0,80	0,02	0,10	0,44 ^a	
	micro	-0,08	-0,04	0,75	-0,15	0,16	0,97	0,42 ^a

Nota: (^a) Medida de Adequação da Amostra; pH = potencial hidrogeniônico, P = fósforo,

K = potássio, Ca = cálcio, Al = alumínio, H+Al = acidez potencial, V = saturação de bases.

(^a) Medida de Adequação da Amostra; Ds = densidade, UV = umidade volumétrica,

ptotal = porosidade total, macro = macroporosidade e micro = microporosidade.

Após verificar a adequação da amostra à análise fatorial, o próximo passo é obter o número de fatores a reter para análise dos dados. Para isto, utilizou-se o critério da raiz latente (critério de Kaiser), que escolhe o número de fatores a reter, em função do número de autovalores acima de 1. Os autovalores iniciais e rotacionados para cada fator, bem como os respectivos percentuais de variância explicada, são apresentados na Tabela 4.6. Com base na regra de retenção de fatores com valores superior a 1, para os atributos

químicos foram retidos dois fatores que conseguem explicar 82,73% da variância. E para os atributos físicos foram retidos três fatores que conseguem explicar 93,25% da variância dos dados originais.

Tabela 4.6 *Autovalor e Percentual de Variância Explicada pelos Fatores para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaú, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.*

Tipo	Compo- nente	Variância Inicial			Variância após Rotação		
		Total	% Variância	% Acum.	Total	% Variância	% Acum.
Químico	1	4,54	64,89	64,89	3,87	55,28	55,28
	2	1,25	17,84	82,73	1,92	27,46	82,73
	3	0,52	7,41	90,14			
	4	0,32	4,63	94,77			
	5	0,23	3,35	98,12			
	6	0,09	1,30	99,42			
	7	0,04	0,58	100,00			
Físico	1	2,64	37,78	37,78	2,59	36,93	36,93
	2	2,44	34,91	72,69	2,02	28,79	65,72
	3	1,44	20,56	93,25	1,93	27,53	93,25
	4	0,34	4,85	98,10			
	5	0,11	1,59	99,69			
	6	0,02	0,24	99,93			
	7	0,01	0,07	100,00			

Nota: Método de Extração: Componente Principal; % Acum. = % Acumulado.

A solução fatorial resultante para um fator não-rotacionado não necessariamente fornece um padrão significativo de cargas fatoriais dos atributos. Por isso, é desejável empregar o método de rotação dos fatores com o objetivo de extremar os valores das cargas, de modo que cada variável se associe a um fator (HAIR *et al.*, 2005).

A matriz das cargas fatoriais rotacionadas dos atributos químicos e físicos é apresentada

na Tabela 4.7, nela as primeiras colunas referem-se as cargas fatoriais para cada atributo em cada fator. A última coluna fornece o valor das comunalidades, indicando o quanto da variância de cada atributo é explicada pelos fatores juntos, observe que todos os atributos químicos e físicos possuem forte relação com os fatores retidos, pois têm elevadas comunalidades.

Os autovalores indicam a importância relativa de cada fator na explicação da variância associada ao conjunto de atributos analisados. A solução fatorial extrai os fatores na ordem de sua importância, isto é, para os atributos químicos o Fator 1 explica a maior parcela de variância, com 55,28% e o Fator 2 explica 27,46%. Assim, 82,73% da variância total são representados pela informação contida na matriz fatorial em termos de 2 fatores.

A escolha dos atributos que compõem cada um dos fatores ocorre observando-se as cargas fatoriais de cada atributo, da esquerda para direita e ao longo de cada linha, selecionando-se a carga fatorial de maior valor absoluto. Logo, adotando este processo, em relação aos atributos químicos o Fator 1 tem cinco cargas significativas e o Fator 2, duas. O primeiro fator, denominado de **Acidez da Solução do Solo**, englobou os seguintes atributos: saturação de bases, acidez potencial, potencial hidrogeniônico, alumínio e cálcio. Todos os atributos, com exceção de acidez potencial e alumínio, apresentam relação positiva com este fator, indicando que mudanças positivas em cada um desses atributos se refletem em aumento na qualidade do solo. Ao segundo fator foram associados os atributos fósforo e potássio, este fator, chamado de **Macronutrientes**, explica 27,46% da variância total dos dados, ambos os atributos estão relacionados positivamente com este fator.

Já em relação aos atributos físicos, o Fator 1 tem três cargas significativas, o Fator 2 possui duas e o Fator 3, também tem duas cargas significativas, conforme pode ser visto na Tabela 4.7. O primeiro fator, denominado de **Aeração do Solo**, englobou os seguintes atributos: densidade, porosidade total e macroporosidade. Todos os atributos, com exceção de macroporosidade, apresentam relação positiva com este fator, indicando que mudanças positivas em cada um desses atributos físicos se refletem em aumento na qualidade do solo.

Também em relação aos atributos físicos, ao segundo fator foram associados os atributos umidade volumétrica e microporosidade, este fator, chamado de **Umidade do Solo**,

explica 28,79% da variância total dos dados, em que ambos os atributos estão relacionados positivamente com ele. Já o terceiro fator denominado de **Granulometria**, foi definido pelos atributos argila e areia, este fator explica 27,53% da variância total dos dados e possui relação positiva com o atributo argila e negativa com o atributo areia.

Tabela 4.7 *Matriz de Cargas Fatoriais após Rotação Ortogonal pelo Método Varimax para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.*

Tipo	Atributo	Fator			Comunalidade
		1	2	3	
Químico	Saturação de Bases (V)	0,93	0,26		0,94
	Acidez Potencial (H+Al)	-0,92	0,04		0,84
	Potencial Hidrogeniônico (pH)	0,86	0,42		0,91
	Alumínio (Al)	-0,83	-0,14		0,71
	Cálcio (Ca)	0,82	0,44		0,87
	Fósforo (P)	0,22	0,84		0,76
	Potássio (K)	0,11	0,87		0,76
	Autovalor	3,87	1,92		5,79
	% de Variância	55,28	27,46		82,73
Físico	Densidade (Ds)	0,98	-0,20	0,03	0,99
	Porosidade Total (ptotal)	0,97	-0,19	-0,01	0,98
	Macroporosidade (macro)	-0,77	-0,56	-0,18	0,94
	Argila	0,06	0,08	0,97	0,94
	Umidade Volumétrica (UV)	0,01	0,90	0,04	0,81
	Areia	-0,03	-0,12	-0,96	0,94
	Microporosidade (micro)	-0,29	0,90	0,17	0,91
	Autovalor	2,59	2,02	1,93	6,51
	% de Variância	36,93	28,79	27,53	93,25

O escore fatorial é uma medida composta criada para cada variável observável sobre cada fator extraído na análise fatorial. Os pesos fatoriais são usados em combinação com os valores da variável original para calcular o escore de cada variável (CARVALHO *et al.*, 2007). A análise dos escores fatoriais serve para representar os fatores em análises subsequentes. Por isso, os escores fatoriais são padronizados para que tenham média zero e desvio padrão um (VELICER; JACKSON, 1990).

A Tabela 4.8 fornece os coeficientes dos escores fatoriais para cada fator em relação aos atributos químicos e físicos. Fazendo-se uso dos coeficientes desta tabela e da Equação (3.5), pode-se gerar os escores fatoriais para cada observação da amostra.

Tabela 4.8 *Matriz de Coeficientes de Regressão dos Escores Fatoriais Após a Aplicação da Rotação via o Método Varimax para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaú, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.*

Tipo	Atributo	Fator		
		1	2	3
Químico	Potencial Hidrogeniônico (pH)	0,19	0,08	
	Fósforo (P)	-0,12	0,52	
	Potássio (K)	-0,17	0,57	
	Cálcio (Ca)	0,17	0,11	
	Alumínio (Al)	-0,25	0,10	
	Acidez Potencial (H+Al)	-0,32	0,24	
	Saturação de Bases (V)	0,26	-0,04	
Físico	Areia	0,03	0,07	-0,52
	Argila	-0,02	-0,09	0,53
	Densidade (Ds)	0,37	-0,06	-0,01
	Umidade Volumétrica (UV)	0,05	0,47	-0,10
	Porosidade Total (ptotal)	0,38	-0,05	-0,03
	Macroporosidade (macro)	-0,32	-0,31	0,01
	Microporosidade (micro)	-0,08	0,44	-0,01

Assim, os escores fatoriais podem ser obtidos, por

i) Atributos Químicos

$$\text{Acidez da Solução do Solo} = 0,19pH - 0,12P - 0,17K + 0,17Ca - 0,25Al - 0,32(H + Al) + 0,26V;$$

$$\text{Macronutrientes} = 0,08pH + 0,52P + 0,57K + 0,11Ca - 0,10Al + 0,24(H + Al) - 0,04V.$$

ii) Atributos Físicos

$$\text{Aeração do Solo} = 0,03areia - 0,02argila + 0,37Ds + 0,05UV + 0,38ptotal - 0,32macro - 0,08micro;$$

$$\text{Umidade do Solo} = 0,07areia - 0,09argila - 0,06Ds + 0,47UV - 0,05ptotal - 0,31macro + 0,44micro;$$

$$\text{Granulometria} = -0,52areia + 0,53argila - 0,01Ds - 0,10UV - 0,03ptotal + 0,01macro - 0,01micro.$$

4.3 Análise Fatorial - Profundidade do Solo (25 - 30 cm)

A Tabela 4.9 apresenta os resultados do teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov para os dados (transformados) dos atributos químicos e físicos de solos coletados na fazenda Barindaua, no ano de 2009, para a profundidade de 25 – 30 cm. As hipóteses testadas são: H_0 : O atributo é normalmente distribuído e H_1 : O atributo não é normalmente distribuído. Nela, observa-se que todos os atributos químicos e físicos possuem distribuição normal ($p > 0,05$), para um nível de significância de 5%.

Tabela 4.9 *Resultados do Teste de Normalidade de Kolmogorov-Smirnov para os Dados (Transformados) de Atributos Químicos e Físicos de Solos, Coletados na Fazenda Barindaia, para a Profundidade de 25 – 30 cm.*

Tipo	Atributo	Estatística	p	Resultado
Químico	Potencial Hidrogeniônico (pH)	0,09	$> 0,150$	Normal
	Matéria Orgânica (MO)	0,10	0,20	Normal
	Fósforo (P)	0,09	0,20	Normal
	Potássio (K)	0,11	0,20	Normal
	Cálcio (Ca)	0,12	0,16	Normal
	Magnésio (Mg)	0,12	0,09	Normal
	Alumínio (Al)	0,11	0,20	Normal
	Acidez Potencial (H+Al)	0,11	0,15	Normal
	Saturação de Bases (V)	0,07	0,20	Normal
Físico	Areia	0,10	0,20	Normal
	Argila	0,13	0,07	Normal
	Silte	0,12	0,12	Normal
	Densidade (Ds)	0,09	0,20	Normal
	Resistência a Penetração (RP)	0,13	0,08	Normal
	Umidade Volumétrica (UV)	0,12	0,11	Normal
	Porosidade Total (ptotal)	0,09	0,20	Normal
	Macroporosidade (macro)	0,11	0,20	Normal
	Microporosidade (micro)	0,06	0,20	Normal

Como já visto anteriormente, inicialmente gerou-se a matriz de correlações com todos os atributos, onde pôde-se verificar em relação aos atributos químicos que matéria orgânica e fósforo não apresentam correlações significativas com os demais atributos químicos. Além disso, em relação aos atributos físicos, pôde-se verificar que silte e resistência a penetração também não apresentam correlações significativas com os demais atributos físicos. Assim

optou-se por eliminar esses atributos da análise fatorial. Logo, por meio da matriz de correlações da Tabela 4.10, pode-se observar a existência de um considerável número de correlações com valores absolutos superiores a 0,30, o que permite dar continuidade à aplicação da técnica.

Tabela 4.10 *Matriz de Correlações de Pearson para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaú, para a Profundidade de 25 – 30 cm.*

		pH	K	Ca	Mg	Al	H+Al	V
Químico	pH	1,00						
	K	-0,32	1,00					
	Ca	0,84	-0,31	1,00				
	Mg	0,02	-0,15	-0,02	1,00			
	Al	-0,89	0,24	-0,88	-0,10	1,00		
	H+Al	-0,72	0,08	-0,62	-0,08	0,79	1,00	
	V	0,82	-0,41	0,87	0,30	-0,88	-0,74	1,00
		Areia	Argila	Ds	UV	ptotal	macro	micro
Físico	Areia	1,00						
	Argila	-0,78	1,00					
	Ds	0,21	-0,09	1,00				
	UV	0,14	-0,19	-0,44	1,00			
	ptotal	-0,21	0,09	-1,00	0,44	1,00		
	macro	-0,01	-0,11	-0,89	0,63	0,89	1,00	
	micro	-0,19	0,18	0,36	-0,67	-0,36	-0,66	1,00

Nota: pH = potencial hidrogeniônico, K = potássio, Ca = cálcio, Mg = Magnésio, Al = alumínio,

H+Al = acidez potencial, V = saturação de bases, Ds = densidade, UV = umidade volumétrica,

ptotal = porosidade total, macro = macroporosidade e micro = microporosidade.

A aplicação da análise fatorial iniciou levando-se em consideração todos os atributos apresentados na matriz de correlações da Tabela 4.10, porém o atributo químico potássio e o atributo físico densidade apresentaram baixo valor da estatística MSA, assim como

baixo valor de comunalidade, daí optou-se o retirar esses atributos da aplicação da análise fatorial e realizar novos cálculos.

A partir da Tabela 4.11 pode-se verificar que o valor da estatística Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) é de 0,73 em relação aos atributos químicos e 0,54 em relação aos atributos físicos, indicando a adequação da amostra a análise fatorial. O nível de significância do teste de esfericidade de Bartlett ($p = 0,00$) para os atributos químicos e físicos conduz a rejeição da hipótese de a matriz de correlações ser a matriz identidade, evidenciando, portanto que há correlações entre as variáveis.

Tabela 4.11 *Resultados da Medida de Kaiser-Meyer-Olkin e do Teste de Esfericidade de Bartlett para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, para a Profundidade de 25 – 30 cm.*

Tipo	Medida	Valor
Químico	KMO	0,73
	Teste de Esfericidade de Bartlett	χ^2 276,54
		p 0,00
Físico	KMO	0,54
	Teste de Esfericidade de Bartlett	χ^2 190,48
		p 0,00

De acordo com a Tabela 4.12, pode-se observar que o MSA é superior a 0,50 para todos os atributos químicos, exceto para o atributo magnésio, que apresenta o resultado de 0,10. Já em relação aos atributos físicos, argila e porosidade total apresentam o resultado de 0,46 e 0,47, respectivamente. Entretanto, a decisão de eliminação destes atributos não será tomada agora, uma vez que estes atributos podem apresentar elevado valor de comunalidade e de cargas fatoriais.

Tabela 4.12 *Matriz de Correlações Anti-imagem para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, para a Profundidade de 25 – 30 cm.*

		pH	Ca	Mg	Al	H+Al	V
Químico	pH	0,93 ^a					
	Ca	-0,16	0,68 ^a				
	Mg	0,11	0,57	0,10 ^a			
	Al	0,40	0,42	0,14	0,84 ^a		
	H+Al	0,10	-0,50	-0,34	-0,45	0,73 ^a	
	V	-0,07	-0,68	-0,68	0,05	0,45	0,71 ^a
		Areia	Argila	UV	ptotal	macro	micro
Físico	Areia	0,54 ^a					
	Argila	0,75	0,46 ^a				
	UV	-0,02	0,04	0,90 ^a			
	Ptotal	0,00	-0,28	0,02	0,47 ^a		
	macro	0,10	0,32	-0,15	-0,93	0,53 ^a	
	micro	0,18	0,26	0,31	-0,60	0,69	0,51 ^a

Nota: pH = potencial hidrogeniônico, Ca = cálcio, Mg = Magnésio, Al = alumínio,

H+Al = acidez potencial, V = saturação de bases, UV = umidade volumétrica,

ptotal = porosidade total, macro = macroporosidade e micro = microporosidade.

Os autovalores para cada fator, bem como os respectivos percentuais de variância explicada, são apresentados na Tabela 4.13. Assim, com base no critério da raiz latente (critério da Kaiser) de retenção de fatores com valores superior a 1, em relação aos atributos químicos foram retidos dois fatores que conseguem explicar 88,29% da variância dos dados originais. E para os atributos físicos também foram retidos dois fatores, estes explicam 79,10% da variância dos dados originais.

Tabela 4.13 *Autovalor e Percentual de Variância Explicada pelos Fatores para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, para a Profundidade de 25 – 30 cm.*

Tipo	Compo- nente	Variância Inicial			Variância após Rotação		
		Total	% de Variância	% Acum.	Total	% de Variância	% Acum.
Químico	1	4,25	70,76	70,76	4,21	70,24	70,24
	2	1,05	17,52	88,29	1,08	18,05	88,29
	3	0,40	6,70	94,99			
	4	0,17	2,80	97,79			
	5	0,09	1,43	99,22			
	6	0,05	0,78	100,00			
Físico	1	2,87	47,87	47,87	2,84	47,40	47,40
	2	1,87	31,22	79,09	1,90	31,70	79,10
	3	0,67	11,10	90,20			
	4	0,34	5,70	95,89			
	5	0,21	3,47	99,36			
	6	0,04	0,64	100,00			

Nota: Método de Extração: Componente Principal; % Acum. = % Acumulado.

A escolha dos atributos que compõem cada um dos fatores ocorre observando-se as cargas fatoriais de cada atributo, da esquerda para direita e ao longo de cada linha, selecionando-se a carga fatorial de maior valor absoluto. Neste sentido, a partir da Tabela 4.14 pode-se perceber que todos os atributos químicos, à exceção do atributo magnésio, possuem elevada carga fatorial no Fator 1, denominado de **Acidez da Solução do Solo 2**. O Fator 2, como já era de se esperar, discrimina apenas o atributo magnésio, este fator, chamado de **Teor de Magnésio**, explica 18,05% da variância total dos dados.

