



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA  
MESTRADO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA

ANTÔNIO ALDÍSIO CARLOS JÚNIOR

**MAPEAMENTO DAS ÁREAS MECANIZÁVEIS DA BACIA HIDROGRÁFICA  
APODI-MOSSORÓ APLICANDO AVALIAÇÃO MULTICRITERIAL**

MOSSORÓ

2016

ANTÔNIO ALDÍSIO CARLOS JÚNIOR

**MAPEAMENTO DAS ÁREAS MECANIZÁVEIS DA BACIA HIDROGRÁFICA  
APODI-MOSSORÓ APLICANDO AVALIAÇÃO MULTICRITERIAL**

Dissertação apresentada ao Mestrado em Manejo de Solo e Água do Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Impactos Ambientais pelo Uso do Solo e da Água

Orientador: Suedêmio de Lima Silva, Prof. Dr.

Co-orientador: Paulo César Moura da Silva, Prof. Dr.

MOSSORÓ

2016

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do autor, sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu respectivo autor seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)  
Setor de Informação e Referência (SIR)

C284m Carlos Júnior, Antônio Aldísio.  
Mapeamento das áreas mecanizáveis da bacia hidrográfica Apodi-Mossoró aplicando avaliação multicriterial / Antônio Aldísio Carlos Júnior. - 2016.  
85 f. : il.

Orientador: Suedêmio de Lima Silva.  
Coorientador: Paulo César Moura da Silva.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em Manejo de Solo e Água, 2016.

1. zoneamento. 2. manejo do solo. 3. mecanização agrícola. 4. geoprocessamento. I. Silva, Suedêmio de Lima, orient. II. Silva, Paulo César Moura da, co-orient. III. Título.

ANTÔNIO ALDÍSIO CARLOS JÚNIOR

**MAPEAMENTO DAS ÁREAS MECANIZÁVEIS DA BACIA HIDROGRÁFICA  
APODI-MOSSORÓ APLICANDO AVALIAÇÃO MULTICRITERIAL**

Dissertação apresentada ao Mestrado em Manejo de Solo e Água do Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Manejo de Solo e Água.

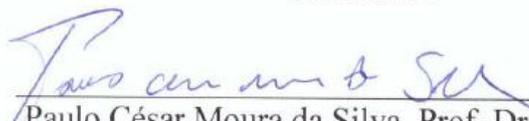
Linha de Pesquisa: Impactos Ambientais pelo Uso do Solo e da Água

Defendida em: 05 / 12 / 2016.

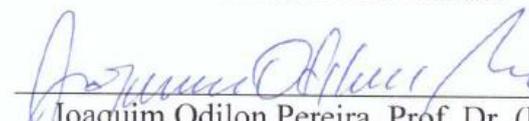
**BANCA EXAMINADORA**



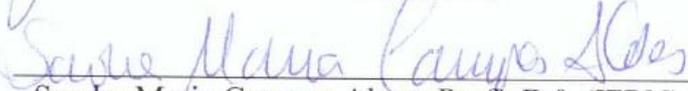
Suedêmio de Lima Silva, Prof. Dr. (UFERSA)  
Presidente



Paulo César Moura da Silva, Prof. Dr. (UFERSA)  
Membro Examinador



Joaquim Odilon Pereira, Prof. Dr. (UFERSA)  
Membro Examinador



Sandra Maria Campos Alves, Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. (IFRN)  
Membro Examinador Externo

Aos meus pais, Antônio Aldísio Carlos e Amália Maria dos Santos Carlos, pelo apoio, dedicação e pelo caminho ao qual me incentivaram e ensinaram a seguir.

*Dedico*

## AGRADECIMENTOS

A Deus por me conceder forças, saúde, paz e sabedoria para lidar com a vida.

A todos os familiares pelo apoio.

A minha querida irmã Mara Adriana dos Santos Carlos, que na condição de filha mais velha, com muita dedicação e amor dedicou-se incondicionalmente na busca pelo melhor para nossa família.

A Fernanda Patrícia Santos de Menezes, mulher que o destino me abençoou para que juntos desfrutássemos da vida, com muito amor, alegria e, sobretudo, com muito companheirismo.

Ao professor Dr. Paulo César Moura da Silva, ao qual externo minha eterna gratidão pelo apoio, compreensão, amizade, ensinamentos acadêmicos e, principalmente, pelo viés humano que conduz sua profissão.

Ao professor Dr. Suedêmio de Lima Silva pela orientação, ensinamentos acadêmicos e confiança depositada e pela forma sempre atenciosa e compreensiva.

Aos professores do programa de pós-graduação em Manejo de Solo e Água pela qualidade do ensino e pelo profissionalismo.

Aos professores membros da banca examinadora, pelas contribuições, críticas e sugestões.

A Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA por conceder a oportunidade de cursar uma pós-graduação.

A Superintendência de Infraestrutura da UFERSA pela compreensão de seus dirigentes que possibilitou o desempenho de minhas atividades funcionais em paralelo ao Curso de Mestrado.

Aos amigos contemporâneos de Mestrado.

## RESUMO

O uso dos solos com práticas mecanizadas mediante a introdução de máquinas e implementos agrícolas consiste em uma das tecnologias que maximiza a rentabilidade das culturas. No entanto, a introdução dessa tecnologia em áreas não propícias sem as devidas ações conservacionistas resulta na intensificação da degradação dos solos. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi mapear e quantificar as áreas da bacia hidrográfica Apodi-Mossoró quanto ao grau de impedimento ao uso de máquinas e implementos agrícolas empregados nas operações de preparo do solo. Para tanto, considerou como critérios as informações de declividade, pedregosidade, profundidade, drenagem e textura do solo os quais foram hierarquizados em subcritérios que definiram as classes de impedimento em nulo, ligeiro, moderado, forte e muito forte. A metodologia utilizada foi a avaliação multicritério integrada ao ambiente de sistema de informação geográfica, através da aplicação das técnicas de normalização, ponderação e combinação dos critérios. A normalização foi realizada com subsídio da lógica *fuzzy* para os critérios quantitativos (declividade, pedregosidade e profundidade) e pela técnica participativa para os critérios qualitativos (drenagem e textura). A ponderação para mensurar a importância de cada critério foi obtida mediante o método AHP - Processo Analítico Hierárquico e, para agregação dos valores normalizados e ponderados para obtenção do mapa final empregou-se a combinação linear ponderada. Os resultados mostram que a área de estudo tem impedimento forte de 5,68% e muito forte de 4,04% da área total da bacia, enquanto a maior parte das terras encontra-se apta à mecanização com impedimento nulo e ligeiro de 34,91% e 27,02% respectivamente. Em termos espaciais, os critérios que condicionaram maiores restrições à mecanização foram: profundidade, pedregosidade e declividade, verificando pouca influência da drenagem e nenhuma relativa à textura. No entanto, a declividade com peso 0,483 foi o critério que em termos de importância foi o que mais influenciou no resultado final, permitindo uma acentuada compensação na classificação final em comparação aos demais critérios.

**Palavras-chave:** zoneamento, manejo do solo, mecanização agrícola, geoprocessamento.

## ABSTRACT

The land use with mechanized practices by introducing agricultural machinery and implements consists of a technology that maximizes the profitability of crops. However, the introduction of this technology in not conducive areas without proper conservation actions results in intensification of land degradation. In this context, the aim of this study was to map and quantify areas of Apodi-Mossoró watershed about the degree of impediment to the use of agricultural machinery and implements employed in tillage operations. Therefore, it was considered as criteria the slope information, stoniness, depth, drainage and texture of the soil, which were ranked in sub-criteria that defined impediment classes as null, slight, moderate, strong and very strong. The methodology used was the multi-criteria evaluation integrated to the geographic information system through the applying of normalization techniques, weighting and combination of the criteria. The normalization was performed with allowance of *fuzzy* logic for quantitative criteria (slope, stoniness and depth) and the participatory technique for qualitative criteria (drainage and texture). The weighting to measure the importance of each criterion was obtained by the AHP - Analytic Hierarchy Process and, for aggregating the normalized and weighted values to obtain the final map, it was used the weighted linear combination. The results shows that the study area has strong impediment of 5,68% and very strong of 4,04% of the total area of the watershed, while most of the land is suitable for mechanization, with null and slight impediment of 34,91 % and 27,02% respectively. In spatial terms, the criteria which conditioned more restrictions to mechanization were depth, stoniness and slope, checking little influence of the drainage and no influence of the texture. However, the slope weighing of 0,483 was the criterion that in terms of importance, most influenced the final result, allowing a marked compensation in the standings compared with the other criteria.

**Key words:** zoning, soil management, agricultural mechanization, geoprocessing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Regras de decisão para a determinação do grau de limitação aos impedimentos à mecanização (N = nulo, L = ligeiro, M = moderado, F = forte e MF = muito forte), em função das variáveis: Declividade (Dec), Rochosidade, pedregosidade, drenagem e profundidade (G), atividade da argila (T) e teor de argila (Arg) ou areia (areia).....	6
Figura 2. Categorias de tratamento de informações espaciais com geoprocessamento. ....	8
Figura 3. Função Sigmoidal. (a) monoticamente crescente (b) monoticamente decrescente (c) e (d) simétricas.....	11
Figura 4. Mapa da localização da bacia hidrográfica Apodi-Mossoró.....	16
Figura 5. Mapa da geomorfologia da bacia hidrográfica Apodi-Mossoró. ....	17
Figura 6. Mapa das classes de solos da bacia hidrográfica Apodi-Mossoró. ....	19
Figura 7. Sequência metodologica adotada na pesquisa.....	23
Figura 8. Sigmoidal crescente para a pedregosidade.....	31
Figura 9. Sigmoidal crescente para a declividade. ....	32
Figura 10. Sigmoidal decrescente para a profundidade.....	32
Figura 11. Mapa do impedimento à mecanização agrícola da bacia hidrográfica Apodi/Mossoró quanto à pedregosidade. ....	40
Figura 12. Mapa do impedimento à mecanização agrícola da bacia hidrográfica Apodi/Mossoró quanto à declividade. ....	42
Figura 13. Mapa do impedimento à mecanização agrícola da bacia hidrográfica Apodi/Mossoró quanto à profundidade. ....	44
Figura 14. Mapa do impedimento à mecanização agrícola da bacia hidrográfica Apodi/Mossoró quanto à drenagem.....	46
Figura 15. Mapa do impedimento à mecanização agrícola da bacia hidrográfica Apodi/Mossoró quanto à textura. ....	48
Figura 16. Mapa normalizado da pedregosidadedo do solo. ....	49
Figura 17. Mapa normalizado da declividade. ....	50
Figura 18. Mapa normalizado da profundidade do solo.....	51
Figura 19. Mapa do impedimento à mecanização da baia hidrográfica Apodi/Mossoró. ....	54
Figura 20. Pontos observados em campo para validação dos resultados. ....	57

Figura 21. Ponto de observação P1. (a) Solo profundo com presença de pedregosidade. (b) Área com relevo predominantemente plano.....	68
Figura 22. Ponto de observação P2. (a) Solo com bastante pedregosidade. (b) Área com relevo predominantemente plano.....	68
Figura 23. Ponto de observação P3. (a e b) Ambiente com relevo plano.....	68
Figura 24. Ponto de observação P4. (a) Solo com presença de pedregosidade. (b) Relevo plano. ....	68
Figura 25. Ponto de observação P5. (a e b) Área com afloramento de rochas e pedregosidade superficial. ....	69
Figura 26. Ponto de observação P6. (a e b) Relevo montanhoso. ....	69
Figura 27. Ponto de observação P7. (a e b) Relevo ondulado com afloramento de rochas.....	69
Figura 28. Ponto de observação P8. (a e b) Região com relevo intercalado entre plano e montanhoso.....	69
Figura 29. Ponto de observação P9. (a e b) Região com relevo ondulado. ....	70
Figura 30. Ponto de observação P10. (a e b) Solos em áreas com presença acentuada de pedregosidade. ....	70
Figura 31. Ponto de observação P11. (a) Solo com bastante pedregosidade. (b) Área com relevo acidentado.....	70
Figura 32. Ponto de observação P12. (a e b) Áreas com intensa presença de morros e relevo acidentado.....	70
Figura 33. Ponto de observação P13. (a e b) Relevo plano e ao fundo a região serrana de Martins e Serrinha dos Pintos.....	71
Figura 34. Ponto de observação P14. (a e b) Ambiente com relevo predominantemente plano. ....	71
Figura 35. Ponto de observação P15. (a e b) Ambiente com relevo plano e ao fundo região montanhosa.....	71
Figura 36. Ponto de observação P16. (a) Áreas com relevo plano. (b) Presença de pedregosidade. ....	71
Figura 37. Ponto de observação P17. (a) Solo profundo e pedregosidade ausente. (b) Ambiente de relevo plano.....	72
Figura 38. Ponto de observação P18. (a) Ambiente de relevo plano, sem pedregosidade aparente. (b) Borda da chapada do Apodi ao fundo. ....	72
Figura 39. Ponto de observação P19. (a) Ambiente de relevo plano e pedregosidade superficial. (b) Afloramento de rochas espaçadas. ....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Graus de restrição á mecanização.....	6
Tabela 2. Áreas das classes de solos da bacia hidrográfica Apodi-Mossoró. ....	20
Tabela 3. Valores da intensidade de importância dos critérios. ....	35
Tabela 4. Intervalo de classificação do impedimento à mecanização. ....	37
Tabela 5. Classe de impedimento à mecanização quanto à pedregosidade.....	40
Tabela 6. Classe de impedimento à mecanização quanto à declividade. ....	42
Tabela 7. Classe de impedimento à mecanização quanto à profundidade.....	44
Tabela 8. Classe de impedimento à mecanização quanto à drenagem. ....	46
Tabela 9. Classe de impedimento à mecanização quanto à textura.....	48
Tabela 10. Valores normalizados para drenagem.....	52
Tabela 11. Valores normalizados para a textura.....	52
Tabela 12. Quantificação das classes de impedimento á mecanização agrícola das terras da bacia hidrográfica Apodi/Mossoró. ....	55

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Subcritérios de pedregosidade quanto ao impedimento à mecanização agrícola. ....	25
Quadro 2. Subcritérios de profundidade do solo quanto ao impedimento à mecanização agrícola. ....	27
Quadro 3. Subcritérios de drenagem do solo quanto ao impedimento à mecanização agrícola. ....	27
Quadro 4. Subcritérios de profundidade do solo quanto ao impedimento à mecanização agrícola. ....	28
Quadro 5. Subcritérios de declividade quanto ao impedimento à mecanização. ....	29
Quadro 6. Hierarquização da matriz de comparação pareada. ....	34
Quadro 7. Índice randômico. ....	36
Quadro 8. Pesos de importância dos critérios. ....	53

## **SIGLAS**

AHP - Analytic Hierarchy Process

AMC - Avaliação Multicritério

APP - Áreas de Preservação Permanente

CLP - Combinação Linear Ponderada

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

GRASS - Geographic Resources Analysis Support System

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INPE - Instituto de Pesquisas Espaciais

MDE - Modelo Digital de Elevação

RN - Rio Grande do Norte

SAGA - System for Automated Geoscientific Analyses

SEMARH - Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

SIG - Sistemas de Informações Geográficas

USGS - United States Geological Survey

WGS - World Geodetic System

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	3
2.1 Impedimento à mecanização agrícola .....	3
2.2 Geoprocessamento .....	7
2.3 Sistemas de informações geográficas .....	8
2.4 Avaliação multicritério .....	9
2.4.1 Normalização dos critérios .....	10
2.4.2 Ponderação dos critérios .....	11
2.4.3 Combinação dos critérios .....	13
2.5 Aplicação da avaliação multicritério em sistema de informação geográfica no uso do solo para agricultura .....	14
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	16
<b>3.1 Localização e descrição da área de estudo</b> .....	16
3.1.1 Clima .....	16
3.1.2 Geomorfologia e geologia .....	17
3.1.3 Solos .....	18
<b>3.2 Base cartográfica</b> .....	21
<b>3.3 Aplicativos computacionais</b> .....	21
<b>3.4 Hierarquização metodológica</b> .....	21
<b>3.5 Elaboração dos mapas temáticos</b> .....	24
3.5.1 Pressupostos para classificação quanto ao impedimento à mecanização agrícola ...	24
3.5.2 Mapa de pedregosidade do solo .....	25
3.5.3 Mapa de profundidade do solo .....	26
3.5.4 Mapa de drenagem do solo .....	27
3.5.5 Mapa de textura do solo .....	28
3.5.6 Mapa de declividade .....	29
<b>3.6 Normalização dos critérios</b> .....	30
3.6.1 Mapa de pedregosidade do solo .....	30
3.6.2 Mapa de declividade .....	31
3.6.3 Mapa de profundidade do solo .....	32
3.6.4 Mapa de drenagem do solo .....	32
3.6.5 Mapa de textura do solo .....	33
<b>3.7 Ponderação dos critérios</b> .....	33
<b>3.8 Combinação linear ponderada</b> .....	37

<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	39
<b>4.1 Mapas temáticos</b> .....	39
4.1.1 Pedregosidade do solo.....	39
4.1.2 Declividade.....	40
4.1.3 Profundidade do solo.....	43
4.1.4 Drenagem do solo.....	44
4.1.5 Textura do solo.....	46
<b>4.2 Mapas temáticos normalizados</b> .....	48
4.2.1 Pedregosidade do solo.....	49
4.2.2 Declividade.....	50
4.2.3 Profundidade do solo.....	50
4.2.4 Drenagem do solo.....	51
4.2.5 Textura do solo.....	52
<b>4.3 Ponderação dos critérios</b> .....	53
<b>4.4 Combinação dos critérios</b> .....	54
<b>4.5 Variação percentual das áreas</b> .....	56
<b>4.6 Processo de validação do mapa final em campo</b> .....	57
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	60
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	61
<b>ANEXOS</b> .....	67

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, principalmente a partir da instituição da Revolução Verde, cujo objetivo era aumentar a produtividade agrícola para atender à crescente demanda, o sistema agrícola brasileiro passou por significativos avanços tecnológicos. A mecanização agrícola surge nesse contexto como uma das principais tecnologias que impulsionaram o aumento das áreas cultiváveis, bem como da produção das culturas.

Para isso, as operações mediante uso de máquinas e implementos agrícolas permitem dentre outros benefícios o melhoramento das condições do solo a partir do seu preparo. Nesta etapa, a mecanização com práticas conservacionistas propicia benefícios físicos, químicos e biológicos ao solo, condicionando um melhor armazenamento de água, melhorando a permeabilidade e a atividade biológica, criando condições para um bom desenvolvimento das culturas.

No entanto, a intensificação e o uso inadequado de práticas agrícolas com o emprego da mecanização têm contribuído para o agravamento da degradação dos solos devido à maior exposição destes aos agentes erosivos, resultando na diminuição de áreas aptas para a agricultura.

Diante dessa problemática, é de importância que as operações agrícolas que exijam a introdução de máquinas e implementos devam ser precedidas de um planejamento adequado que vise estabelecer os critérios técnicos para aperfeiçoar seu uso, sem comprometer o solo.

Apesar dos impactos negativos no solo decorrentes das operações mecanizadas, com destaque para a erosão, estes ocorrem e ou são potencializados em ambientes cujas condições de manejo adotadas não condizem com as propriedades e características dos solos. Além disso, esses impactos são comumente verificados em áreas que não possuem aptidão ao uso da mecanização agrícola ou possui alguma restrição.

Nesse contexto, a delimitação das áreas com impedimento ao uso de máquinas e implementos agrícolas consiste em uma ferramenta de planejamento que otimiza o uso das terras, favorecendo o desenvolvimento sustentável à partir da mitigação dos impactos ambientais no solo.

Para a tomada de decisão quanto às áreas aptas a utilização de práticas mecanizadas, é necessária a escolha de critérios que, em maior ou menor grau influenciam no impedimento à mecanização agrícola. Nessa escolha, ressalta-se que em razão dos atributos do solo e das características do ambiente que podem restringir o uso de máquinas e implementos agrícolas, os critérios a serem utilizados dependem do objetivo proposto.

Nesse sentido, para fins conservacionistas é comum adotar os critérios de declividade, pedregosidade, profundidade, textura e drenagem do solo para mapear e mensurar as áreas com restrição à mecanização agrícola. Cada critério exerce um comportamento diferenciado quanto ao grau de impedimento à mecanização.

Considerando esses critérios, o uso da mecanização agrícola em regiões declivosas, além de diminuir a velocidade de trabalho e de dificultar a estabilidade das máquinas, deixam os solos mais susceptíveis aos processos erosivos. Enquanto isso, a mecanização em solos rasos, assim como a declividade, favorece a susceptibilidade a erosão devido à associação entre baixa capacidade de armazenamento de água do solo com a exposição das camadas subsuperficiais.

A textura e drenagem são critérios que influenciam diretamente nas condições de consistência do solo, conferindo dificuldades na introdução de máquinas e implementos quando operados em solos coesos e pegajosos, causando a desagregação das partículas com consequente degradação do solo. Por fim, a pedregosidade acentuada influencia danificando as máquinas e implementos agrícolas, impedindo a realização das operações.

Considerando o exposto, para o mapeamento e identificação das terras com impossibilidade da inserção de práticas mecanizadas, é necessário à espacialização e a modelagem dos critérios. Para essa finalidade, o geoprocessamento por meio dos sistemas de informações geográficas - SIG é a ferramenta bastante empregada e eficiente na consecução desses estudos.

Porém, o SIG individualmente, para o mapeamento do impedimento à mecanização, pode ser ineficiente na obtenção dos resultados. A simplificação de resultados somente a partir do cruzamento de diversos planos de informações, por exemplo, não atende a estudos com análise complexas que envolvam informações que precisam ser integradas e inter-relacionadas.

Assim, é necessário que o SIG esteja associado a um método analítico que possa combinar e modelar as variáveis inerentes ao estudo de maneira que as informações obtidas representem a realidade. Nesse aspecto, a Avaliação Multicritério fornece métodos que analisam de forma integrada e complexa as relações entre os diversos critérios, fornecendo informações como o grau de importância de um critério, bem como o comportamento deste quando comparado e combinado com outros.

Dentro dessa contextualização, o presente trabalho tem por objetivo mapear e quantificar as áreas da bacia hidrográfica Apodi/Mossoró quanto ao impedimento à mecanização agrícola, mediante uso de máquinas e implementos nas etapas de preparo do solo, bem como avaliar a eficácia da modelagem geoespacial na obtenção dos resultados.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Impedimento à mecanização agrícola

O impedimento à mecanização agrícola refere-se às condições apresentadas pelas terras para o uso de máquinas e implementos agrícolas (Ramalho Filho & Beek, 1995). Diante desse conceito, a introdução de máquinas e implementos agrícolas no campo está condicionada a uma série de fatores. Cada ambiente, em razão de sua posição na paisagem e, principalmente, devido algumas características e propriedades do solo, apresentam restrição ou aptidão ao uso de máquinas e implementos agrícolas.

Para Resende (2002) o maior ou menor impedimento que a área possa oferecer ao processo de mecanização passa a ter uma importância muito grande em determinados agroecossistemas. Nesse sentido, infere-se que o impedimento imposto à mecanização agrícola pelas condições da área reflete a potencialidade que as terras oferecem ao desenvolvimento da produção agrícola.

Na avaliação do impedimento à mecanização agrícola das terras, Ramalho Filho & Beek (1995) citam como fatores limitantes as condições de declividade da área, bem como os atributos do solo de drenagem, profundidade, textura, tipo de argila, pedregosidade e rochiosidade. Esse autor classifica o impedimento em cinco classes com graus definidos em nulo, ligeiro, moderado, forte e muito forte, conforme as condições apresentadas a seguir.

**Nulo (N)** - terras que permitem, em qualquer época do ano, o emprego de todos os tipos de máquinas e implementos agrícolas ordinariamente utilizados. São, geralmente, de topografia plana e praticamente plana, com declividade inferior a 3% e não oferecem impedimentos relevantes à mecanização. O rendimento do trator (número de horas de trabalho usadas efetivamente) é superior a 90%.

**Ligeiro (L)** - terras que permitem, durante quase todo o ano, o emprego da maioria das máquinas agrícolas. São quase sempre de relevo suave ondulado, com declives de 3 a 8%, profundos a moderadamente profundos, podendo ocorrer em áreas de relevo mais suave, apresentando, no entanto, outras limitações (textura muito arenosa ou muito argilosa, restrição de drenagem, pequena profundidade, pedregosidade, sulcos de erosão etc.). O rendimento do trator varia de 75 a 90%.

**Moderado (M)** - terras que não permitem o emprego de máquinas ordinariamente utilizadas durante todo o ano. Essas terras apresentam relevo moderadamente ondulado a ondulado, com declividade de 8 a 20%, ou topografia mais suave no caso de ocorrência de outros impedimentos (pedregosidade, rochiosidade, profundidade exíqua, textura muito arenosa ou muito argilosa do tipo 2:1, grandes sulcos de erosão, drenagem imperfeita, etc.). O rendimento do trator normalmente varia de 50 a 75%.

