



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

RAIMUNDO FERNANDES DE OLIVEIRA JÚNIOR

**MODELAGEM ESPACIAL DOS ATRIBUTOS DO SOLO SOB DIFERENTES
OCUPAÇÕES EM UMA MICROBACIA PERENE DE VERTENTE DO SEMIÁRIDO**

MOSSORÓ

2016

RAIMUNDO FERNANDES DE OLIVEIRA JÚNIOR

**MODELAGEM ESPACIAL DOS ATRIBUTOS DO SOLO SOB DIFERENTES
OCUPAÇÕES EM UMA MICROBACIA PERENE DE VERTENTE DO SEMIÁRIDO**

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

Orientador: Luis Cesar de Aquino Lemos Filho, Prof. Dr.

Co-orientador: Rafael Oliveira Batista, 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 (a) autor (a), 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 (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
BIBLIOTECA CENTRAL ORLANDO TEIXEIRA - CAMPUS MOSSORÓ
Setor de Informação e Referência

O48m Oliveira Junior, Raimundo

Modelagem espacial dos atributos do solo sob diferentes ocupações
em uma microbacia perene de vertente do semiárido / Raimundo
Fernandes de Oliveira Junior. - Mossoró, 2016.
102f: il.

Orientador: Prof. Dr. Luis César de Aquino Lemos Filho
Co-Orientador: Prof. Dr. Rafael Oliveira Batista

Dissertação (MESTRADO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA) -
Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Pró-Reitoria de Pesquisa e
Pós-Graduação

1. Solo. 2. Bacia hidrográfica. 3. Geoestatística. I. Título

RN/UFERSA/BOT038

CDD 631.4

RAIMUNDO FERNANDES DE OLIVEIRA JÚNIOR

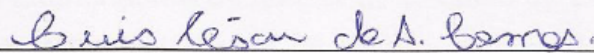
**MODELAGEM ESPACIAL DOS ATRIBUTOS DO SOLO SOB DIFERENTES
OCUPAÇÕES EM UMA MICROBACIA PERENE DE VERTENTE DO SEMIÁRIDO**

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

Defendida em: 25 de fevereiro de 2016.

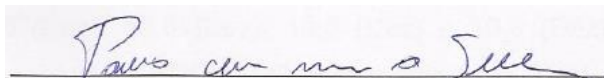
BANCA EXAMINADORA



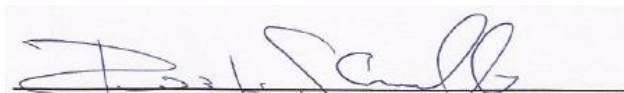
Luis César de Aquino Lemos Filho, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente



Rafael Oliveira Batista, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador



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



Rodrigo Guimarães de Carvalho, Prof. Dr. (UERN)
Membro Examinador

Ao meu querido pai Raimundo Fernandes de Oliveira, pelos ensinamentos de perseverança, fé e coragem que sempre me transmitiu e me guiou até este presente momento (In Memoriam).

Minha mãe Maria da Conceição Soares Fernandes, e a todos meus irmãos pelos ensinamentos de perseverança, fé e coragem ao qual segui para conquistar essa vitória.

Minha noiva Larissa Luana Nicodemos Ferreira pelo apoio fundamental para esta conquista.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Jesus Cristo (Deus) ao qual me concedeu a saúde física e mental para desenvolver este trabalho, pelas conquistas que tem me proporcionado em toda a caminhada da minha vida.

A toda minha família pelo apoio emocional e estrutural para conseguir esta conquista, em especial meus pais e meus irmãos Raniton Fernandes de Oliveira, Renata Fernandes de Oliveira e Romulo Fernandes de Oliveira.

A minha noiva Larissa Luana Nicodemos Ferreira e a toda sua família, pelo companheirismo, amor e assistência, pois sem ajuda crucial dela não teria conseguido terminar esta pesquisa.

Ao meu orientador Prof. D. Sc. Luis César de Aquino Lemos Filho, pela confiança, paciência e disponibilidade para transmitir os seus conhecimentos de maneira clara objetiva, tendo um papel fundamental no desenvolvimento desta pesquisa. Salientando-se que me ajudou a desenvolver profissionalmente e pessoalmente com seus ensinamentos e conselhos.

Aos professores Rafael Oliveira Batista, Paulo Cesar Moura da Silva, José Francismar de Medeiros, Carolina Malala Martins, Joaquim Odilon, Jeane Cruz Portela que contribuíram direta e indiretamente para conclusão desta pesquisa.

A Hermínio Sabino de Oliveira Júnior pela elaboração dos mapas essenciais ao desenvolvimento da pesquisa e todo seu apoio técnico, companheirismo e paciência.

A Joseane Dunga da Costa pelo apoio fundamental nas análises laboratoriais.

Aos Colegas de trabalho Antônio Osmar de Medeiros Júnior, Júnior, Leonardo, pelo apoio as coletas de campo.

Aos meus amigos Luiz Eduardo Vieira de Arruda, Hudson Salatiel Marques Vale, Danniely de Oliveira Costa, Eduardo Bruno da Silva Santos, Tayd Dayvison Custódio Peixoto, Laura Teixeira Leite Carlos, Raquel Fernandes, Ianne Tamara, Salma Luana, Clara Nívea Costa do Vale, Rafael Machado e Paulo César Pinto Cabral que sempre acreditaram e apoiaram nas dificuldades, fazendo com que conseguisse vencer as dificuldades e ultrapassar as barreiras.

A Welson Lima Simões pela disponibilidade em realizar as análises laboratoriais na EMBRAPA SEMI-ÁRIDO.

À Universidade Federal Rural do Semi-Árido pela formação acadêmica e oportunidade de concluir o Curso de Mestrado em Manejo de Solo e Água.

A CAPES pelo apoio financeiro da bolsa durante todo o programa.

A todos os docentes do programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água por contribuírem na minha formação profissional.

RESUMO

O conhecimento do uso e ocupação do solo em bacias hidrográficas é extremamente necessário para um gerenciamento integrado e sustentável de seus recursos, em especial água e solo. Aliado a isso, a espacialização dos atributos do solo tem papel fundamental no dimensionamento e entendimento dos impactos antrópicos em bacias hidrográficas. Logo, descrever e mapear o uso e ocupação do solo juntamente com a variabilidade espacial de seus atributos é de suma importância para se colocar em prática técnicas de manejo racional e adequada de exploração desses recursos. A geoestatística tem contribuído cada vez mais para pesquisa espacial de atributos do solo. Portanto, o objetivo deste trabalho de dissertação foi mapear o uso e ocupação do solo juntamente com seus atributos, utilizando SIG e geoestatística, numa microbacia hidrográfica perene de vertente, em condições semiáridas. A microbacia hidrográfica do Riacho da bica pertence ao médio curso da bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró, localizada no Oeste do estado do Rio Grande do Norte. Foram realizadas coletas inderformadas e deformadas do solo para realização das análises laboratoriais dos atributos físico-hídricos e químicos do solo. O estudo mostrou que o uso da geoestatística foi adequado para a mensuração da dependência espacial dos atributos do solo numa microbacia hidrográfica, sendo os modelos teóricos, exponencial e esférico, os que desempenharam melhores resultados. Dentre os atributos do solo estudados, os químicos sofreram maior interferência dos impactos antrópicos na área. Com esse trabalho foi possível concluir que, o mapa de uso e ocupação do solo, juntamente com os mapas de variabilidade espacial dos atributos do solo, mostrou-se uma poderosa ferramenta de avaliação de impactos ambientais em microbacias hidrográficas, além de contribuírem para o planejamento racional do uso e ocupação do solo em bacias hidrográficas de forma sustentável.

Palavras-chave: Uso e ocupação do solo. Geoestatística. Krigagem. Atributos do solo.

ABSTRACT

Knowledge of the use and occupation of land and water management is extremely necessary for an integrated and sustainable management of its resources, particularly water and soil. Allied to this, the spatial distribution of soil properties play a fundamental role in the design and understanding of human impacts on watersheds. Then, describe and map the land use and occupation with the spatial variability of its attributes is very important to put into practice techniques of rational and appropriate management of exploitation of these resources. Geostatistics has contributed increasingly to space research soil attributes. Therefore, the objective of this work dissertation was to map the use and occupation of land along with their attributes, using GIS and geostatistics, a perennial watershed shed in semi-arid conditions. The watershed of pecks Creek belongs to the middle reaches of the river basin of Apodi-Mossoró River, located in the west of Rio Grande do Norte state. inderformadas and misshapen collected soil to carry out the laboratory of physical water and soil chemical attributes analyzes were performed. The study showed that the use of geostatistics was suitable for the measurement of the spatial dependence of soil properties in a watershed, with the theoretical models, exponential and spherical, who played better results. Among the attributes of the soil studied the chemicals suffered greater interference of human impacts in the area. With this work it was possible to conclude that the map of land use and occupation, along with maps of spatial variability of soil attributes, proved to be a powerful assessment tool of environmental impacts on watersheds and contribute to the planning rational use and land use in watersheds sustainably.

Keywords: Use and occupation of soil. Geostatistics. Kriging. Soil properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Mapa de reconhecimento dos solos do município de Portalegre-RN. (Mapa de solos adaptado para a classificação de solos da EMBRAPA 2013).....	14
Figura 2	– Mapa de reconhecimento dos solos do município de Viçosa-RN. (Mapa de solos adaptado para a classificação de solos da EMBRAPA 2013).....	14
Figura 3	– Localização da microbacia do Riacho da Bica (entre os municípios de Portalegre e Viçosa/RN) juntamente com sua hidrografia.....	20
Figura 4	– : Mapeamento hidrogeodinâmico da microbacia hidrográfica.....	21
Figura 5	– Croqui de distribuição dos pontos amostrais.....	22
Figura 6	– Coleta de solo com estrutura indeformada.....	23
Figura 7	– Coleta de solo com estrutura deformada.....	23
Figura 8	– Mapa do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para o período de seca (Novembro de 2015).....	33
Figura 9	– Foto da microbacia hidrográfica destacando a vegetação no período de seca (Novembro de 2015); visualização da foz para as cabeceiras (a) e visualização das cabeceiras para a foz (b).....	33
Figura 10	– Mapa do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para o período de chuvoso (Fevereiro de 2016).....	34
Figura 11	– Foto da microbacia hidrográfica destacando a vegetação no período de chuvoso (Fevereiro de 2016); visualização da foz para as cabeceiras (a) e visualização das cabeceiras para a foz (b).....	34
Figura 12	– Desmatamento e queimada para prática de agricultura em áreas de topo de morro (a); Desmatamento e cultivo de mandioca em áreas de preservação permanente (b).....	35
Figura 13	– Proximidade do perímetro urbano com nascentes da microbacia (a) e resíduos sólidos encontrados na nascente da Bica (b).....	37
Figura 14	– Mapa do Uso e Ocupação do Solo.....	38
Figura 15	– Ilustração da vegetação caducifólia com formação de serrapilheira na microbacia.....	47
Figura 16	– Ilustração da lavanderia pública instalada em áreas de nascente na microbacia.....	50
Figura 17	– Mapas da variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo: (a) D_s , (b) D_p , (c) Areia, (d) Silte.....	52
Figura 18	– Mapas da variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo: (a) Argila, (b) CTA, (c) DTA (d) VTP (e).....	53
Figura 19	– Mapas da variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo: (a) θ_{PMP} (b) θ_{CC} , (c) P_d	54
Figura 20	– Mapas da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo: (a) pH, (b) CE, (c) MO, (d) Mg.....	55
Figura 21	– Mapas da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo: (a) Na, (b) Ca, (c) K, (d) P.....	56
Figura 22	– Mapas da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo: (a) Al, (b) SB.....	57
Figura 23	– Estatística descritiva gráfica para os dados de teor de areia (%) do solo na microbacia hidrográfica estudada: (a) Histograma de frequência e curva normal; (b) Curva de probabilidade normal; (c) gráfico Box & Plot.....	66
Figura 24	– Estatística descritiva gráfica para os dados de teor de silte (%) do solo na microbacia hidrográfica estudada: (a) Histograma de frequência e curva normal; (b) Curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....	67
Figura 25	– Estatística descritiva gráfica para os dados de teor de argila (%) do solo na microbacia hidrográfica estudada: (a) Histograma de frequência e curva	

	normal; (b) Curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....68
Figura 26	– Estatística descritiva gráfica para os dados da densidade do solo (D_s) na microbacia hidrográfica estudada: (a) Histograma de frequência e curva normal; (b) Curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....69
Figura 27	– Estatística descritiva gráfica para os dados da densidade de partícula (D_p) na microbacia hidrográfica estudada: (a) Histograma de frequência e curva normal; (b) Curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....70
Figura 28	– Estatística descritiva gráfica para os dados do volume total de poros (VTP) na microbacia hidrográfica estudada: (a) Histograma de frequência e curva normal; (b) Curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....71
Figura 29	– Estatística descritiva gráfica para os dados da umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) na microbacia hidrográfica estudada: (a) Histograma de frequência e curva normal; (b) Curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....72
Figura 30	– Estatística descritiva gráfica para os dados da umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) na microbacia hidrográfica estudada: (a) Histograma de frequência e curva normal; (b) Curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....73
Figura 31	– Estatística descritiva gráfica para os dados da porosidade drenável (P_d) na microbacia hidrográfica estudada: (a) Histograma de frequência e curva normal; (b) Curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....74
Figura 32	– Estatística descritiva gráfica para os dados de disponibilidade total de água (DTA) na microbacia hidrográfica estudada: (a) Histograma de frequência e curva normal; (b) Curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot...75
Figura 33	– Estatística descritiva gráfica para os dados de capacidade total de água (CTA) na microbacia hidrográfica estudada: (a) Histograma de frequência e curva normal; (b) Curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....76
Figura 34	– Estatística descritiva gráfica para os dados do potencial hidrogeniônico (pH) na microbacia hidrográfica estudada: (a) Histograma de frequência e curva normal; (b) Curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....77
Figura 35	– Estatística descritiva gráfica para os dados de condutividade elétrica (CE) na microbacia hidrográfica estudada: (a) Histograma de frequência e curva normal; (b) Curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....78
Figura 36	– Estatística descritiva gráfica para os dados de matéria orgânica (MO) na microbacia hidrográfica estudada: (a) Histograma de frequência e curva normal; (b) Curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....79
Figura 37	– Estatística descritiva gráfica para os dados de matéria orgânica (MO) na microbacia hidrográfica estudada: (a) Histograma de frequência e curva normal; (b) Curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....80
Figura 38	– Estatística descritiva gráfica para os dados de sódio (Na) na microbacia hidrográfica estudada: (a) Histograma de frequência e curva normal; (b) Curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....81
Figura 39	– Estatística descritiva gráfica para os dados de magnésio (Mg) na microbacia hidrográfica estudada: (a) Histograma de frequência e curva normal; (b) Curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....82
Figura 40	– Estatística descritiva gráfica para os dados de fósforo (P) na microbacia hidrográfica estudada: (a) Histograma de frequência e curva normal; (b) Curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....83
Figura 41	– Estatística descritiva gráfica para os dados de potássio (K) na microbacia hidrográfica estudada: (a) Histograma de frequência e curva normal; (b) Curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....84

- Figura 42 – Estatística descritiva gráfica para os dados de alumínio (Al) na microbacia hidrográfica estudada: (a) Histograma de frequência e curva normal; (b) Curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....85
- Figura 43 – Estatística descritiva gráfica para os dados da soma de bases (SB) na microbacia hidrográfica estudada: (a) Histograma de frequência e curva normal; (b) Curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Média de precipitação entre os anos de 2005 e 2015 para o município de Portalegre.....	18
Tabela 2	Média de precipitação entre os anos de 2005 e 2015 para o município de Viçosa.....	19
Tabela 3	– Extensão e distribuição percentual das unidades de mapeamento na microbacia hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró.....	38
Tabela 4	– Estatística descritiva para os parâmetros físico-hídrico do solo.....	40
Tabela 5	– Estatística descritiva para os parâmetros químicos do solo.....	40
Tabela 6	– Testes de normalidade, Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para os atributos físico-hídricos do solo.....	41
Tabela 7	– Testes de normalidade, Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para os atributos químicos do solo.....	42
Tabela 8	– Efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C$), alcance (A) e grau de dependência espacial (GD) para os modelos de semivariogramas testados (exponencial, esférico e gaussiano) para os atributos físico-hídricos do solo.....	44
Tabela 9	– Efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C$), alcance (A) e grau de dependência espacial (GD) para os modelos de semivariogramas testados (exponencial, esférico e gaussiano) para os atributos químicos do solo.	45

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 MANEJO DE BACIA HIDROGRÁFICA E A CONSERVAÇÃO DO SOLO.....	3
2.2 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E SEUS IMPACTOS SOBRE OS ATRIBUTOS DO SOLO.....	5
2.3 VARIABILIDADE ESPACIAL E MODELAGEM GEOESTATÍSTICA PARA ESPACIALIZAÇÃO DE ATRIBUTOS DO SOLO.....	7
2.4 USO DE GEOPROCESSAMENTO EM DIAGNÓSTICOS AMBIENTAIS.....	12
2.5 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DA ÁREA DE ESTUDO.....	13
2.5.1 Geologia e geomorfologia.....	13
2.5.2 Solo.....	13
2.5.3 Vegetação.....	16
2.5.4 Clima.....	17
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	20
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	20
3.2 ATRIBUTOS ANALISADOS E PLANO AMOSTRAL.....	22
3.3 AMOSTRAGEM DE SOLO.....	23
3.4 ANÁLISES FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO.....	24
3.4.1 Densidade do solo (Ds).....	24
3.4.2 Densidade de partícula (Dp).....	24
3.4.3 Classificação textural.....	25
3.4.4 Volume total de poros (VTP).....	25
3.4.5 Umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{CC}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}).....	25
3.4.6 Disponibilidade total de água (DTA).....	26
3.4.7 Capacidade total de água do solo (CTA).....	26
3.4.8 Porosidade drenável.....	26
3.5 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS QUÍMICOS.....	27
3.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	27
3.6.1 Estatística descritiva e análise exploratória dos dados.....	27
3.6.2 Estudos variográficos.....	28
3.6.3 Análise dos modelos de semivariogramas.....	29
3.6.4 Suportes computacionais para as análises geoestatísticas.....	29

3.7 Suportes computacionais para mapeamento dos atributos do solo e do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada.....	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
4.1 ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI).....	32
4.2 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO.....	35
4.3 ESTATÍSTICA DESCRITIVA E GEOESTATÍSTICA DOS ATRIBUTOS DO SOLO..	39
4.4 MAPEAMENTO DOS ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS E QUÍMICOS DO SOLO..	46
5. CONCLUSÕES.....	58
REFERÊNCIAS.....	59
APÊNDICE.....	66

1 INTRODUÇÃO

Em virtude do crescimento populacional, acentua-se cada vez mais a necessidade do uso dos recursos naturais, principalmente solo e água, nas bacias hidrográficas. O uso desses recursos pode levar a degradação dos mesmos, pois as ações antrópicas são responsáveis por modificações consideráveis no ambiente das bacias hidrográficas, tendo em vista sua influência quantitativa e qualitativa direta sobre os processos hidrológicos. Dessa forma, é muito importante o desenvolvimento de métodos ligados à gestão e manejo dos recursos naturais solo e água para minimizar os impactos sobre estes.

Atualmente o solo é um dos recursos naturais que mais sofre alteração em suas características, devido à exploração inadequada. A história do uso do solo mostra que essa alteração nem sempre dá lugar a um novo sistema ecológico sustentável, desse modo, solos utilizados intensamente e de forma inadequada, são levados à degradação.

O conhecimento do uso e ocupação do solo em bacias hidrográficas é extremamente necessário para um gerenciamento integrado e sustentável de seus recursos, em especial água e solo, ou seja, propiciar o desenvolvimento econômico, social e político sem agredir o meio ambiente, além de que o perfeito conhecimento dos recursos naturais (solos, água, vegetação, recursos minerais de interesse agrícola) e das características sócio-econômicas (população, produção, evolução da fronteira agrícola e uso atual das terras), constitui o embasamento indispensável para a avaliação das áreas passíveis de utilização com atividades agrícolas sustentáveis e das áreas que devem ser preservadas.

Logo, descrever e mapear o uso e ocupação do solo juntamente com a variabilidade espacial de seus atributos é de suma importância para se colocar em prática técnicas de manejo racional e adequada de exploração desses recursos. A geoestatística, cada vez mais usada em estudos ambientais, juntamente com as tecnologias de sistemas de informações geográficas (SIGs), auxiliam a avaliação e a compreensão do comportamento espacial dos recursos naturais, permitindo descrever de forma eficiente a continuidade espacial, sendo adequada para um manejo racional que busque a conservação do solo.

Uma das aplicações da geoestatística e dos SIGs é a elaboração de mapas temáticos que permitam analisar a variável em estudo. Esse artifício é cada vez mais utilizado para definir zoneamentos de áreas e, assim, identificar subáreas para fins de manejo diferenciado.

A área de estudo localizada microbacia hidrográfica do Riacho da Bica, região de grande relevância ecológica, pois esta localizada na bacia hidrográfica do Rio Apodi Mossoró na região serrana de Martins e Portalegre, destacando-se por apresentar um aporte pluviométrico diferenciado, quando comparado com as demais regiões semi-áridas do Brasil,

pois a influencia do relevo na circulação atmosférica, propicia uma maior precipitação histórica sendo comuns os anos com chuvas acima dos 1.400mm. Soma-se a esse fenômeno, o fato de existir um capeamento sedimentar no topo da serra, entre 630 m e 700 m, que absorve às águas pluviais e as redistribui, especialmente na vertente norte/nordeste, formando setores brejados no terço superior das vertentes, com nascentes perenes e uma mata subcaducifólia no seu entorno (Medeiros 2015).

Para a microbacia do Riacho da Bica, é necessário fornecer subsídios para o planejamento racional do uso dos seus recursos naturais, visando à preservação ambiental desta área de elevada importância regional, uma vez que o uso e ocupação na mesma encontra-se com sérios problemas em sua gestão ambiental, pois apresenta varias interferências ao longo da paisagem da microbacia, principalmente pela urbanização, desmatamentos em topos de morros, utilização recreacionais das áreas das nascentes e atividades agrícolas.

Em virtude do exposto, o estudo teve como objetivo mapear o uso e ocupação do solo juntamente com seus atributos, utilizando Sistema de Informações Geográficas (SIG) e geoestatística, numa microbacia hidrográfica perene de vertente, em condições semiáridas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 MANEJO DE BACIA HIDROGRÁFICA E A CONSERVAÇÃO DO SOLO

A necessidade de um gerenciamento integrado dos recursos naturais em uma bacia hidrográficas e suas sub-bacias, fez com que surgissem estudos sobre o manejo e a conservação dos recursos naturais, criação de conceitos sobre bacias hidrográficas, além da busca por soluções multidisciplinares no entorno destas.

Segundo Barrella (2001), a bacia hidrográfica pode ser definida como um conjunto de terras drenadas por um rio e seus afluentes, formada nas regiões mais altas do relevo por divisores de água, onde as águas pluviais, ou escoam superficialmente formando os riachos e rios, ou infiltram no solo para formação de nascentes e do lençol freático. As águas superficiais escoam para as partes mais baixas do terreno, formando riachos e rios, sendo que as cabeceiras são formadas por riachos que nascem em terrenos íngremes das serras e montanhas e à medida que as águas dos riachos descem, juntam-se a outros riachos, aumentando o volume e formando os primeiros rios, esses pequenos rios continuam seus trajetos recebendo água de outros tributários, formando rios maiores até desembocarem no oceano (Barrella, 2001).

As sub-bacias hidrográficas são definidas como um conjunto de terras drenadas por um rio principal e seus afluentes, ao qual são delimitadas pelos pontos mais elevados do terreno, que formam os divisores de água, demarcando seu contorno (Lacerda & Alvarenga, 2000). Segundo Santana (2003), as bacias podem ser desmembrada em número qualquer de sub-bacias, dependendo do ponto de saída considerada ao longo do seu eixo-tronco ou canal coletor. Cada bacia hidrográfica interliga-se com outra de ordem hierárquica superior, constituindo, em relação à última, uma sub-bacia. Portanto, os termos bacia e sub-bacias hidrográficas são relativos.

As microbacias hidrográficas consistem nas unidades naturais ideais para a gestão dos recursos naturais e implementação de políticas públicas conservacionistas e ambientais, haja vista que é nessas unidades que ocorrem os processos relacionados com o deslocamento das águas na superfície terrestre, a erosão hídrica e as atividades agropecuárias e florestais, com destaque para suas inter-relações e impactos sobre os recursos naturais, especialmente sobre o solo e as águas (Hollanda et al., 2012).

O manejo de bacias hidrográficas é definido como o processo de organizar e orientar o uso da terra e de outros recursos naturais numa bacia hidrográfica, a fim de produzir bens e serviços, sem destruir ou afetar adversamente o solo e a água (Brooks et al., 1991).

Os objetivos básicos do manejo de bacias hidrográficas são: tornar compatível a produção com a preservação ambiental; e concentrar esforços das diversas instituições presentes nas varias áreas de conhecimento, a fim de que todas as atividades econômicas dentro da bacia sejam desenvolvidas de forma sustentável e trabalhadas integradamente (Cecílio et al., 2007).

Souza & Fernandes (2000) relatam que o manejo integrado de bacias hidrográficas visa tornar compatível produção com preservação ambiental, buscando adequar a interveniência antrópica às características biofísicas dessas unidades naturais (ordenamento do uso/ocupação da paisagem, observadas as aptidões de cada segmento e sua distribuição espacial na respectiva bacia hidrográfica), sob gestão integrativa e participativa, de forma que sejam minimizados impactos negativos e se garanta o desenvolvimento sustentado.

Significativo percentual das áreas das bacias hidrográficas é constituído por espaço rural, pois as atividades agropecuárias são aquelas que ocupam maiores extensões de espaço geográfico. Os impactos gerados por essas atividades são de natureza tipicamente difusa, mas a utilização de uma bacia hidrográfica como unidade de estudo permite a pontualização desses problemas, tornando mais fácil a identificação de focos de degradação ambiental instalados e o grau de comprometimento da produção sustentada. Assim, a bacia hidrográfica torna-se a unidade de trabalho ideal para o planejamento de exploração que contemple a integração de recursos naturais e aspectos socioeconômicos, dentro de uma perspectiva de renda para o agricultor e de preservação ambiental (Santana, 2003).

A gestão dos recursos naturais deve contar com o estabelecimento de uma rede multi-institucional que permita o monitoramento ambiental e possibilite o embasamento para o planejamento e intervenções a serem realizadas nas diferentes bacias hidrográficas (Santana, 2003).

O ciclo degradador provocado por desmatamentos, exposição do solo às intempéries, intensa utilização de insumos e escoamento superficial gera impactos negativos decorrentes da erosão, fato esse agravado por um difícil e custoso controle. Para minimizar estes efeitos, é necessário estabelecer um sistema de conservação do solo, associado à observação do uso do solo em função da paisagem e da movimentação da água, em situação específica para cada área (Santos et al., 2007).

A conservação do solo em bacia hidrográfica é de suma importância para a manutenção de espécies vegetais, principalmente no entorno das nascentes e dos leitos dos cursos d'água, com tudo isso, deve-se haver uma gestão integrada das bacias hidrográficas com enfoque na preservação dos recursos naturais para as atuais e futuras gerações.

2.2 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E SEUS IMPACTOS SOBRE OS ATRIBUTOS DO SOLO

Carvalho & Neto (2011) afirmam que o homem desenvolveu ao longo da sua evolução histórica, grande capacidade de apropriação e transformação da natureza, a fim de satisfazer suas necessidades. Entretanto, essas alterações ambientais, são frutos de determinados momentos históricos, que deixaram de considerar inúmeras funções básicas dos ecossistemas, onde foram e são executadas, comprometendo, assim, o ambiente.

Todas as sociedades causam algum tipo de degradação, não importando sua condição socioeconômica, seu modo de produção, bem como o local onde se situam, ou seja, tanto no meio urbano quanto no rural, a degradação existe conforme o tipo e a intensidade das atividades realizadas (Meneguzzo, 2006).

O uso não planejado das terras, as ocupações residenciais em áreas de risco, a adoção de sistemas importados de cultivo, o descarte em ambientes inadequados dos efluentes industriais e domésticos não tratados e o desmatamento, principalmente, em áreas de recarga e de proteção, são algumas das muitas atividades que contribuem para a contínua degradação ambiental (Serato & Rodrigues, 2010; Freitas et al., 2001).

De acordo com Souza (2003), a degradação está fortemente relacionada a fatores de uso e ocupação do solo, que determinam os tipos e graus dos impactos, os quais atingem, de maneira diferenciada, o solo, o ar e a água.

Segundo Grego et al. (2005), o solo pode ser definido como um corpo natural complexo e dinâmico resultante da atuação conjunta de muitos fatores de formação como clima, organismos vivos, material de origem, relevo e tempo. Souza et al. (2004) informavam que os atributos do solo variam de um lugar para outro, apresentando continuidade espacial, dependendo do manejo adotado e das próprias características de origem do solo. O uso e ocupação do solo afeta, diretamente, o equilíbrio das condições de infiltração de água, para tanto os atributos físicos do solo precisam ser monitorados, pois o uso intensivo deste recurso pode provocar mudanças indesejáveis no seu comportamento físico-hídrico (Bertol et al. 2000).

A degradação dos atributos físicos do solo é um dos principais processos responsáveis pela perda da qualidade estrutural e aumento da erosão hídrica (Bertol et al., 2001). Algumas práticas de manejo do solo provocam alterações nesses atributos, principalmente na estrutura, podendo estas alterações serem permanentes ou temporárias. De acordo com Camargo & Alleoni (1997), as principais alterações são evidenciadas por aumento da densidade do solo

(Ds), redução do teor de matéria orgânica (MO), diminuição do volume total de poros (VTP), tamanho de agregados, taxa de infiltração de água e resistência à penetração das raízes.

Bertol et al. (1995), relatavam que, em geral, solos intensamente cultivados apresentam camadas compactadas, com redução do volume de macroporos e aumento de microporos, diminuindo o volume de poros ocupados por ar e aumentando a retenção de água. Em decorrência disso, observa-se redução da taxa de infiltração de água no solo, sendo esta a que melhor reflete o grau de degradação do sistema poroso, com consequente aumento das taxas de escoamento superficial e de erosão hídrica (Schick et al., 2000).

Macedo (2009) ao debater a sustentabilidade da produção agropecuária chama a atenção o uso do solo com a agricultura tradicional, com preparo contínuo do solo, e a extensão de áreas de pastagens degradadas. Dos componentes do manejo o preparo do solo talvez seja a atividade que mais exerce influência sobre a física do solo, pois atua, diretamente, na sua estrutura (Hamza & Anderson, 2005).

Em linhas gerais, o solo mantido em estado natural, sob vegetação nativa, apresenta características físicas como estrutura, permeabilidade, densidade e porosidade do solo adequado ao desenvolvimento normal das plantas (Andreola et al., 2000). Na medida em que se intensifica o uso agrícola, os atributos do solo sofrem alterações, geralmente adversas ao crescimento vegetal, que ficam mais nítidas quando os sistemas de uso são comparados com o estado do solo, ainda, sob vegetação natural (Santos, 2010; Santos et al., 2011a).

Flowers & Lal (1998) constataram em sua pesquisa que a compactação do solo pelo uso de máquinas, originada da compressão do solo insaturado, é a principal causa da degradação física dos solos agrícolas, e aumenta com a intensidade de tráfego em condições inadequadas de umidade do solo. A susceptibilidade à compactação pode ser alterada pelo acúmulo de matéria orgânica, porém, a textura do solo e seus efeitos associados à retenção de água, coesão e densidade do solo determinarão a magnitude e o tipo de efeito (Braidá et al., 2010).

A compactação causada pelo excessivo tráfego de máquinas e implementos agrícolas e pelo pisoteio animal em áreas sob integração lavoura-pecuária, tem sido uma das principais causas da degradação da capacidade produtiva de solos agrícolas (Albuquerque et al. 2001); entretanto, Moreira et al. (2012), ao avaliar a densidade do solo, porosidade de aeração e a permeabilidade do solo ao ar, concluíram que, após oito anos de integração lavoura-pecuária, não se confirmou a hipótese de que o aumento do pisoteio animal diminui a qualidade física do solo.

Os atributos físicos do solo classificam como intermediários e permanentes (Doran & Parkin, 1994). Em geral, os atributos físicos intermediários são mais utilizados como

indicadores da qualidade física do solo, por estarem sujeitos às maiores alterações, em função dos sistemas de manejo (Stefanoski et al., 2013). Como exemplos, tem-se: densidade do solo, resistência à penetração, permeabilidade, aeração, agregação, porosidade e umidade do solo. A textura do solo, mineralogia, densidade de partículas e cor, podem ser elencadas como atributos físicos permanentes, inerentes às propriedades de cada solo e que servem para classificá-lo pedologicamente.

Para Stefanoski et al. (2013), uma gestão segura dos recursos naturais, a análise quantitativa interpretação dos atributos físicos e físico-hídricos e principais alterações geradas na qualidade do solo são fundamentais.

2.3 VARIABILIDADE ESPACIAL E MODELAGEM GEOESTATÍSTICA PARA ESPACIALIZAÇÃO DE ATRIBUTOS DO SOLO

O estudo e o levantamento de atributos dos solos têm se tornado importante aliados na busca do uso sustentável e na preservação dos recursos naturais solo-água, onde o entendimento e a compreensão da dinâmica destes atributos são feitos por meio de estudos estatísticos, mais precisamente a geoestatística. Segundo Avanzi (2005), o estudo em bacias experimentais é fundamental para o entendimento da dinâmica hídrica, principalmente por ser possível visualizar as relações entre vegetação, clima, uso do solo e água no ciclo hidrológico.

Desde o início do século 20, o estudo da variabilidade espacial das propriedades do solo tem sido alvo de pesquisa (Vieira, 2000), porém a análise geoestatística é utilizada para detecção de variabilidade espacial do objeto de estudo em um campo amostral. A variabilidade espacial de atributos do solo vem sendo intensamente estudada por esta ferramenta, visando melhor analisar seu comportamento e sua distribuição no espaço. De acordo com Gomes (2005), a Krigagem, interpolador geoestatístico, é uma importante ferramenta para o mapeamento dos atributos do solo, sendo fundamental no auxílio à tomada de decisões no que concerne ao uso, conservação e manutenção da qualidade dos recursos presentes em bacias hidrográficas. Lima et al. (1999) relataram que os atributos do solo não são distribuídos espacialmente de modo desordenado, apresentando estrutura de correlação espacial.

A habilidade de descrever e mapear a variabilidade espaço-temporal das propriedades do solo é o primeiro passo para a construção de uma melhor metodologia em modelagem hidrológica, mostrando, portanto, a preocupação com a distribuição espacial da água no solo, principalmente, por que mesmo em um solo considerado homogêneo, a variabilidade espacial dos atributos podem ser grande (Lemos Filho, 2010).

Os métodos clássicos de estatística admitem aleatoriedade e independência dos valores amostrais, o que possibilita contornar o problema da variabilidade com um número de amostras adequado. Essa amostragem dá origem a um valor médio representativo, adotado nas decisões de natureza técnica e econômica.

A descrição do padrão espacial de um atributo do solo é possível desde que se considere a posição no espaço dos valores amostrais e a estrutura de dependência espacial da propriedade (Nielsen & Wendroth, 2003). As ferramentas da geoestatística são necessárias nesse processo. Uma limitação do seu uso é que a escala na qual as propriedades do solo usualmente apresentam dependência espacial implica em uma intensidade de amostragem incompatível com as grandes áreas.