Além disso, ainda em relação aos atributos químicos, no primeiro fator todos os atributos, com exceção de acidez potencial e alumínio, apresentam relação positiva com este fator, indicando que mudanças positivas em cada um desses atributos se refletem em

aumento na qualidade do solo. Observe também que o atributo magnésio está relacionado positivamente com o segundo fator.

Em relação aos atributos físicos, o primeiro fator denominado de **Conecção de Poros do Solo**, explica 47,40% de variância total e englobou os seguintes atributos: macroporosidade, porosidade total, umidade volumétrica e microporosidade. Todos os atributos, com exceção de microporosidade, apresentam relação positiva com este fator, indicando que mudanças positivas em cada um desses atributos se refletem em aumento na qualidade do solo em relação aos seus atributos físicos. O segundo fator denominado de **Granulometria 2**, foi definido pelos atributos argila e areia, este fator explica 31,70% da variância total dos dados e possui relação positiva com o atributo argila e negativa com o atributo areia.

Além disso, observa-se ainda na Tabela 4.14 que todos os atributos químicos e físicos possuem forte relação com os fatores retidos, pois têm elevados valores de comunalidades. Assim, a decisão de não excluir o atributo químico magnésio e os atributos físicos argila e porosidade total, em relação a análise da estatística MSA, foi tomada de forma correta.

Tabela 4.14 *Matriz de Cargas Fatoriais após Rotação Ortogonal pelo Método Varimax para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaú, para a Profundidade de 25 – 30 cm.*

Tipo	Atributo	Fator		Comunalidade
		1	2	
Químico	Alumínio (Al)	-0,97	-0,06	0,94
	Potencial Hidrogeniônico (pH)	0,93	-0,03	0,87
	Cálcio (Ca)	0,93	-0,06	0,86
	Saturação de Bases (V)	0,92	0,28	0,93
	Acidez Potencial (H+Al)	-0,83	-0,06	0,70
	Magnésio (Mg)	0,04	1,00	0,99
	Autovalor	4,21	1,08	5,29
	% de Variância	70,24	18,05	88,29
Físico	Macroporosidade (macro)	0,96	0,04	0,92
	Porosidade Total (ptotal)	0,82	0,29	0,77
	Umidade Volumétrica (UV)	0,80	-0,21	0,68
	Microporosidade (micro)	-0,78	0,25	0,67
	Argila	-0,09	0,91	0,84
	Areia	0,00	-0,94	0,88
	Autovalor	2,84	1,90	4,74
	% de Variância	47,40	31,70	79,10

A Tabela 4.15 fornece os coeficientes dos escores fatoriais para cada fator em relação aos atributos químicos e físicos. Logo, com base nesta tabela e na Equação (3.5), pode-se calcular os escores fatoriais para cada observação da amostra, levando em consideração as variáveis padronizadas.

Tabela 4.15 *Matriz de Coeficientes de Regressão dos Escores Fatoriais Após a Aplicação da Rotação via o Método Varimax para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, para a Profundidade de 25 – 30 cm.*

Tipo	Atributo	Fator	
		1	2
Químico	Potencial Hidrogeniônico (pH)	0,23	-0,10
	Cálcio (Ca)	0,23	-0,12
	Magnésio (Mg)	-0,06	0,94
	Alumínio (Al)	-0,23	0,01
	Acidez Potencial (H+Al)	-0,20	0,00
	Saturação de Bases (V)	0,20	0,20
Físico	Areia	-0,03	-0,50
	Argila	0,00	0,48
	Umidade Volumétrica (UV)	0,28	-0,09
	Porosidade Total (ptotal)	0,30	0,18
	Macroporosidade (macro)	0,34	0,05
	Microporosidade (micro)	-0,27	0,11

Dessa maneira, os escores fatoriais podem ser obtidos, por

i) Atributos Químicos

$$\text{Acidez da Solução do Solo } 2 = 0,23pH + 0,23P - 0,06Mg - 0,23Al - 0,20(H + Al) + 0,20V;$$

$$\text{Teor de Magnésio} = -0,10pH - 0,12P + 0,94Mg + 0,01Al + 0,00(H + Al) + 0,20V.$$

ii) Atributos Físicos

$$\text{Conexão de Poros do Solo} = -0,03areia + 0,00argila + 0,28UV + 0,30ptotal + 0,34macro - 0,27micro;$$

$$\text{Granulometria 2} = -0,50\text{areia} + 0,48\text{argila} - 0,09UV + 0,18\text{ptotal} + 0,05\text{macro} + 0,11\text{micro}.$$

4.4 Índice de Qualidade - Superfície do Solo (0 - 5 cm)

4.4.1 Índice de Qualidade baseado nos Atributos Químicos - Superfície do Solo (0 - 5 cm)

Os escores fatoriais estimados, para os dados de atributos químicos de solos coletados na fazenda Barindaua, são apresentados na Tabela 4.16. Fazendo-se a padronização desses escores originais, obtêm-se os escores fatoriais padronizados, com base nos quais se determina o Índice de Qualidade do Solo baseado nos Atributos Químicos (IQSQ), mediante utilização da Equação (3.17), com a finalidade de classificar os solos de acordo com o desempenho dos seus atributos químicos, que são úteis para o crescimento vigoroso dos vegetais, e consequentemente aumentam a produção por área plantada.

Os resultados mostram que 6 amostras de solo apresentam boa qualidade ($\text{IQSQ} \geq 0,70$), os escores dessas amostras de solos apresentam valores positivos e altos, exceto o Solo 1 no Fator 2, nos escores dos dois fatores. Nessa situação, um valor positivo indica que os atributos químicos definidores das dimensões fatoriais apresentam influência positiva na boa qualidade do solo.

A maioria das amostras de solos apresentam qualidade regular ($0,35 \leq \text{IQSQ} < 0,70$), de uma forma geral as amostras desse grupo com sinal negativo no primeiro fator apresentam percentual de saturação de bases como baixa ou média, teor de acidez potencial como médio ou alto, grau de reação do potencial hidrogeniônico como acidez média, teor de alumínio como médio ou alto e teor de cálcio como baixo ou médio. Enquanto que as amostras que apresentam sinal negativo no segundo fator apresentam baixo ou médio teor de potássio.

Por outro lado, 18 amostras de solos apresentam IQSQ inferior a 0,35, ou seja, qualidade ruim, na maioria das amostras desses solos, existe um ou dois fatores com escore fatorial negativo. Essas amostras de solo apresentam como característica baixo percentual de saturação de bases, indicando o caráter distrófico das amostras de solo; médio ou alto teor

de acidez potencial, acidez elevada ou média no grau de reação do potencial hidrogeniônico, médio ou alto teor de alumínio, baixo teor de cálcio, baixo ou médio teor de potássio. Essas amostras de solo de uma maneira geral são ácidas, necessitando para perfeito crescimento dos vegetais da aplicação de corretivos.

Tabela 4.16 *Valores dos Escores Fatoriais Originais e Padronizados e Índice de Qualidade do Solo Baseado nos Dados de Atributos Químicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaú, para a Profundidade de 0 – 5 cm.*

Solo	Escore Original		Escore Padronizado		IQSQ	Classificação
	Fator 1	Fator 2	Fator 1	Fator 2		
Solo 13	2,17	0,75	1,00	0,63	0,88	Bom
Solo 16	1,37	1,43	0,79	0,81	0,80	Bom
Solo 07	1,52	0,90	0,83	0,67	0,78	Bom
Solo 11	1,11	1,29	0,72	0,78	0,74	Bom
Solo 01	2,10	-0,88	0,98	0,20	0,72	Bom
Solo 04	0,95	1,17	0,68	0,74	0,70	Bom
Solo 09	1,26	0,36	0,76	0,53	0,68	Regular
Solo 14	1,07	0,48	0,71	0,56	0,66	Regular
Solo 05	0,70	0,87	0,61	0,66	0,63	Regular
Solo 10	1,64	-1,34	0,86	0,08	0,60	Regular
Solo 17	0,60	0,66	0,59	0,61	0,59	Regular
Solo 19	0,01	1,36	0,43	0,79	0,55	Regular
Solo 08	0,72	-0,09	0,62	0,41	0,55	Regular
Solo 03	0,95	-0,81	0,68	0,22	0,53	Regular
Solo 15	-0,29	1,46	0,35	0,82	0,51	Regular
Solo 21	1,06	-1,31	0,71	0,09	0,50	Regular
Solo 12	0,74	-0,74	0,62	0,24	0,50	Regular
Solo 26	-0,71	2,15	0,24	1,00	0,49	Regular
Solo 31	-0,17	0,62	0,38	0,60	0,46	Regular
Solo 06	-0,71	1,57	0,24	0,85	0,44	Regular
Solo 20	-0,65	1,18	0,26	0,74	0,42	Regular
Solo 37	0,52	-1,26	0,57	0,10	0,41	Regular

Tabela 4.16 *Valores dos Escores Fatoriais Originais e Padronizados e Índice de Qualidade do Solo Baseado nos Dados de Atributos Químicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaú, para a Profundidade de 0 – 5 cm (Continuação).*

Solo	Escore Original		Escore Padronizado		IQSQ	Classificação
	Fator 1	Fator 2	Fator 1	Fator 2		
Solo 02	-0,15	-0,02	0,39	0,43	0,40	Regular
Solo 34	0,33	-1,33	0,51	0,08	0,37	Regular
Solo 27	0,06	-0,85	0,44	0,21	0,37	Regular
Solo 18	-0,25	-0,28	0,36	0,36	0,36	Regular
Solo 33	0,41	-1,65	0,54	0,00	0,36	Regular
Solo 22	-0,50	-0,02	0,30	0,43	0,34	Ruim
Solo 24	-1,20	1,25	0,11	0,77	0,33	Ruim
Solo 23	-0,52	-0,21	0,29	0,38	0,32	Ruim
Solo 25	-0,57	-0,21	0,28	0,38	0,31	Ruim
Solo 29	-0,87	0,10	0,20	0,46	0,29	Ruim
Solo 42	-0,89	0,12	0,20	0,47	0,29	Ruim
Solo 32	-0,50	-0,76	0,30	0,23	0,28	Ruim
Solo 36	-0,60	-0,67	0,27	0,26	0,27	Ruim
Solo 39	-0,75	-0,70	0,23	0,25	0,24	Ruim
Solo 30	-1,04	-0,12	0,15	0,40	0,24	Ruim
Solo 40	-1,11	-0,19	0,14	0,38	0,22	Ruim
Solo 43	-1,63	0,84	0,00	0,66	0,22	Ruim
Solo 44	-0,75	-1,10	0,23	0,14	0,20	Ruim
Solo 35	-0,61	-1,41	0,27	0,06	0,20	Ruim
Solo 41	-1,51	0,24	0,03	0,50	0,19	Ruim
Solo 38	-1,38	-0,21	0,07	0,38	0,17	Ruim
Solo 28	-0,91	-1,44	0,19	0,06	0,14	Ruim
Solo 45	-1,05	-1,19	0,15	0,12	0,14	Ruim
Máximo	2,17	2,15	Média		0,43	
Mínimo	-1,63	-1,65				
Razão da Variância	0,67	0,33				
Variância	3,87	1,92				

4.4.2 Índice de Qualidade baseado nos Atributos Físicos - Superfície do Solo (0 - 5 cm)

Os escores fatoriais estimados, para os dados de atributos físicos de solos coletados na fazenda Barindaua, são apresentados na Tabela 4.17. Fazendo-se a padronização desses escores originais, obtêm-se os escores fatoriais padronizados, com base nos quais se determina o Índice de Qualidade de Solo baseado nos Atributos Físicos (IQSF), mediante utilização da Equação (3.17), com a finalidade de classificar os solos de acordo com o desempenho dos seus atributos físicos.

Os resultados mostram que 6 amostras de solo apresentam boa qualidade ($\text{IQSF} \geq 0,70$), os escores dessas amostras de solos apresentam valores positivos e altos, exceto o Solo 29 no Fator 2 e o Solo 47 no fator 3. Nesta situação, um valor positivo indica que os atributos físicos do solo definidores das dimensões fatoriais apresentam influência positiva na boa qualidade do solo.

A maioria das amostras de solos apresentam qualidade regular ($0,35 \leq \text{IQSF} < 0,70$) em relação aos atributos físicos, de uma forma geral as amostras desse grupo com sinal negativo no primeiro fator apresentam a densidade e a macroporosidade do solo classificadas como média, em ambos os atributos.

Além disso, 2 amostras de solos apresentam IQSF inferior a 0,35 em relação aos atributos físicos, ou seja, qualidade ruim, nas amostras desses solos pode-se perceber que os escores fatoriais são negativos em pelo menos dois fatores, além disso esses solos apresentam baixa microporosidade, isto é, esses solos apresentam poros grandes (macroporos), então o escoamento de água através dos poros costuma ser rápido e, nesse escoamento, a água pode levar consideravelmente sais minerais, contribuindo para tornar o solo pobre desses nutrientes.

Tabela 4.17 *Valores dos Escores Fatoriais Originais e Padronizados e Índice de Qualidade do Solo para os Dados de Atributos Físicos de Solos, Coletados na Fazenda Barindaua, para Profundidade de 0 – 5 cm.*

Solo	Escore Original			Escore Padronizado			IQSF	Classificação
	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 1	Fator 2	Fator 3		
Solo 33	1,79	0,71	1,03	0,95	0,64	0,73	0,79	Bom
Solo 07	0,70	0,33	1,86	0,74	0,57	0,92	0,74	Bom
Solo 14	0,68	-0,22	2,03	0,73	0,47	0,95	0,72	Bom
Solo 21	0,33	2,38	0,25	0,66	0,94	0,55	0,72	Bom
Solo 22	1,40	1,25	-0,15	0,87	0,74	0,46	0,71	Bom
Solo 17	0,61	0,50	1,36	0,72	0,60	0,80	0,71	Bom
Solo 37	0,60	0,73	0,91	0,72	0,64	0,70	0,69	Regular
Solo 42	-0,20	0,08	2,23	0,56	0,53	1,00	0,68	Regular
Solo 12	-0,23	1,17	0,97	0,56	0,72	0,71	0,65	Regular
Solo 16	0,65	0,09	0,63	0,73	0,53	0,64	0,64	Regular
Solo 27	2,06	-0,21	-0,93	1,00	0,47	0,29	0,63	Regular
Solo 03	1,35	1,20	-1,31	0,86	0,73	0,20	0,63	Regular
Solo 40	-0,54	0,08	1,77	0,50	0,53	0,90	0,62	Regular
Solo 39	0,09	1,53	-0,18	0,62	0,79	0,45	0,62	Regular
Solo 08	0,80	0,27	-0,38	0,76	0,56	0,41	0,59	Regular
Solo 01	0,25	-0,13	0,59	0,65	0,49	0,63	0,59	Regular
Solo 25	0,93	0,10	-0,54	0,78	0,53	0,37	0,58	Regular
Solo 23	1,11	-1,10	0,19	0,81	0,31	0,54	0,58	Regular
Solo 45	-0,29	0,15	0,42	0,54	0,54	0,59	0,56	Regular
Solo 11	-0,08	0,60	-0,32	0,59	0,62	0,42	0,55	Regular
Solo 35	0,72	-0,02	-0,74	0,74	0,51	0,33	0,55	Regular
Solo 31	0,01	-0,20	-0,14	0,60	0,47	0,46	0,52	Regular
Solo 15	-0,10	-0,13	-0,11	0,58	0,49	0,47	0,52	Regular
Solo 06	-0,33	-0,09	0,11	0,54	0,49	0,52	0,52	Regular
Solo 13	0,06	-0,22	-0,31	0,61	0,47	0,43	0,51	Regular
Solo 18	-0,93	-0,50	0,97	0,42	0,42	0,72	0,51	Regular
Solo 34	0,21	-0,87	-0,03	0,64	0,35	0,49	0,51	Regular
Solo 19	-0,39	0,06	-0,15	0,52	0,52	0,46	0,51	Regular

Tabela 4.17 *Valores dos Escores Fatoriais Originais e Padronizados e Índice de Qualidade do Solo para os Dados de Atributos Físicos de Solos, Coletados na Fazenda Barindaú, para Profundidade de 0 – 5 cm (Continuação).*

Solo	Escore Original			Escore Padronizado			IQSF	Classificação
	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 1	Fator 2	Fator 3		
Solo 28	0,26	-0,16	-0,76	0,65	0,48	0,32	0,50	Regular
Solo 10	-0,20	-1,12	0,29	0,56	0,31	0,56	0,48	Regular
Solo 02	-0,81	0,26	-0,27	0,44	0,56	0,43	0,48	Regular
Solo 43	-0,67	-0,28	-0,14	0,47	0,46	0,46	0,47	Regular
Solo 29	-0,71	0,37	-0,72	0,46	0,58	0,33	0,46	Regular
Solo 05	-0,29	0,20	-1,12	0,54	0,55	0,24	0,46	Regular
Solo 32	0,08	-0,24	-1,25	0,62	0,47	0,21	0,45	Regular
Solo 20	0,04	-0,63	-0,92	0,61	0,40	0,29	0,45	Regular
Solo 38	-0,95	-0,22	-0,34	0,42	0,47	0,42	0,43	Regular
Solo 04	-0,38	-0,06	-1,13	0,53	0,50	0,24	0,43	Regular
Solo 30	-0,17	-0,38	-1,23	0,57	0,44	0,22	0,43	Regular
Solo 09	-0,38	-1,12	-0,52	0,53	0,31	0,38	0,41	Regular
Solo 44	-1,00	-0,93	-0,12	0,41	0,34	0,47	0,41	Regular
Solo 41	-3,09	-0,37	1,64	0,00	0,44	0,87	0,39	Regular
Solo 36	1,30	-2,83	-1,45	0,85	0,00	0,17	0,39	Regular
Solo 26	-2,86	2,71	-2,20	0,04	1,00	0,00	0,33	Ruim
Solo 24	-1,45	-2,73	0,21	0,32	0,02	0,54	0,29	Ruim
Máximo	2,06	2,71	2,23	Média			0,54	
Mínimo	-3,09	-2,83	-2,20					
Razão	0,40	0,31	0,30					
Variância	2,59	2,02	1,93					

Nota: Razão = Razão de Variância.

