



Universidade Federal de São Carlos

Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente

Fernando de Alvarenga Yoshida

**Distribuição Espacial da Resistência do Solo vista sob
o prisma da Fragilidade Ambiental para a Área de
Proteção Ambiental (APA) de Botucatu**

Araras-SP

2015



Universidade Federal de São Carlos

Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente

Fernando de Alvarenga Yoshida

**Distribuição Espacial da Resistência do Solo vista sob
o prisma da Fragilidade Ambiental para a Área de
Proteção Ambiental (APA) de Botucatu**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente, na linha de pesquisa de Caracterização e Conservação de Recursos Naturais em Ambientes Agrícolas.

Orientador: Prof. Dr. Rubismar Stolf

Araras-SP

2015

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

Y65de Yoshida, Fernando de Alvarenga.
Distribuição espacial da resistência do solo vista sob o prisma da fragilidade ambiental para a Área de Proteção Ambiental (APA) de Botucatu / Fernando de Alvarenga Yoshida. -- São Carlos : UFSCar, 2015.
67 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2015.

1. Solos. 2. Solos - Compactação. 3. Álgebra de mapas. 4. Diagnóstico ambiental. 5. Geoestatística. I. Título.

CDD: 631.4 (20ª)

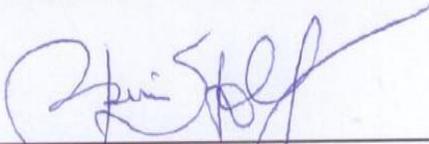


UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

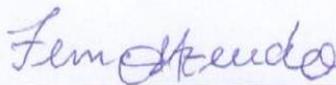
Centro de Ciências Agrárias
Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Fernando de Alvarenga Yoshida, realizada em 28/04/2015:



Prof. Dr. Rubismar Stof
UFSCar



Prof. Dr. Fernando Alves de Azevedo
IAC



Prof. Dr. Caetano Brugnaro
UFSCar

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus sobrinhos: Caio (*in memoriam*) e Lia que me ensinaram a nunca desistir de lutar, não importando o quão difícil isso possa ser e que limites estão dentro da nossa cabeça, que são impostos por nós mesmo, mas que podem e devem ser superados quando precisamos ou assim desejamos.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rubismar Stolf, por ter sempre acreditado e me apoiado durante essa jornada. Meus eternos agradecimentos, hoje e sempre.

Ao Programa de Pós Graduação em Agricultura e Ambiente do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos, no nome do Coordenador Prof. Dr. Claudinei Souza, mas estendendo a todos os Professores que compartilharam seus conhecimentos e a todos os Funcionários que me ajudaram e apoiaram.

À CAPES, pelo auxílio financeiro e suporte à toda e qualquer necessidade que existiu.

Aos Especialistas consultados, Prof. Dr. Caetano Brugnaro (UFSCAR) e Profa. Dra. Simone Sartório (UFSCAR) pela enorme ajuda nas análises estatísticas; ao Prof. Dr. Antônio Cunha (UNESP) pelos dados pluviométricos cedidos gentilmente; ao Prof. Dr. José Geanini e ao técnico João Henrique pela ajuda nas análises de solo no Laboratório de Física de Solos (UFSCAR).

Aos meus pais, Prof. Dr. Winston Yoshida e Profa. Dra. Elizaide Yoshida, exímios pesquisadores, e irmãos, Ricardo e Mariana, por todo apoio, dedicação e inspiração.

À Renata Andrés, pela ajuda no trabalho de campo, companheirismo, apoio e inspiração.

RESUMO

Esse estudo, realizado no limites da APA de Botucatu, buscou, através da distribuição espacial da resistência do solo, elaborar um índice de fragilidade ambiental da resistência do solo e, utilizando metodologias como a análise da fragilidade ambiental, a geoestatística e a análise de decisão multicritérios gerar uma carta ou mapa de fragilidade ambiental para o objeto de estudo. Dividiu-se a área amostral em 78 quadrantes onde foram coletados dados sobre a resistência do solo com um penetrômetro de impacto, dados sobre a declividade, os tipos de solos e uso do solo e cobertura vegetal. Foi elaborado um índice de fragilidade ambiental para a resistência do solo e foram geradas cartas de fragilidades para cada parâmetro levantado e através da álgebra de mapas em uma análise de decisão de multicritérios, a elaboração da carta de fragilidade ambiental. Como resultados pode-se destacar que na declividade, as menores médias da resistência do solo foram encontradas nas declividades mais altas (2,38 MPa - de 20 a 40% e 2,92 MPa - maior que 40%) e esse grupo apresentou diferenças significativas se comparadas com as outras classes de menores declividades (6,44 MPa até 6%, 7,11 MPa de 6 a 12% e 4,85 MPa de 12 a 20%), na profundidade de 0 a 20cm. Foram encontradas diferenças significativas entre os diferentes tipos de uso do solo e cobertura vegetal. A cana de açúcar (9,35 MPa) e as pastagens (9,05 MPa) apresentaram as maiores resistências médias, diferindo do citros (6,23 MPa) que diferiu das culturas perenes, como as florestas de eucalipto (5,28 MPa), o café (3,58 MPa) e as florestas nativas (2,33 MPa) que formaram o último grupo, de menor resistência na camada 0 a 20 cm do solo. Na distribuição espacial da resistência do solo, a krigagem ordinária no modelo de semivariograma exponencial foi o método mais eficiente, atendendo aos parâmetros da validação cruzada comparado com os modelos gaussiano e esférico. A análise de decisão de multicritérios, através da álgebra de mapas, gerou o produto final desse estudo, a carta de fragilidade ambiental para a APA de Botucatu que mostrou que 32,43% do total da área amostral se encontram dentro de classes baixas de fragilidade ambiental e 67,57% do total da área amostral se encontram em classes de fragilidade de média a muito alta.

Palavras-chave: compactação do solo, diagnóstico ambiental, geoestatística, análise de decisão de multicritérios, álgebra de mapas

ABSTRACT

This study, conducted in the limits of EPA of Botucatu, sought by the spatial distribution of soil strength, prepare an environmental fragility index of soil resistance and using methodologies such as the analysis of environmental fragility, geostatistics and multi-criteria decision analysis generate an environmental fragility map of the study object. The sample area was divided into 78 quadrants where data were collected on the soil resistance with an impact penetrometer, slope, soil types and land use and vegetation cover. It has been prepared an environmental fragility index for soil strength and weaknesses and maps were generated for each parameter and raised by map algebra in a multi-criteria decision analysis, the preparation of the environmental fragility map. The results can be noted that the slope, the lowest average of soil resistance were found in the higher slope (2,38 MPa - 20-40% and 2,92 MPa - greater than 40%) and this group showed significant differences compared to other classes of minor steepness (6.44 MPa to 6%, 7.11 MPa 6 to 12 MPa and 4.85% from 12 to 20%) at a depth of 0 to 20cm. There were significant differences between the different types of land use and vegetation cover. Sugarcane (9,35 MPa) and grazing (9,05 MPa) had the highest average resistance, differing from citrus (6.23 MPa) that differed from perennial crops such as eucalyptus forests (5,28 MPa), the coffee (3,58 MPa) and native forests (2,33 MPa) that formed the last group of least resistance in the layer 0-20 cm soil. In the spatial distribution of soil resistance, ordinary kriging in the exponential semivariogram model proved the most efficient method, given the parameters of the cross validation compared with gaussian and spherical models. The multi-criteria decision analysis, through map algebra, generated the final product of this study, the map of environmental fragility to the EPA of Botucatu which showed that 32.43% of the total sample area are within lower fragility environmental classes and 67.57% of the total sample area are averaged fragility classes to very high fragility

Keywords: soil compaction, environmental assessment, geostatistics, multi-criteria decision analysis, map algebra

"O mapeamento do solo é análogo à transferência de uma imagem mental de um pintor para uma tela em branco."

WILDING, 1985.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
1. OBJETO DE ESTUDO	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 A Teoria dos Sistemas e Fragilidade Ambiental	4
2.2 A Sustentabilidade na Agricultura	5
2.3 A Pedometria	5
2.4 A Geoestatística	7
2.5 A Resistência do Solo	7
2.6 A Pedometria, a Resistência do Solo, a Fragilidade Ambiental na Agricultura.....	8
3. OBJETIVOS	11
3.1 Objetivo Geral.....	11
3.2 Objetivos Específicos.....	11
4. MATERIAL E MÉTODOS	12
4.1 Área Amostral e Coleta de Dados	12
4.2 Edição de Dados	15
4.3 Análise Estatística	18
4.4 Geoestatística	19
4.5 Análise Da Fragilidade Ambiental.....	20
4.6 Análise De Decisão Multicritérios	23
5. RESULTADOS e DISCUSSÃO	27
5.1 Resultados dos Dados Coletados em Campo	27
5.2. A Resistência do Solo e a Declividade	28
5.3 A Resistência do Solo e os Tipos de Solos	30
5.4 A Resistência do Solo e o Uso do Solo e Cobertura Vegetal	32
5.5 A Geoestatística na Distribuição Espacial da Resistência do Solo	35
5.6 A Análise da Fragilidade Ambiental	42
5.6.1 Distribuição Espacial da Fragilidade Ambiental	43
5.7 A Análise de Decisão Multicritérios.....	48
5.7.1 Matriz de Multicritérios	48
5.7.2 Álgebra de Mapas	49
6. CONCLUSÕES	56
BIBLIOGRAFIA	58

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: MAPA DE MACROLOCALIZAÇÃO DA APA DE BOTUCATU.	3
FIGURA 2: MODELO DA PEDOLOGIA ATUAL. FONTE: HENGL, 2003.	6
FIGURA 3: MODELO METODOLÓGICO APLICADO.	12
FIGURA 4: MAPA DA ÁREA AMOSTRAL.....	13
FIGURA 5: MAPA DOS PONTOS AMOSTRADOS. ÁREA 38500 HA.	13
FIGURA 6: PLUVIOSIDADE MÉDIA MENSAL (MM) NOS ANOS DE 1997 A 2012 DA APA DE BOTUCATU. FONTE: CUNHA, 2014.	15
FIGURA 7: PLUVIOSIDADE MENSAL DA APA DE BOTUCATU NO ANO DE 2013. FONTE: CUNHA, 2014... 15	15
FIGURA 8: IMAGEM REPRESENTATIVA DO SOFTWARE PENETRÔMETRO DE IMPACTO STOLF. FONTE: STOLF, 2014.	16
FIGURA 9: MAPA DE ALTIMETRIA DA APA DE BOTUCATU. FONTE: PDP, 2006.	16
FIGURA 10: MAPA DE DECLIVIDADE DA APA DE BOTUCATU. FONTE: PDP, 2006.....	17
FIGURA 11: MAPA DE USO DO SOLO E COBERTURA VEGETAL DA APA DE BOTUCATU.	17
FIGURA 12: MAPA DE CLASSES/TIPOS DE SOLOS DA APA DE BOTUCATU. FONTE: PDP, 2006.....	18
FIGURA 13: MODELO DE AMBIENTE SIG. FONTE: MARTINS (2009).	23
FIGURA 14: MODELO DE REPRESENTAÇÃO MATRICIAL OU RASTER. FONTE: MARTINS (2009).	24
FIGURA 15: MODELO DE REPRESENTAÇÃO VETORIAL. (A) PONTO, (B) LINHA E (C) POLÍGONO. FONTE: MARTINS (2009).	24
FIGURA 16: MODELO DE ANÁLISE DE MULTICRITÉRIOS. FONTE: MARTINS (2009).....	25
FIGURA 17: MODELO DE ANÁLISE DE MULTICRITÉRIOS E ÁLGEBRA DE MAPAS UTILIZADO.	26
FIGURA 18: RESISTÊNCIA MÉDIA NAS CAMADAS 0 A 20CM E 20 A 40CM DA APA DE BOTUCATU.	27
FIGURA 19 - RESISTÊNCIA DO SOLO EM PROFUNDIDADES PARA AS CLASSES DE DECLIVIDADE.	28
FIGURA 20: RESISTÊNCIA DO SOLO EM PROFUNDIDADES PARA OS DIFERENTES TIPOS DE SOLOS DA APA DE BOTUCATU.....	30
FIGURA 21: RESISTÊNCIA DO SOLO EM PROFUNDIDADES NOS DIFERENTES USOS DO SOLO E COBERTURA VEGETAL DA APA DE BOTUCATU.....	33
FIGURA 22: DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO NA CAMADA 0 – 20CM DA APA DE BOTUCATU.....	36
FIGURA 23: DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO NA CAMADA 20 – 40CM DA APA DE BOTUCATU.DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO TEOR DE AREIA TOTAL (%) DO SOLO	37
FIGURA 24: DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA AREIA TOTAL (%) DA APA DE BOTUCATU.....	38
FIGURA 25: DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA ARGILA (%) DA APA DE BOTUCATU.....	39
FIGURA 26: DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO SILTE (%) DA APA DE BOTUCATU.	40
FIGURA 27: CLASSES DE FRAGILIDADE AMBIENTAL PARA DECLIVIDADE DA APA DE BOTUCATU.....	44
FIGURA 28: CLASSES DE FRAGILIDADE AMBIENTAL PARA TIPOS DE SOLOS DA APA DE BOTUCATU.....	45
FIGURA 29: CLASSES DE FRAGILIDADE AMBIENTAL PARA USO DO SOLO E COBERTURA VEGETAL DA APA DE BOTUCATU.....	46
FIGURA 30: CLASSES DE FRAGILIDADE AMBIENTAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO NA CAMADA 0 – 20CM DA APA DE BOTUCATU.....	47
FIGURA 31: RASTER DAS CLASSES DE FRAGILIDADE AMBIENTAL DA DECLIVIDADE DA APA DE BOTUCATU.....	50
FIGURA 32: RASTER DAS CLASSES DE FRAGILIDADE AMBIENTAL DOS TIPOS DE SOLOS DA APA DE BOTUCATU.....	50
FIGURA 33: RASTER DAS CLASSES DE FRAGILIDADE AMBIENTAL DO USO DO SOLO E COBERTURA VEGETAL DA APA DE BOTUCATU.....	51
FIGURA 34: RASTER DAS CLASSES DE FRAGILIDADE AMBIENTAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO DA APA DE BOTUCATU.....	51
FIGURA 35: RASTER DE VALORES DA CARTA DE FRAGILIDADE AMBIENTAL DA APA DE BOTUCATU.	53
FIGURA 36: RASTER DE CLASSES DA CARTA DE FRAGILIDADE AMBIENTAL DA APA DE BOTUCATU.	53

ÍNDICE DE QUADROS

QUADRO 1: CLASSES DE FRAGILIDADE PARA A DECLIVIDADE. FONTE: ROSS (1994).	20
QUADRO 2: CLASSES DE FRAGILIDADE DOS TIPOS DE SOLOS. FONTE: ROSS (1994).	21
QUADRO 3: GRAUS DE PROTEÇÃO POR TIPOS DE COBERTURA VEGETAL. FONTE: ROSS (1994).	21
QUADRO 4: GRAUS DE LIMITAÇÕES DA RESISTÊNCIA DO SOLO. FONTE: ADAPTADO DE CANARACHE, 1990.	22
QUADRO 5: GRAUS DE LIMITAÇÕES DA RESISTÊNCIA DO SOLO. FONTE: ADAPTADO DE USDA, 1993. ..	22
QUADRO 6: ATRIBUTOS FÍSICOS DOS TIPOS DE SOLOS DA APA DE BOTUCATU.	32
QUADRO 7: VALIDAÇÃO CRUZADA DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO NA CAMADA 0- 20CM DA APA DE BOTUCATU.	36
QUADRO 8: VALIDAÇÃO CRUZADA DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO NA CAMADA 20-40CM DA APA DE BOTUCATU.	37
QUADRO 9: VALIDAÇÃO CRUZADA DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO TEOR DE AREIA TOTAL (%) DA APA DE BOTUCATU.	38
QUADRO 10: VALIDAÇÃO CRUZADA DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO TEOR DE ARGILA (%) DA APA DE BOTUCATU.	39
QUADRO 11: VALIDAÇÃO CRUZADA DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO TEOR DE SILTE (%) DA APA DE BOTUCATU.	40
QUADRO 12: ÍNDICE DE FRAGILIDADE AMBIENTAL PARA A RESISTÊNCIA DO SOLO PROPOSTO POR ESSE ESTUDO.	43
QUADRO 13: ÍNDICE DE FRAGILIDADE AMBIENTAL PARA AS CLASSES DE DECLIVIDADE. FONTE: ROSS (1994).	44
QUADRO 14: ÍNDICE DE FRAGILIDADE AMBIENTAL DOS TIPOS DE SOLOS. FONTE: ROSS (1994).	45
QUADRO 15: ÍNDICE DE FRAGILIDADE AMBIENTAL DOS TIPOS DE USO DO SOLO E COBERTURA VEGETAL. FONTE: ROSS (1994).	46
QUADRO 16: ÍNDICE DE FRAGILIDADE AMBIENTAL DA RESISTÊNCIA DO SOLO.	47
QUADRO 17: NOTAS PARA AS CLASSES DE FRAGILIDADE AMBIENTAL DA ANÁLISE MULTICRITÉRIOS. ADAPTADO DE ROSS (1994).	48
QUADRO 18: PESOS PARA OS ELEMENTOS DA ANÁLISE MULTICRITÉRIOS.	48
QUADRO 19: MATRIZ DE MULTICRITÉRIOS PARA APA DE BOTUCATU.	49
QUADRO 20: QUANTIDADE DE ÁREAS PARA AS CLASSES DE FRAGILIDADE AMBIENTAL DA APA DE BOTUCATU.	54

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1: RESISTÊNCIA DO SOLO NAS ÁREAS DE DIFERENTES CLASSES DE DECLIVIDADES.	28
TABELA 2: ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉDIAS DAS RESISTÊNCIA DO SOLO E AS CLASSES DE DECLIVIDADES NA CAMADA 0-20CM E 20 A 40CM DA APA DE BOTUCATU.	29
TABELA 3: RESISTÊNCIA DO SOLO NOS DIFERENTES TIPOS DE SOLOS DA APA DE BOTUCATU.	30
TABELA 4: ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉDIAS DAS RESISTÊNCIA DO SOLO E OS TIPOS DE SOLOS NA CAMADA 0-20CM E 20-40CM DA APA DE BOTUCATU.	31
TABELA 5: RESISTÊNCIA DO SOLO NAS ÁREAS DE DIFERENTES USOS DO SOLO E COBERTURA VEGETAL DA APA DE BOTUCATU.	32
TABELA 6: ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉDIAS DA RESISTÊNCIA DO SOLO E AS CLASSES DE USO DO SOLO E COBERTURA VEGETAL NAS CAMADAS 0-20CM E 20-40CM DA APA DE BOTUCATU.	34

LISTA DE ABREVIATURAS

APA: Área de Proteção Ambiental
EPA: Environmental Protected Area
DEM: Digital Elevation Model
GIS: Geographic Information System
GPS: Geographic Positioning System
MCDM: Multicriteria Decision Model
SIG: Sistema de Informação Geográfica

INTRODUÇÃO

Área de Proteção Ambiental (APA) é um tipo de Unidade de Conservação que difere das Unidades de Conservação de Proteção Integral (parques), pois a propriedade das terras pode ser tanto pública quanto privada. Nas APAs é possível desenvolver atividades econômicas, desde que essas atividades sejam planejadas com cuidado, adequando e orientando as ações humanas e determinando onde é permitido, limitado ou proibido o exercício de atividades produtivas. Ela tem como finalidades, segundo o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC, 2000):

- Proteger a biodiversidade;
- Proteger os recursos hídricos e os remanescentes florestais;
- Proteger o patrimônio arqueológico e cultural;
- Promover a melhoria da qualidade de vida das populações;
- Manter o caráter rural da região;
- Evitar o avanço da ocupação urbana na área protegida.

Os solos estão intrinsecamente associados à paisagem e são justamente os condicionantes ambientais que propiciam a sua grande variabilidade (LAGACHERIE e MCBRATNEY, 2007).

Desde quando o homem aprendeu a cultivar a terra, cerca de dez mil anos atrás, o conhecimento em solo vem se desenvolvendo e ganhando importância frente à humanidade (LEPSH, 2002).

Segundo Webster (1980 e 1994), a pedometria é a aplicação de estatística e probabilidade de seus componentes físico-químicos e sua correlação com o espaço físico. A Pedometria, no enfoque da Resistência do Solo torna-se um conhecimento essencial para o manejo e conservação desse recurso de difícil e lenta renovação, quando esta é possível.

A gestão eficaz do solo requer uma compreensão da distribuição dos solos, dos seus aspectos físicos e químicos e seus padrões dentro da paisagem. O total conhecimento dos solos tem como produto final mapas de solos permitindo que o uso da terra seja mantido dentro de suas limitações e, assim, decisões sábias sobre o uso da terra possam ser feitas pelos planejadores e formuladores de políticas públicas (MCBRATNEY et al., 2000).

1. OBJETO DE ESTUDO

Esse estudo procurou um entendimento da pedometria, na distribuição espacial da resistência do solo visto sob o prisma da fragilidade ambiental para a Área de Proteção Ambiental (APA) Corumbataí-Tejupá-Botucatu, Perímetro Botucatu, conforme a Figura 1.

Segundo a Coordenadoria de Planejamento Ambiental Estratégico e Educação Ambiental da Secretaria Estadual de Meio Ambiente de São Paulo, CPLEA (2004), o perímetro Botucatu da APA Corumbataí-Tejupá-Botucatu possui os seguintes aspectos institucionais e legais:

Criação: Decreto Estadual nº 20.960, de 8 de junho de 1983.

Regulamentação: Não regulamentada.

Conselho Gestor: Não implantado.

Atributo natural a ser protegido: As cuevas basálticas e os atributos ambientais e paisagísticos, como os morros testemunhos; os recursos hídricos superficiais; o aquífero Guarani, maior aquífero de água doce da América do Sul; a zona de transição entre biomas mata atlântica e cerrado; e o patrimônio arqueológico com registros pré-históricos de cerca de 6.000 anos.

Localização: Região das cuevas basálticas, no centro oeste do estado de São Paulo.

Unidade de Gestão de Recursos Hídricos: 10 (Tietê/ Sorocaba) e 14 (Alto Paranapanema). Atividades predominantes: a base econômica da região é agrícola, com destaque para as culturas de cana, pastagens, reflorestamento e outras culturas perenes e anuais. Além disso, destaca-se também, a mineração de areia industrial. Seu centro urbano relevante é a cidade de Botucatu, pólo educacional universitário, industrial, turístico, comercial e tecnológico regional.

Área: 218.306 ha.

Municípios abrangidos: Itatinga, Bofete, Botucatu, Avaré, Guareí, Porangaba, São Manuel, Angatuba e Pardinho.

Características da Área: Este perímetro envolve a região da Serra de Botucatu, no reverso e front das cuevas basálticas, que correspondem ao relevo de feições muito marcantes no interior do Estado de São Paulo. Esta APA faz divisa ainda com a represa de Jurumirim (Paranapanema), marco na paisagem local e elemento indutor do turismo na região. Na agricultura destacam-se as culturas de café, desde o começo do século, que se desenvolveu para as pastagens

(gado de corte e leiteiro), o reflorestamento de Pinus e Eucalipto bem como para a cana de açúcar e o citros, com forte incidência de empresas desses setores presentes na região. São encontrados remanescentes importantes de mata atlântica e de cerrados, carregando uma grande biodiversidade endêmica e servindo refúgios da fauna local (CPLEA, 2004).