Quando determinada variável oscila de um local para outro, com algum grau de organização ou continuidade, expresso por meio da dependência espacial, a estatística clássica pode dar lugar a uma estatística relativamente nova no contexto ambiental, a geoestatística (Vieira, 2000). A base da geoestatística vem da Teoria das Variáveis Regionalizadas de Matheron, onde a diferença nos valores de uma dada variável tomada em dois pontos do campo depende da distância entre eles (Vieira, 1995). Assim, a diferença entre os valores do atributo tomados em dois pontos mais próximos no espaço, deve ser menor do que a diferença entre os valores tomados em dois pontos mais distantes. Portanto, cada valor carrega consigo uma forte interferência dos valores de sua vizinhança, ilustrando a continuidade espacial (Isaaks & Srivastava, 1989).

A geoestatística tem por objetivos identificar na aparente desordem entre as amostras uma medida da correlação espacial, realizar estimativas de valores de locais não amostrados a partir de alguns valores conhecidos na população (krigagem) e identificar inter-relações de propriedades no espaço (análises de correlação entre atributos), além de permitir estudar padrões de amostragem adequados (Vieira, 2000).

Uma etapa fundamental que antecede a análise geoestatística é a realização de uma criteriosa análise exploratória dos dados. Deve-se analisar a normalidade dos dados, verificando se há candidatos a dados discrepantes (“outliers”) ou se há a necessidade da transformação dos dados para a sua normalização (Isaaks & Srivastava, 1989). Se a distribuição não é normal, significa que a média aritmética é uma medida bastante influenciada pelos valores extremos, não sendo uma medida de tendência central adequada para a representação dos dados (Eguchi, 2001). Segundo Folegatti (1996), para o ajuste de semivariogramas, a normalidade dos dados não é obrigatória, mas desejável. Caso a

distribuição não seja normal, mas seja razoavelmente simétrica, podem-se admitir as hipóteses necessárias à construção do semivariograma.

Quando se utiliza a ferramenta geoestatística para a análise dos dados, algumas hipóteses de trabalho são assumidas, principalmente a hipótese intrínseca. Por esta hipótese, a probabilidade de variação dos valores tomados entre pontos com a mesma distância de separação é igual, ou seja, a relação da dependência espacial é a mesma em qualquer posição de h (h é o vetor que separa dois pontos amostrais). É assumida a estacionariedade dentro do alcance da continuidade espacial. A estacionariedade de primeira ordem é a esperança do valor de um ponto no espaço ser igual à média, admitindo-se que a média amostral é igual à média populacional. A estacionariedade de segunda ordem assume que há uma variação da média, mas a variância é constante dentro dos limites da continuidade espacial (Isaaks & Srivastava, 1989; Vieira, 1995).

Para avaliar se há dependência espacial entre as amostras utiliza-se o semivariograma, que mede e descreve a dependência espacial e expressa o grau de semelhança entre o ponto e os seus vizinhos (Vieira, 2000). O semivariograma nada mais é do que um gráfico que representa a estimativa das semivariâncias dos dados $[\gamma(h)]$ em relação ao número (h) de vetores (lag ou espaçamento) que os separa. As observações realizadas a distâncias menores devem ser mais similares do que aquelas tomadas às distâncias maiores.

A estimativa das semivariâncias pode ser obtida pela expressão (Vieira, 1995; Reichardt & Timm, 2004):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

Onde $\gamma(h)$ é a semivariância dos dados distantes entre si de um número h de vetores de espaçamento ou lag l , $z(x_i)$ e $z(x_i+h)$ são os pares de valores medidos separados por um vetor lh , $N(h)$ é o número de pares de valores $[z(x_i) - z(x_i+h)]$ separados pelo vetor lh , e Z é a variável em estudo.

Ao semivariograma experimental é ajustada a curva que proporcione a máxima correlação possível com os pontos plotados. O modelo ajustado é chamado de modelo teórico do semivariograma. Na região onde se observa a continuidade espacial a geoestatística é aplicada com eficiência.

O procedimento de ajuste do semivariograma experimental não é direto e automático, como no caso de uma regressão. Esse procedimento é iterativo, pois o intérprete faz um primeiro ajuste e verifica a adequação do modelo teórico. A sensibilidade dos semivariogramas para detectar a variabilidade espacial das amostras está diretamente ligada

ao melhor ajuste dos dados experimentais ao modelo teórico do semivariograma. Ahn et al. (1999), descreveram as influências sobre a escolha do modelo teórico e ajuste desse modelo ao semivariograma experimental. O semivariograma teórico é uma curva ajustada ao semivariograma experimental que proporcione a máxima correlação possível com os pontos plotados.

O semivariograma é uma função crescente de h e, em geral, quanto mais próximos estiverem dois pontos amostrados, mais próximas serão suas respectivas semivariâncias. Quando ajustado um modelo ao semivariograma experimental, este possuirá parâmetros que são de suma importância na construção do mapa de contorno, que são: efeito pepita (C_0), variância estruturada (C_1), alcance (A) e patamar ($C = C_0 + C_1$). Na teoria, quando a distância h é zero, o valor do semivariograma é igual à zero, porém, na prática, isso não acontece e, à medida que h aproxima-se de zero, o valor do semivariograma tendo um valor positivo chamado efeito pepita (C_0). Se o semivariograma for constante, igual ao valor do patamar, obtém-se um efeito pepita (aleatório) puro, não existindo, assim, dependência espacial das amostras.

Os principais modelos para análise da variabilidade espacial de parâmetros do solo, pela geostatística são: o esférico, o exponencial e o gaussiano (Carvalho & Vieira, 2004). Nesse contexto, são também os mais empregados para estudo da continuidade espacial (Vendrusculo, 2003). O modelo de semivariograma teórico que melhor se ajusta ao semivariograma experimental é aquele que possuir o maior coeficiente de correlação e melhor grau de dependência espacial, determinado conforme a metodologia descrita por Cambardella et al. (1994).

A etapa de ajuste do modelo ao semivariograma experimental é de grande importância, pois pode influenciar os resultados posteriores. O modelo ajustado deve se aproximar ao máximo da descrição do fenômeno no campo. Gonçalves et al. (1999) comentavam que a verificação do melhor ajuste do modelo teórico ao semivariograma experimental pode ser realizada pela validação cruzada.

Há duas metodologias básicas para a realização da validação cruzada (Vieira, 1995). Pela primeira metodologia, pode-se ir ao campo com o mapa gerado pela interpolação e fazer uma reamostragem com a finalidade de comparar os valores amostrados com os valores indicados no mapa. Esta metodologia é pouco prática, pois depende da reamostragem para validar o semivariograma criado anteriormente. A metodologia mais utilizada para a realização da validação cruzada do semivariograma é a análise comparativa do valor estimado com o valor real do ponto amostral. Esta metodologia baseia-se na retirada de um valor

amostral do conjunto de dados amostrais, sendo então realizada a interpolação por krigagem daquele ponto (utilizando o modelo do semivariograma ajustado para estimar o valor desta amostra). Após a realização desta etapa em cada ponto amostral são comparados os valores reais com os estimados pela krigagem. O semivariograma melhor ajustado é aquele que possui o maior coeficiente de correlação entre os valores reais e estimados.

O processo de interpolação nada mais é do que, a partir de uma amostra, realizar inferências sobre a população, ou seja, realizar inferências para os pontos não amostrados a partir dos dados coletados nos pontos amostrais (Lemos Filho, 2010).

Existem muitos métodos de interpolação, tais como: método poligonal, triangulação, médias locais e inverso do quadrado das distâncias. Porém, a forma com que os dados variam de um local para outro no campo não segue nenhuma equação linear ou polinômio (Lemos Filho, 2010).

A krigagem é considerada o melhor método de interpolação linear não tendencioso e com variância mínima, pois considera os parâmetros do semivariograma. Nenhum outro método de interpolação é baseado na variância mínima entre as amostras (Isaaks & Srivastava, 1989).

Na realização da interpolação por krigagem são atribuídos pesos aos valores dos pontos amostrais. Estes pesos variam em função da distância que separa o ponto a ser estimado e o ponto de valor conhecido. Os pesos são atribuídos considerando-se o modelo do semivariograma. O valor do ponto desconhecido é então calculado pela solução de um sistema de matrizes (Nielsen & Wendroth, 2003).

Em síntese, a estatística clássica pressupõe não haver relação entre a variação e a distância entre pontos de amostragem, isto é, as variações são aleatórias no espaço, a geoestatística considera existir uma dependência da variação com o espaço de amostragem e que, em parte, essas variações são sistemáticas. Vale salientar que a estatística clássica e a geoestatística, ou estatística espacial, se completam (Oliveira et al.2009).

O estudo da variabilidade espacial de atributos do solo pela geoestatística, utilizando-se a técnica da krigagem, mostrou-se uma importante ferramenta na compreensão da dinâmica destes, podendo ser fundamental no auxílio à tomada de decisões no que tange ao uso, conservação e preservação da qualidade do recurso natural solo e dos demais recursos presentes em sub-bacias hidrográficas.

2.4 O USO DE GEOPROCESSAMENTO EM DIAGNÓSTICOS AMBIENTAIS

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).

O geoprocessamento trata informações alfanuméricas, associando-as a uma localização geográfica. Caracteriza-se como uma área multidisciplinar, envolvendo: ciência da computação, gerenciamento da informação, comunicação de dados, cartografia, sensoriamento remoto, fotogrametria, geografia, geodésica, estatística, etc. Os Sistemas de Informações Geográficas - SIGs têm características especiais, como: apresentam dados alfanuméricos e espaciais; possuem multidisciplinaridade (envolvem cartógrafos, analistas de sistemas e o usuário); os dados espaciais são de diversas origens (restituição cartográfica, GPS, imagens orbitais, ortofotos, levantamentos topográficos, digitalização de mapas analógicos); possuem softwares que interpretam o dado espacial armazenado em banco de dados, associando-o a outros atributos em tabelas de banco de dados, faz análises espaciais, exibe o resultado em outro mapa (temático) em vídeo local ou remoto (Internet, por ex.), imprime, gráfica ou grava em arquivo de saída; os dados devem ser modelados, tratados e atualizados pelas funções do sistema (Barcelos, 1992).

Os estudos de Mapeamento Temático visam a caracterizar e entender a organização do espaço, como base para o estabelecimento das bases para ações e estudos futuros. Exemplos seriam levantamentos temáticos (como geologia, geomorfologia, solos, cobertura vegetal), dos quais o Brasil ainda é bastante deficiente, especialmente em escalas maiores.

Segundo McBratney et al. (2003), o avanço da computação, possibilitou a integração da ciência do solo com sistemas computacionais, revolucionando e maximizando os trabalhos em pedologia, como levantamentos e o monitoramento de uso e ocupação dos solos, possibilitando a rápida sobreposição e atualização de mapas. A utilização do geoprocessamento em trabalhos de levantamento de solos mostra-se importante ferramenta para análise geoestatística e cruzamento dos diversos planos de informações gerados a partir dos atributos ambientais (Assad et al., 1998; Scull et al., 2005; Pedron et al., 2006a). O mapeamento dos atributos dos solos são fontes importantes de dados para estudos de gestão de bacias hidrográficas, avaliação ambiental, zoneamento e planejamento de terras, entre outros.

2.5 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DA ÁREA DE ESTUDO

2.5.1 Geologia e Geomorfologia

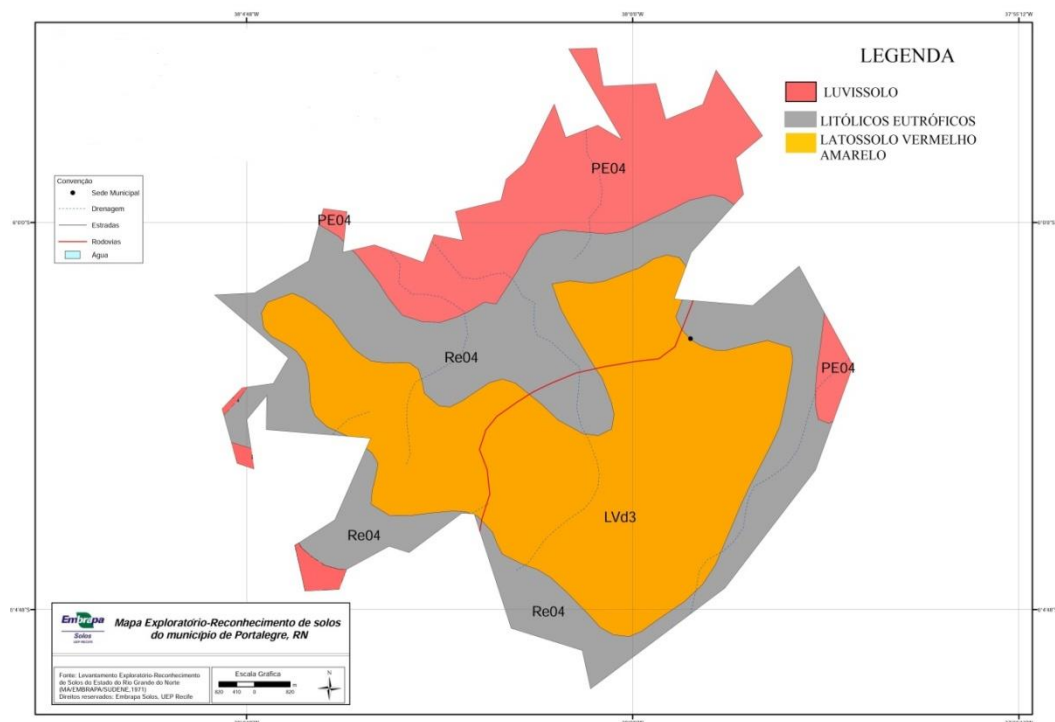
A área de estudo encontra-se numa região com altitudes de 186 a 660 metros localizados na formação geológica da serra de Martins. Situando-se na Depressão Sertaneja - terrenos baixos situados entre as partes altas do Planalto da Borborema e da Chapada do Apodi. Planalto da Borborema são terrenos antigos formados pelas rochas Pré-Cambrianas como o granito, onde se encontram as serras e os picos mais altos.

A área de estudo situa-se predominantemente sobre a Formação Serrana do Martins, de Idade Terciária Inferior, 60 milhões de anos, com arenitos, arenitos caulínicos, conglomerados e siltitos, que apresentam espessura em torno de 30 metros. Estes sedimentos geomorfologicamente constituem uma superfície tabular erosiva que é caracterizada por relevo residual de topo plano testemunho de superfície de erosão, geralmente limitada por escarpas erosivas, com diferentes níveis altimétricos, na realidade, restos de uma cobertura sedimentar outrora muito mais extensa que foi quase completamente erodida. Nas cotas mais baixas, encontram-se os paragnaisses com biotita da Formação Jucurutu, com idade do Pré-cambriano médio (aproximadamente 1.000 milhões de anos), juntamente com suítes de augen gnaisses granitóides com biotita.

2.5.2 Solo

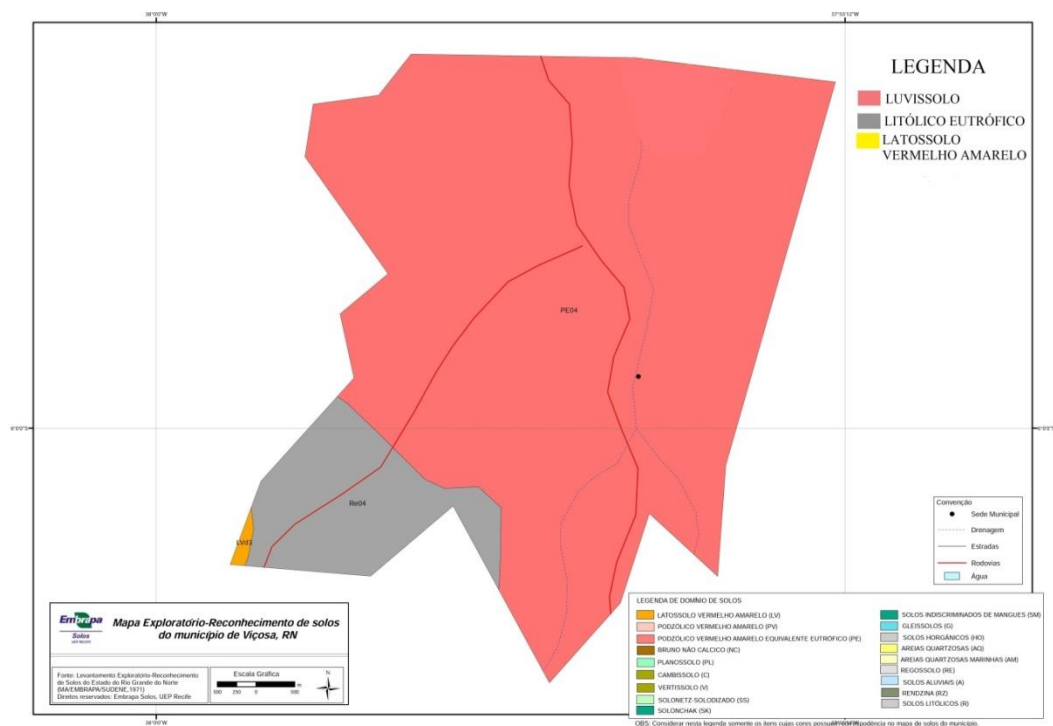
A área de estudo possui solos advindos da Formação da Serra do Martins que são associados aos platôs residuais do Cenozóicos, ao qual tinha como embasamento os morros testemunhos de antigas superfícies de erosão.

De acordo com Mapa Exploratório-Reconhecimento de solos do município de Portalegre e Viçosa/RN da EMBRAPA SOLOS, os principais tipos de solo encontrados na região da micro-bacia hidrográfica são: Latossolo Vermelho Amarelo, Luvissolos e Litólicos Eutróficos, demonstrado na Figura 1 e 2.



Fonte: Embrapa Solos UEP Recife (2006).

Figura 01. Mapa de reconhecimento dos solos do município de Portalegre-RN. (Mapa de solos adaptado para a classificação de solos da EMBRAPA 2013).



Fonte: Embrapa Solos UEP Recife (2006).

Figura 02. Mapa de reconhecimento dos solos do município de Viçosa-RN. (Mapa de solos adaptado para a classificação de solos da EMBRAPA 2013).

Os Latossolos Vermelho-Amarelos são identificados em extensas áreas dispersas em todo o território nacional associados aos relevos, plano, suave ondulado ou ondulado. Ocorrem em ambientes bem drenados, sendo muito profundos e uniformes em características de cor, textura e estrutura em profundidade. São muito utilizados para agropecuária apresentando limitações de ordem química em profundidade ao desenvolvimento do sistema radicular se forem álicos, distróficos ou ácricos. Em condições naturais, os teores de fósforo são baixos, sendo indicada a adubação fostatada. Outra limitação ao uso desta classe de solo é a baixa quantidade de água disponível às plantas. O relevo plano ou suavemente ondulado permite a mecanização agrícola. Por serem profundos e porosos ou muito porosos, apresentam condições adequadas para um bom desenvolvimento radicular em profundidade, sendo ampliadas estas condições se em solos eutróficos (Almeida et al., 2016).

Os Luvisolos são solos rasos a pouco profundos, com horizonte B textural (horizonte resultante de acumulação ou concentração absoluta ou relativa de argila decorrente de processos de iluviação e/ou formação *in situ*) de cores vivas e argila de atividade alta, apresentando horizonte A fraco, de cor clara, pouco espesso, maciço ou com estrutura fracamente desenvolvida. São moderadamente ácidos a neutros, com elevada saturação por bases. Apresentam frequentemente revestimento pedregoso na superfície (pavimento desértico) ou na massa do solo e normalmente possuem uma crosta superficial de 5 a 10 mm de espessura, além de altos teores de silte. São altamente susceptíveis aos processos erosivos, em virtude da grande diferença textural entre o horizonte A e o horizonte B. São de elevado potencial nutricional, decorrente das altas quantidades de nutrientes disponíveis às plantas e de minerais primários facilmente intemperizáveis e são ricos em bases trocáveis, especialmente o potássio. Ocorrem em relevo suave ondulado, o que facilita o emprego de máquinas agrícolas, podendo também ocorrer em relevo mais movimentado, podendo chegar a forte ondulado. As áreas onde estes solos ocorrem são bastante deficientes em água, sendo este o principal fator limitante para o uso agrícola. Estes solos ocupam grandes extensões nos estados do Ceará, Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte. As áreas onde são predominantes perfazem um total de 98.938 km² e constituem 13,3% da região semiárida (Jarbas et al., 2016).

Os Solos Litólicos ocorrem em toda região semiárida, principalmente nas áreas onde são encontrados afloramentos rochosos. São muito pouco desenvolvidos, rasos, não hidromórficos (sem a presença de água), apresentando horizonte A diretamente sobre a rocha ou horizonte C de pequena espessura. São normalmente pedregosos e/ou rochosos, moderadamente a excessivamente drenados com horizonte A pouco espesso, cascalhento, de

textura predominantemente média, podendo também ocorrer solos de textura arenosa, siltosa ou argilosa. Podem ser distróficos ou eutróficos, ocorrendo geralmente em áreas de relevo suave ondulado a montanhoso. Apresentam poucas alternativas de uso por se tratar de solos rasos ou muito rasos e usualmente rochosos e pedregosos. Situa-se em áreas acidentadas de serras e encostas íngremes, normalmente com problemas de erosão laminar e em sulcos severa ou muito severa. A pequena espessura do solo, com frequente ocorrência de cascalhos e fragmentos de rocha no seu perfil, grande susceptibilidade à erosão, normalmente nas áreas de relevo acidentado, onde estes solos ocorrem com maior frequência, são as limitações mais comuns para este tipo de solo. Nos solos distróficos e álicos, há o problema da baixa fertilidade natural. Distribui-se por toda a zona semiárida, usualmente em áreas mais acidentadas, em maiores extensões contendo afloramentos de rocha. As áreas onde predominam estes solos perfazem um total de 143.374 km² e constituem 19,2% da região semiárida (Jarbas et al., 2016).

Os solos presentes nos municípios de Martins e Portalegre favorecem a infiltração das águas, por serem em sua maioria arenosos, sendo dessa forma mais um fator propício à recarga natural subterrânea e a posterior formação de nascentes. Porém, a maioria deles não possui aptidão agrícola, apesar de serem utilizados para esse fim, necessitando de um manejo adequado para não comprometer as nascentes e suas zonas de recarga (Neres, 2014).

2.5.3 Vegetação

A microbacia hidrográfica do Rio Apodi Mossoró está inserida dentro do bioma caatinga, este bioma ocupa uma área de cerca de 844.453,00 quilômetros quadrados, o equivalente a 11% do território nacional. Engloba os estados Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Piauí, Sergipe e o norte de Minas Gerais. Rico em biodiversidade, o bioma abriga 178 espécies de mamíferos, 591 de aves, 177 de répteis, 79 espécies de anfíbios, 241 de peixes e 221 abelhas. Cerca de 27 milhões de pessoas vivem na região, a maioria carente e dependente dos recursos do bioma para sobreviver. A caatinga tem um imenso potencial para a conservação de serviços ambientais, uso sustentável e bioprospecção que, se bem explorado, será decisivo para o desenvolvimento da região e do país. A biodiversidade da caatinga ampara diversas atividades econômicas voltadas para fins agrosilvopastoris e industriais, especialmente nos ramos farmacêutico, de cosméticos, químico e de alimentos (MMA, 2016).

A vegetação predominante da área de estudo é a Caatinga Hiperxerófila, vegetação de caráter mais seco, com predominância de plantas caducifólias, além da abundância de

cactáceas e plantas de porte mais baixas e espalhadas. Entre outras espécies destacam-se a jurema-preta, mufumbo, faveleiro, marmeleiro, xique-xique e facheiro.

Na microbacia hidrográfica encontra-se um imponente dispersor de águas, o platô do maciço serrano de Martins e Portalegre, cujas características geoambientais favorecem a formação de setores de brejos de altitude sustentados por nascentes de água perenes, responsáveis pela formação de “ilhas” de mata úmida. Essas nascentes são justificadas por um contexto ambiental onde o maior aporte pluviométrico ($1.400 \text{ mm ano}^{-1}$), em conjunto com as características do capeamento sedimentar no topo da serra (Formação Serra do Martins), permite uma acumulação de água subterrânea que ressurge em uma altitude aproximada de 630 m, no contato entre a capa sedimentar e o embasamento cristalino, com direcionamento de norte/nordeste.

2.5.4 Clima

A localização geográfica da área de estudo se insere na zona tropical do planeta, com climas de elevadas temperaturas, sendo a pluviosidade dependente do regime sazonal. Os climas dessa forma exercem influências sobre a vida das populações e as atividades econômicas (Neres, 2014).

A microbacia hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró em estudo está inserida na área geográfica de abrangência do clima semiárido brasileiro, definida pelo Ministério da Integração Nacional, em 2005. Esta delimitação tem como critérios o índice pluviométrico, o índice de aridez e o risco de seca.

O Instituto do Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente - IDEMA (2008) subdividiu o clima do Estado Rio Grande do Norte em cinco tipos climáticos, aos quais são: o clima úmido, o subúmido, o subúmido seco, o semiárido e o semiárido intenso.

A microbacia hidrográfica de estudo é classificada nessa subdivisão em subúmido; possuindo um clima tropical chuvoso. Temperaturas médias anuais de máxima de 36°C e mínima de 21°C e umidade relativa do ar de 70% (IDEMA, 2008).

Apesar da microbacia hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró estar situada na região semiárida do Nordeste Brasileiro, esta possui um índice pluviométrico acima da média em relação às demais regiões do semiárido, favorecidas pela topografia (precipitações pluviométricas orográficas, presença de sistemas atmosféricos particulares, densa vegetação, entre outros fatores), o que propiciam recargas das águas subterrâneas, surgimento de nascentes perenes, córregos e cachoeiras.

Com base no banco de dados da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN, 2016), disponibilizado em seu web site, foi obtido a média das

precipitações pluviométricas dos últimos dez anos (2005 a 2015), para os municípios de Portalegre e Viçosa, que estão representados nas tabelas 1 e 2, a média pluviometria anual entre os anos supracitados são atingiu a marca de 1067,02 mm para o município de Portalegre e 889,09 mm para o município de Viçosa, com as máximas entre os meses de janeiro e maio.

Os ano mais chuvoso para os município de Portalegre e Viçosa foi o ano de 2009 com 1915,00 mm e 1380,7 mm respectivamente, já em 2010 o município de Potalegre teve a sua menor precipitação de 623,7 mm e Viçosa em 2012 teve a sua menor precipitação de 542,6 mm (EMPARN, 2016).

Tabela 1. Média de precipitação entre os anos de 2005 e 2015 para o município de Portalegre.

MESES 2005 A 2015	Média máxima /ano (mm)	Precipitação média (mm)
Janeiro	330,7/2011	116,56
Fevereiro	294,79/2009	165,51
Março	718,7/2008	244,01
Abril	586,6/2009	232,90
Maio	395,9/2009	179,33
Junho	214/2013	49,80
Julho	96,7/2009	29,03
Agosto	116/2009	15,83
Setembro	-	0
Outubro	65/2010	5,91
Novembro	25,7/2013	4,79
Dezembro	98,22013	23,31
Total		1067,02

Fonte: Adaptado da EMPARN 2016.

Tabela 2. Média de precipitação entre os anos de 2005 e 2015 para o município de Viçosa.

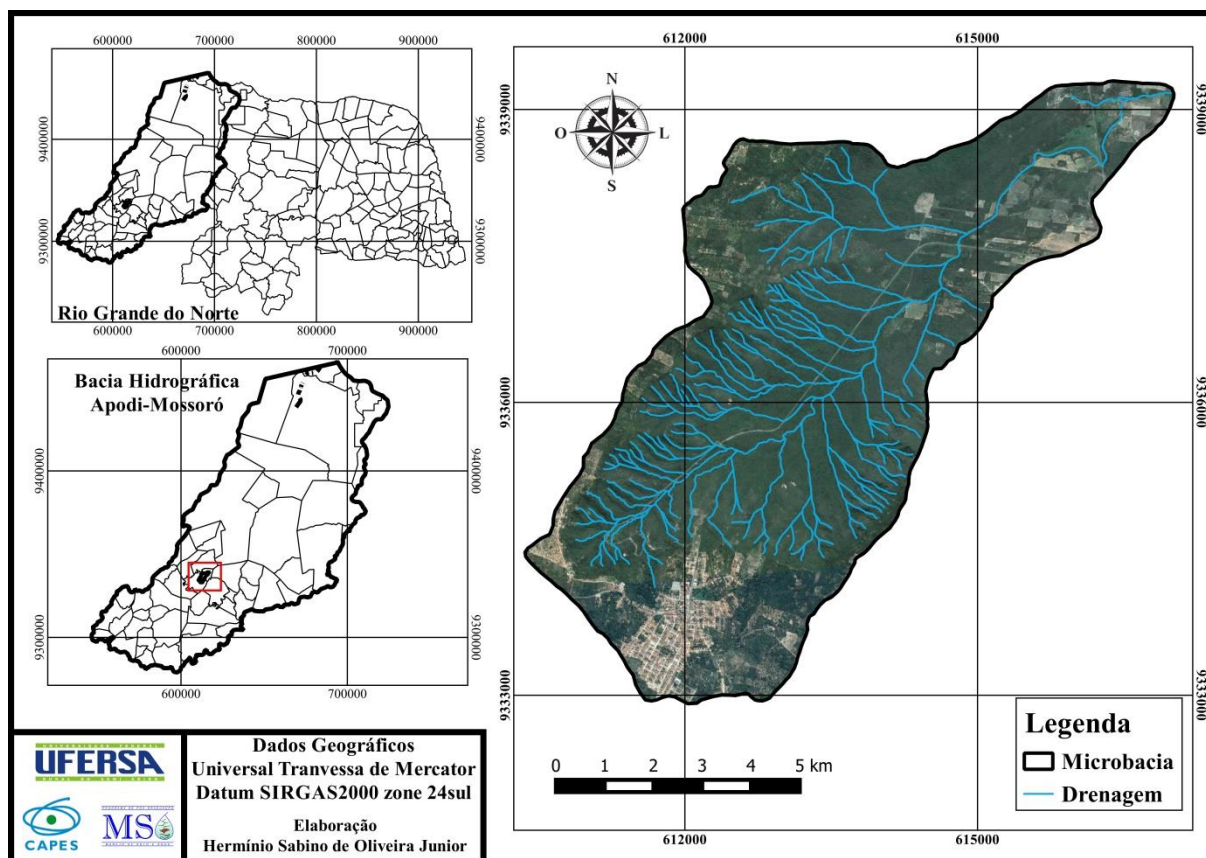
MESES 2005 A 2015	Média máxima /ano (mm)	Precipitação média (mm)
Janeiro	264,3/2012	96,73
Fevereiro	304,5/2009	152,21
Março	616,6/2008	206,92
Abril	395,8/2009	209,54
Maio	269,5/2009	126,16
Junho	135/2013	45,33
Julho	49,8/2011	13,31
Agosto	107/2009	10,51
Setembro	-	0
Outubro	54,6/2011	4,96
Novembro	29/2011	4,33
Dezembro	57/2010	19,85
Total		889,09

Fonte: Adaptado da EMPARN 2015.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

Á área de estudo, com aproximadamente 1895,00 ha, compreende a microbacia hidrográfica do Riacho da Bica na região serrana entre os municípios de Portalegre e Viçosa, mais precisamente no médio curso superior da bacia hidrográfica do Rio Apodi- Mossoró, inseridos na mesorregião Oeste Potiguar do estado do Rio Grande do Norte e na microrregião de Pau dos Ferros, conforme pode ser observado na Figura 3.



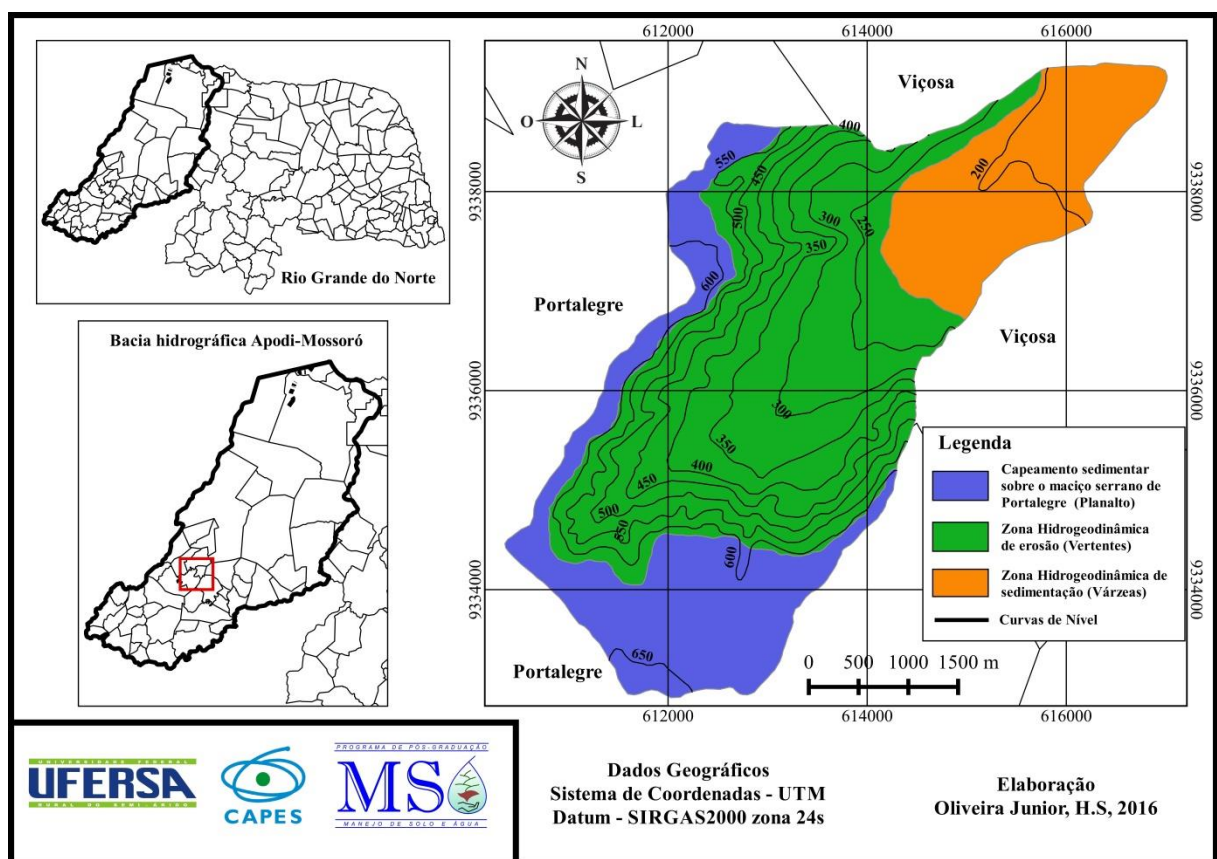
Fonte: Acervo do pesquisador (2016).

FIGURA 03. Localização da microbacia do Riacho da Bica (entre os municípios de Portalegre e Viçosa/RN) juntamente com sua hidrografia.