4.4.3 Índice de Qualidade do Solo Geral - Superfície do Solo (0 - 5 cm)

A partir dos escores fatoriais originais e padronizados, para os dados de atributos químicos e físicos de solos coletados na fazenda Barindaua, apresentados nas Tabelas (4.16) e (4.17), é possível calcular o Índice de Qualidade do Solo Geral (IQSG), isto é, com base nesses escores fatoriais pode-se determinar o Índice de Qualidade do Solo baseado nos Atributos Químicos e Físicos, conforme mostra a Tabela 4.18, mediante utilização da Equação (3.17), com a finalidade de classificar os solos de modo geral, de acordo com o desempenho dos seus atributos químicos e físicos.

Os resultados mostram que 2 amostras de solo apresentam boa qualidade ($\text{IQSG} \geq 0,70$), os escores fatoriais dessas amostras de solos apresentam valores positivos e altos. O sinal positivo indica que os atributos químicos e físicos definidores das dimensões fatoriais apresentam influência positiva na boa qualidade do solo.

A maioria das amostras de solos apresentam qualidade regular ($0,35 \leq \text{IQSG} < 0,70$), de uma forma geral as amostras desse grupo apresentam percentual de saturação de bases como baixa, teor de acidez potencial como médio, grau de reação do potencial hidrogeniônico como acidez média, teor de alumínio como médio, teor de cálcio como baixo, teor de fósforo como alto e teor de potássio como baixo.

Além disso, 8 amostras de solos apresentam IQSG inferior a 0,35, caracterizando qualidade ruim, tendo como características percentual de saturação de bases como baixa, teor de acidez potencial como alto, grau de reação do potencial hidrogeniônico como acidez elevada, teor de alumínio como alto, teor de cálcio como baixo, teor de fósforo como alto, teor de potássio como baixo e baixa microporosidade, caracterizando a presença de macroporos.

A acidez é ocasionada principalmente pela lavagem de alguns elementos nutritivos, tais como sódio, cálcio, magnésio e potássio. Em consequência, haverá deliberação de íons de hidrogênio e alumínio, dificultando o crescimento das plantas (AMARAL, 1984). Além disso, a aplicação contínua e desordenada de fertilizantes pode também ocasionar a acidez dos solos, a partir dos resíduos ácidos.

Tabela 4.18 *Valores dos Escores Fatoriais Padronizados e Índice de Qualidade do Solo Geral Baseado nos Dados de Atributos Químicos e Físicos, de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, para a Profundidade de 0 – 5 cm.*

Solo	Escore Químico		Escore Físico			IQSG	Classificação
	Fator 1	Fator 2	Fator 1	Fator 2	Fator 3		
Solo 07	0,83	0,67	0,74	0,57	0,92	0,76	Bom
Solo 16	0,79	0,81	0,73	0,53	0,64	0,71	Bom
Solo 01	0,98	0,20	0,65	0,49	0,63	0,65	Regular
Solo 02	0,39	0,43	0,44	0,56	0,43	0,44	Regular
Solo 03	0,68	0,22	0,86	0,73	0,20	0,58	Regular
Solo 04	0,68	0,74	0,53	0,50	0,24	0,56	Regular
Solo 05	0,61	0,66	0,54	0,55	0,24	0,54	Regular
Solo 06	0,24	0,85	0,54	0,49	0,52	0,48	Regular
Solo 08	0,62	0,41	0,76	0,56	0,41	0,57	Regular
Solo 09	0,76	0,53	0,53	0,31	0,38	0,54	Regular
Solo 10	0,86	0,08	0,56	0,31	0,56	0,54	Regular
Solo 11	0,72	0,78	0,59	0,62	0,42	0,64	Regular
Solo 12	0,62	0,24	0,56	0,72	0,71	0,58	Regular
Solo 13	1,00	0,63	0,61	0,47	0,43	0,68	Regular
Solo 14	0,71	0,56	0,73	0,47	0,95	0,69	Regular
Solo 15	0,35	0,82	0,58	0,49	0,47	0,51	Regular
Solo 17	0,59	0,61	0,72	0,60	0,80	0,65	Regular
Solo 18	0,36	0,36	0,42	0,42	0,72	0,44	Regular
Solo 19	0,43	0,79	0,52	0,52	0,46	0,53	Regular
Solo 20	0,26	0,74	0,61	0,40	0,29	0,43	Regular
Solo 21	0,71	0,09	0,66	0,94	0,55	0,62	Regular
Solo 22	0,30	0,43	0,87	0,74	0,46	0,54	Regular
Solo 23	0,29	0,38	0,81	0,31	0,54	0,46	Regular
Solo 25	0,28	0,38	0,78	0,53	0,37	0,46	Regular
Solo 26	0,24	1,00	0,04	1,00	0,00	0,40	Regular
Solo 27	0,44	0,21	1,00	0,47	0,29	0,50	Regular
Solo 29	0,20	0,46	0,46	0,58	0,33	0,38	Regular
Solo 31	0,38	0,60	0,60	0,47	0,46	0,49	Regular
Solo 32	0,30	0,23	0,62	0,47	0,21	0,37	Regular

Tabela 4.18 *Valores dos Escores Fatoriais Padronizados e Índice de Qualidade do Solo Geral Baseado nos Dados de Atributos Químicos e Físicos, de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, para a Profundidade de 0 – 5 cm (Continuação).*

Solo	Escore Químico		Escore Físico			IQSG	Classificação
	Fator 1	Fator 2	Fator 1	Fator 2	Fator 3		
Solo 33	0,54	0,00	0,95	0,64	0,73	0,59	Regular
Solo 34	0,51	0,08	0,64	0,35	0,49	0,44	Regular
Solo 35	0,27	0,06	0,74	0,51	0,33	0,38	Regular
Solo 37	0,57	0,10	0,72	0,64	0,70	0,56	Regular
Solo 39	0,23	0,25	0,62	0,79	0,45	0,44	Regular
Solo 40	0,14	0,38	0,50	0,53	0,90	0,43	Regular
Solo 42	0,20	0,47	0,56	0,53	1,00	0,49	Regular
Solo 45	0,15	0,12	0,54	0,54	0,59	0,36	Regular
Solo 24	0,11	0,77	0,32	0,02	0,54	0,31	Ruim
Solo 28	0,19	0,06	0,65	0,48	0,32	0,33	Ruim
Solo 30	0,15	0,40	0,57	0,44	0,22	0,34	Ruim
Solo 36	0,27	0,26	0,85	0,00	0,17	0,33	Ruim
Solo 38	0,07	0,38	0,42	0,47	0,42	0,31	Ruim
Solo 41	0,03	0,50	0,00	0,44	0,87	0,30	Ruim
Solo 43	0,00	0,66	0,47	0,46	0,46	0,35	Ruim
Solo 44	0,23	0,14	0,41	0,34	0,47	0,31	Ruim
Razão Variância	0,31	0,16	0,21	0,16	0,16		
Variância	3,87	1,92	2,59	2,02	1,93		

A Figura 4.3 apresenta o resumo dos resultados apresentados na Seção 4.4. Nela, pode-se observar que em relação ao índice de qualidade do solo baseado nos atributos químicos, 6 amostras de solos foram classificadas como boa, 21 foram classificadas com regular e 18 foram classificadas como ruim, em que as características de cada grupo são apresentadas nos seus respectivos quadros. A interpretação é exatamente a mesma para os demais índices.

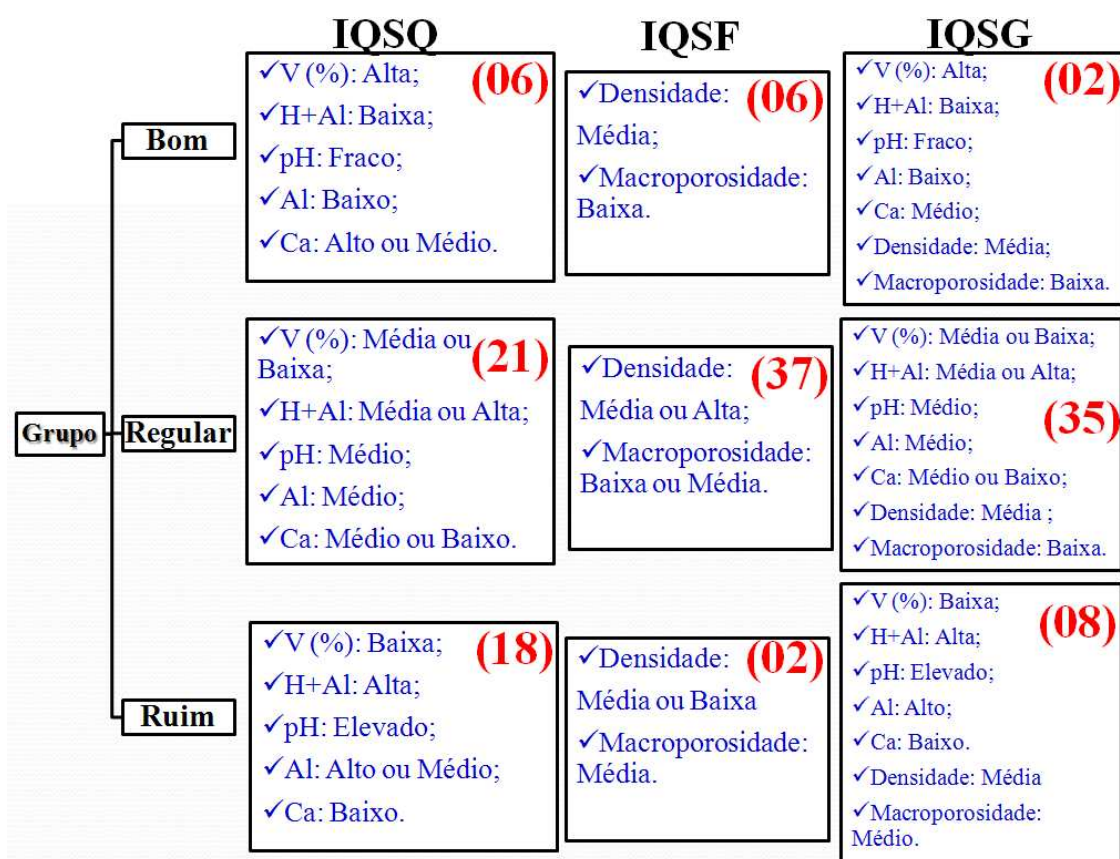


Figura 4.3 *Resumo dos Resultados do Índice de Qualidade do Solo Baseado nos Atributos Químicos (IQSQ), Físicos (IQSF) e Químicos e Físicos Conjuntamente (IQSG), para a Profundidade de 0 – 5 cm.*

4.5 Índice de Qualidade - Profundidade do Solo (25 - 30 cm)

4.5.1 Índice de Qualidade baseado nos Atributos Químicos - Profundidade do Solo (25 - 30 cm)

Os escores fatoriais estimados, para os dados de atributos químicos coletados na fazenda Barindaua, são apresentados na Tabela 4.19, fazendo-se a padronização desses escores originais, obtêm-se os escores fatoriais padronizados, com base nos quais se determina o Índice de Qualidade de Solo baseado nos Atributos Químicos (IQSQ), mediante utilização da Equação (3.17) vista no Capítulo 3, com a finalidade de classificar os solos de acordo com o desempenho dos seus atributos químicos.

Os resultados mostram que 6 amostras de solo apresentam boa qualidade ($\text{IQSQ} \geq 0,70$), os escores fatoriais dessas amostras de solos apresentam valores positivos e altos, exceto os Solos 34, 58 e 74 no Fator 2. Nesta situação, valores positivos indicam que os atributos químicos definidores das dimensões fatoriais apresentam influência positiva na boa qualidade do solo.

Além disso, 23 amostras de solos têm a qualidade classificada como regular ($0,35 \leq \text{IQSQ} < 0,70$), de uma forma geral as amostras desse grupo com sinal negativo no primeiro fator apresentam o teor de alumínio como médio, grau de reação do potencial hidrogeniônico como acidez média ou elevada, baixo teor de cálcio, baixo percentual de saturação de bases, teor de acidez potencial como médio. Enquanto que as amostras que apresentam sinal negativo no segundo fator apresentam baixo teor de magnésio. Esses solos podem ser corrigidos pela aplicação de matéria orgânica e calagem para saltarem para o grupo de solos de boa qualidade.

Por outro lado, 18 amostras de solos apresentam IQSQ inferior a 0,35, ou seja, qualidade ruim, na maioria das amostras desses solos, existe um ou dois fatores com escore fatorial negativo. Essas amostras de solo apresentam como característica o teor de alumínio como médio ou alto, grau de reação do potencial hidrogeniônico como acidez elevada, baixo teor de cálcio, baixo percentual de saturação de bases e teor de acidez potencial como médio ou alto.

Essas amostras de solo de uma maneira geral são ácidas, necessitando para perfeito crescimento dos vegetais da aplicação de corretivos. Por se tratar de amostras coletadas na profundidade de 25 – 30 cm uma explicação para esses resultados pode ser a erosão, principalmente o tipo denominado “laminar”, que transporta o solo superficial fértil para as baixadas e expõe as terras das camadas inferiores, que normalmente não possuem fertilidade necessária para as práticas agrícolas e são ácidas.

Tabela 4.19 *Valores dos Escores Fatoriais Originais e Padronizados e Índice de Qualidade do Solo Baseados nos Dados de Atributos Químicos de Solos, Coletados na Fazenda Barindaua, para a Profundidade de 25 – 30 cm.*

Solo	Escore Original		Escore Padronizado		IQSQ	Classificação
	Fator 1	Fator 2	Fator 1	Fator 2		
Solo 13	1,91	0,84	0,97	0,39	0,85	Bom
Solo 16	2,03	-0,37	1,00	0,18	0,83	Bom
Solo 05	1,64	1,22	0,90	0,45	0,81	Bom
Solo 17	0,89	4,38	0,72	1,00	0,77	Bom
Solo 34	1,65	-0,06	0,90	0,23	0,77	Bom
Solo 26	1,53	-0,99	0,87	0,07	0,71	Bom
Solo 15	1,38	-0,90	0,84	0,09	0,68	Regular
Solo 14	1,15	-0,38	0,78	0,18	0,66	Regular
Solo 03	0,91	0,63	0,72	0,35	0,64	Regular
Solo 33	1,26	-1,34	0,81	0,01	0,64	Regular
Solo 43	0,62	0,51	0,65	0,33	0,58	Regular
Solo 07	0,78	-0,85	0,69	0,10	0,57	Regular
Solo 06	0,84	-1,34	0,70	0,01	0,56	Regular
Solo 19	0,49	0,62	0,61	0,35	0,56	Regular
Solo 37	0,71	-1,40	0,67	0,00	0,53	Regular
Solo 29	0,31	-0,05	0,57	0,23	0,50	Regular
Solo 08	0,23	-0,91	0,55	0,09	0,45	Regular
Solo 23	0,11	-0,54	0,52	0,15	0,45	Regular
Solo 04	-0,20	1,15	0,44	0,44	0,44	Regular
Solo 40	-0,10	0,44	0,47	0,32	0,44	Regular
Solo 35	0,00	-0,46	0,49	0,16	0,42	Regular

Tabela 4.19 Valores dos Escores Fatoriais Originais e Padronizados e Índice de Qualidade do Solo Baseados nos Dados de Atributos Químicos de Solos, Coletados na Fazenda Barindaua, para a Profundidade de 25 – 30 cm (Continuação).

Solo	Escore Original		Escore Padronizado		IQSQ	Classificação
	Fator 1	Fator 2	Fator 1	Fator 2		
Solo 01	-0,24	0,57	0,43	0,34	0,41	Regular
Solo 44	-0,07	-0,94	0,48	0,08	0,39	Regular
Solo 36	-0,28	0,26	0,42	0,29	0,39	Regular
Solo 38	-0,37	0,29	0,40	0,29	0,38	Regular
Solo 02	-0,28	-0,29	0,42	0,19	0,38	Regular
Solo 10	-0,55	1,12	0,36	0,44	0,37	Regular
Solo 32	-0,13	-1,33	0,46	0,01	0,37	Regular
Solo 28	-0,58	0,90	0,35	0,40	0,36	Regular
Solo 39	-0,56	0,30	0,35	0,29	0,34	Ruim
Solo 20	-0,74	1,13	0,31	0,44	0,33	Ruim
Solo 30	-0,75	1,12	0,31	0,44	0,33	Ruim
Solo 18	-0,54	-0,13	0,36	0,22	0,33	Ruim
Solo 25	-0,66	0,08	0,33	0,26	0,31	Ruim
Solo 11	-0,63	-0,23	0,33	0,20	0,31	Ruim
Solo 12	-0,69	-0,26	0,32	0,20	0,30	Ruim
Solo 31	-0,60	-0,80	0,34	0,10	0,29	Ruim
Solo 41	-0,81	-0,01	0,29	0,24	0,28	Ruim
Solo 24	-0,89	-0,01	0,27	0,24	0,26	Ruim
Solo 27	-0,90	-0,26	0,27	0,20	0,25	Ruim
Solo 42	-1,25	-0,85	0,18	0,10	0,16	Ruim
Solo 09	-1,57	0,20	0,10	0,28	0,14	Ruim
Solo 21	-1,50	-0,26	0,12	0,20	0,13	Ruim
Solo 22	-1,60	-0,89	0,09	0,09	0,09	Ruim
Solo 45	-1,97	0,14	0,00	0,27	0,05	Ruim
Máximo	2,03	4,38	Média		0,44	
Mínimo	-1,97	-1,40				
Razão de Variância	0,80	0,20				
Variância	4,21	1,08				

4.5.2 Índice de Qualidade baseado nos Atributos Físicos - Profundidade do Solo (25 - 30 cm)

Os escores fatoriais estimados, para os dados de atributos físicos coletados na fazenda Barindaua, são apresentados na Tabela 4.20, fazendo-se a padronização desses escores originais, obtêm-se os escores fatoriais padronizados, com base nos quais se determina o Índice de Qualidade de Solo baseado nos Dados dos Atributos Físicos (IQSF) do solo, mediante utilização da Equação (3.17), com a finalidade de classificar os solos de acordo com o desempenho dos seus atributos físicos.