**Forte (F)** - terras que permitem apenas, em quase sua totalidade, o uso de implementos de tração animal ou máquinas especiais. Caracterizam-se pelos declives acentuados (20 a 45%), em relevo forte ondulado. Sulcos e voçorocas podem constituir impedimentos ao uso de máquinas, bem como pedregosidade, rochiosidade, pequena profundidade, má drenagem, etc. O rendimento do trator é inferior a 50%.

**Muito forte (MF)** - terras que não permitem o uso de maquinaria, sendo difícil até mesmo o uso de implementos de tração animal. Normalmente, são de topografia montanhosa, com declives superiores a 45% e com impedimentos muito fortes devido à pedregosidade, rochiosidade, profundidade ou aos problemas de drenagem.

Apesar da classificação de Ramalho Filho & Beek (1995) citar vários atributos que conferem impedimento à mecanização agrícola, vários destes não são quantificados, ou seja, com exceção da declividade que expressa os limites definidores de impedimento em termos percentuais, os demais critérios são informações subjetivas que não definem, por exemplo, o percentual de pedras que passe a comprometer a utilização de máquinas e implementos agrícolas.

Relativo à pedregosidade e rochiosidade é comum em trabalhos tais como Silva et al. (2010) quantificar esses parâmetros quanto ao impedimento à mecanização agrícola utilizando as definições e percentuais estabelecidos por Santos et al. (2005). Para esse autor, pedregosidade refere-se à proporção de calhaus (2-20cm de diâmetro) e matações (20-100cm de diâmetro) sobre a superfície ou na massa do solo, próximo à superfície ou dentro do solum.

Aplicando o conceito de pedregosidade ao impedimento à mecanização agrícola, Santos et al (2005) ao classificar os diferentes graus de pedregosidade que o solo pode apresentar, estabelece que o maquinário agrícola convencional sofrerá restrição quanto ao seu uso no campo a uma pedregosidade classificada como moderada, cujo teor de calhaus e matações estão entre 1 a 3% da massa do solo e, ou da superfície, e que um solo classificado como pedregoso, com teor de calhaus e matações entre 3 a 15% só admite o emprego de máquinas especiais e implementos agrícolas manuais.

Já para a rochiosidade, segundo a descrição de Santos et al. (2005), as operações agrícolas com o uso de máquinas e implementos só serão aptas em solos com classificação denominada de ligeiramente rochoso, cujos afloramentos estão espaçados a uma distância entre 30 a 150 metros, ocupando de 2 a 10% da superfície do terreno. Para as terras com afloramentos acima da classificação ligeira, a mecanização se torna impraticável.

Francisco (2010) afirma que a pedregosidade e a rochiosidade são fatores limitantes à mecanização de grande importância, pois restringe as atividades agrícolas, e podem causar sérios prejuízos às máquinas e implementos.

Ainda considerando os fatores que restringem o uso de máquinas e implementos agrícolas, de acordo com Brasil (1971) a pedregosidade e a rochiosidade, juntamente com o relevo fornecem os principais subsídios para o estabelecimento dos graus de limitações ao emprego de implementos agrícolas.

Dada a relevância da declividade, pedregosidade e rochosidade como condições que limitam a prática da mecanização agrícola, Pereira et al. (2004) ao proporem uma metodologia para avaliação da aptidão agrícola das terras utilizou somente esses atributos como critérios para definir os graus de impedimento à mecanização.

Em sua classificação final Pereira et al. (2004) estabelece que as condições adequadas para o uso de máquinas e implementos agrícolas passam a ser influenciadas pela combinação de uma declividade em torno de 3 a 8% associada a uma condição de pedregosidade/rochosidade classificada como ligeira ou uma combinação de áreas com declividade entre 8 a 13% com grau de pedregosidade/rochosidade classificado como nulo. Acima dessas condições a mecanização só poderá ser praticada mediante uso de máquinas especiais.

Rezende (2008) com objetivo de determinar às áreas aptas a mecanização para operações de manejo da lavoura cafeeira no Sul e Sudoeste de Minas Gerais e Höfig et al. (2015) ao analisarem a declividade do terreno no estado do Paraná quanto à potencialidade à mecanização definiram a declividade como o único parâmetro que limita as operações com máquinas agrícolas.

Para tanto, os autores classificaram as áreas em cinco grau de aptidão à mecanização, sendo limites de declividade entre 0 e 5% como áreas extremamente aptas à mecanização, de 5 a 10% muito apta, 10 a 15% apta, 15 a 20% a classificação foi tida como moderada e acima de 20% as áreas foram classificadas como não recomendadas à mecanização.

Já Resende (2002) cita que além do relevo e da pedregosidade, para que a terra esteja apta para operações com o uso de máquinas e implementos agrícolas, é necessário que o solo não tenha argila de atividade alta, nem tenha tendência à compactação (mesmo sendo de argila de atividade baixa) e que apresente áreas contínuas grandes (baixa densidade de drenagem).

Para quantificar o impedimento à mecanização agrícola dos solos do acre, Pacheco et al (2001) utilizaram os critérios de relevo, presença de concreções, drenagem, profundidade e classe textural. Já Delarmelinda et al. (2011) em trabalho em nível de propriedade rural definiu dez critérios (pedregosidade, rochosidade, drenagem, tipo de argila, textura do solo, relevo, presença de erosão, profundidade efetiva do solo, rendimento do trator e época do emprego de máquinas) que contribuíam em maior ou menor grau ao impedimento à mecanização de dez perfis no estado do Estado do Acre.

Wadt et al. (2008) definiram um conjunto de regras de decisão para interpretação do impedimento à mecanização agrícola dos solos. Utilizaram-se como indicadores para avaliar o grau de impedimento à mecanização as variáveis: declividade do terreno, textura do solo (teor

de argila e de areia), profundidade do solo, rochosidade e pedregosidade (incluindo concreções endurecidas, como petroplintita) e drenagem do solo. O resultado do seu trabalho foi obtido mediante combinação da variável declividade com as demais variáveis (Tabela 1 e Figura 1).

Tabela 1. Graus de restrição á mecanização.

Grau	Rochosidade (% de área exposta)	Pedregosidade (% volume ocupado)	Drenagem (Lençol freático/cores acinzentadas ou mosqueadas)	Profundidade
0	Sem rochas	Sem pedregosidade	Ausência	>100 cm
1	< 2	2 a 15	Presença abaixo de 80cm	80 a 100 cm
2	2 a 15	15 a 50	Presença entre 60 e 80 cm	50 a 80 cm
3	15 a 50	50 a 75	Presença entre 30 e 60 cm ou caráter vértico	25 a 50
4	> 50	> 75	Presença a menos de 30 cm	<25cm

Fonte: Wadt et al. (2008).

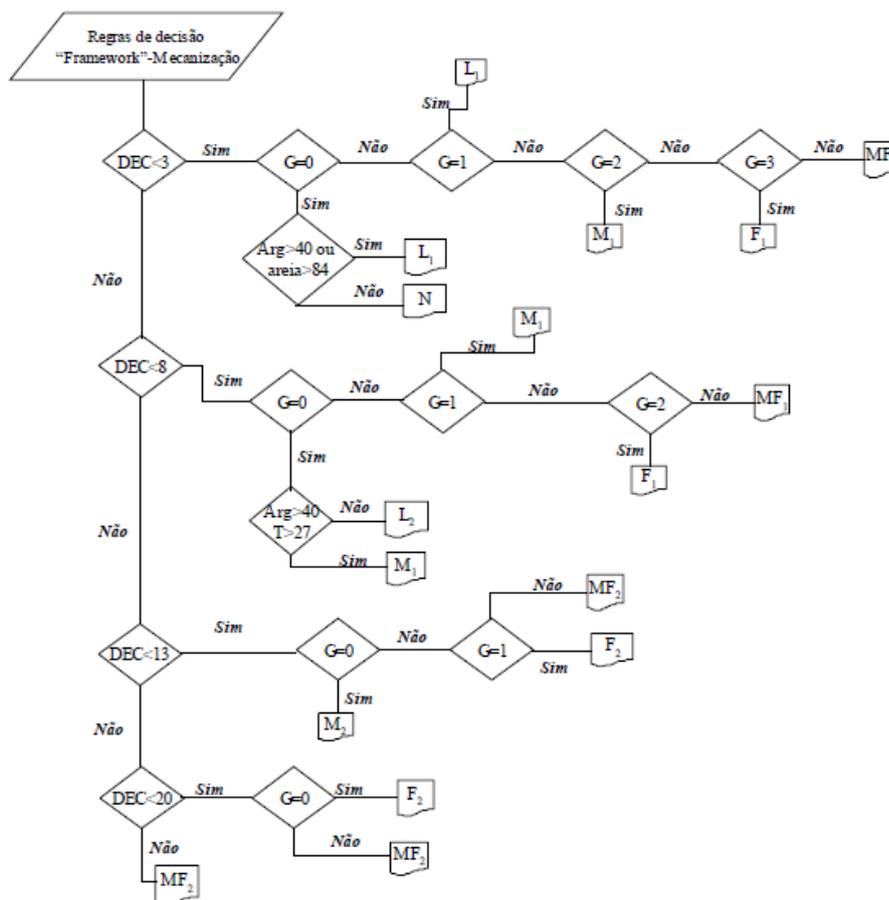


Figura 1. Regras de decisão para a determinação do grau de limitação aos impedimentos à mecanização (N = nulo, L = ligeiro, M = moderado, F = forte e MF = muito forte), em função das variáveis: Declividade (Dec), Rochosidade, pedregosidade, drenagem e profundidade (G), atividade da argila (T) e teor de argila (Arg) ou areia (areia).

Fonte: Wadt et al. (2008).

## 2.2 Geoprocessamento

Nas últimas décadas, com o avanço científico e tecnológico, a análise das informações geográficas se tornou um instrumento utilizado para solução de problemas das diversas áreas do conhecimento humano, especialmente as oriundas do mapeamento que envolve a relação entre espaço e meio ambiente.

Embora por muito tempo os conhecimentos acerca do espaço não tivessem sido sistematizados, pode-se afirmar que o homem sempre se valeu deste tipo de conhecimento em sua vida cotidiana, seja na busca por melhores áreas para caça ou mesmo no atual uso das geotecnologias como apoio à instalação de grandes indústrias e equipamentos diversos (Rodrigues, 2015).

Até meados da década de 1990, as informações geográficas eram armazenadas majoritariamente em papel. Com o desenvolvimento da tecnologia digital, ocorrido a partir de então, foi possível o armazenamento e a representação das informações em ambiente computacional, viabilizando todo o processo associado à sua manipulação e utilização (Sepe, 2015).

Nesse cenário, o geoprocessamento surge como a ciência de suma importância para o tratamento das informações espaciais. O termo geoprocessamento denota uma disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento de informações geográficas, tendo como objetivo principal fornecer ferramentas computacionais para que diferentes analistas determinem as evoluções espacial e temporal de um fenômeno geográfico, e as inter-relações entre esses fenômenos (Câmara & Medeiros, 1998).

De acordo com Fitz (2008) o geoprocessamento possibilita à manipulação, a análise, a simulação de modelagens e a visualização de dados georreferenciados, permitindo a tomada de decisões. Para Ribeiro (2013), o geoprocessamento é o conjunto de procedimentos metodológicos capaz de criar deduções por meio de relações espaciais entre componentes da situação ambiental.

Considerando o geoprocessamento como um conceito que envolve diversas tecnologias, Oliveira (2011) cita que o geoprocessamento agrega uma série de ferramentas para tratamento multidisciplinares de dados espaciais, como o Sensoriamento Remoto, os Sistemas de Informação Geográfica, conhecidos como SIG/GIS, Processamento Digital de Imagens-PDI, Geoestatística, Cartografia Digital, Computer Aided Design – CAD (Desenho Assistido por Computador), Banco de Dados Alfanuméricos e o Global Navigation Satellite Systems – GNSS (Sistemas Globais de Navegação por Satélite) (Figura 2).

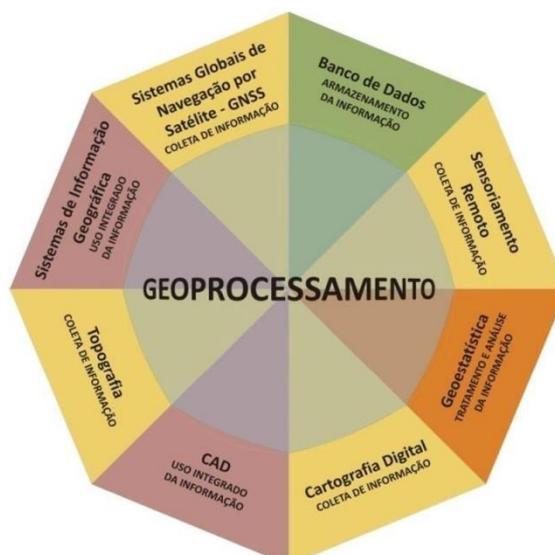


Figura 2. Categorias de tratamento de informações espaciais com geoprocessamento.  
 Fonte: Oliveira (2011).

Pra confirmar abrangência e potencialidade da atuação do geoprocessamento como ciência multidisciplinar citamos os trabalhos de Trabaquini et al. (2011) que caracterizou as lavouras cafeeiras utilizando técnicas de geoprocessamento, Zanata et al. (2012) que realizou uma análise de uso e ocupação do solo em áreas de preservação permanentes com o uso de técnicas de geoprocessamento, Rocha et al. (2015) que utilizaram o geoprocessamento na seleção de áreas para implantação de aterros sanitários e Mendes et al. (2016) que aplicaram o geoprocessamento na caracterização de uma bacia hidrográfica.

### 2.3 Sistemas de informações geográficas

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) podem ser definidos como um sistema de informação baseado em computador que permite a captura, modelagem, manipulação, recuperação, análise e apresentação de dados geograficamente referenciados (Worboys & Duchkam, 2004).

Malczewski (2004) cita que o sistema de informação geográfica é composto por quatro componentes: entrada de dados, armazenamento e gestão de dados, manipulação e análise e saída dos dados. A entrada de dados refere-se ao processo de identificação, escolha e inserção dos dados necessários para uma aplicação específica. O componente de armazenamento e gerenciamento de dados de um SIG inclui as funções necessárias para armazenar e recuperar dados a partir do banco de dados. A manipulação e análise constituem no processo de inferência dos dados, possibilitando a obtenção de novas informações. Por fim, a saída de

dados fornece uma maneira de ver os dados/informações na forma de mapas, tabelas, diagramas, etc.

Para Câmara & Queiroz (2001) as principais características de um SIG são:

- Inserir e integrar, numa única base de dados, informações espaciais provenientes de dados cartográficos, dados censitários e cadastro urbano e rural, imagens de satélite, redes e modelos numéricos de terreno;
- Oferecer mecanismos para combinar as várias informações, através de algoritmos de manipulação e análise, bem como para consultar, recuperar, visualizar e plotar o conteúdo da base de dados georreferenciados.

Os SIG apresentam um amplo ferramental à manipulação de dados espaciais, em casos de grandes volumes e complexidade, para geração de informações que subsidiam a avaliação e tomada de decisão (Pinto, 2015).

Bezerra et al. (2011) enfatiza que o SIG por permitir trabalhar com um grande volume de informações de forma confiável e objetiva, bem como por realizar o tratamento das informações de maneira simultânea e inter-relacionadas possibilita a análise de forma prática e precisa sobre os impactos nos recursos naturais.

Em razão da grande capacidade de gerenciamento e análise espacial, o SIG é aplicado em diversos estudos com diferentes temáticas, principalmente no planejamento do uso das terras para agricultura. Nesse sentido, Baroudy (2016) com o uso de um modelo fundamentado por um sistema de informação geográfica mapeou e avaliou as terras adequadas para o estabelecimento do trigo em uma região do Egito. Já Montgomery et al. (2016) desenvolveram um sistema lógico com o auxílio do SIG para tomada de decisão quanto às áreas mais adequadas para a agricultura.

Nessa direção, Silva et al. (2010) ao utilizar o SIG para avaliação da aptidão agrícola das terras concluiu que o seu uso permitiu a análise e integração dos temas com significativa redução de tempo e subjetividade nos cruzamentos.

## **2.4 Avaliação multicritério**

Langemeyer et al. (2016) afirmam que a análise multicritério é um processo com múltiplos passos que consiste de um conjunto de métodos para estruturar e formalizar processos de tomada de decisão de forma transparente e consistente.

A avaliação multicritério - AMC é composta por um número finito de alternativas, devidamente conhecidas. Cada alternativa é representada pelo seu desempenho na avaliação

dos múltiplos critérios. Dessa forma, o problema de um conjunto de critérios pode ser definido como encontrar a melhor alternativa ou um conjunto de alternativas para uma decisão (Elsheikh et al. 2013).

As metodologias de apoio à decisão multicritério compõem um conjunto extenso de métodos, e podem ser definidas como ferramentas matemáticas que permitem a comparação de diferentes alternativas ou cenários, do ponto de vista de diferentes critérios, com o propósito de auxiliar a tomada de decisão (Araújo, 2014).

Conforme Romano et al. (2015) alguns métodos de análise multicritério tem evoluído como uma ferramenta fundamental para ajudar os tomadores de decisão em qualquer classificação de um conjunto de alternativas para a resolução de problemas ou fazer uma escolha entre estes.

A metodologia para desenvolvimento de uma aplicação com base em multicritério requer a definição de determinados parâmetros, que são a ponderação dos critérios, a padronização ou normalização dos valores e um método de combinação dos critérios intervenientes (Falcão, 2013).

#### 2.4.1 Normalização dos critérios

Além da escolha do método a ser adotado na avaliação multicritério deve-se estar atento em como possibilitar que atributos com valoração diferentes possam ser combinados no processo de avaliação (Antonello, 2008).

Assim, o processo de normalização dos critérios de um estudo consiste em adotar uma metodologia para disposição dos valores dos critérios em um único plano de referência com escala pré-definida de forma a proporcionar, por exemplo, a comparação entre declividade cuja unidade está em porcentagem e profundidade dada em centímetros.

Existem basicamente dois meios de normalizar os dados de um critério: através do emprego de modelos matemáticos e ou mediante inserção direta dos dados pelo pesquisador. O primeiro é utilizado quando os critérios contêm dados quantitativos, enquanto o segundo é usado em critérios de ordem qualitativa ou nominal.

No entanto, entre esses meios de padronização de valores, existem diversos métodos, com variações matemáticas significativas, podendo os valores ser ajustados a partir de equações que expressam comportamentos diferentes de um critério em relação ao objetivo do estudo.

Com essa preocupação, Vettorazzi (2006) afirma que os diferentes valores dos critérios refletem diferentes níveis de utilidade do tomador de decisão e que isso pode afetar a inter-relação entre os atributos de um estudo, resultando em diferentes padrões do uso da terra.

Atualmente um dos modelos matemáticos mais empregados para essa finalidade é a lógica *fuzzy*. Gdoura et al. (2015) utilizaram função de pertinência *fuzzy* para padronizar os critérios na definição das áreas adequadas para recarga de um aquífero e, Rebolledo et al. (2016) que ao analisarem a influência de uma serie de critério na vulnerabilidade a contaminação por nitrato em águas subterrâneas empregaram a lógica *fuzzy* para normalização de seus dados.

A teoria dos conjuntos *fuzzy* ajuda a lidar melhor com atributos qualitativos, representando uma ótima ferramenta para modelar termos e relações imprecisos comumente empregados por seres humanos em comunicação e compreensão (Nascimento et al, 2009).

Dentre as funções da lógica *fuzzy* utilizada para normalização dos dados cita-se a Linear, Sigmoidal e J-Shaped. Eastman (2012) diz que a função sigmoidal (em forma de S) é a mais utilizada na lógica *fuzzy*.

Essa função é composta por quatro pontos de controle representados pelas letras a, b, c e d, respectivamente significando o ponto em que o valor deixa de ser nulo, o ponto em que a curva atinge o seu valor máximo, o ponto em que a curva começa a cair e, por fim, o ponto em que o valor retorna a zero (Figura 3. c e d). A curva pode ser monótona crescente quando os valores não diminuem ou monótona decrescente quando os valores não aumentam (Figura 3. a e b).

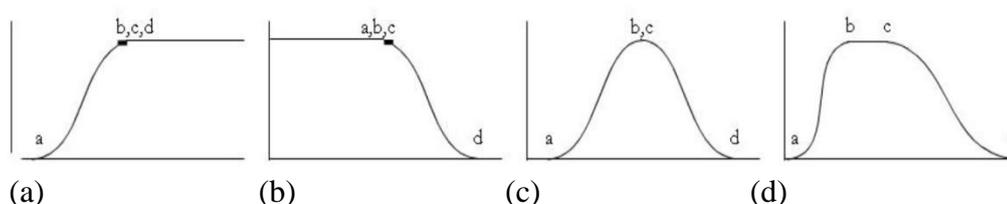


Figura 3. Função Sigmoidal. (a) monoticamente crescente (b) monoticamente decrescente (c) e (d) simétricas.

Fonte: Eastman (2012).

#### 2.4.2 Ponderação dos critérios

Um dos grandes problemas em trabalhar com inúmeras variáveis dentro de um estudo é o estabelecimento quantitativo da contribuição de cada variável no objetivo proposto. O processo de ponderar os critérios consiste em atribuir um peso, dentro de uma escala pré-estabelecida, que represente a influência do critério ou fator no resultado final de um estudo.

Alguns trabalhos a exemplo de Fantinel et al. (2015) e Vital et al. (2014) estabelecem os pesos dos critérios de forma direta, fundamentado em outros estudos ou de acordo com o conhecimento técnico-teórico do pesquisador. No entanto, o processo de ponderação pode ser aplicado com o uso de modelos matemáticos.

Entre os métodos matemáticos mais difundidos para ponderação está o *Analytic Hierarchy Process* – (AHP). O método foi desenvolvido por Tomas Saaty (1977) e consiste em uma abordagem multicritério para suporte à tomada de decisão na qual fatores da decisão são arranjados em uma estrutura hierárquica (Freitas, 2013).

Antonello (2008) ao descrever a estruturação do método AHP relata que o processo inicia com a decomposição em níveis organizacionais em uma hierarquia que deve conter no topo o objetivo final, seguindo no nível abaixo os atributos (critérios) que podem ser em outro nível subdivididos em subatributos e por fim, na base da hierarquia estão as alternativas possíveis de ser assumidas.

De acordo com Saaty (2008) a aplicação do método AHP atende as seguintes etapas:

- 1 – Definição do problema;
- 2 - Estruturação da hierarquia do problema em níveis, a partir do objetivo principal da decisão (no topo da hierarquia), estabelecendo os critérios e objetivos intermediários em cada nível da hierarquia, até o nível mais baixo da hierarquia, que normalmente compreende o conjunto de alternativas para a decisão.
- 3 - Construir um conjunto de matrizes de comparação par a par. Cada elemento em uma parte superior de níveis é usado para comparar os elementos no nível imediatamente abaixo com relação a ele.
- 4 - Uso de prioridades obtidas a partir das comparações em pares para atribuir pesos aos critérios.

Ainda de acordo com Saaty (2008) para fazer comparações, precisamos de uma escala de números que indica quantas vezes um elemento é mais importante ou dominante sobre outro elemento em relação ao objetivo.

Patriche et al. (2016) compararam o método AHP com a regressão de logística binária para quantificar a susceptibilidade ao desmoronamento de terras na Romênia e concluíram que o método AHP é uma análise subjetiva avançada com qualidade desde que o pesquisador detenha um bom conhecimento da área, e que em sua opinião diferentes pesquisadores dificilmente atribuirão os mesmos valores na matriz de comparação pareada, o que dificulta o resultado.

O método AHP tem a potencialidade de modelar distintas variáveis inseridas em diversas áreas do conhecimento. Na área ambiental e agrícola este método está sendo

amplamente aplicado para delimitação de áreas que representam alguma limitação ou potencialidade de uso. Assim, Campos et al. (2015) com o propósito de definir as áreas prioritárias para uso agrícola ponderou suas variáveis através do Processo Analítico Hierárquico.

Já Dias et al. (2014) empregaram o método AHP para modelar a vulnerabilidade ambiental e Sartori et al. (2014) utilizaram o método AHP para definir áreas prioritárias para adequação ao uso das terras quanto a sua capacidade de uso.

#### 2.4.3 Combinação dos critérios

Para combinação dos critérios em avaliação multicritério existem diversos métodos que podem ser empregados dos quais segundo Malczewski (2004) o método booleano e a combinação linear ponderada são os métodos considerados mais diretos e frequentemente usados. Nesta revisão será dada ênfase ao método combinação linear ponderada, em razão ser este o utilizado nesta pesquisa.