Na microbacia hidrográfica de estudo predominam recursos hídricos intermitentes sazonais. Porém, no médio curso da bacia hidrográfica, encontra-se um imponente dispensor de águas, o platô do maciço serrano de Martins e Portalegre, cujas características geoambientais favorecem a formação de setores de brejos de altitude sustentados por nascentes de água perenes, responsáveis pela formação de “ilhas” de mata úmida. Essas nascentes são justificadas por um contexto ambiental onde o maior aporte pluviométrico, em conjunto com as características do capeamento sedimentar no topo da serra (Formação Serra

do Martins), permite uma acumulação de água subterrânea que ressurge em uma altitude aproximada de 630 m, no contato entre a capa sedimentar e o embasamento cristalino, com direcionamento de norte/nordeste. O clima da microbacia, conforme a classificação climática de Köppen é considerada tropical chuvoso, com inverno seco e com a estação chuvosa prolongando-se até o mês de julho.

A altitude da microbacia de estudo varia de 186 a 660 metros, conforme se verifica nas curvas de nível no mapa da Figura 4. Ainda nessa figura, visualiza-se a presença de um capeamento sedimentar sobre um maciço serrano, onde predominam Latossolos Vermelho Amarelo. Além disso, identificam-se a zona hidrogeodinâmica de sedimentação (várzea), onde predominam os Luvisolos, e a zona hidrogeodinâmica de erosão (vertentes), onde predominam os Neossolos Litólicos. A predominância desses tipos de solos em cada uma dessas zonas é confirmada através dos mapas de solos adaptado para a classificação de solos da EMBRAPA (2013), conforme as Figuras 1 e 2.



Fonte: Acervo do pesquisador (2015).

FIGURA 04. Curvas de nível e mapeamento hidrogeodinâmico da microbacia hidrográfica.

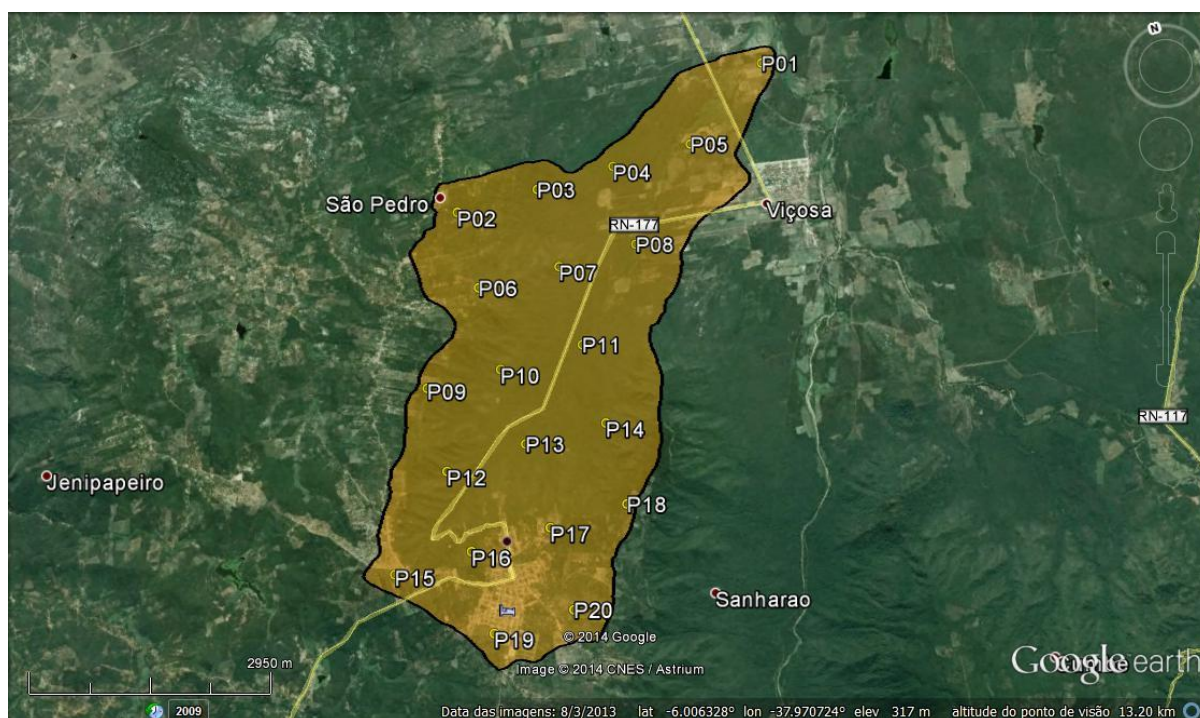
3.2 ATRIBUTOS ANALISADOS E PLANO AMOSTRAL

Para elaboração do plano amostral, realizou-se a delimitação da microbacia hidrográfica, através das curvas de nível e observação dos divisores topográficos utilizando ferramentas de um SIG (Google Earth, 2016).

Foi estabelecido um grid equidistante sobre a microbacia hidrográfica, onde cada ponto georreferenciado (GPS) do grid foi um ponto amostral no campo, para realização de amostragem de solo e caracterização dos atributos físico-hídricos e químicos em 20 (vinte) pontos amostrais (Figura 5).

Todo o estudo foi realizado considerando a profundidade no perfil do solo de 0 - 0,30 m, onde foram coletadas amostras deformadas e indeformadas do solo com fins de realizar as análises físico-hídricas e químicas do solo.

Os atributos avaliados dos solos foram: físico-hídricos (densidade do solo (D_s); densidade de partícula (D_p); volume total de poros (VTP); porosidade drenável (P_d); teor de areia, silte e argila; umidade na capacidade de campo (θ_{CC}); umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}); disponibilidade total de água (DTA) e capacidade total de água no solo (CTA)) e químicos (potencial hidrogeniônico (pH); condutividade elétrica (CE); matéria orgânica (MO); cálcio (Ca^{2+}); sódio (Na^+); magnésio (Mg^{2+}); fósforo (P); potássio (K^+); alumínio (Al^{3+}) e soma de bases (SB)).



Fonte: Adaptado do Google Earth (2016).

Figura 05. Croqui de distribuição dos pontos amostrais.

3.3 AMOSTRAGEM DE SOLO

Para a coleta das amostras de solo com estrutura indeformada foi utilizado amostrador do tipo Uhland, com anéis volumétricos de dimensões conhecidas para avaliação da densidade do solo. Foi coletada uma amostra por ponto, totalizando 20 amostras na área em estudo. Após a coleta, os anéis foram tampados e, posteriormente, levados ao laboratório com o cuidado para manter a estrutura e a umidade do solo. O excesso de solo presente na amostra foi retirado no campo, mantendo a massa de solo contida no anel volumétrico.



Fonte: Acervo do pesquisador (2015).

Figura 06. Coleta de solo com estrutura indeformada.

As coletas de amostras com estrutura deformada foram realizadas nos 20 (vinte) pontos amostrais, com auxílio de uma “boca de lobo”, sendo transferidas para sacos plásticos devidamente identificados. O beneficiamento das amostras foi realizado em laboratório, na sala de beneficiamento de amostras de solo, as mesmas foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneiras de malha com abertura 2 mm, obtendo assim a terra fina seca ao ar (TFSA).



Fonte: Acervo do pesquisador (2016).

Figura 07: Coleta de solo com estrutura deformada.

3.4 ANÁLISES FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO

As determinações de textura, densidade do solo, densidade de partículas e dos atributos químicos do solo foram feitas no Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta (LASAP) da UFERSA, os procedimentos foram realizados com três repetições, exceto a densidade do solo.

Todas as análises físicas do solo foram realizadas de acordo com a metodologia descrita no Manual de Métodos de Análise do Solo da EMBRAPA (Donagema et al., 2011).

3.4.1 Densidade do solo (Ds)

Após coleta, as amostras foram encaminhadas ao LASAP e levadas à estufa a 105°C por 24 horas para secagem.

$$D_s = \frac{M_s}{V} \quad (1)$$

em que:

Ds: densidade do solo (g cm^{-3});

Ms: massa de solo seco em estufa (g);

V: volume de solo (cm^3).

3.4.2 Densidade de partículas (Dp)

As 20 amostras de solo (deformadas) foram enviadas ao LASAP, para determinação da massa de solo seco (Ms) e do volume ocupado pela partícula sólida (Vs), conforme metodologia do manual de análises de solos da EMBRAPA (Donagema et al., 2011). O procedimento foi realizado com três repetições. A densidade de partículas foi calculada empregando a equação 2, descrita em Reichardt & Timm (2004):

$$D_p = \frac{M_s}{V_s} \quad (2)$$

em que:

Dp: densidade de partículas (g cm^{-3});

Ms: massa de solo seco em estufa (g);

Vs: volume de solo seco (cm^3).

3.4.3 Classificação textural

As amostras de solo foram enviadas para o LASAP, para a determinação do conteúdo de argila, silte e areia. Na determinação da granulométrica (por dispersão total) utilizou-se o Método da Pipeta.

3.4.4 Volume Total de Poros (VTP)

A porosidade total calculada ou volume total de poros (VTP) foi obtida em porcentagem pela relação:

$$\text{VTP} = 100 \cdot \left(1 - \frac{D_s}{D_p} \right) \quad (3)$$

em que:

VTP: volume total de poros (%);

D_s : densidade do solo (g cm^{-3});

D_p : densidade de partícula (g cm^{-3}).

3.4.5 Umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{CC}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP})

A obtenção da umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{CC}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) foi obtida por meio do método da centrifuga realizada no Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta da Embrapa Semi-Árido, em Petrolina - PE, onde as amostras das camadas de 0,0-0,20 m de profundidade foram saturadas, por 72 horas, com uma lâmina de água de aproximadamente 4 cm de altura, para avaliação de seu conteúdo volumétrico na saturação. Com a saturação do solo o processo de centrifugação gera tensão de umidade decrescente ao longo do eixo de rotação da centrífuga (Silva & Azevedo, 2002). Para este estudo foram aplicadas rotações de 800 e 9.200 rpm, correspondentes às tensões médias de 10 e 1500 KPa; para tanto foi utilizado um período de centrifugação de 3 horas (Silva & Azevedo, 2002). Após o período de centrifugação foi realizada a pesagem da umidade restante nas amostras. Os procedimentos de cálculo para a conversão de rotação em tensão e as características da centrífuga encontram-se descritos em Silva & Azevedo (2001).

3.4.6 Disponibilidade total de água (DTA)

A água compreendida entre a capacidade de campo, no limite superior e o ponto de murcha permanente, no limite inferior corresponde à água total disponível. A disponibilidade total d'água do solo é uma característica do solo, a qual corresponde à quantidade de água que o solo pode reter ou armazenar por determinado tempo (Bernardo et al., 2011), equação 4:

$$DTA = \frac{C_c - P_m}{10} \times D_s \quad (4)$$

em que:

DTA – disponibilidade total de água, mm cm⁻¹;

C_c – capacidade de campo, % em peso;

P_m – ponto de murchamento, % em peso;

D_s – densidade do solo, g cm⁻³.

3.4.7 Capacidade total de água do solo (CTA)

A capacidade total de água do solo somente deve ser calculada até a profundidade do solo correspondente a profundidade efetiva do sistema radicular, dependendo da cultura e da profundidade do solo da região (Bernardo et al., 2011), pode ser obtida pelo produto da disponibilidade total de água e a profundidade do sistema radicular. Conforme Pinheiro (2010), a profundidade efetiva das raízes de Caatinga preservada variam de 0,36 m a 0,73 m; para procedimento de cálculo foi considerada uma profundidade de 0,40 m, estando dentro dos valores limites, equação 5:

$$CTA = DTA \times Z \quad (5)$$

em que:

CTA – capacidade total de água no solo, mm;

DTA – disponibilidade total de água, mm cm⁻¹;

Z – profundidade efetiva do sistema radicular, cm.

3.4.8 Porosidade drenável (Pd)

A porosidade drenável, equivale à proporção de macroporos responsáveis pela drenagem e aeração do solo. Representa a fração do volume do solo por onde a água livre se movimenta, ou seja, a água que excede a capacidade de campo e que deve ser drenada (Pizarro, 1978). Pode ser determinada com base no volume total de poros e na umidade volumétrica na capacidade de campo, conforme Mello et al. (2002), equação 6:

$$PD = VTP - \theta_{CC} \quad (6)$$

em que:

PD – porosidade drenável, $m^3 m^{-3}$;

VTP – volume total de poros, decimal;

θ_{CC} – umidade volumétrica na capacidade de campo, $m^3 m^{-3}$.

3.5 DETERMINAÇÃO DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS

Os atributos químicos do solo analisados foram: pH em água, na proporção de 1:2,5; condutividade elétrica do extrato de saturação (CE); cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) trocáveis, empregando complexometria após extração com KCl 1 mol L^{-1} ; alumínio (Al^{3+}) trocável, por extração com KCl 1 mol L^{-1} e titulado com NaOH 0,025 mol L^{-1} ; fósforo (P) disponível, sódio (Na^+) e potássio (K^+), extraídos em Mehlich⁻¹, sendo o P disponível determinado por espectrofotometria do visível e os íons Na^+ e K^+ por fotometria de chamas. A partir das análises realizadas foram obtidos os índices: soma de bases (SB). Sendo determinados segundo o manual de métodos de análises de solo da Embrapa (Donagema et al., 2011).

3.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

3.6.1 Estatística descritiva e análise exploratória dos dados

Esta análise tem como objetivo visualizar o comportamento geral e identificar possíveis valores discrepantes, sem considerar a posição geográfica dos dados observados, a qual é fundamental para a tomada de decisões sobre os procedimentos a serem realizados.

Antes das análises geoestatísticas, foram empregadas análises estatísticas (clássica) como as medidas de tendência ou posição central (média, mediana, valores máximo e mínimo), as medidas de dispersão (desvio padrão, variância e coeficiente de variação) e as medidas da forma da dispersão (simetria e curtose).

A média e a mediana permitem a verificação de um possível ajuste dos dados à distribuição normal e o desvio padrão e o coeficiente de variação dão ideia da magnitude de variabilidade dos dados.

Essas análises foram aplicadas em todas as variáveis (atributos) estudadas na microbacia, no intuito de observar o comportamento da distribuição dos dados, considerando a posição geográfica de cada observação, sendo auxiliar na decisão da hipótese de estacionaridade a ser assumida nas análises de geoestatística.

O procedimento da análise consiste na verificação de tendência dos dados e sua remoção, quando constatada, por meio da avaliação a identificação de dados discrepantes (outliers) e, por último, a avaliação da normalidade da diferença entre pares de pontos, por meio de histograma de frequências, curvas de probabilidade normal e testes de aderência a normalidade de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk.

3.6.2 Estudos variográficos

O ajuste do modelo teórico ao semivariograma experimental é um dos procedimentos de maior relevância para a realização de interferências e para a interpretação de fenômenos com continuidade espacial e temporal. Esta etapa deve ser feita com muito rigor, devido ao fato de a sensibilidade dos semivariogramas para detectar a variabilidade espacial do fenômeno estar diretamente ligada ao modelo ajustado. Portanto, devem ser analisadas as possibilidades de ajuste, de forma que o modelo escolhido se aproxime ao máximo do fenômeno real, resultando numa maior veracidade das estimativas. Este ajuste é feito por métodos matemáticos, estimando-se parâmetros que estruturam tais modelos (efeito pepita, contribuição ou patamar e alcance).

As expressões matemáticas destes modelos são:

a) Modelo esférico de Martheron (equação 7)

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \times \left[\frac{3h}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & 0 \leq h \leq a \\ C_0 + C_1 & h > a \end{cases} \quad (7)$$

em que $C_0 + C_1$ é o patamar, a é o alcance e h é a distância euclidiana.

b) Modelo exponencial de Formery (equação 8)

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp \left(-\frac{h}{a} \right) \right] \quad h \geq 0 \quad (8)$$

c) Modelo gaussiano ou parabólico (equação 9)

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left\{ 1 - \exp \left[-\left(\frac{h}{a} \right)^2 \right] \right\} \quad h \geq 0 \quad (9)$$

O alcance desses modelos tem significado puramente analítico, denominado alcance teórico e são distintos devido à característica individual de cada modelo em atingir o patamar.

Dessa maneira, o alcance prático é denominado por $2/3$, 3 e $3^{(1/2)}$ vezes o alcance teórico, para o modelo esférico, exponencial e gaussiano, respectivamente.

Os métodos matemáticos de ajuste podem ser divididos em dois grupos: ajuste do modelo ao semivariograma experimental e ajuste do modelo diretamente aos dados observados.

3.6.3 Análises dos modelos de semivariogramas

O modelo de semivariograma teórico que melhor se ajusta ao semivariograma experimental é aquele que possuir o maior coeficiente de correlação

Para analisar a modelagem do semivariograma aos dados experimentais e assim obter estatisticamente o melhor modelo a ser considerado, foram estabelecidos os critérios do maior grau de dependência espacial, segundo Mello et al. (2005). O grau de dependência espacial é calculado pela equação 10.

$$GD = \left(\frac{C_0}{C_0 + C_1} \right) 100 \quad (10)$$

em que C_0 é o efeito pepita, C_1 é a variância estruturada e $C_0 + C_1$ é o patamar.

De acordo com Cambardella et al. (1994), se o efeito pepita for menor que 25% do patamar ($GD < 25\%$), isso indica uma variável com forte dependência espacial. Se o efeito pepita permanecer entre 25% e 75% do patamar ($25\% \leq GD \leq 75\%$), indica uma variável com moderada dependência espacial. Porém, se o efeito pepita corresponder de 75% a 100% do patamar ($75\% < GD < 100\%$) representa uma variável com fraca dependência espacial. Pode ocorrer, também, de o efeito pepita corresponder exatamente a 100% do patamar ($GD = 100\%$). Neste caso, o semivariograma possui efeito pepita puro.

3.6.4 Suportes computacionais para as análises geoestatística

Os dados foram georreferenciados em coordenadas métricas e num sistema matricial que permite aplicações com mínima deformação da área.

As análises de estatística descritiva e geoestatísticas, para todas as variáveis, foram realizadas pelos programas Statistica Development Environment, GS+ (Gamma Design Software, 2004) e GeoR (Ribeiro Júnior & Diggle, 2001). Após as análises exploratórias, foram construídos os semivariogramas experimentais. A partir disso, foram ajustados os semivariogramas teóricos para os modelos esférico, exponencial e gaussiano.

Posteriormente, foram tomados todos os parâmetros necessários para a realização da interpolação dos resultados pelo processo de krigagem. Também foram calculadas as relações

entre o efeito pepita e o patamar ($C_0/C+C_0$), para cada modelo ajustado. Esta relação, segundo Cambardella et al. (1994), mede o grau da dependência espacial do atributo amostrado.

Para os atributos que apresentaram uma estrutura de dependência espacial, os mapas de contorno foram construídos por meio do interpolador geoestatístico de Krigagem (Vieira, 2000), por meio da equação 9:

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i) \quad (11)$$

em que $z^*(x_0)$ é a variável interpolada, λ_i são os pesos associados aos pontos vizinhos e $z(x_i)$ o valor da variável no ponto vizinho. Quando não detectada a estrutura de dependência espacial do atributo, o mapa foi construído por meio do interpolador inverso quadrado da distância (IDW), utilizando a seguinte equação 10 (Mello et al., 2003; Câmara & Carvalho, 2004):

$$X_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^2} \times X_i \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^2} \right)} \quad (12)$$

em que d é a distância entre o i -ésimo ponto de vizinhança e o ponto amostrado, X_p é a variável interpolada e X_i o valor da variável i -ésima localidade vizinha.

Partindo da krigagem e do IDW, foram elaborados os mapas de variabilidade espacial, com auxílio do Surfer 11.0 (2012), dos atributos do solo na área em estudo, para, a partir daí, fazer a análise da correlação espacial existente entre as mesmas, visando fornecer subsídios para identificar as diferentes zonas homogêneas na área.

3.7 SUPORTES COMPUTACIONAIS PARA MAPEAMENTO DOS ATRIBUTOS DO SOLO E DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI)

Para elaboração dos mapas temáticos com a variabilidade espacial dos atributos do solo na microbacia hidrográfica, foi utilizado um software de modelagem espacial (Surfer 11.0, 2012), ao qual foi utilizada a ferramenta de geoestatística (krigagem) para espacialização dos dados.

Para a elaboração do Mapa do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), foi utilizado o software livre QGIS versão 2.12.1 (2006). O estabelecimento das classes de vegetação da microbacia em estudo resultou das variações identificadas pelo NDVI, permitindo assim, a formulação de um Índice de Cobertura Vegetal. Este índice foi determinado com imagens de satélite do LANDSAT 8 com datas de Novembro de 2015

(período das coletas de solo) e Fevereiro de 2016, disponibilizado no web site do Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais - INPE.

O NDVI possibilita determinar a densidade de fitomassa foliar fotossinteticamente ativa por unidade de área (quanto maior este índice de vegetação, mais densa é a fitomassa verde). À medida que aumenta a quantidade de vegetação verde aumenta a reflexão na banda do infravermelho próximo e diminui a reflexão na banda do vermelho fazendo com que o aumento da razão seja potencializado, realçando assim a vegetação (Novo, 1989).

Dessa forma, Jensen (1996) descreve para o cálculo do NDVI a seguinte equação:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (13)$$

em que,

NDVI é o índice de Vegetação por Diferença Normalizada;

NIR é a refletância no comprimento de onda correspondente ao InfraVermelho Próximo (0,76 a 0,90 μm);

R é a refletância no comprimento de onda correspondente ao Vermelho (0,63 a 0,69 μm).

A vegetação é caracterizada, assim, por uma intensa absorção devido à clorofila na região do vermelho (0,63 – 0,69 μm) e por uma intensa energia refletida na região do infravermelho próximo (0,76 – 0,90 μm) causada pela estrutura celular das folhas. Se o objetivo central é gerar o NDVI da imagem selecionada, só é necessário utilizar as bandas 3 e 4 da imagem, as quais atuam no comprimento de onda que correspondente a região do visível vermelho e ao infravermelho próximo (Melo, 2011).

Utilizando-se o software QGIS versão 2.12.1 (2006), foram efetuadas operações de registro, mosaico, recorte, segmentação e classificação supervisionada de imagem.

O Google Earth foi utilizado na identificação e classificação das imagens servindo como apoio à etapa de coleta de amostras, elaboração de mapa de uso e ocupação do solo, elaboração da drenagem da microbacia, elaboração das curvas de nível, elaboração e identificação das zonas hidrogeodinâmicas da microbacia, além de auxiliar as viagens a campo possibilitando a identificação das áreas representadas nas imagens de satélite.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI)

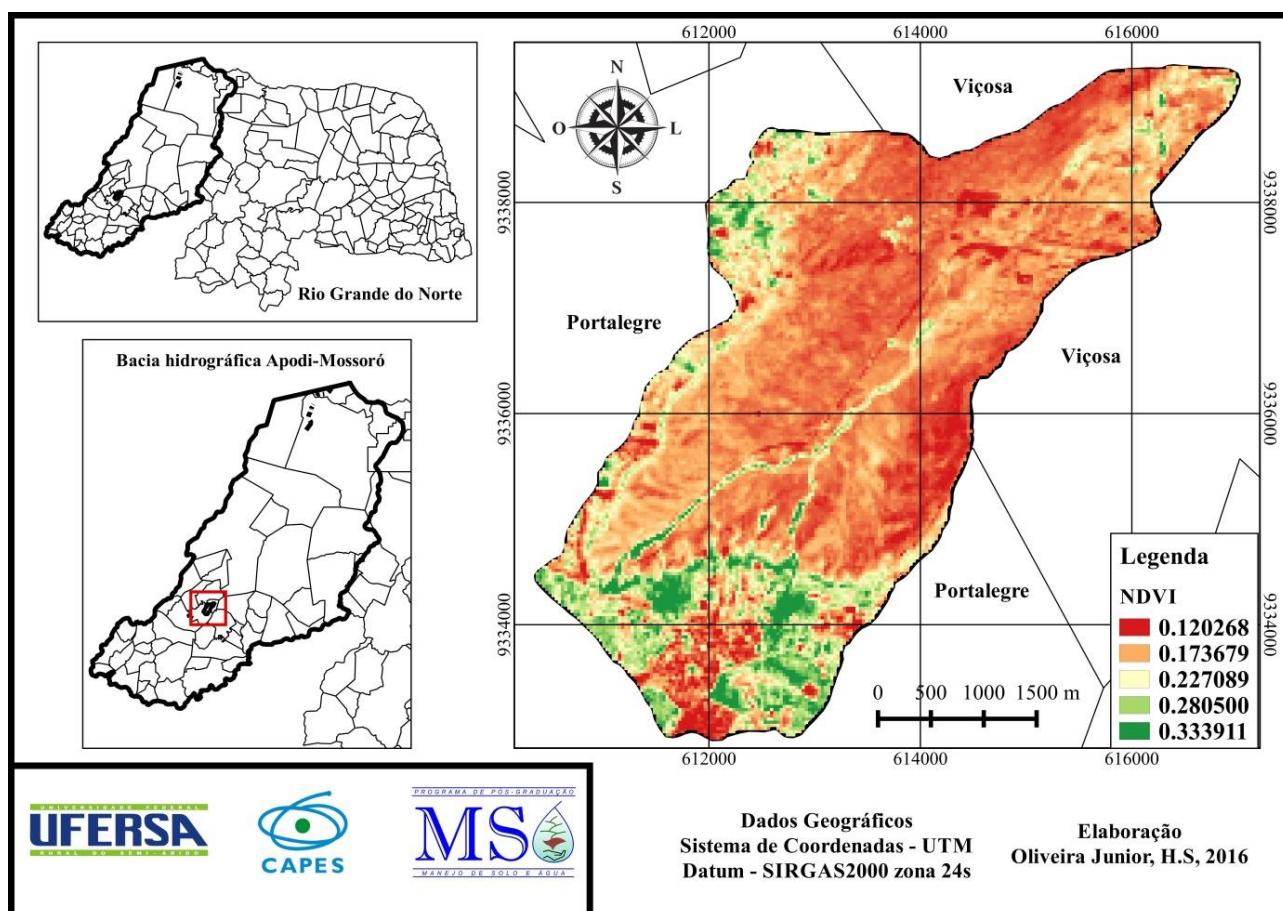
Os mapas das Figuras 8 e 10, elaborados a partir do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - NDVI, mostram uma variação da cobertura vegetal entre os períodos de estiagem (novembro 2015) e chuvoso (fevereiro de 2016) na microbacia hidrográfica. Neles, é possível verificar redução da cobertura vegetal na microbacia durante o período de estiagem, pois a vegetação predominante na área é de espécies vegetais com características caducifólias (perda das folhas na época seca). Também se pode observar que, o NDVI sofreu acréscimo de aproximadamente 56% da estação seca para a chuvosa, evidenciando à alta capacidade de crescimento vegetativo do bioma caatinga num curto espaço de tempo (novembro 2015 – fevereiro 2016) em resposta a presença de umidade (chuvas) de acordo com as Tabelas 1 e 2. O período chuvoso (Janeiro e Fevereiro de 2016) teve uma precipitação média 303,00 mm, sendo distribuído com 264,8 mm em Janeiro e 38,2 mm em Fevereiro (EMPARN, 2016).

Analizando a Figura 8, do período de estiagem, onde o NDVI para a microbacia hidrográfica foi menor, é possível identificar de forma nítida uma maior intensidade vegetativa no entorno das nascentes perenes da microbacia hidrográfica e ao longo do percurso do leito do rio principal, formando um mata ciliar perenifolia. Esse fato demonstra a influencia de nascentes perenes na manutenção de matas ciliares, que são de suma importância para a preservação dos rios.

Ainda na Figura 8, é possível visualizar que a vegetação nas cabeceiras da microbacia também apresentaram NDVI mais elevado. Fato que pode ser explicado pela influência das condições edafoclimáticas na região, pois essas áreas de cabeceiras estão situadas num capeamento sedimentar sobre um maciço serrano de elevada altitude (aproximadamente 716 metros), que propicia clima mais ameno e com precipitações mais frequentes, em função da ocorrência de precipitações pluviométricas orográficas (região de barlavento). Além disso, os solos nessas áreas são classificados como latossolos, que geralmente garantem melhores condições de desenvolvimento vegetal em função de suas melhores características físico-hídricas, como por exemplo, maior profundidade do perfil, maior armazenamento de água no solo, maior infiltração e permeabilidade, entre outras.

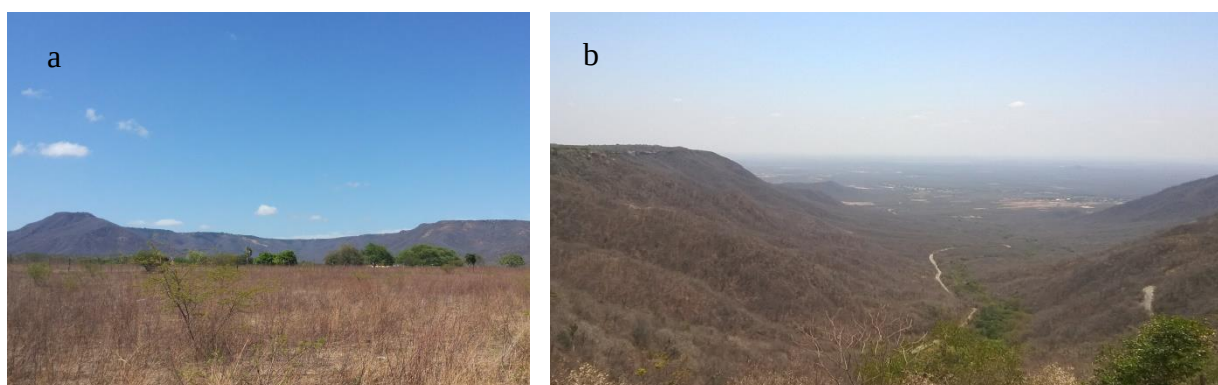
Comparando o mapa de NDVI para estação chuvosa (Figura 10) com o mapa de uso e ocupação do solo (Figura 14), verifica-se que, na área classificada pelo uso e ocupação como sendo caatinga preservada o NDVI apresentou maiores valores, indicando elevada densidade vegetal. Já as áreas onde o solo foi classificado como solo descoberto e agricultura, apresentaram menores valores no NDVI, mostrando, portanto, que o uso e ocupação do solo pela ação antrópica influenciam, diretamente, no índice de cobertura foliar de uma microbacia hidrográfica e, conseqüentemente, nos atributos do solo.

As fotos das Figuras 9 e 11 ilustram o registro da vegetação nos períodos da elaboração dos mapas de NDVI para as estações seca e chuvosa, respectivamente.



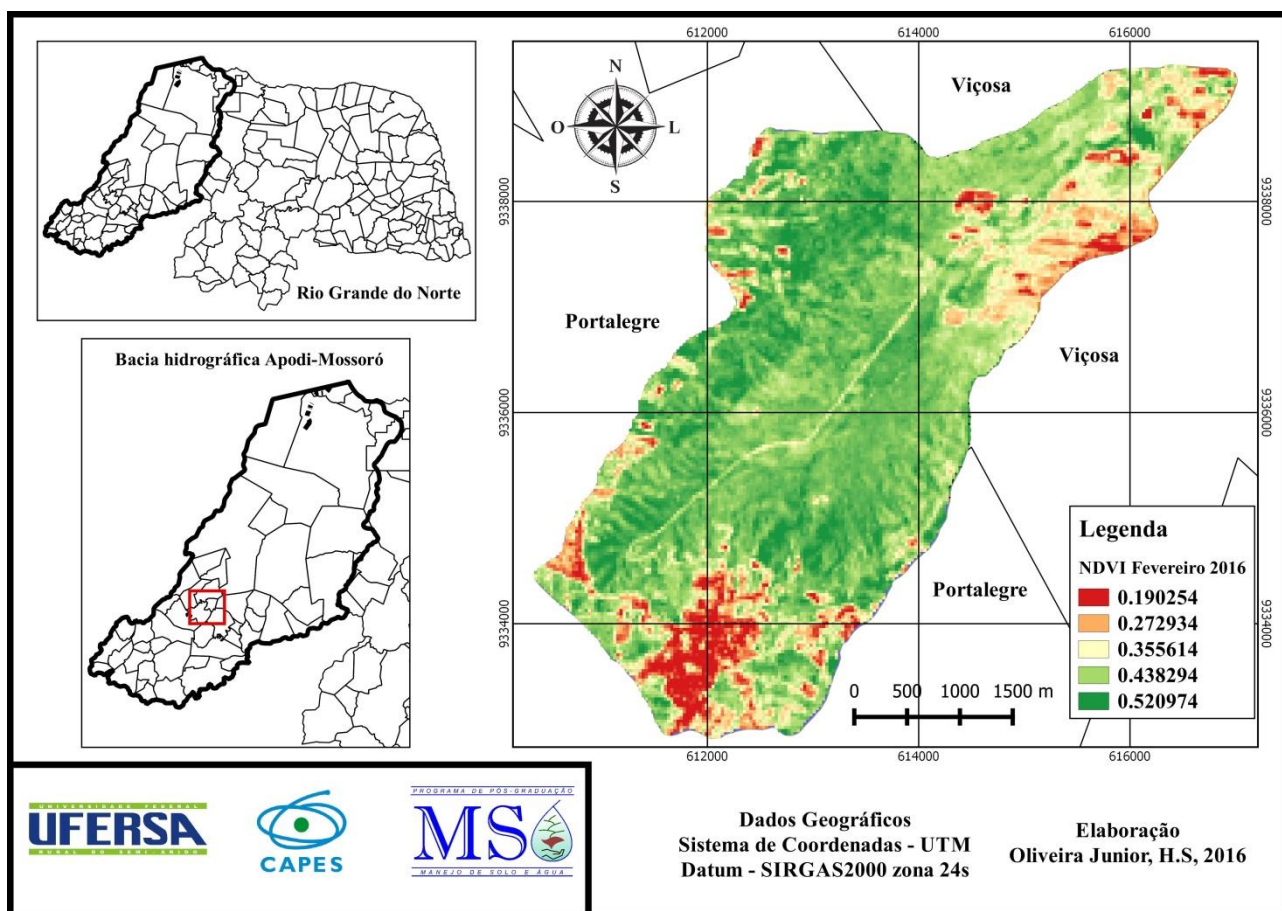
Fonte: Acervo do pesquisador (2016).

Figura 08. Mapa do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para o período de seca (Novembro de 2015).



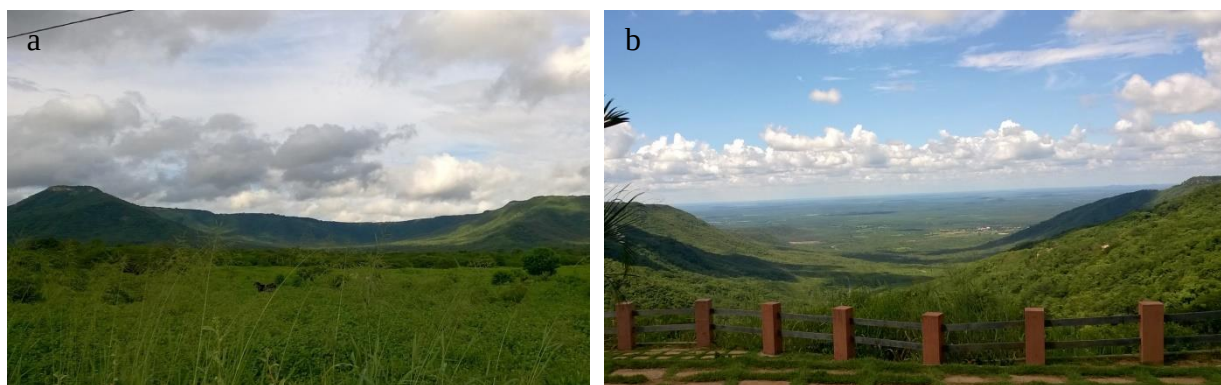
Fonte. Acervo do pesquisador (2015).

Figura 09. Foto da microbacia hidrográfica destacando a vegetação no período de seca (Novembro de 2015); visualização da foz para as cabeceiras (a) e visualização das cabeceiras para a foz (b).