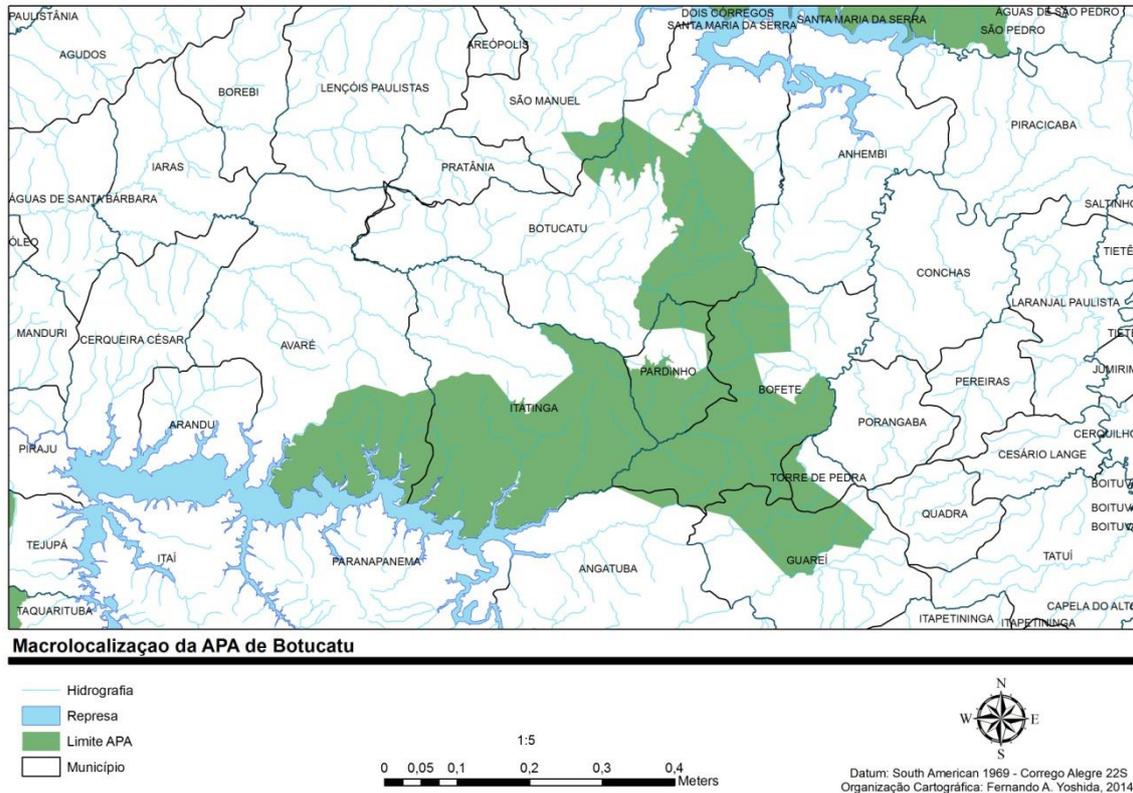


Figura 1: Mapa de macrolocalização da APA de Botucatu.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A Teoria dos Sistemas e Fragilidade Ambiental

Tricart (1977) analisou o meio ambiente sob o prisma da Teoria dos Sistemas, que parte do pressuposto de que na natureza as forças de energia e matéria se processam através das relações de equilíbrio dinâmico. Entretanto, este equilíbrio seria frequentemente alterado pelas intervenções do homem nos diversos componentes da natureza, gerando estado de desequilíbrios temporários ou até permanentes.

O homem, ao fazer parte do ambiente como um elemento ativo é capaz de modificar a paisagem. Ele possui a capacidade de alterar solos, vegetação, condições hidrológicas, formas de erosão, introduzindo desta forma modificações no sistema, as quais, podem propiciar o desequilíbrio ou novos arranjos que atingem o estado de equilíbrio funcional e o colapso. A modificação da paisagem é atingida através das alterações nas relações de suas variáveis (TRICART, 1977).

Estas mudanças que ocorrem na paisagem são resultantes da relação entre os condicionantes do meio físico e biótico e as atividades humanas. A intensidade dessas transformações inadvertidas depende primeiramente do esforço (ou tensão) aplicado ao sistema, e posteriormente, do grau de suscetibilidade à mudança (sensibilidade) do próprio sistema (ROSS, 1994).

Interferências no ambiente ocorrem, pois, o homem reproduz e reordena o espaço, ou então, provoca alterações em função de um “aproveitamento” dos recursos naturais sem uma preocupação de conservação e preservação desses recursos. Os diferentes tipos de uso acabam por provocar diferentes processos sobre o meio natural gerando desequilíbrios (MONTEIRO, 2001).

A análise integrada dos ambientes naturais, fundamentada na concepção de Tricart (1977) e aplicada ao planejamento agroambiental, enfatizava a importância de se considerar no planejamento não somente as potencialidades dos recursos naturais, mas, sobretudo as fragilidades dos ambientes naturais face às diferentes inserções dos homens na natureza. A importância de se conhecer o papel de cada variável, uma vez que cada uma delas apresenta um grau de influência no ambiente, interferindo com maior ou menor intensidade. Estas variáveis são interdependentes e apresentam uma relação constante de troca de energia e matéria entre as partes.

Estas variáveis tratadas de forma integrada possibilitam obter um diagnóstico das diferentes categorias hierárquicas da fragilidade dos ambientes naturais (ROSS, 1994).

Sendo assim, o mapeamento do solo é de fundamental importância para o conhecimento da dinâmica dos ambientes, conseqüentemente, um valioso subsídio à avaliação da vulnerabilidade dos vários tipos de uso (ROSS, 1994).

Diante desse quadro complexo da análise da fragilidade ambiental, a geologia, a geomorfologia, a pedometria e a pedologia, assim como o uso do solo, tem um peso muito grande no tratamento dessas questões. Isso é ressaltado no fato de que as formas do relevo e sua dinâmica sintetizam em si o mecanismo das trocas de energia e matéria que se processam entre os componentes do estrato geográfico (ROSS, 1994).

2.2 A Sustentabilidade na Agricultura

O reconhecimento das formas de utilização dos recursos naturais é fundamental para o planejamento, podendo direcionar a uma política de ocupação e uso do espaço com a intenção de manter e melhorar as condições de vida atual e futura (MONTEIRO, 2001).

Essa ideia de manter e melhorar as condições de vida atual e futura é premissa básica de todos os conceitos de sustentabilidade encontrados na literatura. Assim, não é diferente para a agricultura, sendo que, nesse caso, deve-se olhar para a agricultura sustentável sob o prisma de desafios, conforme Assad e Almeida (2004) que apontaram cinco desafios para Sustentabilidade na Agricultura: desafio ambiental, econômico, social, territorial e tecnológico

Para Tanasa (2010), o estudo da evolução do uso do solo pela agricultura desempenha um papel importante através da análise pedométrica/pedológica e econômica, na fundação de uma prática agrícola sustentável e de gestão adequada dos recursos naturais.

2.3 A Pedometria

Partindo dos pressupostos da Teoria de Sistemas de Tricart (1977), passando pela análise de fragilidade de Ross (1994) e pelo desenvolvimento sustentável na agricultura de Assad e Almeida (2004), existe então a necessidade de um melhor conhecimento sobre os solos, suas características

físico-químicas, sua distribuição espacial e seus comportamentos. A ciência que aborda esses conhecimentos sobre os solos é a Pedometria.

Segundo Webster e Oliver (1980) e Webster (1994), a pedometria é a aplicação de estatística e probabilidade de seus componentes físico-químicos e sua correlação com o espaço físico, ou seja, sua distribuição espacial.

O conceito da Pedometria desenvolveu-se para uma análise integrada de diversas ciências (Figura 2), remetendo aos conceitos de Tricart (1977) e Ross (1994). A definição mais recente de pedometria, da Pedometric Society é: “a aplicação de métodos matemáticos e estatísticos para a modelagem quantitativa dos solos, com o objetivo de analisar sua distribuição, propriedades e comportamentos” (HENGL, 2003).

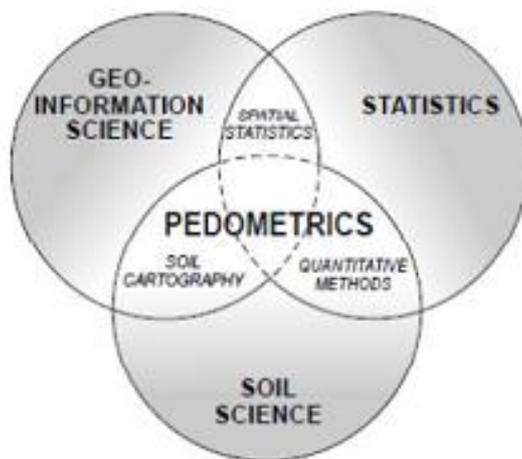


Figura 2: Modelo da pedologia atual. Fonte: HENGL, 2003.

O levantamento convencional do solo depende da fotointerpretação e previsão de tipos de solo, enquanto as técnicas pedométricas (ainda) concentraram-se principalmente no mapeamento das variáveis do solo individual em escalas maiores. Segundo Hengl (2003), o levantamento convencional normalmente leva a um mapa de solos baseado polígono enquanto que os produtos de técnicas pedométricas são mapas de grão fino (alta qualidade e resolução) de propriedades do solo. Nos últimos anos, o mapeamento digital de solos teve um rápido desenvolvimento de novas metodologias, principalmente devido ao aumento das fontes de mapas e de tecnologia. Dois grupos principais têm desempenhado um papel fundamental: os modelos (parâmetros) de terreno (DEM - *Digital Elevation Model*) e imagens de sensoriamento remoto. Os parâmetros do terreno são produtos derivados do DEM que podem ser utilizados para quantificar a geomorfologia do terreno, isto é, acumulação e potencial de

deposição, para ajustar a influência de fatores geoclimáticos no terreno, ao passo que as imagens de teledetecção refletem a rugosidade, cor, teor de umidade e outras características da superfície do solo (HENGL, 2003).

Mapeamento de Solos deve ser entendido como a criação e a disseminação de sistemas de informação espacial dos solos (LAGACHERIE e MCBRATNEY, 2007). Assim, o mapeamento de solos deixa de ser apenas uma representação cartográfica e passa a ser uma análise integrada de diversos elementos, compondo um sistema de informação de solos.

2.4 A Geoestatística

Segundo Landim (1998), a geoestatística é um ramo da estatística que une o conceito de variáveis aleatórias com o conceito de variáveis regionalizadas, gerando um novo conceito de funções aleatórias, que são posteriormente processadas por aplicativos computacionais. Inúmeros métodos de interpolação, com diversos níveis de complexidade estão disponíveis na literatura (CARVALHO et al., 2002, 2009). A teoria das variáveis regionalizadas, desenvolvida por Krige (1951), conforme citado por Vieira (2000), concluiu que somente a informação dada pela variância dos dados é insuficiente para explicar um fenômeno em estudo. Para tal, seria necessário levar em consideração a distância entre as observações. A partir daí surgiu o conceito de geoestatística. Portanto, essa teoria considera a dependência espacial das observações, lançando mão de medidas estatísticas que expressem essa estrutura de dependência em pontos referenciados (VIEIRA, 1998).

A krigagem é um interpolador geoestatístico onde os pesos são distribuídos de maneira não tendenciosa, apresentando variância mínima e possibilitando o conhecimento da variância da estimativa (WEBSTER e OLIVER, 1980).

2.5 A Resistência do Solo

A pedometria, no enfoque da resistência do solo, torna-se um conhecimento essencial para o manejo e conservação dos solos, um recurso de difícil e lenta renovação, quando esta é possível.

Camargo (1983) menciona que a compactação é um dos mais sérios danos causados ao solo devido à exploração agrícola.

A Resistência ou Compactação do Solo é uma característica natural do mesmo ou resultado das ações antrópicas sobre este.

Compactação é o ato ou ação de forçar a agregação das partículas do solo, reduzindo, desta forma, o volume por elas ocupado. Ela pode ser descrita em termos da tensão aplicada no solo e das mudanças resultantes em suas condições. As mudanças que ocorrem nas propriedades físicas do solo incluem: aumento da densidade do solo; decréscimo do volume de macroporos; infiltração e movimento interno de água mais lentos; aeração mais pobre e maior resistência mecânica do solo ao crescimento de raízes (SEIXAS et al., 1998).

A compactação pode ser definida como sendo a ação mecânica por meio da qual se impõe, ao solo, uma redução em seu índice de vazios, que é a relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos. A mudança de relação das fases é devida, principalmente, à reorganização das partículas do solo, quando submetido a uma força de compressão (CAMARGO, 1983). Os solos agrícolas podem ser compactados por animais em pastoreio, bem como pelas raízes de árvores, porém mais significativos são os efeitos da mecanização, ocasionados pelo tráfego de máquinas usadas no manejo das culturas. Em geral, as máquinas empregadas são muito pesadas e exercem grande pressão no solo.

Segundo Camargo (1983), as consequências da compactação são:

1. Aumento a densidade do solo, causando acúmulo de água na superfície,
2. Deterioração das condições anaeróbicas,
3. Aumento de erosão,
4. Aumento do carreamento de sedimentos para os recursos hídricos,
5. Redução da infiltração de água,
6. Redução do crescimento de raízes e decréscimo da produção.

2.6 A Pedometria, a Resistência do Solo, a Fragilidade Ambiental na Agricultura

A agricultura moderna, de alta mecanização, alta produtividade, grande *input* energético externo, vem trazendo consequências graves para o meio ambiente e para as relações sociais e culturais do homem do campo em decorrência de um benefício econômico considerável para o País.

Segundo Chaim et al. (2004), as perdas de solo no Brasil são estimadas em 500 milhões de toneladas de terra/ano. Destas, as perdas dos principais nutrientes são estimadas em 0,10% N (nitrogênio), 0,15% P (fósforo) e 1,5% K (potássio), com perda total estimada em 8 milhões de toneladas desses elementos/ano. Estas resultam não só na perda de produtividade, mas em gastos adicionais com reposição de insumos e fertilizantes carreados, perda de diversidade biológica, assoreamento de corpos d'água e sérios impactos visuais (como aqueles provocados pelos corpos d'água secos ou de coloração alterada por conter solo em suspensão, ou pela presença de voçorocas e de grandes fissuras erosivas).

As técnicas de preparo e manejo do solo são fundamentais para garantir práticas agrícolas sustentáveis (CHAIM et al., 2004). Como exemplo de práticas sustentáveis pode-se citar a adubação verde, terraceamento, plantio direto, roçadeiras ecológicas, manejo integrado de pragas, entre outros (DAROLT, 2000).

Os custos estimados com erosões do solo são significativos, como pode ser visto abaixo:

- O valor total dos custos com erosões nos Estados Unidos encontram-se entre 9 e 44 bilhões de dólares (Cooper, 2008);
- No Estado de São Paulo: US\$ 1,7 bilhão contabilizando-se os custos dos nutrientes perdidos pela erosão do solo (Castro e Valério Filho, 1997);
- Estado do Paraná, com seis milhões de hectares de área agrícola, o prejuízo por perdas de nutrientes devido à erosão é da ordem de 121 milhões de dólares por ano (Derpsch et al., 1991);
- As perdas de nutrientes do solo no Brasil é da ordem de 4 bilhões de dólares (Bahia, et al., 1992).

Assim, para uma agricultura sustentável, uma correta e eficaz compreensão e manejo dos solos é primordial. Para que esse conhecimento seja completo, é necessário o levantamento de seus aspectos físico-químicos e de sua distribuição espacial, para que perdas e danos decorrentes das práticas possam ser remediados e mudanças nos sistemas de produção possam ser feitos, através de manejos adequados e orientados por políticas públicas que visem o

não comprometimento de nenhum dos pilares (aspectos) da agricultura sustentável e mantendo a produtividade.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é elaborar uma carta de fragilidade ambiental para APA de Botucatu através da distribuição espacial da resistência do solo relacionada com outros elementos como a declividade, os tipos de solos e o uso e cobertura vegetal através da aplicação da análise de decisão de multicritérios.

3.2 Objetivos Específicos

- Verificar qual o melhor modelo geoestatístico para a distribuição espacial da resistência do solo;
- Verificar através de análises estatísticas relação entre médias a resistência do solo e os outros elementos envolvidos na análise de fragilidade (declividade, classes de solo e uso e cobertura vegetal);
- Elaborar de um índice de fragilidade ambiental para a resistência do solo para ser utilizado em uma matriz de multicritérios;
- Elaborar cartas de fragilidade ambiental para declividade, classes de solos e uso e cobertura vegetal, bem como da distribuição espacial da resistência do solo e uma matriz de multicritérios e uma mapa contendo esses elementos para a APA de Botucatu.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Abaixo, serão descritos o material e os métodos que foram utilizados para a elaboração do projeto.

A Figura 3 apresenta um modelo representativo da metodologia utilizada:

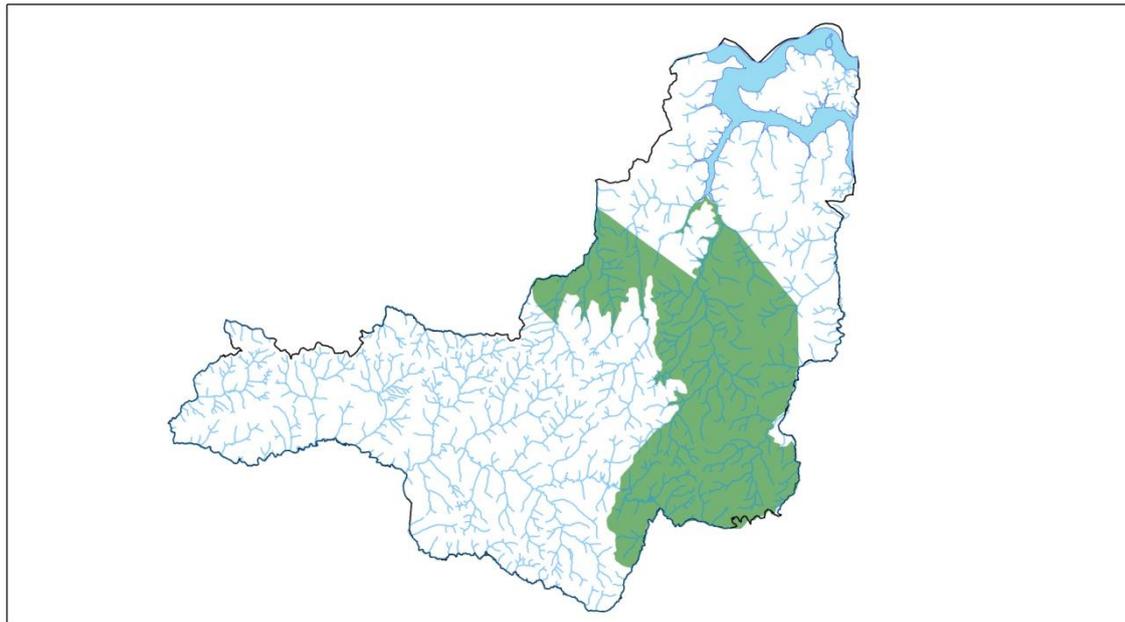


Figura 3: Modelo metodológico aplicado.

4.1 Área Amostral e Coleta de Dados

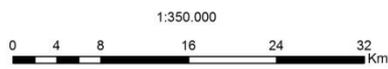
A área objeto de estudo foi a APA Corumbataí-Tejupá-Botucatu, perímetro Botucatu, dentro do limite territorial do Município de Botucatu, visto que o Perímetro Botucatu da APA contempla outros municípios, mas para fins de análise, foi utilizada somente a área do que esta inserida dentro do limite territorial do município de Botucatu, totalizando 38.500 ha, conforme pode ser observado na Figura 4.

Foi elaborado um *grid* (quadrante, grade ou grelha) para a coleta dos dados onde dividiu-se a área de estudo em 10 partes iguais (cada grid tem 837,40 ha) no sentido norte-sul e no sentido leste-oeste e foram coletados dados da resistência do solo em cada um desses *grids*, totalizando 78 pontos de amostragem, conforme a Figura 5.



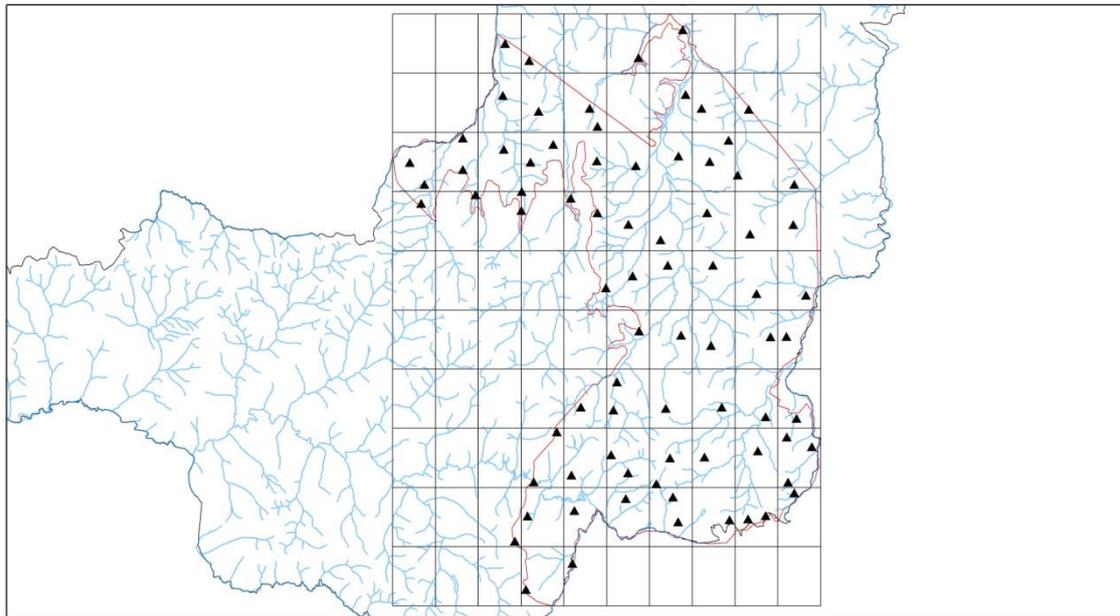
Microlocalização da APA de Botucatu

- Hidrografia
- Represa
- Limite APA
- Limite Municipal



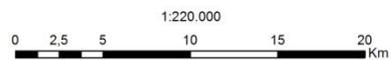
Datum: South American 1969 - Corrego Alegre 22S
Organização Cartográfica: Fernando A. Yoshida, 2014.

Figura 4: Mapa da área amostral.



Coleta de Dados em Campo - Grid

- Pontos Coletados
- Hidrografia
- Limite da APA
- Limite Municipal



Datum: UTM - South American 1969 - 22s
Organização Cartográfica: Fernando A. Yoshida, 2014.

Figura 5: Mapa dos pontos amostrados. Área 38500 ha.

Dentro de cada *grid* priorizou-se que a coleta de dados fosse exatamente no centro do polígono. Foi gerado o *centroid* de cada polígono, de onde foram retiradas as coordenadas para se chegar até o ponto da coleta, porém, devido à dificuldades de acesso, alguns pontos foram deslocados em relação ao centro do polígono. Para se chegar até o ponto de coleta e fazer o georreferenciamento dos dados coletados foi utilizado o aparelho Garmin Oregon 400t, no sistema de coordenadas UTM, SAD 1969.

No desenvolvimento do trabalho foram coletados dados em campo sobre a resistência do solo à penetração mecânica, sobre a declividade, classes de solos, uso do solo e cobertura vegetal, bem como amostras de solo, na profundidade 0-10 cm, para uma melhor caracterização física dos tipos de solos encontrados na APA de Botucatu como o teor de areia total (%), teor de silte (%), teor de argila (%) apresentados em detalhes a seguir.

Foi utilizado o equipamento Penetrômetro de Impacto de Stolf (STOLF, 1983), que mede a resistência do solo à penetração mecânica através de impactos de peso conhecido e medindo-se a profundidade atingida por cada impacto, conforme metodologia descrita por Stolf (1983).

No levantamento da resistência do solo à penetração mecânica foram coletados duas amostras por ponto para que se tivesse uma média da resistência do solo de cada ponto amostrado e assim uma maior precisão do atributo em estudo.

Para definir os teores de areia, silte e argila aplicou-se os métodos propostos pela Embrapa (1997), feitos no Laboratório de Física do Solo no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos.

Os dados foram coletados em julho, agosto e na primeira quinzena de setembro de 2013, justamente no período mais crítico da estiagem. Esse período foi escolhido para que a resistência do solo tivesse sua maior manifestação e expressividade e assim pudessem representar sua maior fragilidade, uma vez que, em geral, a maior resistência de um solo se manifestará quanto mais seco e/ou mais denso ele se apresentar (BUSSCHER, 1990; CANARACHE, 1990; PABIN et al., 1998).

Segundo Cunha (2014), o regime médio mensal pluviométrico do município de Botucatu se caracteriza pelo gráfico da Figura 6 abaixo:

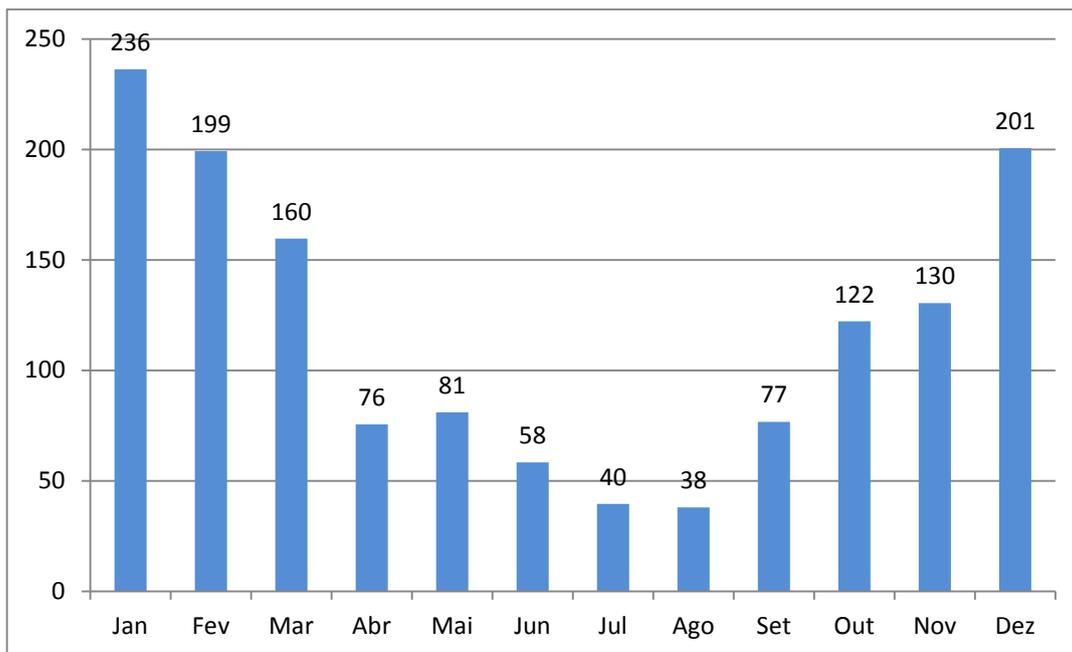


Figura 6: Pluviosidade média mensal (mm) nos anos de 1997 a 2012 da APA de Botucatu. Fonte: Cunha, 2014.