A combinação linear ponderada – CLP é um método onde os critérios são agregados e combinados em um processo de ponderação que permite, após a normalização e ponderação dos critérios, a compensação entre todos os critérios, conforme peso ou grau de importância (Pinto, 2015).

Matematicamente a CPL é definida pela Equação 1:

$$S = \sum_i^n w_i . x_i \quad (1)$$

Em que:

S = Valor final;

W<sub>i</sub> = Peso do critério

X<sub>i</sub> = Valor normalizado do critério

Em ambiente de SIG Eastman (2012) detalha que o procedimento CLP consiste em multiplicar cada pixel de um mapa de critério normalizado pelo seu respectivo peso e depois somar os resultados.

Romano et al. (2015) ressaltam que o método da combinação linear ponderada, diferente da técnica booleana, não trabalha com resultados nos extremos e, por isso o método não apresenta aversão ao risco e nem risco em excesso, caracterizando-se como um método de risco médio ao ser aplicado para delimitação de áreas para diversas finalidades.

## **2.5 Aplicação da avaliação multicritério em sistema de informação geográfica no uso do solo para agricultura**

Nos estudos que demandam o uso de um SIG as variáveis inerentes ao objetivo pretendido comumente estão em grande número, principalmente quando o estudo envolve a escolha de uma alternativa entre diversas outras que podem atender a um objetivo. Nesses estudos as técnicas de geoprocessamento devem estar sempre combinadas a um método consolidado de análise espacial. Para definição de áreas mais adequadas que suporta uma determinada atividade e ou uso prioritário, a integração de SIG com a avaliação multicritério se mostra como uma ferramenta bastante poderosa (Paula et al, 2011).

Mendas et al. (2012) ressaltam que apesar do enorme potencial, o SIG contribui pouco para resolver problemas específicos e exemplifica isso dissertando que se concentrando apenas no aspecto espacial, pode-se negligenciar, por exemplo, para avaliar a aptidão das terras para agricultura, o fato da influência de diversos critérios no estudo.

Dessa forma, o autor diz que a integração de análise de decisão multicritério em um sistema de informação geográfico fornece uma poderosa ferramenta de apoio à decisão espacial que oferece a oportunidade de produzir de forma eficiente os mapas de aptidão da terra.

Corroborando com este pensamento Campos et al. (2015) descrevem que o uso de sistemas de informação geográfica, enquanto ferramenta de geoprocessamento, aliado a técnica de análise de multicritérios, possibilita a padronização e a integração de dados, que normalmente são provenientes de diversas fontes, permitindo que se realize uma avaliação conjunta dos critérios, proporcionando mais eficiência e confiabilidade no processo de tomada de decisão para promover a adequação do uso das terras.

Malczewski (2004) afirmou que a integração entre as técnicas de tomada de decisão multicritérios e sistemas de informações geográficas representa um avanço considerável nas análises envolvendo a adequação do uso das terras, em relação às abordagens convencionais de sobreposição de mapas.

Zolekar et al. (2015) analisaram mediante SIG e avaliação multicritério as áreas mais adequadas para agricultura em uma região montanhosa da Índia. Para tanto utilizou como critérios os dados do solo de declividade, relação uso do solo e cobertura, profundidade, textura, umidade, capacidade de retenção de água, erosão, carbono orgânico, pH , nitrogênio, potássio e fósforo, e aplicou os métodos AHP e combinação linear ponderada para classificação das terras mais adequadas à agricultura.

De maneira análoga, Akıncı et al. (2013) empregou o método AHP em ambiente SIG para definir as áreas mais propícias à agricultura em um vilarejo na Turquia. Neste estudo, o autor utilizou nove parâmetros do solo como critérios.

Com o objetivo mais específico, Zhang et al. (2015) mapeou uma província na China com o uso de SIG e AMC para definir as áreas mais aptas à cultura do tabaco. Em sua conclusão, o autor cita que integração da lógica *fuzzy* e AHP com SIG fornece uma combinação precisa e poderosa na aplicação de análise de adequabilidade da terra.

Com o mesmo propósito Kazemi et al. (2016) delimitou a aptidão das áreas de Gonbad-Kavous/Irã para cultivo da fava. Os critérios escolhidos (temperatura, precipitação, declividade, altitude, matéria orgânica, pH, CE, e alguns nutrientes) foram combinados pelo método AHP para ponderação e tratados em ambiente SIG, concluindo que a combinação de SIG e AHP é um método prático e aplicável para determinar a adequação de terras para culturas da fava.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Localização e descrição da área de estudo

A bacia hidrográfica Apodi-Mossoró localiza-se no oeste do Estado do Rio Grande do Norte - RN, entre as coordenadas 9290000m e 9450000m de latitude sul e 545000m e 725000m de longitude oeste, delimitando uma área de 14.276 km<sup>2</sup>, correspondente a cerca de 26,8% do território estadual. Trata-se de uma bacia que é inteiramente potiguar, desde a sua nascente na serra de Luiz Gomes até a foz entre os municípios de Areia Branca e Grossos (Figura 4).

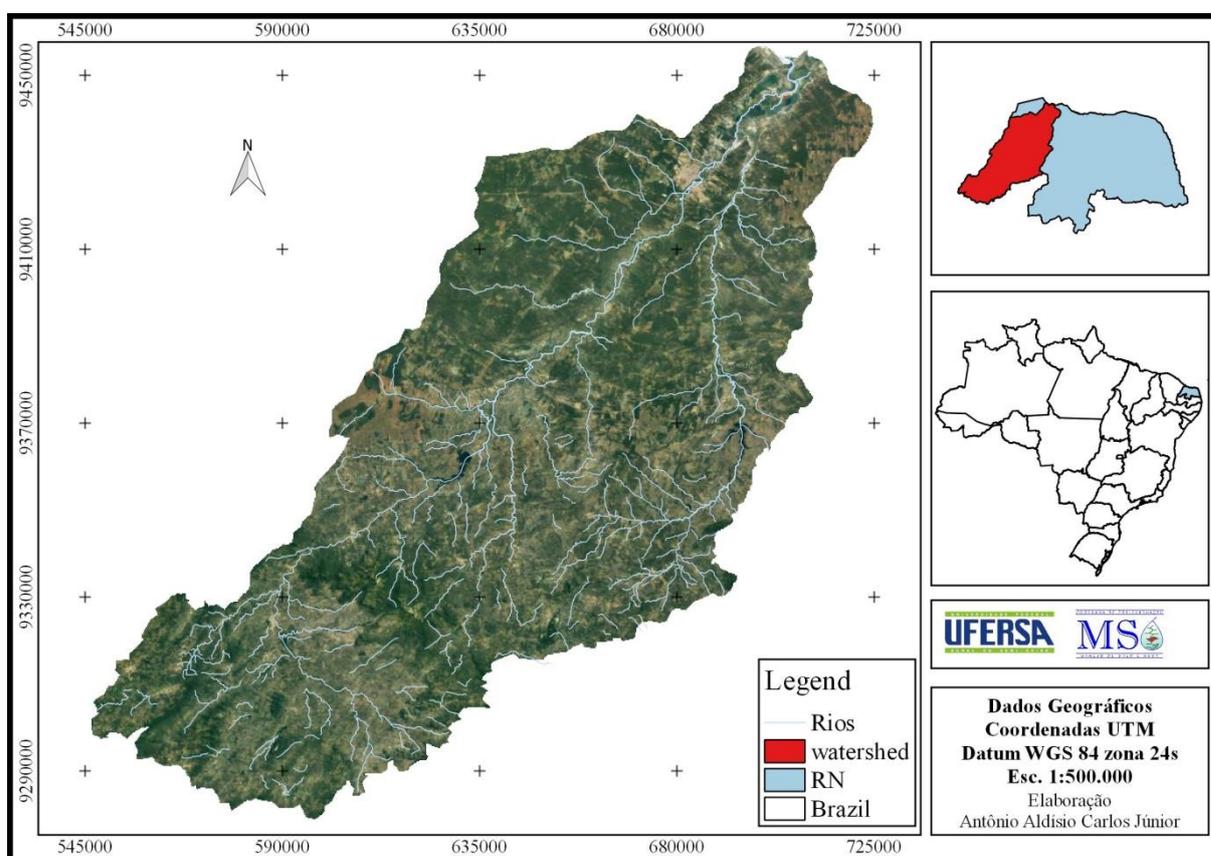


Figura 4. Mapa da localização da bacia hidrográfica Apodi-Mossoró.  
Fonte: Base digitalizada SEMARH e IBGE.

##### 3.1.1 Clima

Na bacia hidrográfica Apodi-Mossoró a predominância do clima BSw'h', conforme classificação climática de Köppen, caracterizado por um clima muito quente e semiárido, com a estação chuvosa se atrasando para o outono. No extremo sudoeste da bacia, correspondendo às suas nascentes, ocorre o tipo Aw', caracterizado por um clima tropical chuvoso com verão seco e estação chuvosa se adiantando para o outono (SEMARH, 1998).

Ainda de acordo com SEMARH (1998), na maior parte da bacia, as precipitações médias anuais de longo período situam-se em torno de 700 mm, havendo pequena área, nas proximidades da foz e na região a leste do trecho médio do rio do Carmo, com precipitações de 600 mm. Na parte alta, a montante da localidade de Tabuleiro Grande, há um aumento até cerca de 900 mm, com pequena área, na região alta de Martins, chegando a 1.100 mm.

### 3.1.2 Geomorfologia e geologia

As unidades geomorfológicas da bacia hidrográfica Apodi-Mossoró estão inseridas em duas grandes morfoestruturas, o embasamento cristalino (centro sul) e bacia potiguar (centro norte).

A primeira caracteriza-se por um relevo predominantemente de superfícies aplainadas degradadas, com grande presença de regiões montanhosas representadas pelos domínios montanhosos no extremo sul, domínios de morro e serras, escarpas e alguns insebergues (Figura 5).

Na segunda morfoestrutura predomina regiões de baixos platôs. No extremo norte, junto à foz do rio Apodi, ocorre a faixa litorânea, representada por uma planície flúvio-marinha, ladeada pelos tabuleiros costeiros (Figura 5).

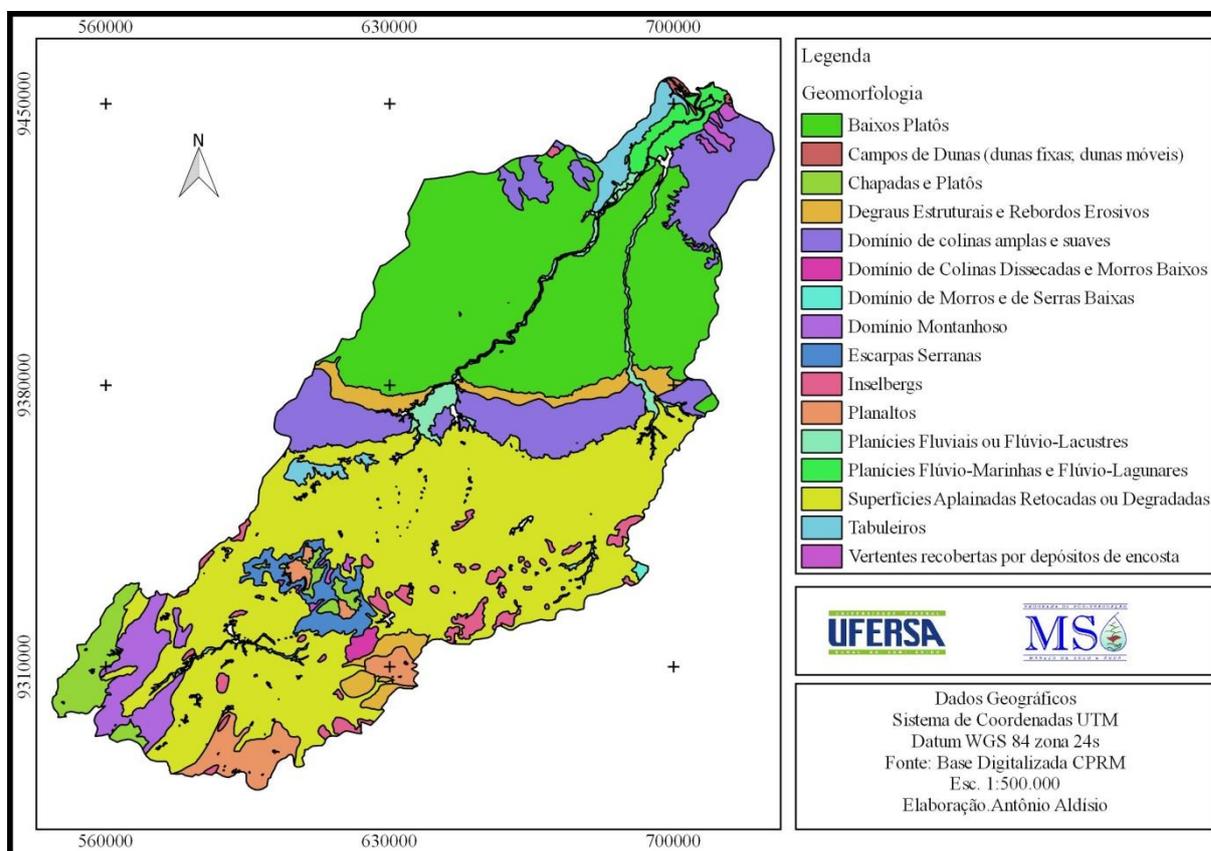


Figura 5. Mapa da geomorfologia da bacia hidrográfica Apodi-Mossoró.  
 Fonte. Base digitalizada CPRM.

No aspecto geológico o extenso platô que caracteriza a superfície Cárstica é constituído por um pacote sedimentar clástico (siltitos, arenitos e arenitos calcíferos) da formação Açú, que se sobrepõe ao embasamento cristalino e encontra-se recoberto pela formação Jandaíra, constituída por calcários bioclásticos, calcarenitos e calcários dolomíticos, com clásticos como acessórios (SEMARH, 1998).

De acordo com SEMARH (1998) a feição geomorfológica depressão sertaneja (superfícies aplainadas), do ponto de vista geológico, é relacionada à litologias Pré-Cambrianas dos complexos Caicó e Seridó, compreendendo migmatitos, gnaisses migmatizados, granitóides, anfibolitos, quartzitos, metarcóseos, calcários cristalinos e rochas calcossilicáticas, ocorrendo, ainda intrusões de rochas plutonianas e filonianas, principalmente, granitos sintetônicos e pós-tectônicos.

Já a região costeira é composta por rochas areno/argilosas proveniente do sedimento do grupo barreiras e aluviões na faixa litorânea.

### 3.1.3 Solos

A distribuição das classes de solos está representada na Figura 6 e suas respectivas áreas quantificadas na Tabela 2. Observa-se que na região centro sul onde ocorre o embasamento cristalino os solos mais representativos são o Argissolo Vermelho Amarelo, Luvisolos Crômicos e Neossolo Litólico e Regolítico, além da presença na região serrana de Martins na parte plana o Latossolo Vermelho Amarelo.

Conforme EMBRAPA (2013) os Argissolos apresentam horizonte B textural, com argila de atividade baixa ou alta conjugada com saturação por base baixa ou caráter alítico. Nos Argissolos representativos do embasamento cristalino, BRASIL (1971) descreve que essa classe é proveniente de rochas referidas ao Pré-Cambriano tais como gnaiss com plagioclasio e biotita e de migmatito e que são em sua maioria constituídos por argila de atividade baixa.

Os Luvisolos são rasos a pouco profundo, típico do ambiente semiárido, rico em bases e com argila de atividade alta e apresenta como principais limitações à profundidade efetiva, pedregosidade superficial e consistência muito dura quando seca e pegajosa quando úmida (EMBRAPA, 2014).

Já os Neossolos Litólicos apresentam como principal característica a disposição do horizonte A ou hístico em contato direto com a rocha ou sobre um horizonte C a uma profundidade de 50 cm, enquanto os Neossolos Regolíticos apresentam contato lítico a uma profundidade maior que 50 cm e horizonte A sobrejacente a C ou Cr, admitindo horizonte Bi com menos de 10 cm de espessura (EMBRAPA, 2013).

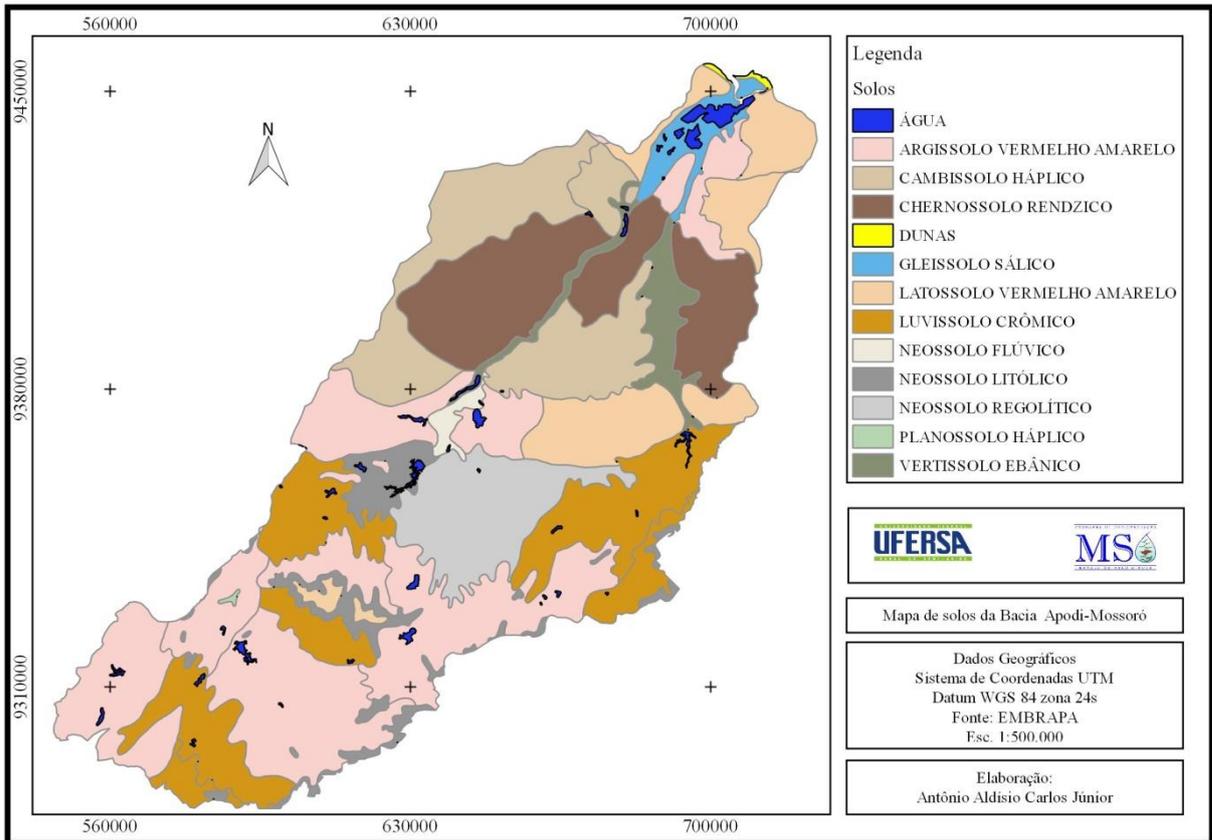


Figura 6. Mapa das classes de solos da bacia hidrográfica Apodi-Mossoró.  
Fonte: Adaptado EMBRAPA.

Os Latossolos, presentes no centro sul da bacia, encontram-se distribuídos na zona serrana de Martins/RN e Portalegre/RN. São solos constituídos com B latossólico, de avançado estágio de intemperização, muito evoluído e variam de fortemente a bem drenados, com concentração relativa de argilo minerais resistentes e/ou oxídidos e hidróxidos de ferro e alumínio (EMBRAPA, 2013).

Na região centro norte, de ocorrência da Bacia Sedimentar, as principais classes de solos são Cambissolos Háplicos e Chernossolos Rêndizicos e em menor quantidade estão os Vertissolos.

Os Cambissolos estão espacializados predominantemente na chapada do apodi e são pouco desenvolvidos com presença de horizonte B incipiente (Bi). Rochas e sedimentos diversificados constituem seu material de origem. Possui grande heterogeneidade de atributos morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos. Apresenta minerais primários facilmente alteráveis na massa do solo (EMBRAPA, 2014).

Os Chernossolos compreendem solos constituídos por material mineral que tem como características diferenciais a alta saturação por bases e alta atividade da argila, com horizonte

diagnóstico A chernozêmico, com horizonte superficial rico em matéria orgânica, com alto conteúdo de cálcio e magnésio e com a presença de argilomierais 2:1 (EMBRAPA, 2013).

O Vertissolo apresenta horizonte vértico, variam de pouco profundos a profundos, são imperfeitamente a mal drenados e tem como principal característica a ocorrência de fendas na época seca associada à atividade da argila do tipo 2:1. Apresenta sequencia de horizontes A-C ou A-Biv-C (EMBRAPA, 2013).

Já no baixo curso da bacia, as classes de solos predominantes são Gleissolo Sálico e Latossolo provenientes da formação barreiras. Conforme EMBRAPA (2014) o Gleissolo é um solo mal a muito mal drenado com horizonte glei, desenvolvido a partir de sedimentos colúvio-aluvionares sob hidromorfismo permanente ou sazonal. Apresenta cor acinzentada e ocorre em relevo plano no ambiente de várzea e de baixada. Sequência de horizontes do tipo: A – Cg – C; A – Btg ou Big – C; H – Cg – C ou A – H – Cg.

Observa-se na Tabela 2 que o total das áreas das classes de solos difere da área total da bacia hidrográfica Apodi-Mossoró (14.276 km<sup>2</sup>). Isso ocorreu em virtude da ausência de mapeamento das classes de solos em algumas áreas que limitam a bacia.

Tabela 2. Áreas das classes de solos da bacia hidrográfica Apodi-Mossoró.

<b>Classe de solo</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>%</b>
Argissolo Vermelho Amarelo	4225,293	30,57
Luvissole Crômico	2217,129	16,03
Cambissolo Háplico	1866,175	13,49
Chernossolo Rêndzico	1758,557	12,71
Latossolo Vermelho Amarelo	1308,316	9,46
Neossolo Regolítico	947,722	6,85
Neossolo Litólico	607,345	4,39
Vertissolo Ebânico	408,582	2,95
Gleissolo Sálico	228,885	1,65
Neossolo Flúvico	88,426	0,64
Planossolo Háplico	6,554	0,05
Água	148,024	1,07
Dunas	18,942	0,14
<b>Total</b>	<b>13832,95</b>	<b>100,00</b>

Fonte: Acervo do autor.

### **3.2 Base cartográfica**

Como base cartográfica de referência utilizou-se o mapa do Levantamento Exploratório e de Reconhecimento de Solos do Estado do Rio Grande do Norte na escala 1:500.000, (Brasil, 1971), que serviu de base para elaboração dos mapas de pedregosidade, profundidade, drenagem e textura do solo.

De maneira complementar foram utilizados os mapas da malha digital dos municípios do Estado do Rio Grande do Norte, ano de 1970 e 2014 na escala 1:500.000, elaborado pela Coordenação de Cartografia do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), bem como o mapa da bacia hidrográfica Apodi-Mossoró elaborado pela Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte (SEMARH).

Além dessas bases foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) do projeto Topodata do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), nas quadriculas 06s39, 05s39, 04s39, 06s375, 05s375 e 04s375, com dados de altimetria espaçados em uma resolução de 30 metros, derivado do processamento das imagens SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) disponibilizado pelo USGS (United States Geological Survey).

### **3.3 Aplicativos computacionais**

Para obtenção, armazenamento, processamento e apresentação dos dados geográficos, bem como para confecção, análise e interação dos planos de informações a fim de obter respostas quanto aos objetivos propostos, à pesquisa utilizou os seguintes softwares:

System for Automated Geoscientific Analyses – SAGA GIS versão 2.1.2 (SAGA GIS DEVELOPMENT TEAM, 2014) para normalização dos planos de informações no formato matricial.

QGIS versão 2.8.7 (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2015) para as etapas de formulação do banco de dados, georreferenciamento, análise espacial dos planos de informações e elaboração dos mapas finais.

GRASS-GIS versão 6.4.3 (Geographic Resources Analysis Support System) para elaboração do mapa de declividade.

### **3.4 Hierarquização metodológica**

O procedimento metodológico do estudo foi desenvolvido a partir da hierarquização em ambiente SIG das seguintes etapas, conforme é esquematicamente demonstrado na Figura 7.