Fonte. Acervo do pesquisador (2016).

Figura 10. Mapa do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para o período de chuvoso (Fevereiro de 2016).



Fonte. Acervo do pesquisador (2016).

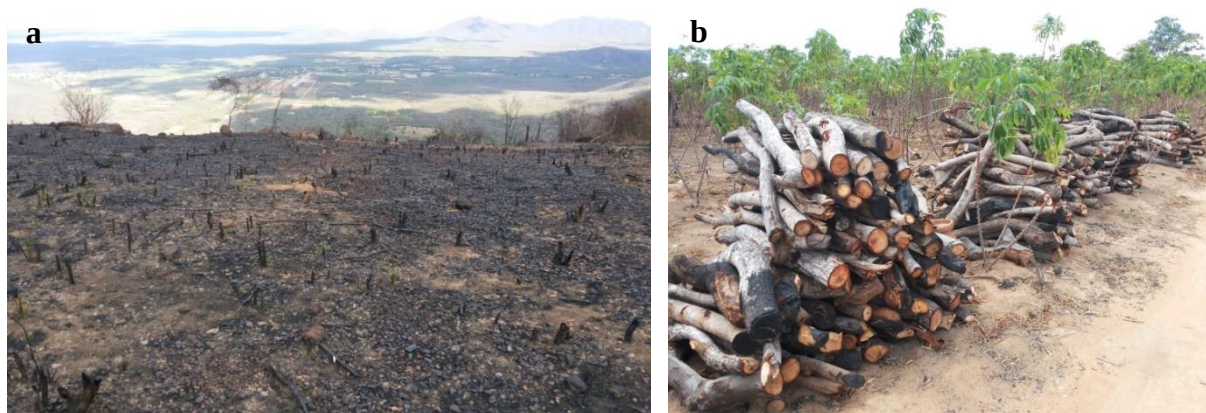
Figura 11. Foto da microbacia hidrográfica destacando a vegetação no período de chuvoso (Fevereiro de 2016); visualização da foz para as cabeceiras (a) e visualização das cabeceiras para a foz (b).

4.2 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

A Figura 14 apresenta o mapa de uso e ocupação do solo para a microbacia hidrográfica estudada, nele percebe-se uma diversidade do uso nas terras da microbacia, como área urbanizada (7,08%), agricultura (6,85%), caatinga preservada (52,62%), caatinga manejada (29,51%), mata ciliar (2,85%), recursos hídricos (0,06%) e solo exposto (0,98%). Destaca-se no mapa de uso e ocupação da microbacia, a presença da caatinga preservada em mais da metade da área. Considerando a caatinga manejada como uma área pouco antropizada e somando-se sua área a da caatinga preservada, obtém-se que 82,13% da área total da microbacia apresenta boa condição de cobertura vegetal, garantindo proteção contra as degradações ambientais nos recursos naturais solo e água.

Outro ponto importante observado no mapa de uso e ocupação são as áreas agrícolas predominantemente situadas nas várzeas da microbacia, possivelmente pelas condições topográficas (áreas planas) e boa fertilidade (zona hidrogeodinâmica de sedimentação), conforme a espacialização dos atributos químicos do solo (Figuras 20, 21 e 22).

Porém algumas áreas agrícolas estão situadas nas regiões de cabeceiras, provavelmente em função das melhores condições edafoclimáticas (presença de Latossolo e maior índice pluviométrico), fato que pode contribuir para um maior impacto negativo na produção de água das nascentes perenes da microbacia, pois essas áreas são zonas de recarga de aquíferos que alimentam essas nascentes. Além disso, foi observado “*in situ*”, conforme Figura 12, a prática condenável de técnicas agrícolas que contribuem para a degradação física, química e biológica do solo, como as queimadas. As ocupações de uso agrícola dessas áreas vão de encontro ao que rege o código florestal brasileiro, que garante preservação permanente de áreas em topo de morro.



Fonte: Acervo do pesquisador (2016).

Figura 12. Desmatamento e queimada para prática de agricultura em áreas de topo de morro (a); Desmatamento e cultivo de mandioca em áreas de preservação permanente (b).

Ainda nas áreas de cabeceiras, onde se encontram as zonas de recargas dos aquíferos, observa-se a presença intensa de áreas urbanizadas, provocando a impermeabilização do solo, reduzindo a infiltração de água e aumentando o escoamento superficial, que irão afetar, diretamente, a recarga dos aquíferos e, conseqüentemente, reduzir a vazão das nascentes perenes. Além do mais, o maior escoamento gerado, contribui para o arraste de resíduos e contaminantes para áreas de nascentes, conforme registrado na Figura 13. Ainda em relação às áreas urbanas, a ausência de saneamento e a presença acentuada de fossas sépticas rudimentares podem provocar a contaminação dos aquíferos subterrâneos, podendo alterar a qualidade da água das nascentes, pois segundo o IBGE (2007), Portalegre não se encontra entre os municípios com serviços de esgotamento sanitário. Em resumo, a presença da urbanização em zonas de recarga de aquífero podem afetar diretamente as nascentes em termos quantitativos (redução da vazão) e qualitativos (contaminação).

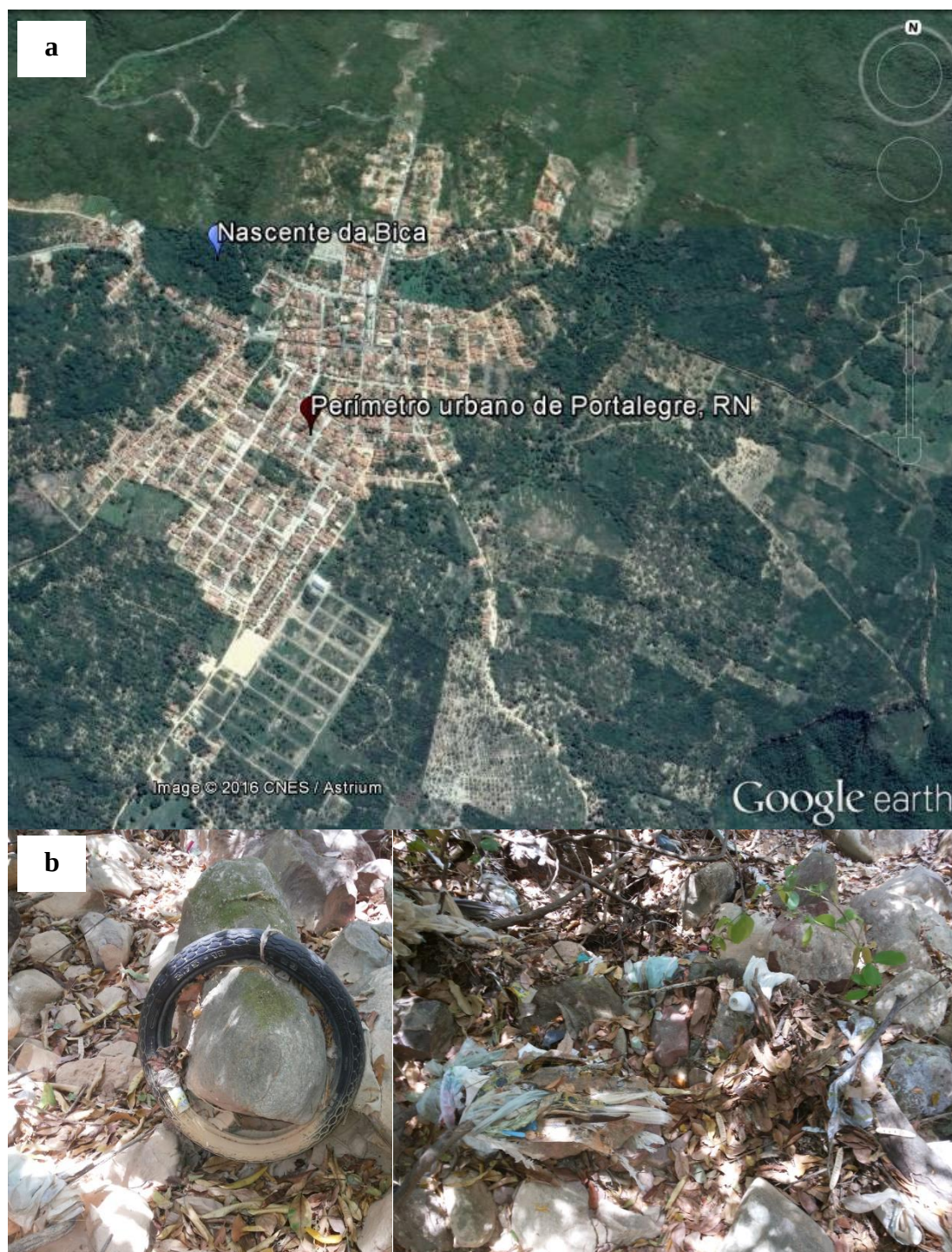
Medeiros (2015) analisando a qualidade da água da cachoeira do Pinga, localizada na microbacia hidrográfica em estudo, através do Índice de Qualidade de Água – IQA, concluiu que os IQAs obtidos apresentaram valores condizentes com as evidências de degradação antrópicas observadas em campo. E que a água do Riacho da Bica vai perdendo qualidade à medida que desce a vertente, variando de razoável a ruim.

Neres (2014) avaliou o grau de preservação das nascentes do município de Portalegre, constatando que 40% das nascentes avaliadas obtiveram um grau de proteção “péssimo”; 20% estavam com grau de proteção “ruim”; 20% foram consideradas com grau de proteção “razoável” e 20% se encontravam com grau de proteção “bom”. Destaca-se, ainda, que nenhuma nascente foi considerada com grau de proteção “ótimo”.

Conforme o estudo realizado por Medeiros & Medeiros (2012), ao qual tomou como base o levantamento feito pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) no estado do RN e a Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), os solos da região da microbacia hidrográfica (Portalegre e Viçosa) são classificados em Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, Argissolo, Luvisolo, Regossolo e Neossolos. De acordo com (CPRM, 2005), os solos da microbacia hidrográfica em estudo apresentam aptidão agrícola para regulação de lavouras, estando apto para culturas de ciclo longo como algodão arbóreo, sisal, caju e coco; além disso, algumas áreas são indicadas para preservação da flora e da fauna ou mesmo para recreação e balneabilidade da população.

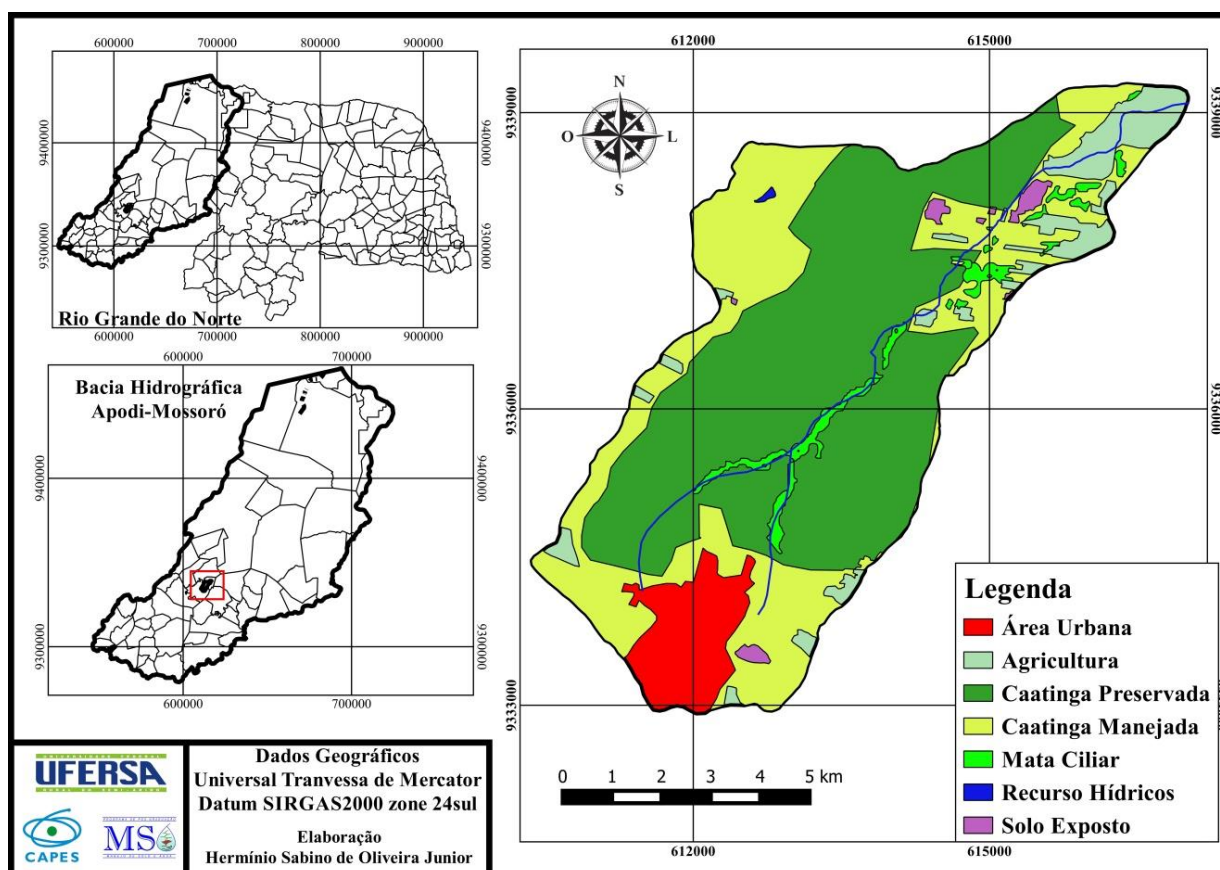
Na Tabela 3 apresentam-se as áreas, em hectare, para os diversos usos e ocupações do solo na microbacia estudada e seus respectivos percentuais em relação à área total.

Deve-se destacar que a mata ciliar, com área de 53,83 ha (correspondente a 2,85 % do total), deve possuir apenas aptidão de uso para conservação da fauna e flora, pois as mesmas são ricas em biodiversidade dentro da microbacia, sendo uma área de elevada importância ecológica.



Fonte: Acervo do pesquisador (2016).

Figura 13. Proximidade do perímetro urbano com nascentes da microbacia (a) e resíduos sólidos encontrados na nascente da Bica (b).



Fonte: Acervo do pesquisador (2016).

Figura 14. Mapa do uso e ocupação do solo.

Tabela 3. Extensão e distribuição percentual das unidades de mapeamento na microbacia hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró.

Unidade de Mapeamento	Área em (ha)	Percentual (%)
Caatinga preservada	992,44	52,62
Caatinga manejada	556,53	29,51
Mata ciliar	53,83	2,85
Solo exposto	18,49	0,98
Agricultura	129,20	6,85
Área urbana	133,64	7,08
Recursos hídricos	1,32	0,06
Total	1885,87	100,00

4.3 ESTATÍSTICA DESCRITIVA E GEOESTATÍSTICA DOS ATRIBUTOS DO SOLO

Na Tabela 4 e 5 encontra-se a estatística descritiva para os atributos físicos hídricos e químicos do solo, para os 20 pontos amostrais na microbacia hidrográfica. Nessas tabelas, encontram-se os valores da média (μ), mediana (η), desvio padrão (σ), coeficientes de variação (CV), valor máximo e mínimo ($V_{\max}$ e $V_{\min}$), assimetria (Ass) e curtose (Cur), para os atributos físico-hídricos: densidade do solo (D_s); densidade de partícula (D_p); volume total de poros (VTP); porosidade drenável (Pd); teor de areia, silte e argila; umidade na capacidade de campo (θ_{CC}); umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}); disponibilidade total de água (DTA) e capacidade total de água no solo (CTA) e para os atributos químicos: potencial hidrogeniônico (pH); condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CE_{es}); matéria orgânica (MO); cálcio (Ca); sódio (Na); magnésio (Mg); fósforo (P); potássio (K); alumínio (Al) e soma de bases (SB).

Conforme a classificação proposta por Warrick & Nielsen (1980) onde a variável é classificada como de baixa variação ($CV < 12\%$), média ($12 < CV < 60\%$), alta ($CV > 60\%$), os atributos físico-hídricos que obtiveram baixa variação foram à D_s e a D_p , para os demais atributos (VTP, Areia, Silte, Argila, θ_{CC} , θ_{PMP} , Pd, DTA, CTA) a variação foi classificada como média, pois nenhum atributo apresentou CV superior a 60%. Os atributos D_s e D_p possuem maior homogeneidade na área estudada quando comparado aos demais atributos físico-hídricos, pois os mesmos apresentaram os menores valores de CV, sendo 11,03% e 5,02%, respectivamente (Tabela 4).

Já os atributos químicos do solo não apresentaram valores de CV classificados como de baixa variação ($CV < 12\%$). Os atributos pH, CE, MO e Mg foram classificados como de média variação, conforme seus valores de CV ($12 < CV < 60\%$), e os demais atributos (Ca, Na, P, K, Al, SB) classificaram-se como de alta variação ($CV > 60\%$). Ainda é possível notar que o pH, com coeficiente de variação igual a 18,92 %, tem a menor variação quando relacionado com os demais atributos químicos estudados, isso demonstra uma maior homogeneidade dos valores encontrados.

Lima et al. (2014) também obtiveram CV alto para atributos químicos do solo em estudo realizado na Sub-Bacia Hidrográfica das Posses, Extrema/MG, onde a maioria dos atributos apresentou CV% superior a 65%, destacando-se o fósforo que foi superior a 170%. Apenas o pH do solo obteve CV baixo (6,85%). Santos (2011) também verificou CV alto para Ca e K em um vale aluvial do semiárido pernambucano.

Os resultados (Tabelas 4 e 5) demonstram que os atributos físicos do solo variaram em menor intensidade quando comparados aos químicos, fato que pode ser explicado pela

resposta mais rápida dos atributos químicos as interferências naturais e antrópicas na paisagem. Para Warrick & Nielsen (1980), os atributos físicos do solo geralmente apresentam maior homogeneidade dos dados (baixos valores de CV). O alto valor de CV dos dados para os atributos químicos do solo podem estar relacionados às grandes alterações provocadas pelo manejo inadequado do solo.

O desvio padrão é uma medida de dispersão dos dados em relação a média, medindo a variabilidade dos valores em volta dela. O valor mínimo do desvio padrão é 0 (zero) indicando que não há variabilidade, ou seja, que todos os valores são iguais a média (Oliveira et al., 2009).

Observando-se as Tabelas 4 e 5, nota-se que os valores do desvio padrão dos atributos físico-hídricos apresentaram menor variabilidade em volta da média (menor dispersão dos dados), quando comparado aos resultados encontrados para os atributos químicos do solo.

Os dados de desvio padrão e coeficiente de variação dão ideia da magnitude de variabilidade das propriedades analisadas, porém nada informa quanto à estrutura de dependência espacial dos atributos, o que só é possível por meio de técnicas de geoestatística.

Comparando-se os valores entre as medidas de posição média e mediana, verifica-se que, para os atributos físico-hídricos do solo os seus respectivos valores apresentaram semelhança, podendo ser um indicativo de distribuição normal dos dados, fato reforçado pelos valores de assimetria e curtose. Já para os atributos químicos, esse comportamento não foi observado para uma boa parcela deles, como por exemplo: Na, P, K e Al.

Os gráficos dos Histogramas de Frequência, Curvas de Probabilidade Normal e BoxPlot, para os atributos do solo estudados na microbacia hidrográfica, contidos em Apêndices nas Figuras 23 a 43, auxiliam na visualização da normalidade dos dados e na identificação de dados discrepantes (outliers). De acordo com esses gráficos obtidos para os atributos estudados, verificou-se a mesma tendência da comparação das medidas de dispersão (média e mediana). Ou seja, os atributos físico-hídricos também apresentaram melhores tendências à distribuição normal, quando comparados aos químicos.

Para a grande maioria dos atributos analisados (físicos e químicos), os histogramas de classes indicaram a presença de normalidade multivariada, devido à boa distribuição da mesma, em termos de normalidade das diferenças, considerada, da mesma forma, condição fundamental em estudos geoestatísticos que envolvam a utilização de algoritmos da máxima verossimilhança, a qual consiste da aplicação de um modelo multivariado normal (Ribeiro Júnior & Diggle, 2001).

Os gráficos de probabilidade normal demonstram que a maioria dos dados estava sobre a reta com poucos pontos afastados, indicando que não deve ser grande o número de valores periféricos candidatos a “outliers”.

O gráfico de “boxplot” é de fundamental importância para a identificação de pontos amostrados que são candidatos a “outliers”, ou seja, pontos que produzem alta variabilidade aos dados e distorção dos mesmos em torno da média, prejudicando a existência de normalidade. Dados discrepantes afetam substancialmente o comportamento do semivariograma, sobretudo na parte inicial do mesmo (Diggle & Ribeiro Júnior, 2000), conduzindo a conclusões erradas sobre a variância do ruído (efeito pepita) e ou a existência de correlação espacial (Mello, 2004).

Foi possível verificar, através dos gráficos de Histogramas de Frequência, Curvas de Probabilidade Normal e BoxPlot (Figuras 23 a 43, Apêndices), que para todos os atributos estudados não houve ocorrência de “outliers”, com isto, as análises geoestatísticas foram desenvolvidas com toda a base de dados.

Isaaks & Srivastava (1989) destacam que, apesar de importante, a normalidade não é considerada uma exigência para aplicação da geoestatística sendo que a ocorrência de média e variabilidade dos dados constantes é mais importante porque permite que a krigagem não seja comprometida.

Um fundamento comum da modelagem estocástica é que os dados tenham distribuição normal, a partir do qual toda inferência geoestatística pode ser realizada (Cressie, 1993). A geoestatística não exige normalidade dos dados para ser aplicada, contudo, se existir, as inferências realizadas receberão propriedades estatísticas ótimas, tal como a máxima verossimilhança.

Embora a análise estatística descritiva dê uma ideia da normalidade, essa só poderá ser comprovada através dos testes de aderência a normalidade de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk.

Tabela 4. Estatística descritiva para os parâmetros físico-hídrico do solo.

Parâmetros	Areia -----	Silte (%) -----	Argila -----	D _s (g cm ⁻³)	D _p (g cm ⁻³)	VTP (%)	θ _{CC} (%)	θ _{PMP} (%)	Pd (%)	DTA (mm cm ⁻¹)	CTA (mm)
μ	66.81	17.92	15.28	1.42	2.35	39.49	23.17	12.28	16.32	1.09	21.79
η	67.19	19.19	13.35	1.40	2.35	38.76	22.48	12.59	17.41	1.13	22.53
σ	10.53	8.40	8.39	0.16	0.12	6.10	5.35	3.21	8.49	0.35	7.04
CV	15.77	46.89	54.91	11.03	5.02	15.45	23.07	26.15	52.05	32.33	32.34
V _{max}	86.48	35.70	34.63	1.80	2.51	48.29	32.48	20.56	30.37	1.61	32.20
V _{min}	42.32	4.28	5.66	1.14	2.08	25.00	11.63	7.23	2.00	0.44	8.81
Cur	0.37	-0.40	0.68	0.50	-0.11	-0.07	0.10	1.00	-1.03	-0.92	-0.91
Ass	-0.47	0.18	1.20	0.52	-0.69	-0.52	-0.44	0.64	-0.25	-0.25	-0.25

Tabela 5. Estatística descritiva para os parâmetros químicos do solo.

Parâmetros	pH	CE _{es} (dS m ⁻¹)	MO (g kg ⁻¹)	Ca ²⁺ (cmol dm ⁻³)	Na ⁺ (mg dm ⁻³)	Mg ²⁺ (cmol dm ⁻³)	P (mg dm ⁻³)	K ⁺ (mg dm ⁻³)	Al ³⁺ (cmol dm ⁻³)	SB (cmol dm ⁻³)
μ	5.04	0.45	17.91	2.99	27.71	1.25	8.26	129.89	0.35	4.69
η	5.21	0.49	18.28	2.46	14.55	1.20	5.54	91.90	0.00	4.10
σ	0.95	0.24	6.63	2.52	31.00	0.47	6.18	179.73	0.57	2.96
CV	18.92	53.44	37.03	84.41	111.87	37.33	74.84	138.37	164.29	63.03
V _{max}	6.35	0.95	33.23	8.50	110.15	1.97	25.93	712.85	2.15	10.36
V _{min}	3.34	0.09	7.87	0.00	6.85	0.42	2.19	12.12	0.00	0.85
Cur	-1.24	0.07	0.55	-0.67	2.65	-1.03	2.09	6.56	4.35	-0.73
Ass	-0.21	0.35	0.66	0.66	1.96	-0.01	1.47	2.60	2.00	0.64

As Tabelas 6 e 7 apresentam os resultados dos testes de aderência à normalidade de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk, sendo o teste de Shapiro-Wilk o mais recomendado para esse estudo, pois a amostragem possui menos de 50 observações (Lawles, 1982; Maroco, 2007). A normalidade dos dados contribui de forma positiva para que as análises geoestatísticas sejam feitas de forma mais precisa e com possibilidade de expressão de melhores resultados. Porém, Folegatti (1996) afirma que, para o ajuste de semivariogramas, a normalidade dos dados não é obrigatória, mas desejável. O autor ainda diz que, caso a distribuição não seja normal, mas razoavelmente simétrica, podem-se admitir as hipóteses necessárias à construção do semivariograma.

De acordo com Isaaks & Srivastava (1989), a normalidade dos dados indica candidatos a dados discrepantes (“outliers”) ou se há a necessidade da transformação dos dados para a sua normalização. Para Ribeiro Júnior & Diggle (2001), a tendência à normalidade dos dados pode favorecer partes do semivariograma pela máxima verossimilhança, uma vez que o algoritmo da mesma pressupõe normalidade multivariada dos dados.

Conforme os resultados expostos na Tabela 6, para todos os dados dos atributos físico-hídricos estudados, exceto para o teor de argila, o *p-value* indicou que os dados se adequaram à Distribuição Normal a 5% de significância, pois *p-value* foi maior que 0,05, não rejeitando a hipótese de nulidade (H_0), conforme descreve Oliveira et al.(2009).

Tabela 6. Testes de normalidade, Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para os atributos físico-hídricos do solo.

Atributo	----- Kolmogorov-Smirnov -----			----- Shapiro-Wilk -----	
	p-value	p-lilliefors	K-S	p-value	W
Areia	0,20	0,20	0,08028	0,9476	0,98111*
Silte	0,20	0,20	0,10835	0,7585	0,97017*
Argila	0,20	0,05	0,20645	0,0100	0,86603 ^{NS}
Ds	0,20	0,20	0,10082	0,9135	0,97851*
Dp	0,20	0,20	0,12460	0,3142	0,94628*
VTP	0,20	0,10	0,17625	0,3014	0,94530*
θ_{CC}	0,20	0,20	0,14645	0,5987	0,96268*
θ_{PMP}	0,20	0,20	0,10567	0,5648	0,96104*
P_d	0,20	0,20	0,13617	0,4266	0,95369*
DTA	0,20	0,20	0,13810	0,5224	0,95892*
CTA	0,20	0,20	0,13786	0,5223	0,95891*

* Significativo a 5% ($\alpha=0,05$); ^{NS}= Não significativo a 5%.

Já para os dados dos atributos químicos do solo (resultados exposto na Tabela 7), apenas 50% dos atributos (pH, CE, MO, Mg e SB) o *p-value* indicou que seus dados se adequaram à Distribuição Normal a 5% de significância, pois *p-value* foi menor que 0,05, não rejeitando a hipótese de nulidade (H_0), conforme descreve Oliveira et al.(2009).

Tabela 7. Testes de normalidade, Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para os atributos químicos do solo.

Atributo	----- Kolmogorov-Smirnov -----			----- Shapiro-Wilk -----	
	p-value	p-lilliefors	K-S	p-value	W
pH	0,20	0,20	0,11236	0,2038	0,93628*
CE	0,20	0,20	0,15738	0,1135	0,92307*
MO	0,20	0,20	0,11785	0,3607	0,94958*
Ca ²⁺	0,20	0,10	0,18127	0,0397	0,89911 ^{NS}
Na ⁺	0,05	0,01	0,33206	0,0000	0,65294 ^{NS}
Mg ²⁺	0,20	0,20	0,12005	0,4825	0,95682*
P	0,20	0,05	0,20309	0,0040	0,84216 ^{NS}
K ⁺	0,05	0,01	0,32044	0,0000	0,61568 ^{NS}
Al ³⁺	0,05	0,01	0,32864	0,0000	0,68344 ^{NS}
SB	0,20	0,15	0,16861	0,0968	0,91947*

* Significativo a 5% ($\alpha=0,05$); ^{NS}= Não significativo a 5%.

Nas Tabelas 8 e 9, apresentam-se os valores do efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C), alcance (A) e grau de dependência espacial (GD) para os modelos testados (exponencial, esférico e gaussiano) pela máxima verossimilhança, onde é possível observar, os resultados das análises geoestatísticas para os atributos do solo.

Segundo Vieira et al. (1997), quanto menor o coeficiente de efeito pepita, maior será a semelhança entre os valores vizinhos e a continuidade do fenômeno, e menor será a variância da estimativa.

Empregando-se a escala de dependência espacial determinada por Cambardella et al. (1994), verificou-se que, para todos os semivariogramas obtidos, exceto os modelos exponencial e gaussiano do atributo densidade de partícula e o modelo gaussiano do atributo magnésio, apresentaram forte dependência espacial, visto que, seus valores de efeito pepita (C_0) foram inferiores a 25% do valor do patamar ($GD < 25\%$). Sendo que as exceções apresentaram moderada dependência espacial.

De maneira geral, pela análise do grau de dependência espacial (GD), os modelos matemáticos dos semivariogramas teóricos que melhor se adequaram aos dados dos semivariogramas experimentais foram o esférico e exponencial, sendo o gaussiano o pior. Esses resultados corroboram com trabalhos de diversos autores (Vieira, 2000; Bassoi et al., 2007; Lemos Filho et al., 2008) que indicam os modelos exponenciais e esféricos como sendo os mais adequados para ajuste de atributos do solo.

O único atributo do solo estudado que não apresentou dependência espacial (efeito pepita puro) foi o atributo químico sódio (Na^+), assim, pode-se assumir que a distribuição é completamente ao acaso, não havendo dependência espacial entre as amostras, e os métodos da estatística clássica podem ser aplicados, sendo a média aritmética o que representa bem o

conjunto de dados. No entanto, não significa, necessariamente, que não exista estrutura de variância, devido provavelmente à dependência espacial que ocorre em uma distância menor entre os pontos de amostragem utilizada (Vieira, 2000). Santos (2011), estudando a variabilidade física e química dos atributos do solo, num vale aluvial em Pernambuco, observou que os atributos silte, porosidade total (PT) e Ds apresentaram efeito pepita puro. Gomes (2005) estudando variabilidade dos atributos físico-hídricos do solo de uma microbacia hidrográfica em Minas Gerais, constatou que o atributo silte apresentou efeito pepita puro.

O alcance (A) é de fundamental importância para a interpretação de semivariogramas, pois indica a distância máxima que os pontos amostrais são relacionados (Vieira et al., 1983), sendo uma das principais utilizações dos semivariogramas a determinação do número ideal de amostras. Amostras separadas por distâncias menores do que o alcance são espacialmente dependentes, enquanto aquelas separadas por distâncias maiores não são, ou seja, um semivariograma igual à variância dos dados implica em variação aleatória. Além disso, ele também é utilizado para definir o raio de ação máximo de interpolação por krigagem, em que os pesos utilizados na ponderação podem afetar os valores estimados (Souza, 1992).

Nas Tabelas 8 e 9, podem-se observar os valores de alcance (A) para os semivariogramas gerados pela máxima verossimilhança para os modelos exponencial, esférico e gaussiano, para os dados dos atributos físico-hídricos e químicos do solo da microbacia. Esses resultados mostram que os alcances foram bem variados, sendo que, os atributos físico-hídricos do solo apresentaram, de maneira geral, em termos médios, menores distâncias de alcances (A), variando de 433,01 a 3630,00 metros, quando comparados aos atributos químicos do solo (que variaram de 692,82 a 3993,00 metros).

Tabela 8. Efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C$), alcance (A) e grau de dependência espacial (GD) para os modelos de semivariogramas testados (exponencial, esférico e gaussiano) para os atributos físico-hídricos do solo.

Atributo	Modelo	C_0	$C_0 + C$	A (m)	$GD=(C_0/C_0+C) \times 100$ (%)
Areia	Exponencial	16,20	115,00	570,00	14,087
	Esférico	7,30	114,10	500,00	6,398*
	Gaussiano	22,30	114,20	433,01	19,527
Silte	Exponencial	0,10	70,59	1830,00	0,142*
	Esférico	0,80	70,16	1690,00	1,140
	Gaussiano	5,40	70,49	1402,96	7,661
Argila	Exponencial	0,10	82,50	3630,00	0,121*
	Esférico	0,10	73,40	1880,00	0,136
	Gaussiano	0,10	72,90	1420,28	0,137
Ds	Exponencial	0,0053	0,027	480,00	19,630
	Esférico	0,00001	0,027	660,00	0,037*
	Gaussiano	0,00001	0,027	554,26	0,037*
Dp	Exponencial	0,0046	0,016	270,00	28,750
	Esférico	0,0038	0,016	630,00	23,750*
	Gaussiano	0,0061	0,016	467,65	38,125
VTP	Exponencial	9,30	42,79	2910,00	21,734
	Esférico	0,10	40,02	880,00	0,250
	Gaussiano	0,10	40,34	796,74	0,248*
θ_{CC}	Exponencial	0,01	23,35	1110,00	0,043*
	Esférico	0,01	23,44	1050,00	0,043*
	Gaussiano	0,01	23,50	848,70	0,043*
θ_{PMP}	Exponencial	0,01	9,94	2130,00	0,101*
	Esférico	0,01	9,83	1640,00	0,102
	Gaussiano	0,01	9,88	1316,36	0,101*
Pd	Exponencial	0,10	67,90	1290,00	0,147*
	Esférico	0,10	67,60	1050,00	0,148
	Gaussiano	0,10	68,00	883,35	0,147*
DTA	Exponencial	0,006	0,1190	1590,00	5,042
	Esférico	0,0001	0,1182	1290,00	0,085*
	Gaussiano	0,014	0,1172	1021,91	11,945
CTA	Exponencial	2,10	47,53	1620,00	4,418
	Esférico	0,10	47,16	1300,00	0,212*
	Gaussiano	5,40	47,11	1039,23	11,463

* Melhores modelos de acordo com (GG).

Tabela 9. Efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C$), alcance (A) e grau de dependência espacial (GD) para os modelos de semivariogramas testados (exponencial, esférico e gaussiano) para os atributos químicos do solo.