No período da coleta dos dados em campo, o regime de chuvas na estiagem foi muito baixo, conforme pode ser observado pelo gráfico da Figura 7 abaixo:

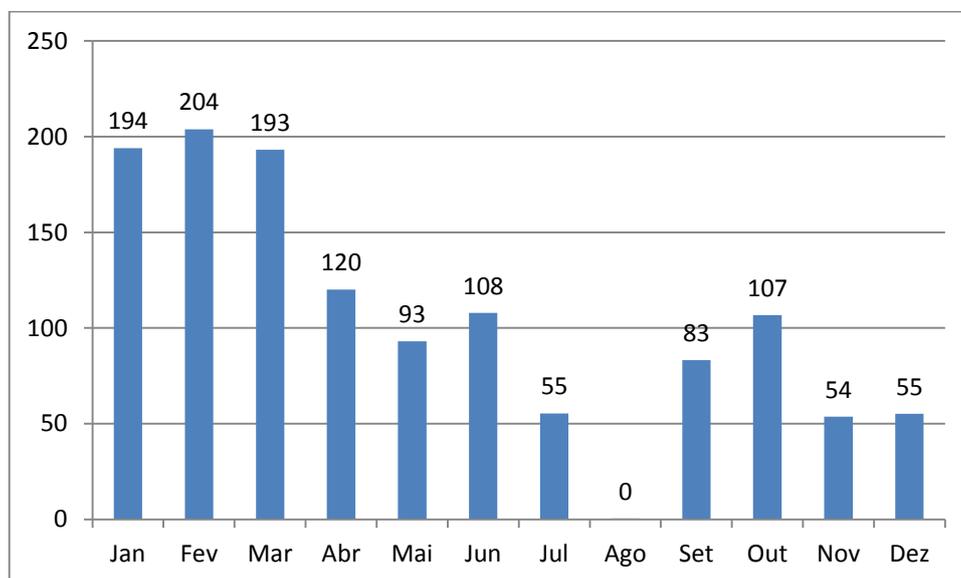


Figura 7: Pluviosidade mensal da APA de Botucatu no ano de 2013. Fonte: Cunha, 2014.

4.2 Edição de Dados

Os dados coletados foram colocados no software Penetrômetro de Impacto de Stolf – Software de Manipulação de Dados em Excell-VBA (STOLF, 2014), como pode ser observado na Figura 8 e onde foram convertidos em unidades de medidas de análise MPa, conforme descritos por Stolf (1991).

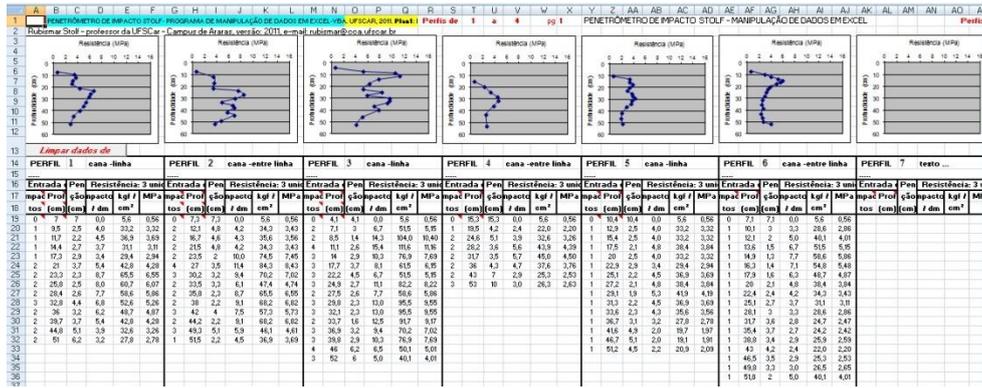


Figura 8: Imagem representativa do software penetrômetro de impacto STOLF. Fonte: Stolf, 2014.

Para cada ponto amostrado foi levantada também a sua respectiva declividade, classe de solo e uso do solo e cobertura vegetal. Para a declividade, o levantamento foi feito através de um mapa de declividade elaborado a partir de um modelo digital de terreno (DEM) de base cartográfica de curvas de nível de equidistância de 5m (IGC, 1979) conforme representado nas Figuras 9 e 10.

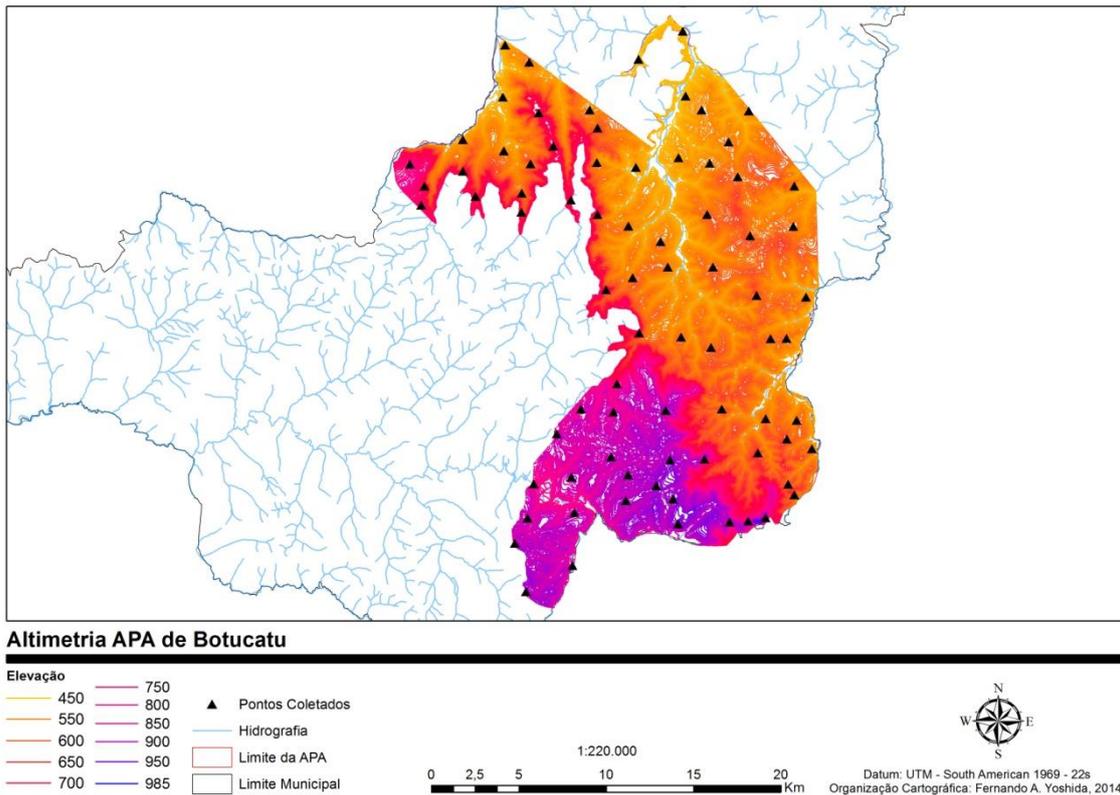


Figura 9: Mapa de altimetria da APA de Botucatu. Fonte: PDP, 2006.

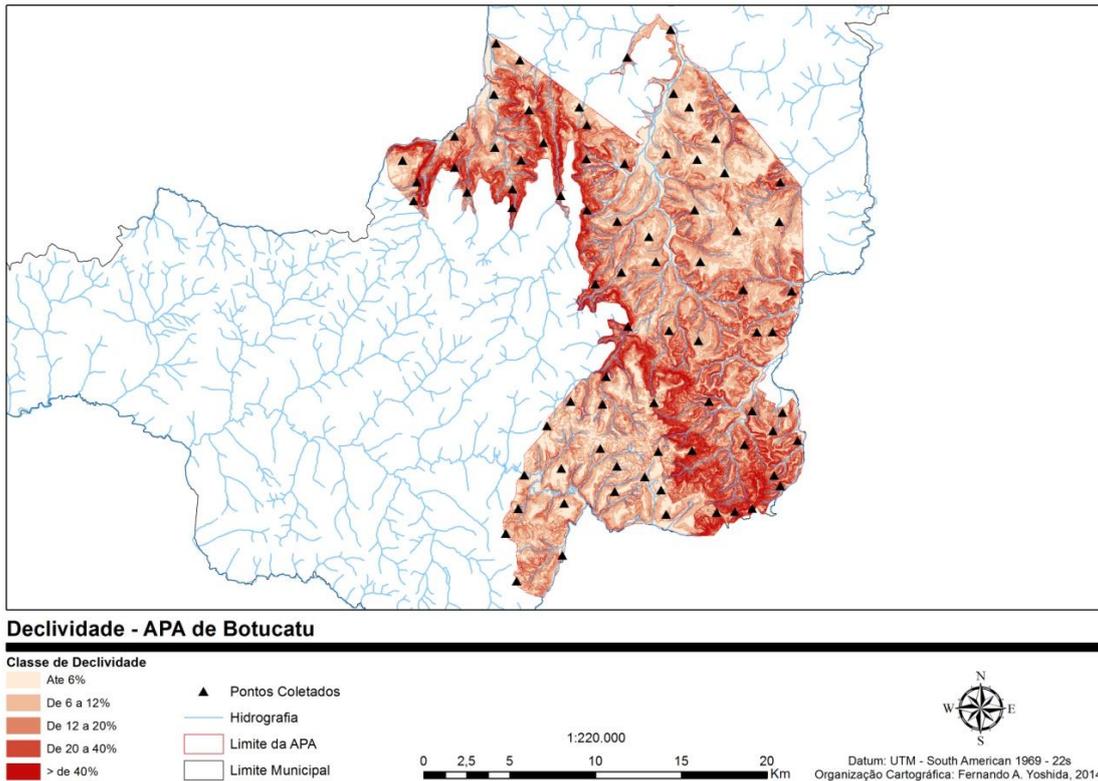


Figura 10: Mapa de declividade da APA de Botucatu. Fonte: PDP, 2006.

O uso do solo e cobertura vegetal foi levantado a partir de uma imagem de satélite CBERS 2B, elaborado pelo próprio autor, no ano de 2010, através do método de classificação supervisionada, conforme a Figura 11.

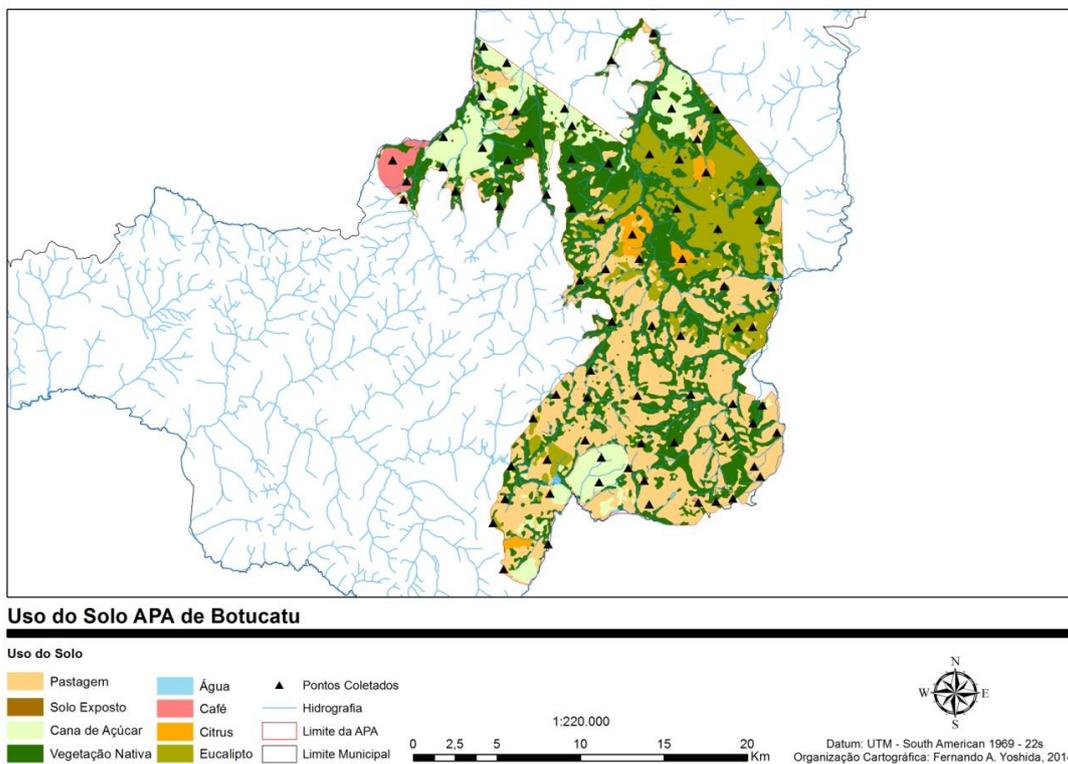


Figura 11: Mapa de uso do solo e cobertura vegetal da APA de Botucatu.

Ainda, para cada ponto foi levantado seu respectivo tipo de solo, feito a partir de um mapa disponibilizado pelo PDP (2006), observado na Figura 12.

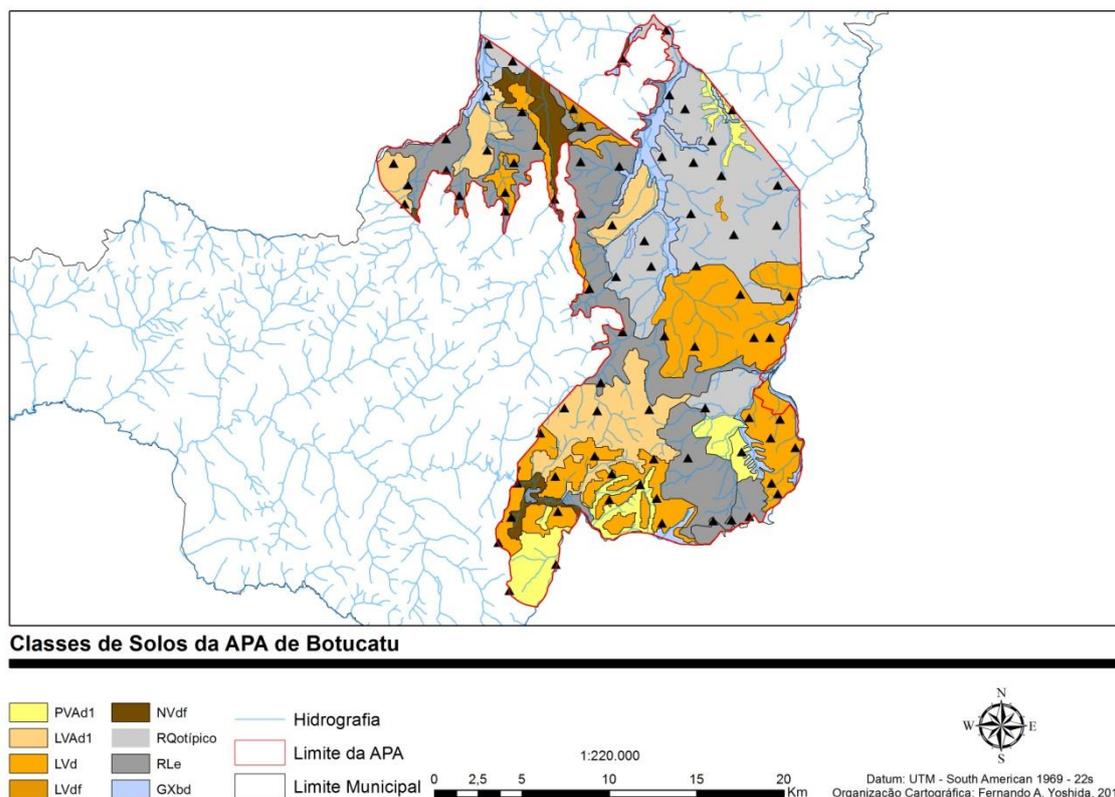


Figura 12: Mapa de classes/tipos de Solos da APA de Botucatu. Fonte: PDP, 2006.

4.3 Análise Estatística

Nessa etapa foi feita uma análise de comparação de médias correlacionando a resistência do solo com as diferentes declividades, as diferentes classes de solos, os diferentes usos e coberturas vegetais. O experimento apresentava uma grande variedade de tratamentos e observações: cinco classes de declividade, seis tipos de solos, seis diferentes usos de solo, resistência do solo à penetração mecânica nas camadas 0 a 20 cm e 20 a 40 cm em setenta e oito pontos de amostragem (ver Quadro 1A, nos apêndices). Optou-se por usar então, uma média harmônica das repetições nas análises de variância (ver Tabelas 1A, 2A, 3A, 4A, 5A e 6A nos apêndices), que apresentou resultados altamente significativos. Ressalta-se que se trata de um modelo fortemente heterogêneo em relação ao número de observações em cada tratamento. Além disso, não foram analisadas as interações entre a declividade, tipo de solo e uso e cobertura vegetal e profundidade da amostragem.

Após a análise de variância foi feita a análise de comparação múltiplas entre médias através do modelo Scott-Knott (SCOTT & KNOTT, 1977), que

possui a característica de separar as médias em grupos discretos, sem a sobreposição entre estes.

4.4 Geoestatística

A partir dos dados convertidos e suas coordenadas geográficas, utilizando os valores obtidos por horizonte do solo, horizonte A (camada de 0cm a 20cm) e horizonte B (camada de 20cm a 40cm) foi possível elaborar os respectivos mapas de distribuição espacial da resistência do solo através da geoestatística, utilizando a krigagem ordinária, onde cada ponto medido é excluído e seu valor é estimado com os dados restantes (Vieira, 1997; 1998; 2000); ou seja, estimam-se os valores da variável em estudo sobre os mesmos pontos amostrados e comparando os novos valores com os dados medidos.

A krigagem está fortemente associada ao modelo de semivariograma escolhido, permitindo que a validação cruzada possa ser usada para se verificar a precisão do modelo e o método de semivariograma adotado (Vieira et al., 1983). Assim, esse estudo avaliou, através da validação cruzada (Vieira et al., 1983) os modelos de semivariograma exponencial, esférico e gaussiano e verificou-se qual modelo se aplicou melhor para a distribuição espacial da resistência do solo.

Conforme descritos por Guimarães (2013) e Esri (2013) os parâmetros da validação cruzada para os modelos de semivariograma na krigagem, que foram calculados pelo aplicativo usado, foram:

- MEE (média do erro de estimação): média da diferença entre os valores coletados em campo e os valores estimados. Quanto mais próximo de zero, maior a indicação de que as estimativas são não-viesadas. No entanto, cabe salientar que a escala da variável pode interferir nesse valor.
- RMS (*root mean square* - raiz quadrada do erro médio quadrático): Valores de RMS menores são melhores, pois indicam que os valores estimados pela interpolação estão mais próximos dos valores medidos em campo.
- ASE (*average standard error* - média do desvio padrão proveniente da krigagem): O ideal é que seu valor esteja próximo ao RMS.

- MS (*mean standardized* - média do erro após padronização): Como a interpolação por Krigagem é um método não-viesado, este valor deve ser próximo de zero.
- RMSS (*root mean square standardized* - raiz quadrada do erro quadrático padronizado): O ideal é que tenha valor próximo de 1.

Foram testados três modelos de semivariograma: o modelo exponencial, o esférico e o gaussiano para a distribuição espacial da resistência do solo nas profundidades 0 a 20cm, 20 a 40cm. Aproveitando os dados disponíveis, foram testados também os 3 modelos de semivariograma para a distribuição espacial dos atributos físicos do solo, como o teor de areia total (%), teor de silte(%) e o teor de argila (%).

Os dados foram representados, portanto, em mapas ou cartas da distribuição espacial da resistência do solo para a camada 0 a 20cm e a camada 20 a 40cm, teor de areia total (%), teor de silte e teor de argila (%) que foram elaborados no software ArcGis (ESRI), utilizando a extensão Geostatistical Analyst (ESRI, 2013).

4.5 Análise Da Fragilidade Ambiental

A partir dos dados coletados da resistência do solo foi criado um índice de resistência do solo agrupando-se os valores encontrados em campo e baseado na literatura sobre o assunto, foi feita a concepção de graus de fragilidades ambiental para a resistência do solo, seguindo a metodologia de análise empírica da fragilidade ambiental de Ross (1994), conforme descrita abaixo.

Com relação à declividade (Quadro 1), foram utilizados os intervalos de classes já consagrados nos estudos de capacidade/aptidão agrícola, associados com conhecimentos de valores limites críticos da geotecnia, indicativos do vigor dos processos erosivos, riscos de escorregamentos/deslizamentos e inundações frequentes (ROSS, 1994).

Quadro 1: Classes de fragilidade para a declividade. Fonte: Ross (1994).

Classes de Declividade	
Categorias	%
Muito Baixa	Até 6%
Baixa	de 6 a 12%
Média	de 12 a 20%
Alta	de 20 a 40%
Muito Alta	> de 40%

Os critérios utilizados para a fragilidade ambiental da variável solos (Quadro 2) passaram pelas características de textura, estrutura, plasticidade, grau de coesão das partículas e profundidade/espessura dos horizontes. Tais características estariam diretamente relacionadas com relevo, litologia e clima, elementos motores da pedogênese e fatores determinantes das características físicas e químicas dos solos (ROSS, 1994).

Quadro 2: Classes de fragilidade dos tipos de solos. Fonte: Ross (1994).

Classes de Fragilidade	Tipos de Solos
1 - Muito Baixa	Latossolo Roxo, Latossolo Vermelho-Escuro e Vermelho-Amarelo textura argilosa
2 - Baixa	Latossolo Amarelo e Vermelho-Amarelo textura médio-argilosa
3 - Média	Latossolo Vermelho-Amarelo, Terra Roxa, Terra Bruna, Podzólico Vermelho-Amarelo textura médio-argilosa
4 - Forte	Podzólico Vermelho-Amarelo textura médio-arenosa e Cambissolos
5 - Muito Forte	Podzólicos com cascalhos, Litólicos e Areias Quartzosas

Os graus de proteção aos solos pela cobertura vegetal natural e cultivadas, organizados por Ross (1994), obedeceram à ordem crescente da capacidade de proteção (inverso da fragilidade), conforme o Quadro 3.

Quadro 3: Graus de proteção por tipos de cobertura vegetal. Fonte: Ross (1994).

Graus de Proteção	Tipos de Cobertura Vegetal
1 - Muito Alta	Florestas/Matas naturais, Florestas cultivadas com biodiversidade
2 – Alta	Formações arbustivas naturais com estrato herbáceo denso. Formações arbustivas densas (matas secundárias, cerrado denso, capoeira densa). Mata homogênea de Pinus densa. Pastagens cultivadas sem pisoteio de gado. Cultivo de ciclo longo.
3 – Média	Cultivo de ciclo longo em curvas de nível/terraceamento como café, laranja com forrageiras entre ruas. Pastagens com baixo pisoteio. Silvicultura de eucaliptos com sub-bosques de nativas.
4 – Baixa	Cultivo de ciclo longo de baixa densidade (café, pimenta-do-reino, laranja) com solo exposto entre as ruas, cultivos de ciclo curto (soja, milho, feijão) com cultivo em curvas de nível/terraceamento..
5 - Muito Baixa	Áreas desmatadas e queimadas recentemente, solo exposto por arado, solo exposto ao longo de caminhos e estradas, terraplanagens, culturas de ciclo curto

Para a elaboração do índice de fragilidade ambiental resistência do solo a literatura define a fragilidade ambiental como sendo a redução ou impedimento do crescimento das raízes e infiltração de água no solo. Segundo Canarache (1990) a fragilidade do crescimento das raízes varia de sem limitações, baixa limitações, médias limitações, sérias limitações e o impedimento total do crescimento das raízes, como pode ser visto no Quadro 4 abaixo:

Quadro 4: Graus de limitações da resistência do Solo. Fonte: Adaptado de Canarache, 1990.