Inicialmente, de posse do mapa de solos do Estado do Rio Grande do Norte, foram elaborados a partir das informações extraídas do Boletim Técnico N° 21 (Brasil, 1971) os planos de informações da pedregosidade, profundidade, drenagem e textura do solo. O plano de informação da declividade foi obtido mediante processamento das imagens do Modelo Digital de Elevação (MDE) do projeto Topodata. Com os mapas elaborados, foram extraídas as restrições dos corpos d'água pelo método booleano.

O procedimento seguinte constituiu em dispor todos os planos de informações em uma mesma escala de referência a partir da normalização dos critérios. Para os critérios quantitativos (declividade, pedregosidade e profundidade do solo) empregou-se a função *fuzzy* sigmoidal, enquanto para os critérios qualitativos (drenagem e textura) adotou-se a técnica participativa com a introdução dos valores de acordo com o conhecimento técnico de pesquisadores da área.

Com os critérios normalizados, a fim de definir o grau de importância de cada um quanto ao impedimento do uso de máquinas e implementos agrícolas, procedeu-se com a aplicação do processo analítico hierárquico (Saaty, 1977) para a ponderação dos respectivos critérios.

Por fim, para obtenção do mapa final que classifica os solos quanto ao impedimento à mecanização agrícola, aplicou-se o método combinação linear ponderada.

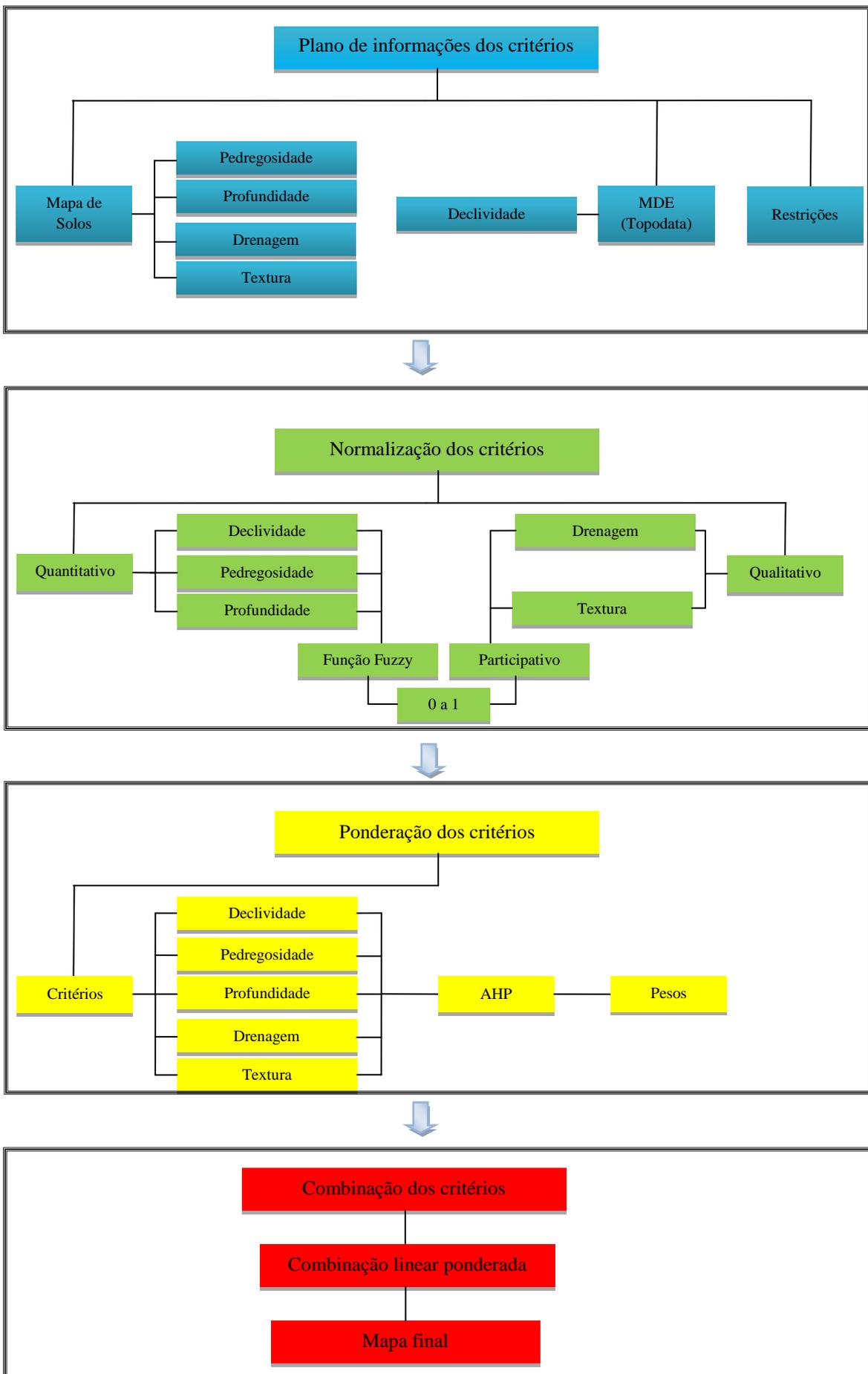


Figura 7. Sequência metodológica adotada na pesquisa.  
 Fonte. Acervo do autor

### 3.5 Elaboração dos mapas temáticos

Inicialmente, no intuito de limitar os solos da bacia hidrográfica Apodi-Mossoró, a base cartográfica foi reprojeta para o datum World Geodetic System - WGS84/Zona 24s, e o mapa de solo da bacia foi obtido a partir do cruzamento dos mapas de solo do Rio Grande do Norte e do limite da bacia hidrográfica Apodi-Mossoró.

Para elaboração dos mapas temáticos dos critérios utilizados que limitam as áreas quanto ao impedimento ao uso de máquinas e implementos agrícolas, foram analisadas e extraídas as informações dos perfis dos solos descritos no Boletim Técnico nº 21 (Brasil, 1971) que compreendem a área da bacia hidrográfica Apodi-Mossoró.

O procedimento constituiu em obter as informações dos perfis representativos de cada unidade de mapeamento de solos, bem como através das informações relevantes constantes na caracterização de cada classe de solo que representam os limites dispostos no mapa de solos do Estado do Rio Grande do Norte.

Desta forma, os mapas temáticos representados pela pedregosidade, profundidade, drenagem e textura foram espacializados no mesmo polígono que delimita os solos do Estado do Rio Grande do Norte, o que resulta que cada classe de solo do mapa do Levantamento Exploratório e de Reconhecimento do Estado limita na mesma escala os respectivos critérios.

A confecção dos mapas foi realizada a partir do software QGIS 2.8.7 onde foi gerado um banco de dados, conforme os subcritérios estabelecidos para classificação do impedimento à mecanização agrícola e, em seguida, procederam-se com os processos de editoração para manipulação e edição do mapa final.

#### 3.5.1 Pressupostos para classificação quanto ao impedimento à mecanização agrícola

No presente estudo avaliaram-se as áreas quanto à possibilidade e ou restrição do uso de máquinas e implementos agrícolas considerando os seguintes aspectos:

1. O uso de máquinas e implementos agrícolas utilizados nas operações de preparo do solo para culturas anuais, bem como para práticas de manejo do solo e água;
2. As operações mecanizadas devem atender a critérios técnicos de manejo de solo e água;
3. Os critérios de drenagem e textura foram introduzidos pela indicação quanto à implementação de boas práticas para o uso do solo com objetivo de mitigar os

impactos negativos no solo das práticas mecanizadas, do que propriamente como restrição ao uso de máquinas e implementos agrícolas;

4. Em razão da escala 1:500.000 utilizada no mapeamento dos critérios deste estudo, os resultados obtidos devem, apenas, ser tidos como uma ferramenta norteadora e complementar para subsidiar estudos em campo.

### 3.5.2 Mapa de pedregosidade do solo

O mapa de pedregosidade do solo foi elaborado a partir do mapa do levantamento exploratório e de reconhecimento de solos do Rio Grande do Norte mediante criação de um banco de dados georreferenciado com as informações analíticas de cascalhos e calhaus constantes no perfil representativo de cada unidade de mapeamento. A quantificação da pedregosidade foi obtida pela soma dos teores de cascalhos e calhaus nos horizontes do solo, sendo utilizado como parâmetro o horizonte que apresentou o maior teor de pedras no perfil até uma profundidade de 40 cm.

Para classificar o impedimento à mecanização agrícola imposto pela pedregosidade, foram utilizados os subcritérios definidos conforme Quadro 1. De maneira a facilitar a compreensão da presença de pedregosidade em cada unidade de mapeamento, empregou-se de forma auxiliar as informações relativas à fase que o solo foi classificado (fase pedregosa e rochosa).

Assim, para as unidades de mapeamento classificadas com fase pedregosa, adotou-se o percentual de pedregosidade classificada como muitas. Já para a unidade de mapeamento descrita como fase pedregosa e rochosa aplicou o percentual equivalente a bastantes.

Quadro 1. Subcritérios de pedregosidade quanto ao impedimento à mecanização agrícola.

<b>Subcritérios de pedregosidade</b>	<b>%</b>	<b>Impedimento à mecanização</b>
Ausente/Muito poucas	0 a 10	Nulo
Poucas	10 a 20	Ligeiro
Moderada	20 a 35	Moderado
Muitas	35 a 50	Forte
Bastantes	> 50	Muito forte

Fonte: Adaptado de BRASIL (1971), Lepsch (1991), Pacheco (2001) e Francisco (2010).

Na classificação da pedregosidade, em razão do mapa de solos não delimitar os afloramentos rochosos, a rochosidade não foi incluída de forma direta neste trabalho, sendo esta condição parte da interpretação do Boletim Técnico n° 21 para inferência da fase em que

se encontram os solos e, portanto, a rochividade foi utilizada indiretamente para mensuração da pedregosidade.

De posse do mapa de pedregosidade em formato vetorial, efetuaram-se os cálculos das respectivas classes de impedimento à mecanização por meio da calculadora de campo do software QGIS 2.8.7. Por fim, com intuito de integrar o mapa para posteriormente ser normalizado e aplicado os métodos da avaliação multicriterial de ponderação e combinação linear ponderada, o mapa foi convertido para o formato matricial em uma resolução espacial de 30 metros com base na coluna do banco de dados que continha a percentagem de pedras.

### 3.5.3 Mapa de profundidade do solo

O mapa de profundidade do solo foi elaborado a partir do mapa do levantamento exploratório e de reconhecimento de solos do Rio Grande do Norte, mediante criação de um banco de dados georreferenciado com as informações morfológicas do perfil representativo de cada unidade de mapeamento.

Ao se considerar que as máquinas e implementos devem realizar operações em atendimento as técnicas de manejo de solo e água, para classificar o impedimento à mecanização agrícola imposto pela profundidade do solo foram utilizados os subcritérios definidos conforme Quadro 2.

Nesse sentido, mesmo considerando que muitas culturas exigem pouca profundidade do solo para o desenvolvimento e crescimento radicular e, assim, demandarem operações mecanizadas a baixas profundidades, entendeu-se que a utilização de máquinas e implementos agrícolas nessas condições, apesar de não restringir a produção agrícola, pode contribuir com a indução de impactos no solo tais como a erosão.

Além das informações do perfil do solo representativo da unidade de mapeamento, foram utilizadas as informações de profundidades de outros perfis que foram classificados em níveis de menor representatividade, bem como a descrição quanto às condições de profundidade de ocorrência das classes de solos.

De posse do mapa de profundidade em formato vetorial, efetuaram-se os cálculos das respectivas classes de impedimento à mecanização por meio da calculadora de campo do software QGIS 2.8.7. Por fim, com intuito de integrar o mapa para posteriormente ser normalizado e aplicado os métodos da avaliação multicriterial de ponderação e combinação linear ponderada, o mapa foi convertido para o formato matricial em uma resolução espacial de 30 metros com base na coluna do banco de dados que continha a profundidade de cada perfil analisado.

Quadro 2. Subcritérios de profundidade do solo quanto ao impedimento à mecanização agrícola.

<b>Subcritérios de profundidade</b>	<b>Profundidade (cm)</b>	<b>Impedimento à mecanização</b>
Muito profundo	>80	Nulo
Profundo	60 a 80	Ligeiro
Moderadamente profundo	40 a 60	Moderado
Raso	20 a 40	Forte
Muito raso	< 20	Muito forte

Fonte: Adaptado de Francisco (2010).

### 3.5.4 Mapa de drenagem do solo

O mapa de drenagem do solo foi elaborado a partir do mapa do levantamento exploratório e de reconhecimento de solos do Rio Grande do Norte mediante criação de um banco de dados georreferenciado em ambiente SIG com as informações das condições de drenagem do perfil representativo de cada unidade de mapeamento. Os dados para delimitar a drenagem do solo não consideraram a época do ano e, portanto, não considera as variações de precipitação ao longo do ano.

As denominações quanto à classificação da drenagem estabelecida no boletim técnico do levantamento exploratório e de reconhecimento dos solos do Rio Grande do Norte foram agrupadas de maneira a classificar o impedimento à mecanização agrícola em quatro subcritérios, conforme Quadro 3.

Quadro 3. Subcritérios de drenagem do solo quanto ao impedimento à mecanização agrícola.

<b>Subcritérios de drenagem</b>	<b>Impedimento à Mecanização</b>
Fortemente/Acentuadamente/Bem drenado	Nulo
Moderadamente drenado	Moderado
Imperfeitamente drenado	Forte
Mal drenado	Muito forte

Fonte: Adaptado de Francisco (2010).

Considerando que as operações agrícolas para o preparo do solo devem ser realizadas em conformidade com as técnicas de manejo de solo e água, no presente trabalho entende-se que estas operações devem ser praticadas nas condições ótimas de umidade, correspondente ao estado friável de cada solo.

Nesse sentido, a formulação de um mapa de drenagem do solo quanto ao impedimento do uso de máquinas e implementos agrícolas tem por finalidade fornecer informações que possam subsidiar os agricultores quando ao uso adequado do solo, levando em consideração

os impactos que podem ser causados nas propriedades e características do solo devido à introdução de práticas mecanizadas em condições de drenagem deficiente.

De posse do mapa de drenagem em formato vetorial, efetuaram-se os cálculos das respectivas classes de impedimento à mecanização por meio da calculadora de campo do software QGIS 2.8.7. Nesse critério, o processo de conversão do mapa do formato vetorial para o matricial se deu na etapa de normalização dos critérios.

### 3.5.5 Mapa de textura do solo

O mapa de textura do solo foi elaborado a partir do mapa do levantamento exploratório e de reconhecimento de solos do Rio Grande do Norte, mediante criação de um banco de dados georreferenciado em ambiente SIG com as informações analíticas de granulometria do perfil representativo de cada unidade de mapeamento.

Para classificação quanto ao impedimento agrícola provocada pela textura, adotou-se como parâmetro o teor de areia, silte e argila em uma camada de 30 cm, tendo em vista que esta profundidade é que ocorrem as operações mecanizadas de preparo do solo da maior parte das culturas agrícolas.

Assim, foram adaptadas neste estudo as informações constantes em Pacheco et al. (2001) e Francisco (2010) para estabelecer os subcritérios de textura do solo que imprimem graus de restrição ao uso de máquinas e implementos agrícolas, conforme Quadro 4.

Quadro 4. Subcritérios de profundidade do solo quanto ao impedimento à mecanização agrícola.

<b>Subcritério textura</b>	<b>Areia(%)</b>	<b>Argila</b>	<b>Impedimento à mecanização</b>
Arenosa	> 70	< 15	Nulo
Média	> 15	< 35	Ligeiro
Siltosa	< 15	< 35	Forte
Argilosa		35 a 60	Moderado
Muito Argilosa		> 60	Forte

Fonte: Adaptado de Pacheco et al. (2001) e Francisco (2010).

Apesar dos solos com teores elevados de argilas serem em termos agrícolas mais indicados para o cultivo, no presente estudo, a classificação imposta quanto ao uso de máquinas e implementos nessas condições está associada, principalmente, as mudanças de consistências que os solos estão sujeitos devido à influência da classe textural, o que demanda

a adoção de boas práticas agrícolas para mitigar os impactos no solo, provocados pela mecanização.

De posse do mapa de textura em formato vetorial, efetuaram-se os cálculos das respectivas classes de impedimento à mecanização por meio da calculadora de campo do software QGIS 2.8.7. Assim como o mapa de drenagem, o processo de conversão do mapa do formato vetorial para matricial se deu na etapa de normalização dos critérios.

### 3.5.6 Mapa de declividade

Para elaboração do mapa de declividade foram obtidas junto ao programa Topodata do INPE as imagens de satélites contendo os dados de altimetria das quadriculas 06s39, 05s39, 04s39, 06s375, 05s375 e 04s375. Inicialmente com apoio do software QGIS 2.8.7 as imagens foram unidas na forma de um mosaico. O passo seguinte consistiu em reprojetar o mosaico para o sistema de coordenadas WGS 84/Zona 24s com o objetivo de permitir o cruzamento com o mapa da bacia hidrográfica e o mapa de solos do Rio Grande do Norte.

A partir do módulo raster do QGIS 2.8.7 para delimitar as imagens de altimetria nos limites da área da bacia hidrográfica Apodi-Mossoró foi realizado um corte utilizando como camada máscara o shapefile dos solos que limitam a bacia hidrográfica.

Obtido o mapa de altimetria da bacia, foi determinado a declividade em porcentagem através do comando `r.slope.aspect` do software GRASS-GIS 6.4.3 incorporado ao QGIS 2.8.7. Para o cálculo da declividade esse comando utiliza as fórmulas propostas por Horn (1981), na qual o algoritmo utiliza uma matriz 3x3 ao redor de cada pixel para extração da declividade.

Por fim, com o objetivo de obter a classificação da declividade quanto ao impedimento à mecanização agrícola, realizou-se a reclassificação da imagem raster, conforme dados do Quadro 5.

Quadro 5. Subcritérios de declividade quanto ao impedimento à mecanização.

<b>Subcritérios de declividade</b>	<b>Impedimento à mecanização</b>
0 a 3 (%)	Nulo
3 a 6 (%)	Ligeiro
6 a 9 (%)	Moderado
9 a 12 (%)	Forte
> 12 (%)	Muito forte

Fonte: Acervo dos autores.

Para isso, utilizando o comando `r.recode` do GRASS-GIS 6.4.3 incorporado ao QGIS 2.8.7 foram introduzidas as informações contendo as regras de fatiamento em arquivo txt, conforme a seguinte estruturação:

0:3.000000:1 (Nulo)  
3.000001:6.000000:2 (Ligeiro)  
6.000001:9.000000:3 (Moderado)  
9.000001:12.000000:4 (Forte)  
12.000001:\*:5 (Muito Forte)

Em face do mapa de declividade ser obtido diretamente em formato matricial, diferentemente dos demais critérios, para realização dos cálculos relativos à quantificação de cada classe de impedimento à mecanização foi feito a conversão do mapa para o formato vetorial para, em seguida, através da calculadora de campo do QGIS 2.8.7, obter os resultados.

### 3.6 Normalização dos critérios

Para tornar factível a combinação e integração dos mapas produzidos para posteriormente aplicar os métodos da avaliação multicritério, é necessário dispor as respectivas informações em uma mesma escala de valores. Diante dos critérios do presente estudo, observa-se que existem dois tipos de dados: quantitativos (declividade, pedregosidade e profundidade) e qualitativos (textura e drenagem) que estão em unidades distintas.

Devido às distintas unidades utilizadas para mensurar cada critério, procedeu-se com a normalização dos dados dos mapas em uma escala de valores de 0 a 1 mediante aplicação de modelos matemáticos e técnica participativa, respectivamente, para os dados quantitativos e qualitativos, sendo que à medida que o valor se aproxima de 0, menor o impedimento imposto pelo critério, ao passo que a medida que o valor se aproxima de 1, maior restrição o critério impõe à mecanização agrícola. Com isso foi possível a análise espacial pixel a pixel dos respectivos mapas de critérios.

#### 3.6.1 Mapa de pedregosidade do solo

O mapa de pedregosidade foi normalizado com o ajuste dos dados por meio da função de pertinência *fuzzy* sigmoidal crescente com pontos de controle  $a = 10.1\%$  e  $b = 50.1\%$ , conforme Figura 8.

Deste modo, o comportamento da pedregosidade quanto ao impedimento à mecanização agrícola significa que, quanto maior a quantidade de pedras, maior o impedimento imposto

por esse critério. Assim, de 0 até 10% não ocorre influência da pedregosidade na introdução de máquinas e implementos agrícolas e, portanto, atribui-se um valor 0 que corresponde a classe de impedimento nulo. Em áreas superiores a 50% de pedras o valor normalizado atinge o máximo, indicando que nestas condições a área tem impedimento muito forte às operações mecanizadas com o uso de máquinas e implementos agrícolas.

A normalização da pedregosidade foi realizada com o uso do software SAGA GIS versão 2.1.2 através do algoritmo *fuzzify* incorporado ao QGIS 2.8.7. Os resultados desse processo foram apresentados em mapa no formato matricial em que cada pixel corresponde a um valor em uma escala de 0 a 1.

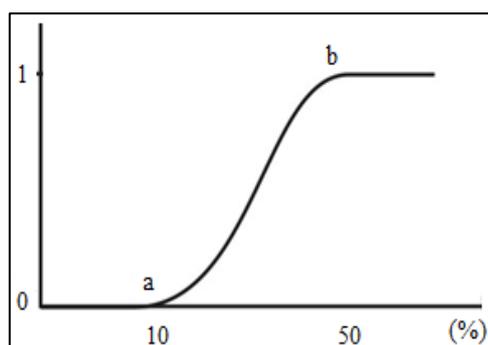


Figura 8. Sigmoide crescente para a pedregosidade.

Fonte: Acervo do autor.

### 3.6.2 Mapa de declividade

De modo análogo ao critério pedregosidade, o comportamento da declividade quanto ao impedimento à mecanização agrícola proposta neste estudo ajusta-se ao modelo de função de pertinência *fuzzy* sigmoide crescente, indicando que até um determinado valor de declividade o uso de máquinas e implementos agrícolas não apresenta restrição, enquanto sua utilização vai sendo restritiva à medida que a área é formada por maiores declives até o ponto de atingir o valor máximo que, a partir deste, ocorre à classificação muito forte para operações mecanizadas.

Admitindo-se essa condição, adotaram-se como pontos de controle para padronização do mapa de declividade os valores de  $a = 3.1\%$  e  $b = 12.1\%$ , significando respectivamente os valores de 0 e 1 quanto ao impedimento à mecanização agrícola, conforme Figura 9.

A normalização do mapa de declividade foi realizada com o uso do software SAGA GIS versão 2.1.2 através do algoritmo *fuzzify* incorporado ao QGIS 2.8.7. Os resultados desse processo foram apresentados em mapa no formato matricial em que cada pixel corresponde a um valor em uma escala de 0 a 1.

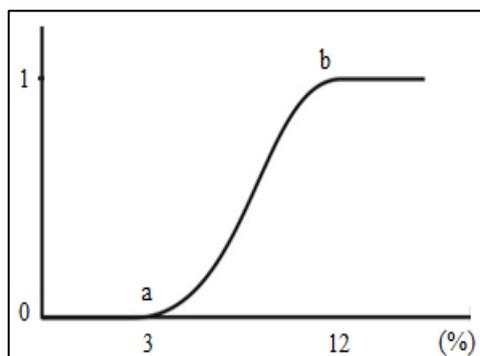


Figura 9. Sigmoide crescente para a declividade.

Fonte: Acervo do autor.

### 3.6.3 Mapa de profundidade do solo

Distinto do comportamento dos critérios de pedregosidade e declividade, a profundidade do solo foi ajustada por meio da função de pertinência *fuzzy* sigmoide decrescente, conforme Figura 10. Para tanto, adotaram-se como pontos de controle os valores de  $c=20.1$  e  $d=80.1$ , significando que acima de 80 cm de profundidade o impedimento imposto por esse critério às operações mecanizadas é nulo e, portanto, com valor 0, enquanto que a medida que os solos apresentam menores profundidades, maiores serão as restrições as práticas mecanizadas pressupostas neste estudo, com valor 1 representando restrição muito forte em solos com profundidades menores que 20 cm.

A normalização do mapa de profundidade do solo foi realizada com o uso do software SAGA GIS versão 2.1.2 através do algoritmo *fuzzify* incorporado ao QGIS 2.8.7. Os resultados desse processo foram apresentados em mapa no formato matricial em que cada pixel corresponde a um valor em uma escala de 0 a 1.

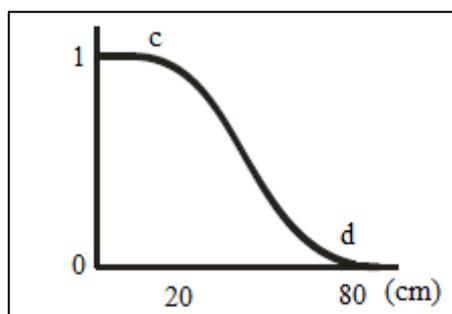


Figura 10. Sigmoide decrescente para a profundidade.