Atributo	Modelo	C_0	$C_0 + C$	A (m)	$GD=(C_0/C_0+C) \times 100$ (%)
pH	Exponencial	0,001	0,828	1386,00	0,121*
	Esférico	0,002	0,8130	1214,00	0,246
	Gaussiano	0,001	0,8150	1020,18	0,123
CE_{es}	Exponencial	0,0068	0,0604	1518,00	11,258
	Esférico	0,0008	0,0589	1191,00	1,358*
	Gaussiano	0,0056	0,0590	1025,37	9,492
MO	Exponencial	0,10	48,01	960,00	0,208*
	Esférico	0,10	47,64	750,00	0,210
	Gaussiano	0,10	48,14	692,82	0,208*
Ca^{2+}	Exponencial	0,01	5,978	1770,00	0,000*
	Esférico	0,01	5,979	1680,00	0,000*
	Gaussiano	0,01	6,004	1385,64	0,000*
Na^+	Exponencial	Efeito pepita puro (ausência de dependência espacial)			
	Esférico				
	Gaussiano				
Mg^{2+}	Exponencial	0,0001	0,2092	2919,00	0,048*
	Esférico	0,0413	0,1986	2523,00	20,796
	Gaussiano	0,0754	0,1998	2274,18	37,738
P	Exponencial	0,01	28,81	1557,00	0,035
	Esférico	0,01	28,91	1546,00	0,035
	Gaussiano	0,01	29,02	1257,47	0,034*
K^+	Exponencial	100,00	38380,00	1812,00	0,261*
	Esférico	4300,00	37030,00	1578,00	11,612
	Gaussiano	5600,00	37290,00	1305,97	15,017
Al^{3+}	Exponencial	0,0001	0,2792	3993,00	0,036*
	Esférico	0,0001	0,2272	2053,00	0,044
	Gaussiano	0,0001	0,2362	1768,42	0,042
SB	Exponencial	0,01	9,61	2016,00	0,104*
	Esférico	0,01	9,50	1751,00	0,105
	Gaussiano	0,01	9,63	1472,24	0,104*

* Melhores modelos de acordo com (GG).

4.4 MAPEAMENTO DOS ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS E QUÍMICOS DO SOLO

Nas Figuras 17 a 22 são apresentados os mapas da variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos: densidade do solo (D_s); densidade de partícula (D_p); volume total de poros (VTP); porosidade drenável (Pd); teor de areia, silte e argila; umidade na capacidade de campo (θ_{CC}); umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}); disponibilidade total de água (DTA) e capacidade total de água no solo (CTA) e para os atributos químicos: potencial hidrogeniônico (pH); condutividade elétrica (CE); matéria orgânica (MO); cálcio (Ca^{2+}); sódio (Na^+); magnésio (Mg^{2+}); fósforo (P); potássio (K^+); alumínio (Al^{3+}) e soma de bases (SB), que foram obtidos por meio de Krigagem dos dados.

Comparando o mapa de densidade do solo (D_s) (Figura 17a) com o de matéria orgânica (MO) (Figura 20c) da microbacia hidrográfica estudada, verifica-se que, em pontos onde a densidade do solo foi menor, houve coincidência com pontos onde o teor de matéria orgânica foi mais elevado, mostrando a interferência direta da MO na melhoria física do solo, pois com o aumento do teor de MO, há uma diminuição da densidade do solo e aumento da porosidade, conseqüentemente, maior capacidade de infiltração, retenção e armazenamento de água no solo, fato comprovado pela análise dos mapas de CTA (Figura 18b); DTA (Figura 18c); VTP (Figura 18d); θ_{PMP} (Figura 19a) e θ_{CC} (Figura 19b).

Ainda em relação a MO, percebe-se no mapa da Figura 20c, que os maiores teores de MO coincidiram com as áreas com ocupação de caatinga preservada (conforme o mapa da Figura 14), indicando o efeito da vegetação caducifólia na produção de serrapilheira (Figura 15) e sua influencia positiva sobre o incremento de matéria orgânica do solo. Além de aumentar a MO no solo, melhorando suas condições físicas e químicas, a presença de serrapilheira contribui para a redução do impacto das gotas de chuva diretamente no solo, evitando sua degradação pelo efeito da energia cinética das gotas. Dessa forma, impede o desprendimento da estrutura do solo, evitando o selamento superficial e conseqüente aumento do escoamento superficial, fatos que promovem o arraste de partículas sólidas (erosão), e conseqüentemente o assoreamento dos cursos d'água. Além do mais, o impacto das gotas de chuva, diretamente, sobre o solo exposto promove a compactação do mesmo.

Todos esses fatos mencionados tornam esse atributo fundamental para a manutenção da qualidade do solo, visto que a matéria orgânica (MO) é um dos melhores indicadores de qualidade do solo, pois se relaciona com inúmeras propriedades físicas, químicas e biológicas (Reichert et al., 2003). Conceição et al. (2005) consideraram a MO como um eficiente indicador para discriminar a qualidade do solo induzida por sistemas de manejo.



Fonte: Acervo do pesquisador (2015).

Figura 15. Ilustração da vegetação caducifólia com formação de serrapilheira na microbacia.

Verifica-se que a D_s na microbacia hidrográfica varia de $1,14 \text{ g cm}^{-3}$ a $1,80 \text{ g cm}^{-3}$ (Figura 17a), evidenciando que em algumas áreas pode ter ocorrido compactação em função do uso atual do solo. Os maiores valores de D_s são observado na região noroeste e sul do mapa, onde há caatinga manejada e zona urbana, respectivamente (Figura 14). Esses valores elevados provavelmente foram causados por atividades antrópicas, refletindo diretamente em outros atributos físico-hídricos do solo, como volume total de poros, porosidade drenável, capacidade total de armazenamento, entre outros. Segundo Junqueira Júnior (2006), atributos como a densidade do solo e o teor de matéria orgânica herdam influência do manejo empregado no uso e ocupação das terras. Por isso, esses atributos podem ser considerados bons indicadores das condições de uso, ocupação e equilíbrio dos recursos presentes nas microbacias hidrográficas.

A distribuição espacial do atributo VTP na microbacia hidrográfica é apresentada pela Figura 18d, seus valores apresentam grande variação, estando entre 25 a 48,29%. Fazendo-se associação da distribuição do VTP com D_s , MO e CTA, nota-se grande relação entre estes, principalmente na região central da microbacia, onde há menor D_s e uma maior CTA e MO, visto que a matéria orgânica proporciona uma maior retenção de água no solo.

Na Figura 19c apresenta-se a distribuição espacial da porosidade drenável (P_d) na microbacia hidrográfica, este atributo, assim como os demais, encontra-se bastante variável na área, os maiores valores de P_d são encontrados nas regiões periféricas da microbacia hidrográfica, onde estão localizados os Latossolos (Figuras 1, 2 e 4), que possuem em suas características o horizonte B textural, resultante de acumulação de argila decorrente de processos de iluviação, com isso há um maior teor de areia nos horizontes superficiais,

potencializando o movimento de água no solo, tornando-o susceptíveis aos processos erosivos, em virtude da grande diferença textural entre o horizonte A e o horizonte B.

As variabilidades das frações texturais areia, silte e argila podem ser visualizadas pelas Figuras 17c, 17d e 18a, respectivamente. O maior percentual de areia encontra-se ao noroeste e a nordeste da microbacia hidrográfica, coincidindo com a foz da mesma, segundo Carvalho (1994), as areias apresentam-se concentradas próximo ao leito dos rios e locais de origem, enquanto que as partículas finas, como silte e argila, são arrastadas por maiores percursos. A fração silte (Figura 17d) encontra-se bastante variável na microbacia hidrográfica, com teores de 4,28 a 35,70%, as maiores concentrações estão na região central da mesma, isso se deve ao carregamento de sedimentos para cotas mais baixas, o que originou o acúmulo desta fração. A argila encontra-se de forma pontual nas extremidades da microbacia, e assim como as demais frações possui grande variação na área, 5,66 a 34,63%, sua presença possibilita uma maior estruturação do solo reduzindo percas por erosão (agente cimentante).

A densidade de partículas (D_p), Figura 17b, é um atributo inerente ao solo e sua variação ocorre em razão da mineralogia e do teor de matéria orgânica, na microbacia hidrográfica esse atributo também possui variação, 2,08 a 2,51 g cm⁻³, os menores valores são encontrados na região central da microbacia, justamente onde se observa uma maior concentração de silte. Segundo Ferreira (2010), os solos minerais comumente encontrados no Brasil apresentam D_p média de 2,65 mg m⁻³, refletindo a presença dominante de quartzo, feldspatos e silicatos, porém, na microbacia estudada foram encontrados valores abaixo dessa média, podendo haver incorporação de matéria orgânica.

Na zona hidrogeodinâmica de sedimentação, na várzea (Figura 4), onde há uma predominância dos Luvisolos, os teores de silte apresentaram valores elevados quando comparadas com outras áreas da bacia, além de poder indicar o carregamento dessa partícula de áreas de vertentes, em épocas chuvosas, para as várzeas, existe o fato dos Luvisolos serem ricos em silte (Jarbas et al., 2016).

As espacializações (krigagem) dos atributos químicos estudados na microbacia encontram-se dispostos da seguinte forma: pH - Figura 20a; CE - Figura 20b; MO - Figura 20c; Mg²⁺ - Figura 20d; Na⁺ - Figura 21a; Ca²⁺ - Figura 21b; K⁺ - Figura 21c; P - Figura 21d; Al³⁺ - Figura 22a; SB - Figura 22b.

Observando o mapa do pH, nota-se que há uma aparente relação espacial com a MO. As faixas de valores de pH acompanham as faixas de valores da MO; as áreas que possuem maiores teores de MO, o pH tende a apresentar valores mais baixos, este resultado corrobora com a espacialização encontrada por Reis (2010), que estudando a variabilidade dos atributos

do solo para a microbacia do Córrego Fazenda Glória, em Taquaritinga/SP, também observou que as faixas de valores de pH acompanham as faixas de valores da MO.

Confrontando os mapas de alumínio com o do pH, percebe-se aumento do teor de Alumínio em locais onde os solos apresentaram uma forte acidez potencial, comportamento natural conforme descrito por Sousa et al. (2007) e Portugal et al. (2010). Porém, na área da várzea, o alumínio apresentou maiores teores, quando comparado ao restante da bacia, mesmo a acidez sendo fraca. Esse fato pode ser explicado pela ação antrópica nas partes altas da microbacia, ocasionando o carreamento desse elemento químico para as zonas mais baixas (várzeas) e, conseqüentemente, aumentando suas concentrações. Outro fator que pode ter causado um maior teor de Al^{3+} na várzea, foi à prática agrícola presente em grande parte dessa região, pois assim como o alumínio, outros atributos químicos, como: K^+ , P, Ca^{2+} , Na^+ , pH, CE_{es} e SB, também se apresentaram com maiores valores nessa região, indicando que essas maiores concentrações possam ter sido em função da técnica agrícola de adubação, prática comum na microbacia.

Os valores de pH acima de 5,0 favorecem a precipitação do alumínio na forma de hidróxido, isto pode justificar os baixos teores de alumínio trocável encontrados no solo da microbacia hidrográfica em estudo.

Outras causas da acidez, segundo Coelho (1973), são os cultivos intensivos, pois as plantas retiram do solo os nutrientes essenciais de que necessitam para seu desenvolvimento e produção, e como as adubações são geralmente deficientes em cálcio e magnésio, o solo vai-se empobrecendo nessas bases trocáveis, ficando em seu lugar íons de hidrogênio. A erosão também pode ser uma das causas, pois ocorre a remoção da camada superficial do solo, que possui maiores teores de bases e favorece a acidificação do solo, expondo as camadas mais ácidas do subsolo.

O fato de oito, dos dez, atributos químicos estudados (Al^{3+} , K^+ , P, Ca^{2+} , Na^+ , pH, CE_{es} e SB) terem apresentado maiores valores na região da várzea, pode ter a mesma explicação do comportamento do alumínio. Ou seja, ou foram carreados das partes altas da microbacia para as várzeas, em função da degradação ocasionada pela ação antrópica, ou foi oriunda da adubação química, prática comum nas atividades agrícolas da região.

Souza (2001) relata que, dentre os diversos fatores que influenciam na variabilidade dos atributos do solo, a posição do terreno na paisagem (declividade e forma de relevo, Figura 4) é uma característica de grande influencia. O autor acrescenta que a forma da paisagem pode gerar caminhos preferenciais para o fluxo de água, podendo interferir na variabilidade dos atributos do solo.

Comparando os mapas de Al^{3+} , Ca^{2+} e Mg^{2+} , percebe-se que onde apresentaram baixas concentrações dos cátions Ca^{2+} e Mg^{2+} , houve maior concentração do alumínio, confirmando o que descreveu Pritchett & Fisher (1987), que a redução das disponibilidades desses cátions aumenta a concentra de alumínio na solução do solo.

Outro comportamento que chama atenção na variação espacial dos atributos químicos do solo, foi o fato de nove, dos dez, atributos estudados (Mg^{2+} , K^+ , P, Ca^{2+} , Na^+ , pH, MO, CE_{es} e SB) apresentarem maiores valores coincidentes com algumas regiões de nascentes. Uma possível explicação para esse comportamento é a presença de uma lavanderia pública (Figura 16) nessa área, pois o efluente oriundo dessa atividade é rico em elementos químicos que alteram diretamente as concentrações desses atributos no solo. Além do mais, essas áreas de nascentes encontram-se muito próximas da área urbanizada do município de Portalegre, o que pode, em função da topografia da região, ter ocasionado o escoamento de esgoto a céu aberto para as áreas de nascentes, principalmente nas épocas chuvosas.



Fonte: Google Earth (2016) e Neres (2014).

Figura 16. Ilustração da lavanderia pública instalada em áreas de nascente na microbacia.

Ainda em relação aos atributos químicos do solo, verificou-se que nas áreas de predominância de Latossolo (capeamento sedimentar próximo aos divisores da microbacia estudada, conforme Figura 4) apresentaram menores valores para todos os nutrientes lixiviáveis, em especial o fósforo. Fato que corrobora com as características desse tipo de solo, pois são solos bem drenados, muito profundos e com textura e estrutura em profundidade. Além de apresentarem limitações de ordem química e, em condições naturais, os teores de fósforo são baixos (Jarbas et al., 2016).

Os resultados dos mapas especializados dos atributos químicos do solo também apresentaram coerência para a zona hidrogeodinâmica de sedimentação (Figura 4), onde há predominância dos Luvisolos. Visto que, conforme Jarbas et al. (2016), esses são solos moderadamente ácidos a neutros, com elevada saturação por bases. Ainda, é um tipo de solo de elevado potencial nutricional e rico em bases trocáveis, especialmente o potássio.

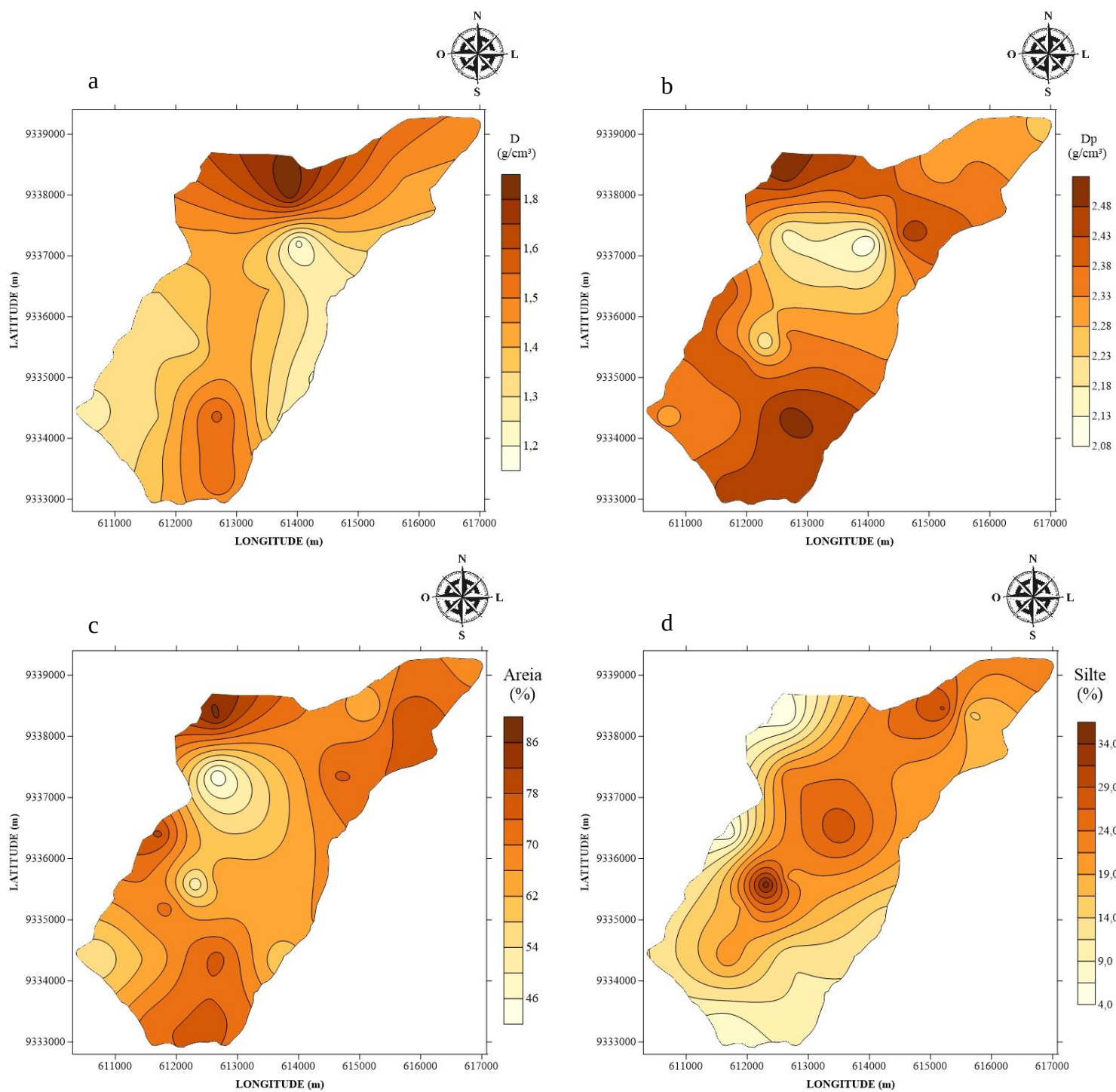


Figura 17. Mapas da variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo: (a) D_s , (b) D_p , (c) Areia e (d) Silte.

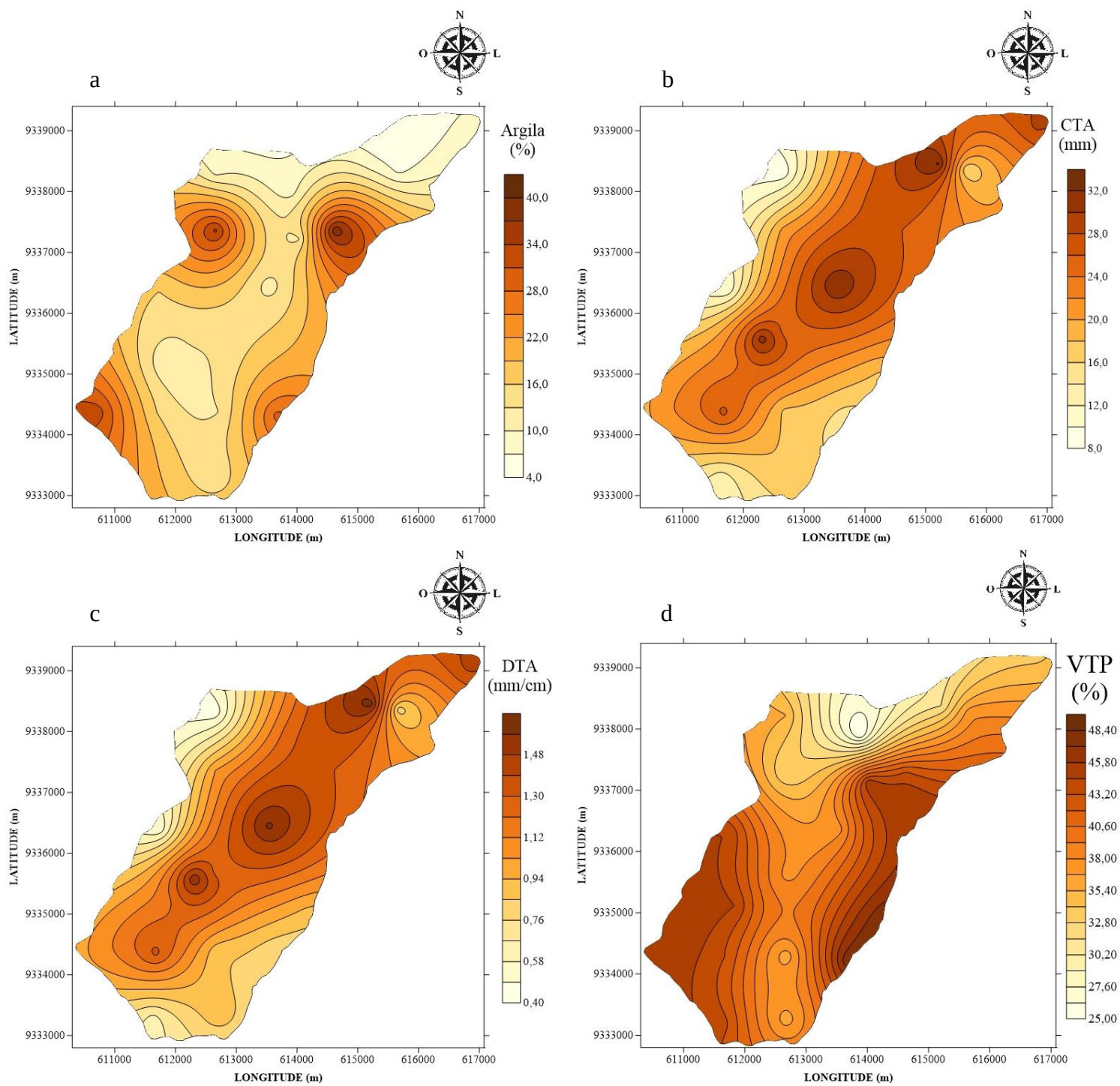


Figura 18. Mapas da variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo: (a) Argila, (b) CTA, (c) DTA e (d) VTP.

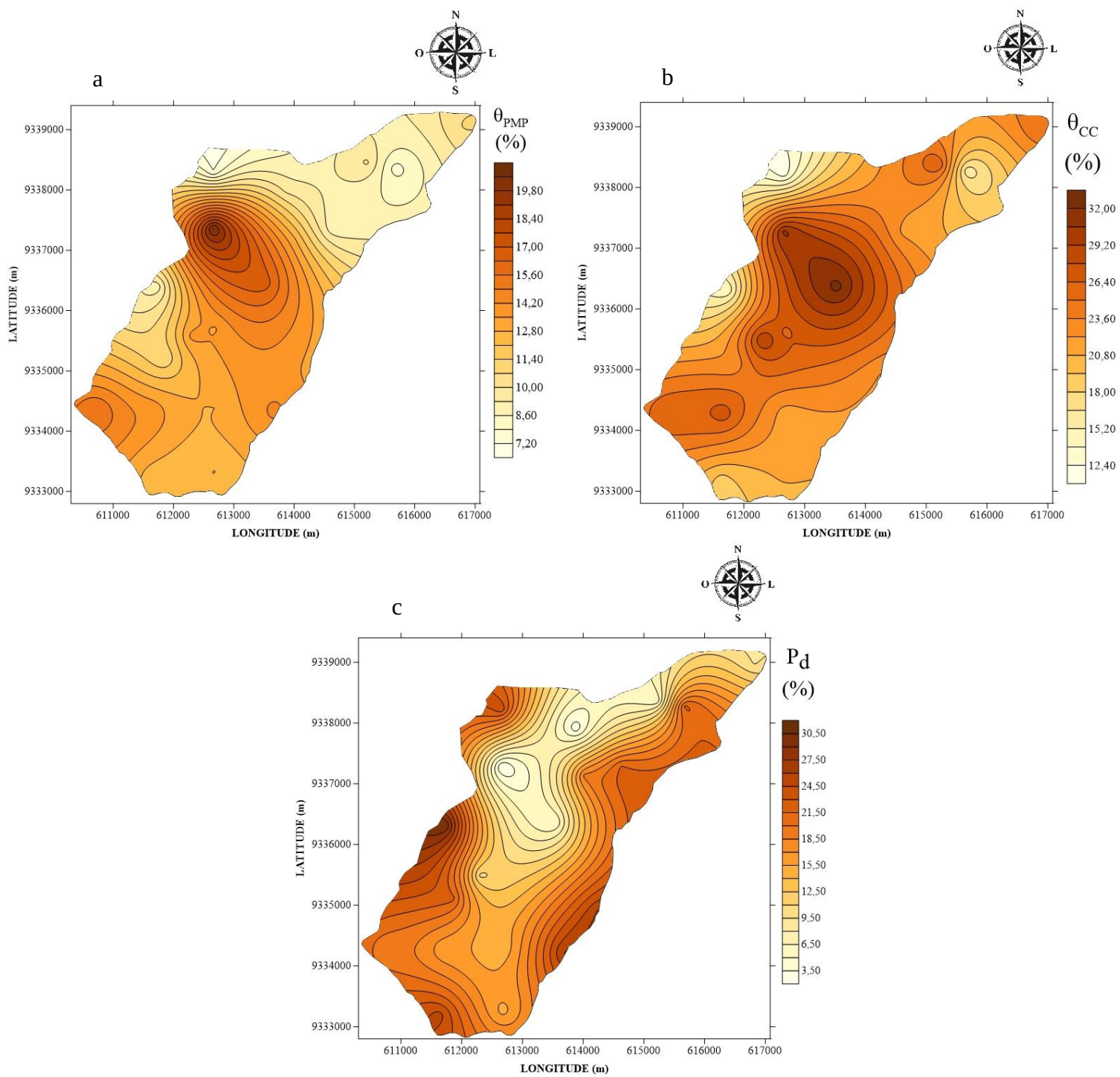


Figura 19. Mapas da variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo: (a) θ_{PMP} (b) θ_{CC} e (c) P_d .

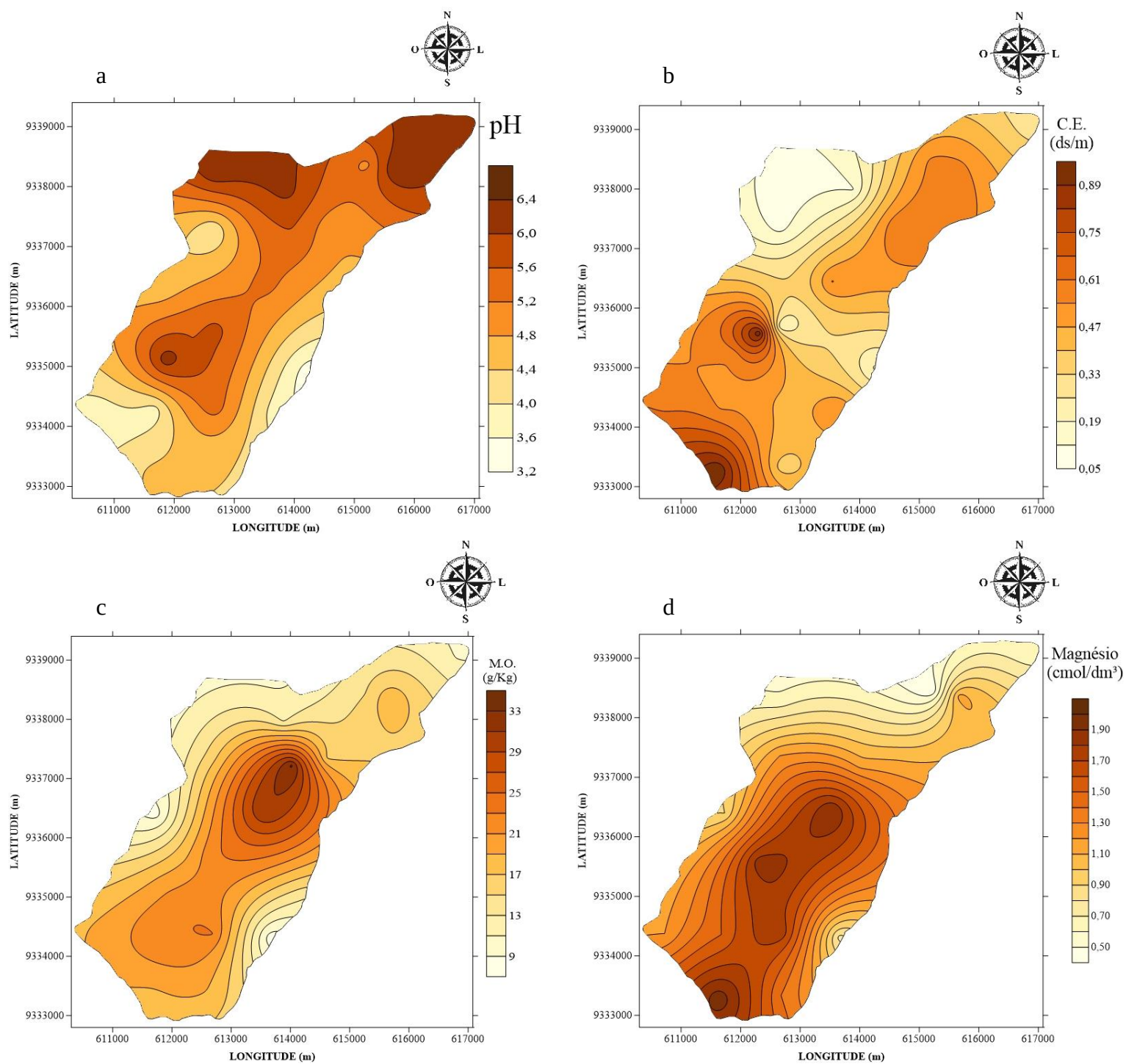


Figura 20. Mapas da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo: (a) pH, (b) CE, (c) MO e (d) Mg.

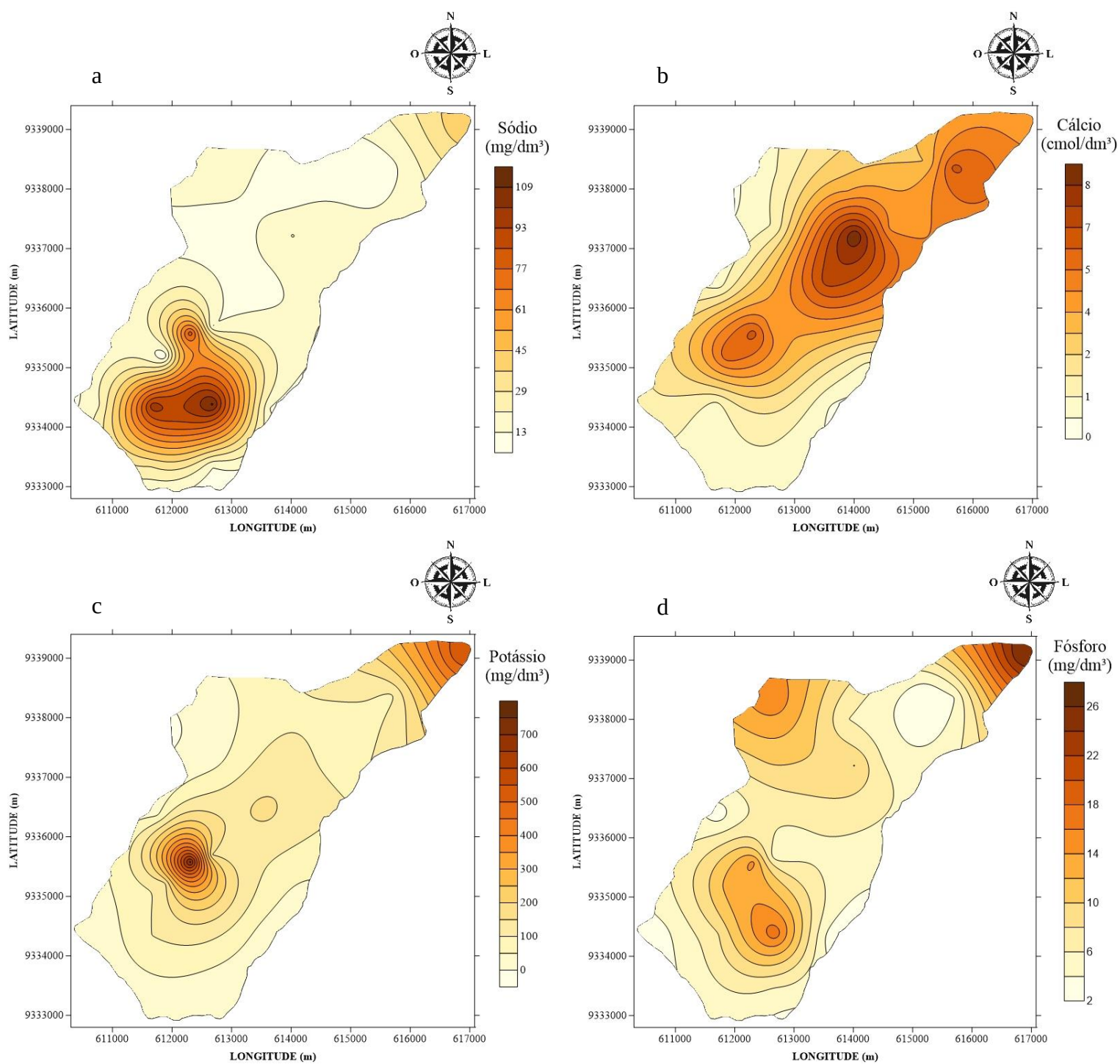


Figura 21. Mapas da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo: (a) Na, (b) Ca, (c) K e (d) P.

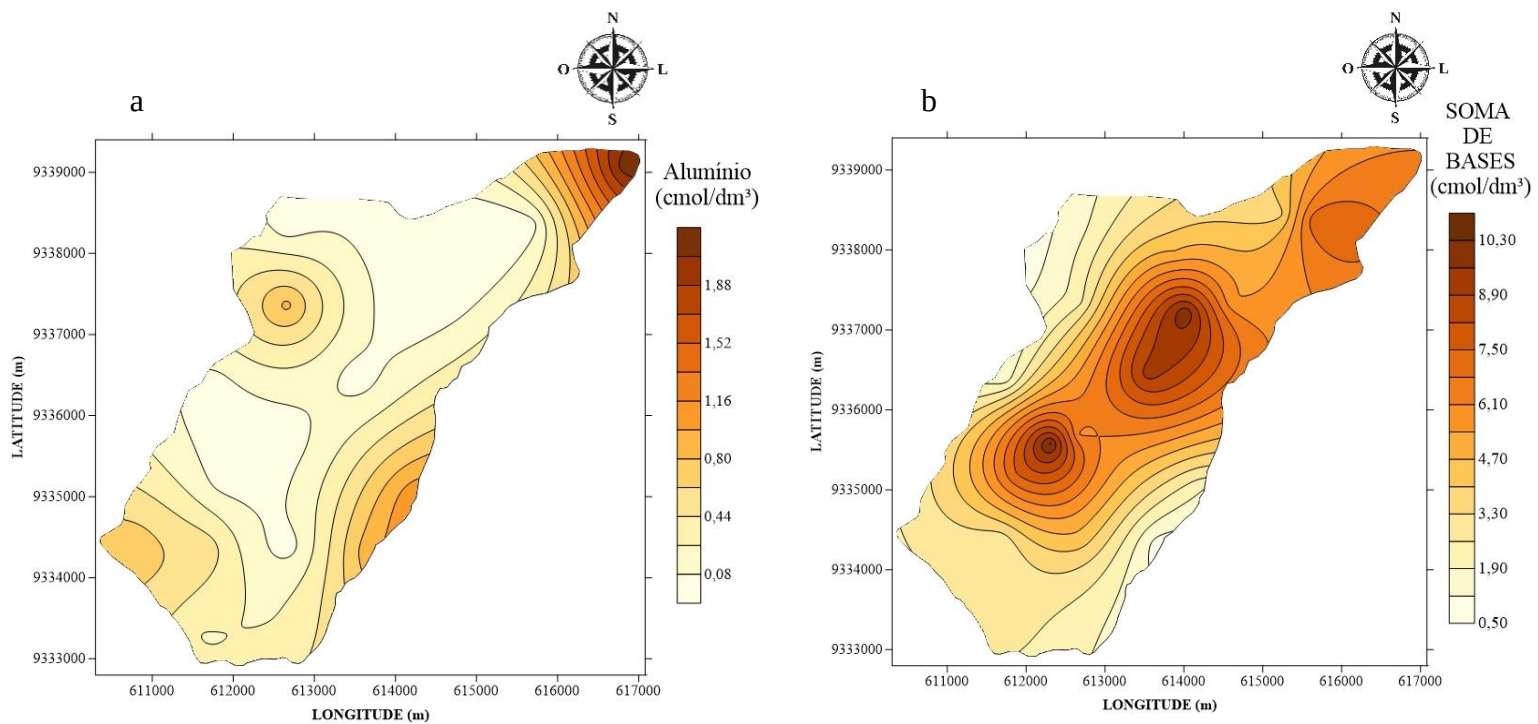


Figura 22. Mapas da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo: (a) Al e (b) SB.