Classes	Limites (Mpa)	Limitações ao crescimento das raízes
Muito baixa	< 1,1	Sem limitação
Baixa	1,1 a 2,5	Pouca limitação
média	2,6 a 5,0	Algumas limitações
Alta	5,1 a 10,0	Sérias limitações
Muito alta	10,1 a 15,0	Raízes praticamente não crescem
Extremamente alta	> 15,0	Raízes não crescem

O USDA (1993) apresenta outro tipo de classificação da resistência do solo com relação às culturas de ciclo curto, que define também a limitação do crescimento de raízes como sendo o principal impacto ambiental da resistência do solo e o classifica conforme o Quadro 5:

Quadro 5: Graus de limitações da resistência do solo. Fonte: Adaptado de USDA, 1993.

Classes	Limites (Mpa)
Extremamente baixa	< 0,01
Muito baixa	0,01 - 0,1
Baixa	0,1 - 1
Moderada	1 - 2
Alta	2 - 4
Muito Alta	4 - 8
Extremamente Alta	> 8

Para esse estudo foi elaborado um índice de fragilidade ambiental para a resistência do solo, utilizando a literatura bem como os valores encontrados em campo.

Os índices de fragilidade ambiental na concepção de produtos cartográficos, denominados de Cartas de Fragilidades decorrem do cruzamento das variáveis e da localização espacial descritas acima, onde cada tabela se traduz por um cartograma que representa as classes de fragilidade de um elemento analisado. Os produtos cartográficos identificam as manchas de

diferentes padrões de fragilidade para a declividade, para os tipos de solos e para o uso e cobertura vegetal, conforme metodologia proposta por Ross (1994) e acrescentando então, o parâmetro da resistência do solo, que não é empírico e sim medido em campo com instrumentos precisos, representando então um estágio, nível ou classe de degradação ambiental.

4.6 Análise De Decisão Multicritérios

Para a concepção de uma carta de fragilidade que integra os elementos proposto por Ross (1994), acrescido da resistência do solo, foi utilizado o método da análise de decisão multicritérios (MCDM - *Multicriteria Decision Model*) dentro do ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica) para criar uma carta de fragilidade ambiental para a APA de Botucatu.

O ambiente SIG se caracteriza por um sistema de entrada e saída de dados, operado em camadas (*layers*), conforme pode se observado na Figura 13, onde, segundo Smith et al. (1987), SIG é um banco de dados complexo, indexado espacialmente, sobre o qual opera-se um conjunto de procedimentos para responder a consultas sobre entidades espaciais.

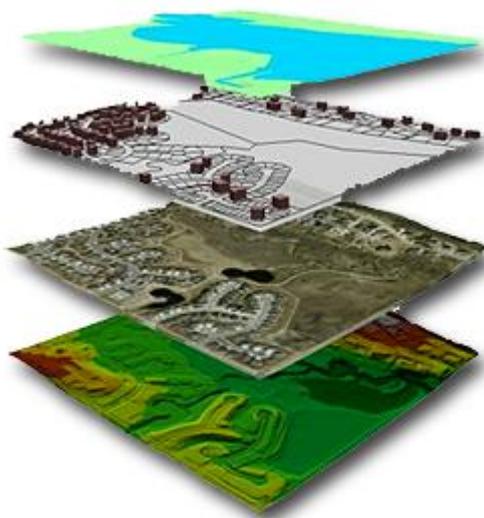


Figura 13: Modelo de ambiente SIG. Fonte: Martins (2009).

Segundo Martins (2009), os dados espaciais podem ser representados de duas maneiras:

- Raster ou Matricial: neste modelo o terreno é representado por uma matriz composta por linhas e colunas, conforme a Figura 14, que definem células, denominadas pixel, que apresenta um valor referente

ao atributo. A superfície é concebida como contínua, onde cada pixel representa uma área do terreno, definindo sua resolução espacial.

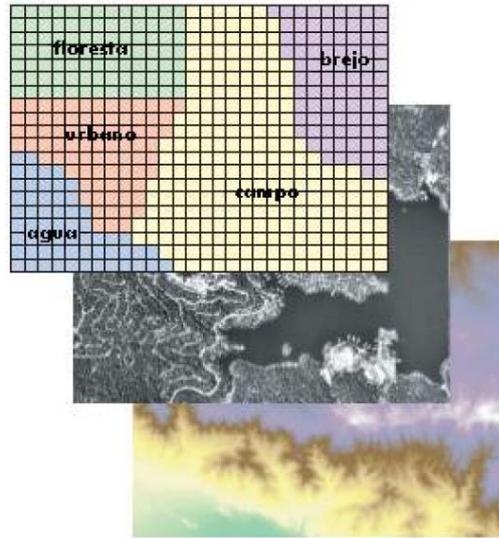


Figura 14: Modelo de representação matricial ou raster. Fonte: Martins (2009).

- Vetorial: a localização e a feição geométrica do elemento são armazenadas e representadas por vértices definidos por um par de coordenadas. Dependendo da sua forma e da escala cartográfica, os elementos podem ser expressos por pontos, linhas ou polígonos, conforme representado na Figura 15.



Figura 15: Modelo de representação vetorial. (A) Ponto, (B) Linha e (C) Polígono. Fonte: Martins (2009).

A análise de decisão multicritérios (MCDM), geralmente, parte da necessidade de tomada de decisão onde um conjunto de elementos com seus respectivos atributos, objetivos e/ou alternativas são avaliadas com base em critérios conflitantes e incomensuráveis. Sendo assim, a análise de decisão multicritérios (MCDM) permite a investigação combinada de variáveis para gerar um mapa síntese como produto final (MARTINS, 2009). São elaborados matrizes com linhas e colunas dos atributos, objetivos e/ou alternativas, com notas e pesos para cada elemento e o resultado é interação e/ou integração desses

elementos e/ou de seus atributos, atendendo ou não, dentro de níveis ou graus, o objetivo proposto.

Dentro do ambiente SIG, existem diversos métodos para o uso da análise de multicritérios. O método de Álgebra de Mapas contribui para esse tipo de análise, uma vez que consiste na aplicação de operações aritméticas para associar várias camadas de modo a obter como resultado, classificações que permitem análises diversas (MARTINS, 2009).

A análise de decisão multicritério com o método de álgebra de mapa permite agrupar e classificar áreas que apresentem graus de fragilidades ambientais semelhantes conforme representado na Figura 16.

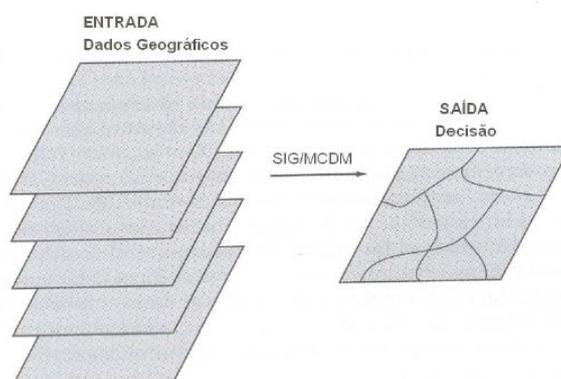


Figura 16: Modelo de análise de multicritérios. Fonte: Martins (2009).

Nesse estudo foram utilizadas as duas diferentes representações SIG, tanto vetoriais, para elaboração dos mapas base e das cartas de fragilidade, bem como a representação de raster ou matricial, na análise de decisão multicritérios, no método de álgebra de mapas.

A partir das cartas ou cartogramas de fragilidade ambiental elaborado para cada variável estudada (declividade, classes de solos, uso e cobertura vegetal e resistência do solo) foi possível, convertê-los em dados matriciais, com suas respectivas notas e pesos (Matriz de Multicritérios) atribuídos para cada fragilidade ambiental e sua respectiva área e localização espacial e, através álgebra de mapas, somar as respectivas áreas que possuem notas de fragilidade iguais, resultando assim, no objetivo primário desse estudo que é a carta de fragilidade ambiental para a APA de Botucatu, metodologia aplicada conforme o modelo da Figura 17.

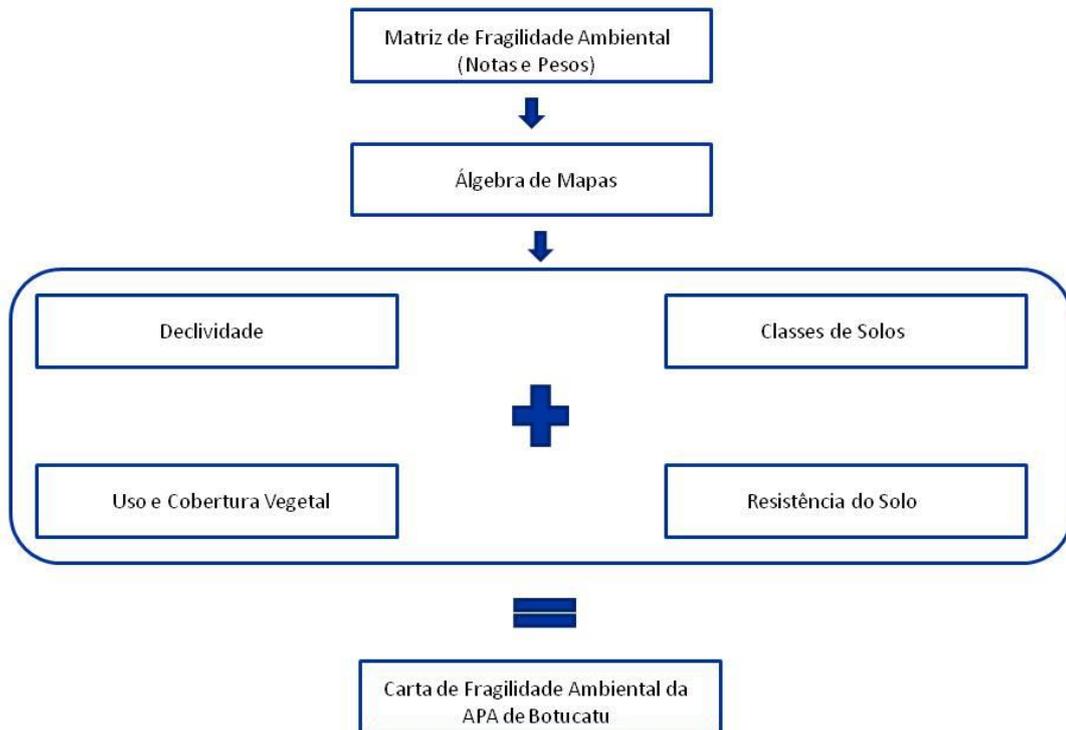


Figura 17: Modelo de análise de multicritérios e álgebra de mapas utilizado.

Essas variáveis tratadas de forma integrada possibilitaram obter um diagnóstico das diferentes categorias hierárquicas da fragilidade dos ambientes naturais e torna-se de fundamental importância para o conhecimento da dinâmica dos ambientes, conseqüentemente, um valioso subsídio à avaliação da vulnerabilidade dos vários tipos de uso e permitindo que o uso da terra pudesse vir a ser mantido dentro de suas limitações.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resultados dos Dados Coletados em Campo

A resistência do solo teve grandes variações em seus valores, mostrando uma heterogeneidade nos pontos amostrados como pode ser observado no Quadro 1A, nos apêndices.

O menor valor encontrado foi de 1,23 MPa, o maior valor foi de 16,7 MPa e valor médio foi de 5,88 MPa para a camada 0cm e 20cm (Quadro 1A, apêndices e Figura 18). Já para a camada 20cm a 40cm o menor valor foi de 1,28 MPa, o maior valor foi de 12,54 MPa e o valor médio foi de 5,68 MPa (Apêndice Quadro 1A e Figura 18). Isso mostra que a resistência do solo sofreu maiores variações na camada superior do solo (0-20cm) e pode indicar que essa camada sofre maiores impactos ambientais e as consequências desses impactos, o que para fins de análises de fragilidade do solo, acabou por ser a opção de escolha para os dados de entrada na análise de multicritérios.

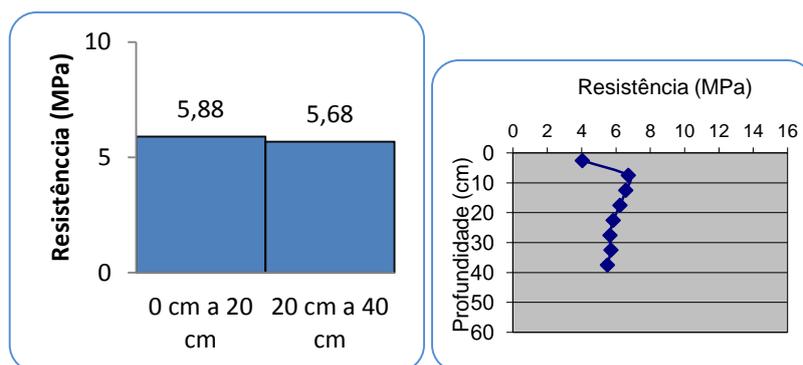


Figura 18: Resistência média nas camadas 0 a 20cm e 20 a 40cm da APA de Botucatu.

Segundo Cunha et al (2009), solos recentemente arados e gradeados foram mais susceptíveis à compactação do que solos somente arados ou subsolados. O efeito do tráfego do trator concentrou-se principalmente na camada superficial, e a primeira passada foi a que mais provocou compactação do solo. Sistemas de cultivo sem preparo de solo ou com preparo reduzido, como o plantio direto, são técnicas eficientes no controle da erosão, quando comparado com o sistema convencional, porém alguns estudos mostraram problemas de compactação do solo, provocados pelo efeito cumulativo do tráfego de máquinas. Isso indica a importância do manejo do solo para o controle da compactação, diminuição da densidade e aumento da porosidade do solo (CUNHA et al, 2009).

5.2. A Resistência do Solo e a Declividade

A declividade, por ser um fator de influência na resistência do solo, sendo esse um fator natural, decorrentes das condições ambientais e também decorrentes do uso antrópico de cada região, optou-se então por separar em classes, para um melhor entendimento, sendo elas: até 6%, de 6 a 12%, de 12 a 20%, de 20 a 40% e maior que 40% e os resultados estão representados na Tabela 1 e Figura 19.

Tabela 1: Resistência do solo nas áreas de diferentes classes de declividades.

Prof. Em Camadas(cm)	Até 6%	De 6 a 12%	De 12 a 20%	De 20 a 40%	Maior que 40%
0-5	4,75	4,82	3,70	1,06	1,39
5-10	7,27	8,28	5,24	2,43	3,21
10-15	6,95	8,06	5,28	2,81	3,31
15-20	6,80	7,28	5,17	3,24	3,77
20-25	6,18	6,55	5,54	3,63	4,03
25-30	6,09	6,36	5,03	3,52	3,76
30-35	6,09	6,39	5,14	3,64	4,12
35-40	5,65	6,13	5,06	3,86	4,24
40-45	5,52	6,00	5,27	4,13	4,34
45-50	5,30	5,78	5,24	3,92	4,62

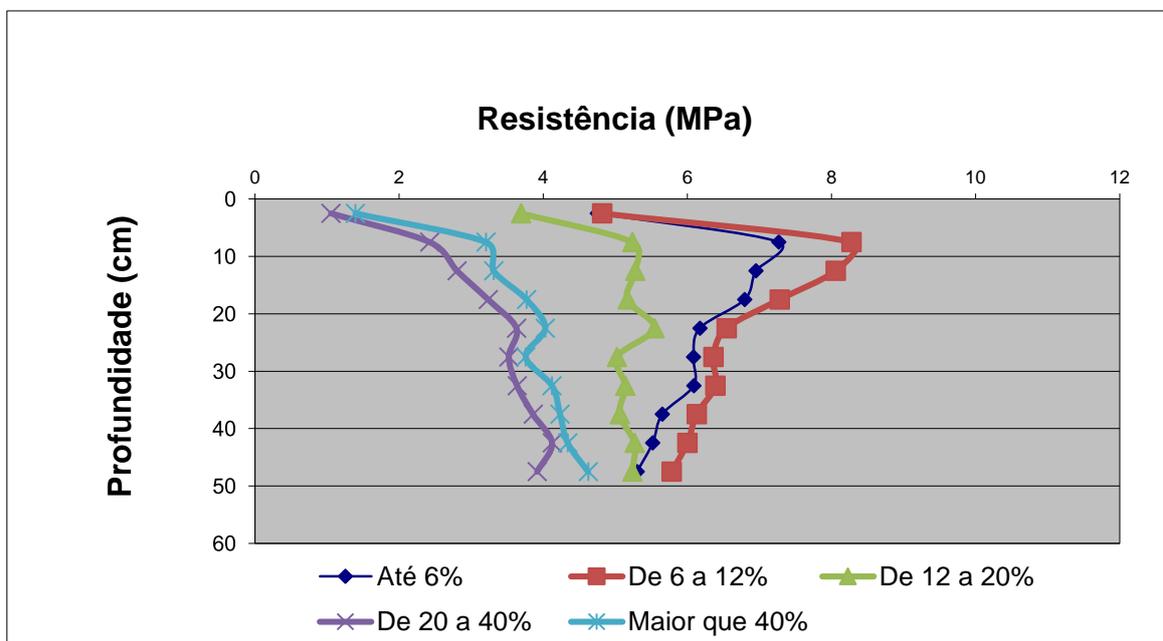


Figura 19 - Resistência do solo em profundidades para as classes de declividade.

Observa-se na Tabela 2 abaixo as menores médias da resistência do solo foram encontradas nas declividades mais altas (2,38 MPa - de 20 a 40% e 2,92 MPa - maior que 40%) e esse grupo apresentou diferenças significativas se

comparadas com as outras classes de menores declividades (6,44 MPa até 6%, 7,11 MPa de 6 a 12% e 4,85 MPa de 12 a 20%), na profundidade de 0 a 20cm. Isso mostra que nas declividades menores (até 6%, de 6 a 12% e de 12 a 20%) onde a resistência do solo foi maior evidencia o fato de um uso antrópico mais acentuado, com possível manejo mais intenso e um uso agrícola empregado de maior mecanização, assim causando maior impacto sobre o solo, aumentando sua compactação. Nas declividades maiores, onde foram apresentados menores valores da resistência do solo, o uso antrópico deve ser menos intenso, uma vez que incide restrições físicas e legais sobre o uso dessas áreas.

Tabela 2: Análise comparativa entre médias das resistência do solo e as classes de declividades na camada 0-20cm e 20 a 40cm da APA de Botucatu.

DECLIVIDADE	Resistência do Solo (MPa)			
	Prof 0-20cm		Prof 20-40cm	
Declividade				
até 6%	6.44	a	6.00	a
de 6 a 12%	7.11	a	6.36	a
de 12 a 20%	4.85	a	5.19	a
de 20 a 40%	2.38	b	3.66	a
maior que 40%	2.92	b	4.04	a
Média	5.88		5.68	

Letras iguais na coluna indicam não significância pelo teste de Scott-Knott a 5%.

Na Tabela 2, observa-se que os menores valores da resistência do solo também foram encontrados nas maiores classes de declividade, na camada 20 a 40cm, evidenciando novamente que o uso agropastoril é mais intenso nas camadas de menores declividades, porem nas classes de declividades maiores os valores não foram significativamente diferente das classes menores e isso pode inferir outras perspectivas sobre a declividade, por exemplo, onde existem as maiores declividades são encontrados solos mais rasos, onde afloramentos da rocha base (basaltos ou arenitos) podem influenciar essa maior resistência nas camadas mais profundas (20 a 40cm). Ou a cobertura vegetal que nas classes de declividade maiores é de maior parte de florestas nativas, onde as raízes das arvores de grande porte podem exercer essa força de compactação. Mas fica evidenciado que não existem diferenças significativas da resistência do solo entre as classes de declividades nas camadas mais profundas do solo (20 a 40cm).

5.3 A Resistência do Solo e os Tipos de Solos

Os diferentes tipos de solos, com suas diferentes características e composições singulares acabam possuindo diferentes valores na resistência do solo, condicionado pelos processos ambientais naturais, mas também por processos decorrentes do uso antrópico. Foram analisados os seguintes diferentes tipos de solos encontrados na área objeto de estudo e os resultados estão expostos na Tabela 3 e Figura 20:

- **LVdf**= Latossolos Vermelhos Distróféricos
- **LVd**= Latossolos Vermelhos Distróficos
- **PVAd1**= Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos
- **LVAd1**= Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos
- **RLe**= Neossolos Litólicos Eutróficos
- **RQoTípico**= Neossolos Quartzênicos Típicos
- **GXbd**= Gleissolos Háplicos Tb

Tabela 3: Resistência do solo nos diferentes tipos de solos da APA de Botucatu.

Prof. Em Camadas(cm)	RLe	LVd	PVAd1	LVAd1	RQoTípico	GXbd	LVdf
0-5	3,22	3,41	2,69	5,25	5,19	5,48	3,73
5-10	5,66	5,39	4,70	7,79	8,72	10,05	11,17
10-15	4,56	5,72	5,36	6,81	8,75	11,15	14,55
15-20	4,16	5,45	6,13	6,87	8,74	7,29	11,69
20-25	4,26	5,17	6,28	5,44	8,24	6,73	8,93
25-30	3,86	5,06	6,23	5,57	8,14	5,87	7,14
30-35	4,04	5,08	7,31	5,57	8,06	6,16	5,77
35-40	4,18	4,96	7,80	4,89	7,44	6,33	5,35
40-45	4,27	4,94	7,78	3,96	7,71	5,64	5,15
45-50	4,15	4,72	6,29	3,49	7,75	5,82	7,91

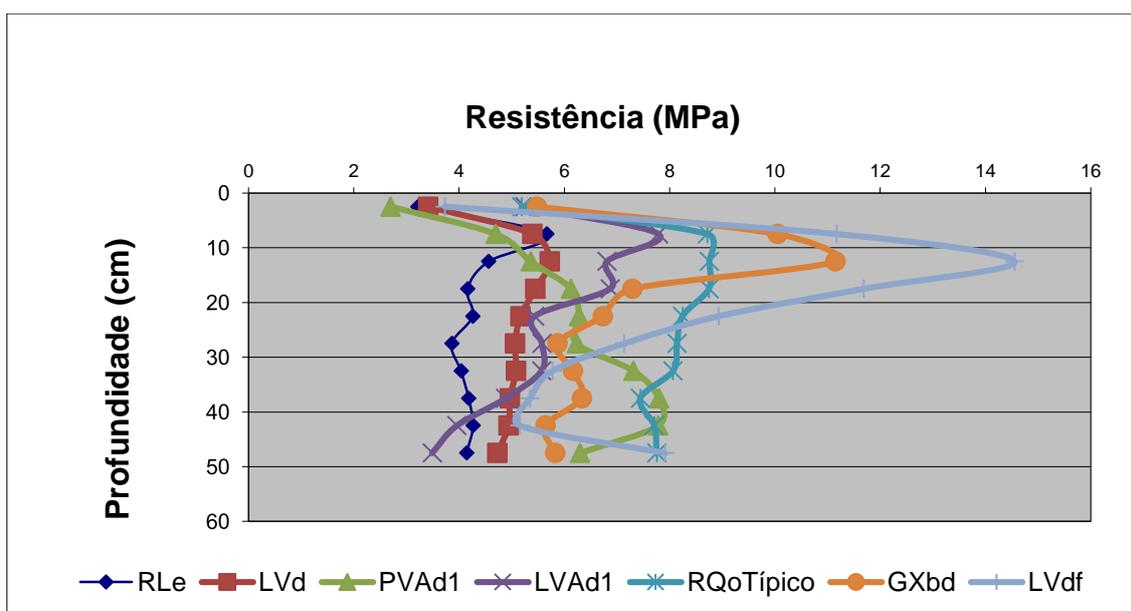


Figura 20: Resistência do solo em profundidades para os diferentes tipos de solos da APA de Botucatu

Observa-se na Tabela 4 que não existem diferenças significativas na resistência do solo nas diferentes classes de solos, nas diferentes profundidades. Fica evidenciado que a resistência varia de acordo com os diferentes tipos de solos, pois cada solo possui características físicas e químicas distintas, porém essas diferenças na resistência do solo não foram significativas para os diferentes tipos de solo tanto nas camadas superficiais (0 a 20cm) como nas camadas mais profundas (20 a 40cm), o que ressalta a ideia de que os outros fatores, como a declividade ou o uso do solo e cobertura vegetal possam ter uma influência maior no valores de resistência do solo encontrados nesse estudo.

Tabela 4: Análise comparativa entre médias das resistências do solo e os tipos de solos na camada 0-20cm e 20-40cm da APA de Botucatu.

TIPOS DE SOLO	Resistência do Solo (MPa)	
	Prof 0-20cm	Prof 20-40cm
Solos		
GXbd	8.49 a	6.27 a
LVAd1	6.68 a	5.37 a
LVd	4.99 a	5.07 a
PVAd1	4.72 a	6.90 a
RLe	4.40 a	4.09 a
Tipo	7.85 a	7.97 a
Média	5.82	5.67
Letras iguais na coluna indicam não significância pelo teste de Scott-Knott a 5%.		