Os resultados mostram que 3 amostras de solo apresentam boa qualidade ($\text{IQSF} \geq 0,70$), os escores dessas amostras de solos apresentam valores positivos e altos nos dois fatores. Nesta situação, um valor positivo indica que os atributos físicos definidores das dimensões fatoriais apresentam influência positiva na boa qualidade do solo.

A maioria das amostras de solos apresentam qualidade regular ($0,35 \leq \text{IQSF} < 0,70$) em relação aos atributos físicos do solo, de uma forma geral as amostras desse grupo com sinal negativo no escore do primeiro fator apresentam a macroporosidade do solo classificada como crítica. Além disso, 12 amostras de solos apresentam IQSF inferior a 0,35 em relação aos atributos físicos, sendo classificadas com qualidade ruim. Nesta categoria todas as amostras de solo apresentam sinal negativo nos dois fatores, com exceção dos Solos 38 e 70 com sinal positivo no segundo fator.

Tabela 4.20 *Valores dos Escores Fatoriais Originais e Padronizados e Índice de Qualidade do Solo em Relação aos Dados de Atributos Físicos de Solos, Coletados na Fazenda Barindaua, para a Profundidade de 25 – 30 cm.*

Solo	Escore Original		Escore Padronizado		IQSF	Classificação
	Fator 1	Fator 2	Fator 1	Fator 2		
Solo 40	2,54	1,58	1,00	0,89	0,95	Bom
Solo 08	1,26	1,15	0,71	0,80	0,75	Bom
Solo 27	1,24	1,18	0,71	0,80	0,75	Bom
Solo 41	1,23	0,60	0,71	0,68	0,69	Regular
Solo 25	0,80	1,13	0,61	0,79	0,68	Regular
Solo 33	1,41	0,02	0,75	0,55	0,67	Regular
Solo 22	1,21	0,19	0,70	0,59	0,66	Regular
Solo 17	0,98	0,40	0,65	0,63	0,64	Regular
Solo 20	1,55	-0,77	0,78	0,38	0,62	Regular
Solo 04	1,34	-0,59	0,73	0,42	0,61	Regular
Solo 10	0,60	0,31	0,57	0,61	0,59	Regular
Solo 36	0,43	0,50	0,53	0,65	0,58	Regular
Solo 01	1,03	-0,66	0,66	0,41	0,56	Regular
Solo 31	-0,81	2,10	0,25	1,00	0,55	Regular
Solo 05	1,06	-0,92	0,67	0,35	0,54	Regular
Solo 07	-0,35	1,25	0,35	0,82	0,54	Regular
Solo 12	-0,46	1,42	0,33	0,85	0,54	Regular
Solo 42	0,26	0,03	0,49	0,55	0,51	Regular
Solo 28	-0,18	0,55	0,39	0,67	0,50	Regular
Solo 39	-1,13	2,02	0,18	0,98	0,50	Regular
Solo 45	0,47	-0,49	0,54	0,44	0,50	Regular
Solo 23	0,81	-1,15	0,61	0,30	0,49	Regular
Solo 34	-0,06	0,17	0,42	0,58	0,48	Regular
Solo 11	0,12	-0,53	0,46	0,43	0,45	Regular
Solo 09	0,83	-1,70	0,62	0,18	0,44	Regular

Tabela 4.20 *Valores dos Escores Fatoriais Originais e Padronizados e Índice de Qualidade do Solo em Relação aos Dados de Atributos Físicos de Solos, Coletados na Fazenda Barindaú, para a Profundidade de 25 – 30 cm (Continuação).*

Solo	Escore Original		Escore Padronizado		IQSF	Classificação
	Fator 1	Fator 2	Fator 1	Fator 2		
Solo 37	0,03	-0,57	0,44	0,42	0,43	Regular
Solo 16	-0,75	0,52	0,26	0,66	0,42	Regular
Solo 43	-0,54	-0,01	0,31	0,54	0,40	Regular
Solo 44	-1,13	0,86	0,18	0,73	0,40	Regular
Solo 15	-0,61	-0,04	0,29	0,54	0,39	Regular
Solo 30	-1,11	0,69	0,18	0,70	0,39	Regular
Solo 29	-0,93	0,25	0,22	0,60	0,37	Regular
Solo 35	-0,30	-0,86	0,36	0,36	0,36	Regular
Solo 13	-0,86	-0,29	0,24	0,49	0,34	Ruim
Solo 38	-0,44	-1,03	0,33	0,32	0,33	Ruim
Solo 24	-0,97	-0,29	0,21	0,48	0,32	Ruim
Solo 06	-0,35	-1,27	0,35	0,27	0,32	Ruim
Solo 19	-0,90	-0,42	0,23	0,46	0,32	Ruim
Solo 03	-1,13	-0,14	0,18	0,52	0,31	Ruim
Solo 26	-0,96	-0,52	0,22	0,44	0,30	Ruim
Solo 32	-1,31	0,02	0,14	0,55	0,30	Ruim
Solo 18	-1,92	0,61	0,00	0,68	0,27	Ruim
Solo 21	-1,25	-0,78	0,15	0,38	0,24	Ruim
Solo 02	-0,50	-2,00	0,32	0,11	0,24	Ruim
Solo 14	-0,27	-2,53	0,37	0,00	0,22	Ruim
Máximo	2,54	2,10		Média	0,48	
Mínimo	-1,92	-2,53				
Razão de Variância	0,60	0,40				
Variância	2,84	1,90				

4.5.3 Índice de Qualidade do Solo Geral - Profundidade do Solo (25 - 30 cm)

A partir dos escores fatoriais originais e padronizados, para os dados de atributos químicos e físicos coletados na fazenda Barindaua, apresentados nas Tabelas (4.19) e (4.20), é possível calcular o Índice de Qualidade do Solo Geral (IQSG), isto é, com base nesses escores fatoriais pode-se determinar o Índice de Qualidade do Solo baseado nos Atributos Químicos e Físicos, conforme mostra a Tabela 4.21, mediante utilização da Equação (3.17), com a finalidade de classificar os solos de modo geral, de acordo com o desempenho dos seus atributos químicos e físicos conjuntamente.

Os resultados mostram que 1 amostra de solo apresenta boa qualidade ($\text{IQSG} \geq 0,70$), os escores fatoriais dessa amostra de solo apresenta valores positivos e altos. Nesse caso, o sinal positivo indica que os atributos químicos definidores das dimensões fatoriais apresentam influência positiva na boa qualidade do solo.

A maioria das amostras de solos apresentam qualidade regular ($0,35 \leq \text{IQSG} < 0,70$), de uma forma geral as amostras desse grupo apresentam percentual de saturação de bases como baixa, teor de acidez potencial como médio, grau de reação do potencial hidrogeniônico como acidez média ou elevada, teor de alumínio como médio, teor de cálcio como baixo, teor de magnésio como baixo e macroporosidade como baixa.

Além disso, 8 amostras de solos apresentam IQSG inferior a 0,35, caracterizando qualidade ruim, tendo como características percentual de saturação de bases como baixa, teor de acidez potencial como médio ou alto, grau de reação do potencial hidrogeniônico como acidez elevada, teor de alumínio como médio ou alto, teor de cálcio como baixo, teor de magnésio como baixo e baixa macroporosidade, caracterizando a presença de microporosidade elevada (muitos poros de retenção de água), assim deverão armazenar uma maior quantidade de água, implicando em maiores intervalos entre as irrigações.

Tabela 4.21 *Valores dos Escores Fatoriais Padronizados e Índice de Qualidade do Solo Geral Baseado nos Dados de Atributos Químicos e Físicos, de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, para a Profundidade de 25 – 30 cm*

Solo	Escore Original		Escore Padronizado		IQSG	Classificação
	Fator 1	Fator 2	Fator 1	Fator 2		
Solo 17	0,72	1,00	0,65	0,63	0,71	Bom
Solo 05	0,90	0,45	0,67	0,35	0,68	Regular
Solo 40	0,47	0,32	1,00	0,89	0,68	Regular
Solo 33	0,81	0,01	0,75	0,55	0,66	Regular
Solo 16	1,00	0,18	0,26	0,66	0,64	Regular
Solo 34	0,90	0,23	0,42	0,58	0,63	Regular
Solo 13	0,97	0,39	0,24	0,49	0,61	Regular
Solo 08	0,55	0,09	0,71	0,80	0,59	Regular
Solo 07	0,69	0,10	0,35	0,82	0,55	Regular
Solo 15	0,84	0,09	0,29	0,54	0,55	Regular
Solo 04	0,44	0,44	0,73	0,42	0,52	Regular
Solo 26	0,87	0,07	0,22	0,44	0,52	Regular
Solo 43	0,65	0,33	0,31	0,54	0,50	Regular
Solo 25	0,33	0,26	0,61	0,79	0,49	Regular
Solo 03	0,72	0,35	0,18	0,52	0,49	Regular
Solo 27	0,27	0,20	0,71	0,80	0,49	Regular
Solo 37	0,67	0,00	0,44	0,42	0,49	Regular
Solo 01	0,43	0,34	0,66	0,41	0,48	Regular
Solo 36	0,42	0,29	0,53	0,65	0,48	Regular
Solo 41	0,29	0,24	0,71	0,68	0,48	Regular
Solo 10	0,36	0,44	0,57	0,61	0,47	Regular
Solo 20	0,31	0,44	0,78	0,38	0,47	Regular
Solo 23	0,52	0,15	0,61	0,30	0,46	Regular
Solo 14	0,78	0,18	0,37	0,00	0,45	Regular
Solo 06	0,70	0,01	0,35	0,27	0,45	Regular
Solo 19	0,61	0,35	0,23	0,46	0,45	Regular
Solo 29	0,57	0,23	0,22	0,60	0,44	Regular
Solo 28	0,35	0,40	0,39	0,67	0,43	Regular
Solo 39	0,35	0,29	0,18	0,98	0,42	Regular

Tabela 4.21 *Valores dos Escores Fatoriais Padronizados e Índice de Qualidade do Solo Geral Baseado nos Dados de Atributos Químicos e Físicos, de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, para a Profundidade de 25 – 30 cm (Continuação).*

Solo	Escore Original		Escore Padronizado		IQSG	Classificação
	Fator 1	Fator 2	Fator 1	Fator 2		
Solo 31	0,34	0,10	0,25	1,00	0,41	Regular
Solo 12	0,32	0,20	0,33	0,85	0,41	Regular
Solo 44	0,48	0,08	0,18	0,73	0,40	Regular
Solo 35	0,49	0,16	0,36	0,36	0,40	Regular
Solo 11	0,33	0,20	0,46	0,43	0,37	Regular
Solo 22	0,09	0,09	0,70	0,59	0,36	Regular
Solo 30	0,31	0,44	0,18	0,70	0,36	Regular
Solo 38	0,40	0,29	0,33	0,32	0,36	Regular
Solo 32	0,46	0,01	0,14	0,55	0,34	Ruim
Solo 42	0,18	0,10	0,49	0,55	0,33	Ruim
Solo 02	0,42	0,19	0,32	0,11	0,31	Ruim
Solo 18	0,36	0,22	0,00	0,68	0,30	Ruim
Solo 24	0,27	0,24	0,21	0,48	0,29	Ruim
Solo 09	0,10	0,28	0,62	0,18	0,28	Ruim
Solo 45	0,00	0,27	0,54	0,44	0,26	Ruim
Solo 21	0,12	0,20	0,15	0,38	0,19	Ruim
Razão de Variância	0,42	0,11	0,28	0,19		
Variância	4,21	1,08	2,84	1,90		

A partir da Figura 4.4 pode-se observar os principais resultados apresentados na Seção 4.5, isto é, pode-se observar em relação ao índice de qualidade do solo baseado nos atributos químicos (IQSQ) que 6 amostras de solos foram classificadas como boa, 23 foram classificadas com regular e 16 foram classificadas como ruim, em que as características de cada grupo são apresentadas nos seus respectivos quadros. A interpretação é exatamente a mesma para os demais índices de qualidade do solo baseados nos atributos físicos (IQSF) e químicos e físicos conjuntamente (IQSG), para a profundidade de 25 – 30 cm.

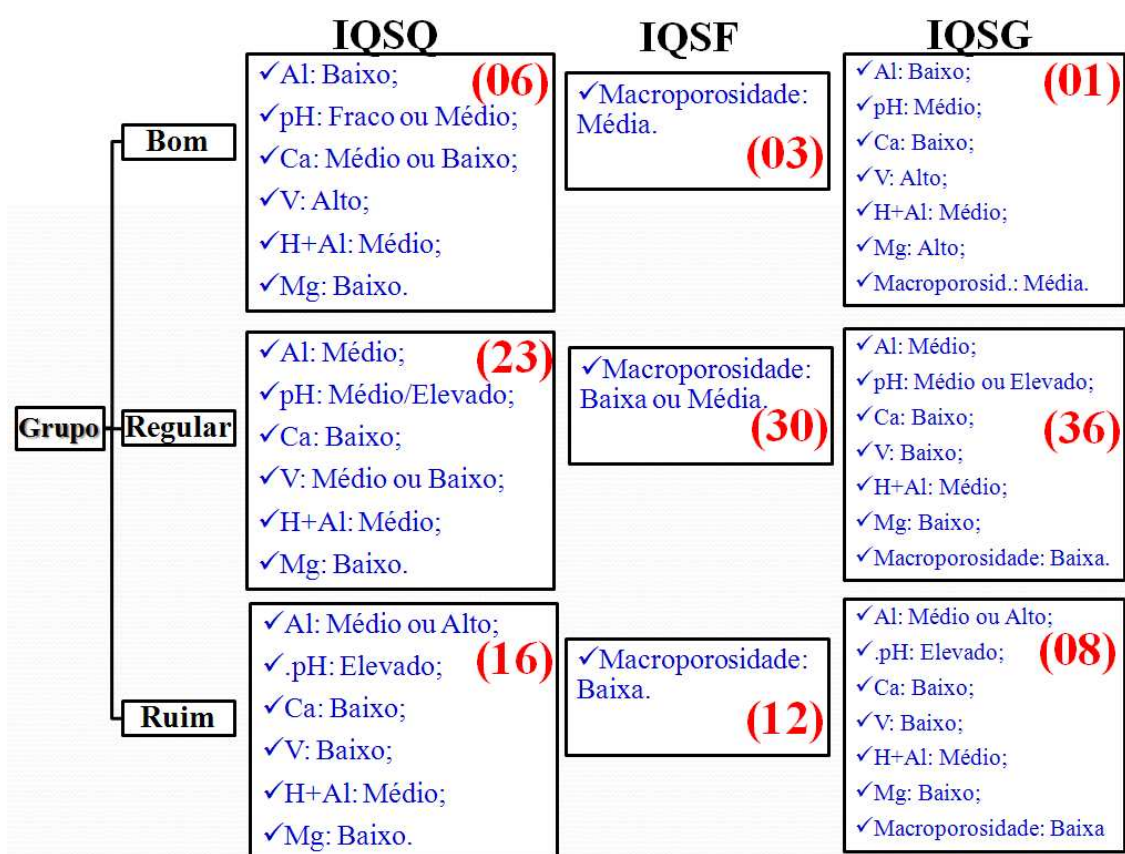


Figura 4.4 *Resumo dos Resultados do Índice de Qualidade do Solo Baseado nos Atributos Químicos (IQSQ), Físicos (IQSF) e Químicos e Físicos Conjuntamente (IQSG), para a Profundidade de 25 – 30 cm.*

Realizada a aplicação da técnica análise fatorial, onde pôde-se estimar os escores fatoriais, com base nos quais se determina o Índice de Qualidade de Solo baseado nos Dados dos Atributos Químicos (IQSQ), Físicos (IQSF) e Químicos e Físicos conjuntamente (IQSG) do solo, para as profundidades de 0 – 5 cm e 25 – 30 cm, mediante utilização da Equação (3.17), com a finalidade de classificar os solos de acordo com o desempenho dos seus atributos. A próxima etapa é a aplicação da técnica análise discriminante realizada com o objetivo de validar os resultados obtidos na construção dos índices, bem como, conhecer os atributos químicos e físicos do solo, que influenciam e estão associados a qualidade do solo de plantação de Açaí.

4.6 Análise Discriminante - Superfície do Solo (0 - 5 cm)

4.6.1 Análise Discriminante dos Atributos Químicos e Físicos Individualmente-Superfície do Solo (0 - 5 cm)

O lambda de Wilks, que varia de 0 a 1, testa a existência de diferenças de médias entre os grupos para cada variável, valores elevados desta estatística indicam ausência de diferença entre os grupos. Assim, o teste de igualdade de médias dos grupos para cada atributo químico e físico é apresentado na Tabela 4.22. Os resultados demonstram que, para um nível de significância de 5%, todos os atributos químicos, com exceção de matéria orgânica e magnésio, contribuíram para a discriminação dos grupos. Além disso, pode-se perceber que os atributos saturação de bases, potencial hidrogeniônico e cálcio são os que mais discriminam os grupos, isto é, seus poderes de diferenciação dos grupos é superior, se comparado com os outros atributos químicos.