Fonte: Acervo do autor.

### 3.6.4 Mapa de drenagem do solo

O procedimento utilizado para confecção do mapa normalizado da drenagem do solo consistiu na aplicação da técnica participativa, na qual pesquisadores do tema objeto deste

estudo atribuíram valores na escala de 0 a 1 as classes de impedimento à mecanização agrícola relativa à drenagem.

Esses valores foram inseridos no banco de dados do mapa de drenagem e, posteriormente, para aplicação da avaliação multicriterial, o mapa em formato vetorial foi convertido para o formato matricial com resolução de 30 metros, em que cada pixel corresponde a um valor de importância atribuído às classes de impedimento à mecanização imposta pela drenagem.

### 3.6.5 Mapa de textura do solo

A textura por ser determinada pela percentagem de areia, silte e argila dos solos constitui uma informação quantitativa. No entanto, a combinação dessas granulometrias para que se apresentam em um mesmo plano de referência mediante uso de modelo matemático, semelhante aos critérios de declividade, pedregosidade e profundidade, não é possível em ambiente SIG.

Diante deste fato, o procedimento utilizado para confecção do mapa normalizado da textura do solo consistiu na aplicação da técnica participativa, na qual pesquisadores do tema objeto deste estudo atribuíram valores na escala de 0 a 1 as classes de impedimento à mecanização agrícola imposta pela textura.

Obtidos os valores, estes foram inseridos no banco de dados do mapa de textura e, posteriormente, para aplicação da avaliação multicriterial, o mapa em formato vetorial foi convertido para o formato matricial com resolução de 30 metros, em que cada pixel corresponde a um valor de importância atribuído às classes de impedimento à mecanização imposta pela textura.

## 3.7 Ponderação dos critérios

Após a normalização dos critérios em uma única unidade, para aplicação da técnica de combinação linear ponderada, é necessário atribuir pesos relativos de importância a cada critério. Conforme já discutido no referencial teórico, os critérios atribuídos para mensurar o grau de impedimento ao uso de máquinas e implementos agrícolas têm influências distintas, com alguns critérios sendo mais importantes que outros.

Para atribuição do grau de importância relativa de um critério em relação a outro empregou-se a proposta metodológica desenvolvida por Saaty (1977), denominada AHP

(*Analytical Hierarchy Process*). Nesse processo os pesos foram obtidos a partir da construção de uma matriz de comparação pareada.

Ressalta-se que o emprego desta técnica exige uma argumentação teórica científica que fundamenta a importância de cada critério quanto ao objetivo do trabalho. Nesse sentido são comumente utilizados para alimentar a matriz de comparação pareada valores obtidos em pesquisas científicas e, na ausência desses dados emprega-se a técnica participativa baseada no conhecimento empírico e de literatura do pesquisador.

Relativo ao impedimento à mecanização agrícola, os estudos até então desenvolvidos não comparam especificamente os critérios utilizados nesta pesquisa para quantificação dos pesos de importância. No entanto, alguns estudos ao delimitar o impedimento à mecanização através de alguns critérios agrícolas trazem informações qualitativas que subsidiam na atribuição de pesos.

Assim, para o julgamento dos valores na matriz de comparação pareada será adotada a técnica participativa tendo como fundamento as informações constantes nos trabalhos de Pacheco et al. (2001), Pereira et al. (2004), Francisco et al. (2010), Delarmelinda et al. (2011), bem como as informações das classificações técnicas de Ramalho Filho e Beek (1995) e Lepsch et al. (1991).

A construção da matriz de comparação pareada foi hierarquizada conforme Quadro 6.

Quadro 6. Hierarquização da matriz de comparação pareada.

	Declividade	Pedregosidade	Profundidade	Drenagem	Textura
Declividade	1				
Pedregosidade		1			
Profundidade			1		
Drenagem				1	
Textura					1

Para o julgamento dos valores que definem a comparação entre os critérios, adaptou-se as regras contidas na metodologia de Saaty (1977), dispostos na Tabela 3.

Tabela 3. Valores da intensidade de importância dos critérios.

Intensidade de Importância	Definição	Explicação
1	Importância Igual	Os dois fatores contribuem igualmente para o objeto
3	Importância moderada	Um fator é ligeiramente mais importante que o outro
5	Importância essencial	Um fator é claramente mais importante que o outro
7	Importância demonstrada	Um fator é fortemente favorecido e sua maior relevância foi demonstrada na prática
9	Importância extrema	A evidência que diferencia os fatores é da maior ordem possível
2-4-6-8	Valores intermediários entre julgamentos	Indecisão entre os fatores

Fonte: Adaptado de Saaty (1977).

A partir dos dados inseridos pelo julgador foi obtida a matriz abaixo:

$$\begin{matrix}
 & \begin{matrix} C1 & C2 & \dots & Cn \end{matrix} \\
 \begin{matrix} C1 \\ C2 \\ \vdots \\ Cm \end{matrix} & \begin{bmatrix} w1/w1 & w1/w2 & \dots & w1/wn \\ w2/w1 & w2/w2 & \dots & w2/wn \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ wm/w1 & wm/w2 & \dots & wm/wn \end{bmatrix}
 \end{matrix}$$

Em que:

Wm = Peso referente à linha

Wn = Peso referente à coluna

De acordo com a metodologia de Saaty (1977) para obter a matriz de comparação pareada os valores  $a_{ij}$  são calculados pela divisão de  $W_m/W_n$  pela somatória da coluna correspondente conforme Equação 2.

$$a_{11} = \frac{w1/w1}{\sum wm/w1}; \quad a_{12} = \frac{w2/w1}{\sum wm/w2} \quad \dots \quad a_{1n} = \frac{w1/wn}{\sum wm/wn} \quad (2)$$

Por fim, para calcular o peso processado da comparação pareada de cada critério frente ao objetivo do trabalho, divide-se a soma da linha encontrada na matriz no processo anterior pela sua ordem (Equação 3).

$$\sum a_{1n}/n = P1; \quad \sum a_{2n}/n = P2 \quad \dots \quad \sum a_{mn}/n \quad (3)$$

Após a obtenção dos pesos relativos a cada critério, para aferir os julgamentos será adotado o índice de consistência constante na metodologia (SAATY, 1977) calculado da seguinte forma (Equação 4):

$$IC = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)} \quad (4)$$

Em que:

IC = Índice de consistência

( $\lambda_{max}$ ) = É o valor máximo do autovalor

n = número de critérios analisados

O autovalor é dado pela Equação 5:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[Aw]}{w_i} \quad (5)$$

Em que:

Aw = é a multiplicada da matriz de julgamento pelos pesos relativos normalizados.

Wi = pesos relativos normalizados.

Assim, para obter o  $\lambda_{max}$  será realizado o seguinte procedimento: a) multiplicação dos valores de cada linha da matriz de comparação pareada ( $a_{11}$ ,  $a_{12}$ ...  $a_{1n}$ ) pelos pesos normalizados ( $w$ ); e b) divisão do valor obtido pelo peso normalizado correspondente ( $w$ ).

Por fim, para verificar o grau de consistência dos resultados é calculada a razão de consistência (Equação 6).

$$RC = IC/IR \quad (6)$$

Em que:

RC = Razão de consistência

IR = Índice randômico

O índice randômico foi definido por Saaty (1980) baseado em dados que avaliaram 500 matrizes conforme dados do Quadro 7.

Quadro 7. Índice randômico.

N	1	2	3	4	5	6	7	8	.....
IR	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	....

Fonte: Saaty (1980)

De acordo com Saaty (1977) a razão de consistência deve apresentar valor menor que 0,1 (10%).

Todos esses procedimentos foram executados no Software QGIS 2.8.7 através do plugin AHP, constante no banco de complementos do programa, a partir dos mapas dos critérios normalizados em formato matricial.

### 3.8 Combinação linear ponderada

Depois de normalizar e obter os pesos finais dos critérios procedeu-se com a aplicação do método de combinação linear ponderada. Este método consistiu em multiplicar o peso relativo de cada critério pelos valores dos subcritérios resultantes da normalizados dos dados, conforme Equação 7.

$$IM = \sum_i^n w_i . x_i \quad (7)$$

Em que:

IM = Impedimento à mecanização.

Wi = Peso dos critérios declividade, pedregosidade, profundidade do solo, drenagem e textura.

Xi = Valores dos subcritérios normalizados.

A execução desse cálculo foi realizada na calculadora RASTER do software QGIS 2.8.7 em que cada mapa dos critérios normalizados foi multiplicado pelos respectivos pesos. Como resultado final foi obtido uma imagem monocromática que posteriormente foi reclassificada conforme os critérios da Tabela 4.

Tabela 4. Intervalo de classificação do impedimento à mecanização.

Intervalo de Classificação	Impedimento à mecanização
0 a 0,2	Nulo
0,2 a 0,4	Ligeiro
0,4 a 0,6	Moderado
0,6 a 0,8	Forte
0,8 a 1	Muito Forte

Fonte: Acervo do autor.

A reclassificação foi realizada com o subsídio do programa GRASS-GIS 6.4.3 através do algoritmo r.recode, no qual foi inserido em formato txt as regras para reclassificação dos valores de cada pixel conforme dados a seguir.

0:0.2000000:1 (Nulo)  
0.2000001:0.4000000:2 (Ligeiro)  
0.4000001:0.6000000:3 (Moderado)  
0.6000001:0.8000000:4 (Forte)  
0.8000001:1:5 (Muito Forte)

Por fim, o mapa final foi convertido do formato matricial para o vetorial com objetivo de mensurar as áreas quanto às classes de impedimento à mecanização agrícola.

Em virtude do processamento das imagens dos produtos finais serem provenientes de operações que inicialmente realizaram o recorte de mapas em formato matricial tendo como máscara mapas vetoriais, em ambiente SIG esse procedimento gera uma diferença de área que neste estudo foi analisada averiguando a variação percentual das áreas dos mapas finais com a área real do mapa de solos da bacia hidrográfica.

Para validação das informações contidas no mapa final procedeu-se com obtenção de informações em campo por meio de imagens que demonstraram as condições do ambiente que restringiam em maior ou menor grau as áreas para o uso mecanizado.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Mapas temáticos

#### 4.1.1 Pedregosidade do solo

Quando avaliado a influência da pedregosidade na restrição a introdução de máquinas e implementos agrícolas, observa-se, conforme mapa da Figura 11 e dados constantes na Tabela 5, que os solos da bacia hidrográfica Apodi/Mossoró são classificados em maior percentual na classe nulo, correspondente a uma área de 5496,109 Km<sup>2</sup> (39,79%).

Essas áreas estão situadas predominantemente no centro ao norte da bacia hidrográfica Apodi/Mossoró sob a influência da bacia sedimentar e em menor proporção no extremo sul e na região serrana de Martins.

Confrontando essa classificação com o mapa de solos da Figura 6, constatam-se que a classe de impedimento nulo está inserida em áreas onde predominam os solos Cambissolo Háplico, os Latossolos situados no extremo norte, e na serra de Martins, e nos Argissolos vermelho amarelos na parte central da bacia e em faixa no extremo sul.

Marques et al. (2007) ao investigar a gênese e morfologia de diversos Cambissolos no arquipélago de Fernando de Noronha verificou a intensa presença de pedregosidade superficial, indicando diferentemente deste estudo, que os solos possuem restrição a inserção de implementos agrícolas. Isso ocorre devido à heterogeneidade dos pedoambientes de ocorrência dessas classes de solos, pois podem ser encontrados nas mais diversas variações de materiais de origem, relevo e clima, fazendo com que apresentem características distintas.

Já a classe de impedimento moderado foi identificada nos Chernossolo Rendzico e Argissolo Vermelho Amarelo, representando uma área de 2952,135 Km<sup>2</sup>, equivalente a 21,37% da área da bacia hidrográfica. Por fim, as classes forte e muito forte de impedimento à mecanização agrícola quanto à pedregosidade correspondem respectivamente a 26,47% e 11,30%.

A classe forte tem ocorrência em quase sua totalidade nos Luvisolo Crômicos e Argissolo Vermelho Amarelo, enquanto a classe muito forte é representada nas unidades de mapeamento constituídas por Neossolo Litólicos e Regolítico. Corroborando com parte desses resultados Francisco et al. (2012) ao classificar as terras da Paraíba quanto à mecanização identificou que a restrição imposta pela pedregosidade era predominantemente encontrada nos Luvisolos Cômicos e Neossolos Litólicos.

Tal resultado deve-se ao fato que esses dois tipos de solos são típicos da região semiárida, pouco desenvolvidos, em que o clima com baixa intensidade de intemperismo associado ao material de origem resistente, bem como ao relevo ondulado, que condicionam a formação de solos com superfícies pedregosas.

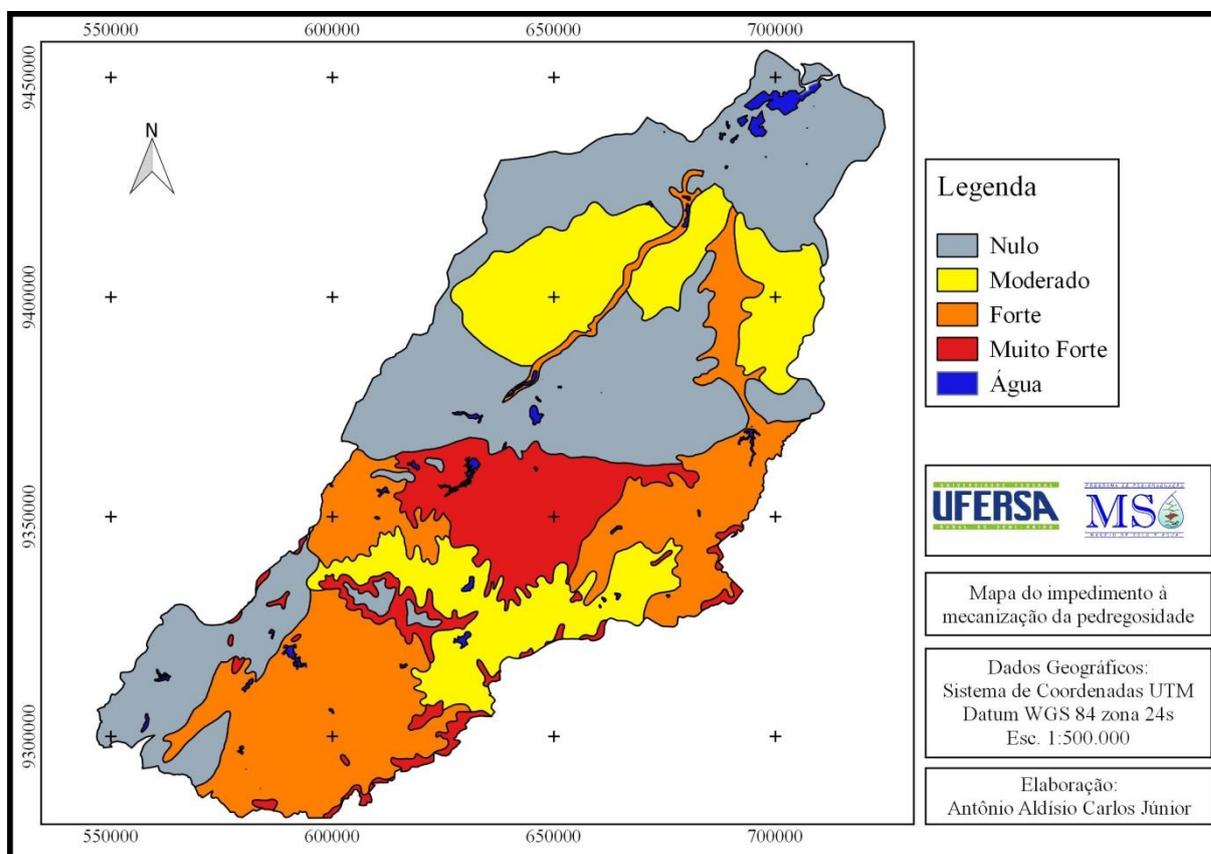


Figura 11. Mapa do impedimento à mecanização agrícola da bacia hidrográfica Apodi/Mossoró quanto à pedregosidade.

Fonte: Acervo do autor.

Tabela 5. Classe de impedimento à mecanização quanto à pedregosidade.

Classe de Impedimento	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)
Nulo	5496,109	39,79
Moderado	2952,135	21,37
Forte	3656,232	26,47
Muito Forte	1561,511	11,30
Água	148,024	1,07
<b>Total</b>	<b>13814,011</b>	<b>100,00</b>

Fonte: Acervo do autor.

#### 4.1.2 Declividade

O resultado obtido quanto avaliado a influência individual da declividade no impedimento à mecanização agrícola aponta que a área de estudo é predominantemente apta à introdução de máquinas e implementos agrícolas, representadas pelas classes de impedimento

nulo e ligeiro, que correspondem respectivamente a 43,62% e 31,32% da área da bacia (Figura 12 e Tabela 6).

Conforme Maia et al. (2012) a morfologia da bacia atesta os pronunciados efeitos da erosão a que foi submetida, onde as repetidas remoções do manto de intemperismo, sobretudo no cenozóico, originaram a extensa superfície aplainada, adequadas para o uso mecanizado.

No outro extremo, as classes forte e muito forte somam 13,23% da área e se encontram espacializadas, principalmente, no embasamento cristalino, situadas na região serrana de Martins e Portalegre e uma extensa área no alto curso da bacia. As demais áreas dessas classes se distribuem em menor número em regiões pontuais, onde ocorre afloramento rochoso.

A ocorrência de regiões declivosas concentradas no centro sul da bacia deve-se as características geológicas, com predomínio de rochas resistentes ao intemperismo, diferente do que ocorre na parte centro norte da bacia, com presença da bacia sedimentar representada por rochas calcárias.

As áreas com impedimento forte e muito forte, parte foram mapeadas em locais com declividade acima de 45° e ou topos de morros que são ambientes classificados pela legislação como de áreas de preservação permanente - APP e que, portanto, com exceção de casos específicos, não admitem o uso para fins agrícolas.

Corroborando com essa informação, Bezerra et al. (2008) ao estudarem as áreas de APP do município de Martins, o qual nesta pesquisa apresentou parte de suas áreas com impedimento muito forte à mecanização, concluiu que os topos de morros ocupam uma porção significativa, representando cerca de 25,52% da superfície do município, sendo a maior área de APP estudada.

Os tipos de solos onde foram identificados os impedimentos mais restritivos as operações com máquinas e implementos agrícolas foram: Neossolo Litólicos, Luvisolos Crômicos e parte dos Argissolos Vermelhos Amarelos (Figuras 6 e 12). Semelhante a esses resultados, Francisco et al (2012) identificou no estado da Paraíba as áreas mais declivosas estão relacionadas a solos Neossolos Litólicos e Argissolos.

Desta forma, a utilização de máquinas e implementos agrícola nas áreas forte e muito forte deve, para fins de mitigar os impactos ambientais decorrentes dessas atividades, ser precedida de práticas tais como plantio em curvas de níveis, terraceamento e preparo do solo no sentido perpendicular ao declive.

Além de propiciar maior vulnerabilidade à erosão dos solos, a mecanização em áreas declivosas afeta algumas operações, minimizado sua eficiência. Nesse sentido, Pereira et al. (2012) ao estudarem o preparo do solo com uso de subsolador, encontraram que a profundidade de alcance do implemento diminuiu com o aumento da declividade das áreas,

enquanto Tavares et al. (2016) quando avaliaram o rendimento operacional de máquinas na colheita do café, concluíram que a partir de 15,1% de declividade, ocorreu redução de 42% na eficiência da capacidade de campo quando comparada a áreas planas.

Conforme procedimento metodológico, ao definir os limites das classes de impedimento a partir das imagens SRTM, observou-se que algumas áreas pontuais, sobretudo no cume de regiões montanhosas, com afloramento de rochas, o impedimento à mecanização foi classificado de nulo a moderado, o que não corresponde à realidade, mas que tal situação foi verificada em razão dessas áreas possuírem pequenas faixas planas no topo em unidade maior que a resolução de 30 metros das imagens.

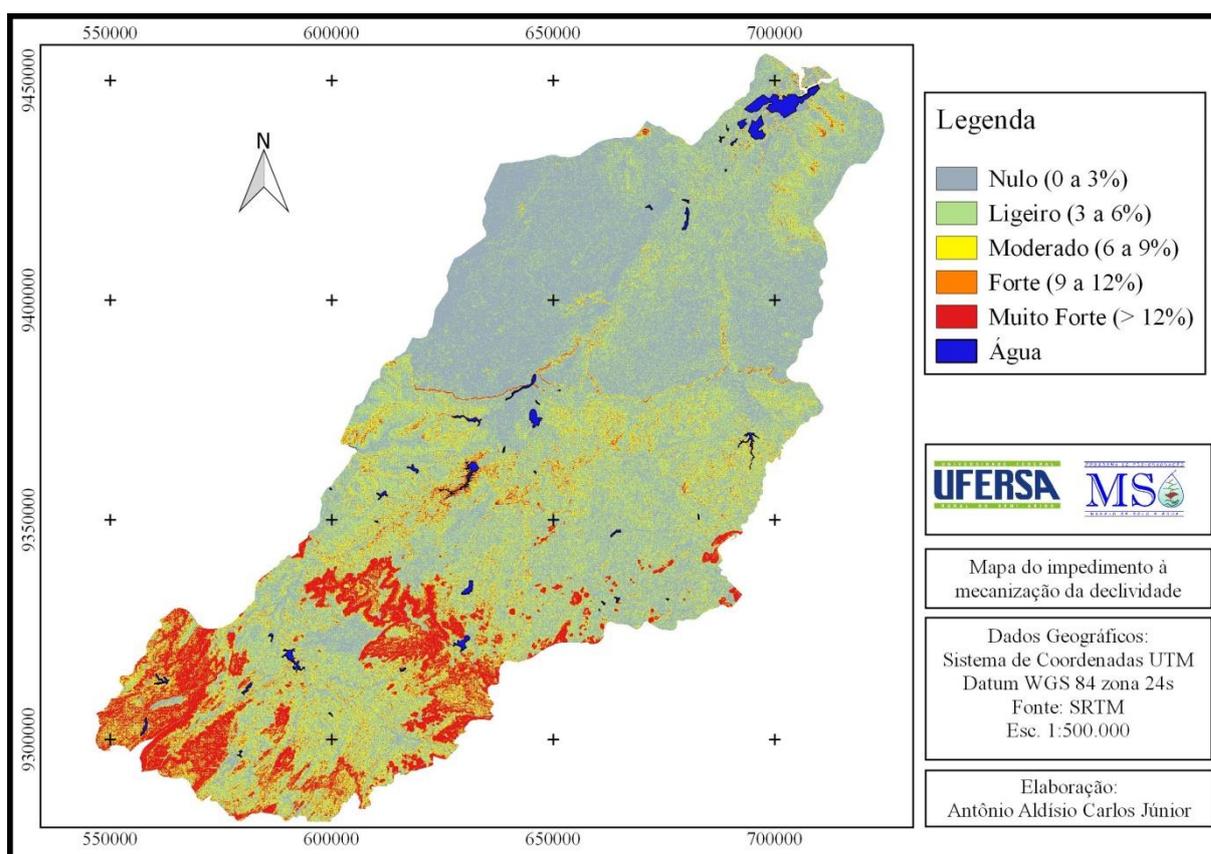


Figura 12. Mapa do impedimento à mecanização agrícola da bacia hidrográfica Apodi/Mossoró quanto à declividade.

Fonte: Acervo do autor.

Tabela 6. Classe de impedimento à mecanização quanto à declividade.

Classe de Impedimento	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)
Nulo	6025,311	43,46
Ligeiro	4326,509	31,21
Moderado	1529,966	11,03
Forte	579,017	4,18
Muito Forte	1254,708	9,05
Água	148,024	1,07
<b>Total</b>	<b>13863,535</b>	<b>100,00</b>

Fonte: Acervo do autor.

#### 4.1.3 Profundidade do solo

De acordo com os critérios estabelecidos para classificar o impedimento à mecanização agrícola, em virtude da profundidade do solo, observa-se que a bacia hidrográfica Apodi/Mossoró tem suas áreas especializadas com predomínio das classes nulo e forte, que correspondem a 30,99% e 45,28%, respectivamente, sendo de menor ocorrência a classe de impedimento moderado (0,05%) seguido de ligeiro (6,10%) e muito forte (16,51%) (Figura 13 e Tabela 7).

A classe de impedimento nulo está inserida em duas unidades de mapeamento representadas pelos Latossolos e Argissolos, enquanto a classe forte e muito forte são constituídas pelos demais tipos de solos que predominam na bacia, com exceção do Planossolo com impedimento moderado, e alguns Cambissolos com impedimento ligeiro. (Figuras 6 e 13).