As diferentes características físicas do solo, como teor de areia total, teor de argila e silte também apresentam valores diferenciados para cada tipo de solo e apresentam também diferentes médias na resistência do solo conforme pode ser observado no Quadro 6. Os dados mostram que os tipos de solo que possuem grande teor de areia total, como RQoTípico, GXbd apresentam altos valores de resistência do solo à penetração mecânica, mas Luciano et al (2012) ressaltaram que os diferentes tipos de solos possuíam comportamentos distintos quando submetidos à compactação, devido às variações da textura, da mineralogia, do teor de matéria orgânica, da umidade, além do histórico de pressões promovido pelos processos pedogenéticos de formação e pelo manejo do solo.

Quadro 6: Atributos físicos dos tipos de solos da APA de Botucatu.

Classe de Solo	Argila(%)	Areia Total(%)	Silte(%)	RES 0-20cm (MPa)	RES 20-40cm (MPa)
RQoTípico	7,84	88,16	3,99	7,85	7,97
GXbd	12,77	81,10	6,13	8,49	6,27
RLe	16,50	75,09	8,41	4,40	4,09
LVd	20,88	66,56	12,56	4,99	5,07
PVAd1	37,44	49,70	12,86	4,72	6,90
LVAd1	30,90	48,80	20,30	6,68	5,37
Média	21,06	68,24	10,71	5,82	5,67
Desvio Padrão	11,22	16,33	5,85	1,74	1,39
CV(%)	1,88	4,18	1,83	3,56	4,27

5.4 A Resistência do Solo e o Uso do Solo e Cobertura Vegetal

O uso do solo e cobertura vegetal é também um fator de influência na resistência do solo, sendo esse um fator tanto natural (as florestas nativas e as outras coberturas vegetais naturais) como um fator decorrente do resultado direto das ações do homem no ambiente. Optou-se por separar por tipo de uso e cobertura, para um melhor entendimento, sendo estas: Café, Cana de Açúcar, Citros, Eucalipto, Pastagem e Vegetação Nativa, conforme pode ser observado no Tabela 5 e Figura 21.

Tabela 5: Resistência do solo nas áreas de diferentes usos do solo e cobertura vegetal da APA de Botucatu.

Prof. Em Camadas(cm)	Nativa	Café	Eucalipto	Citros	Pastagem	Cana de Açúcar
0-5	1,06	2,23	2,50	5,89	7,38	6,49
5-10	2,35	4,16	5,11	7,48	11,43	10,53
10-15	2,80	3,84	6,01	6,03	9,53	11,25
15-20	3,12	4,10	7,48	5,52	7,84	9,15
20-25	3,39	3,56	6,79	6,39	7,28	7,70
25-30	3,41	3,51	6,40	7,61	6,61	7,39
30-35	3,60	3,52	7,00	7,65	6,16	7,31
35-40	3,82	3,16	6,37	9,08	5,41	7,07
40-45	4,07	3,08	6,47	10,18	5,13	6,23
45-50	4,08	2,79	6,56	9,17	5,03	5,99

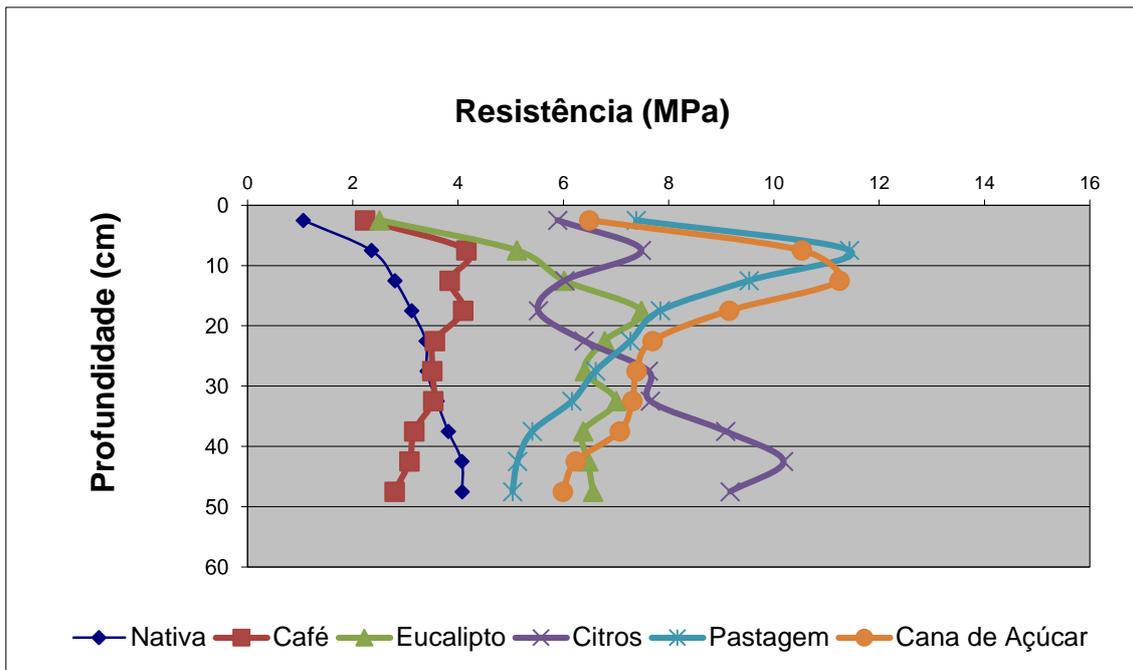


Figura 21: Resistência do solo em profundidades nos diferentes usos do solo e cobertura vegetal da APA de Botucatu.

Observa-se na Tabela 6 que existiram diferenças significativas na resistência do solo nos diferentes tipos de uso do solo e cobertura vegetal. Ficou evidenciado que a resistência variou de acordo com o uso do solo e sua cobertura vegetal, principalmente com relação à florestas nativas, as florestas plantadas (eucalipto) e as culturas permanentes como o café, que apresentaram valores de resistência à penetração mecânica de baixos a médios. O Citros, apesar de ser uma cultura permanente, exige um manejo mais intenso, comparado ao manejo das outras culturas permanentes, bem como das culturas perenes, o que refletiu diretamente no valor de resistência do solo apresentado. As pastagens e as culturas de cana de açúcar, apresentaram os maiores valores de resistência do solo nas camadas mais superiores do solo (0-20cm).

Nas camadas mais profundas do solo (20-40cm), também houve diferenças significativas entre os diferentes tipos de uso e cobertura vegetal e a resistência do solo, destacando as florestas nativas onde não existem manejos e as culturas de café onde o manejo é pouco intenso. Já as florestas plantadas, o citros, as pastagens e cana de açúcar, não apresentaram diferenças significativas entre si, o que remete ao fato dos diferentes tipos de manejo, onde Reichert et al. (2007) destacou que os sistemas de manejo teriam comportamento diferente em relação à atuação das máquinas, pois no plantio convencional, a camada compactada era rompida pelos implementos de preparo do solo, transferindo a

compactação para maiores profundidades pelo tráfego e contato dos implementos com o solo subsuperficial. No sistema de plantio direto ou em pastagens não há revolvimento e a compactação do solo fica mais restrita à sua superfície; em áreas florestais, a cada revolvimento do solo a compactação é eliminada até à camada de ação dos implementos, porém, em áreas sob condução de rebrota, a compactação permanece.

Tabela 6: Análise comparativa entre médias da resistência do solo e as classes de uso do solo e cobertura vegetal nas camadas 0-20cm e 20-40cm da APA de Botucatu.

USO DO SOLO	Resistência do Solo (MPa)	
	Prof 0-20cm	Prof 20-40cm
Café	3.58 c	3.44 b
Cana	9.35 a	7.37 a
Citrus	6.23 b	7.69 a
Eucalipto	5.28 c	6.64 a
Nativa	2.33 c	3.55 b
Pasto	9.05 a	6.37 a
Média	5.88	5.68
Letras iguais na coluna indicam não significância pelo teste de Scott-Knott a 5%.		

5.5 A Geoestatística na Distribuição Espacial da Resistência do Solo

Foram testados três modelos de semivariograma para o método de Krigagem Ordinária na elaboração dos mapas de distribuição espacial da resistência do solo, bem como dos atributos físicos (teor de areia total e argila, todos em porcentagem) dos pontos amostrados: o modelo exponencial, o modelo esférico e o modelo gaussiano.

Segundo Vieira (1997; 1998), Guimarães (2013) e Esri (2013), existem diversos parâmetros para dizer se um método é mais adequado que outro, e essa análise é chamada de validação cruzada. Segundo esses autores o parâmetro RMS (*root mean square*) ou raiz quadrada do erro médio quadrático, onde os menores valores indicam um modelo mais adequado, pois indicam que os dados estimados pela interpolação estão mais próximos dos medidos em campo. Este deve ser o parâmetro primário dentro de uma validação cruzada, portanto, considerando o menor RMS e atendendo aos outros parâmetros da validação cruzada, foram escolhidos os modelos de semivariograma para cada elemento ou atributo, na elaboração dos mapas de distribuição espacial.

Conforme pode ser observado nos Quadros 7, 8, 9, 10 e 11 e nas Figuras 22, 23, 24, 25 e 26 tanto para a distribuição espacial da resistência do solo nas camadas 0 a 20cm como nas camadas 20 a 40cm e inclusive para os atributos físicos do solo [teor de areia total (%), teor de silte (%) e argila (%)], o modelo exponencial apresentou melhor desempenho, tendo o menor RMS e atendendo os outros requisitos da validação cruzada.

Distribuição Espacial da Resistência do Solo na profundidade 0cm a 20cm

Segue abaixo o Quadro 7 contendo a validação cruzada e o mapa, Figura 22, para a distribuição espacial da resistência do solo na profundidade 0 a 20cm.

Quadro 7: Validação cruzada da distribuição espacial da resistência do solo na camada 0-20cm da APA de Botucatu.

Validação Cruzada	Parâmetro	Exponencial	Esférico	Gausiano
Amostras	-	78	78	78
Média dos Valores Medidos	-	5,8802	5,8802	5,8802
Média dos Valores Estimados	-	5,9091	5,9063	5,9039
Média Do Erro de Estimção (MEE)	valores ≈ 0	0,028924774	0,026127994	0,02370565
Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático (RMS)	valores $<$	3,553772855	3,566558467	3,564079575
Média Do Desvio Padrão Proveniente da Krigagem (MS)	valores ≈ 0	0,004088951	0,004341972	0,003790025
Raiz Quadrada do Erro Quadrático Padronizado (RMSS)	valores ≈ 1	0,949392796	0,949859227	0,949391981
Média Do Erro Após Padronização (ASE)	valores \approx ao RMS	3,776367812	3,755146499	3,754673435

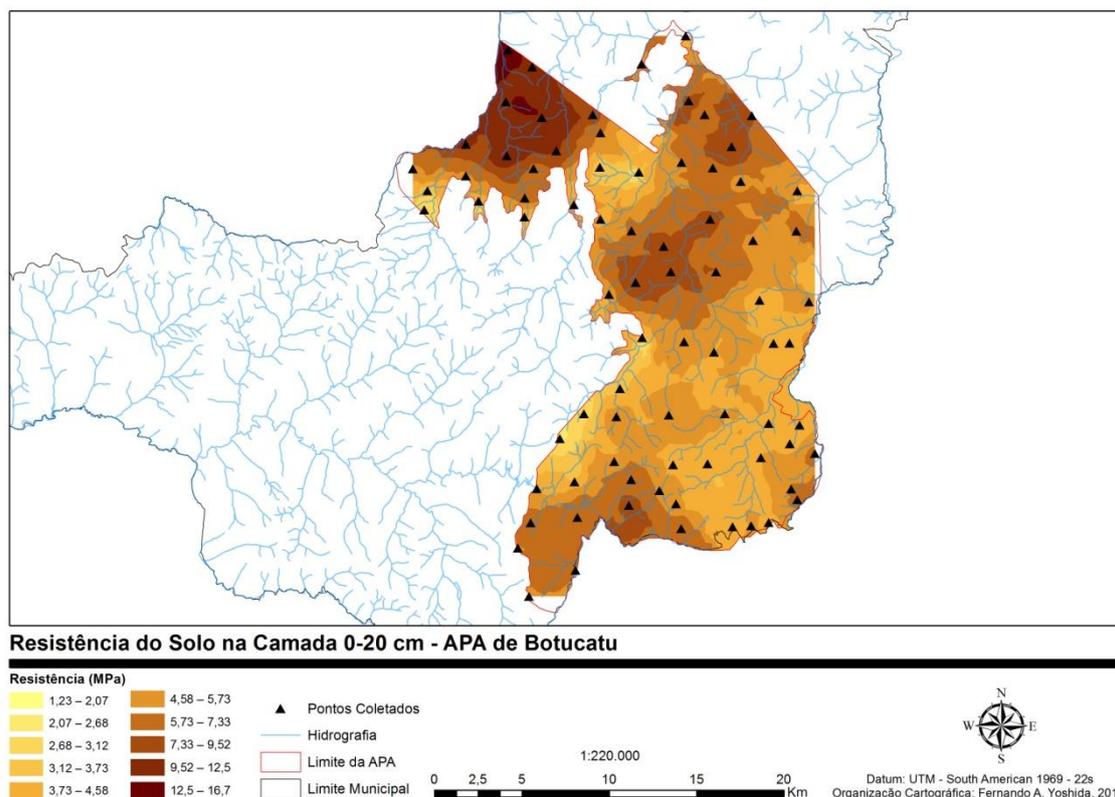


Figura 22: Distribuição espacial da resistência do solo na camada 0 – 20cm da APA de Botucatu.

Distribuição Espacial da Resistência do Solo na profundidade 20cm a 40cm

Segue abaixo o Quadro 8 contendo a validação cruzada e o mapa, Figura 23, para a distribuição espacial da resistência do solo na profundidade 20 a 40cm.

Quadro 8: Validação cruzada da distribuição espacial da resistência do solo na camada 20-40cm da APA de Botucatu.

Validação Cruzada	Parâmetro	Exponencial	Esférico	Gausiano
Amostras	-	78	78	78
Média dos Valores Medidos	-	5,6815	5,6815	5,6815
Média dos Valores Estimados	-	5,7187	5,7149	5,7009
Média Do Erro de Estimação (MEE)	valores \approx 0	0,037236782	0,033407131	0,01939159
Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático (RMS)	valores <	2,727680134	2,783674619	2,750600104
Média Do Desvio Padrão Proveniente da Krigagem (MS)	valores \approx 0	0,007464413	0,007888431	0,007915077
Raiz Quadrada do Erro Quadrático Padronizado (RMSS)	valores \approx 1	1,103554947	1,101751963	1,091606892
Média Do Erro Após Padronização (ASE)	valores \approx ao RMS	2,528948346	2,510641175	2,504931034

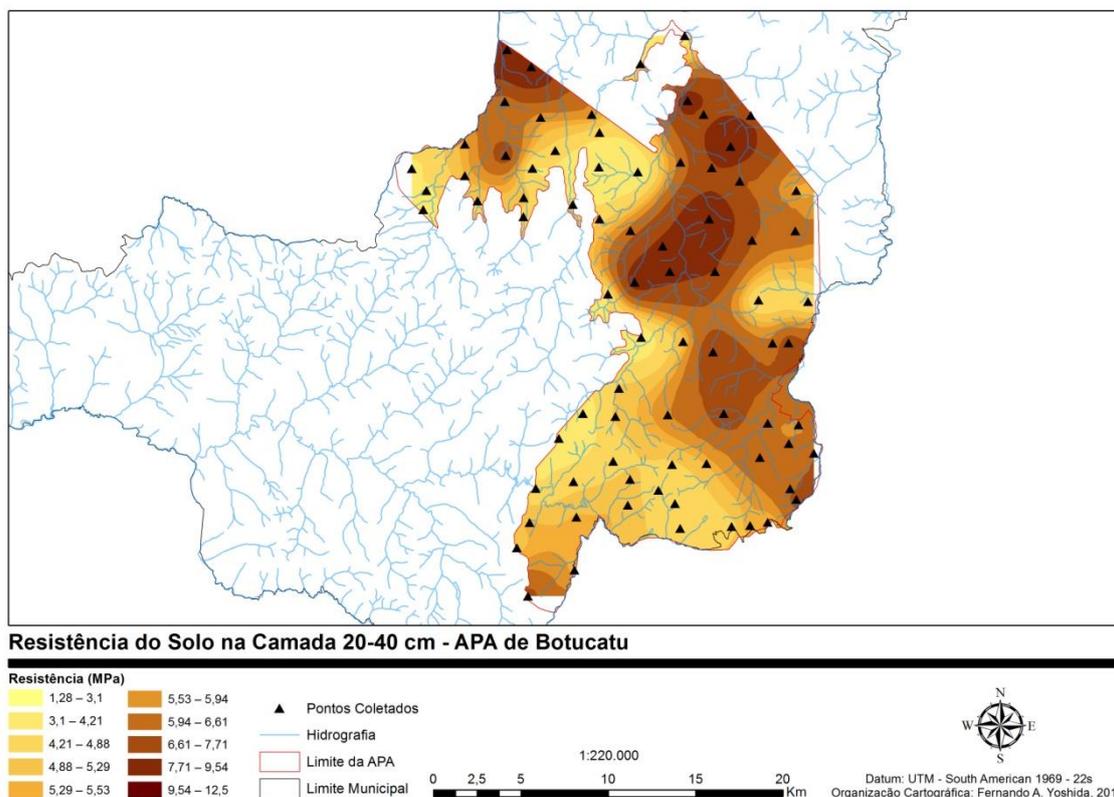


Figura 23: Distribuição espacial da Resistência do solo na camada 20 – 40cm da APA de Botucatu.

Distribuição Espacial do Teor de Areia Total (%) do Solo

Segue abaixo o Quadro 9 contendo a validação cruzada e o mapa, Figura 24, para a distribuição espacial do teor de areia total (%).

Quadro 9: Validação cruzada da distribuição espacial do teor de areia total (%) da APA de Botucatu.

Validação Cruzada	Parâmetro	Exponencial	Esférico	Gausiano
Amostras	-	78	78	78
Média dos Valores Medidos	-	71,768	71,768	71,768
Média dos Valores Estimados	-	71,882	71,8900	71,8470
Média Do Erro de Estimção (MEE)	valores ≈ 0	0,113191359	0,121569468	0,078393248
Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático (RMS)	valores $<$	16,43776094	16,43972365	16,44382472
Média Do Desvio Padrão Proveniente da Krigagem (MS)	valores ≈ 0	0,00544568	0,006327119	0,003870087
Raiz Quadrada do Erro Quadrático Padronizado (RMSS)	valores ≈ 1	1,000196583	0,984493832	0,981070466
Média Do Erro Após Padronização (ASE)	valores \approx ao RMS	16,74492256	16,7813603	16,82440924

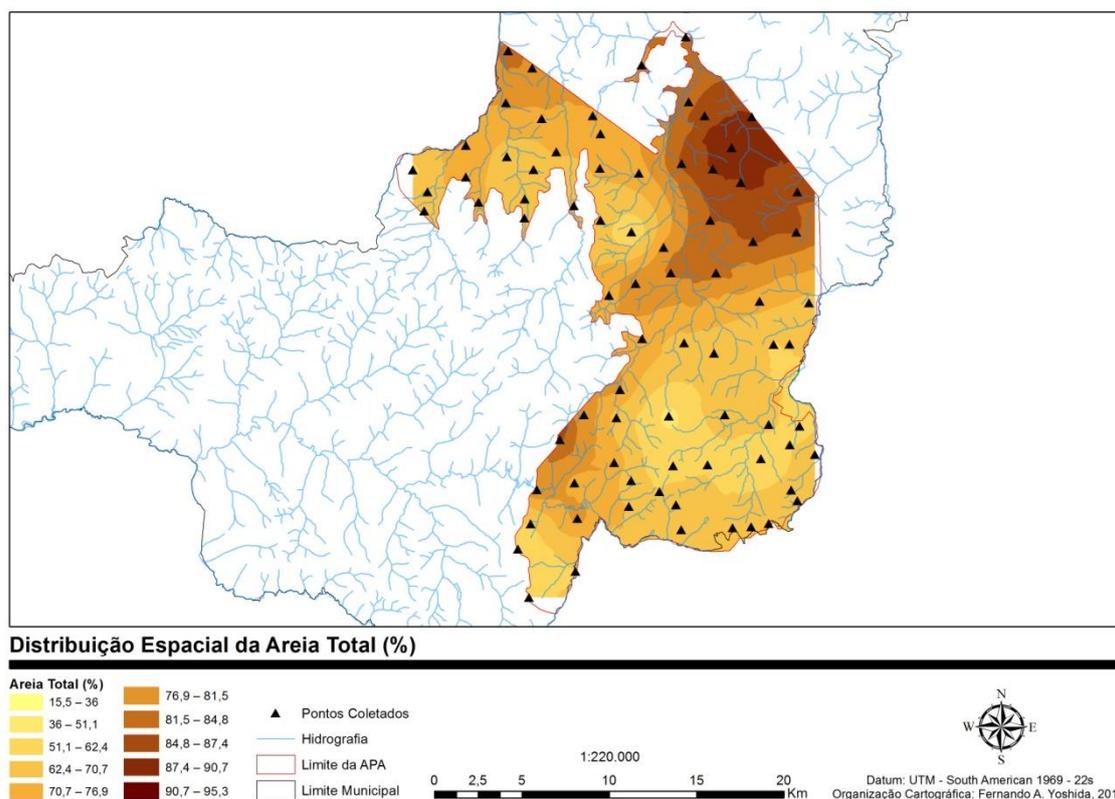


Figura 24: Distribuição espacial da areia total (%) da APA de Botucatu.

Distribuição Espacial do Teor de Argila (%) do Solo

Segue abaixo o Quadro 10 contendo a validação cruzada e o mapa, Figura 25, para a distribuição espacial do teor de argila (%).

Quadro 10: Validação cruzada da distribuição espacial do teor de argila (%) da APA de Botucatu.

Validação Cruzada	Parâmetro	Exponencial	Esférico	Gausiano
Amostras	-	78	78	78
Média dos Valores Medidos	-	18,182	18,182	18,182
Média dos Valores Estimados	-	18,185	18,164	18,181
Média Do Erro de Estimação (MEE)	valores ≈ 0	0,002980371	-0,018280127	-0,000949269
Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático (RMS)	valores $<$	11,0721195	11,11117019	11,07214186
Média Do Desvio Padrão Proveniente da Krigagem (MS)	valores ≈ 0	0,000897501	-0,001005586	0,000557805
Raiz Quadrada do Erro Quadrático Padronizado (RMSS)	valores ≈ 1	0,954015264	0,958302077	0,952203749
Média Do Erro Após Padronização (ASE)	valores \approx ao RMS	11,64493123	11,63001969	11,66544386

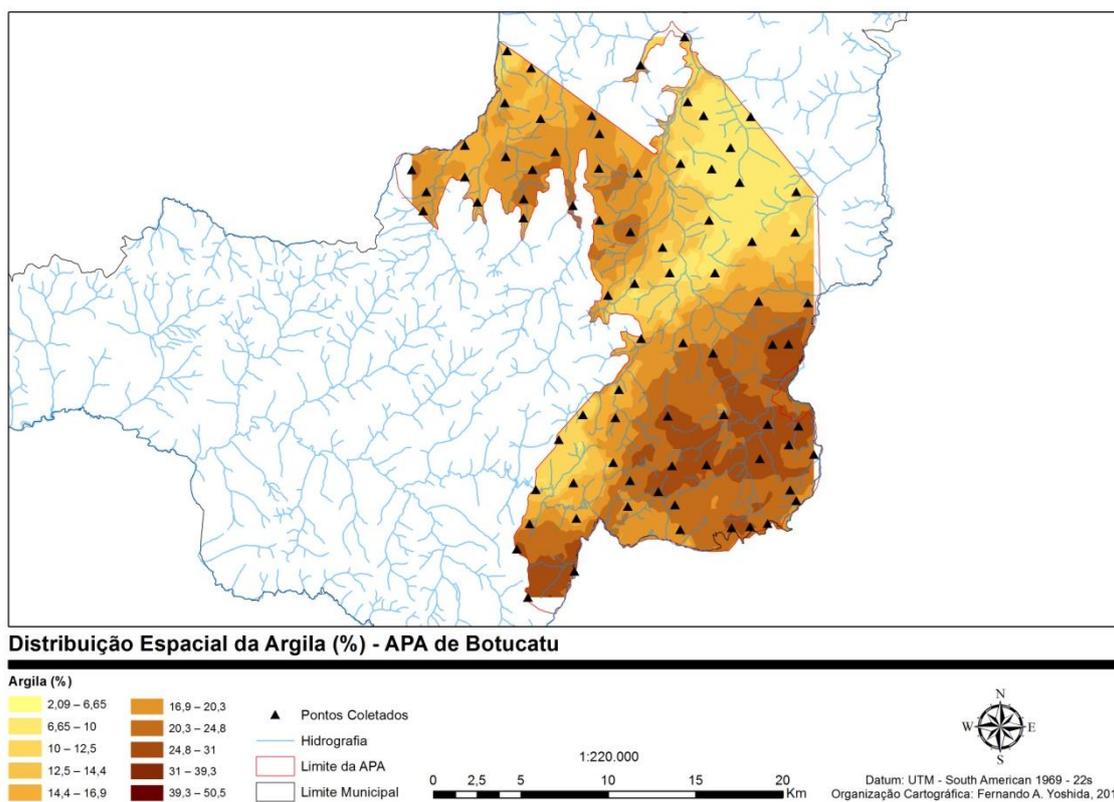


Figura 25: Distribuição espacial da argila (%) da APA de Botucatu.