5 CONCLUSÕES

O estudo mostrou que o uso da geoestatística foi adequado para a mensuração da dependência espacial dos atributos do solo numa microbacia hidrográfica, sendo os modelos teóricos, exponencial e esférico, os que apresentaram melhores resultados. Além disso, aliado aos Sistemas de Informações Geográficas, a metodologia mostrou-se viável para a espacialização dos atributos do solo, contribuindo significativamente para um mapeamento mais preciso dos parâmetros estudados.

Os atributos físico-hídricos do solo apresentaram-se mais homogêneos, com uma menor variabilidade em seus dados, quando comparados aos atributos químicos.

Os atributos químicos do solo sofreram maior interferência dos impactos antrópicos originados do uso e ocupação da microbacia hidrográfica.

A característica caducifólia da caatinga presente na microbacia hidrográfica, associada a preservação da vegetação, garantiram aos solos dessas áreas uma melhor condição dos seus atributos, propiciando a sua conservação.

O estudo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada evidenciou a rápida recuperação da vegetação caatinga da microbacia hidrográfica em resposta a pluviosidade.

A topografia e o relevo da microbacia hidrográfica interferiram de forma direta no comportamento espacial dos atributos do solo estudados.

O mapa de uso e ocupação do solo, juntamente com os mapas de variabilidade espacial dos atributos do solo, mostrou-se uma poderosa ferramenta de avaliação de impactos ambientais em microbacias hidrográficas, além de contribuírem de forma primorosa para o planejamento racional do uso e ocupação do solo em bacias hidrográficas de forma sustentável.

REFERÊNCIAS

- Ahn, C. W.; Baumgardner, M. F.; Biehl, L. L. Delineation of soil variability using geostatistics and fuzzy clustering analyses of hyperspectral data. *Journal Soil Science Society of America*, Madison, v. 63, p. 142-150, 1999.
- Albuquerque, J. A.; Sangoi, L.; Ender, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.25, p.717-723, 2001.
- Almeida, E. P. C.; Santos, H. G.; Zaroni, M. J. Agencia Embrapa de Informação Tecnológica-AGEITEC. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONT000g05ip3qr02wx5ok0q43a0r3t5vjo4.html>. Acesso em: 26 Jan. 2016.
- Andreola, F.; Costa, L. M.; Olszewski, N. Influência da cobertura vegetal de inverno e da adubação orgânica e, ou, mineral sobre as propriedades físicas de uma Terra Roxa Estruturada. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.24, p.857-865, 2000.
- Assad, M.L.L.; Hamada, E.; Cavalieri, A. Sistema de informações geográficas na avaliação de terras para a agricultura. In: Assad, E.D.; Sano, E.E. (Ed.) *Sistema de Informações Geográficas: aplicações na agricultura*. Planaltina: Embrapa-CPAC, 1998. p.191-232.
- Avanzi, J.C. Modelagem do escoamento superficial e erosão hídrica em uma microbacia hidrográfica na região dos tabuleiros costeiros (mestrado em solos e nutrição de plantas), Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2005.
- Barcelos, I. O., Geoprocessamento. 1992. Endereço Eletrônico: <http://www.celepar.gov.br/batebyte/bb92/geop.htm>.
- Barrella, W. et al. As relações entre as matas ciliares os rios e os peixes. In: Rodrigues, R.R.; Leitão Filho; H.F. (Ed.) *Matas ciliares: conservação e recuperação*. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001.
- Bassoi, L. H.; Aquino, L. S.; Reckziegel, L. N.; Timm, L. C.; Vaz, C. M. P.; Manieri, J.; Tavares, V. E. Q. Mapas de contorno da capacidade de água disponível em solo cultivado com videiras irrigadas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., 2007, Gramado. Anais... Gramado: SBCS, 2007. p. 1-4.
- Bernardo, S.; Soares, A. A.; Mantovani, E. C. Manual de irrigação – 8. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2011.
- Bertol, I.; Almeida, J. A. de.; Almeida, E. X.; Kurtz, C. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem de capim Elefante-Anão C.V. Mott. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 35, n. 5, p. 1047-1054, maio 2000.
- Bertol, I.; Beutler, J. F. ; Leite, D. & Batistela, O. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetado pelo tipo de manejo de solo. *Scientie Agricola*, Piracicaba v. 58, n. 3, p. 555-560, 2001.
- Bertol, I.; Santos, J. C. P. Uso do solo e propriedades físico-hídricas na Planalto Catarinense. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília v. 30, p. 263-267, 1995.
- Braida, J. A.; Reichert, J. M.; Reinert, D. J.; Veiga, M. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e Argissolo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.131-139, 2010.
- Brooks, K, N.; Ffolliott, P.F.; Gregersen, H. M.; Thames, J. L. *Hidrology and management of watersheds*. Ames, Iowa State University Press, 1991.
- Câmara, G.; Carvalho, M. S. Análise espacial de eventos. In: DRUCK, S.; Carvalho, M. S.; Câmara, G.; Monteiro, A. M. V. (Ed.). *Análise espacial de dados geográficos*. Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2004. cap. 2, p. 55-75.

- 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. p. 13 – 29.
- Camargo, O. T. de.; Alleoni, L. R. F. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. Piracicaba, 1997. 132 p.
- Cambardella, C. A.; Moorman, T. B.; Parkin, T. B.; Karlen, D. L.; Novak, J. M.; Turco, R.F.; Konopka, A.E. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. Soil Science Society of America Journal, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994
- Carvalho, A. D. P.; Neto, J. M. D. M. Estudo da degradação ambiental da Bacia hidrográfica do açude Soledade no Estado da Paraíba. XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR). Curitiba: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2011. p. 1129. 30 de abril a 05 de maio
- Carvalho, J. R. P.; Vieira, S. R. Teste de filiben para validar modelos Geoestatísticos aplicados à agroclimatologia. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 23., 2004, São Pedro. Anais... Campinas: UNICAMP, 2004. 1 CD-ROM.
- Carvalho, N. O. Hidrossedimentologia prática. Rio de Janeiro: CPRM, 1994. 372 p.
- Cecílio, R. A.; Garcia, G. O.; Moreira, M. C. A importância do setor agropecuário para a proteção e conservação dos recursos hídricos. In: Jesus Junior, W. C. et al. (Eds.) Novas tecnologias em Ciências Agrárias. Alegre: Suprema Gráfica e Editora, 2007. 264p.
- Coelho, F. S. Fertilidade do solo. 2. ed. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1973. 384 p.
- Conceição, P. C.; Amado, T. J. C.; Mielniczuk, J.; Spagnollo, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria e atributos relacionados. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG, v.20, n. 5, p. 777-778, set./out. 2005.
- CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea: Diagnóstico do Município de Portalegre, RN. In: MASCARENHAS et al (Org.). Recife: CPRM/PRODEEM, 2005.
- Cressie, N. A. Statistics for spatial data. New York: J. Wiley, 1993. 900 p. (Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics).
- Diggle, P. J.; Ribeiro Junior, P. J. Model-based geostatistics. In: SIMPÓSIO DE PROBABILIDADE ESTATÍSTICA, 14., 2000, Caxambú. Resumos... Caxambú: Associação Brasileira de Estatística, 2000. 129 p.
- Donagema, G. K.; Campos, D. V. B. de; Calderano, S. B.; Teixeira, W. G.; Viana, J. H. M. (Org.). Manual de métodos de análise de solos. 2.ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p. (Embrapa Solos. Documentos, 132).
- Doran, J. W.; Parkin, T. B. Defining and assessing soil quality. In: Doran, J. W.; Coeman, D. C.; Bezdicek, D. F.; Stewart, B. A. (ed.). Defining soil quality for sustainable environment. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p.3-21. SSSA Special Publication, 35.
- Eguchi, E. S. Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos de um solo hidromórfico no município de Lavras-MG. 2001. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. UEP Recife, 2006. Disponível em: (www.uep.cnps.embrapa.br/solos/index.html).
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e Abastecimento. 2013. 230 p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte, Monitoramento Pluviométrico Anual do Município de Portalegre e Viçosa (2005 – 2015). Natal: EMPARN, 2016. Disponível em: <<http://189.124.135.176/monitoramento/monitoramentoboletim.php>>. Acessado em 29/02/2016.

- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3. ed. Brasília/DF. 2011. 353 p.
- Ferreira M. M. Caracterização física do solo. In: Jong van Lier Q, editor. Física do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2010. p.1-28.
- Flowers, M. D.; LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. *Soil & Tillage Research*, v.48, p.21-35, 1998.
- Folegatti, M. V. Estabilidade temporal e variabilidade espacial da umidade e do armazenamento de água em solo siltoso. 1996. 84 p. Tese (Doutorado em Irrigação) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- Freitas, P. L.; Manzatto, C. V.; Coutinho, H. L. C. A crise da energia e a degradação dos recursos naturais: solo, ar, água e biodiversidade. *Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 26, p. 7-9, 2001.
- Gamma Design Software. GS+: geostatistics for the environmental sciences. Plainwell, 2004.
- Gomes, N. M, Variabilidade espacial de atributos físicos-hídricos do solo da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela da região do Alto Rio, MG. 2005. 124p.Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem)- UFLA, Lavras, MG.
- Gonçalves, A.C.A.; Folegatti, M.V. & Silva, A.P. Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em área irrigada por pivô-central. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, 23:155-164, 1999.
- Google Earth. <http://earth.google.com/>. [janeiro de 2016]
- Grego, C.R.; Vieira, S.R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. *Revista brasileira de ciências do solo*, v. 29, p. 169-177, 2005.
- Hamza, M. A.; Anderson, W.K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions, *Soil & Tillage Research*, v.82, p.121-145, 2005.
- Hollanda, M. P. ; Campanharo, W. A. ; Cecílio, R. A. . Manejo de Bacias Hidrográficas e a Gestão Sustentável dos Recursos Naturais. In: Lima D. Martins; Thales R. Hannas; Rita de C.M.O. Ventura; Anandy K. F. Alvim-Hannas; Jane A. Mendonça; Lidiane H. de Fúcio; Lílian B. F. Longo; Lívia P. A. Lamas; Luciana B. e Silva; Ludmila B. Furtado; Mônica de O. Costa; Rutelêia C. S. Silva. (Org.). *Atualidades em Desenvolvimento Sustentável*. 1ed. Manhuaçu - MG: Suprema Gráfica e Editora Ltda, 2012, v. 1, p. 57-66.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Histórico de Portalegre-RN. 2007. Disponível em: <<http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/dtbs/riograndedonorte/portalegre.pdf>> Acesso em: 23. jan.2016.
- Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Ambiente do Rio Grande do Norte- IDEMA. Perfil do município de Martins, 2008. Disponível em: <http://www.idema.rn.gov.br/contentproducao/aplicacao/idema/socio_economicos/arquivos/Perfil%202008/Martins.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2013.
- Isaaks, E. H.; Srivastava, M. An introduction to applied geostatistics. New York: Oxford University, 1989. 600p.
- Jarbas, T.; Sá, I. B.; Petreire, V. G.; Taura, T. A. Agência Embrapa de Informação Tecnológica - AGEITEC. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/bioma_caatinga/arvore/CONT000g5twggzh02wx5ok01edq5scvvo0oy.html>. Acesso em: 26 Jan. 2016.
- Jensen, J. R. Introductory digital image processing: a remote sensing perspective. 2 a . ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1996.
- Junqueira Júnior, J. A. Escoamento de nascentes associado à variabilidade espacial de atributos físicos e uso do solo em uma bacia hidrográfica de cabeceira do Rio Grande - MG. 2006. 84 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Lavras, Lavras.

- Lacerda, M. P. C.; Alvarenga, M. I. N. Recursos naturais da microbacia. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v.21, n. 207, p. 21-32, nov./dez. 2000.
- Lawles, J. F. Statistical models and methods for lifetime data. New York: J. Wiley, 1982. 580 p.
- Lemos Filho, L. C. de A. Estabilidade temporal e análise espacial do armazenamento de água em solo arenoso da região de Petrolina-PE. 2010. 151 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- Lemos Filho, L.C.A.; Oliveira, E.L.; Faria, M.A.; Andrade, L.A.B. Variação espacial da densidade do solo e matéria orgânica em uma área cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). Revista Ciência Agronômica, v. 39, p. 193-202, 2008.
- Lima, C. A. G.; Silans, A.P. Variabilidade espacial da infiltração de água no solo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.34, n.12, p. 2311-2320, dez. 1999.
- Lima, G. C.; Silva, M. L. N.; Oliveira, M. S.; Curi, N.; Silva, M. A.; Oliveira, A. H. Variabilidade de atributos do solo sob pastagens e mata atlântica na escala de microbacia hidrográfica. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.18, n.5, p.517–526, 2014. Disponível em: <
http://www.agriambi.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=24&Itemid=11>. Acesso em: 26 jan. 2016.
- Macedo, M. C. M. Integração lavoura pecuária: O estado da arte e inovações tecnológicas. Revista Brasileira de Zootecnia, v.38, p.133-146, 2009.
- Maroco, J. Análise Estatística com utilização do SPSS. 3ª Ed.Lisboa: Edições SilaboLtda, 2007. 824p.
- McBratney, A.B.; Santos, M.L.M.; Minasny, B. On digital soil mapping. Geoderma, v.117, p.3-52, 2003.
- Medeiros, S. J. G. R.; Medeiros, J. F. d. Descrição da Geodiversidade como Subsídio ao Zoneamento Ambiental de Portalegre – RN. Geotemas. Pau dos Ferros, RN. v.2, n.2, p. 17-33, jul./dez. 2012.
- Medeiros, S. R. M. Análise da viabilidade socioambiental para a criação de uma unidade de conservação na microbacia da mata da bica, Portalegre (RN). 2015. 147 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Naturais). Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. Programa de Pós Graduação em Ciências Naturais. Disponível em: <
<http://www.uern.br/controladepaginas/mestrado-dissertacoes/defendidas/arquivos/2212samylle.pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2016.
- Mello, C. R.; Lima, L. M.; Silva, A. M.; Mello, J. M.; Oliveira, M. S. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 27, p. 925-933, 2003.
- Mello, J. M. Geostatística aplicada ao inventário florestal. 2004, 110 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais, com opção em Silvicultura e Manejo Florestal)- ESALQ, Piracicaba, SP.
- Mello, J. M.; Batista, J. L. F.; Ribeiro Júnior, P. J.; Oliveira, M. S. Ajuste e seleção de modelos espaciais de semivariogramas visando à estimativa volumétrica de *Eucaliptus grandis*. Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 1, n. 69, p. 25-37, 2005.
- Mello, R. C. de.; Oliveira, G. C. de.; Ferreira, D. F.; Lima, J. M. de.; Predição da porosidade drenável e disponibilidade de água para Cambissolos da Microrregião Campos das Vertentes, MG. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 37, n. 9, p. 1319-1324, set. 2002.
- Melo, E. T.; Sales, M. C. L.; Oliveira, J. G. B. Aplicação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para análise da degradação ambiental da microbacia hidrográfica do Riacho dos Cavalos, Crateús-CE. RA´E GA 23 (2011), p. 520-533. Curitiba, Departamento de Geografia – UFPR. Disponível em: www.geografia.ufpr.br/raega/.. Acesso em: 31 Jan. 2016.

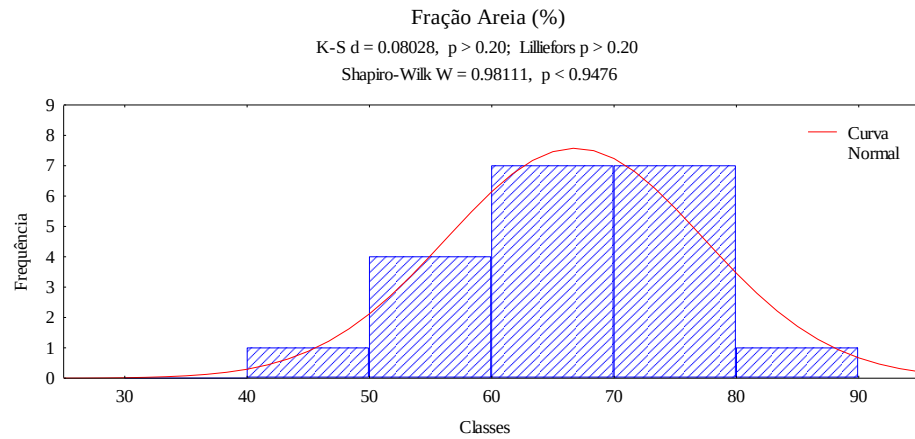
- Meneguzzo, I. S. Análise da degradação ambiental na área urbana da bacia do rio Arroio Gertrudes, Ponta Grossa, PR.: uma contribuição ao planejamento ambiental. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, p. 100. 2006.
- Ministério do Meio Ambiente- MMA. Biomas: Caatinga. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/biomas/caatinga>>. Acesso em: 25 Jan. 2016.
- Moreira, W. H.; Betioli Júnior, E.; Petean, L. P.; Tormena, A. C.; Alves, S. J.; Costa, M. A. T.; Franco, H. H. S. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico em sistema de integração lavoura-pecuária. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, p.389-400, 2012.
- Neres, S. C. T. Nascentes da região serrana de Martins e Portalegre, Rio Grande do Norte: aspectos hidrodinâmicos e macroscópicos como subsídio à conservação. 2014. 169 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Naturais). Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. Programa de Pós Graduação em Ciências Naturais. Disponível em: < http://www.uern.br/controladepaginas/mestrado-dissertacoes/defendidas/arquivos/2212dis_suellen.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2016.
- Nielsen, D. R.; Wendroth, O. Spatial and temporal statistics: sampling field soils and their vegetation. Reiskirchen: Catena Verlag, 2003. 398 p.
- Novo, E. L. M. Sensoriamento remoto: princípios e aplicações. Edgar Blucher, São Paulo, 1989.
- Oliveira, M. S. de; Bearzoti, E.; Vilas Boas, F. L.; Nogueira, D. A.; Nicolau, L. A. Introdução a Estatística. Lavras: Editora UFLA, 2009. 334p.
- Pedron, F.A.; Poelking, E.L.; Dalmolin, R.S.D.; azevedo, A.C.; Klamt, E. A aptidão de uso da terra como base para o planejamento dos recursos naturais no município de São João do Polesine, RS. *Ciência Rural*, v.36, p.105-112, 2006.
- Pinheiro, E. A. R. Determinação in situ da profundidade efetiva das raízes da caatinga preservada para fins de balanço de água no solo. Monografia (Graduação) Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Fortaleza, 2010.
- Pizarro, F. Drenagem agrícola y recuperacion de suelos salinos. Madrid, Editorial Agrícola Española, 1978, 521p
- Portugal, A. F.; Costa, O. D. V.; Costa, L. M. Propriedades físicas e químicas do solo em áreas com sistemas produtivos e mata na região da Zona da Mata mineira. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 575 - 585, 2010.
- Pritchett, W. L.; Fisher, R. F. Properties and management of forest soils. 2.ed. New York: John Wiley e Sons, 1987.
- Quantum GIS user guide version 2.12.1 "TITAN".QGIS Development TEAM, 118 p., 2006. Disponível em: <http://www.qgis.org>.
- Reichardt, K.; Timm, L. C. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. São Paulo: Manole, 2004. 478.
- Reichert, J. M.; Reinert, D. J.; Braidá, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ciência & Ambiente*, Santa Maria, v. 27, p. 26-48, jul./dez. 2003.
- Ribeiro Júnior, P. J.; Diggle, P. J. GeoR: a package for geostatistical analysis. *R-NEWS*, London, v. 1, n. 2, p. 15-18, 2001.
- Santana, D.P. Manejo Integrado de Bacias Hidrográficas. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. 63p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 30).
- Santos, E. S.; Silva, J. R. L.; Andrade, T. S.; Montenegro, A. A. A. Caracterização morfométrica da bacia experimental do riacho jatobá Pesqueira-PE. In: XVII Simpósio brasileiro de Recursos Hídricos, 2007, São Paulo, SP-Brasil.
- Santos, G. G. Impacto de sistemas de integração lavoura-pecuária na qualidade física do solo. Goiânia: UFG, 2010. 122p. Tese Doutorado.

- Santos, G. G.; Marchão, R. L.; Silva, E. M.; Silveira, P. M.; Becquer, T. Qualidade física do solo sob sistemas de integração lavoura-pecuária. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.46, p.1339-1348, 2011a.
- Santos, K. S. Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos em solos de vale aluvial no semiárido Pernambucano. 2011. 109 f.: il. Dissertação Mestrado em Ciências do Solo, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Agronomia, Recife, Disponível em: <http://tede.ufrpe.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=1273>. Acesso em: 25 jan. 2016.
- Santos, G.V. et al. Análise hidrológica e socioambiental da bacia hidrográfica do córrego romão dos reis, VIÇOSA-MG. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v.31, n.5, p.931-940, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rarv/v31n5/a17v31n5.pdf>> Acesso em: 24 jan.2016.
- Santos, K. S.; Variabilidade dos atributos físicos e químicos em um solo de vale aluvial no semiárido Pernambucano. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) Universidade Federal Rural do Pernambuco, Recife, 2011. Disponível em: <http://tede.ufrpe.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=1273>. Acesso em: 16 Jan. 2016.
- Schick, J.; Bertol, I.; Batistela, O.; Balbinot Júnior, A.A. Erosão hídrica em Cambissolo húmico álico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: I. Perdas de solo e água. *Revista brasileira de ciência do solo*, v. 24, p. 427-436, 2000.
- Scully, P.; Franklin, J.; Chadwick, O.A. The application of classification tree analysis to soil type prediction in a desert landscape. *Ecological Modelling*, v.181, p.1-15, 2005.
- Serato, D. S.; Rodrigues, S. C. Avaliação e recuperação da área degradada (voçoroca) no interior da Fazenda Experimental do Glória no município de Uberlândia (MG). *Boletim Goiano de Geografia*, Goiânia, v. 30, p. 29-42, jul/dez 2010.
- Silva, E.M. da; Azevedo, J.A. de. Influência do período de centrifugação na curva de retenção de água em solos de Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.37, p.1487-1494, 2002.
- Silva, E.M. da; Azevedo, J.A. de. Período de centrifugação adequado para levantamento da curva de retenção da água em solos do bioma Cerrado. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. 40p. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 8).
- Souza, C.K. Relação solo-paisagem-erosão e variabilidade espacial de Latossolos em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar no município de Jaboticabal (SP). 2001. 186f. Tese (Mestrado) – Faculdade de Agronomia, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2001.
- Souza, E.R. & Fernandes, M.R. Sub-bacias hidrográficas: unidades básicas para o planejamento e a gestão sustentáveis das atividades rurais. *Inf. Agropec.*, Belo Horizonte, 207: 15- 20, 2000.
- Souza, G. B. N. Degradação ambiental e ocupação do solo na várzea do rio Ouricuri, Capanema (PA). *Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada*. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2003.
- Souza, Z. M.; Marques Júnior, J.; Perreira, G. T.; Moreira, L. F. Influência da pedoforma na variabilidade espacial de alguns atributos físicos e hídricos de um latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. *Irriga, Botucatu*, v. 9, n. 1, p. 1-11, jan./abr. 2004.
- Stefanoski, D. C.; Santos G. G.; Marchão R. L.; Petter F. A.; Pacheco L. P.; Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, n.12, p.1301–1309, 2013. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v17n12/v17n12a08.pdf>> Acesso em: 24 Jan. 2016.
- Surfer. Contouring and 3D surfaces mapping for scientist's engineers. version 11.0, user's guide. New York: Golden Software, 2012. 619 p.
- Vendrusculo, L. G. Uso de índice de desempenho e do critério de informação de Akaike para ajuste de modelos de semivariogramas. Campinas: EMBRAPA, 2003. 4 p. (Comunicado técnico, 58).

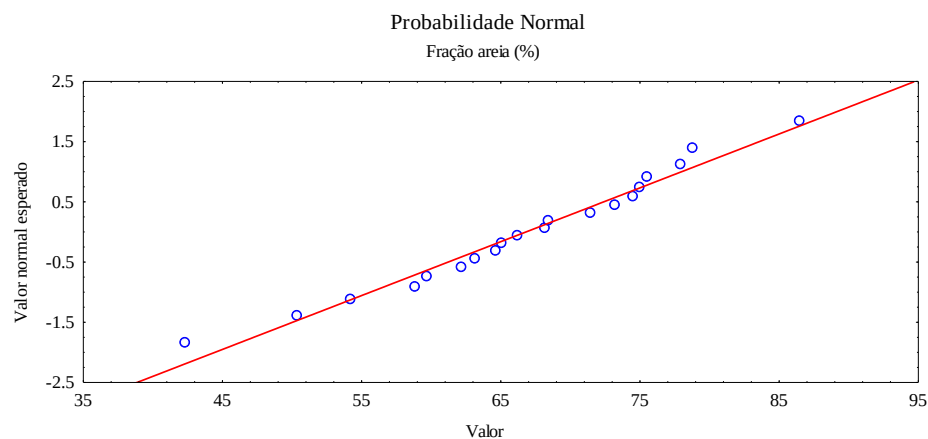
- Vieira, S. R. Curso de atualização em conservação do solo: uso da geoestatística em estudos de variabilidade espacial. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1995. 61 p. Apostila.
- Vieira, S. R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um latossolo roxo de Campinas (SP). *Bragantia*, Campinas, v. 56, n. 1, p. 181-190, 1997.
- Vieira, S. R.; Hatfield, J. L.; Nielsen, D. R.; Biggar, J. W. Geoestatistical theory and applications to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, Berkeley, v. 51, n. 3, p. 1-75, 1983.
- Vieira, S.R. Geoestatística em estudo de variabilidade espacial do solo. In: Novais, R.F.; Alvarez V., V.H. & Schaefer, C.E.G.R., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.1-55.
- Warrick, A. W.; Nielsen, D. R. Spatial variability of soil physical proprieties in the field. In: Hillel, D. *Applications of soil physics*. New York: Academic Press, 1980. Cap.5, p.319-344.
- Souza, L. S. Variabilidade espacial do solo em sistemas de manejo. 1992. 162 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

APÊNDICE – ESTATÍSTICA DESCRITIVA GRÁFICA

(a)



(b)



(c)

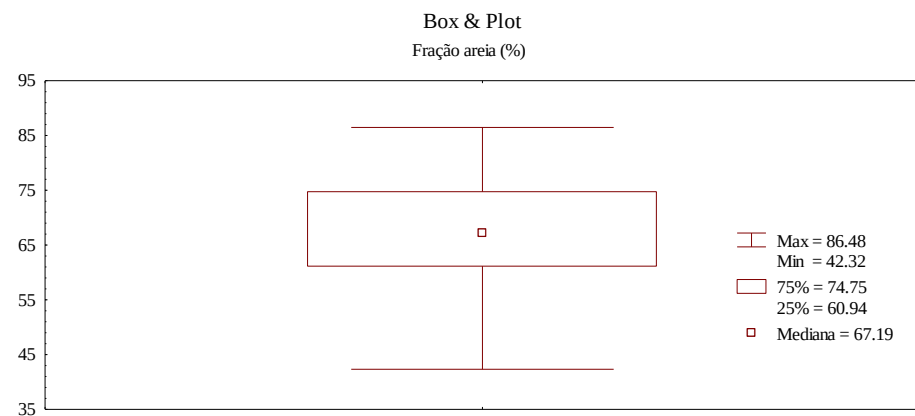
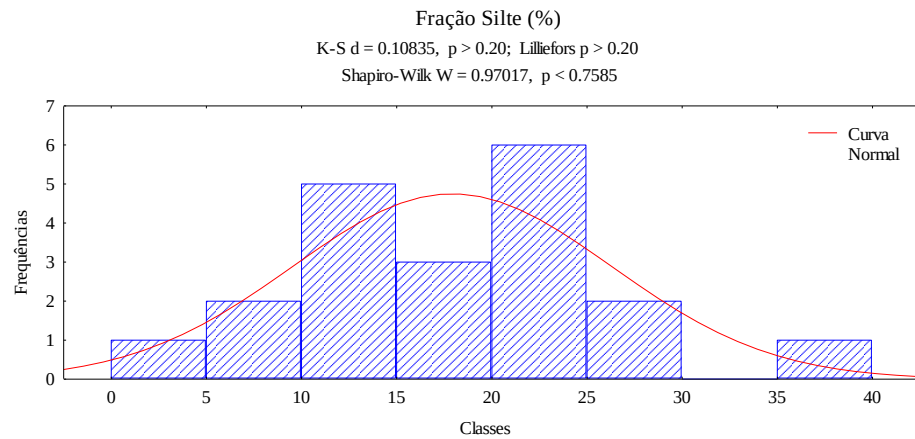
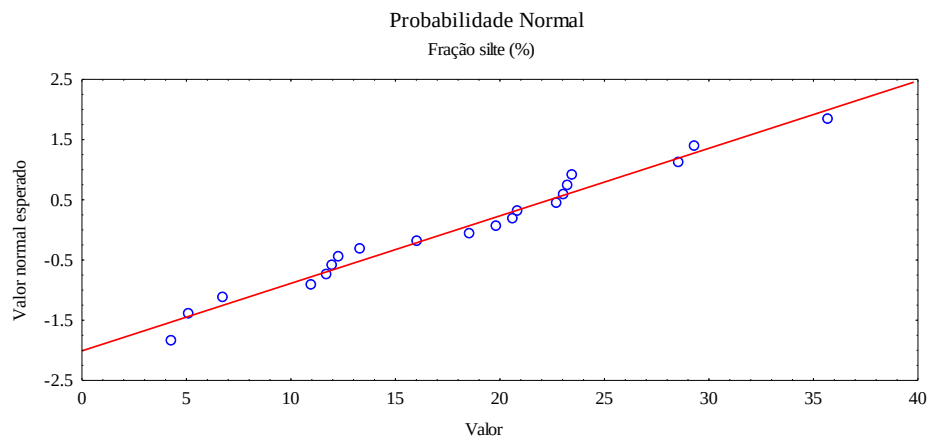


Figura 23. Estatística descritiva gráfica para os dados de teor de areia (%) do solo na microbacia hidrográfica estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

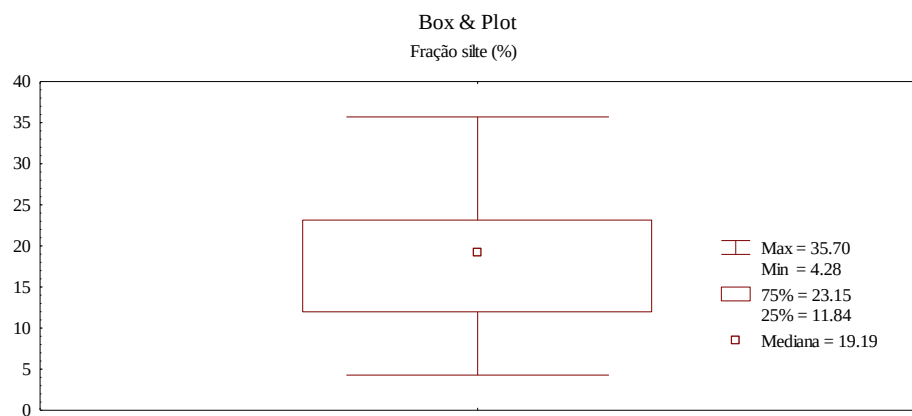
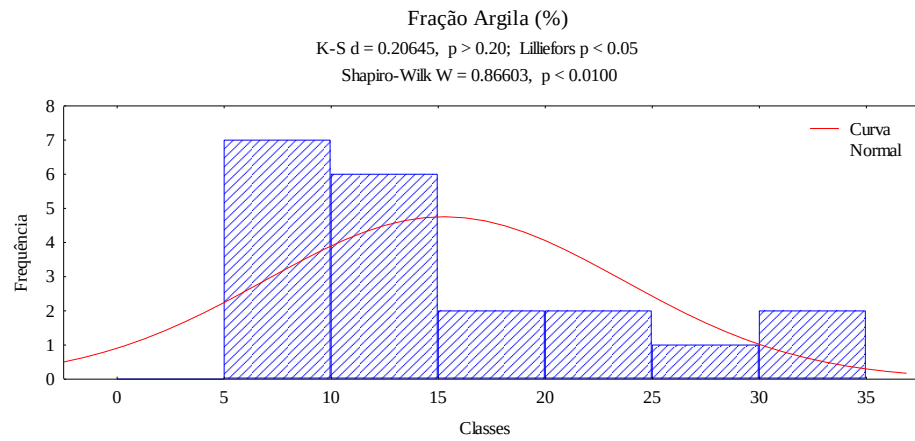
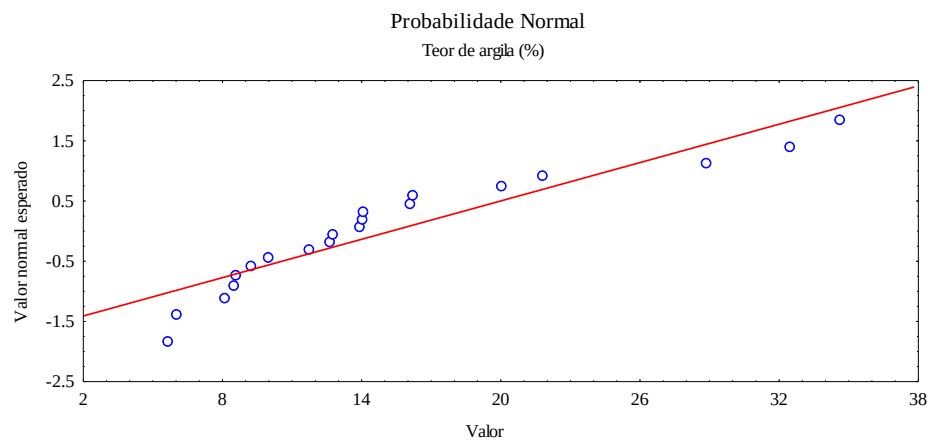


Figura 24. Estatística descritiva gráfica para os dados de teor de silte (%) do solo na microbacia hidrográfica estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