Em relação aos atributos físicos, quase todos os atributos, com exceção de silte, resistência a penetração e microporosidade, contribuíram para a discriminação dos grupos. Além disso, pode-se perceber que os atributos macroporosidade e densidade são os que mais discriminam os grupos, isto é, seus poderes de diferenciação dos grupos é superior, se comparado com os outros atributos físicos.

Tabela 4.22 *Resultado do Teste de Igualdade de Médias dos Grupos para Seleção de Atributos Químicos e Físicos Discriminantes de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.*

Tipo	Atributo	Lambda de Wilks	F	Significância
Químico	Potencial Hidrogeniônico (pH)	0,23	69,51	0,00
	Matéria Orgânica (MO)	0,99	0,14	0,87
	Fósforo (P)	0,80	5,22	0,01
	Potássio (K)	0,83	4,39	0,02
	Cálcio (Ca)	0,25	63,54	0,00
	Magnésio (Mg)	0,93	1,66	0,20
	Alumínio (Al)	0,42	29,49	0,00
	Acidez Potencial (H+Al)	0,47	23,91	0,00
	Saturação de Bases (V)	0,21	76,96	0,00
Físico	Areia	0,76	6,80	0,00
	Argila	0,75	7,09	0,00
	Silte	0,95	1,15	0,33
	Densidade (Ds)	0,70	9,08	0,00
	Resistência a Penetração (RP)	0,98	0,47	0,63
	Umidade Volumétrica (UV)	0,84	4,11	0,02
	Porosidade Total (ptotal)	0,76	6,67	0,00
	Macroporosidade (macro)	0,59	14,77	0,00
	Microporosidade (micro)	0,95	1,14	0,33

Na Tabela 4.22, analisando primeiramente os atributos químicos, o atributo saturação de bases apresentou maior valor de F (76,96) e, conseqüentemente, menor valor de lambda de Wilks (0,21), sendo esse o primeiro atributo químico selecionado para entrar na análise pelo procedimento *stepwise*, esse atributo foi pareado com os demais, onde foi selecionado o atributo potencial hidrogeniônico, como o segundo melhor atributo discriminante. Após dois passos, foram selecionados dois atributos químicos com alto poder discriminante, como pode ser visto na Tabela 4.23.

Por mais que os atributos fósforo, potássio, cálcio, alumínio e acidez potencial tenham se mostrado significante na Tabela 4.22, isto é, apresentam diferenças significativas nos três grupos de solos, eles não foram incluídos na análise. Como pode ser observado por meio da Tabela 4.3, esses atributos apresentam altas correlações com os atributos saturação de bases e potencial hidrogeniônico selecionados na análise. Portanto, ficaram no modelo apenas os atributos com menores valores de lambdas de Wilks.

Em relação aos atributos físicos, pode-se observar na Tabela 4.22 que o atributo macroporosidade apresentou maior valor de F (14,77) e, conseqüentemente, menor valor de lambda de Wilks (0,59), sendo esse o primeiro atributo selecionado para entrar na análise pelo procedimento *stepwise*, esse atributo físico foi pareado com os demais, onde foi selecionado o atributo argila, como o segundo melhor atributo físico discriminante. Após dois passos, foram selecionados dois atributos físicos com significativo poder discriminante, como pode ser visto na Tabela 4.23.

Além disso, ainda com relação aos atributos físicos, ao analisar o valor do teste F na Tabela 4.22, nota-se que densidade é o segundo atributo físico com menor valor de lambda de Wilks e deveria ser selecionado na análise. No entanto, após os dois passos ele foi substituído pelo atributo argila. Isso ocorre, em razão de que, à medida que uma variável é selecionada e retirada do modelo, nova combinação é realizada, alterando os valores de F e, conseqüentemente a ordem da seleção.

Tabela 4.23 *Atributos Químicos e Físicos Incluídos/Excluídos da Análise por Meio do Procedimento Stepwise, Valores de Lambda de Wilks e Estatística F, para os Dados Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.*

Tipo	Passo	Atributo	Lambda de Wilks	F	Significância
Químico	1	Saturação de Bases (V)	0,21	76,96	0,00
	2	Potencial Hidrogeniônico (pH)	0,18	28,13	0,00
Físico	1	Macroporosidade (macro)	0,59	14,77	0,00
	2	Argila	0,47	9,50	0,00

Após a definição das variáveis discriminantes, procedeu-se a determinação das funções discriminantes importantes na análise das contribuições desses atributos. Neste estudo, como há três grupos, duas funções discriminantes são definidas para representar 100% da variância total, conforme apresenta a Tabela 4.24, nela nota-se que houve grande predominância da primeira função discriminante, que representa 99,86% em relação aos atributos químicos e 98,99% em relação aos atributos físicos da variância total explicada. Além disso, o valor alto do coeficiente de correlação canônica da primeira função, para os atributos químicos e físicos, indica alto grau de associação entre a primeira função discriminante e os grupos.

Tabela 4.24 *Autovalor, Percentual de Variância e Correlação Canônica das Funções Discriminantes para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaia, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.*

Tipo	Função	Autovalor	% de Variância	% Acumulado	Correlação Canônica
Químico	1	4,59	99,86	99,86	0,91
	2	0,01	0,14	100,00	0,08
Físico	1	1,12	98,99	98,99	0,73
	2	0,01	1,01	100,00	0,11

A partir da Tabela 4.25 pode-se observar quando as informações nas sucessivas funções discriminantes são retiradas, isto é, antes de nenhuma função ser retirada, o valor do lambda de Wilks igual a 0,18 e 0,47, em relação aos atributos químicos e físicos, respectivamente, indica que a primeira função discriminante é altamente significativa, isto é, pode-se observar por meio dos resultados da segunda função discriminante que há um decréscimo no poder discriminatório por conta do aumento no valor do lambda de Wilks.

Tabela 4.25 *Lambda de Wilks e χ^2 das Funções Discriminantes para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.*

Tipo	Teste de Função	Lambda de Wilks	χ^2	Significância
Químico	1 e 2	0,18	71,70	0,00
	2	0,99	0,27	0,60
Físico	1 e 2	0,47	31,60	0,00
	2	0,99	0,47	0,49

Conforme cada função discriminante foi gerada, segundo a magnitude do seu autovalor associado, as estatísticas lambda de Wilks e χ^2 (Tabela 4.25) avaliam a quantidade de informação discriminante não incorporada pelas funções procedentes. Neste sentido, ao nível de significância de 5%, o teste χ^2 indicou que a segunda função discriminante deveria ser eliminada do modelo, visto que somente a primeira função discriminante é significativa para separar as observações em grupos. A Tabela 4.26 apresenta os coeficientes padronizados da primeira função discriminante para cada um dos atributos químicos e físicos explicativos.

Tabela 4.26 *Coeficientes Padronizados das Funções Discriminantes para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.*

Tipo	Atributo Químico	Função Discriminante 1
Químico	Potencial Hidrogeniônico (pH)	0,53
	Saturação de Bases (V)	0,62
Físico	Argila	-0,61
	Macroporosidade (macro)	0,84

A Tabela 4.27 apresenta os coeficientes da função de classificação para os atributos químicos e físicos, que servem apenas para classificar observações e não tem qualquer

interpretação discriminante. Dessa maneira, cada amostra de solo será classificada no grupo em que o escore discriminante for maior.

Tabela 4.27 *Coefficientes de Classificação da Função Discriminante Linear de Fisher para os Dados de Atributos Químicos e Físicos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.*

Tipo	Atributo	Classificação do IQS		
		Bom	Regular	Ruim
Químico	Potencial Hidrogeniônico (pH)	64,57	58,77	54,54
	Saturação de Bases (V)	-0,41	-0,60	-0,81
	(Constante)	-197,26	-150,47	-122,76
Físico	Argila	375,21	350,38	327,70
	Macroporosidade (macro)	-17,83	37,00	115,75
	(Constante)	-283,18	-249,35	-232,67

Em relação a aplicação da análise discriminante para os atributos químico, como exemplo, considere uma amostra de solo com o grau de reação do potencial hidrogeniônico (pH) igual a 6,57 e percentual de saturação de bases (V) igual a 75,18%. Qual o possível grupo que pertenceria essa amostra de solo?

$$Bom = 64,57 \times 6,57 - 0,41 \times 75,18 - 197,26 = 196,11;$$

$$Regular = 58,77 \times 6,57 - 0,60 \times 75,18 - 150,47 = 190,34;$$

$$Ruim = 54,54 \times 6,57 - 0,81 \times 75,18 - 122,76 = 174,75.$$

Dessa forma, essa nova amostra de solo, com as características químicas mencionadas, pertenceria ao grupo bom do Índice de Qualidade de Solo em relação aos Atributos Químicos (IQSQ), visto que é neste grupo que se observa o maior valor da função de classificação.

A Tabela 4.28 mostra o resultado da classificação das amostras de solo pelo procedimento *stepwise* na análise discriminante. Nela, observa-se que 91,11% das amostras de solo

foram classificadas corretamente e que apenas 4 amostras foram classificadas de forma errada.

Tabela 4.28 *Quantidade e Percentual de Observações Classificadas pelo Procedimento Stepwise nos Três Grupos Determinados para os Dados de Atributos Químicos Coletados na Fazenda Barindaú, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.*

Classificação IQSQ		Reclassificação do IQSQ			Total
		Bom	Regular	Ruim	
Bom	Quantidade	5	1	0	6
	%	83,33	16,67	0,00	100,00
Regular	Quantidade	2	18	1	21
	%	9,52	85,71	4,76	100,00
Ruim	Quantidade	0	0	18	18
	%	0,00	0,00	100,00	100,00
Total		7	19	19	45

Nota: 91,11% das amostras originais foram classificadas corretamente.

Considerando agora a análise discriminante aplicada aos atributos físicos do solo, como exemplo, suponha uma amostra de solo com o percentual de argila igual a 32,84 e macroporosidade igual a $0,06 \text{ cm}^3/\text{cm}^{-3}$. Qual o possível grupo que pertenceria essa amostra de solo?

Conforme foi visto no início deste capítulo, os valores do atributo argila foram transformados a partir da aplicação da função $\log_{10}$, assim para o cálculo do escore discriminante deve-se aplicar a função $\log_{10}$ ao valor de argila da nova amostra que será classificada. Dessa maneira, $\log_{10} \text{argila} = \log_{10} 32,84 = 1,52$. Neste sentido, o escore discriminante dos três grupos é dado por,

$$\text{Bom} = 375,21 \times 1,52 - 17,83 \times 0,06 - 283,18 = 286,069;$$

$$\text{Regular} = 350,38 \times 1,52 + 37,00 \times 0,06 - 249,35 = 285,448;$$

$$\text{Ruim} = 327,70 \times 1,52 + 115,75 \times 0,06 - 232,67 = 272,379.$$

Dessa forma, essa nova amostra de solo, com as características físicas mencionadas, pertenceria ao grupo bom do Índice de Qualidade de Solo baseado nos Atributos Físicos (IQSF), visto que é neste grupo que se observa o maior valor dentre as funções de classificação.

A Tabela 4.29 mostra o resultado da classificação das amostras de solo pelo procedimento *stepwise* na análise discriminante. Onde pode-se observar que 95,56% das amostras de solo foram classificadas corretamente e que apenas 2 amostras foram classificadas de forma errada.

Tabela 4.29 *Quantidade e Percentual de Observações Classificadas pelo Procedimento Step-wise nos Três Grupos Determinados para os Dados de Atributos Físicos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.*

Classificação IQSQ		Reclassificação do IQSF			Total
		Bom	Regular	Ruim	
Bom	Quantidade	6	0	0	6
	%	100,00	0,00	0,00	100,00
Regular	Quantidade	1	35	1	37
	%	2,70	94,59	2,70	100,00
Ruim	Quantidade	0	0	2	2
	%	0,00	0,00	100,00	100,00
Total		7	35	3	45

Nota: 95,56% das amostras originais foram classificadas corretamente.

4.6.2 Análise Discriminante dos Atributos Químicos e Físicos Conjuntamente - Superfície do Solo (0 - 5 cm)

O teste de igualdade de médias dos grupos para os atributos químicos e físicos conjuntamente é apresentado na Tabela 4.30. Os resultados mostram que, para um nível de significância de 5%, os atributos saturação de bases, macroporosidade, potencial hidro-

geniônico, cálcio, alumínio, acidez potencial, potássio e microporosidade contribuem para a discriminação dos grupos. Além disso, pode-se perceber que os atributos saturação de bases, macroporosidade e potencial hidrogeniônico são os que mais discriminam os grupos, isto é, seus poderes de diferenciação dos grupos é superior, se comparado com os outros atributos.

Tabela 4.30 *Resultado do Teste de Igualdade de Médias dos Grupos para Seleção dos Atributos Químicos e Físicos Discriminantes Conjuntamente, para os Dados de Solo Coletados na Fazenda Barindaú, no Ano de 2009, para Profundidade de 0 – 5 cm.*

Tipo	Atributo	Lambda de Wilks	F	Significância
Químico	Potencial Hidrogeniônico (pH)	0,66	10,81	0,00
	Matéria Orgânica (MO)	1,00	0,04	0,97
	Fósforo (P)	0,94	1,45	0,25
	Potássio (K)	0,84	4,09	0,02
	Cálcio (Ca)	0,69	9,38	0,00
	Magnésio (Mg)	0,90	2,31	0,11
	Alumínio (Al)	0,71	8,74	0,00
	Acidez Potencial (H+Al)	0,72	8,15	0,00
	Saturação de Bases (V)	0,62	12,94	0,00
Físico	Areia	0,88	2,85	0,07
	Argila	0,92	1,86	0,17
	Silte	0,96	0,87	0,42
	Densidade (Ds)	0,93	1,61	0,21
	Resistência a Penetração (RP)	0,96	0,85	0,44
	Umidade Volumétrica (UV)	0,89	2,56	0,09
	Porosidade Total (ptotal)	0,94	1,41	0,26
	Macroporosidade (macro)	0,62	12,62	0,00
	Microporosidade (micro)	0,84	4,03	0,03

Na Tabela 4.30 o atributo saturação de bases apresentou maior valor de F (12,94) e, consequentemente, menor valor de lambda de Wilks (0,62), sendo esse o primeiro atributo selecionado para entrar na análise pelo procedimento *stepwise*, esse atributo foi pareado com os demais, um de cada vez, para selecionar o segundo melhor atributo discriminante e, assim, sucessivamente. Após os 3 passos, foram selecionadas 3 atributos com real poder de discriminação.

Analisando o valor do teste F na Tabela 4.30, nota-se que potencial hidrogeniônico é o terceiro atributo com maior valor e deveria ser selecionado na análise. No entanto, após os 3 passos ele foi substituído pelo atributo potássio. Isso ocorre, em razão de que, à medida que uma variável é selecionada e retirada do tabela, nova combinação é realizada, alterando os valores de F e, consequentemente a ordem da seleção.

Tabela 4.31 *Atributos Químicos e Físicos Incluídos/Excluídos da Análise por Meio do Procedimento Stepwise, Valores de Lambda de Wilks e Estatística F, para os Dados Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 cm.*

Passo	Atributo	Lambda de Wilks	F	Significância
1	Saturação de Bases (V)	0,62	12,94	0,00
2	Macroporosidade	0,44	10,52	0,00
3	Potássio (K)	0,34	9,64	0,00

Após a definição dos atributos discriminantes, o próximo passo é a determinação das funções discriminantes importantes na análise das contribuições desses atributos. Neste estudo, como há três grupos, duas funções discriminantes são definidas para representar 100% da variância total, conforme apresenta a Tabela 4.32, nela nota-se que houve grande predominância da primeira função discriminante, que representa 96,97% da variância total explicada. Além disso, o valor alto do coeficiente de correlação canônica da primeira função indica alto grau de associação entre a primeira função discriminante e os grupos.

Tabela 4.32 *Autovalor, Percentual de Variância e Correlação Canônica das Funções Discriminantes para os Dados de Atributos Químicos e Físicos para a Profundidade de 0 – 5 cm.*

Função	Autovalor	% de Variância	% Acumulado	Correlação Canônica
1	1,81	96,97	96,97	0,80
2	0,06	3,03	100,00	0,23

A partir da Tabela 4.33 pode-se observar como as informações nas sucessivas funções discriminantes são retiradas, isto é, antes de nenhuma função ser retirada, o valor do lambda de Wilks igual a 0,34, indica que a primeira função discriminante é altamente significativa, isto é, pode-se observar por meio dos resultados da segunda função discriminante que há um decréscimo no poder discriminatório por conta do aumento no valor do lambda de Wilks.

Tabela 4.33 *Lambda de Wilks e χ^2 das Funções Discriminantes para os Dados de Atributos Químicos e Físicos para Profundidade de 0 – 5 cm.*

Teste de Função	Lambda de Wilks	χ^2	Significância
1 e 2	0,34	44,62	0,00
2	0,95	2,25	0,32

Conforme cada função discriminante foi gerada, segundo a magnitude do seu autovalor associado, as estatísticas lambda de Wilks e χ^2 (Tabela 4.33) avaliam a quantidade de informação discriminante não incorporada pelas funções procedentes. Neste sentido, ao nível de significância de 5%, o teste χ^2 indicou que a segunda função discriminante deveria ser eliminada do modelo, visto que somente a primeira função discriminante é significativa para separar as observações em grupos.

A Tabela 4.34 apresenta os coeficientes padronizados da primeira função discriminante para cada um dos atributos químicos e físicos explicativos.

Tabela 4.34 *Coefficientes Padronizados das Funções Discriminantes para os Dados de Atributos Químicos e Físicos para Profundidade de 0 – 5 cm.*

Tipo	Atributo	Função Discriminante 1
Químico	Potássio (K)	0,68
	Saturação de Bases (V)	0,51
Físico	Macroporosidade (macro)	-0,89

A Tabela 4.35 apresenta os coeficientes da função de classificação, que servem apenas para classificar observações e não tem qualquer interpretação discriminante. Dessa maneira, cada amostra de solo será classificada no grupo em que o escore discriminante for maior.