Distribuição Espacial do Teor de Silte (%) do Solo

Segue abaixo o Quadro 11 contendo a validação cruzada e o mapa, Figura 26, para a distribuição espacial do teor de Silte (%).

Quadro 11: Validação cruzada da distribuição espacial do teor de silte (%) da APA de Botucatu.

Validação Cruzada	Parâmetro	Exponencial	Esférico	Gaussiano
Amostras	-	78	78	78
Média dos Valores Medidos	-	10,0474	10,0474	10,0474
Média dos Valores Estimados	-	10,0177	10,0359	10,0195
Média Do Erro de Estimação (MEE)	valores \approx 0	-0,02971533	-0,011792266	-0,027918474
Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático (RMS)	valores <	7,490080166	7,532684157	7,511489479
Média Do Desvio Padrão Proveniente da Krigagem (MS)	valores \approx 0	-0,003447885	-0,001563785	-0,003652346
Raiz Quadrada do Erro Quadrático Padronizado (RMSS)	valores \approx 1	0,983810978	0,976525027	0,972688506
Média Do Erro Após Padronização (ASE)	valores \approx ao RMS	7,743821964	7,748233933	7,759244915

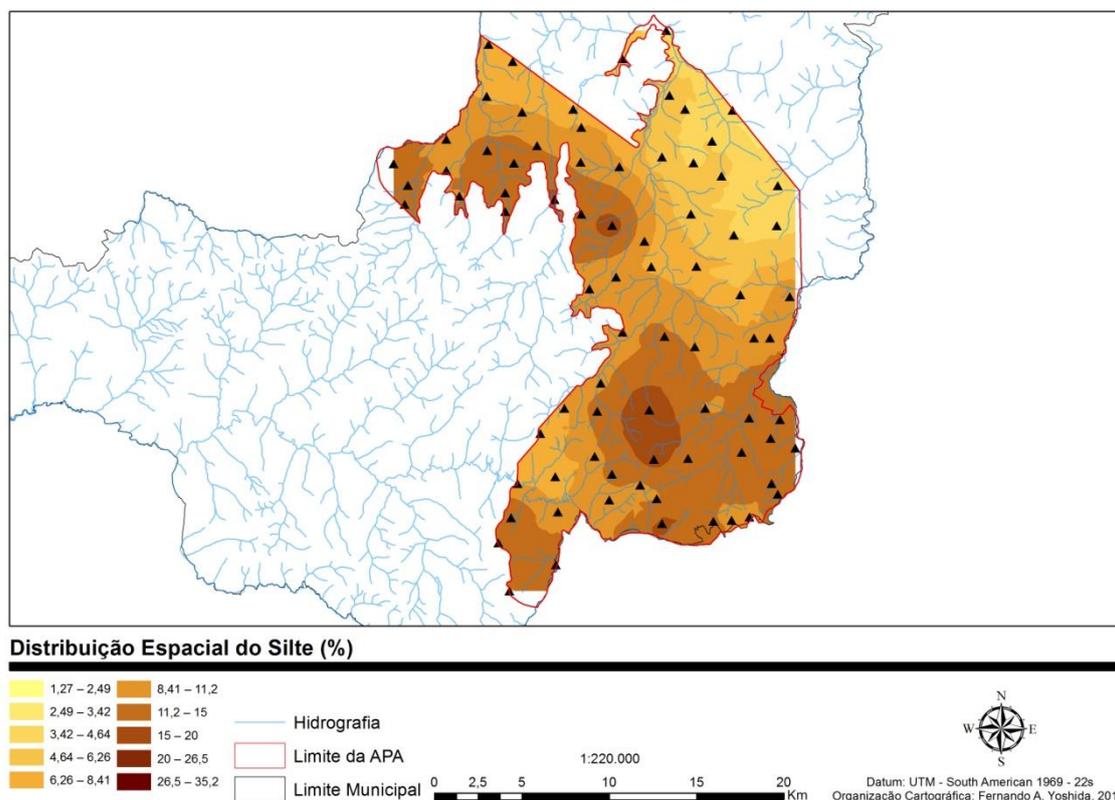


Figura 26: Distribuição espacial do silte (%) da APA de Botucatu.

Como pode ser observado nos quadros 7, 8, 9 10 e 11, a diferença entre um modelo de semivariograma e outra é muito pequena, como por exemplo, no quadro 7, os valores do RMS para a distribuição espacial da resistência do solo na camada 0-20cm ficaram em 3,553 para o modelo exponencial; ,3,566 para o esférico e 3,564 para o gaussiano. Para a distribuição espacial do teor de silte do solo, coforme apresentados no quadro 11, os valores foram 7,490 para o modelo exponencial; 7,532 para o modelo esférico e 7,511 para o gaussiano. mostrando que não existem grandes diferenças entre os modelos de semivariograma. Mello (2004) ressalta que não há entre os modelos (esférico, gaussiano e exponencial) um que se destaque e Vieira et al (1983), pondera que os próprios tipos de dados (valores, porcentagens, desvio padrão entre os valores) podem influenciar no modelo mais adequado para cada aplicação.

5.6 A Análise da Fragilidade Ambiental

A proposta de classes de fragilidade ambiental de Ross (1994) envolvendo diversos parâmetros ambientais como a declividade, as classes de solos, o uso do solo e cobertura vegetal são bastante utilizados e difundidos em diagnósticos e planejamento ambiental. A resistência do solo também é um parâmetro muito utilizado, no planejamento agrícola, mas pouco utilizado nas análises ambientais. Sendo assim, surgiu a proposta de incorporar a resistência do solo, dentro de uma análise ambiental.

Para que isso fosse possível, buscou-se na literatura os índices de fragilidade da resistência do solo, onde foi possível elaborar um índice, com classes e valores, para a realidade local, a área objeto de estudo.

Canarache (1990) e USDA (1993) propuseram uma classificação com classes e valores para a resistência do solo levando em consideração a o desenvolvimento das raízes, na verdade, o impedimento do desenvolvimento das raízes e a capacidade de infiltração de água no solo, considerando-os como uma fragilidade ambiental. Esse estudo buscou então, a partir desses dois índices, criar outro índice, levando em consideração também os valores da resistência do solo encontrado em campo e assim agrupar diferentes valores para a fragilidade ambiental para a resistência do solo, conforme pode ser observado nos quadros 4 e 5.

Os índices de Canarache (1990) e USDA (1994) agruparam valores de resistência do solo em classe, sendo que o USDA leva em consideração as culturas de ciclo curto, que normalmente são de espécies vegetais não arbustivas ou arbóreas e que possuem raízes frágeis e assim, que sofrem muito com a compactação do solo e a baixa retenção de água. Já o índice de Canarache (1990) levava em consideração também as culturas de ciclo mais longo, com raízes mais robustas, por isso as classes menores agrupam valores mais altos.

Segue abaixo então, no Quadro 12, o índice de fragilidade ambiental para a resistência do solo que o presente estudo elaborou:

Quadro 12: Índice de fragilidade ambiental para a resistência do solo proposto por esse estudo.

Resistência do Solo (MPa)	Limitações	Fragilidade Ambiental
Até 1,5	Sem limitação	Muito Baixa
De 1,5 a 3,0	Pouca limitação	Baixa
De 3,0 a 6,0	Algumas limitações	Média
De 6,0 a 12,0	Sérias limitações	Forte
> 12,0	Sérias limitações até inviabilidade	Muito Forte

Pode-se afirmar que esse índice proposto nesse estudo (quadro 12) representou uma realidade local ou regional, levando em consideração os fundamentos teóricos encontrados na literatura conforme visto acima, mas também os aspectos regionais, pois foi fundamentado nos valores encontrados e medidos em campo.

5.6.1 Distribuição Espacial da Fragilidade Ambiental

Segundo os pressupostos de Sothava (1976), a preocupação central dos estudos ambientais não seria simplesmente estudar os componentes da natureza, mas sim, as conexões entre eles. As diferentes associações e interações entre os componentes do estrato geográfico definem ambientes dotados de uma dinâmica própria, onde o estudo dessa dinâmica leva a um entendimento desta relação.

A concepção de produtos cartográficos, denominados de Cartas de Fragilidades, decorreu do cruzamento das variáveis descritas Ross (1994), onde cada tabela se traduziu por um cartograma (mapa) de trabalho que representou as classes de fragilidade para a declividade (Quadro 13 e Figura 27), classes de fragilidade dos tipos de solos (Quadro 14 e Figura 28), classes de fragilidade para o uso do solo e cobertura vegetal (Quadro 15 e Figura 29) e finalmente, esse estudo propõe classes de fragilidade para a resistência do solo (Quadro 16 e Figura 30).

5.6.1.1 A Fragilidade Ambiental para a Declividade

Segue abaixo o Quadro 13 e a carta de fragilidade ambiental, Figura 27, para a declividade da APA de Botucatu.

Quadro 13: Índice de fragilidade ambiental para as classes de declividade. Fonte: Ross (1994).

Classes de Declividade (%)	Fragilidade Ambiental
Até 6%	Muito Baixa
de 6 a 12%	Baixa
de 12 a 20%	Média
de 20 a 40%	Forte
> de 40%	Muito Forte

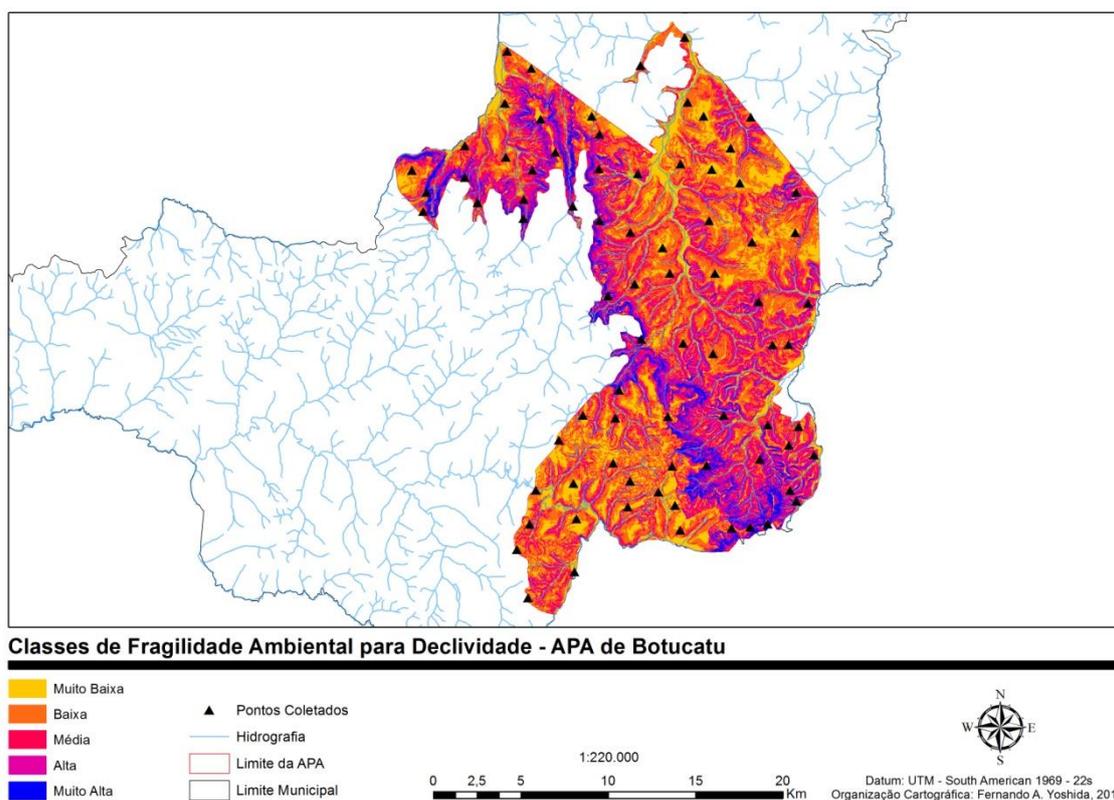


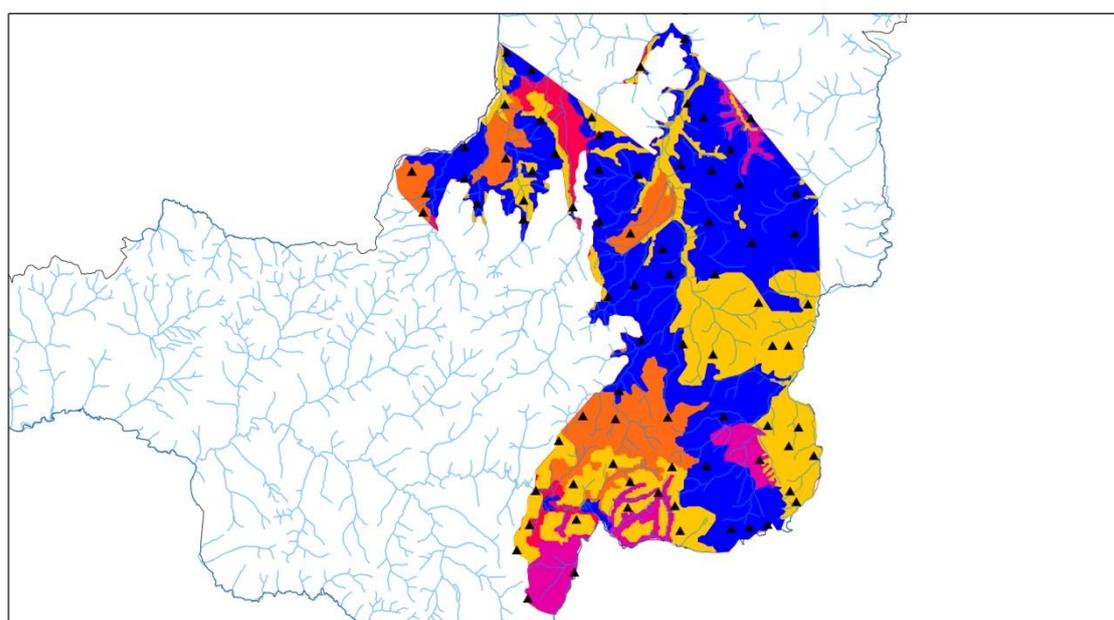
Figura 27: Classes de fragilidade ambiental para declividade da APA de Botucatu.

5.6.1.2 A Fragilidade Ambiental para os Tipos de Solo

Segue abaixo o Quadro 14 e a carta de fragilidade ambiental, Figura 28, para as classes de solo da APA de Botucatu.

Quadro 14: Índice de fragilidade ambiental dos tipos de solos. Fonte: Ross (1994).

Tipos de Solo	Fragilidade Ambiental
GXbd, LVd, LVdf	Muito Baixa
LVA _{d1}	Baixa
NVdf	Média
PVA _{d1}	Forte
RLe, RQoTípico	Muito Forte



Classes de Fragilidade Ambiental para Tipos de Solos - APA de Botucatu

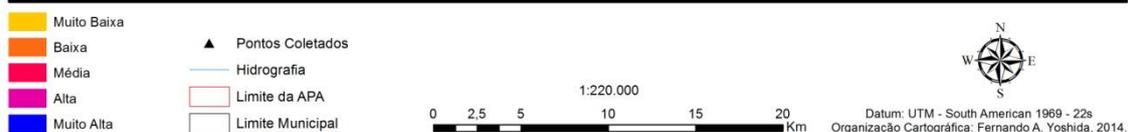


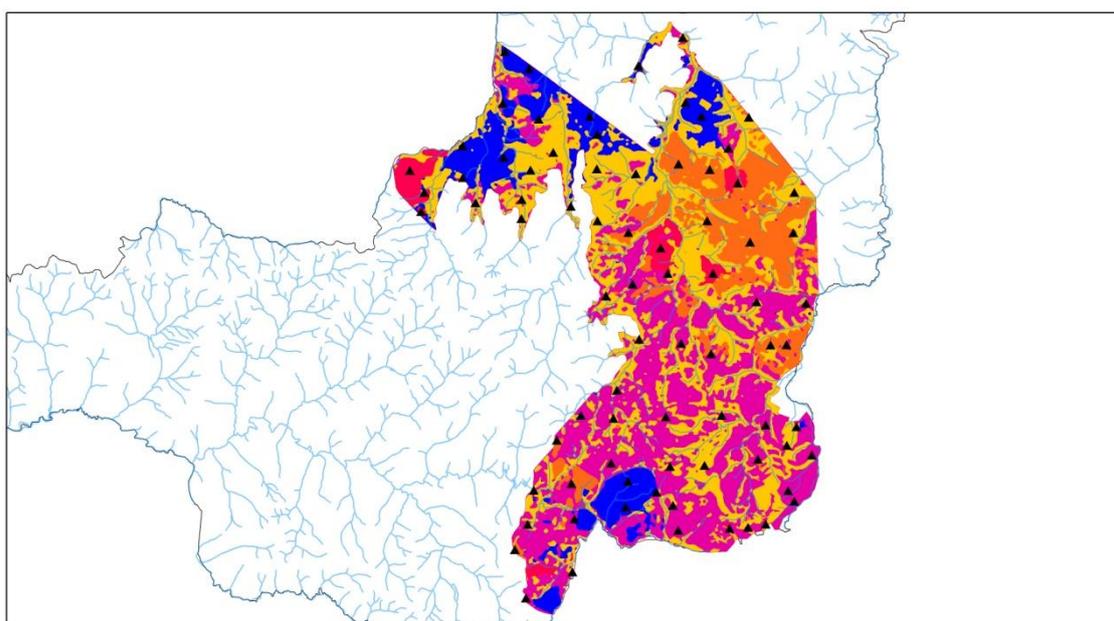
Figura 28: Classes de fragilidade ambiental para tipos de solos da APA de Botucatu.

5.6.1.3 A Fragilidade Ambiental para o Uso do Solo e Cobertura Vegetal

Segue abaixo o Quadro 15 e a carta de fragilidade ambiental, Figura 29, para os diferentes usos do solo e cobertura vegetal da APA de Botucatu.

Quadro 15: Índice de fragilidade ambiental dos tipos de uso do solo e cobertura vegetal. Fonte: Ross (1994).

Uso do Solo e Cobertura Vegetal	Fragilidade Ambiental
Nativa	Muito Baixa
Eucalipto	Baixa
Café, Citrus	Média
Pastagem	Forte
Cana de Açúcar	Muito Forte



Classes de Fragilidade Ambiental para Uso do Solo e Cobertura Vegetal - APA de Botucatu

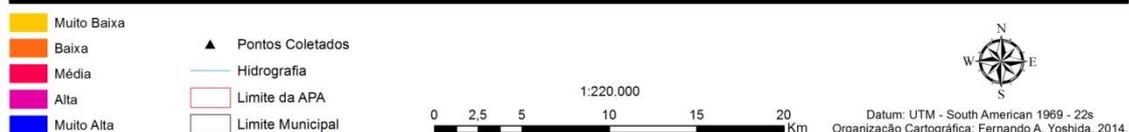


Figura 29: Classes de fragilidade ambiental para uso do solo e cobertura vegetal da APA de Botucatu.

5.6.1.4 A Fragilidade Ambiental para a Resistência do Solo

Conforme proposto por Canarache (1990) e USDA (1993), os diferentes níveis de resistência do solo à penetração mecânica apresentam diferentes graus de fragilidade ambiental, que podem ser representadas espacialmente em uma carta de fragilidade ambiental. Esse estudo propõe então, um índice de fragilidade ambiental para a resistência do solo baseado nos autores supracitados e nos dados coletados em campo.

Segue abaixo o índice desenvolvido nesse estudo, Quadro 16 e a carta de fragilidade ambiental, Figura 30, para as diferentes resistências do solo da APA de Botucatu.

Quadro 16: Índice de fragilidade ambiental da resistência do solo.

Resistência do Solo (MPa)	Limitações	Fragilidade Ambiental
Até 1,5	Sem limitação	Muito Baixa
De 1,5 a 3,0	Pouca limitação	Baixa
De 3,0 a 6,0	Algumas limitações	Média
De 6,0 a 12,0	Sérias limitações	Forte
> 12,0	Sérias limitações até inviabilidade	Muito Forte

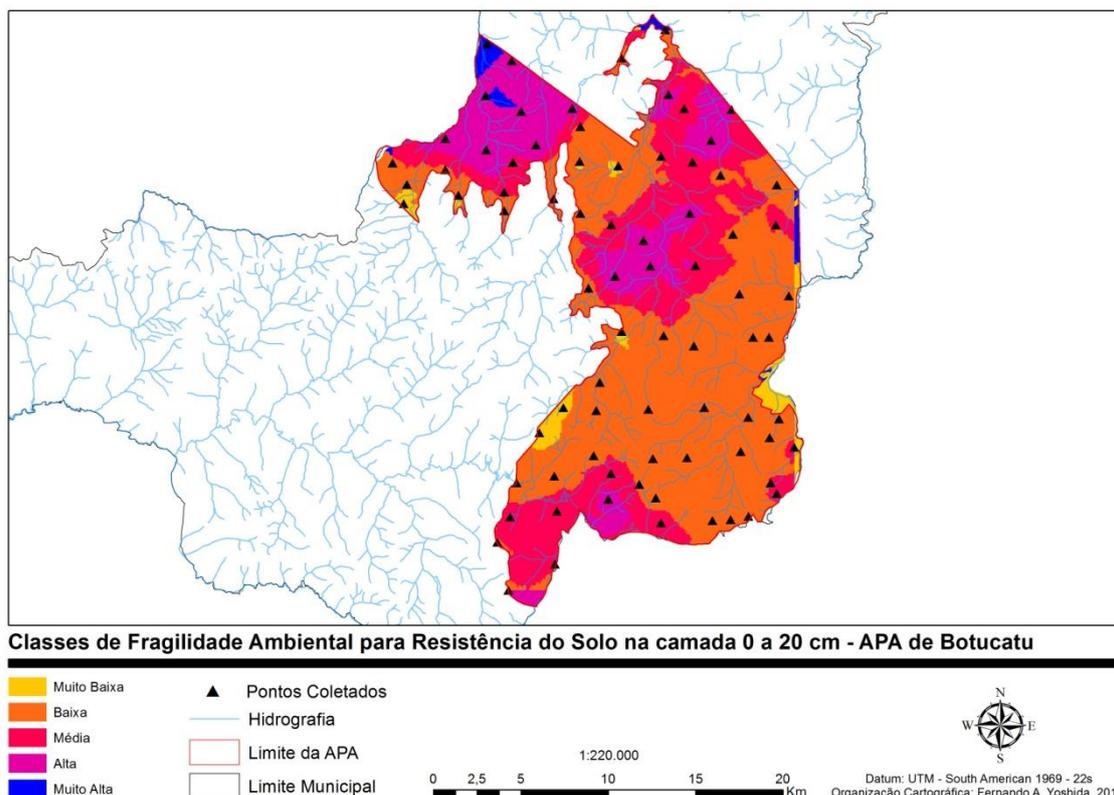


Figura 30: Classes de fragilidade ambiental da resistência do solo na camada 0 – 20cm da APA de Botucatu.

5.7 A Análise de Decisão Multicritérios

A análise de decisão multicritérios, como vista na metodologia, é um processo que combina e transforma dados geográficos (dados de entrada) em uma decisão resultante (dados de saída). Os procedimentos envolvem a utilização de dados geográficos, dos atributos dos elementos envolvidos na análise (classes de fragilidades) e das regras de decisão (matriz de multicritérios) para se obter o resultado esperado (MARTINS, 2009).

Os dados de entrada são os mapas de fragilidade ambiental da declividade, das classes de solo, do uso e cobertura vegetal e da resistência do solo. O dado de saída é a carta de fragilidade ambiental da APA de Botucatu, que na verdade é a combinação dos elementos analisados após as regras de decisão, ou seja, a matriz de multicritérios.

5.7.1 Matriz de Multicritérios

Para a elaboração da matriz de multicritérios aplicou-se notas para as classes de fragilidade, conforme o Quadro 17:

Quadro 17: Notas para as classes de fragilidade ambiental da análise multicritérios. Adaptado de Ross (1994).