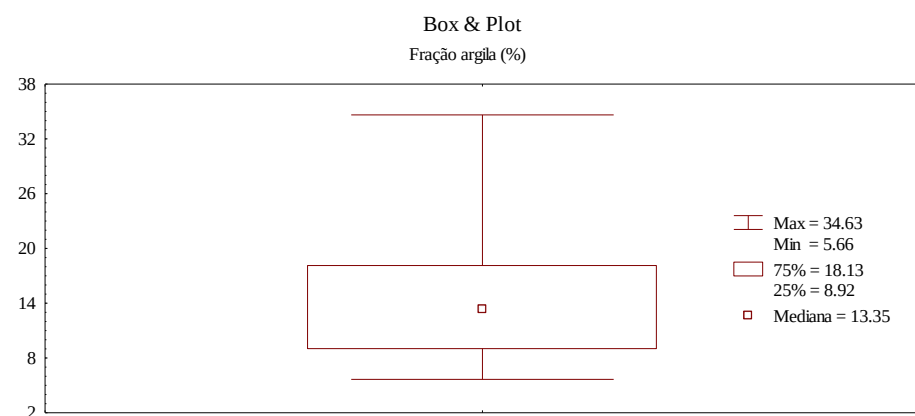
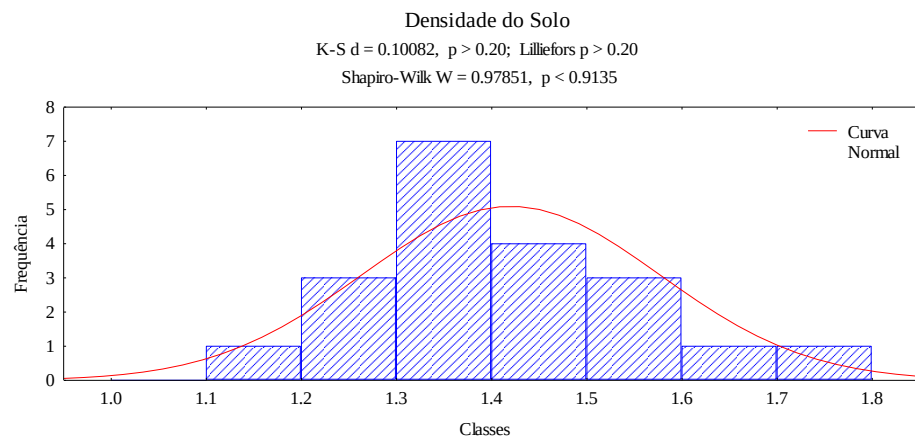
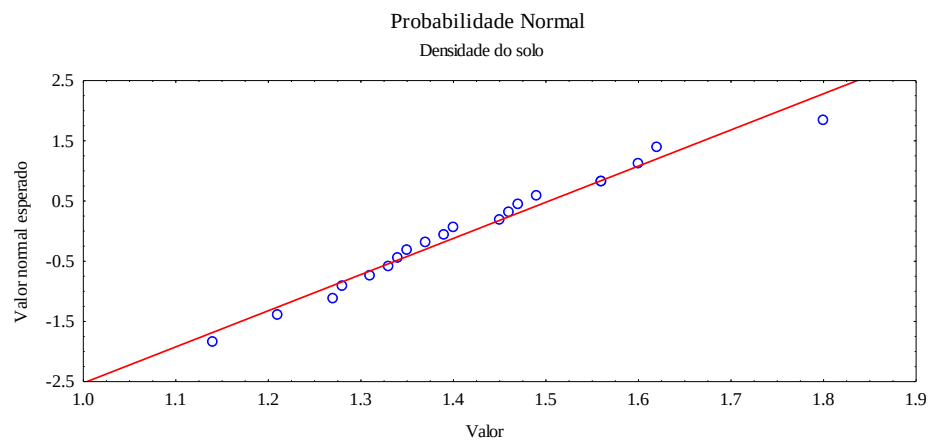


Figura 25. Estatística descritiva gráfica para os dados de teor de argila (%) do solo na microbacia hidrográfica estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

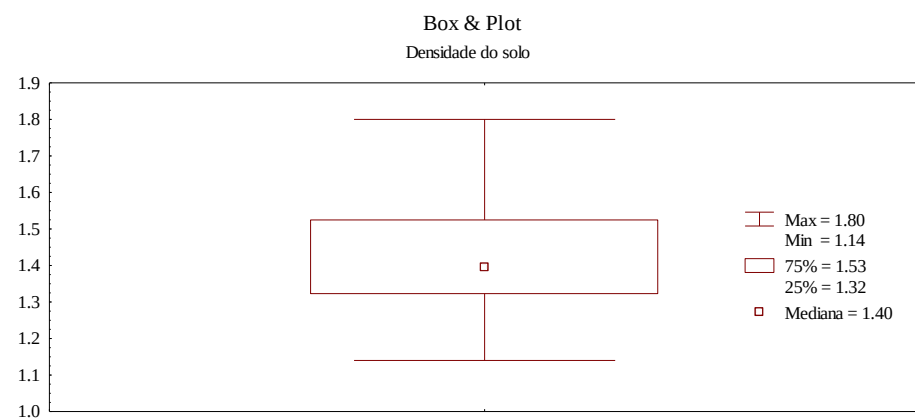
(a)



(b)

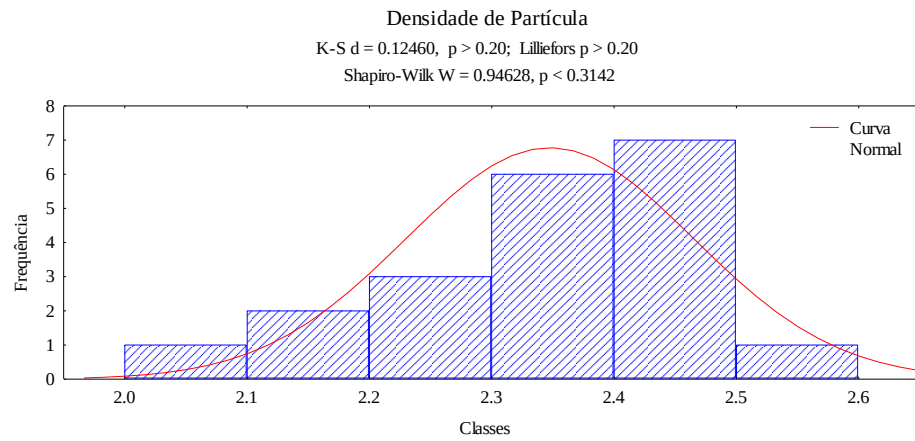


(c)

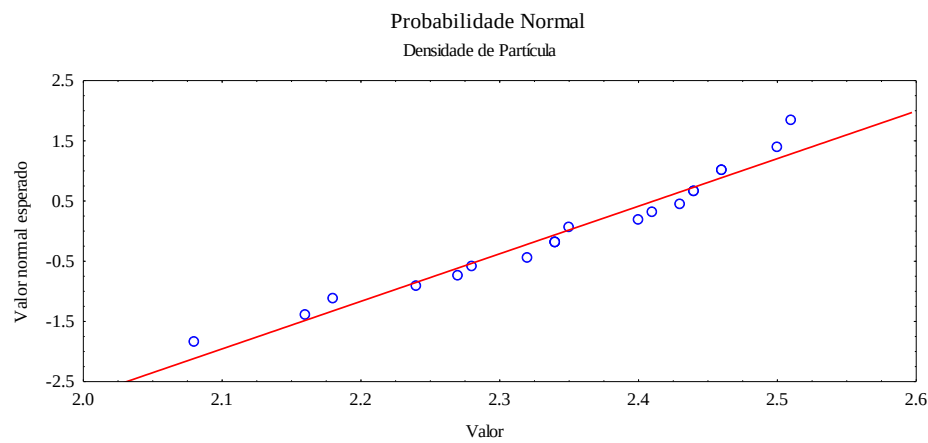


(Figura 26. Estatística descritiva gráfica para os dados da densidade do solo (Ds)) na microbacia hidrográfica estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

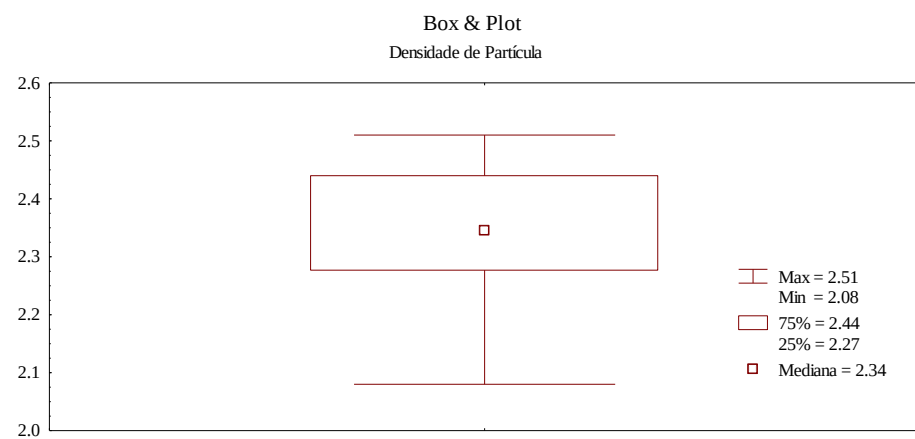
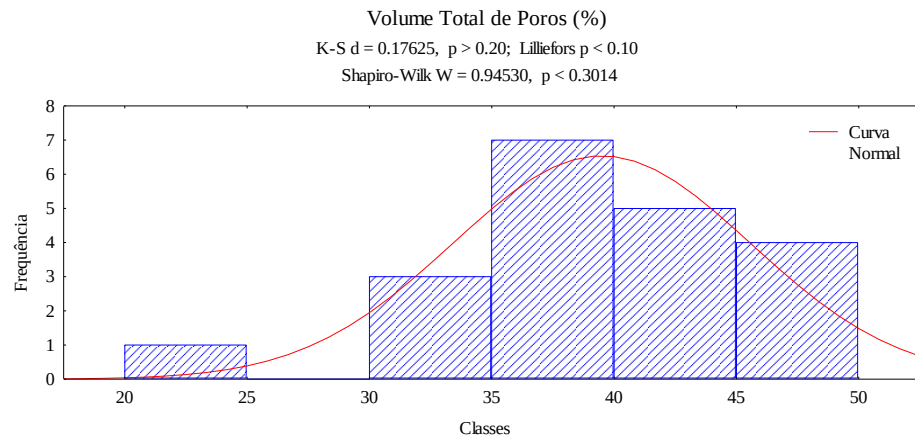
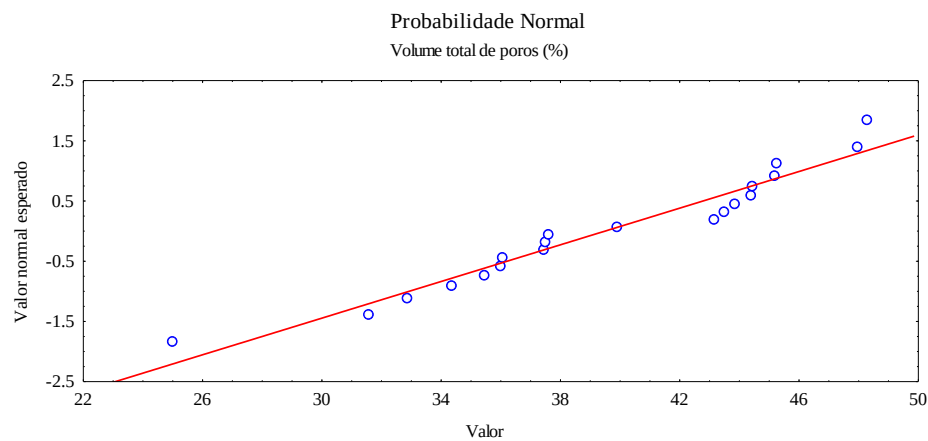


Figura 27. Estatística descritiva gráfica para os dados da densidade de partícula (D_p) na microbacia hidrográfica estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

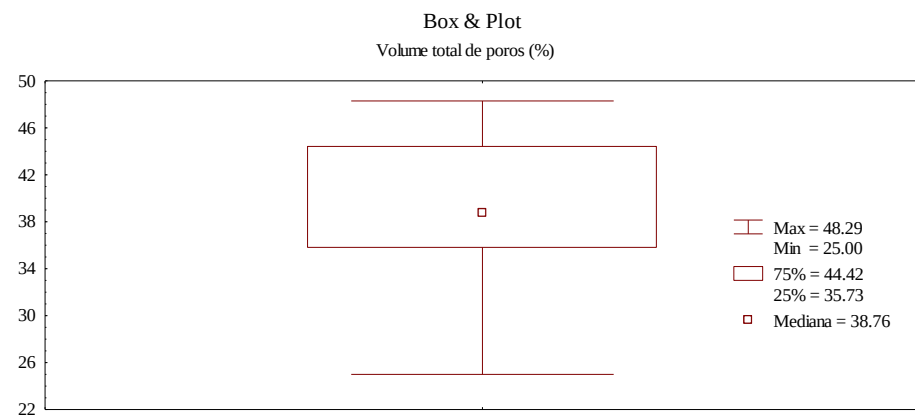
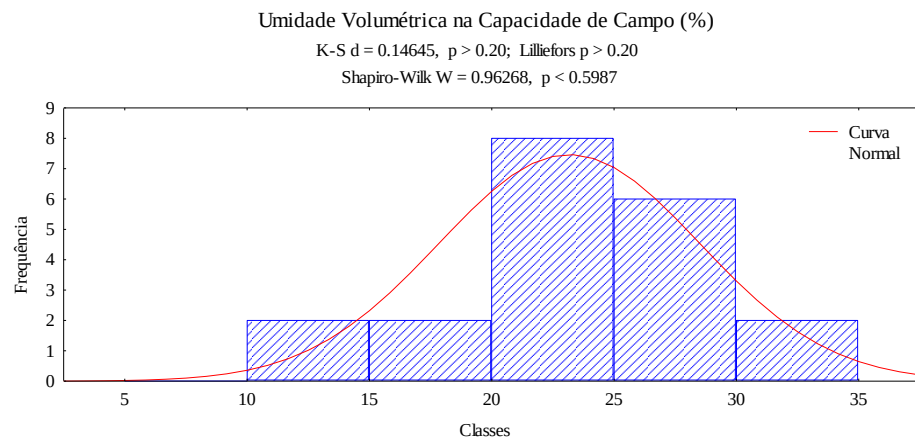
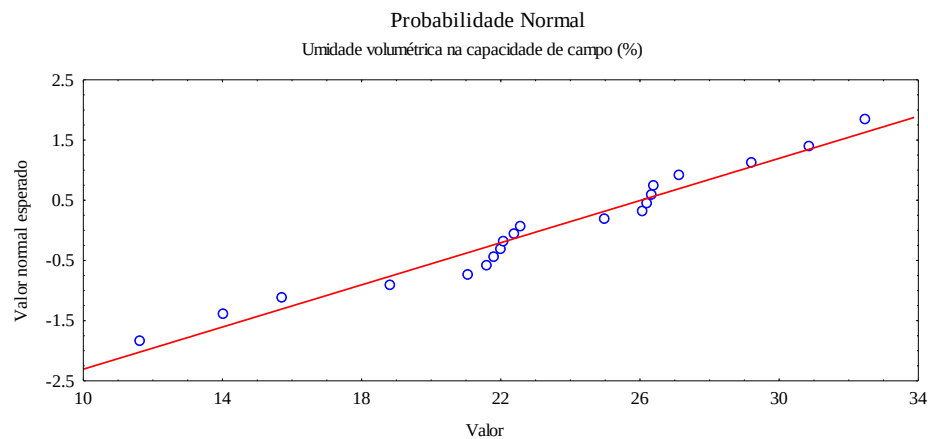


Figura 28. Estatística descritiva gráfica para os dados do volume total de poros (VTP) na microbacia hidrográfica estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

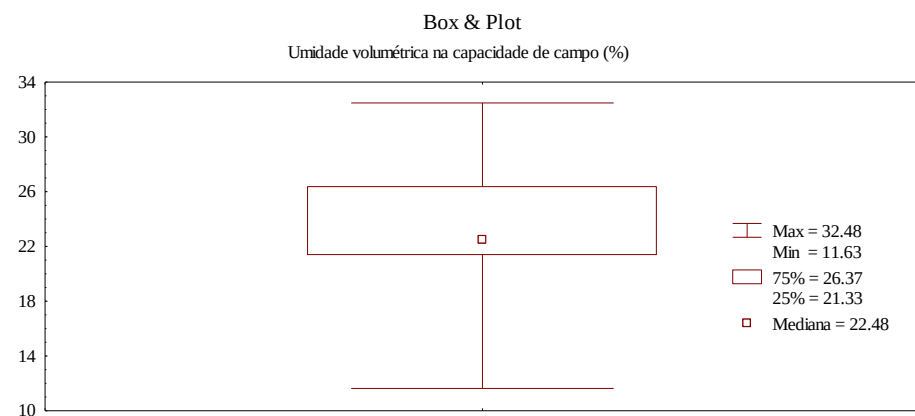
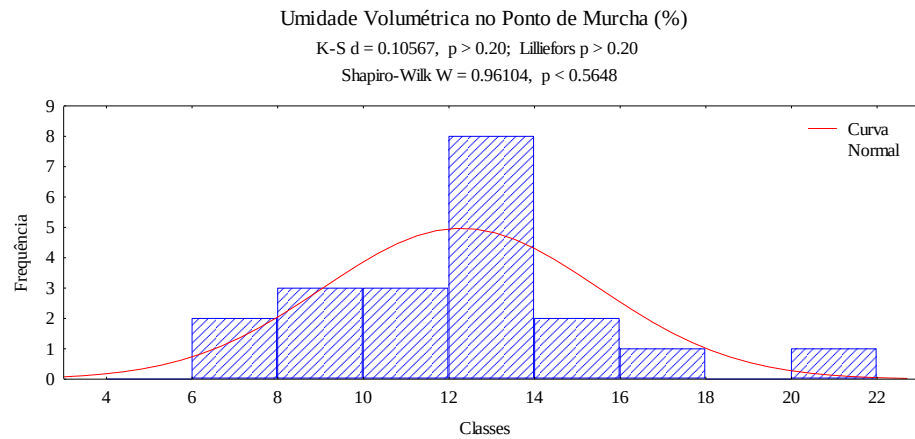
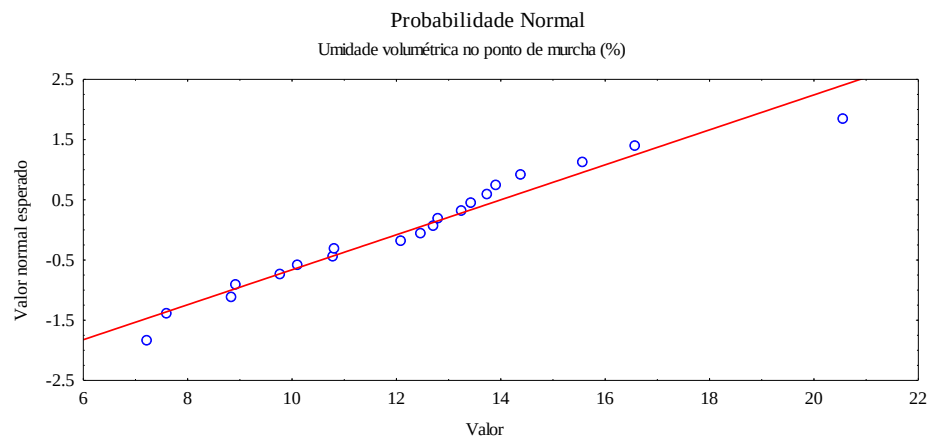


Figura 29. Estatística descritiva gráfica para os dados da umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) na microbacia hidrográfica estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

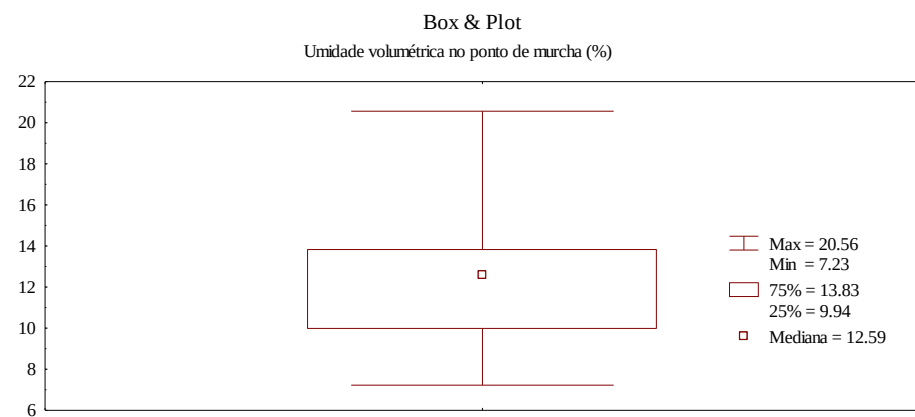
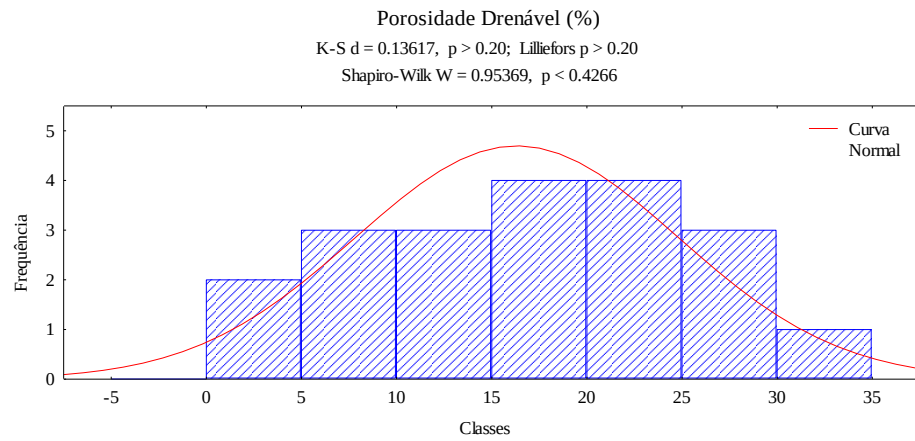
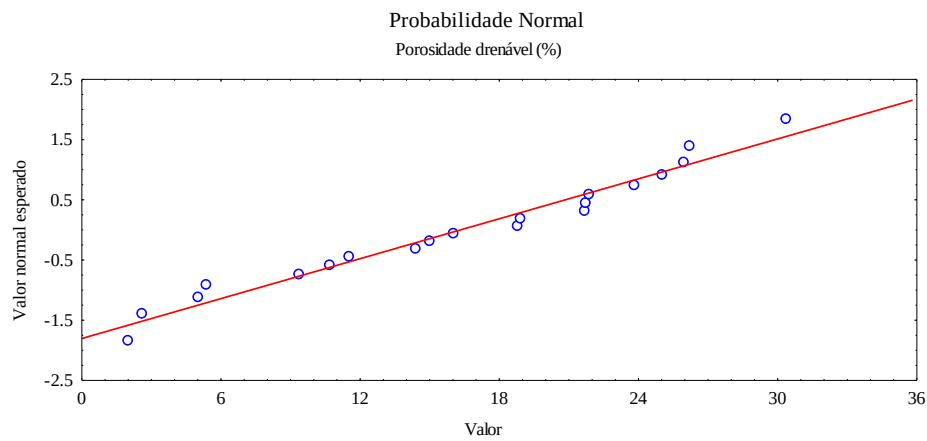


Figura 30. Estatística descritiva gráfica para os dados da umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) na microbacia hidrográfica estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

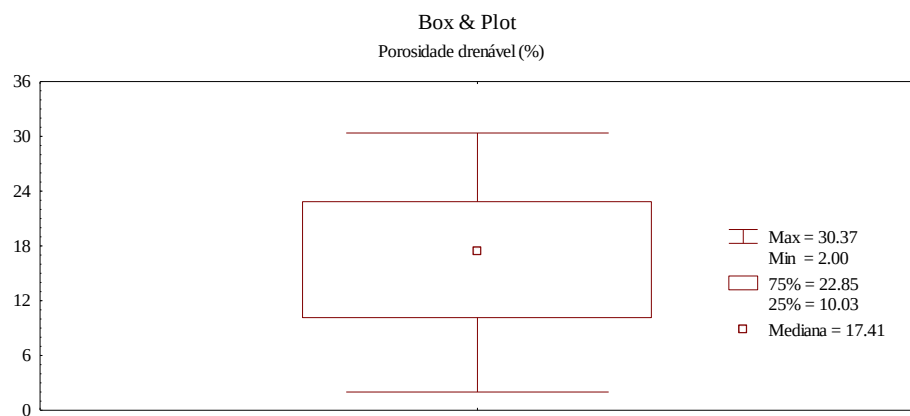
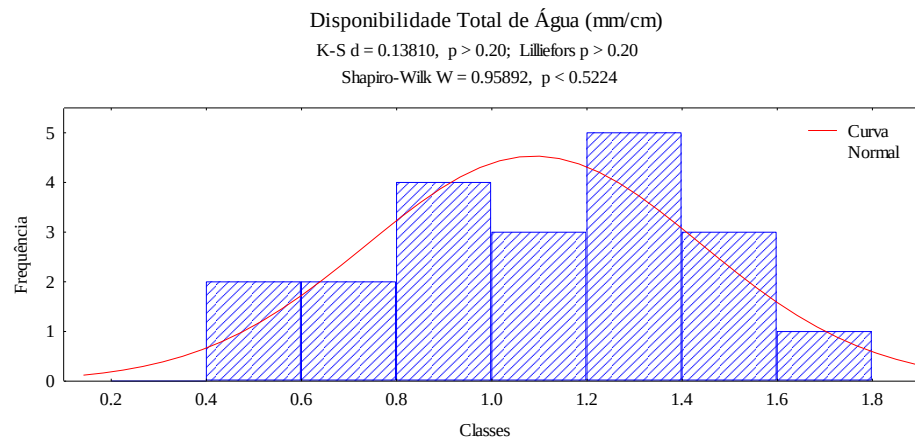
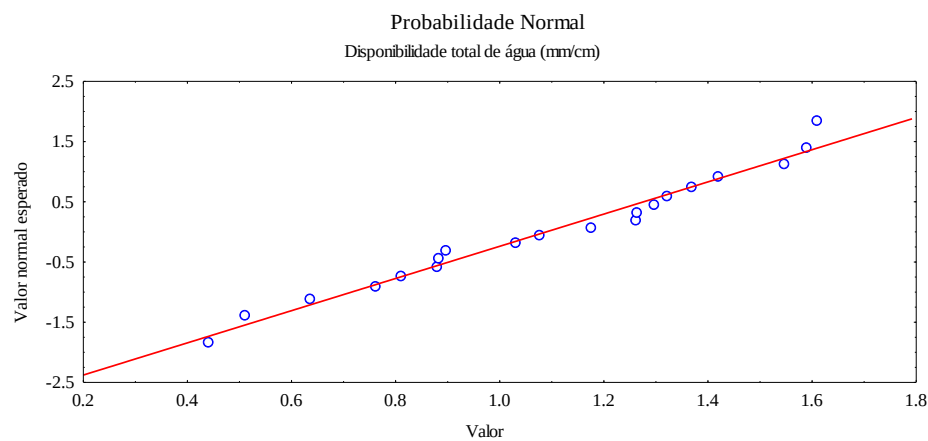


Figura 31. Estatística descritiva gráfica para os dados da porosidade drenável (P_d) na microbacia hidrográfica estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

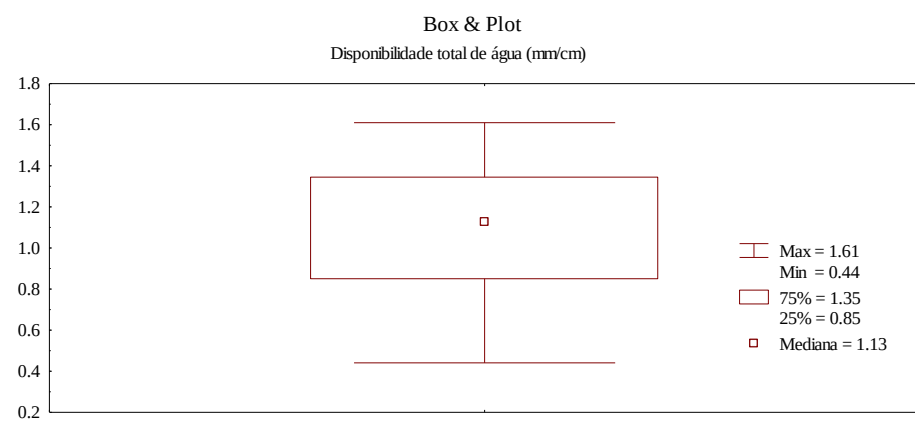
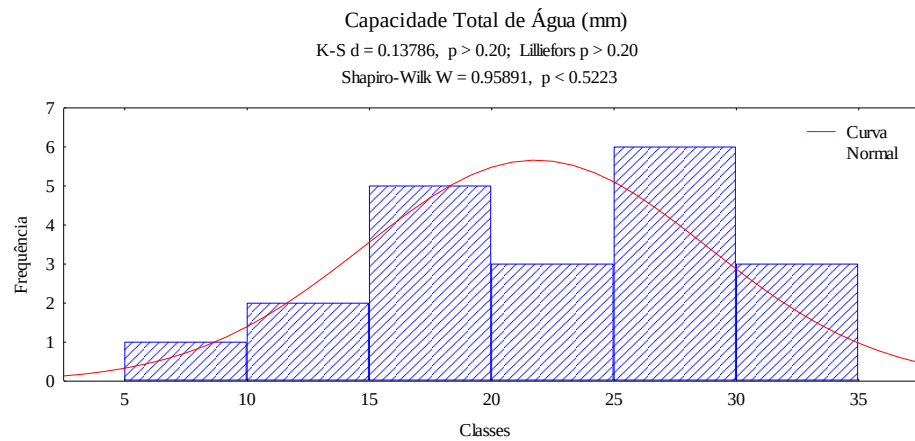
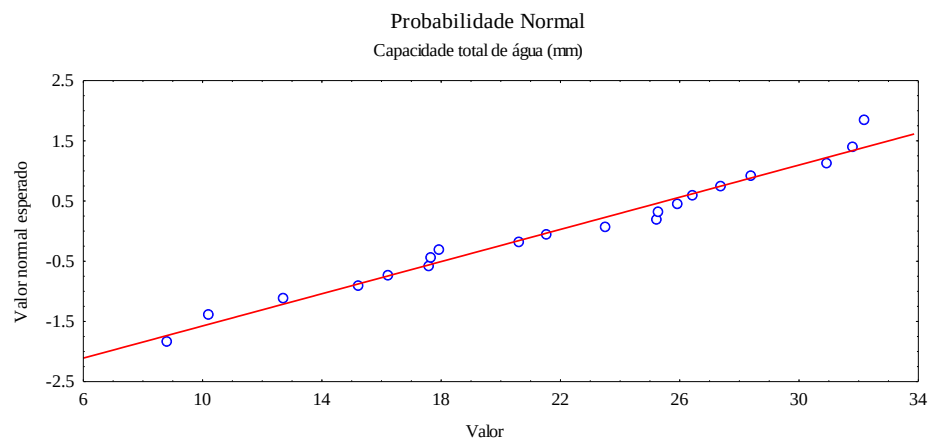


Figura 32. Estatística descritiva gráfica para os dados de disponibilidade total de água (DTA) na microbacia hidrográfica estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

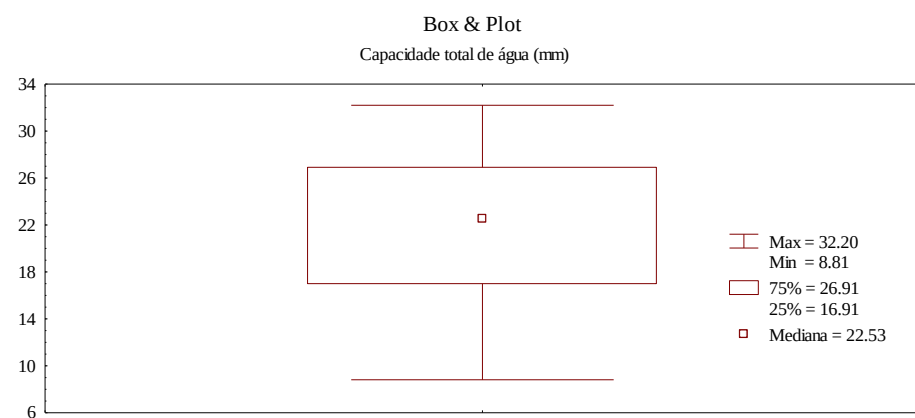
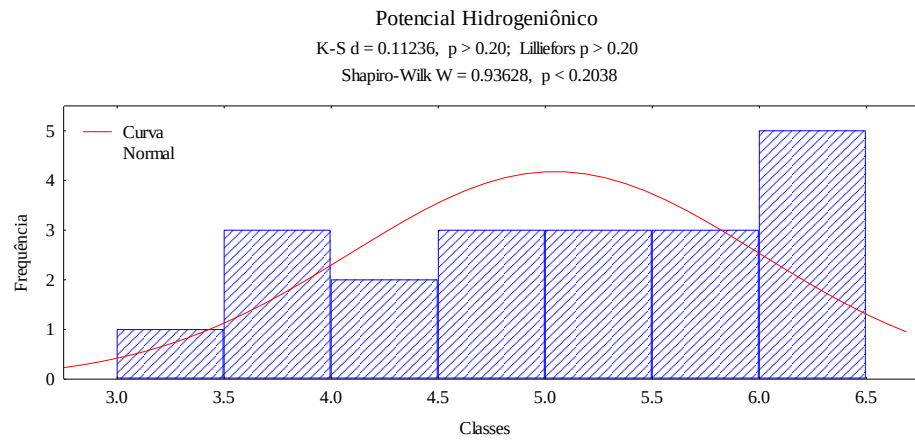
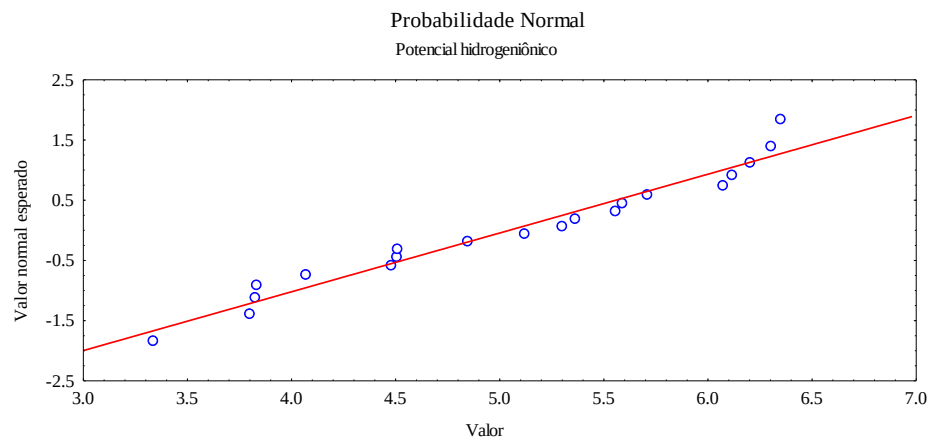


Figura 33. Estatística descritiva gráfica para os dados de capacidade total de água (CTA) na microbacia hidrográfica estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