Tabela 4.35 *Coefficientes de Classificação da Função Discriminante Linear de Fisher para os Dados de Atributos Químicos e Físicos para Profundidade de 0 – 5 cm.*

Tipo	Atributo	Classificação do IQSG		
		Bom	Regular	Ruim
Químico	Potássio (K)	-23,08	-32,99	-42,37
	Saturação de Bases (V)	0,31	0,19	0,11
Físico	Macroporosidade (macro)	121,14	167,75	249,65
	(Constante)	-23,64	-24,04	-41,07

Como exemplo, considere uma amostra de solo com teor de potássio (K) igual a $0,22 \text{ cmolc/dm}^{-3}$, percentual de saturação de bases (V) igual a 38,50% e macroporosidade igual a $0,12 \text{ cm}^3/\text{cm}^{-3}$. Qual o possível grupo que pertenceria essa amostra de solo?

Conforme foi visto no início deste capítulo, os valores do atributo potássio foram transformados a partir da aplicação da função $\log_{10}$, assim para o cálculo do escore discriminante deve-se aplicar a função $\log_{10}$ ao valor de potássio da nova amostra que será classificada. Dessa maneira, $\log_{10}K = \log_{10}0,22 = -0,66$. Neste sentido, o escore discriminante dos

três grupos é dado por,

$$\begin{aligned} Bom &= -23,08 \times -0,66 + 0,31 \times 38,50 + 121,14 \times 0,12 - 23,64 = 18,07; \\ Regular &= -32,99 \times -0,66 + 0,19 \times 38,50 + 167,75 \times 0,12 - 24,04 = 25,31; \\ Ruim &= -42,37 \times -0,66 + 0,11 \times 38,50 + 249,65 \times 0,12 - 41,07 = 21,00. \end{aligned}$$

Dessa forma, essa nova amostra de solo, com as características mencionadas, pertenceria ao grupo regular do Índice de Qualidade de Solo baseado nos Atributos Químicos e Físicos Conjuntamente (IQSG), visto que é neste grupo que se observa o maior valor das funções de classificação.

A Tabela 4.36 mostra o resultado da classificação dos atributos químicos e físicos das amostras de solo, analisados conjuntamente pelo procedimento *stepwise*. Nela, observa-se que 93,33% das amostras de solo foram classificadas corretamente e que apenas 3 amostras foram classificadas de forma errada.

Tabela 4.36 *Quantidade e Percentual de Observações Classificadas pelo Procedimento Stepwise nos Três Grupos Determinados para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaú, no Ano de 2009, para Profundidade de 0 – 5 cm.*

Classificação IQSG		Reclassificação do IQSG			Total
		Bom	Regular	Ruim	
Bom	Quantidade	2	0	0	2
	%	100,00	0,00	0,00	100,00
Regular	Quantidade	0	33	2	35
	%	0,00	94,29	5,71	100,00
Ruim	Quantidade	0	1	7	8
	%	0,00	12,50	87,50	100,00
Total		2	34	9	45

Nota: 93,33% das amostras originais foram classificadas corretamente.

4.7 Análise Discriminante - Profundidade do Solo (25 - 30 cm)

4.7.1 Análise Discriminante dos Atributos Químicos e Físicos Individualmente - Profundidade do Solo (25 - 30 cm)

Os resultados da Tabela 4.37 mostram que em relação aos atributos químicos, para um nível de significância de 5%, os atributos saturação de bases, alumínio, potencial hidrogeniônico, cálcio, acidez potencial e magnésio contribuem para a discriminação dos grupos. Além disso, pode-se perceber que os atributos saturação de bases, alumínio e potencial hidrogeniônico são os que mais discriminam os grupos, isto é, seus poderes de diferenciação dos grupos é superior, se comparado com os outros atributos químicos.

Além disso, também pode-se observar que quase todos os atributos físicos, com exceção de microporosidade, resistência a penetração e silte, contribuem para a discriminação dos grupos. Sendo que os atributos porosidade total e densidade são os que mais discriminam os grupos, isto é, seus poderes de diferenciação dos grupos é superior, se comparado com os outros atributos físicos.

Tabela 4.37 *Resultado do Teste de Igualdade de Médias dos Grupos para Seleção de Atributos Químicos e Físicos Discriminantes, de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.*

Tipo	Atributo	Lambda de Wilks	F	Significância
Químico	Potencial Hidrogeniônico (pH)	0,30	48,29	0,00
	Matéria Orgânica (MO)	0,95	1,02	0,37
	Fósforo (P)	0,98	0,47	0,63
	Potássio (K)	0,91	2,03	0,14
	Cálcio (Ca)	0,43	27,86	0,00
	Magnésio (Mg)	0,86	3,54	0,04
	Alumínio (Al)	0,29	51,51	0,00
	Acidez Potencial (H+Al)	0,46	24,31	0,00
	Saturação de Bases (V)	0,28	54,95	0,00
Físico	Areia	0,78	6,03	0,00
	Argila	0,81	5,02	0,01
	Silte	0,99	0,22	0,80
	Densidade (Ds)	0,50	20,81	0,00
	Resistência a Penetração (RP)	0,98	0,34	0,71
	Umidade Volumétrica (UV)	0,77	6,44	0,00
	Porosidade Total (ptotal)	0,50	20,81	0,00
	Macroporosidade (macro)	0,58	15,33	0,00
	Microporosidade (micro)	0,87	3,07	0,06

A partir Tabela 4.37, em relação aos atributos químicos, pode-se verificar que o atributo saturação de bases apresentou maior valor de F (54,95) e, conseqüentemente, menor valor de lambda de Wilks (0,28), sendo esse o primeiro atributo selecionado para entrar na análise pelo procedimento *stepwise*, esse atributo foi pareado com os demais, onde foi selecionado o atributo potencial hidrogeniônico, como o segundo melhor atributo químico discriminante, seguido do atributo magnésio. Após três passos foram selecionados três atributos com alto poder discriminante.

Já em relação aos atributos físicos, pode-se observar na Tabela 4.37 que os atributos porosidade total e densidade apresentam o maior valor de F (20,81) e, conseqüentemente, menor valor de lambda de Wilks (0,50), no entanto o primeiro atributo a ser selecionado para entrar na análise pelo procedimento *stepwise* foi densidade, em seguida esse atributo foi pareado com os demais, onde foi selecionado o atributo argila, como o segundo melhor atributo discriminante. Após cinco passos, foram selecionados cinco atributos físicos com alto poder discriminante, como pode ser visto na Tabela 4.38.

Analizando os valores do teste F na Tabela 4.37, nota-se que alumínio é o segundo atributo químico com maior valor e deveria ser selecionado na análise. No entanto, ele foi substituído pelo atributo magnésio. O mesmo ocorre com o atributo físico porosidade total, pois tem o mesmo valor de lambda de Wilks que densidade, no entanto este também não foi selecionado para entrar na análise. Isso ocorre, em razão de que, à medida que uma variável é selecionada e retirada do modelo, nova combinação é realizada, alterando os valores de F e, conseqüentemente a ordem da seleção.

A partir da Tabela 4.39 nota-se que houve predominância da primeira função discriminante, que representa 90,12% da variância total explicada em relação aos atributos químicos e 82,18% em relação aos atributos físicos. Além disso, o valor do coeficiente de correlação canônica das funções indica o grau de associação entre as funções discriminantes e os grupos.

Tabela 4.38 *Atributos Químicos e Físicos Incluídos/Excluídos da Análise por Meio do Procedimento Stepwise, Valores de Lambda de Wilks e Estatística F, para os Dados de Solos Coletados na Fazenda Barindaú, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.*

Tipo	Passo	Atributo	Lambda de Wilks	F	Significância
Químico	1	Saturação de Bases (V)	0,28	54,95	0,00
	2	Potencial Hidrogeniônico (pH)	0,21	24,54	0,00
	3	Magnésio (Mg)	0,15	21,48	0,00
Físico	1	Densidade (Ds)	0,50	20,81	0,00
	2	Argila	0,36	13,55	0,00
	3	Macroporosidade (macro)	0,27	12,25	0,00
	4	Microporosidade (micro)	0,20	11,85	0,00
	5	Umidade Volumétrica (UV)	0,17	10,92	0,00

Tabela 4.39 *Autovalor, Percentual de Variância e Correlação Canônica das Funções Discriminantes para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaú, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.*

Tipo	Função	Autovalor	% de Variância	% Acumulado	Correlação Canônica
Químico	1	3,81	90,12	90,12	0,89
	2	0,42	9,88	100,00	0,54
Físico	1	2,73	82,18	82,18	0,86
	2	0,59	17,82	100,00	0,61

A partir da Tabela 4.40 pode-se observar como as informações na sucessivas funções discriminantes são retiradas, isto é, antes de nenhuma função ser retirada, o valor do lambda de Wilks igual a 0,15 e 0,17 para os atributos químicos e físicos, respectivamente, indica que a primeira função discriminante é altamente significativa, isto é, pode-se observar por meio dos resultados da segunda função discriminante que há um decréscimo no poder

discriminatório por conta do aumento no valor do lambda de Wilks, no entanto o valor do teste χ^2 da segunda função indica que a mesma continua contendo poder de discriminação.

Tabela 4.40 *Lambda de Wilks e χ^2 das Funções Discriminantes para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.*

Tipo	Teste de Função	Lambda de Wilks	χ^2	Significância
Químico	1 e 2	0,15	78,70	0,00
	2	0,71	14,31	0,00
Físico	1 e 2	0,17	71,25	0,00
	2	0,63	18,59	0,00

A Tabela 4.41 apresenta os coeficientes padronizados das funções discriminantes para cada um dos atributos químicos e físicos explicativos.

Tabela 4.41 *Coeficientes Padronizados das Funções Discriminantes para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.*

Tipo	Atributo	Função Discriminante	
		1	2
Químico	Potencial hidrogeniônico (pH)	0,79	0,94
	Magnésio (Mg)	0,41	1,06
	Saturação de Bases (V)	0,40	-1,10
Físico	Argila	1,10	0,42
	Densidade (Ds)	0,12	2,60
	Umidade Volumétrica (UV)	0,61	0,41
	Macroporosidade (macro)	1,25	3,16
	Microporosidade (micro)	0,47	1,77

A Tabela 4.42 apresenta os coeficientes da função de classificação da análise discriminante aplicada aos dados de atributos químicos e físicos de solos coletados na fazenda Barindaua, que servem apenas para classificar observações e não tem qualquer interpretação discriminante. Dessa maneira, cada amostra de solo será classificada no grupo em que o escore discriminante for maior.

Tabela 4.42 *Coeficientes de Classificação da Função Discriminante Linear de Fisher para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.*

Tipo	Atributo	Classificação do IQSQ		
		Bom	Regular	Ruim
Químico	Potencial Hidrogeniônico (pH)	10902,46	10530,27	10477,35
	Magnésio (Mg)	364,12	348,12	349,91
	Saturação de Bases (V)	-427,78	-427,29	-443,81
	(Constante)	-4541,12	-4212,02	-4149,17
Físico	Argila	12,76	12,35	11,57
	Densidade (Ds)	2227,36	2315,22	2277,66
	Umidade Volumétrica (UV)	714,44	708,04	683,31
	Macroporosidade (macro)	988,56	1010,81	981,10
	Microporosidade (micro)	5910,24	6057,22	5926,19
	(Constante)	-2938,96	-3058,49	-2922,75

Para a análise discriminante aplicada aos dados de atributos químicos, como exemplo, considere uma amostra de solo com o grau de reação do potencial hidrogeniônico (pH) igual a 5,86, teor de magnésio (Mg) igual a $0,60 \text{ cmolc/dm}^{-3}$ e percentual de saturação de bases (V) igual a 48,83%. Qual o possível grupo que pertenceria essa amostra de solo?

Conforme foi visto no início deste capítulo, os valores do grau de reação do potencial hidrogeniônico foram transformados, assim para o cálculo do escore discriminante deve-se aplicar a função $\log_{10}$ e em seguida a transformação de Box-Cox com $\lambda = 0,5$ aos valores do potencial hidrogeniônico da nova amostra que será classificada, isto é,

$pH^* = (\log_{10} pH)^{0,5} = (0,77)^{0,5} = 0,88$. Para o atributo magnésio foi realizada também a transformação de Box-Cox com $\lambda = 0,5$, assim $Mg^* = (0,60)^{0,5} = 0,77$ e para o atributo saturação de bases foi aplicado o $\log_{10}$, então $V^* = \log_{10} 48,83 = 1,96$. Neste sentido, o escore discriminante dos três grupos é dado por,

$$Bom = 10902,46 \times 0,88 + 364,12 \times 0,77 - 427,78 \times 1,69 - 4541,12 = 4610,48;$$

$$Regular = 10530,27 \times 0,88 + 348,12 \times 0,77 - 427,29 \times 1,69 - 4212,02 = 4600,54;$$

$$Ruim = 10477,35 \times 0,88 + 349,91 \times 0,77 - 443,81 \times 1,69 - 4149,17 = 4590,29.$$

Dessa forma, essa nova amostra de solo, com as características químicas mencionadas, pertenceria ao grupo bom do Índice de Qualidade de Solo em relação aos Atributos Químicos (IQSQ), visto que é neste grupo que se observa o maior valor das funções de classificação.

A Tabela 4.43 mostra o resultado da classificação das amostras de solo pelo procedimento *stepwise*. Nela observa-se que 95,56% das amostras de solo foram classificadas corretamente, isto é, apenas duas amostras foram classificadas de forma errada.

Tabela 4.43 *Quantidade e Percentual de Observações Classificadas pelo Procedimento Stepwise nos Três Grupos Determinados para os Dados de Atributos Químicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.*

Classificação IQSQ		Reclassificação do IQSQ			Total
		Bom	Regular	Ruim	
Bom	Quantidade	6	0	0	6
	%	100,00	0,00	0,00	100,00
Regular	Quantidade	0	23	0	23
	%	0,00	100,00	0,00	100,00
Ruim	Quantidade	0	2	14	16
	%	0,00	12,50	87,50	100,00
Total		6	25	14	45

Nota: 96,56% das amostras originais foram classificadas corretamente.

Com base na análise discriminante aplicada aos dados de atributos físicos, como exemplo, considere uma amostra de solo com percentual de argila igual a 31,52, densidade (Ds) igual a $1,61 \text{ g/cm}^{-3}$, umidade volumétrica (UV) igual $0,36 \text{ cm}^3/\text{cm}^{-3}$, macroporosidade (macro) igual $0,04 \text{ cm}^3/\text{cm}^{-3}$ e microporosidade (micro) igual a $0,35 \text{ cm}^3/\text{cm}^{-3}$. Qual o possível grupo que pertenceria essa amostra de solo?

Como foi aplicado a transformação de Box-Cox com $\lambda = -0,5$ aos valores da umidade volumétrica, para o cálculo do escore discriminante deve-se aplicar esta transformação aos valores originais da umidade volumétrica da nova amostra que será classificada, isto é, $UV^* = (0,36)^{-0,5} = 1,67$ e, para o atributo macroporosidade foi aplicado o $\log_{10}$, então $macro^* = \log_{10}0,04 = -1,40$. Neste sentido, o escore discriminante dos três grupos é dado por,

$$Bom = 12,76 \times 31,52 + 2227,36 \times 1,61 + 714,44 \times 1,67 + 988,56 \times -1,40 + 5910,24 \times 0,35 - 2938,96 = 2926,76;$$

$$Regular = 12,35 \times 31,52 + 2315,22 \times 1,61 + 708,04 \times 1,67 + 1010,81 \times -1,40 + 6057,22 \times 0,35 - 3058,49 = 2945,39;$$

$$Ruim = 11,57 \times 31,52 + 2277,66 \times 1,61 + 683,31 \times 1,67 + 981,10 \times -1,40 + 5926,19 \times 0,35 - 2922,75 = 2950,51.$$

Dessa forma, essa nova amostra de solo, com as características físicas mencionadas, pertenceria ao grupo ruim do Índice de Qualidade do Solo em relação aos Atributos Físicos (IQSF), visto que é neste grupo que se observa o maior valor das funções de classificação.

A Tabela 4.44 mostra o resultado da classificação das amostras de solo pelo procedimento *stepwise*. Observa-se que 95,56% das amostras de solo foram classificadas corretamente e que apenas duas amostras foram classificadas de forma errada.

Tabela 4.44 *Quantidade e Percentual de Observações Classificadas pelo Procedimento Stepwise nos Três Grupos Determinados para os Dados de Atributos Físicos de Solos, Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.*

Classificação IQSF		Reclassificação do IQSF			Total
		Bom	Regular	Ruim	
Bom	Quantidade	2	1	0	3
	%	66,67	33,33	0,00	100,00
Regular	Quantidade	0	29	1	30
	%	0,00	96,67	3,33	100,00
Ruim	Quantidade	0	0	12	12
	%	0,00	0,00	100,00	100,00
Total		2	30	13	45

Nota: 95,56% das amostras originais foram classificadas corretamente.

4.7.2 Análise Discriminante dos Atributos Químicos e Físicos Conjuntamente - Profundidade do Solo de 25-30 cm

O teste de igualdade de médias dos grupos para os atributos químicos e físicos é apresentado na Tabela 4.45. Os resultados mostram que os atributos magnésio, acidez potencial, alumínio e saturação de bases são que mais contribuem para a discriminação dos grupos, destacando-se os atributos magnésio e acidez potencial, pois seus poderes de diferenciação dos grupos é superior, se comparado com os outros atributos.