Com esses resultados, os solos da bacia são bastante susceptíveis as operações com o emprego de máquinas e implementos agrícolas para o preparo primário e secundário do solo, pois estas práticas ao revolver camadas em subsuperfície destroem completamente a estrutura do solo, podendo ocasionar processos erosivos que resultam na degradação dos solos e perdas de áreas para o cultivo. Assim, todas as atividades de mecanização do solo na bacia devem adotar técnicas que minimizem o seu revolvimento, com adoção de técnicas conservacionistas como o sistema de plantio direto.

Sessi (2013) ao analisar a influência da profundidade do solo no impedimento à mecanização agrícola classificou semelhante a este estudo, que os Gleissolos e Neossolos por serem rasos contribuem para a restrição ao uso de práticas mecanizáveis e, de maneira distinta do encontrado neste estudo, classificou o Cambissolo como muito profundo, e, portanto, apto à mecanização agrícola.

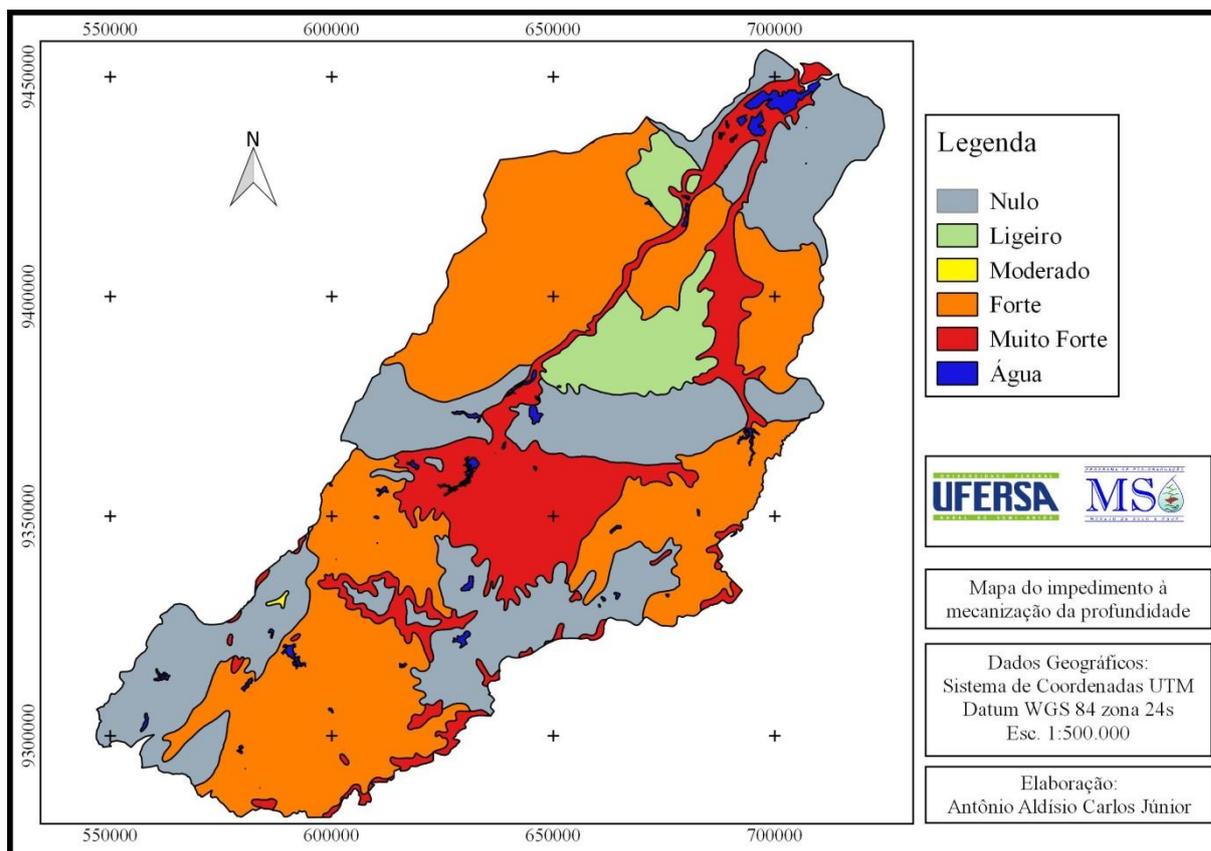


Figura 13. Mapa do impedimento à mecanização agrícola da bacia hidrográfica Apodi/Mossoró quanto à profundidade.

Fonte: Acervo do autor.

Tabela 7. Classe de impedimento à mecanização quanto à profundidade.

Classe de Impedimento	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)
Nulo	4281.665	30,99
Ligeiro	842,067	6,10
Moderado	6,554	0,05
Forte	6254,74	45,28
Muito Forte	2280,961	16,51
Água	148,024	1,07
<b>Total</b>	<b>13814,011</b>	<b>100,00</b>

Fonte: Acervo do autor.

#### 4.1.4 Drenagem do solo

As condições de drenagem dos solos da bacia hidrográfica Apodi/Mossoró quanto à possibilidade de utilização de máquinas e implementos agrícolas, de acordo com os pressupostos estabelecidos no trabalho, tem-se que as áreas são classificadas basicamente em duas classes de impedimento à mecanização representada por nulo, com 53,31% e moderado 38,26% (Tabela 8).

O impedimento nulo à mecanização ocorre em toda extensão da bacia e abrange os Luvisolos, Argissolos, Latossolos e parte dos Cambissolos, enquanto o moderado está concentrado mais na parte centro norte da bacia e compreende: Cambissolos, Neossolo e parte dos Luvisolos (Figura 6 e 14).

O impedimento mais restritivo à mecanização, correspondente a classe forte (5,66%) e muito forte (1,70%) concentra-se em quatro unidades de mapeamento, com os seguintes solos predominantes: Vertissolos, Argissolo, Planossolo e Gleissolo. Essas áreas sofrem forte influência da rede de drenagem da bacia hidrográfica e estão situadas predominantemente no estuário da bacia e, em áreas onde permeiam os rios Apodi/Mossoró e do Carmo, cujos fluxos são controlados por barragens.

Em razão disso, essas áreas estão sujeitas a elevação do lençol freático, principalmente quando da ocorrência do período chuvoso, conferindo, deste modo, impedimento à mecanização agrícola seja pela restrição a introdução dos implementos ou diminuição dos meses do ano em que se podem aplicar as operações com máquinas e implementos.

Nesses solos, geralmente os limites de consistências são representados por pegajosidade quando úmidos e tenacidade quando secos e, nessas condições, as operações com máquinas e implementos agrícolas não são indicadas devido aos impactos que causam na desestruturação e conseqüentemente compactação do solo, tornando-o menos adequado para atividades agrícolas.

Nesse sentido, Lopes et al. (2011) estudaram o efeito da umidade do solo na compactação de um Cambissolo submetido a tráfego de máquinas agrícolas e concluíram que as maiores alterações nas propriedades físicas avaliadas ocorreram com o aumento da umidade do solo.

Louzada et al. (2008) em estudo de solo de várzea observou haver uma relação muito estreita entre a drenagem subsuperficial e superficial com a possibilidade de preparo do solo.

Francisco et al. (2012) identificaram no estado da Paraíba as unidades de mapeamento composta por Luvisolo, Planossolo e Vertissolo, assim como neste estudo, com forte impedimento à mecanização agrícola devido as condições de drenagem. O impedimento quanto à drenagem imposta por essas classes de solos está associada a pouca profundidade conjugada com o caráter vértico e elevado teor de argila.

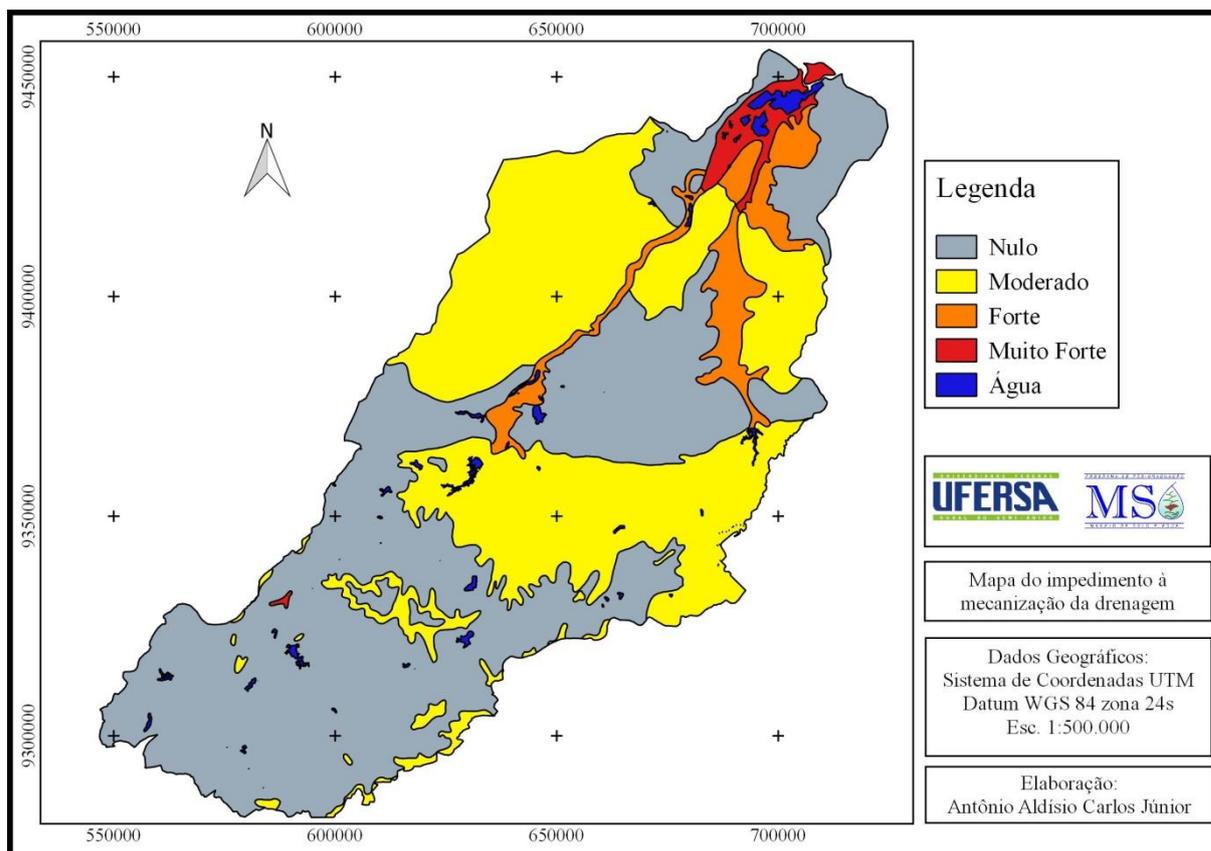


Figura 14. Mapa do impedimento à mecanização agrícola da bacia hidrográfica Apodi/Mossoró quanto à drenagem.

Fonte: Acervo do autor.

Tabela 8. Classe de impedimento à mecanização quanto à drenagem.

<b>Classe de Impedimento</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (%)</b>
Nulo	7363,467	53,31
Moderado	5285,634	38,26
Forte	781,447	5,66
Muito Forte	235,439	1,70
Água	148,024	1,07
<b>Total</b>	<b>13814,011</b>	<b>100,00</b>

Fonte: Acervo do autor.

#### 4.1.5 Textura do solo

Na avaliação da influência da textura quanto à mecanização agrícola, os resultados indicam que a bacia hidrográfica Apodi/Mossoró possui áreas com impedimento as operações com máquinas e implementos correspondentes as classes nulo, ligeiro e moderado, que representam respectivamente 2,06%, 53,00% e 43,87% da área de estudo (Tabela 9).

Com esses resultados a textura da bacia é caracterizada pela sua composição granulométrica média em maior parte dos solos, incluído as unidades de mapeamento representadas pelos Neossolos, Argissolos, Luvisolos e Latossolos, enquanto os solos com

textura argilosa, que representam impedimento moderado, correspondem às unidades de mapeamento constituídas pelo Vertissolos, Gleissolos, Chernossolos, Cambissolos e Luvissolos. Já a textura arenosa foi mapeada na unidade com predomínio de um Argissolo. (Figuras 6 e 15).

Corroborando com essa distribuição textural, Costa (2013) ao mapear os teores de areia, silte e argila de solos do Estado do Rio Grande do Norte, por meio de geoestatística, obteve como resultado que os maiores teores de argila, em torno de 450 a 525 g/Kg de solo, são encontrados nos solos do centro norte da bacia hidrográfica Apodi/Mossoró, onde estão as unidades de mapeamento que este estudo apresentou como moderado quanto à utilização de máquinas e implementos.

Assim como a drenagem, solos argilosos influenciam nas condições de sua consistência, deixando-os com uma pequena margem de umidade a ser trabalhados. Desta forma, a interação de máquinas e implementos com o solo em umidades não recomendadas para operações mecanizadas podem acarretar em sua degradação, sendo imprescindível a definição das condições ótimas de umidade.

Mota et al. (2008) ao analisarem as propriedades física e hídricas de três solos da chapada do Apodi, região de Mossoró, concluíram que o risco do uso de máquinas e implementos na degradação de um Cambissolo Háplico foi acentuado devido ao conteúdo de argila relativamente significativo, enquanto no Latossolo e Argissolo o risco foi baixo.

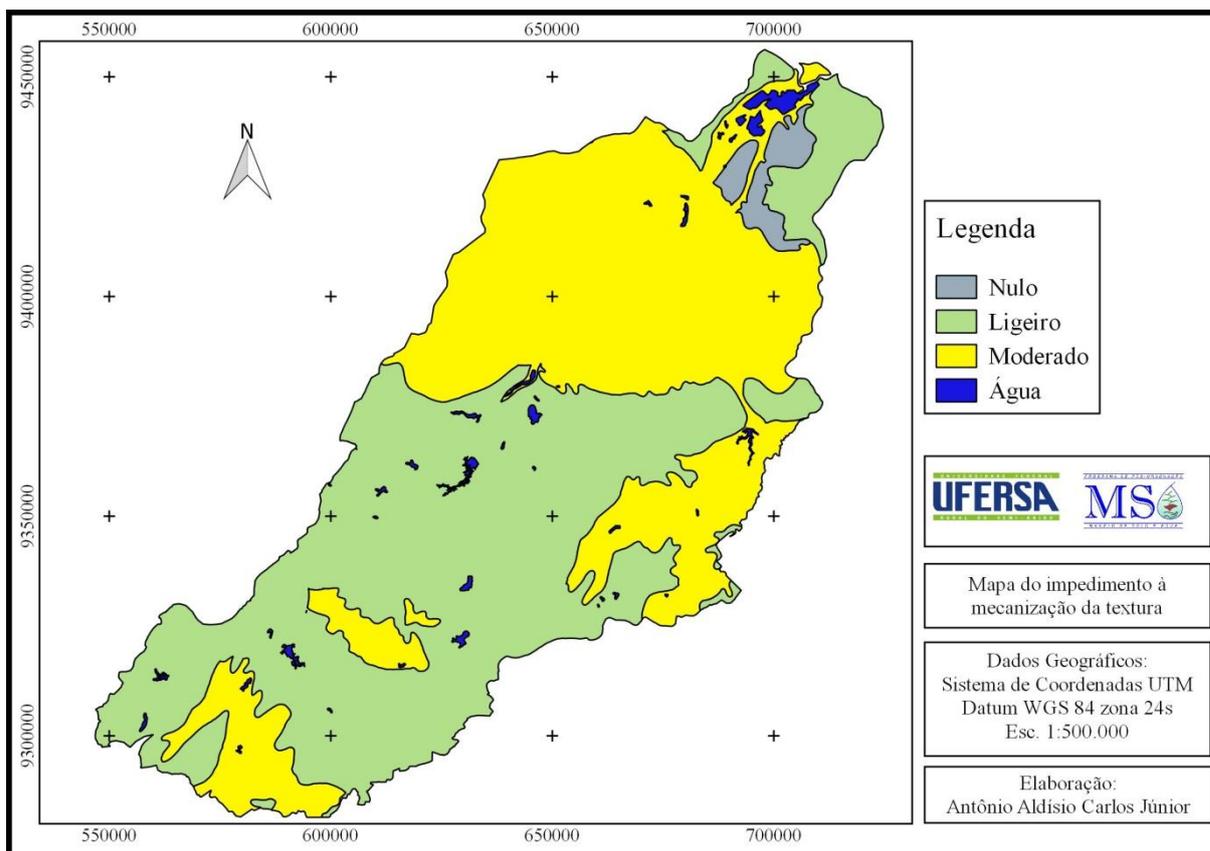


Figura 15. Mapa do impedimento à mecanização agrícola da bacia hidrográfica Apodi/Mossoró quanto à textura.

Fonte: Acervo do autor.

Tabela 9. Classe de impedimento à mecanização quanto à textura.

Classe de Impedimento	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)
Nulo	284,439	2,06
Ligeiro	7321,045	53,00
Moderado	6060,503	43,87
Água	148,024	1,07
<b>Total</b>	<b>13814,011</b>	<b>100,00</b>

Fonte: Acervo do autor.

## 4.2 Mapas temáticos normalizados

O processo de normalização resultou no reescalonamento dos mapas temáticos dos critérios em um referencial com valores de 0 a 1, indicando que à medida que os valores nos mapas se aproximam de 1, maior o impedimento à mecanização imposto pelo critério, enquanto valores próximos de 0 representam as áreas aptas à mecanização agrícola, conforme pressupostos estabelecidos neste estudo.

A diferença dos resultados deste processo para os mapas temáticos do item 4.1 é que nos mapas normalizados o grau de impedimento à mecanização de um critério é apresentado em escala graduada de valores, em detrimento das classes vistas nos mapas do item anterior.

Desta forma, ao observar os mapas normalizados dos critérios quantitativos, unidades de mapeamento dos mapas do item 4.1 que foram classificadas em uma mesma classe quanto ao impedimento à mecanização, por exemplo, impedimento forte, pode conter mais de um valor, representado por tonalidades de cores diferentes, indicando que dentro de uma mesma classificação as unidades de mapeamento podem apresentar intensidade de impedimentos distintos.

A seguir, serão apresentados os resultados da normalização dos dados dos critérios que foram divididos em dados quantitativos (declividade, pedregosidade e profundidade) e qualitativos ou nominais (textura e drenagem).

#### 4.2.1 Pedregosidade do solo

Aplicando a função de pertinência sigmoidal crescente da lógica *fuzzy*, com pontos de controle  $a = 10.1\%$  e  $b = 50.1\%$ , obteve-se o grau de intensidade imposto pela pedregosidade do solo no impedimento à mecanização agrícola das áreas da bacia hidrográfica Apodi/Mossoró (Figura 16).

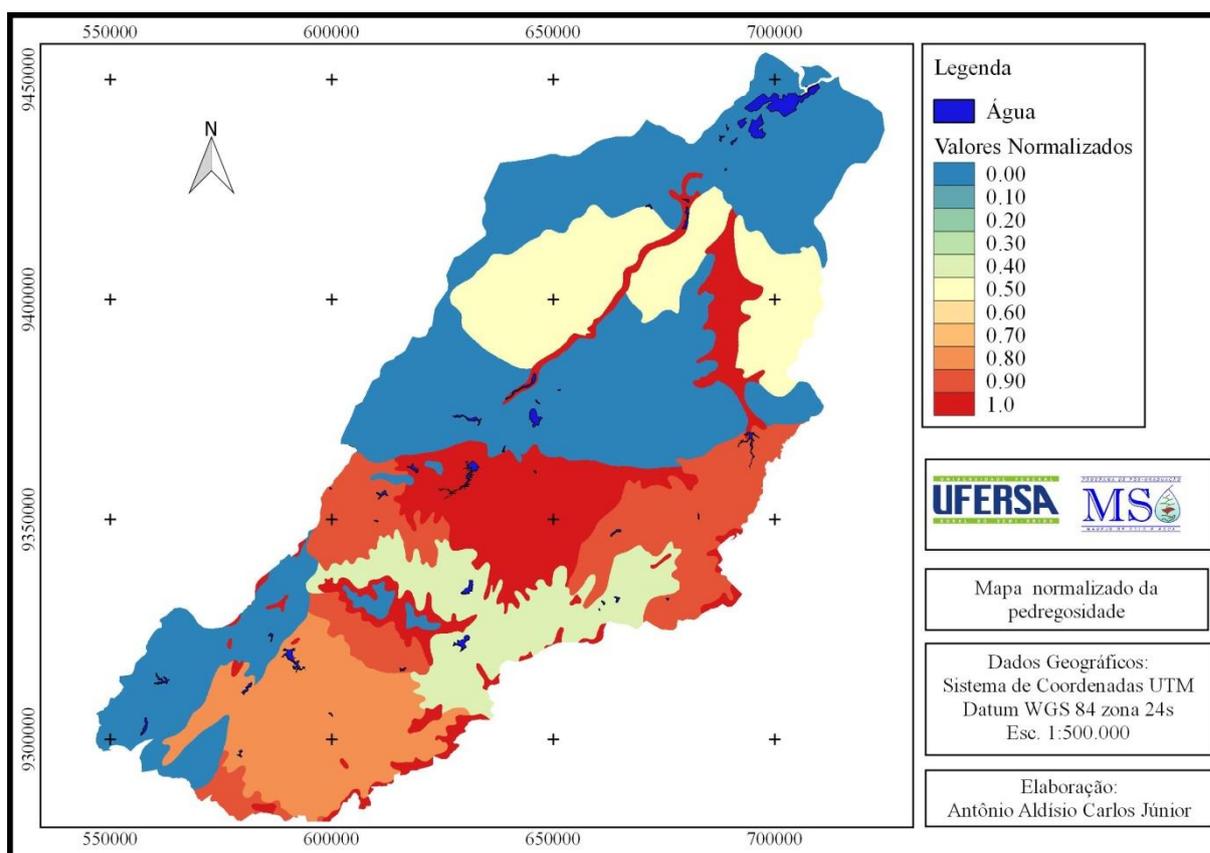


Figura 16. Mapa normalizado da pedregosidade do solo.

Fonte: Acervo do autor.

#### 4.2.2 Declividade

Aplicando a função de pertinência sigmoïdal crescente da lógica *fuzzy*, com pontos de controles  $a = 3.1\%$  e  $b = 12.1\%$ , obteve-se o grau de intensidade imposto pela declividade no impedimento à mecanização agrícola das áreas da bacia hidrográfrica (Figura 17).

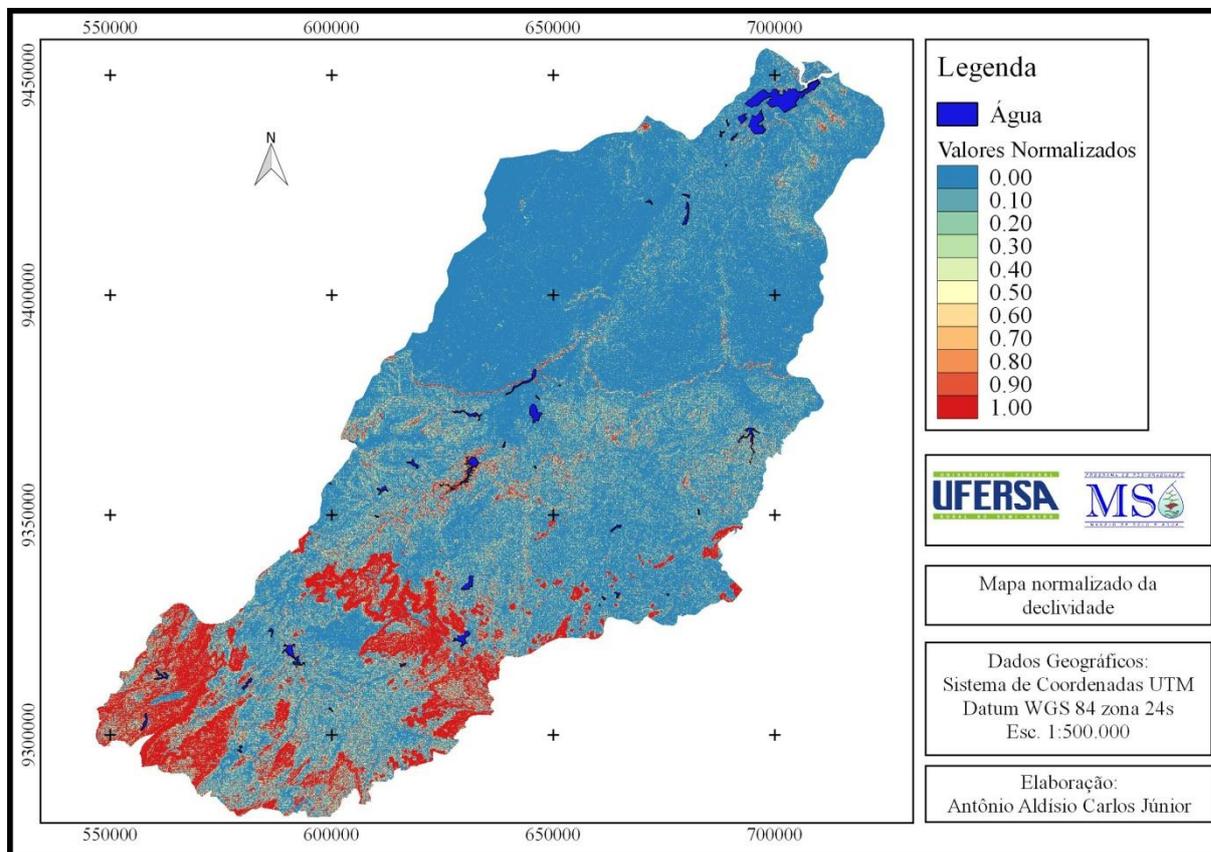


Figura 17. Mapa normalizado da declividade.