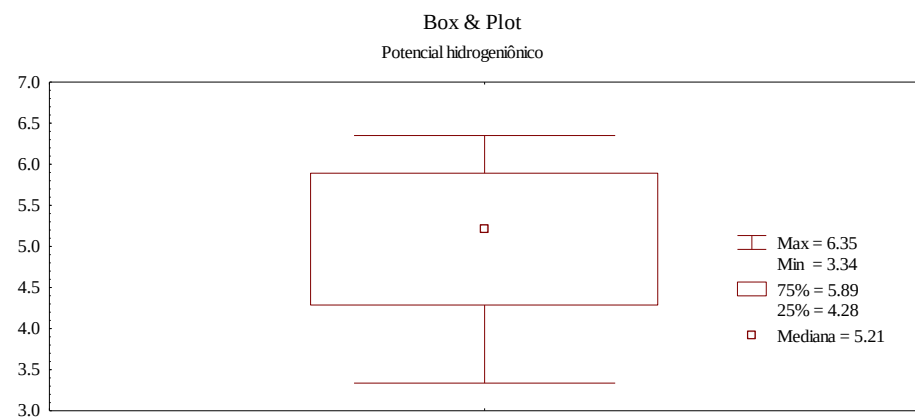
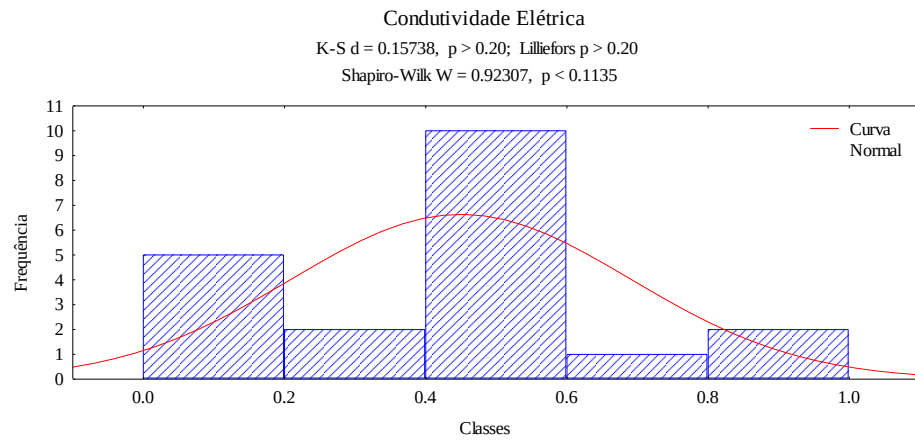
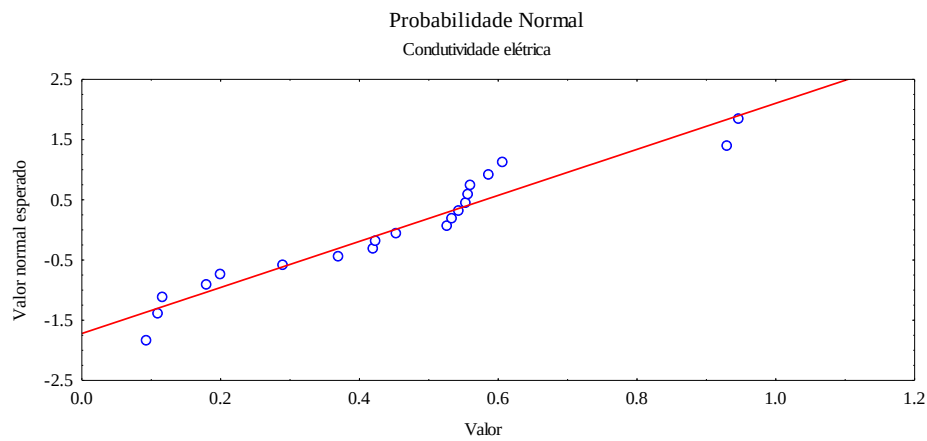


Figura 34. Estatística descritiva gráfica para os dados do potencial hidrogenioiônico (pH) na microbacia hidrográfica estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

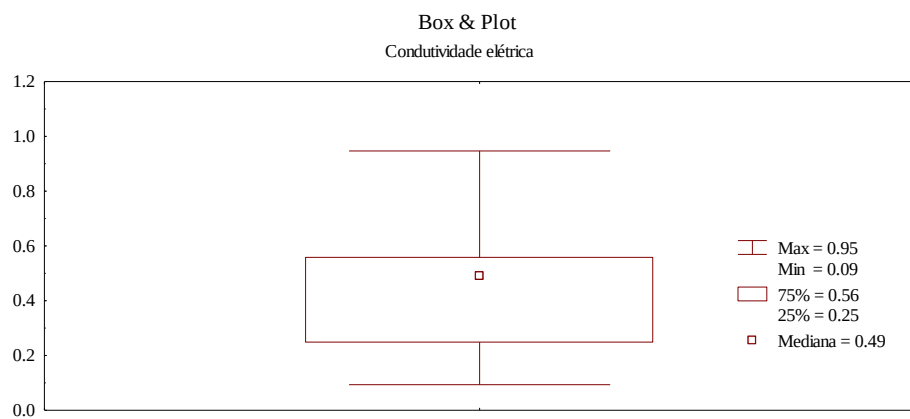
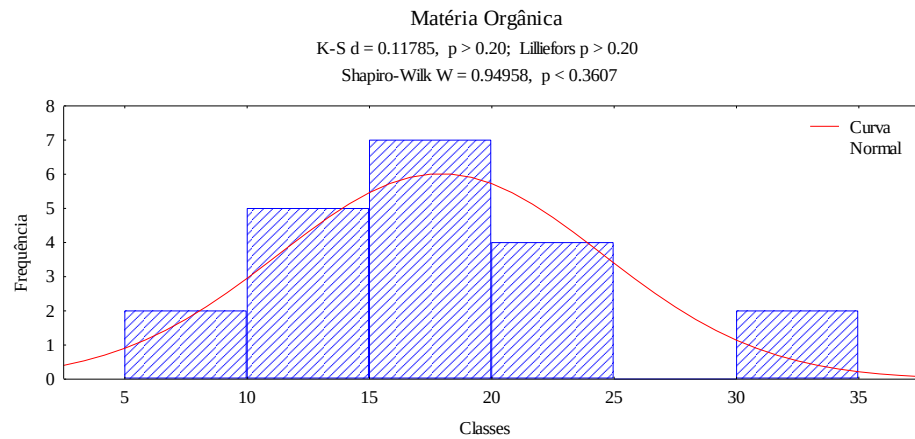
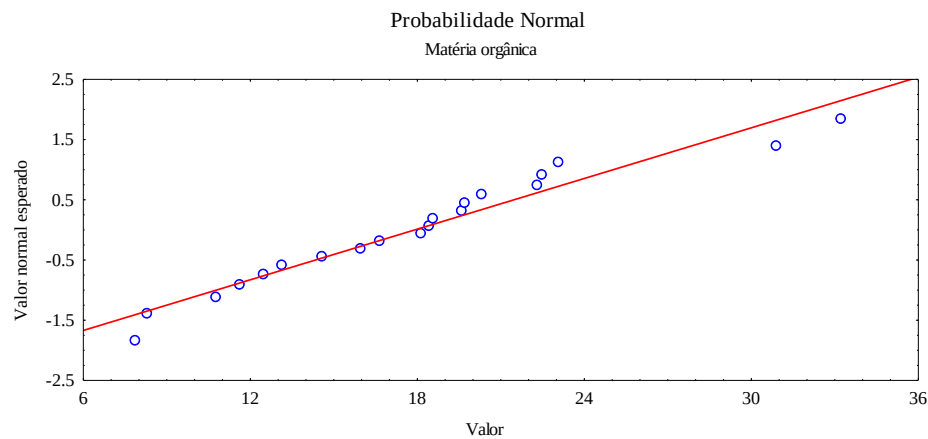


Figura 35. Estatística descritiva gráfica para os dados de condutividade elétrica (CE) na microbacia hidrográfica estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

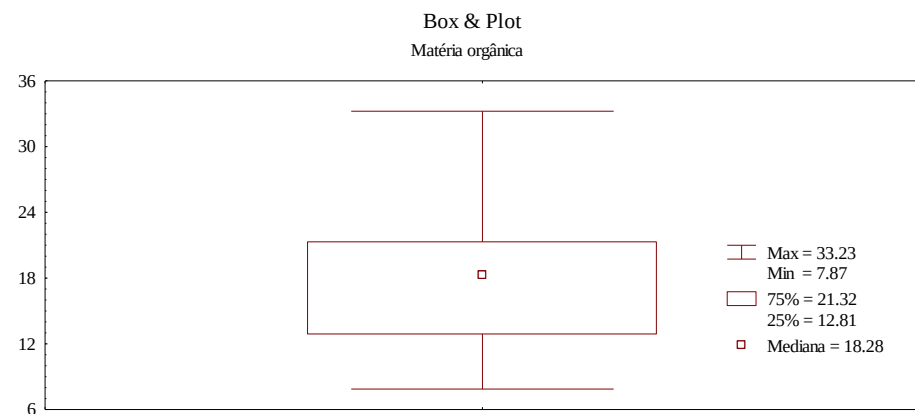
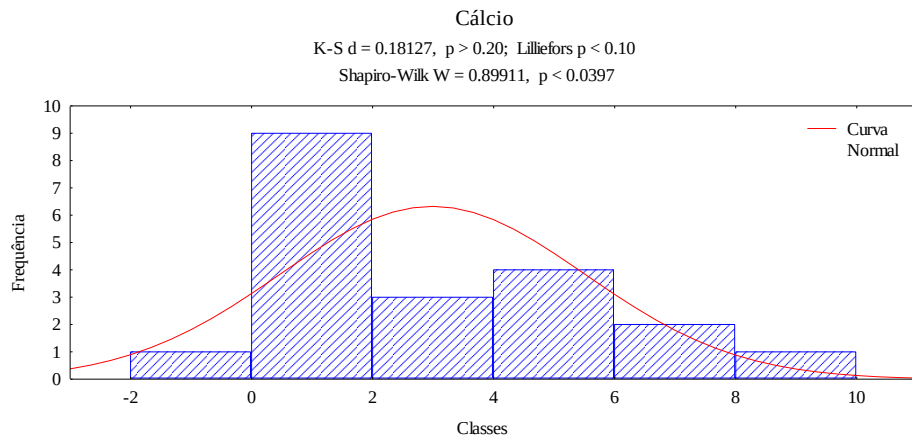
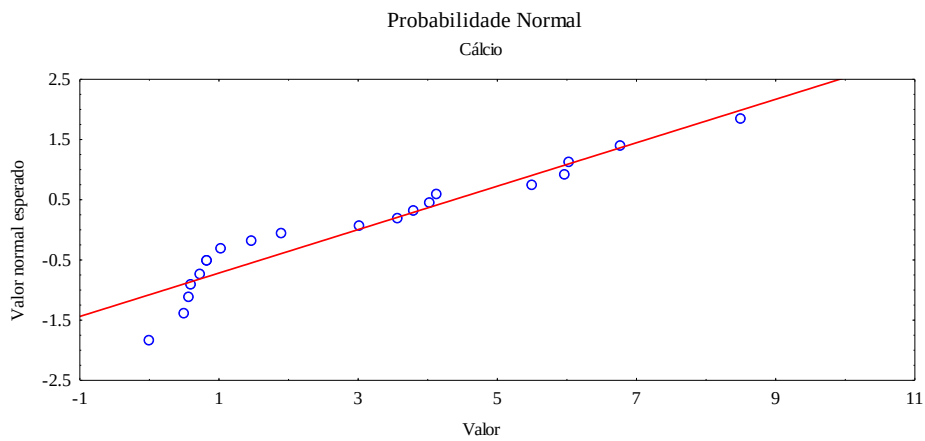


Figura 36. Estatística descritiva gráfica para os dados de matéria orgânica (MO) na microbacia hidrográfica estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

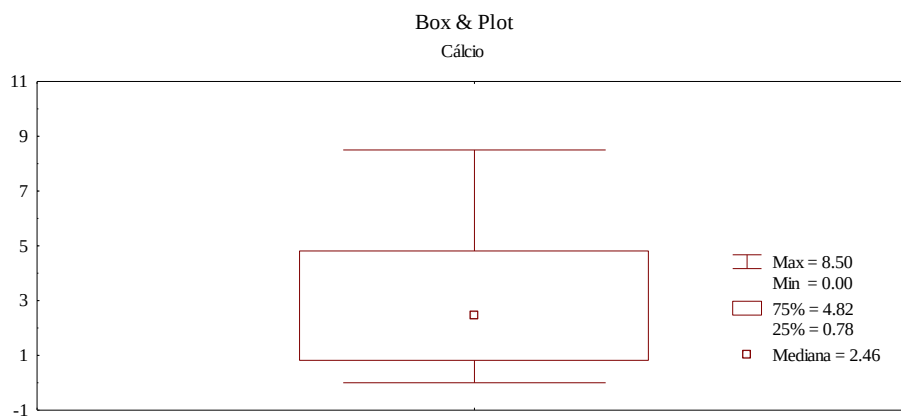
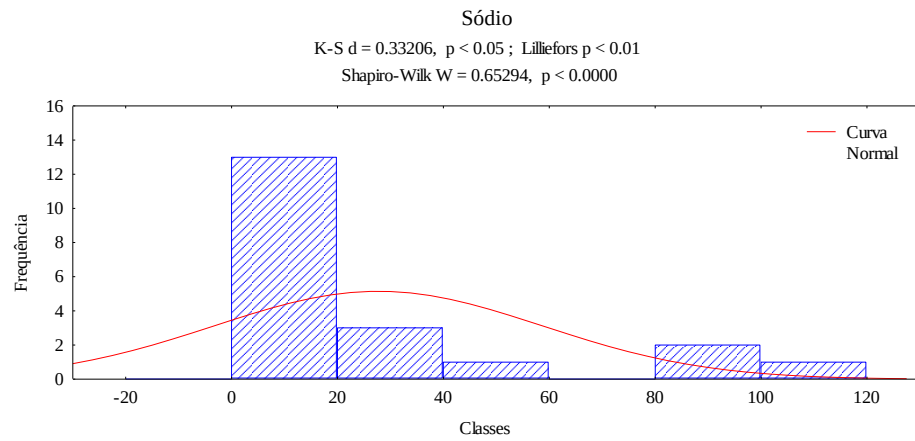
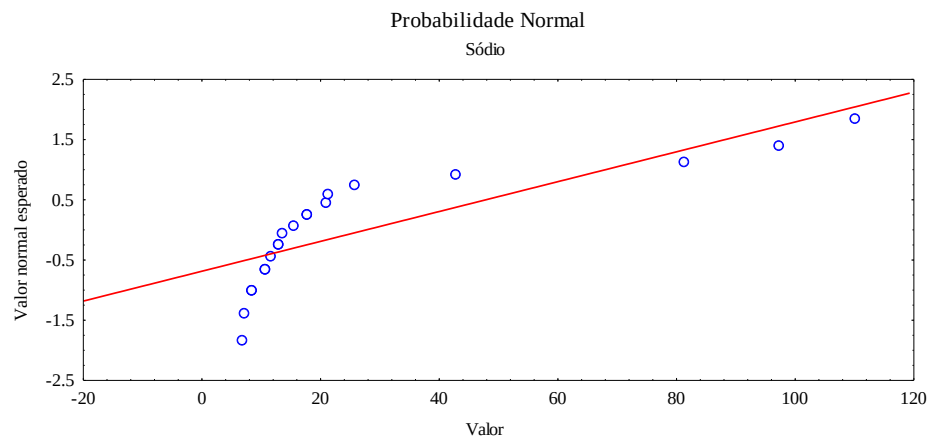


Figura 37. Estatística descritiva gráfica para os dados de matéria orgânica (MO) na microbacia hidrográfica estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

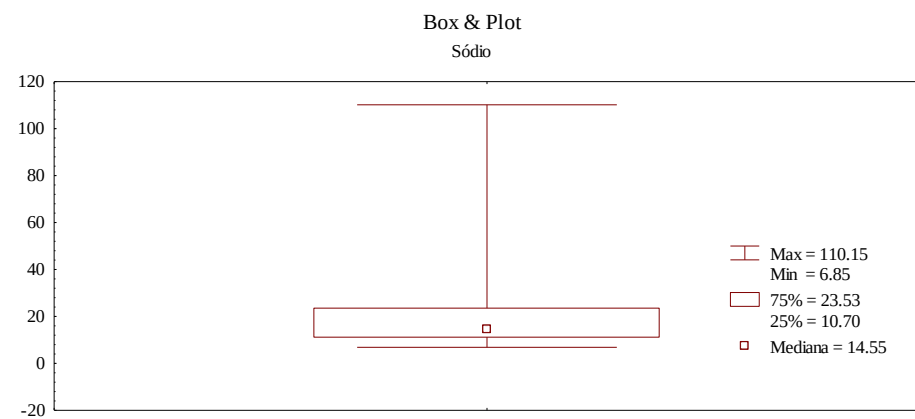
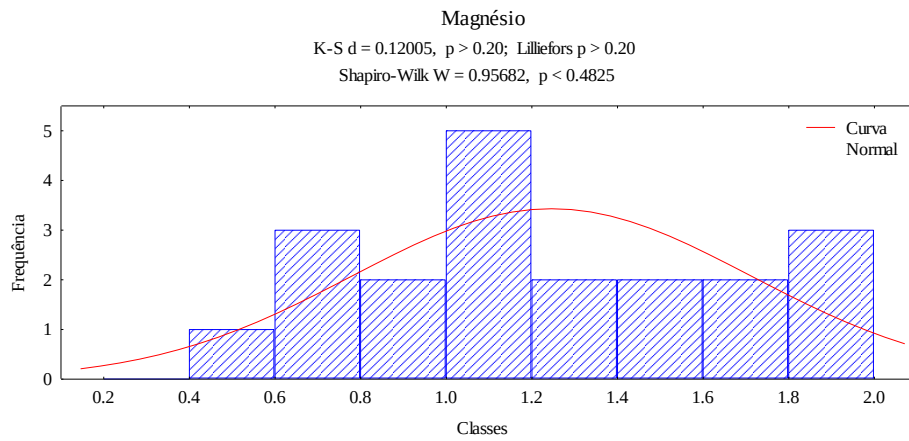
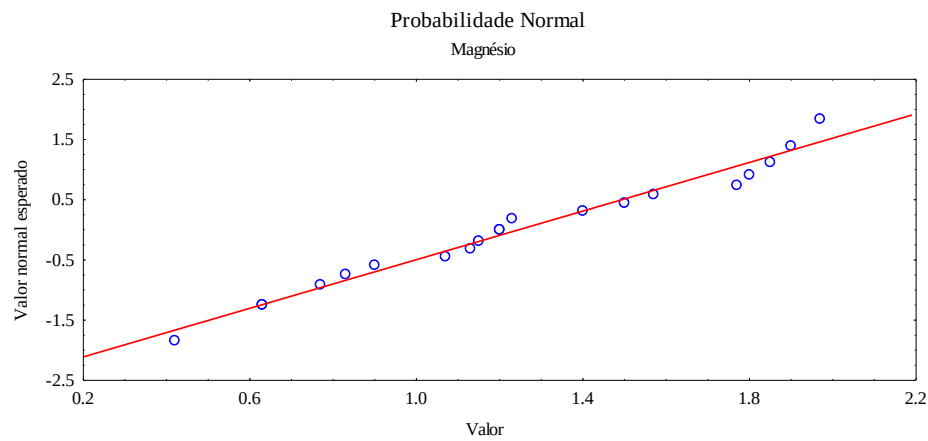


Figura 38. Estatística descritiva gráfica para os dados de sódio (Na) na microbacia hidrográfica estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

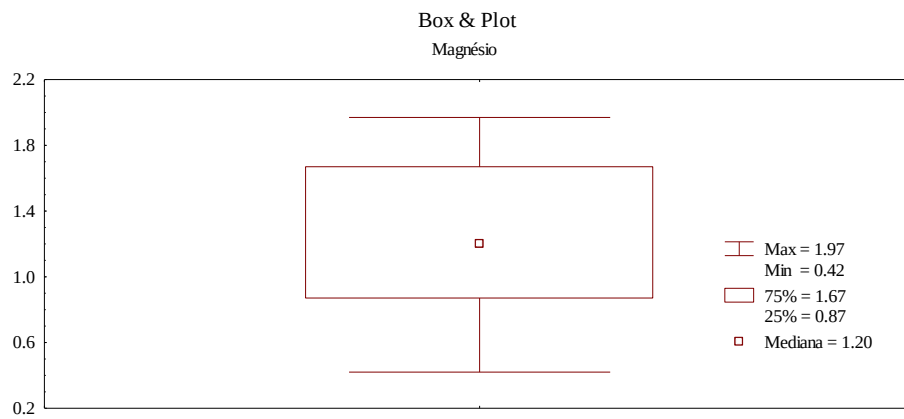
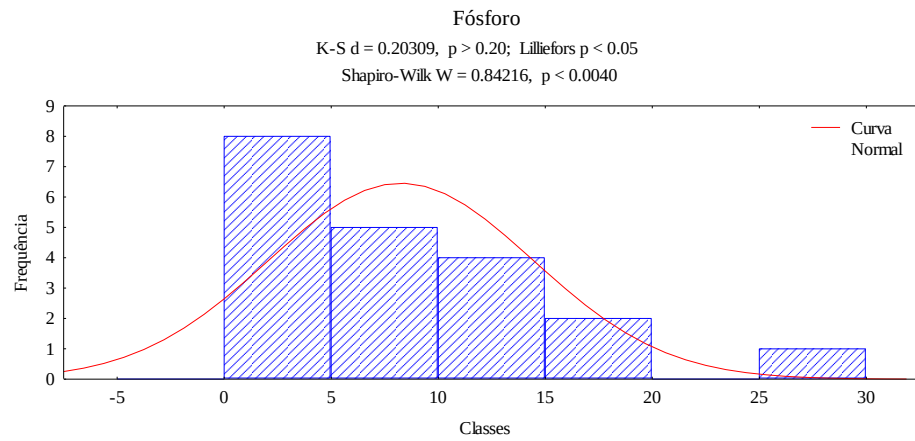
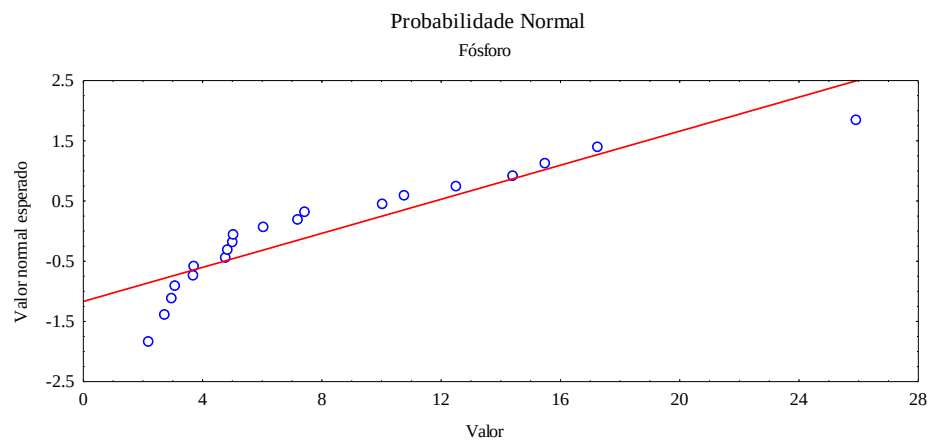


Figura 39. Estatística descritiva gráfica para os dados de magnésio (Mg) na microbacia hidrográfica estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

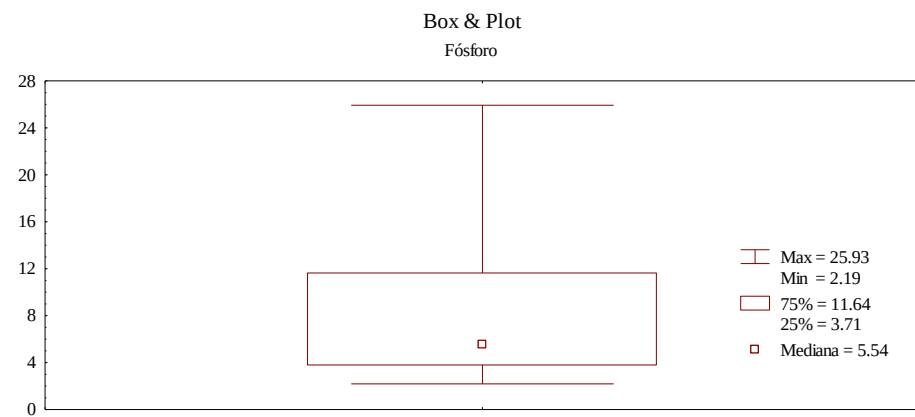
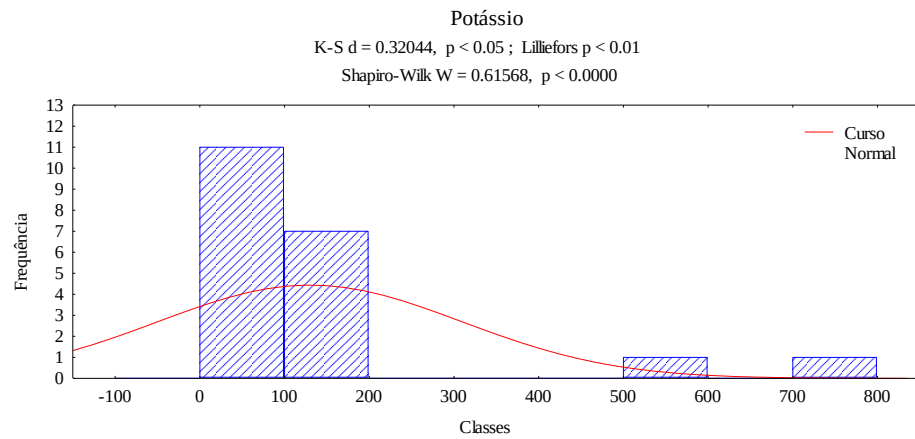
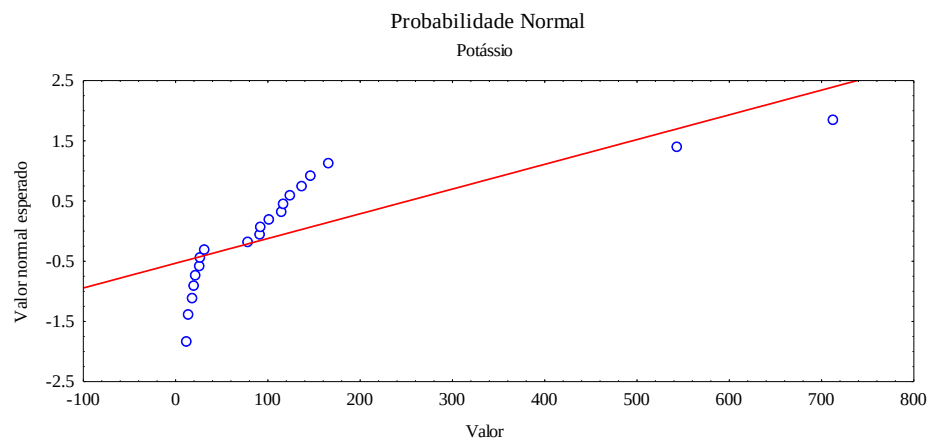


Figura 40. Estatística descritiva gráfica para os dados de fósforo (P) na microbacia hidrográfica estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

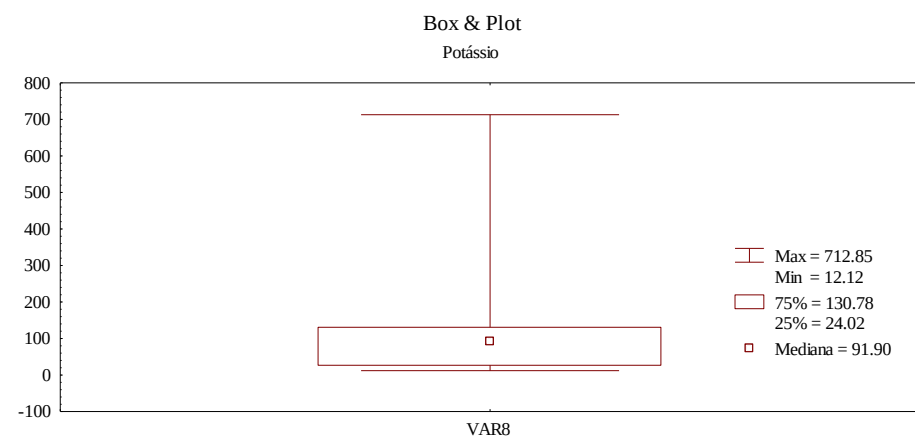
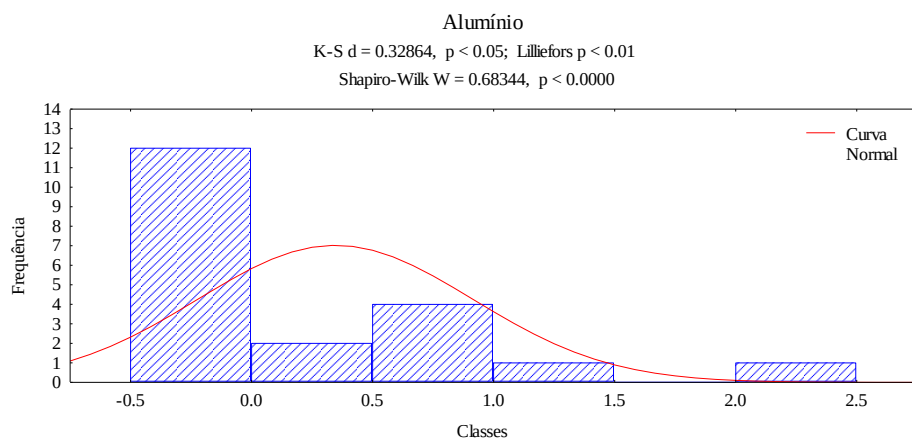
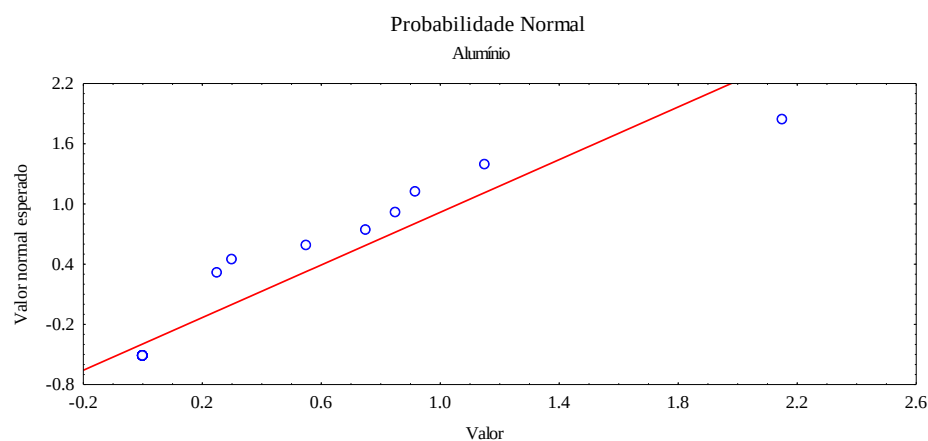


Figura 41. Estatística descritiva gráfica para os dados de potássio (K) na microbacia hidrográfica estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

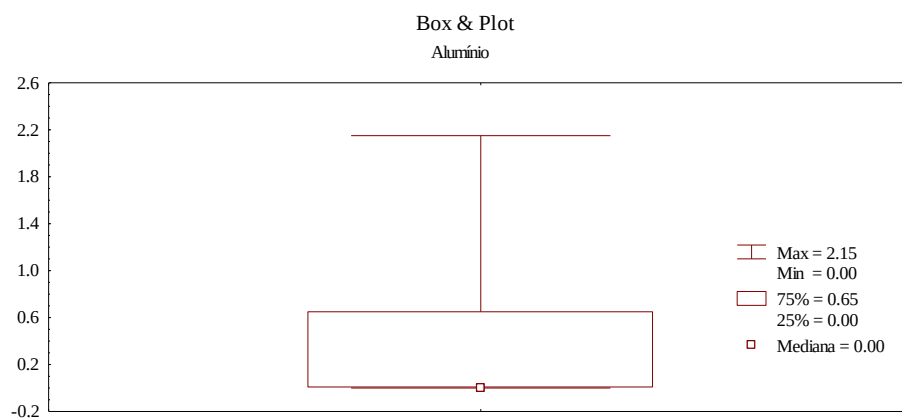
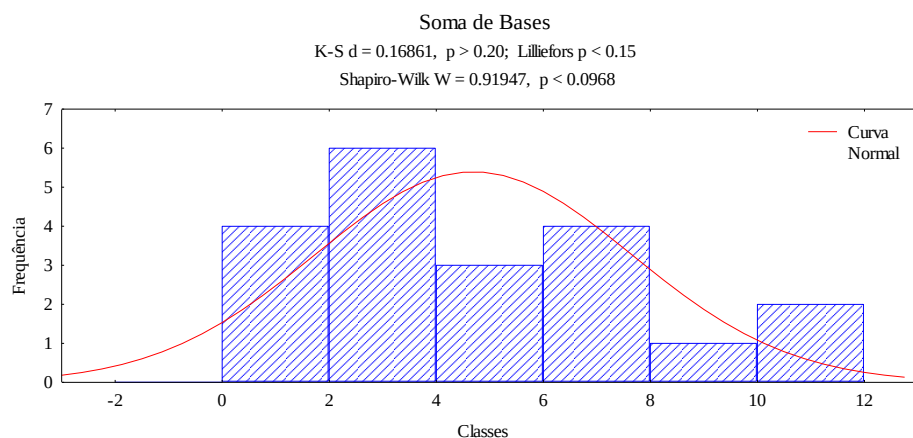
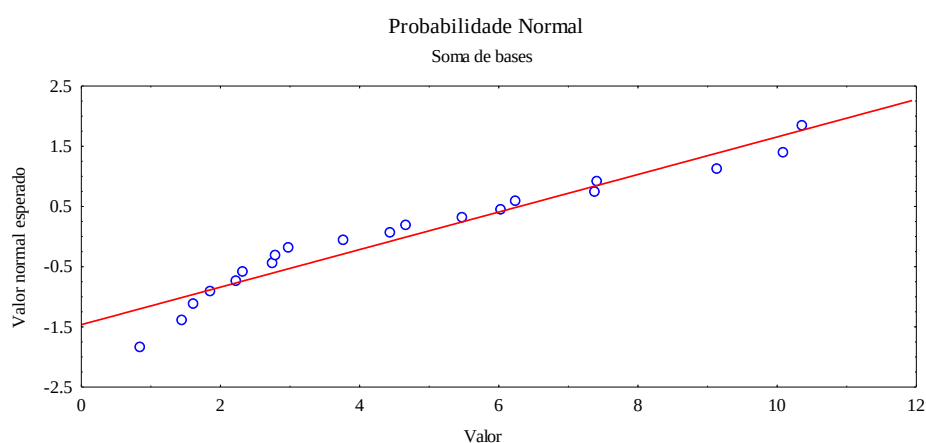


Figura 42. Estatística descritiva gráfica para os dados de alumino (Al) na microbacia hidrográfica estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

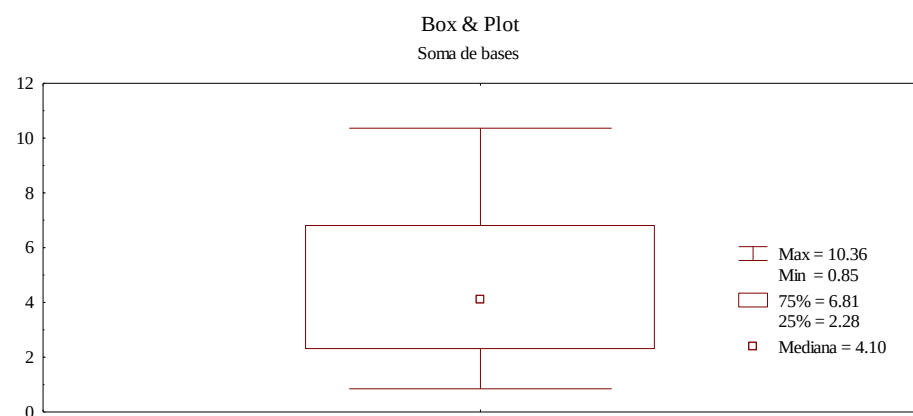


Figura 43. Estatística descritiva gráfica para os dados da soma de bases (SB) na microbacia hidrográfica estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.