Fragilidade Ambiental	Nota
Muito Baixa	1
Baixa	2
Média	3
Forte	4
Muito Forte	5

Na atribuição dos pesos para os elementos envolvidos na análise aplicou-se pesos iguais, uma vez que todos eles, a sua maneira, representam valores diferentes de fragilidade ambiental não existindo uma hierarquia entre eles, observado no Quadro 18 abaixo:

Quadro 18: Pesos para os elementos da análise multicritérios.

Elementos	Pesos
Resistência do Solo (MPa)	0,25
Classe de Solo	0,25
Declividade (%)	0,25
Uso do Solo e Cobertura Vegetal	0,25
Total	1

Apresenta-se abaixo então, no Quadro 19, a matriz de multicritérios desenvolvida nesse estudo.

Quadro 19: Matriz de multicritérios para APA de Botucatu.

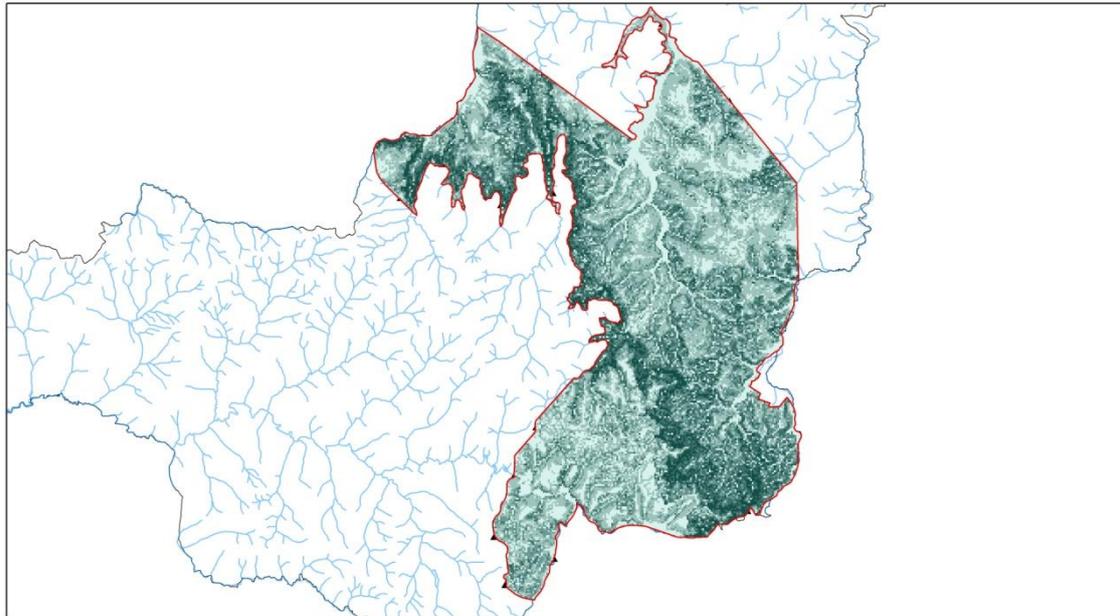
Critérios	Elementos de Avaliação	Fragilidade Ambiental	Nota	Peso
Resistência do Solo (MPa)	Até 1,5 MPa	Muito Baixa	1	0,25
	De 1,5 a 3,0 MPa	Baixa	2	
	De 3,0 a 6,0 MPa	Média	3	
	De 6,0 a 12,0 MPa	Forte	4	
	> que 12,0 MPa	Muito Forte	5	
Classe de Solo	GXbd, LVd	Muito Baixa	1	0,25
	LVA _d 1	Baixa	2	
	NV _{df}	Média	3	
	PVA _d 1	Forte	4	
	RLe, RQoTípico	Muito Forte	5	
Declividade (%)	Até 6%	Muito Baixa	1	0,25
	de 6 a 12%	Baixa	2	
	de 12 a 20%	Média	3	
	de 20 a 40%	Forte	4	
	> de 40%	Muito Forte	5	
Uso do Solo e Cobertura Vegetal	Nativa	Muito Baixa	1	0,25
	Eucalipto	Baixa	2	
	Café, Citrus	Média	3	
	Pastagem	Forte	4	
	Cana de Açúcar	Muito Forte	5	

5.7.2 Álgebra de Mapas

A álgebra de mapas permitiu combinar múltiplos mapas, atribuindo notas e pesos para os elementos envolvidos e identificando relações, através de expressões algébricas de maneira fácil e eficiente (MARTINS, 2009).

Os mapas de fragilidades da declividade, dos tipos de solo, do uso do solo e cobertura vegetal e da resistência do solo foram convertidos de vetor para raster com tamanho de pixel 92 (cell size) e cada pixel com seu valor atribuído pela nota da fragilidade ambiental (de 1 até 5).

Segue abaixo os mapas (Figuras 31, 32, 33 e 34) em formato raster dos elementos envolvidos na análise de multicritérios.



Raster - Classes de Fragilidade Ambiental para Declividade - APA de Botucatu

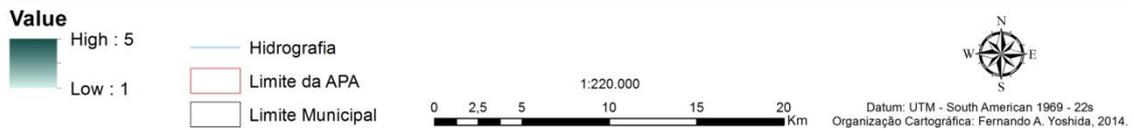
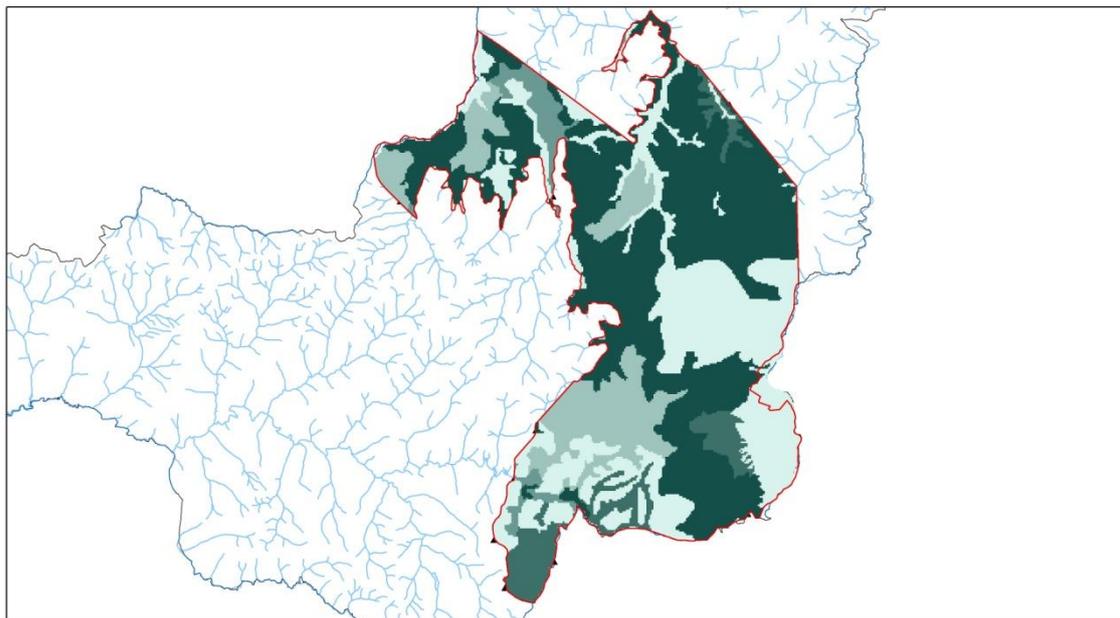


Figura 31: Raster das classes de fragilidade ambiental da declividade da APA de Botucatu.



Raster - Classes de Fragilidade Ambiental para Tipos de Solos - APA de Botucatu

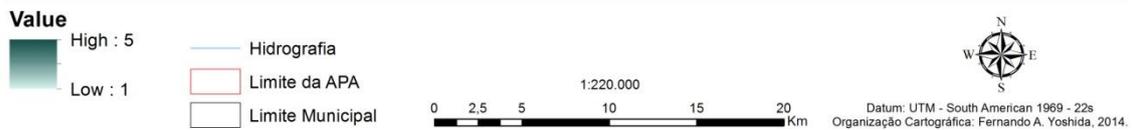
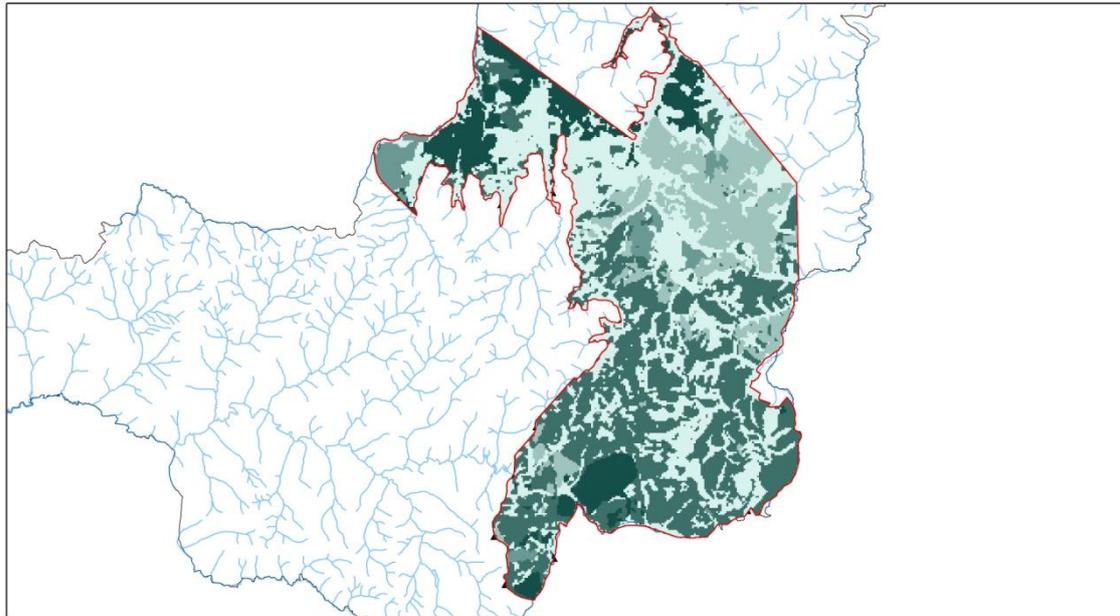


Figura 32: Raster das classes de fragilidade ambiental dos tipos de solos da APA de Botucatu.



Raster - Classes de Fragilidade Ambiental para Uso do Solo e Cobertura Vegetal - APA de Botucatu

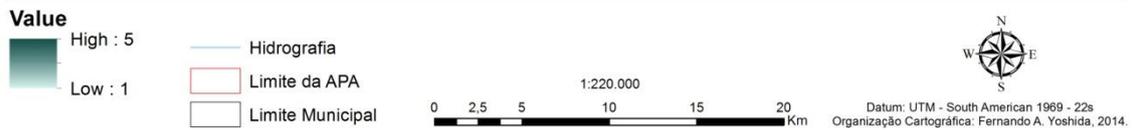
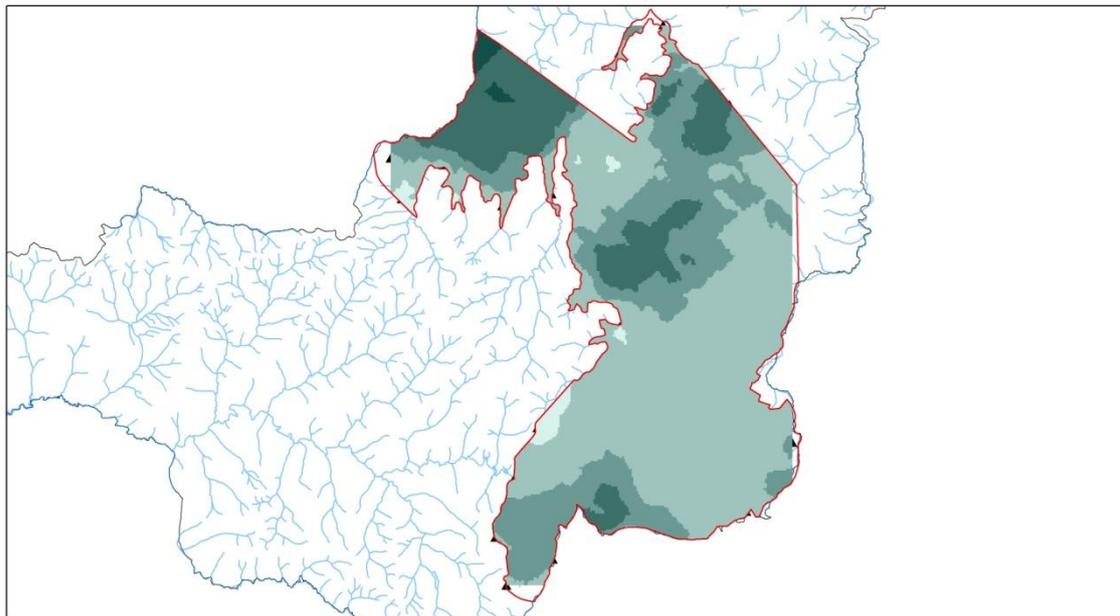


Figura 33: Raster das classes de fragilidade ambiental do uso do solo e cobertura vegetal da APA de Botucatu.



Raster - Classes de Fragilidade Ambiental para Resistência do Solo na camada 0 a 20 cm - APA de Botucatu

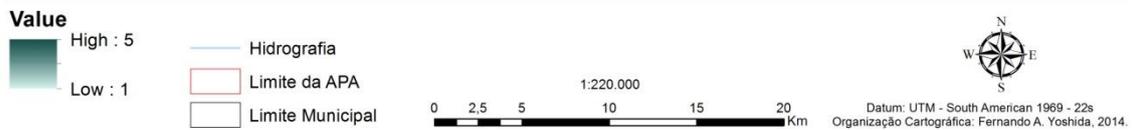


Figura 34: Raster das classes de fragilidade ambiental da resistência do solo da APA de Botucatu.

Através da extensão Spatial Analyst – Raster Calculator do software ArcGis (Esri, 2013), foi possível aplicar uma fórmula algébrica de adição dos elementos de valores iguais de fragilidade ambiental (1, 2, 3, 4 e 5) multiplicado pelo seu peso (0,25). Segue a fórmula utilizada:

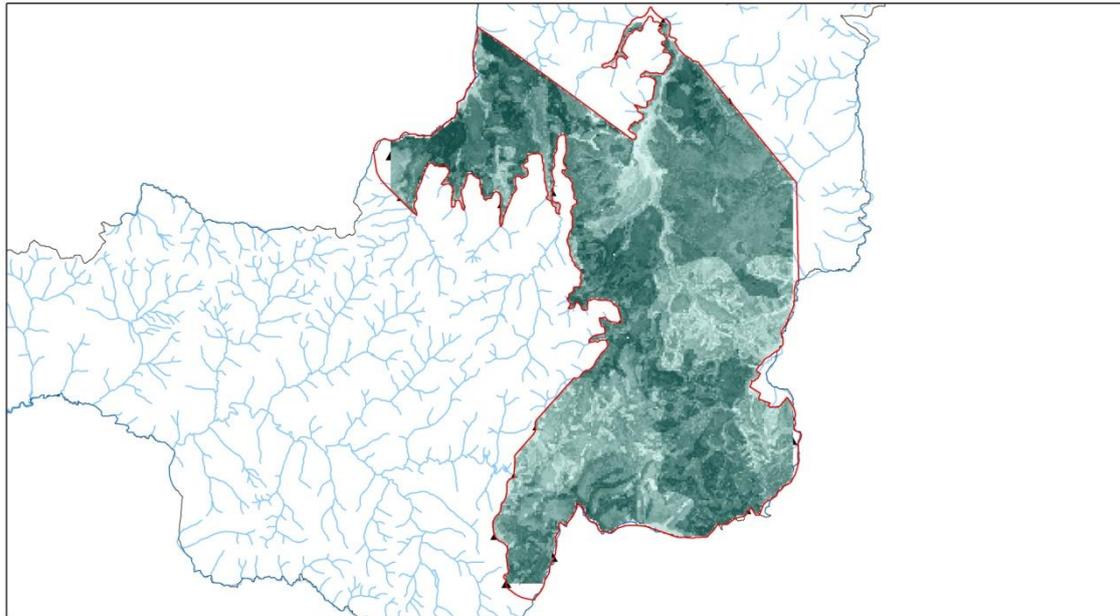
$$(\text{Declividade} * 0,25) + (\text{Classe de Solo} * 0,25) + (\text{Uso do Solo} * 0,25) + (\text{Resistência do Solo} * 0,25) = \text{Carta de Fragilidade Ambiental da APA de Botucatu}$$

Após essa distribuição espacial dos parâmetros surgiu a necessidade de integra-los em um único espaço, em uma carta de fragilidade ambiental que levasse em consideração, com pesos iguais, todas os parâmetros. Assim buscou-se a utilização da análise de decisão de multicritérios, que juntamente com as ferramentas SIG de análise espacial e álgebra de mapas possibilitou integrar essas informações.

Criou-se então a matriz de multicritérios (quadro 19), com notas e pesos para cada atributo de cada parâmetro envolvido na análise e através da álgebra de mapas foi possível elaborar a carta de fragilidade ambiental da APA de Botucatu (Figura 35 e Figura 36), com classes e valores de fragilidade ambiental para o espaço, ambiente ou paisagem estudada.

Sendo assim, a análise de decisão de multicritérios desempenou o papel de interpolador dos parâmetros e critérios, cada qual com suas notas e pesos das fragilidades ambientais proposta por Ross (1994), agregando ainda o parâmetro da resistência do solo.

Abaixo, segue o produto final desse estudo, que é a Carta de Fragilidade Ambiental da APA de Botucatu em valores, na Figura 35 e em classes, na Figura 36.



Carta de Fragilidade Ambiental para APA de Botucatu - Raster

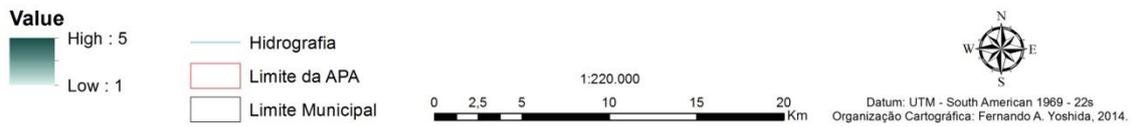
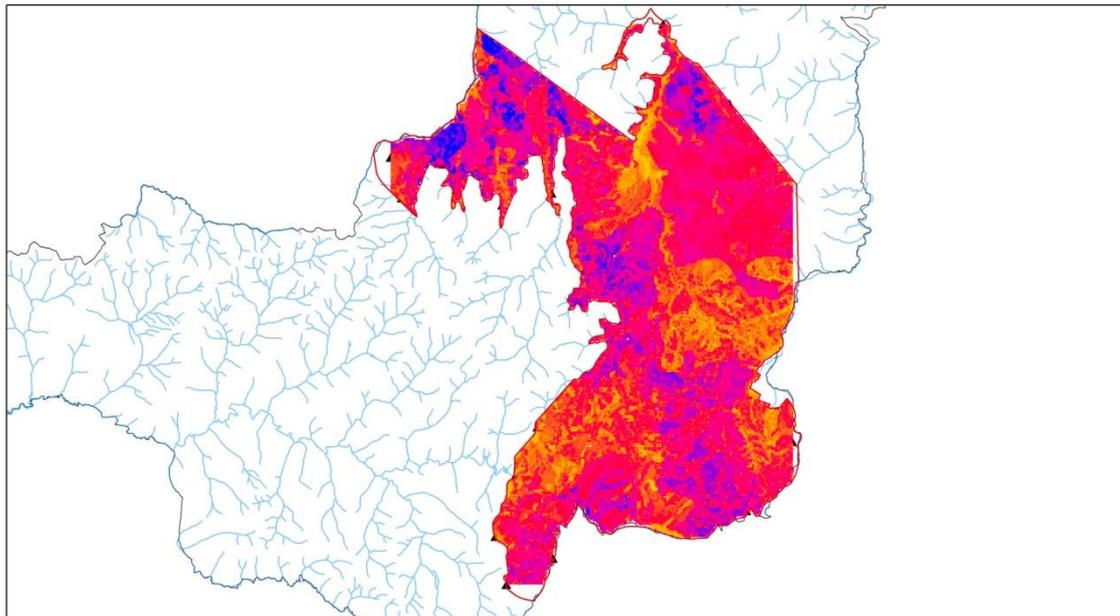


Figura 35: Raster de valores da Carta de Fragilidade Ambiental da APA de Botucatu.



Carta de Fragilidade Ambiental para APA de Botucatu

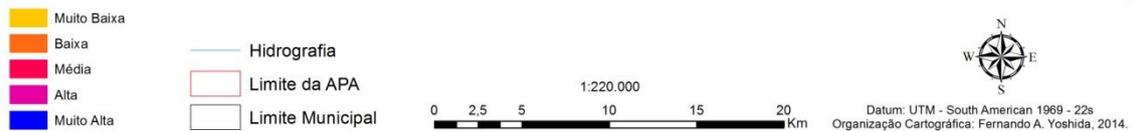


Figura 36: Raster de classes da Carta de Fragilidade Ambiental da APA de Botucatu.

No Quadro 20 abaixo pode-se observar a quantidade de áreas para cada classe de fragilidade ambiental, o que expressa a necessidade de um melhor planejamento das atividades antrópicas, o uso e ocupação do solo, os manejos adotados para cada prática, seja agrícola, florestal ou pastoril, e de conservação, uma vez que, apenas 32,43% do total da área amostral se encontram dentro de classes de muito baixa e baixa de fragilidade ambiental e 67,57% do total da área amostral se encontram em classes de fragilidade de média a muito alta. O fator positivo desse resultado aponta que apenas 2,38% da área amostral se encontram na classe de fragilidade muito alta.

Quadro 20: Quantidade de áreas para as classes de fragilidade ambiental da APA de Botucatu.

Fragilidade Ambiental	Área (ha)	(%)
1	2270,15	5,90
2	10214,39	26,53
3	17045,54	44,27
4	8055,00	20,92
5	914,91	2,38
Total	38500,00	100,00

Tratando-se de uma unidade de conservação, de uma APA Estadual de importância regional, nacional e, até internacional, pois são as áreas de recarga do maior aquífero de água doce na América do Sul, o Aquífero Guarani, uma área de belas paisagens, de transição e intersecção de biomas, um berço de biodiversidade endêmica da flora e refúgio da fauna, esse estudo aponta para a necessidade de um plano de manejo adequado que contemple as necessidades das atividades econômicas mas dentro do limite que um ambiente natural importante, já impactado, possam coexistir.

Esse estudo buscou contribuir de maneira positiva para o diagnóstico agrícola e ambiental da APA Perímetro Botucatu, servindo como subsídio para o planejamento do desenvolvimento e uso do território em bases sustentáveis, tornando-se um importante instrumento para a formulação de políticas territoriais, orientando os diversos níveis decisórios na adoção de políticas convergentes com as diretrizes da sustentabilidade, buscando assim, conservar os recursos naturais, diminuir os riscos socioambientais e garantir a produtividade e os benefícios decorrentes das práticas econômicas sustentáveis.

A análise integrada dos ambientes naturais, a pedometria, na distribuição espacial da resistência do solo, a análise da fragilidade ambiental, a análise de decisão multicritérios aplicada ao planejamento agroambiental, enfatiza a importância de se considerar não somente as potencialidades dos recursos naturais, mas, sobretudo as fragilidades desses ambientes, face as diferentes inserções dos homens na natureza, principalmente na busca de um desenvolvimento sustentável dentro de uma unidade de conservação.

6. CONCLUSÕES

1. A resistência do solo encontrada na APA de Botucatu apresentou uma grande variação, onde o menor valor encontrado foi de 1,23 MPa, o maior valor foi de 16,7 MPa e valor médio foi de 5,87 MPa para a camada 0 a 20cm do solo. Já para a camada 20 a 40cm, o menor valor foi de 1,28 MPa, o maior valor foi de 12,54 MPa e o valor médio foi de 5,68 MPa.

2. A resistência do solo é uma característica natural de diferentes solos, ambientes, paisagens, declividades e cobertura vegetal, porém existe uma forte relação da resistência do solo com o uso do solo e cobertura vegetal, onde diferentes tipos de uso e seus diferentes manejos modificam essa resistência natural ao ponto de se tornar uma fragilidade ambiental.