Fonte: Acervo do autor.

#### 4.2.3 Profundidade do solo

Aplicando a função de pertinência sigmoïdal decrescente da lógica *fuzzy*, com pontos de controles  $c = 20.1\%$  e  $d = 80.1\%$ , obteve-se o grau de intensidade imposto pela profundidade do solo no impedimento à mecanização agrícola das áreas da bacia hidrográfrica (Figura 18).

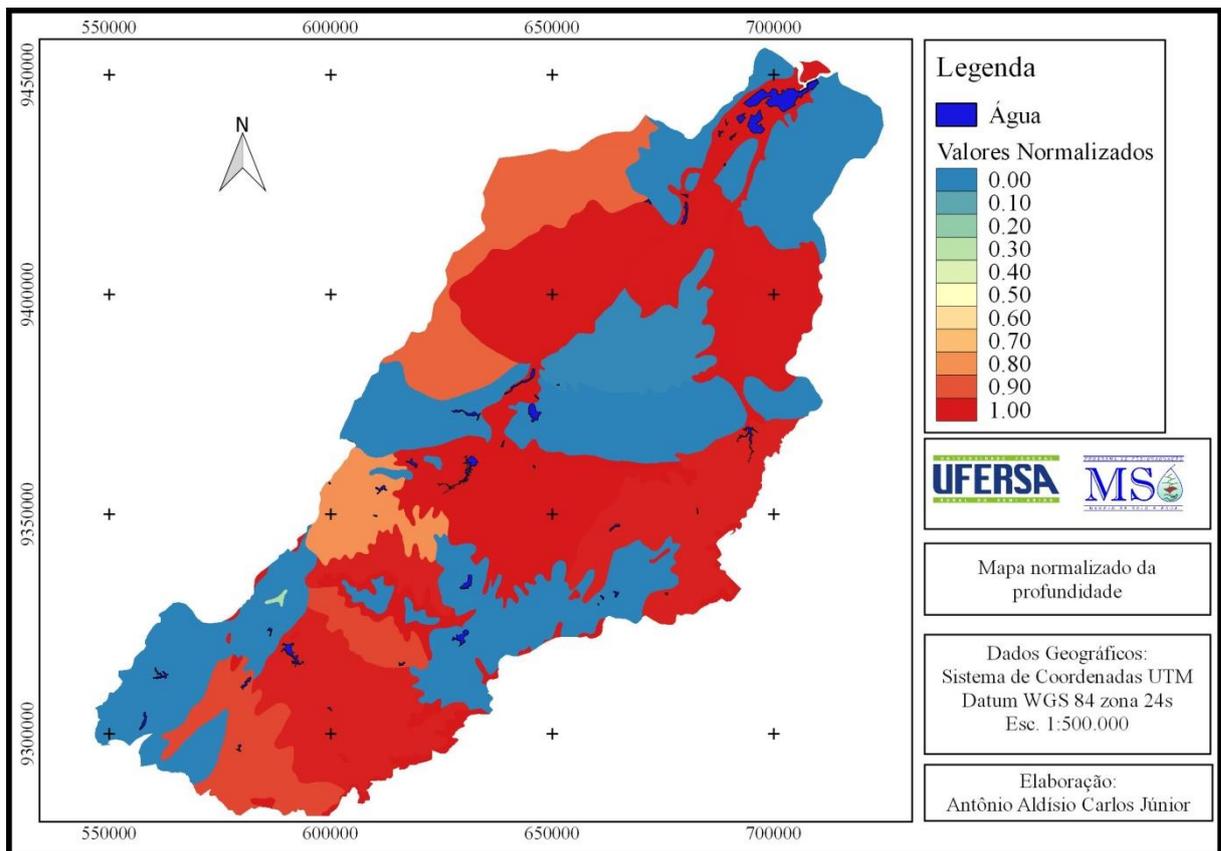


Figura 18. Mapa normalizado da profundidade do solo.

Fonte: Acervo do autor.

#### 4.2.4 Drenagem do solo

Diferente dos critérios quantitativos (pedregosidade, declividade e profundidade), para normalização dos dados referentes à drenagem foram atribuídos valores de maneira arbitrária, conforme entendimento da contribuição de cada subcritério quanto ao impedimento à mecanização.

Desta forma, adotou-se basicamente o modelo linear para inserção dos valores, sendo que à medida que a dificuldade de drenagem aumenta, maior restrição às operações com máquinas e implementos agrícolas. Assim, para o impedimento nulo representado pelas condições de forte a bem drenado o valor adotado foi 0, e no outro extremo, para solos mal drenados, com impedimento muito forte o valor foi 1 e nas demais classes, considerando a escala linear, adotaram-se os valores de 0,5 e 0,75, respectivamente, para o impedimento moderado e forte (Tabela 10).

Tabela 10. Valores normalizados para drenagem.

<b>Subcritérios de drenagem</b>	<b>Impedimento à Mecanização</b>	<b>Valor normalizado</b>
Fortemente/Acentuadamente/Bem drenado	Nulo	0
Moderadamente drenado	Moderado	0,5
Imperfeitamente drenado	Forte	0,75
Mal drenado	Muito forte	1

Fonte: Acervo do autor.

#### 4.2.5 Textura do solo

Assim como a normalização dos subcritérios da drenagem, para a textura adotou-se a inserção dos valores de maneira arbitrária em função da contribuição de cada classe textural no impedimento à mecanização agrícola.

Para a textura não foi introduzida à classe de impedimento muito forte, pois se entendeu que esta condição não se aplica ao estudo, ou seja, isoladamente a textura não confere grau muito forte quanto à utilização de máquinas e implementos para o preparo do solo.

Posto isto, os valores foram escalonados considerando o impedimento nulo, ligeiro, moderado e forte seguindo um modelo linear dentro da escala de 0 a 1 (Tabela 11). Para o impedimento forte os subcritérios textura siltosa e muito argilosa foram empregados, uma vez que para solos siltosos o revolvimento desses por meio do seu preparo pode favorecer a sua impermeabilização, enquanto solos muito argilosos, devido sua contribuição para a mudança da consistência, geralmente a faixa de umidade ótima para trabalho é pequena. A realização de operações de preparo de solo em umidade acima do limite de liquidez provoca a compactação, limita o desenvolvimento radicular das culturas e contribui de forma decisiva para os processos erosivos, resultando em sua degradação.

A contribuição da textura neste estudo se deu a partir dos subcritérios que considerou as classes arenosa, média e argilosa, que receberam valores de 0, 0,25 e 0,5 respectivamente.

Tabela 11. Valores normalizados para a textura.

<b>Subcritério textura</b>	<b>Areia(%)</b>	<b>Argila (%)</b>	<b>Impedimento à mecanização</b>	<b>Valor normalizado</b>
Arenosa	> 70	< 15	Nulo	0
Média	> 15	< 35	Ligeiro	0,25
Siltosa	< 15	< 35	Forte	0,75
Argilosa		35 a 60	Moderado	0,5
Muito argilosa		> 60	Forte	0,75

Fonte: Acervo do autor.

### 4.3 Ponderação dos critérios

Para o processo de ponderação, inicialmente definiu-se a hierarquia de comparação, considerando subjetivamente a importância de cada critério quanto ao impedimento à mecanização. Assim, a sequência de importância foi definida pelo critério de declividade o mais relevante, seguido pela pedregosidade, profundidade, drenagem e textura.

Após a hierarquização, realizou-se a comparação pareada dos critérios e obteve-se como resultado as seguintes relações:

- A declividade é moderadamente mais importante que a pedregosidade;
- A declividade tem importância de moderada a essencial comparada com a profundidade;
- A declividade tem importância de essencial a demonstrada comparada com a drenagem;
- A declividade tem importância extrema comparada com a textura;
- A pedregosidade tem importância entre igual à moderada comparada com a profundidade;
- A pedregosidade tem importância entre essencial a demonstrada comparada a drenagem;
- A pedregosidade tem importância entre demonstrada e extrema comparada a textura;
- A profundidade tem importância entre moderada a essencial comparada à drenagem;
- A profundidade tem importância demonstrada comparada à textura;
- A drenagem tem importância moderada comparada a textura.

Para essas informações, aplicando-se as equações do AHP (Satty, 1977), foram obtidos os pesos relativos de cada critério, conforme Quadro 8. Diante dos resultados, observa-se que a declividade contribuiu com 48,3% do impedimento à mecanização agrícola da área, sendo este na prática o fator mais limitante à mecanização, seguido pela pedregosidade com 25,5%, profundidade com 16,9%, drenagem com 6,2% e textura com 3,1%.

Quadro 8. Pesos de importância dos critérios.

	Declividade	Pedregosidade	Profundidade	Drenagem	Textura	Pesos
Declividade	1	3	4	7	9	0,483
Pedregosidade	0,333	1	2	6	8	0,255
Profundidade	0,25	0,5	1	4	7	0,169
Drenagem	0,143	0,167	0,25	1	3	0,062
Textura	0,111	0,125	0,143	0,333	1	0,031
Razão de Consistência (RC) = 0,058					Soma	1,00

Fonte: Acervo do autor.

A razão de consistência de 0,058 indicou que a atribuição dos valores na matriz de comparação pareada seguiu um procedimento lógico e, portanto, que as relações obtidas neste estudo foram validadas em consonância com a metodologia empregada.

#### 4.4 Combinação dos critérios

O mapa final do impedimento à mecanização agrícola da bacia hidrográfica Apodi/Mossoró foi resultado da aplicação do método da combinação linear ponderada que possibilitou a integração e combinação dos critérios e subcritérios adotados neste estudo por meio dos seus respectivos pesos e valores normalizados (Figura 19).

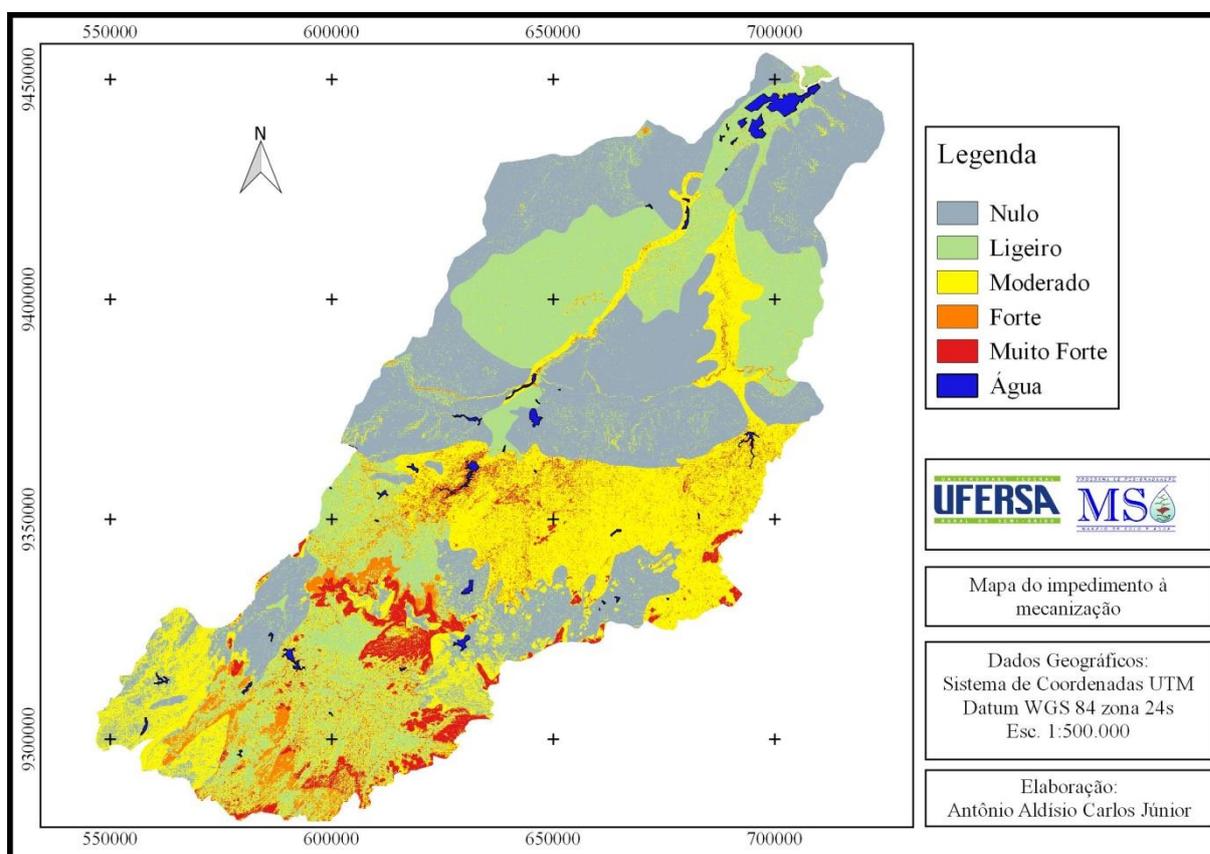


Figura 19. Mapa do impedimento à mecanização da bacia hidrográfica Apodi/Mossoró.  
Fonte: Acervo do autor.

Diante dos resultados da Tabela 12, as classes de impedimento à mecanização nula, ligeira e moderada, correspondem a 34,91%, 27,02% e 27,28%, respectivamente da área total, sendo as mais representativas espacialmente, enquanto as classes forte e muito forte com 5,68% e 4,04% respectivamente foram às de menor distribuição espacial.

Verifica-se como característica da metodologia empregada, uma compensação entre os critérios, sendo que áreas que possuíam aptidão à mecanização agrícola, representadas por critérios com pesos mais baixos foram compensadas por critérios com pesos mais elevados.

Assim, a combinação dos critérios com diferentes pesos fez com que seus valores tendessem a uma média.

Nesse cenário, tendo em vista os pesos obtidos que representam o grau de importância de um critério quanto ao impedimento à mecanização, a declividade com peso de 0,483 foi o critério que mais influenciou o resultado final, permitindo uma compensação acentuada em comparação à compensação atribuída pelos demais critérios.

Tabela 12. Quantificação das classes de impedimento à mecanização agrícola das terras da bacia hidrográfica Apodi/Mossoró.

<b>Classe de Impedimento</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (%)</b>
Nulo	4820,641	34,91
Ligeiro	3732,260	27,02
Moderado	3766,977	27,28
Forte	784,016	5,68
Muito Forte	557,981	4,04
Água	148,024	1,07
<b>Total</b>	<b>13809,889</b>	<b>100,00</b>

Fonte: Acervo do autor.

Nesse sentido, ao analisar o impedimento imposto somente pela declividade com o mapa final (Figuras 12 e 19), observa-se que as classes de impedimento forte e muito forte pouco se alteraram em termos de espacialização e áreas, ocorrendo apenas uma compensação de áreas de muito forte para a classe moderado no extremo sul da bacia em decorrência que os demais critérios, para esta mesma área, apresentaram impedimento de nulo a ligeiro.

Influência semelhante da declividade pode ser percebida nas áreas do centro norte da bacia nas unidades de mapeamento das classes de solos Cambissolo, Chernossolo, Gleissolo e Vertissolo que apresentaram, prioritariamente, moderado, forte e muito forte restrição à mecanização agrícola quando analisado os critérios de textura, drenagem e profundidade, mas que em razão de situarem em áreas planas foram classificadas no final como classes menos restritivas à mecanização agrícola.

Diante do efeito de compensação dos critérios, o mapa final do impedimento à mecanização agrícola deste estudo serve como instrumento norteador da delimitação das áreas mais adequadas a exploração utilizando a mecanização tratorizada em todas as etapas do processo produtivo, sendo imprescindível a análise individualizada de cada parâmetro que condiciona restrição à mecanização, com o risco de não ocorrendo tal análise, a área mesmo tendo sua classificação enquadrada como nula e ligeira, possa ser utilizada sem as devidas práticas conservacionistas exigidas para atender a restrição imposta por um ou mais critérios que na análise integrada não influenciam a classificação final quanto ao impedimento à mecanização.

A compensação dos critérios permitiu a minimização do risco associado à obtenção de valores extremos. Desta forma, Francisco et al. (2012) utilizando a lógica booleana mapeou que as áreas do Estado da Paraíba tem predominância das classes forte e muito forte à mecanização, sendo o fator mais importante para este resultado a pouca profundidade efetiva dos solos.

A diferença desses resultados para este estudo, apesar de analisadas áreas distintas, pode ser associada em parte ao procedimento metodológico através da lógica booleana adotado no primeiro cujo impedimento à mecanização é classificado apenas pelo fator mais restritivo de uma área.

Quando correlacionado o mapa final com o mapa de solos observa-se que as classes forte e muito forte de impedimento à mecanização concentram-se no centro sul da bacia, justamente onde ocorrem as regiões mais declivosas, associados aos solos com pouca profundidade e pedregosos cujas áreas são representadas pelos Neossolos Litólicos e Luvisolos Crômicos. Já o impedimento moderado distribui-se espacialmente em toda a bacia, mas concentrado na sua porção central onde predominam os Luvisolos e Neossolo Regolítico com critérios de maior contribuição a pouca profundidade e elevada pedregosidade do solo (Figuras 6 e 19).

Por fim, os impedimentos nulo e ligeiro foram mapeados nas unidades com predomínio dos Latossolos, Argissolos, Cambissolos, Chernossolos e Gleissolos, sendo os critérios declividade, profundidade e pedregosidade para os Latossolos e Argissolos os mais importantes para obtenção desta classificação e, para as demais unidades de mapeamentos, a região plana associada a pouca pedregosidade condicionaram essas áreas a classificação menos restritivas à mecanização agrícola.

Analisando a influência global dos critérios empregados neste estudo, observa-se que a drenagem e textura além dos pesos relativamente baixos, individualmente foram os critérios que menos influenciaram no impedimento à mecanização, com poucas áreas representadas pelos impedimentos mais restritivos. Assim, o mapa final basicamente foi influenciado pelas condições de declividade, pedregosidade e profundidade do solo.

#### **4.5 Variação percentual das áreas**

Para avaliação das variações dos valores de áreas dos mapas do processamento das imagens em diferentes formatos (matricial e vetorial) considerou a área real de estudo 13814,011 Km<sup>2</sup> referente ao valor do cruzamento do mapa de solos do RN com o mapa da bacia hidrográfica sem as áreas de dunas.

Áreas diferentes do valor real foram encontradas nos mapas de declividade (Figura 12) e no mapa final de impedimento à mecanização (Figura 19) devido à interação por meio do recorte de dados matricial com dados vetoriais para obtenção desses mapas. Assim, nessa condição o software utilizado modelou esse cruzamento considerando o centro do pixel, resultando que os pixels que se encontravam dentro do limite da bacia acima do seu centro foram computados como área da bacia e os pixels que se encontravam dentro do limite da bacia cortando abaixo do seu centro foram descartados e não considerado área da bacia.

Desta forma, considerando os valores totais de 13863,535 km<sup>2</sup> para a declividade e 13809,889 km<sup>2</sup> para mapa final, a variação percentual comparada com a área total foi de 0,36% e 0,03%, respectivamente, considerada irrelevante.

#### 4.6 Processo de validação do mapa final em campo

O processo de validação dos resultados deste estudo foi obtido mediante cruzamento das informações contidas no mapa final do impedimento à mecanização com os pontos P1 a P19, verificados em campo por imagens fotográficas (Figura 20 e anexos).

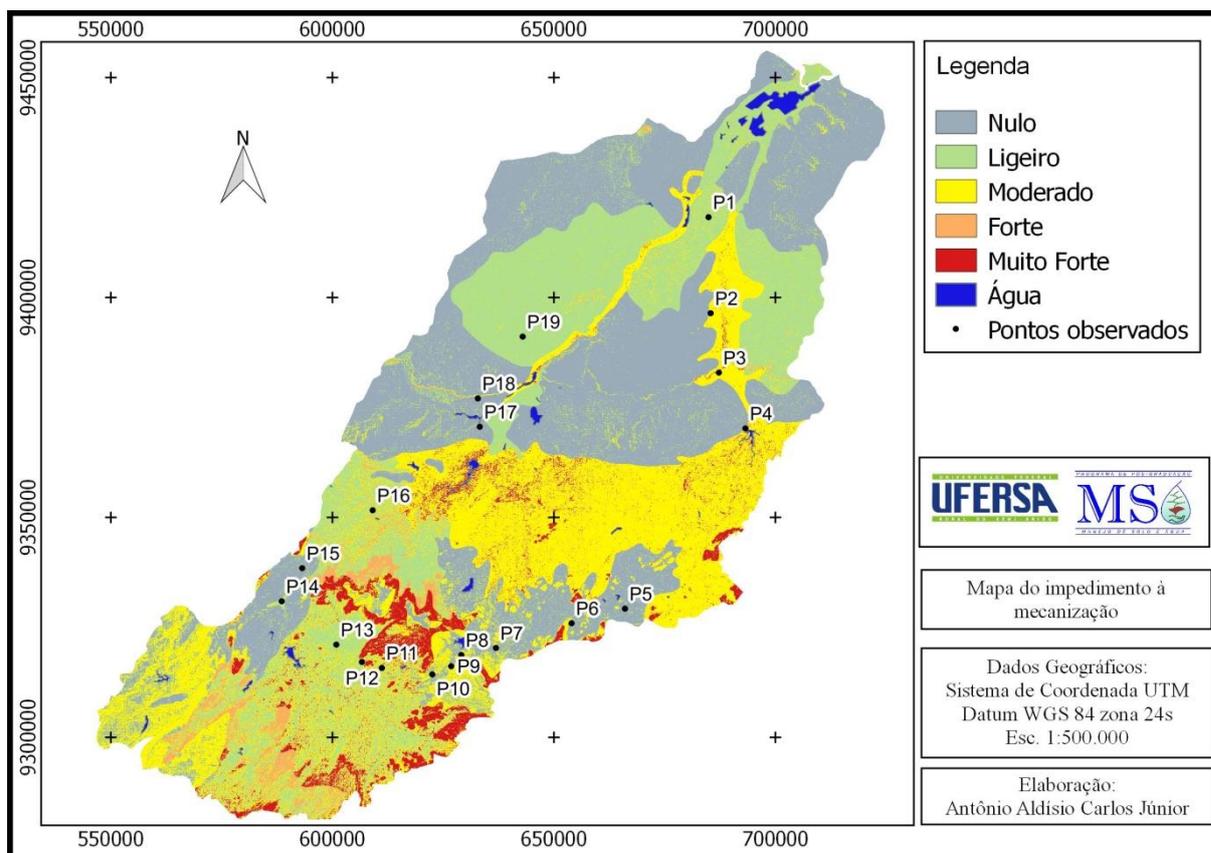


Figura 20. Pontos observados em campo para validação dos resultados.

Fonte: Acervo do autor.

Diante dos resultados que apontaram que a classificação final das áreas para mecanização é predominantemente influenciado pelos critérios de declividade e pedregosidade, os pontos observados em campo foram prioritariamente direcionados para análise desses critérios.

Para os pontos P1, P2, P3 e P4, as imagens fotográficas, em anexo, corroboraram com o mapa da declividade (Figura 12), indicando relevo predominantemente plano das áreas. Já para a pedregosidade, observa-se com exceção do ponto P1, que todas as demais áreas contêm intensa quantidade de pedras em superfície o que valida a classificação quanto à pedregosidade contida na Figura 11. Em razão da elevada pedregosidade, no mapa final essas áreas foram classificadas quanto ao impedimento à mecanização em moderado, mesmo considerando que os ambientes são de relevo plano.

A partir do ponto P5 ao P12, observa-se uma nítida mudança em relação aos pontos acima analisados no que se refere ao relevo. Para esses pontos, a partir das imagens fotográficas, percebe-se que o relevo é caracterizado pela presença de regiões montanhosas e áreas acidentadas intercaladas com faixas planas. Conforme o mapa da Figura 12, as áreas de maior impedimento à mecanização quando avaliada a declividade são justamente as áreas dos pontos P6 a P12, confirmando que o procedimento metodológico adotado condiz com as informações em campo.