Tabela 4.45 *Resultado do Teste de Igualdade de Médias dos Grupos para Seleção de Variáveis Discriminantes para os Dados de Atributos Químicos e Físicos Conjuntamente de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.*

Tipo	Atributo	Lambda de Wilks	F	Significância
Químico	Potencial hidrogeniônico (pH)	0,87	3,09	0,06
	Matéria Orgânica (MO)	0,96	0,77	0,47
	Fósforo (P)	0,95	1,07	0,35
	Potássio (K)	0,99	0,23	0,79
	Cálcio (Ca)	0,90	2,41	0,10
	Magnésio (Mg)	0,53	18,94	0,00
	Alumínio (Al)	0,71	8,69	0,00
	Acidez Potencial (H+Al)	0,59	14,55	0,00
	Saturação de Bases (V)	0,74	7,48	0,00
Físico	Areia	0,92	1,82	0,17
	Argila	0,96	0,81	0,45
	Silte	0,98	0,51	0,60
	Densidade (Ds)	0,88	2,75	0,08
	Resistência a Penetração (RP)	0,97	0,67	0,52
	Umidade Volumétrica (UV)	0,89	2,69	0,08
	Porosidade Total (ptotal)	0,88	2,75	0,08
	Macroporosidade (macro)	0,93	1,61	0,21
	Microporosidade (micro)	0,99	0,26	0,77

Na Tabela 4.45 o atributo magnésio apresentou maior valor de F (18,94) e, consequentemente, menor valor de lambda de Wilks (0,53), sendo esse o primeiro atributo selecionado para entrar na análise pelo procedimento *stepwise*, esse atributo foi pareado com os demais, um de cada vez, para selecionar o segundo melhor atributo discriminante e, assim, sucessivamente. Após os três passos, foram selecionadas três atributos com real poder de discriminação.

Analizando o valor do teste F na Tabela 4.30, nota-se que alumínio é o terceiro atributo com maior valor e deveria ser selecionado na análise. No entanto, após os três passos ele foi substituído pelo atributo densidade. Isso ocorre, em razão de que, à medida que uma variável é selecionada e retirada do tabela, nova combinação é realizada, alterando os valores de F e, conseqüentemente a ordem da seleção.

Tabela 4.46 *Atributos Químicos e Físicos Incluídos/Excluídos da Análise por Meio do Procedimento Stepwise, Valores de Lambda de Wilks e Estatística F , para os Dados de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.*

Passo	Atributo	Lambda de Wilks	F	Significância
1	Magnésio (Mg)	0,53	18,94	0,00
2	Acidez Potencial (H+Al)	0,31	16,62	0,00
3	Densidade (Ds)	0,24	13,69	0,00

Na Tabela 4.47, observa-se que a primeira função discriminante representa 74,33% da variância total explicada. Além disso, os valores dos coeficientes de correlação canônica da funções indicam o grau de associação entre as funções discriminantes e os grupos.

Tabela 4.47 *Autovalor, Percentual de Variância e Correlação Canônica das Funções Discriminantes para os Dados de Atributos Químicos e Físicos Conjuntamente de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.*

Função	Autovalor	% de Variância	% Acumulado	Correlação Canônica
1	1,63	74,33	74,33	0,79
2	0,56	25,67	100,00	0,60

A partir da Tabela 4.48 pode-se observar como as informações nas sucessivas funções discriminantes são retiradas, isto é, antes de nenhuma função ser retirada, o valor do lambda de Wilks igual a 0,24, indica que a primeira função discriminante é significativa, isto é, pode-se observar por meio dos resultados da segunda função discriminante que há

um decréscimo no poder discriminatório por conta do aumento no valor do lambda de Wilks.

Tabela 4.48 *Lambda de Wilks e χ^2 das Funções Discriminantes para os Dados de Atributos Químicos e Físicos Conjuntamente de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.*

Teste de Função	Lambda de Wilks	χ^2	Significância
1 e 2	0,24	57,93	0,00
2	0,64	18,30	0,00

A Tabela 4.49 apresenta os coeficientes padronizados da primeira função discriminante para cada um dos atributos químicos e físicos explicativos.

Tabela 4.49 *Coeficientes Padronizados das Funções Discriminantes para os Dados de Atributos Químicos e Físicos Conjuntamente de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.*

Tipo de Atributo	Atributo	Função Discriminante	
		1	2
Químico	Magnésio (Mg)	-0,64	0,79
	Acidez Potencial (H+Al)	0,87	0,57
Físico	Densidade (Ds)	0,51	0,44

A Tabela 4.35 apresenta os coeficientes da função de classificação, que servem apenas para classificar observações e não tem qualquer interpretação discriminante. Dessa maneira, cada amostra de solo será classificada no grupo em que o escore de discriminate for maior.

Tabela 4.50 *Coeficientes de Classificação da Função Discriminante Linear de Fisher para os Dados de Atributos Químicos e Físicos Conjuntamente de Solos Coletados na Fazenda Barindaú, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.*

Tipo de Atributo	Atributo	Classificação do IQSG		
		Bom	Regular	Ruim
Químico	Magnésio (Mg)	66,40	24,78	21,03
	Acidez Potencial (H+Al)	16,79	20,59	25,53
Físico	Densidade (Ds)	180,52	188,98	206,70
	(Constante)	-196,87	-176,05	-220,14

Como exemplo, considere uma amostra de solo com teor de magnésio (Mg) igual a $0,50 \text{ cmolc/dm}^{-3}$, teor de acidez potencial (H+Al) igual a $2,78 \text{ cmolc/dm}^{-3}$ e densidade (Ds) igual $1,36 \text{ g/cm}^{-3}$. Qual o possível grupo que pertenceria essa amostra de solo?

Como foi aplicado a transformação de Box-Cox com $\lambda = 0,5$ aos valores originais de magnésio, para o cálculo do escore discriminante deve-se aplicar esta transformação aos valores originais de magnésio da nova amostra que será classificada, isto é, $Mg^* = (0,50)^{0,5} = 0,71$. O escore discriminante dos três grupos é obtido por,

$$\begin{aligned}
 \text{Bom} &= 66,40 \times 0,71 + 16,79 \times 2,78 + 180,52 \times 1,36 - 196,87 = 142,26; \\
 \text{Regular} &= 24,78 \times 0,71 + 20,59 \times 2,78 + 188,98 \times 1,36 - 176,05 = 155,73; \\
 \text{Ruim} &= 21,03 \times 0,71 + 25,53 \times 2,78 + 206,70 \times 1,36 - 220,14 = 146,82.
 \end{aligned}$$

Dessa forma, essa nova amostra de solo, com as características mencionadas, pertenceria ao grupo regular do Índice de Qualidade de Solo Geral (IQSG), visto que é neste grupo que se observa o maior valor das funções de classificação.

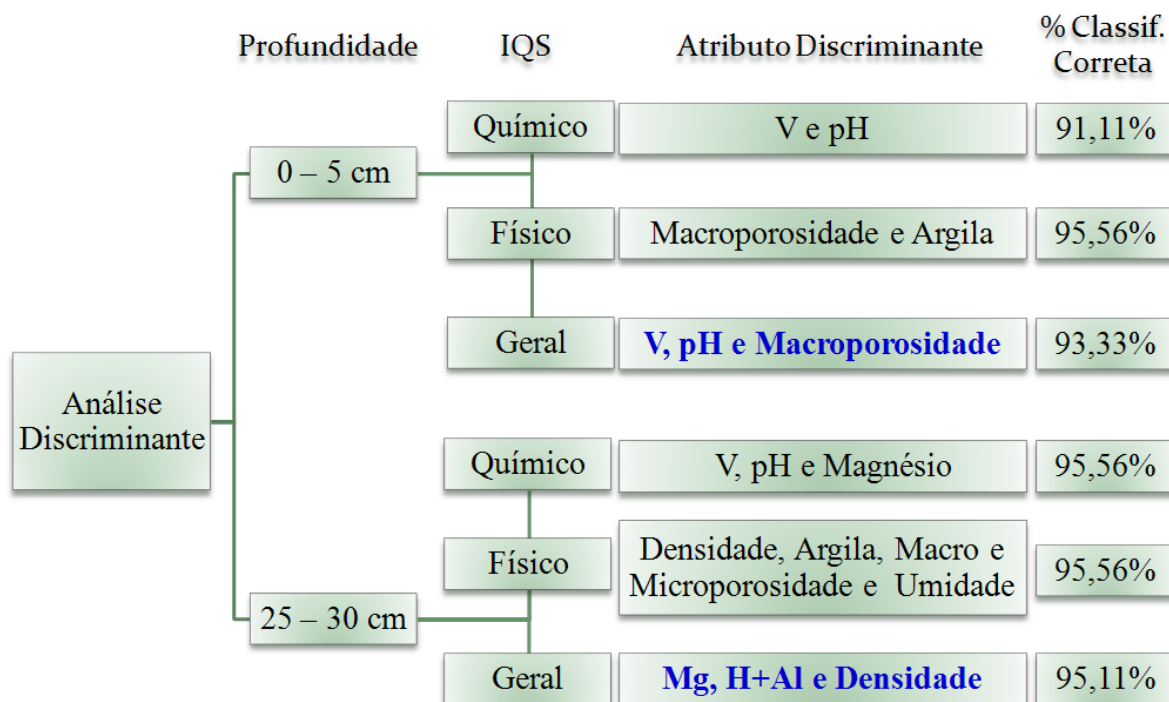
A Tabela 4.51 mostra o resultado da classificação das amostras de solo pelo procedimento *stepwise*. Nela, observa-se que 95,56% das amostras de solo foram classificadas corretamente e que apenas duas amostras foram classificadas de forma errada.

Tabela 4.51 *Quantidade e Percentual de Observações Classificadas pelo Procedimento Stepwise nos Três Grupos Determinados para os Dados de Atributos Químicos e Físicos de Solos Coletados na Fazenda Barindaua, no Ano de 2009, para a Profundidade de 25 – 30 cm.*

Classificação IQSG		Reclassificação do IQSG			Total
		Bom	Regular	Ruim	
Bom	Quantidade	1	0	0	1
	%	100,00	0,00	0,00	100,00
Regular	Quantidade	0	36	0	36
	%	0,00	100,00	0,00	100,00
Ruim	Quantidade	0	2	6	8
	%	0,00	25,00	75,00	100,00
Total		1	38	6	45

Nota: 95,56% das amostras originais foram classificadas corretamente.

A Figura 4.5 apresenta o resumo dos resultados apresentados nas Seções 4.6 e 4.7, isto é, os resultados na análise discriminante aplicada aos dados de atributos químicos, físicos e químicos e físicos conjuntamente, de solos coletados na fazenda Barindaua, no ano de 2009, para a profundidade de 0 – 5 cm e 25 – 30 cm. Com base nesta figura pode-se verificar que para a profundidade de 0 – 5 cm, em relação ao Índice de Qualidade do Solo baseado nos Atributos Químicos (IQSQ), os atributos que mais discriminam os grupos são saturação de bases e potencial hidrogeniônico, em que 91,11% das observações foram classificadas corretamente pelo procedimento *stepwise* nos três grupos determinados (bom, regular e ruim). A interpretação é a mesma para os demais índices e profundidades.



Nota: V = Saturação de Bases; pH = Potencial Hidrogeniônico; Mg = Magnésio; H+Al = Acidez Potencial.

Figura 4.5 *Resumo dos Resultados da Análise Discriminante Aplicada aos Dados de Atributos Químicos, Físicos e Químicos e Físicos Conjuntamente de Solos Coletados na Fazenda Barindaú, no Ano de 2009, para a Profundidade de 0 – 5 e 25 – 30 cm.*

Capítulo 5

Considerações Finais e Recomendações

Este capítulo apresenta na Seção 5.1 as considerações finais e na 5.2 algumas recomendações para trabalhos futuros.

5.1 Considerações Finais

A avaliação da qualidade do solo pode ser realizada pelo monitoramento de seus atributos ou características físicas, químicas e biológicas. Neste contexto, este trabalho teve por objetivo estabelecer índices de qualidade do solo para plantação de Açaí, a partir de métodos estatísticos multivariados. Assim, inicialmente realizou-se a aplicação da técnica análise fatorial, onde pôde-se estimar os escores fatoriais, a partir dos quais se determinou o Índice de Qualidade de Solo baseado nos dados de Atributos Químicos (IQSQ), Físicos (IQSF) e Químicos e Físicos Conjuntamente (IQSG) do solo, para as profundidades de 0–5 cm e 25 – 30 cm, com a finalidade de classificar os solos de acordo com as características dos seus atributos.

A análise fatorial agrupou os atributos químicos, para profundidade de 0 – 5 cm, que influenciam na qualidade do solo, em duas dimensões fatoriais, explicando 82,73% da variância total dos dados. O primeiro fator, denominado de Acidez da Solução do Solo, englobou os seguintes atributos: saturação por base (V), acidez potencial (H+Al), potencial hidrogeniônico (pH), alumínio (Al) e cálcio (Ca); ao segundo fator, chamado de Macronutrientes, foram associados os atributos fósforo (P) e potássio (K). A partir da estimação dos escores fatoriais pôde-se obter o Índice de Qualidade de Solo baseado nos dados de Atributos Químicos (IQSQ), onde observou-se que a maior parte das amostras de solo de plantação de Açaí apresentou qualidade de solo regular, em função da baixa magni-

tude e/ou sinal negativo dos escores fatoriais relativos a cada fator. Observou-se também que 6 amostras de solo apresentaram alto IQSQ, sendo classificadas com qualidade boa. Estes solos podem servir como base para melhorar os solos de qualidade inferior.

Em relação a aplicação da análise fatorial aos dados de atributos físicos, para profundidade de 0 – 5 cm, observou-se que foram retidos três fatores que explicam 93,25% da variância dos dados originais. O primeiro fator, denominado de Aeração do Solo, englobou os seguintes atributos: densidade (Ds), porosidade total (ptotal) e macroporosidade (macro); ao segundo fator, chamado de Umidade do Solo, foram associados os atributos umidade volumétrica (UV) e microporosidade (micro); enquanto que o terceiro fator denominado de Granulometria, foi definido pelos atributos argila e areia. Em seguida a partir dos escores estimados foi possível determinar o Índice de Qualidade de Solo baseado nos Atributos Físicos (IQSF), em que pôde-se constatar que 6 amostras de solo apresentam boa qualidade, os escores dessas amostras de solos apresentam valores positivos e altos, exceto o Solo 29 no Fator 2 e o Solo 47 no fator 3. Além disso, 37 amostras de solos apresentam qualidade regular e 2 amostras de solos apresentam qualidade ruim, nas amostras desses solos os escores fatoriais são negativos em pelo menos dois fatores.

A partir dos escores fatoriais originais e padronizados obtidos para os atributos químicos e físicos, foi possível calcular o Índice de Qualidade do Solo Geral (IQSG), com o objetivo de classificar os solos de modo geral, de acordo com o desempenho dos seus atributos químicos e físicos conjuntamente. Assim, verificou-se que 2 amostras de solo apresentaram boa qualidade, 35 amostras de solo apresentaram qualidade regular e 8 amostras de solos apresentaram qualidade ruim, mostrando que essas amostras de solos precisam passar por algum processo de correção.

Assim, como para profundidade de 0 – 5 cm, foi realizada a aplicação da análise fatorial para os dados de atributos químicos e físicos das amostras de solos coletadas na profundidade de 25 – 30 cm. Para análise dos atributos químicos foram retidos dois fatores que explicam 88,29% da variância dos dados originais. O primeiro fator, denominado de Acidez da Solução do Solo 2, foi definido pelos atributos alumínio (Al), potencial hidrogeniônico (pH), cálcio (Ca), saturação por base (V), e acidez potencial (H+Al), enquanto que o fator

2, discrimina apenas o atributo magnésio (Mg), este fator chamado de Teor de Magnésio, explica 18,05% da variância total dos dados.

Em relação a análise dos atributos físicos também foram retidos dois fatores, os mesmos explicam 79,10% da variância total dos dados originais, onde o primeiro fator, denominado de Conexão de Poros do Solo, englobou os atributos: macroporosidade (macro), porosidade total (ptotal), umidade volumétrica (UV) e microporosidade (micro); já o segundo fator denominado de Granulometria 2, foi definido pelos atributos argila e areia. A partir dos escores fatoriais estimados e fazendo-se a padronização desses escores originais, foi possível obter os escores fatoriais padronizados, com base nos quais pôde-se determinar o Índice de Qualidade de Solo baseado nos dados de Atributos Químicos (IQSQ), Físicos (IQSF) e Químicos e Físicos Conjuntamente (IQSG) para profundidade de 25 – 30 cm.

Com base nos resultados obtidos para o IQSQ para profundidade de 25 – 30 cm, conclui-se que 6 amostras de solo apresentaram boa qualidade, 23 amostras de solos apresentaram qualidade classificada como regular, 18 amostras de solos apresentam IQSQ inferior a 0,35, ou seja, qualidade ruim, na maioria das amostras desses solos, existe um ou dois fatores com escore fatorial negativo. Já os resultados do IQSF para profundidade de 25 – 30 cm, mostrou que 3 amostras de solo apresentaram boa qualidade, 30 amostras de solo apresentaram qualidade classificada com regular e 12 amostras foram classificadas com qualidade ruim.

A partir dos escores fatoriais originais e padronizados obtidos para os atributos químicos e físicos, foi possível calcular o Índice de Qualidade do Solo Geral (IQSG), isto é, com base nesses escores fatoriais pôde-se determinar o índice de qualidade do solo baseado nos atributos químicos e físicos conjuntamente para profundidade de 25 – 30 cm. Os resultados mostraram que apenas 1 amostra de solo apresenta boa qualidade, 36 amostras foram classificadas como regular e 8 amostras de solos apresentaram qualidade ruim.

Realizada a aplicação da análise fatorial e a construção dos Índices de Qualidade do Solo baseado nos dados de Atributos Químicos (IQSQ), Físicos (IQSF) e Químicos e Físicos Conjuntamente (IQSG), para as profundidades de 0 – 5 cm e 25 – 30 cm. A próxima etapa consistiu na aplicação da técnica análise discriminante realizada com o objetivo de validar os resultados obtidos na construção dos índices, bem como, conhecer entre os atributos

químicos e físicos do solo, quais influenciam e estão associados a qualidade do solo de plantação de Açaí.