3. Com relação à declividade, as menores médias, 2,38 MPa (de 20 a 40%) e 2,92 MPa (maior que 40%) na resistência do solo foram encontradas nas declividades mais altas e esse grupo apresentou diferenças significativas se comparadas com as outras classes de menores declividades (6,44 MPa até 6%, 7,11 MPa de 6 a 12% e 4,85 Mpa de 12 a 20%), na profundidade de 0 a 20cm. Isso mostra que nas declividades menores onde a resistência do solo foi maior evidencia o fato de um uso antrópico mais acentuado, com possível manejo mais intenso e um uso agrícola empregado de maior mecanização, assim causando maior impacto sobre o solo, aumentando sua compactação. Nas declividades maiores, onde foram apresentados menores valores da resistência do solo, o uso antrópico deve ser menos intenso, uma vez que incide restrições físicas e legais sobre essas áreas.

4. Foram encontradas diferenças significativas entre os diferentes tipos de uso do solo e cobertura vegetal. Manejos do solo mais intensos, como cultivo da cana de açúcar, apresentou a maior resistência média do solo, de 9,35 MPa, e as pastagens, que em virtude do pisoteio dos animais, apresentou a segunda maior resistência média, de 9,05 MPa, estão dentro do mesmo grupo em nível de significância. Já o citros, apresentou 6,23 MPa de resistência média, que difere significativamente dos demais grupos e por final, as culturas perenes, como o café (3,58 MPa), as florestas plantadas de exóticas, o eucalipto (5,28 MPa) e as florestas nativas (2,33 MPa) formaram um outro grupo, de menor resistência média do solo nas camadas superiores (0 a 20 cm).

5. A geoestatística, na distribuição espacial da resistência do solo, a krigagem ordinária no modelo de semivariograma exponencial se mostrou o mais eficiente, apresentando o menor RMS, 3,553; enquanto o modelo esférico foi de 3,566 e o guasiano de 3,564 para a camada 0 a 20cm do solo e atendeu também aos outros parâmetros da validação cruzada. O mesmo desempenho foi apresentado para a camada 20 a 40 cm e para os demais atributos físicos do solo (teor de areia total, teor de silte e teor de argila) testados, mostrando que o modelo exponencial de semivariograma na krigagem ordinária foi o melhor para a distribuição espacial de todos os elementos analisados.

6. O índice de fragilidade ambiental da resistência do solo proposto nesse estudo levou em consideração a fundamentação teórica proposta por Ross (1994), bem como outros índices já consagrados encontrados na literatura sobre a resistência do solo (Canareche, 1990 e USDA, 1993), integrando também a realidade local, utilizando os valores e a variação desses valores encontrados em campo, na sua elaboração.

7. A utilização da análise de decisão de multicritérios exigiu a elaboração de uma matriz de multicritérios, que integrou diferentes atributos de diferentes parâmetros ambientais, com notas e pesos, tornando-se, a base para, através do SIG e da álgebra de mapas, gerar o produto final desse estudo, a carta de fragilidade ambiental para a APA de Botucatu que mostrou que apenas 32,43% do total da área amostral se encontram dentro de classes de muito baixa e baixa de fragilidade ambiental e 67,57% do total da área amostral se encontram em classes de fragilidade de média a muito alta.

BIBLIOGRAFIA

- AMSTALDEN, L. F. F. *Os custos da modernização*. Campinas: UNICAMP/IFCH, ano 1, p.156 (Monografia) , 1991.
- ASSAD, M.E.L; ALMEIDA, J. *Agricultura e Sustentabilidade – Contexto, Desafios e Cenários*. Ciência & Ambiente, n. 29, p.15-30, 2004.
- BAHIA, V.G.; CURI, N.; CARMO, D.N.; MARQUES, J.J.G.S.M. *Fundamentos de erosão do solo (tipos, formas, mecanismos, fatores determinantes e controle)*. Informe Agropecuário, v. 16, n. 176, p.25-31, 1992.
- BUSSCHER, W.J. *Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content*. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., v.3, p 519-524, 1990.
- CAMARGO, O. A. *Compactação do solo e desenvolvimento de plantas*. Campinas, Fundação Cargill, p.44, 1983.
- CANARACHE, A. *PENETR - A generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration*. Soil Till. Res., Amsterdam, 16:51-70, 1990.
- CARVALHO, J.R.P de; SILVEIRA, P.M. da; VIEIRA, S.R. *Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos*. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 37, n. 8, p. 1151-9, ago, 2002.
- CARVALHO, C. C. N.; ROCHA, W. F.; e UCHA, J. M. *Mapa digital de solos: Uma proposta metodológica usando inferência fuzzy*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.13, n.1, p.46–55, Campina Grande, PB, 2009.
- CASTRO, A. G.; VALÉRIO FILHO, M. *Simulação da expectativa de perdas de solo em microbacias sob diferentes manejos florestais*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, n. 21, v. 4, p. 419-26, 1997.
- CHAIM, A.; CAPALBO, D. M. F.; HAMADA, E.; TAMBASCO, F. J.; FERRAZ, J. M. G.; SKORUPA, L. A.; Pessoa, M. C. P. Y.; LOPES ASSAD, M.L.; SCRAMIN, S. *Boas práticas agrícolas e meio ambiente*. In: *Elementos de*

apoio para as boas práticas agrícolas e sistemas APPCC. 1a. ed. Brasília: Embrapa, p. 13-27, 2004.

COOPER, M. *Degradação e Recuperação dos Solos*. ESALQ, Piracicaba, 2008.

CPLEA - Coordenadoria de Planejamento Ambiental Estratégico e Educação Ambiental. *Áreas de Proteção Ambiental no Estado de São Paulo*. Secretaria Estadual do Meio Ambiente. Coordenação: Lúcia Bastos Ribeiro de Sena. 2004.

CUNHA, A. R. *Dados Pluviométricos da Estação Meteorológica do Departamento de Solos e Recursos Ambientais*. Faculdade de Ciências Agrônomicas: UNESP, Campus de Botucatu, 2014.

CUNHA, J.P.A.R; CASCÃO, V.N.; REIS, E.F. *Compactação causada pelo tráfego de trator em diferentes manejos de solo*. Acta Scientiarum. Agronomy, v. 31, n. 3, p. 371-375, Maringá, 2009.

DAROLT, M. R. *As Dimensões da Sustentabilidade: Um estudo da agricultura orgânica na região metropolitana de Curitiba-PR*. Tese de Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento, Universidade Federal do Paraná/ParisVII. 310 p., 2000;

DERPSCH, R.; ROTH, C.H.; SIDIRAS, N.; KÖPKE, U. *Controle da erosão no Paraná, Brasil: sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo*. Eschborn, GTZ/IAPAR, 1991.

EMBRAPA. *Manual de métodos de análise do solo*. 2.ed. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e Abastecimento, 1997. 212p.

ESRI. ArcGis 10.1 Help - *Geostatistical Analyst e Spatial Analyst*. Disponível no endereço:<http://http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/Performing_cross_validation_and_validation/003100000059000000/>.

Acesso em 20 de dezembro de 2013.

- FLOWERS, M.D. ; LAL, R. *Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a Molic Ochraqualf in Northwest Ohio*. Soil Till. Res., v.48, p 21-35, 1998.
- GUIMARÃES, W. D. *GeoEstatística para o mapeamento da variabilidade espacial de atributos físicos do solo*. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2013. 72p. (Tese de Doutorado)
- HENGL, T. *Pedomertic Mapping*. ITC Dissertation number 101, Wageningen University, The Netherlands, 2001.
- HORN, R.; LEBERT, M. *Soil compactability and compressibility*. In: SOANE, B.D.; van OUWERKERK, C., eds. Soil compactation in crop production. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.45-69.
- IGC. *Levantamento Planialtimétrico do Estado de São Paulo*. Cartas em escala 1:10.000. Instituto Geográfico Cartográfico do Estado de São Paulo, 1979.
- KELLER, E.C. *Projeto do mapeamento da utilização da terra*. Universidade de São Paulo, 1969.
- KRIGE, D. G. *A statistical approach to some basic mine valuation problems on the witwatersrand*. Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa, 52(6):119–139, 1951.
- LAGACHERIE, P. P.; MCBRATNEY, A. B. *Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for digital soil mapping*. In: Lagacherie, P.; Mcbratney, A.; Voltz, M. (Ed.). *Digital soil mapping: an introductory perspective*. Amsterdam: Elsevier, p. 3-22, 2007.
- LANDIM, P.M.B. *Análise estatística de dados geológicos* - Fundação Editora da UNESP, 226 pp., 1998.
- LEPSCH, I. F. *Formação e Conservação dos Solos*. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.
- LUCIANO, Rodrigo Vieira; ALBUQUERQUE, Jackson Adriano; COSTA, André; BATISTELA, Bruno; WARMLING, Maria Tereza. *Atributos físicos*

relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no Sul do Brasil. Rev. Bras. Ciênc. Solo vol.36 no.6 Viçosa Nov./Dec.2012.

MARTINS, V.B. *Metodologia baseada em sistemas de informação geográfica e análise de multicritérios para seleção de áreas para construção de um repositório para o combustível nuclear usado.* Rio de Janeiro: URFJ/COPPE, 2009. Tese de Doutorado, 124p.

MCBRANTNEY, A. B.; ODEH, I. O. A.; BISHOP, T. F. A.; DUNBAR, M. S.; SHATAR, T. M. *An overview of pedometric techniques for use in soil survey.* Geoderma, ED. 97 - ANO 2000. Pag. 293–327. Amsterdam, 2000.

MONTEIRO, C. A. F. *Geossistemas: a História de uma Procura.* Editora Contexto. São Paulo, 2001.

PABIN, J., LIPIEC, J., LODEK, S., et al. Critical soil bulk density and strength for pea seedling root growth as related to other soil factors. *Soil ; Tillage Research*, Amsterdam, v.46, p.203-208, 1998.

PDP - *Plano Diretor Participativo.* Prefeitura Municipal de Botucatu: Botucatu, 2006.

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

ROSS, J.L.S. (1990). *Geomorfologia Ambiente e Planejamento.* Editora Contexto. São Paulo. 1990.

ROSS, J.L.S. (1994). *Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados* – in Revista do Depto. de Geografia – FFLCH-USP nº 6, São Paulo, 1994.

SCOTT, A. J.; KNOTT, M. *A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance.* Biometrics, v.30, n.3, p.507-12, 1974.

- SEIXAS, F.; OLIVEIRA JÚNIOR, E.D. ; SOUZA, C.R. *Efeito da camada de resíduos florestais na compactação do solo causada pelo transporte primário da madeira*. Sci. Flores talis, v.54, p.9-16, 1998.
- SILVA, S.A.; LIMA J.S.S.; SOUZA, G.S.; OLIVEIRA, R.B. *Avaliação de Interpoladores estatísticos e determinísticos na estimativa de atributos do solo em agricultura de precisão*. IDESIA (Chile) Volume n 26, Nº 2, Maio-Agosto, 2008.
- SMITH, T.; MENON, S.; STAR.; et al. Requirements and principles for the implementation and vonstruction of large-scale geographic information systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1(1): 13_31, 1987.
- SNUC – *Sistema Nacional de Unidades de Conservação*. Lei Nº 9.985, de 18 de Julho de 2000.
- SOTCHAVA, V.B. *O Estudo dos Geossistemas – Métodos em Questão*. Nº 16. IGEOG/USP. São Paulo, 1976.
- STOLF, R. Operação do penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf. Piracicaba: IAA/PLANALSUCAR, Boletim n.2, 8p, 1983.
- STOLF, R. *Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados do penetrômetro de impacto de resistência do solo*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.15, p.229-235, 1991.
- STOLF, R.; MURAKAMI, J.H.; BRUGNARO, C.; SILVA, L. G.; SILVA, L.C.F.; [MARGARIDO, L.A.C.](#) *Penetrômetro de impacto Stolf - programa computacional de dados em EXCEL-VBA*. Revista Brasileira de Ciência do Solo (Impresso), v. 38, p. 774-782, 2014.
- TANASA, I.C.; NICULITA, M.; ROSCA, B.; PIRNAU, R. *Pedometric Techniques in Spatialisation of Soil Properties for Agricultural Land Evaluation*. *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine*, Vol. 67, número 1, Cluj-Napoca, Romenia, 2010.

- TRICART, J .”*Ecodinâmica*”. FIBGE. Rio de Janeiro, 1977.
- USDA. *Soil Survey Manual*. Washington, DC, USA, Soil Survey Division Staff, 1993. 437p.
- VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, Berkeley, 15,3:1-75, 1983.
- VIEIRA, S. R. *Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo Roxo de Campinas (SP)*. *Bragantia*, Campinas, v.56, n.1, p.181-190, 1997.
- VIEIRA, S. R. *Geoestatística em estudos de variabilidade espacial*. Campinas: IAC, 1998. 53p.
- VIEIRA, S. R. *Uso de geoestatística em estudos de variabilidade espacial de propriedades do solo*. In: Roberto Ferreira Novais; Victor Hugo Alvarez V.; Carlos Ernesto G. R. Schaefer. (Org.). *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000, v. I, p. 1-54.
- WEBSTER, R.; OLIVER, M.A. *Statistical methods in soil and land resource survey*. Oxford: Oxford University Press, 316p, 1980.
- WEBSTER, R.; *The development of pedometric*. *Geoderma*, Ed. 62 - Pag.1-15. Elsevier Science B.V., Amsterdam, 1994.
- WILDING, L.P. *Spatial variability: its documentation, accommodation and implication to soil surveys*. 1985. In: Nielsen, D.R., Bouma, J. _Eds., *Soil Spatial Variability*. Proceedings of a Workshop of ISSS and the SSSA, Las Vegas USA. Nov. 30–Dec. 1, 1984.

APÊNDICES

Quadro 1A: Dados Coletados em campo nos pontos de amostragem.

PONTO	ALTITUDE	USO/COBERTURA	Resistência MPa 0-20 cm	Resistência MPa 20-40 cm	ARGILA(%) 0-10cm	AREIA TOTAL(%) 0-10cm	SILTE(%) 0-10cm	SOLO	DECLV
1	784 m	Eucalipto	1,82	2,97	2,09	95,32	2,59	LVd	de 6 a 12%
2	785 m	Cana de Açucar	3,5	3,86	3,74	94,04	2,22	LVd	de 6 a 12%
3	862 m	Cana de Açucar	9,59	5,95	19,99	54	26,01	LVd	de 6 a 12%
4	875 m	Eucalipto	4,92	4,36	40,37	38,38	21,25	LVd	de 6 a 12%
5	906 m	Citrus	3,1	8,29	32,4	58,7	8,9	PVAd1	de 6 a 12%
6	923 m	Pasto	11,08	5,86	19,99	74,01	6	LVd	de 6 a 12%
7	890 m	Pasto	6,34	5,14	29,38	58,17	12,45	PVAd1	Até 6%
8	880 m	Eucalipto	2,47	4,85	24,56	68,67	6,77	LVd	Até 6%
9	852 m	Cana de Açucar	7,79	5,59	3,77	92,35	3,88	LVd	Até 6%
10	844 m	Eucalipto	6,33	6,27	48,7	19,17	32,13	LVAAd1	de 6 a 12%
11	868 m	Nativa	1,84	2,89	10,4	85,57	4,03	LVAAd1	de 6 a 12%
12	869 m	Eucalipto	4,01	3,95	7,26	88,04	4,7	LVd	de 6 a 12%
13	871 m	Cana de Açucar	7,78	5,63	23,62	58,85	17,53	LVAAd1	Até 6%
14	912 m	Cana de Açucar	5,15	3,79	42,75	53,06	4,19	LVd	de 12 a 20%
15	910 m	Nativa	3,18	3,71	3,54	94,26	2,19	LVd	Até 6%
16	940 m	Pasto	8,14	4,62	18,4	52,85	28,7	LVd	de 6 a 12%
17	887 m	Pasto	5,58	7,39	22,8	68,3	8,9	RLe	de 6 a 12%
18	884 m	Nativa	3,05	3,6	18,27	77,15	4,58	RLe	> de 40%
19	899 m	Nativa	3,06	5,15	26,3	62,9	10,8	RLe	de 20 a 40%
20	899 m	Café	2,57	3,44	29,67	59,25	11,08	RLe	de 12 a 20%
21	925 m	Nativa	2,84	4,42	22,13	50,59	27,27	LVd	de 6 a 12%
22	815 m	Nativa	2,6	5,52	4,05	90,61	5,34	RLe	de 20 a 40%
23	550 m	Pasto	5,11	5,39	15,7	70,8	13,5	LVd	de 6 a 12%
24	613 m	Eucalipto	4,71	7,28	50,54	32,24	17,22	PVAd1	de 12 a 20%
25	542 m	Nativa	2,1	5,5	33,98	49,89	16,13	LVd	de 6 a 12%
26	555 m	Pasto	8,74	6,87	17,4	70,7	11,9	LVd	de 6 a 12%
27	547 m	Nativa	2,1	5,5	23,8	65,8	10,4	LVd	de 12 a 20%
28	575 m	Pasto	6,59	5,66	16,2	68	15,8	LVd	de 6 a 12%
29	583 m	Pasto	6,58	8,72	17,8	69,6	12,6	LVd	de 6 a 12%
30	618 m	Eucalipto	4,53	9,98	25,9	63,42	10,67	LVd	de 6 a 12%
31	622 m	Pasto	4,94	7,97	8,7	87,5	3,8	RQoTípico	de 12 a 20%
32	565 m	Café	4,27	4,3	29,63	59,47	10,9	RLe	de 20 a 40%
33	566 m	Cana de Açucar	10,28	6,8	18,45	79,47	2,08	LVdf	de 6 a 12%
34	552 m	Cana de Açucar	4,85	5,64	6,8	88,8	4,4	RQoTípico	Até 6%
35	551 m	Cana de Açucar	11,53	12,54	10,2	83	6,8	GXbd	de 6 a 12%
36	550 m	Pasto	15,28	12,54	3,7	92,2	4,1	RQoTípico	Até 6%
37	575 m	Citrus	1,88	4,89	4,85	87,93	7,22	RQoTípico	de 6 a 12%

38	541 m	Eucalipto	4,3	6,38	8,9	88,4	2,7	RQoTípico	de 6 a 12%
39	536 m	Nativa	2,97	4,43	12,15	85,77	2,08	RQoTípico	de 12 a 20%
40	592 m	Eucalipto	7,54	7,11	9,22	89,52	1,27	RQoTípico	Até 6%
41	573 m	Eucalipto	9,86	11,89	10,5	86,9	2,6	RQoTípico	de 6 a 12%
42	573 m	Citrus	8,89	8,45	5,3	87,8	6,9	RQoTípico	de 6 a 12%
43	532 m	Citrus	8,82	8,4	6,5	87,3	6,2	RQoTípico	de 6 a 12%
44	588 m	Pasto	15,28	12,54	3,8	93,4	2,8	RQoTípico	de 6 a 12%
45	661 m	Nativa	3,25	1,95	15,9	76	8,1	RLe	> de 40%
46	793 m	Nativa	3,18	4,6	13,52	78,96	7,52	RLe	> de 40%
47	795 m	Pasto	12,7	4,88	14,7	76,7	8,6	RLe	de 6 a 12%
48	718 m	Pasto	12,68	4,88	16,1	76,3	7,6	RLe	Até 6%
49	587 m	Pasto	8,71	5,77	30,29	57,86	11,85	LVd	de 12 a 20%
50	822 m	Café	3,57	3	32,4	49	18,6	LVAd1	Até 6%
51	812 m	Cana de Açucar	16,7	10,22	8,75	84,64	6,61	RQoTípico	de 6 a 12%
52	769 m	Cana de Açucar	15,95	10,25	25,4	59,5	15,1	LVAd1	de 6 a 12%
53	808 m	Pasto	12,65	4,94	13,6	80,4	6	GXbd	de 6 a 12%
54	783 m	Café	3,91	3	34,5	45,4	20,1	LVAd1	Até 6%
55	746 m	Nativa	2,39	4,69	17,3	74,1	8,6	RLe	de 20 a 40%
56	606 m	Eucalipto	4,35	4,8	40,08	55,44	4,47	LVd	de 6 a 12%
57	615 m	Pasto	4,71	2,93	20,5	65,2	14,3	LVd	de 12 a 20%
58	630 m	Nativa	1,37	1,89	22,81	72,92	4,27	LVd	de 20 a 40%
59	635 m	Pasto	5,41	3,6	19,5	64,8	15,7	LVd	de 6 a 12%
60	603 m	Nativa	1,3	1,3	13,7	76,9	9,4	RLe	de 20 a 40%
61	525 m	Nativa	1,32	1,28	14,3	78,1	7,6	RLe	Até 6%
62	505 m	Nativa	1,23	1,37	15,9	75,5	8,6	RLe	de 20 a 40%
63	510 m	Eucalipto	4,3	5,74	7,3	90,8	1,9	RQoTípico	de 6 a 12%
64	540 m	Eucalipto	7,34	7,26	8,1	89,4	2,5	RQoTípico	Até 6%
65	540 m	Eucalipto	7,16	7,27	9,1	88,2	2,7	RQoTípico	de 6 a 12%
66	645 m	Nativa	2,75	4,46	12,8	76,3	10,9	RLe	de 20 a 40%
67	695 m	Nativa	2,5	5,54	10,1	77,3	12,6	RLe	> de 40%
68	465 m	Nativa	1,36	1,88	13,4	84,5	2,1	RQoTípico	de 6 a 12%
69	460 m	Nativa	1,3	1,34	14,5	79,9	5,6	GXbd	Até 6%
70	570 m	Citrus	8,45	8,39	6,2	87,3	6,5	RQoTípico	Até 6%
71	705 m	Nativa	2,63	4,49	23,3	51	25,7	LVd	> de 40%
72	565 m	Nativa	2,88	1,94	21,9	55	23,1	LVd	de 6 a 12%
73	730 m	Nativa	2,45	4,3	12,5	81,6	5,9	RLe	de 20 a 40%
74	525 m	Pasto	12,33	4,88	9,5	86,2	4,3	RLe	de 6 a 12%
75	565 m	Cana de Açucar	11,38	12,52	7,9	86,6	5,5	RQoTípico	Até 6%
76	565 m	Eucalipto	6,29	6,26	49,3	15,5	35,2	LVAd1	Até 6%
77	580 m	Eucalipto	4,49	9,89	26	61,1	12,9	LVd	Até 6%
78	840 m	Cana de Açucar	7,74	5,62	22,9	57,4	19,7	LVAd1	de 12 a 20%

Tabela 1A: Análise de Variância da camada 0-20cm para as classes de declividade da APA de Botucatu.

Profundidade 0-20 cm

Análise de variância

Causa de variação	GL	SQ	QM	F	p-value	
Repetições	8	305,68	38,21	10,68	1,92E-09	**
Classes de Solo	4	642,27	160,57	44,89	4,94E-18	**
Resíduo	65	232,52	3,58			
Total	77	1.180,47				

** Significativo a 1%.

Tabela 2A: Análise de Variância da camada 20-40cm para as classes de declividade da APA de Botucatu.

Profundidade 20-40 cm

Análise de variância

Causa de variação	GL	SQ	QM	F	p-value	
Repetições	8	219,54	27,44	4,73	1,33E-04	**
Classes de Solo	4	204,60	51,15	8,82	9,49E-06	**
Resíduo	65	377,14	5,80			
Total	77	581,74				

** Significativo a 1%.

Tabela 3A: Análise de Variância da camada 0-20cm para as classes de solos da APA de Botucatu.

Profundidade 0-20 cm

Análise de variância

Causa de variação	GL	SQ	QM	F	p-value	
Repetições	8	305,68	38,21	10,52	2,79E-09	**
Classes de Solo	5	642,27	128,45	35,36	3,55E-17	**
Resíduo	64	232,52	3,63			
Total	77	1180,47				

** Significativo a 1%.

Tabela 4A: Análise de Variância da camada 20-40cm para as classes de solos da APA de Botucatu.

Profundidade 20-40 cm

Análise de variância

Causa de variação	GL	SQ	QM	F	p-value
Repetições	8	219,54	27,44	4,66	1,61E-04 **
Classes de Solo	5	204,60	40,92	6,94	3,10E-05 **
Resíduo	64	377,14	5,89		
Total	77	581,74			

** Significativo a 1%.

Tabela 5A: Análise de Variância da camada 0-20cm para as classes de uso do solo da APA de Botucatu.

Profundidade 0-20 cm

Análise de variância

Causa de variação	GL	SQ	QM	F	p-value
Repetições	8	305,68	38,21	10,52	2,79E-09 **
Uso do solo	5	642,27	128,45	35,36	3,55E-17 **
Resíduo	64	232,52	3,63		
Total	77	1.180,47			

** Significativo a 1%.

Tabela 6A: Análise de Variância da camada 20-40cm para as classes de uso do solo da APA de Botucatu.

Profundidade 20-40cm

Análise de variância

Causa de variação	GL	SQ	QM	F	p-value
Repetições	8	219,54	27,44	4,66	1,61E-04 **
Uso do solo	5	204,60	40,92	6,94	3,10E-05 **
Resíduo	64	377,14	5,89		
Total	77	581,74			

** Significativo a 1%.