Quando analisado em campo a pedregosidade das áreas margeadas pelos pontos P5 a P12, constata-se que são áreas com intensa pedregosidade, em alguns casos tanto em superfície como em subsuperfície, com presença substancial de afloramento rochoso, o que valida a classificação do mapa da pedregosidade para essas áreas (Figura 11). Devido à influência desses dois critérios, no mapa final do impedimento à mecanização, as áreas margeadas por esses pontos foram classificadas de moderado a muito forte (Figura 20).

A partir do ponto P13 até o ponto P19 as áreas estão inseridas em relevo predominantemente plano, condicionando a classificação final dessas áreas nas classes de nulo a ligeiro quanto ao impedimento à mecanização, sendo que nas áreas com classe ligeira, a exemplo dos pontos P16 e P19, observou-se presença de pedregosidade, o que possivelmente influenciou para que essas áreas diferentes das demais não fossem classificadas com impedimento nulo.

As análises em campo, assim como as obtidas nos resultados desse estudo, comprova o efeito de compensação entre os critérios para a classificação final que é inerente a metodologia de combinação linear ponderada. Para tal comprovação em campo, citam-se os resultados do mapa final evidenciado nos diversos pontos analisados, a exemplo dos pontos

P2, P3 e P4 que se situam em relevo plano, mas que devido à elevada pedregosidade a classificação final tendeu para um resultado médio representado pela classe moderado.

## 5 CONCLUSÕES

Quando analisados individualmente os critérios considerados para mapear e quantificar as áreas da bacia hidrográfica Apodi-Mossoró quanto ao impedimento à mecanização, constatou-se que, quantitativamente, as maiores restrições à introdução de máquinas e implementos agrícolas para o preparo do solo foram em decorrência da baixa profundidade e grande presença de pedregosidade dos solos, seguidas pela influência de regiões declivosas e com deficiência de drenagem. Enquanto isso, não se obteve maiores graus de restrições devido à textura do solo.

A integração dos critérios por meio da avaliação multicritério mostrou que as áreas da bacia hidrográfica Apodi/Mossoró são classificadas, predominantemente, nas classes de menor restrição ao impedimento à mecanização agrícola e, portanto, são áreas aptas para o preparo do solo sem oferecer maiores risco de degradação das terras, nas circunstâncias que sejam adotadas as medidas conservacionistas de manejo de solo e água.

O método AHP evidenciou que entre os critérios estabelecidos, a declividade e a pedregosidade e, em menor intensidade a profundidade, são, em termos de grau de importância, os que mais influenciaram para classificação final das áreas quanto ao impedimento à mecanização agrícola proposta neste estudo.

O procedimento metodológico com a integração da avaliação multicritério com o sistema de informação geográfica mostrou-se viável para o mapeamento e quantificação das áreas quanto ao impedimento à mecanização agrícola, indicando que as informações constantes no mapa final do estudo são relevantes para o planejamento e uso sustentável das terras.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antonello, S. L. Um sistema de planejamento e gestão para bacias hidrográficas com uso de análise multicritérios. Piracicaba: ESALQ, 2008. 129p. Tese Doutorado.
- Araújo, F. T. de. V. Metodologia de avaliação multicritério da vulnerabilidade à desertificação no semiárido. Fortaleza: UFCE, 2014. 201p. Tese Doutorado.
- Akıncı, H.; Özalp, A. Y.; Turgut, B. Agricultural land use suitability analysis using GIS and AHP technique. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.97, p.71-82, 2013.
- Barbosa Neto, M. V. Zoneamento da aptidão agrícola e uso dos solos da área do médio curso do rio Natuba - PE. Recife: UFPE, 2011. 124p. Dissertação Mestrado.
- Bezerra, J. M.; Feitosa, A. P.; Morais, C. T. da. S. L.; Silva, P. C. M. da.; Silva, I. R. da. Zoneamento ambiental das áreas de preservação permanente do município de Martins, RN. *Revista Caatinga*. v.21, p. 113-122, 2008.
- Bezerra, J. M.; Silva, P. C. M.; Batista, R. O.; Feitosa, A. P. Uso de Geotecnologia para avaliação ambiental da deterioração do município de Mossoró. *Revista de Geografia*. v. 28, p. 127-140, 2011.
- Baroudy, A. A. El. Mapping and evaluating land suitability using a GIS-based model. *Catena*, v.140, p.96-104, 2016.
- Brasil. Ministério da Agricultura. Levantamento Exploratório e de Reconhecimento dos Solos do Estado do Rio Grande do Norte. Recife. Convênio MA/CONTA/USAID/BRASIL, 1971 (Boletins DPFS-EPE-MA, 21 - Pedologia, 8).
- Câmara, G.; Medeiros, J.S. de. Mapas e suas representações computacionais. In: Assad, E.D. & Sano, E.E. *Sistema de Informações Geográficas: Aplicações na Agricultura*. 2. ed. Brasília: Embrapa-SPI/ Embrapa-CPAC, 1998. Cap.2, p.13-29.
- Câmara, G.; Queiroz, G. R. de. Arquitetura de sistemas de informação geográfica. In: Câmara, G.; Davis, C.; Monteiro, A. M. V. *Introdução à ciência da geoinformação*. São José dos campos: INPE, 2001. Cap.3, p. 3-12.
- Campos, S.; Felipe, A. C.; Campos, M.; Reche, A. M.. Análise multicriterial aplicado na definição de áreas prioritárias ao uso agrícola da terra da bacia do rio Capivara, Botucatu, SP. *Irriga*, v. Edição Especial, p.66-86, 2015.
- Costa, W. P. L. B. da. Metais pesados em solos do Rio Grande do Norte: Valores de referência de qualidade e relações geopedológicas. Recife: UFRPE, 2013, 121p. Tese Doutorado.
- Delarmelinda, E. A.; Wadt, P. G. S.; Anjos, L. H. C.; Masutti, C. S. M.; Silva, E. F.; Silva, M. B. E.; Coelho, R. M.; Shimizu, S. H.; Couto, W. H. Avaliação da aptidão agrícola dos solos do acre por diferentes especialistas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 1841-1853, 2011.
- Dias, V. S. B.; Silva, A. D. B. da. AHP na modelagem da vulnerabilidade ambiental do mini corredor ecológico serra das onças (BA). *Revista Brasileira de Cartografia*, v.6, p.1363-1377, 2014.

- Eastman, J. R. Idrise selva: Guia para SIG e procesamiento de imágenes. Clark University, 2012. 321p. Manual.
- Elsheikh, R.; Shariff, A. R. B. M.; Amiri, F.; Ahmad, N. B.; Balasundram, S. K.; Soom, M. A. M. Agriculture Land Suitability Evaluator (ALSE): A decision and planning support tool for tropical and subtropical crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.93, p98-110, 2013.
- EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3.ed. Brasília: Embrapa Solos, 2013. 353p.
- EMBRAPA. Solos do Nordeste. Recife: Embrapa Solos, 2014. 8p.
- Falcão, E. C. F. Análise de riscos à degradação ambiental utilizando avaliação multicritério espacial, no município de Boa Vista-PB. Campina Grande: UFCC, 2013. 126p. Tese Doutorado.
- Fantinel, R. A.; Benedetti, A. C. P. Avaliação dos fatores influentes na vulnerabilidade à erosão do solo por meio de decisão multicritério e de técnicas de geoprocessamento no município de Piratini-RS. *Ciência e Natura*, v.38, p. 156 – 163, 2015.
- Fitz, P. R. Geoprocessamento sem complicação. 1. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 160p.
- Francisco, P. R. M. Classificação e mapeamento das terras para mecanização do Estado da Paraíba utilizando sistemas de informações geográficas. Areia: UFPB, 2010, 122p. Dissertação de Mestrado.
- Francisco, P. R. M.; Chaves, I. B.; Lima, E. R. V. de. Mapeamento das terras para mecanização agrícola - Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.5, p. 233-249, 2012.
- Freitas, A. H. A. Incorporação de riscos ambientais em decisões corporativas utilizando abordagem multicritério. Rio de Janeiro: UFRJ, 2013. 176p. Tese Doutorado.
- Gdoura, K.; Anane, M.; Jellali, S. Geospatial and AHP-multicriteria analyses to locate and rank suitable sites for groundwater recharge with reclaimed water. *Resources, Conservation and Recycling*, v.104, p.19-30, 2015.
- Horn, B. K. P. Hill Shading and the Reflectance Map. *Proceedings of the IEEE*, v. 69, p.14–47, 1981.
- Höfig, P.; Araújo Júnior, C. F. Classes de declividade do terreno e potencial para mecanização no estado do Paraná. *Coffee Science*, v.10, p.195-203, 2015.
- Kazemi, H.; Sadeghi, S.; Akinci, H. Developing a land evaluation model for fababean cultivation using geographic information system and multi-criteria analysis (A case study: Gonbad-Kavousregion, Iran). *Ecological Indicators*, v.63, p.37-47, 2016.
- Langemeyer, J.; Baggethun, E. G.; Haase, D. Bridging the gap between ecosystem service assessments and land-use planning through Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA). *Environmental Science & Policy*, v.62, p.45-56, 2016.
- Lepsch, I. F.; BELLINAZZI Júnior. R; Bertolini, D.; Espíndola, C. R. Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso. 4a Aprox. SBCS, Campinas-SP. 1991. 175p.

- Lopes, E. da Silva.; Sampietro, J. A.; Lombardi, K. C.; Dias, A. N. Avaliação da umidade na compactação do solo submetido ao tráfego de máquinas de colheita florestal. *Revista Árvore*, v. 35, p. 659-667, 2011.
- Louzada, J. A.; Caicedo, N.; Helfer, F. Condições de drenagem relacionadas ao trânsito de máquinas em solo de várzea (RS-Brasil). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, p. 98-105, 2008.
- Maia, P. R.; Bezerra, F. H. R.; Geomorfologia e mapeamento temático da bacia hidrográfica do rio apodi-mossoró, Nordeste do Brasil. *Revista Geonorte*, v.3, p. 510–519, 2016.
- Malczewski, J.; GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. *Progress in Planning*, 62, p.3-65, 2004.
- Marques, F. A.; Ribeiro, M. R.; Bittar, S. M. B.; Lima Neto, J. A.; Lima, J. F. W. F. Characterization and classification of cambisols from the archipelago Fernando de Noronha, Pernambuco, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, p. 1023-1034, 2007.
- Mendas, A.; Delali, A. Integration of multicriteria decision analysis in GIS to develop land suitability for agriculture: Application to durum wheat cultivation in the region of Mleta in Algeria. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.83, p.117-126, 2012.
- Mendes, I. de.; Souza.; Mercante, E.; Scariotto, M. C, Maggi, M. F.; Correa, M. M.; Kusminski, D. Geoprocessing applied to the physiographic characterization of the lontas river basin. *Revista GEAMA*, v.6, p.170-175, 2016.
- Montgomery, B.; Dragicevic, S.; Dujmovic.; Schmidt.; M. A GIS-based logic scoring of preference method for evaluation of land capability and suitability for agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 124, p.340-353, 2016.
- Mota, J. C. A.; Assis Júnior, R. N. D.; Amaro Filho, J.; Libardi, P. L. Algumas propriedades físicas e hídricas de três solos na chapada do Apodi, RN, cultivados com melão. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 49-58, 2008.
- Nascimento, V. L.; Lima, E. R. V. de, Santos, C. A. G. SIG na avaliação de áreas para ocupação urbana de João Pessoa-PB. *Ambiente Construído*, v.9, p.107-123, 2009.
- Oliveira, F. F. G. da. Aplicação das técnicas de geoprocessamento na análise dos impactos ambientais e na determinação da vulnerabilidade ambiental no litoral sul do Rio Grande do Norte. Rio Claro: UNESP, 2011. 250p. Tese Doutorado.
- Pacheco, E. P.; Araújo, E. A. de; Amaral, E. F. do; Silva, C. L.; Parizzi Neto, A. Aptidão natural para mecanização agrícola dos solos do Estado do Acre. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2001. p. 1-5. Comunicado Técnico, 129.
- Patriche, C. V.; Pirnau, R.; Grozavu, A.; Rosca, B. A comparative analysis of binary logistic regression and analytical hierarchy process for landslide susceptibility assessment in the Dobrov river basin, Romania. *Pedosphere*, v.26, p.335-350, 2016.
- Paula, E. M. S.; Souza, M. J. N. de. Sistemas de informações geográficas na análise da vulnerabilidade ambiental da bacia do rio Ceará-CE. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 63, p. 545-554, 2011.

Pereira, D. P.; Fiedler, N. C.; Lima, J. S. de S.; Guimarães, P. P.; Môra, R.; Carmo, F. C. de. A. do. Eficiência da subsolagem na profundidade de preparo do solo em função da declividade do terreno. CERNE, v. 18, p. 607-612, 2012.

Pereira, L.C.; Lombardi Neto, F. Avaliação da aptidão agrícola das terras: proposta metodológica. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2004. 36 p.

Pinto, R. C. Identificação e mapeamento de áreas suscetíveis a movimentos de massa através de avaliação multicritério em sistema de informações geográficas – análise conceitual e uma proposta metodológica. Curitiba: UFPR, 2015. 211p. Tese Doutorado.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS. Versão 2.8.7 2014. Disponível em <http://qgis.org/>. Acesso em 23outubro. 2015.

Ramalho Filho, A. & Beek, K. J. Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras. 3ª. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1995. 65p.

Rebolledo, B.; Gil, A.; Flotats, X.; Sánchez, J. A. Assessment of groundwater vulnerability to nitrates from agricultural sources using a GIS-compatible logic multicriteria model. Journal of Environmental Management, v.171, p.70-80, 2016.

Resende, M; Lani, J. L. 500 anos de uso do solo no Brasil. In: Araújo, Q. R. de. 500 anos de uso do solo no Brasil. Ilhéus. UESC, 2002, Cap.1 p.1-50.

Rezende, F. A. Determinação das áreas cafeeiras mecanizáveis no sul de Minas Gerais com cenário para a colheita. Lavras: UFLA, 2008. 94p. Dissertação Mestrado.

Ribeiro, M. F. Análise ambiental aplicada à definição da zona de amortecimento no parque estadual da Pedra Branca (Município do Rio de Janeiro, RJ, com base em geoprocessamento. Rio de Janeiro: UFRJ, 2013. 407p. Tese Doutorado.

Rocha, P. G. O.; Ximenes, T. C. F.; Gerra, M. S. Geoprocessamento aplicado a seleção de áreas para implantação de aterro sanitário: estudo de caso, consórcio Brejo Madre de Deus e Juatuba-PE. Revista GEAMA, v.2, p.79-89, 2015.

Rodrigues, M. T. Comportamento de sistemas de informações geográficas por meio de classificação supervisionada em diferentes bacias hidrográficas. Botucatu: UNESP, 2015. 101p. Tese Doutorado.

Romano, G.; Sasso, P.; Liuzzi, G. T.; Gentile, F. Multi-criteria decision analysis for land suitability mapping in a rural area of southern Italy. Land Use Policy, v.48, p.131-143, 2015.

Saaty, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. Journal of mathematical psychology, v. 15, p.234-281, 1977.

Saaty, T.L. The Analytic Hierarchy Process, New York: McGraw Hill, 1980.

Saaty, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. International journal of services sciences, v.1, p. 83-98, 2008.

SAGA GIS DEVELOPMENT TEAM. System for Automated Geoscientific Analyses – SAGA GIS. Versão 2.1.2. 2014. Disponível em: <http://www.saga-gis.org/>. Acesso em 05 abril. 2016.

Santos, R. D.; Lemos, R. C.; Santos, H. G.; Ker, J. C.; Anjos, L. H. C. Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo. 5ª ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência de Solo, 2005. 100 p.

Sartori, A. A. D. C.; Polonio, V. D.; Zimback, C. R. L. Adequação territorial com abordagem multicriterial pela análise da combinação linear ponderada. *Geociências*, v.33, p.192-201, 2014.

SEMARH - Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Plano Estadual de Recursos Hídricos. Natal, 1998.

Sepe, L. G. D. Análise do campus de São Carlos da universidade federal de São Carlos. São Carlos: UFSCAR, 2015. 60p. Dissertação Mestrado.

Sessi, C. C. Propostas de manejo para diferentes classes de solos dos assentamentos José Maria e Papuan II do município de Abelardo Luz-SC. Florianópolis: UFSC, 2013. 122p. Dissertação Mestrado.

Silva, B. E. da; Nogueira, R. E.; Uberti, A. A. A. Avaliação da aptidão agrícola das terras como subsídio ao assentamento de famílias rurais, utilizando sistemas de informações geográficas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.1977-1991, 2010.

Tavares, T. O.; Silva, R. P. da.; Santinato, F.; Santos, A. F. dos.; Paixão, C. S. S.; Silva V. A. Operational performance of the mechanized picking of coffee in four soil slope. *African Journal of Agricultural Research*, v. 11, p.4857-4863, 2016.

Trabaquini, K.; Miglioranza, E.; França, V. de; Pereira Neto, O. C. Caracterização de lavouras cafeeiras, utilizando técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, no município de Umurama-PR. *Revista Ciências Agrotécnicas*, v.35, p.35-44, 2011.

Vettorazzi, C.; A. Avaliação multicritérios, em ambiente SIG, na definição de áreas prioritárias à restauração florestal visando à conservação de recursos hídricos. Piracicaba: ESALQ, 2006. 151p. Tese Livre Docência.

Vital, S. R. O.; Lima, E. R. V. de, Silveira, T. A. Análise multicriterial na adequação do uso das terras do município de Amparo-PB. *Boletim de Geografia*, v.32, p.62-74, 2014.

Wadt, P. G. S.; Nóbrega, M. S.; Anjos, L. H. C. Grau de Limitação Quanto aos Impedimentos à Mecanização no Sistema de Aptidão Agrícola das Terras em Nível de Propriedade Rural. In: *Manejo e Conservação do Solo e da Água*, Rio de Janeiro, 2008. Anais. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2008b.

Worboys, M. F.; Duckham, M. GIS: A computing perspective. 2. ed. Boca Raton: CRC PRESS, 2004. 426p.

Zanata, J. M.; Pirole, E. L.; Delatorre, C. C. M.; Gimenes, G. R. Análise do uso e ocupação do solo nas áreas de preservação permanente da microbacia Ribeirão Bonito, apoiada em técnicas de geoprocessamento. *Revista Geonorte*, v.2, p.1262-1272, 2012.

Zhang, J.; Su, Y.; Wu, J.; Liang, H. GIS based land suitability assessment for tobacco production using AHP and fuzzy set in Shandong province of China. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.114, p. 202-211, 2015.

Zolekar, R. B.; Bhagat, V. S. Multi-criteria land suitability analysis for agriculture in hilly zone: Remote sensing and GIS approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.118, p.300-321, 2015.

## **ANEXOS**



Figura 21. Ponto de observação P1 ( $05^{\circ}15'38.84''S$   $37^{\circ}19'52.70''W$ ). (a) Solo profundo com presença de pedregosidade. (b) Área com relevo predominantemente plano.



Figura 22. Ponto de observação P2 ( $05^{\circ}27'29.65''S$   $37^{\circ}19'35.16''W$ ). (a) Solo com bastante pedregosidade. (b) Área com relevo predominantemente plano.



Figura 23. Ponto de observação P3 ( $05^{\circ}34'49.23''S$   $37^{\circ}18'33.64''W$ ). (a e b) Ambiente com relevo plano.



Figura 24. Ponto de observação P4 ( $05^{\circ}41'41.56''S$   $37^{\circ}15'17.60''W$ ). (a) Solo com presença de pedregosidade. (b) Relevo plano.



Figura 25. Ponto de observação P5 ( $06^{\circ}03'58.69''S$   $37^{\circ}29'57.72''W$ ). (a e b) Área com afloramento de rochas e pedregosidade superficial.



Figura 26. Ponto de observação P6 ( $06^{\circ}05'47.44''S$   $37^{\circ}36'29.67''W$ ). (a e b) Relevo montanhoso.



Figura 27. Ponto de observação P7 ( $06^{\circ}08'52.26''S$   $37^{\circ}45'44.99''W$ ). (a e b) Relevo ondulado com afloramento de rochas.



Figura 28. Ponto de observação P8 ( $06^{\circ}09'44.37''S$   $37^{\circ}49'58.64''W$ ). (a e b) Região com relevo intercalado entre plano e montanhoso.



Figura 29. Ponto de observação P9 ( $06^{\circ}11'08.37''\text{S}$   $37^{\circ}51'13.17''\text{W}$ ). (a e b) Região com relevo ondulado.



Figura 30. Ponto de observação P10 ( $06^{\circ}12'08.47''\text{S}$   $37^{\circ}53'31.61''\text{W}$ ). (a e b) Solos em áreas com presença acentuada de pedregosidade.



Figura 31. Ponto de observação P11 ( $06^{\circ}11'21.85''\text{S}$   $37^{\circ}59'42.16''\text{W}$ ). (a) Solo com bastante pedregosidade. (b) Área com relevo acidentado.

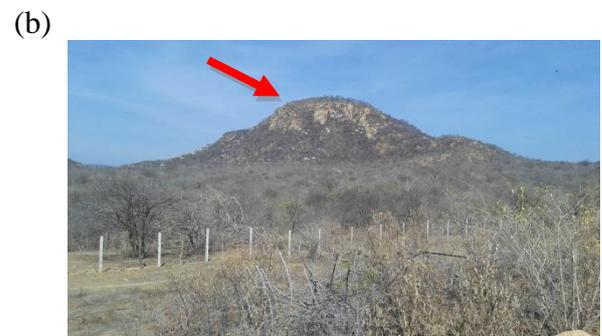


Figura 32. Ponto de observação P12 ( $06^{\circ}10'37.86''\text{S}$   $38^{\circ}02'08.87''\text{W}$ ). (a e b) Áreas com intensa presença de morros e relevo acidentado.



Figura 33. Ponto de observação P13 ( $06^{\circ}08'29.60''S$   $38^{\circ}05'17.37''W$ ). (a e b) Relevo plano e ao fundo a região serrana de Martins e Serrinha dos Pintos.



Figura 34. Ponto de observação P14 ( $06^{\circ}03'09.17''S$   $38^{\circ}11'58.39''W$ ). (a e b) Ambiente com relevo predominantemente plano.



Figura 35. Ponto de observação P15 ( $05^{\circ}59'03.65''S$   $38^{\circ}09'28.96''W$ ). (a e b) Ambiente com relevo plano e ao fundo região montanhosa.

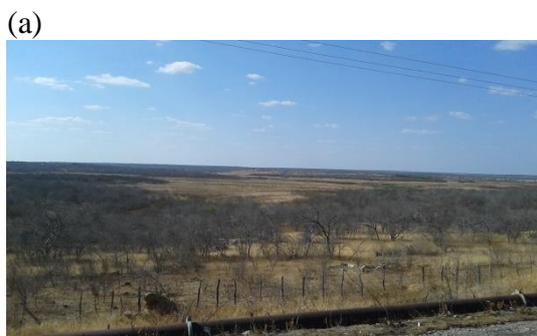


Figura 36. Ponto de observação P16 ( $05^{\circ}51' 54.32''S$   $38^{\circ}00'51.85''W$ ). (a) Áreas com relevo plano. (b) Presença de pedregosidade.

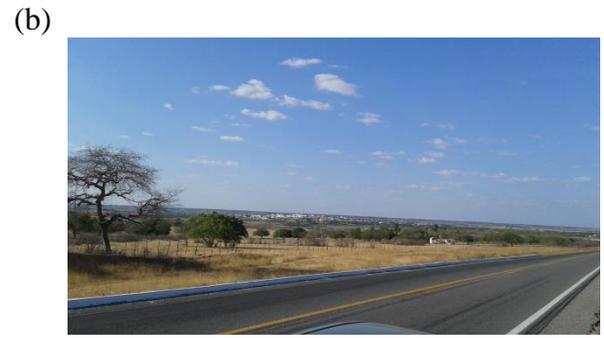


Figura 37. Ponto de observação P17 ( $05^{\circ}41'34.67''S$   $37^{\circ}47'47.04''W$ ). (a) Solo profundo e pedregosidade ausente. (b) Ambiente de relevo plano.



Figura 38. Ponto de observação P18 ( $05^{\circ}38'04.98''S$   $37^{\circ}48'01.37''W$ ). (a) Ambiente de relevo plano, sem pedregosidade aparente. (b) Borda da chapada do Apodi ao fundo.



Figura 39. Ponto de observação P19 ( $05^{\circ}30'26.54''S$   $37^{\circ}42'33.41''W$ ). (a) Ambiente de relevo plano e pedregosidade superficial. (b) Afloramento de rochas espaçadas.