De acordo com os resultados obtidos na análise discriminante para profundidade de 0 – 5 cm, pôde-se observar que entre os atributos químicos, saturação por base (V) e potencial hidrogeniônico (pH), são os atributos que mais discriminam os grupos, isto é, seus poderes de diferenciação dos grupos é superior, se comparado com os outros atributos. Já em relação aos atributos físicos pôde-se perceber que os atributos macroporosidade (macro) e argila são os que mais discriminam os grupos. Quando aplicada a análise discriminante para os atributos químicos e físicos conjuntamente, observou-se que os atributos saturação por base (V), macroporosidade (macro) e potencial hidrogeniônico (pH) são os melhores atributos discriminantes, isto é, se apenas alguns atributos do solo forem utilizados para monitoramento da qualidade do solo de plantação de Açaí, para profundidade de 0 – 5 cm, saturação por base (V), macroporosidade (macro) e potencial hidrogeniônico (pH), devem ser selecionados.

Com base nos resultados obtidos na análise discriminante para profundidade de 25 – 30 cm, percebeu-se que entre os atributos químicos, saturação por base (V), potencial hidrogeniônico (pH) e Magnésio (Mg) são os atributos com maiores poderes discriminantes. Em relação aos atributos físicos pôde-se perceber que os atributos densidade (Ds), argila, macroporosidade (macro), microporosidade (micro) e umidade volumétrica (UV) são os atributos que mais discriminam os grupos. Já para a aplicação da análise discriminante para os atributos químicos e físicos conjuntamente, observou-se que os atributos magnésio (Mg), acidez potencial (H+Al) e densidade (Ds) são os atributos com maiores poderes discriminantes.

Na aplicação da análise discriminante observou-se também pelo resultado da classificação das amostras de solo pelo procedimento *stepwise* que mais de 90% das amostras de solo foram classificadas corretamente em relação aos atributos químicos, físicos e, químicos e físicos conjuntamente, para as profundidades de 0 – 5 cm e 25 – 30 cm, comprovando a viabilidade da análise multivariada na classificação da qualidade de solos para plantação de Açaí.

5.2 Recomendações

Recomenda-se para trabalhos futuros:

- i)* Aplicar a metodologia utilizada nesta dissertação para estudar a qualidade de solo em outras culturas, como exemplo, plantação de laranja e pimenta-do-reino;
- ii)* Utilizar a geoestatística para georreferenciar os solos segundo a classificação de qualidade obtida a partir do índice de qualidade do solo baseado nos dados químicos (IQSQ), físicos (IQSF) e químicos e físicos conjuntamente (IQSG);
- iii)* Avaliar a qualidade do solo a partir do monitoramento de atributos ou características biológicas separadamente, e em seguida realizar as análises considerando os atributos químicos, físicos e biológicos conjuntamente.

Anexo

Tabela 1 *Valores Críticos de D_c no Teste de Kolmogorov-Smirnov tal que $P(D_{cal} > D_c) = \alpha$.*

N	Nível de Significância α					N	Nível de Significância α				
	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01		0,20	0,10	0,05	0,02	0,01
1	0,90	0,95	0,98	0,99	1,00	21	0,23	0,26	0,29	0,32	0,34
2	0,68	0,78	0,84	0,90	0,93	22	0,22	0,25	0,28	0,31	0,34
3	0,57	0,64	0,71	0,79	0,83	23	0,22	0,25	0,28	0,31	0,33
4	0,49	0,57	0,62	0,69	0,73	24	0,21	0,24	0,27	0,30	0,32
5	0,45	0,51	0,56	0,63	0,67	25	0,21	0,24	0,26	0,30	0,32
6	0,41	0,47	0,52	0,58	0,62	26	0,20	0,23	0,26	0,29	0,31
7	0,38	0,44	0,48	0,54	0,58	27	0,20	0,23	0,25	0,28	0,31
8	0,36	0,41	0,45	0,41	0,54	28	0,20	0,23	0,25	0,28	0,30
9	0,34	0,39	0,43	0,48	0,51	29	0,19	0,22	0,25	0,28	0,30
10	0,32	0,37	0,41	0,46	0,49	30	0,19	0,22	0,24	0,27	0,29
11	0,31	0,35	0,39	0,44	0,47	31	0,19	0,21	0,24	0,27	0,29
12	0,30	0,34	0,38	0,42	0,45	32	0,18	0,21	0,23	0,26	0,18
13	0,29	0,33	0,36	0,40	0,43	33	0,18	0,21	0,23	0,26	0,28
14	0,28	0,31	0,35	0,39	0,42	34	0,18	0,21	0,23	0,25	0,27
15	0,27	0,30	0,34	0,38	0,40	35	0,18	0,20	0,22	0,25	0,27
16	0,26	0,30	0,33	0,37	0,39	36	0,17	0,20	0,22	0,25	0,27
17	0,25	0,29	0,32	0,36	0,38	37	0,17	0,20	0,22	0,24	0,26
18	0,24	0,28	0,31	0,35	0,37	38	0,17	0,19	0,22	0,24	0,26
19	0,24	0,27	0,30	0,34	0,36	39	0,17	0,19	0,21	0,24	0,26
20	0,23	0,27	0,29	0,33	0,35	40	0,17	0,19	0,21	0,24	0,25
Acima de 50	$\frac{1,07}{\sqrt{N}}$	$\frac{1,22}{\sqrt{N}}$	$\frac{1,36}{\sqrt{N}}$	$\frac{1,52}{\sqrt{N}}$	$\frac{1,63}{\sqrt{N}}$	-	-	-	-	-	-

Fonte: Fávero *et al.* (2009).

Nota: N é o Tamanho da Amostra.

Referências Bibliográficas

- AMARAL, N.D. Noções de Conservação do Solo. 2.ed. São Paulo: Nobel, 1984. 120 p.
- ARAÚJO, R.; GOEDERT, W.J.; LACERDA, M.P.C. Qualidade do Solo sob Diferentes Usos e sob Cerrado Nativo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. *n.* 31, *p.* 1099-1108. 2007.
- BLACK, C.A. Soil Plant Relationships. Ames: Iowa State University, *p.* 365-402, 1967.
- BOUDOT, J.P.; BEL HADJ, B.A.; CHONE, T.; HADJ, B.A.B. Carbon Mineralization in Andosols and Aluminum-Rich Highland Soils. *Soil Biol. Biochem.*, *n.* 18, *p.* 457-461, 1986.
- BRADY, N.C. Natureza e Propriedades dos Solos. 7.ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989.
- BRUGGEN, A.H.C.; SEMENOV, A.M. In Search of Biological Indicators for Soil Health and Disease Suppression. *Applied Soil Ecology*. Amsterdam, *v.* 15, *n.* 1, *p.* 13-24, 2000.
- CARVALHO, R.; GOEDERT, J.W.; ARMANDO, M.S. Atributos Físicos da Qualidade de um Solo sob Sistema Agroflorestal. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. Brasília, *v.* 39, *n.* 11, *p.* 1153-1155, nov. 2004.
- CARVALHO, D.F.; SANTANA, A.C.; NOGUEIRA, A.K.M.; MENDES, F.A.T.; CARVALHO, A.C. Análise do Desempenho Competitivo da Indústria de Móveis de Madeira do Estado do Pará. *Amazônia: Ciência e Desenvolvimento*. Belém, *v.* 2, *n.* 4, *p.* 37-36, jan./jun. 2007.
- D'ANDRÉA, A.F.; SILVIA, M.L.N.; CURI, N.; SIQUEIRA, J.O.; CARNEIRO, M.A.C. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. *n.* 26, *p.* 913-923. 2002.
- DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COE-

MAN, D.C.; BEZDICEK, D.F; STEWART, B.A., eds. Defining Soil Quality for Sustainable Environment. Madison, Soil Science Society of America, p. 3-21. 1994.

DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: DORAN, J.W; JONES, A.J., eds. Methods for Assessing Soil Quality. Madison, Soil Science Society of America. p. 25-37, 1996.

DUMANSKI, J., PIERI, C. Land Quality Indicators: Research Plan. Agriculture, Ecosystems e Environment, n. 81, v. 2, p. 93-102, 2000.

FÁVERO, L.P.; BELFIORE, P., SILVA, P., CHAN, B. Análise de Dados: Modelagem Multivariada para Tomada de Decisões. 1.ed. Rio de Janeiro: Campos Elsevier, 2009.

FOY, C.D. Effect of Aluminum on Plant Growth. In: CARSON, F.W. The Plant Root and Its Environment. Charlottesville, University Press of Virginia, p. 601-642. 1974.

GALVÃO, F.A.D.; VAHL, L.C. Propriedades Químicas de Solos Orgânicos do Litoral do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Revista Brasileira de Agrociência, v. 2, n. 2, p. 131-135, Mai.-Ago., 1996.

GLIESSMAN, S.R. Agroecologia: Processos Ecológicos em Agricultura Sustentável. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2000.

GOMES, S. A. Disponível em: < <http://www.grupocultivar.com.br/artigos/artigo.asp?d=517> >. Acesso em: 12 de Maio de 2011.

GREGORICH, E.G.; CARTER, M.R.; ANGERS, D.A. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. Canadian Journal of Soil Science, v.74, p. 367-385, 1994.

HAIR Jr., J.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L.; BLACK, W.C. Análise Multivariada de Dados. 5.ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

HARDYCK, C.D.; PETRINOVICH, L.F.; Indroduction to Statistics for the Behavioral Sciences, 2.ed. Philadelphia: Saunders, 1976.

HO, R. Handbook of Univariate and Multivariate Data Analysis and Interpretation with SPSS.

Boca Raton: Chapman e Hall, 2006.

HOMMA, A.K.O.; NOGUEIRA, O.L.; MENEZES, A.J.E.A.; CARVALHO, J.E.U.; NICOLI, C.M.L; MATOS, G.B. Açaí: Novos Desafios e Tendências. Revista Amazônia: Ciência e Desenvolvimento. Belém, v. 1, n. 2, jan./jun. 2006.

JOHNSON, R.A.; WICHERN, D.W. Applied Multivariate Statistical Analysis. 6.ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2007.

KARLEN, D.L.; DITZLER, C.A.; ANDREWS, S.S. Soil Quality: Why and How? Geoderma, Amsterdam, v. 114, n. 3/4, p. 145-156, 2003.

LAGARDE; J. Initiation à L'Analyse des Données. Paris: Dunod, 1995.

LEONARDO, H.C.L. Indicadores de Qualidade de Solo e Água para a Avaliação do Uso Sustentável da Microbacia Hidrográfica do Rio Passo Cue, Região Oeste do Estado do Paraná. Piracicaba, 2003. 131 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz.

LILLIEFORS, H.W. On The Kolmogorov-Smirnov Test for Normality with Mean and Variance Unknown, Jour. Amer. Stat Assoc. n. 62, p. 399-402, 1967.

LIMA, V.C. Solos da Amazônia: Mitos e Equívocos. Disponível em: <http://www.escola.agrarias.ufpr.br/texto4.html>. Acesso em: 12 de maio de 2011.

LOPES, A.S. Manual de Fertilidade de Solos. São Paulo: ANDA/POTAFOS, 1989. 153 p.

MCBRIDE, M.B. Environmental Chemistry of Soils. New York: Oxford University Press, 1994.

MAROCO, J. Análise Estatística com a Utilização do SPSS. 3.ed. Lisboa: Lisboa. 2007. 822 p.

MENDES, F.G.; MELLONI, E.G.P.; MELLONI, R. Aplicação de Atributos Físicos do Solo no Estudo da Qualidade de Áreas Impactadas, em Itajubá/MG. Cerne, Lavras, v. 12, n. 3, p. 211-220, jul.-set. 2006.

MENDONÇA, J.F.B. Solo: Substrato da Vida. Brasília: Embrapa Recursos Genéticos e Biotec-

nologia, 2006. 156 p.

MINGOTI, Sueli A. *Análise de Dados através de Métodos de Estatística Multivariada: uma abordagem aplicada*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

NOGUEIRA, O.L. *Sistema de Produção do Açaí: Introdução e Importância Econômica*. 2.ed. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2006. Disponível em: <<http://sistemadeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Acai/SistemaProducaoAcai-2ed/paginas/intro.htm>>.

OLIVEIRA, A.L.M.; SOUZA, C.C.; BOEHME, P.; SAMOBYL, R.W. A Normalização de Distribuições Não Normais Através da Transformação de Box-Cox e Alguns Comentários Sobre a Avaliação de Qualidade. In: Congresso Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP); Gramado/RS, 1997. Anais. Piracicaba, ENEGEP, 1997. (CDROM)

PEREIRA, J.C.R. *Análise de Dados Qualitativos: Estratégias Metodológicas para as Ciências da Saúde, Humanas e Sociais*. 3. ed. São Paulo: EDUSP, 2004.

PESTANA, M.H.; GAGEIRO, J.N. *Análise de Dados para Ciências Sociais: A complementaridade do SPSS*. 4.ed. Lisboa: Edições Sílabo, 2005.

PRIMAVESI, A. *Manejo Ecológico do Solo: A Agricultura em Regiões Tropicais*. São Paulo: Nobel, 2002. 549 p.

RAIJ, B.V. *Fertilidade do Solo e Adubação*. São Paulo: Ceres, 1991.

REIS, E. *Estatística Multivariada*. 2.ed. Lisboa: Sílabo, 2001.

ROGEZ, H. *Açaí: Preparo, Composição e Melhoramento da Conservação*. Belém: EDUFPA, 2000, 312 p.

RONQUIM, C.C. *Conceitos de Fertilidade do Solo e Manejo Adequado para as Regiões Tropicais*. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010. 26 p.

SANTANA, A.C. Índice de Desempenho Competitivo das Empresas de Polpa de Frutas do Estado do Pará. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, Rio de Janeiro, v. 45, n. 3, p. 749-775, jul./set. 2007.

SANTANA, D. P.; BAHIA FILHO, A. F. C. Soil quality and agricultural sustainability in the Brazilian Cerrado. In: World Congress Of Soil Science, 16. Montpellier. Montpellier: ISSS, 1998.

SHARMA, S. Applied Multivariate Techniques. Hoboken: John Wiley e Sons, 1996.

SHIKI, S. Sistema agroalimentar no cerrado brasileiro. In: SHIKI, S.; SILVA, J.G. da; ORTEGA, A.C. (Org.). Agricultura, meio ambiente e sustentabilidade do cerrado brasileiro. Uberlândia: UFU, p. 135-166, 1997.

SOUZA, Z. M.; ALVES, M. C.; Propriedades químicas de um Latossolo Vermelho Distrófico de Cerrado sob diferentes usos e manejos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 27, n. 1, p. 133-139, jan./fev. 2003.

SILVA, R.L., Dinâmica da Matéria Orgânica e Relações com Propriedades Químicas em um Latossolo sob Diferentes Usos da Terra na Amazônia Oriental. Belém, 2008. 75 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal Rural da Amazônia.

SILVA, S.B. Análise de Solos. Belém: Universidade Federal do Pará, 2003, 152 p.

SPEARMAN, C. General Intelligence Objectively Determined and Measured. American Journal of Psychology n. 15, p. 201-293, 1904.

SPOSITO, G.; ZABEL, A. The assessment of soil quality. Geoderma, Amsterdam, v. 114, n. 3/4, p. 143-144, 2003.

SPOSITO, G. The Chemistry of Soils. New York, Oxford University Press, 1989. 345 p.

STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D. Solos do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Emater RS - UFRGS, 2002. 126 p.

VAN RAIJ, B. Fertilidade do Solo e Adubação. São Paulo: Agronômica Ceres; Piracicaba: Potafos, 1991, 343 p.

VELICER, W.F.; JACKSON, D.N. Component Analysis versus Common Factor Analysis: Some Issues in Selecting an Appropriate Procedure. Multivariate Behavioral Research, v. 25, p. 1-28, 1990.

VELOSO, C.A.C.; SANTOS, C.D.M.; SILVA, A.R.; CARVALHO, E.J.M. Influência da Aplicação de Doses Potássio e Boro na Formação do Açaizeiro em Latossolo Amarelo do Nordeste Paraense. In: XXIX Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas. 2010, Guarapari - ES. Resumos.

VIÉGAS, I.J.M.; MEIRELES, R.O.; FRAZÃO, D.A.C.; CONCEIÇÃO, H.E.O. Avaliação da Fertilidade de um Latossolo Amarelo Textura Média para o Cultivo do Açaizeiro no Estado do Pará. Revista de Ciências Agrárias. Belém, *n.* 52, *p.* 23-26, jul./dez. 2009.

VIÉGAS, I.J.M.; FRAZÃO, D.A.C.; THOMAZ, M.A.A.; CONCEIÇÃO, H.E.O.; PINHEIRO, E. Limitações Nutricionais para o Cultivo de Açaizeiro em Latossolo Amarelo Textura Média, Estado do Pará. Revista Brasileira de Fruticultura. Jaboticabal-SP, *v.* 26, *n.* 2, *p.* 382-384, agosto. 2004.

VIEIRA, L.S. Manual da Ciência do Solo. São Paulo: Agronômica Ceres, 1975.

VIEIRA, L.S.; VIEIRA, M.N.F. Manual de Morfologia e Classificação de Solos. 2.ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1983. 319 *p.*

WAGNER, D. K.; WAGNER, S. Relevô, Solos e Subsolos. Disponível em: http://www.istoeamazonia.com.br/index.php?option=com_content&task=view&id=707&Itemid=236 Acesso em: 19 de maio de 2011.

WOTKE, A. C. P.; CAMARGO, O. a. de. Adsorção e troca iônica. In: MONIZ, A. C. (Coord.). Elementos de pedologia. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, *p.* 125-147, 1975.

ZILLI, J.E.; RUMJANEK, N.G.; XAVIER, G.R.; COUTINHO, H.L.C.; NEVES, M.C.P. Diversidade Microbiana como Indicador de Qualidade do Solo. Cadernos de Ciência e Tecnologia, Brasília, *v.* 20, *n.* 3, *p.* 391-411, set.-dez. 2003.