



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

LARISSA LUANA NICODEMOS FERREIRA

**VARIAÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO, EM ZONA DE RECARGA DE
NASCENTE, EM UMA MICROBACIA PERENE DO SEMIÁRIDO**

MOSSORÓ

2016

LARISSA LUANA NICODEMOS FERREIRA

**VARIAÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO, EM ZONA DE RECARGA DE
NASCENTE, EM UMA MICROBACIA PERENE 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.

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 (BCOT)
Setor de Informação e Referência (SIR)

F383v Ferreira, Larissa Luana Nicodemos.
VARIAÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO, EM
ZONA DE RECARGA DE NASCENTE, EM UMA MICROBACIA
PERENE DO SEMIÁRIDO / Larissa Luana Nicodemos
Ferreira. - 2016.
107 f. : il.

Orientador: Luis César de Aquino Lemos Filho.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Manejo de Solo e Água, 2016.

1. Hidrologia. 2. Bacia Apodi-Mossoró. 3.
Caatinga. I. Lemos Filho, Luis César de Aquino,
orient. II. Título.

Setor de Informação e Referência
Bibliotecário-Documentalista
Nome do profissional, Bib. Me. (CRB-15/10.000)

LARISSA LUANA NICODEMOS FERREIRA

**VARIAÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO, EM ZONA DE RECARGA DE
NASCENTE, EM UMA MICROBACIA PERENE 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.

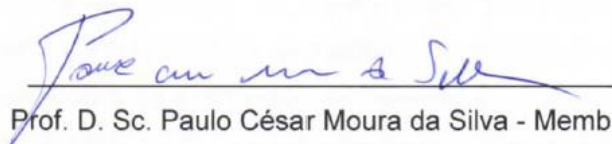
Linha de Pesquisa: Impactos Ambientais

Defendida em: 29 /04 /2016.

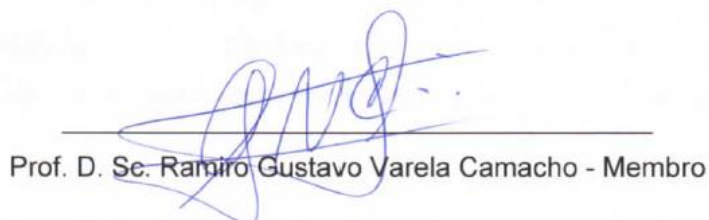
BANCA EXAMINADORA



Prof. D. Sc. Luis César de Aquino Lemos Filho - Presidente



Prof. D. Sc. Paulo César Moura da Silva - Membro



Prof. D. Sc. Ramiro Gustavo Varela Camacho - Membro

*Aos meus amados pais, Maria Zillene Nicodemos e
Ubiratan Ferreira da Silva, a minha irmã Maria Isabel.
Ao meu companheiro Raimundo Júnior.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar forças para continuar e sabedoria para enfrentar as dificuldades da vida.

A minha família que é a minha fortaleza, muito obrigada por todo apoio que me fez perseverar.

Ao meu amigo e companheiro Raimundo Júnior que tanto me aconselhou e esteve ao meu lado a todo o momento, torcendo pelo meu sucesso.

Ao meu orientador, professor Luis César de Aquino Lemos Filho por estar junto nessa caminhada desde a graduação, com toda paciência e dedicação, levarei seus ensinamentos por toda a minha vida profissional, muito obrigada pelos conselhos de amigo.

A Hermínio Sabino de Oliveira Júnior, por todo apoio técnico no desenvolvimento dessa pesquisa.

A Joseane Dunga da Costa por toda a dedicação e empenho para contribuir com as análises laboratoriais.

Aos colegas de trabalho Antônio Osmar de Medeiros Júnior, Júnior Almeida, Leonardo Cordeiro, por todas as aventuras vividas durante o trabalho de campo.

Aos colegas de laboratório Safira, Maria Clara, Tarcísio, Kaline e Antônio Carlos, agradeço por todas as contribuições e orientações.

Aos meus amigos Luiz Eduardo Vieira de Arruda, Hudson Salatiel Marques Vale, Danniely de Oliveira Costa, Clara Nívea Costa do Vale, Mariuchy Sammara de Brito Paiva Franco, Clara Lívia Câmara que sempre incentivaram e apoiaram esse desafio.

A Welson Lima Simões pela disponibilidade em realizar as análises laboratoriais na Embrapa Semiárido.

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

A CAPES pelo apoio financeiro com a concessão da bolsa de estudos.

A todos os docentes do programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água que contribuíram para minha formação profissional, com a transmissão dos seus valiosos conhecimentos.

*O essencial é invisível aos olhos, e só
pode ser visto com o coração.*

O Pequeno Príncipe

RESUMO

Em virtude do crescimento populacional, acentua-se cada vez mais a necessidade do uso dos recursos naturais, principalmente solo e água, podendo levar a degradação dos mesmos, sendo o estudo dos atributos do solo fundamental no dimensionamento e entendimento dos impactos antrópicos sobre o meio ambiente. 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 o manejo racional e adequado de exploração desses recursos. Portanto, o objetivo deste trabalho foi mapear o uso e ocupação do solo juntamente com seus atributos físico-hídricos e químicos, utilizando Sistema de Informação Geográfica e geoestatística, numa área de recarga de nascente de uma microbacia hidrográfica perene de vertente, em condições semiáridas. A área de estudo está inserida no médio curso da bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró, localizada no Oeste do estado do Rio Grande do Norte, foram realizadas coletas de solo, em vários pontos da área estudada para a caracterização e mapeamento dos atributos avaliados. O uso da geoestatística, aliado ao Sistema de Informação Geográfica, mostrou-se viável para a espacialização dos atributos do solo, contribuindo significativamente para um mapeamento mais preciso dos atributos estudados. Os resultados indicaram que os atributos físico-hídricos do solo foram menos variáveis e mais estáveis às ações antrópicas na área, quando comparado aos atributos químicos. Além disso, a vegetação local, a topografia e o relevo interferiram diretamente no comportamento dos atributos do solo (químicos e físico-hídricos). Os resultados mostraram uma estreita relação entre o uso e ocupação do solo e a distribuição espacial dos seus atributos, indicando os impactos das diversas ações antrópicas sobre o meio. Dessa forma, foi possível identificar áreas que deveriam estar preservadas (nascentes, topo de morro, zonas de recargas, etc), mas encontram-se manejadas e com suas condições naturais modificadas pela ação do homem. Com isso, conclui-se que a mensuração espacial dos impactos antrópicos no meio é etapa primordial para o planejamento do uso e ocupação do solo de forma racional, adotando técnicas de conservação dos recursos naturais.

Palavras-chave: Hidrologia. Bacia Apodi-Mossoró. Caatinga.

ABSTRACT

Because of population growth, increasingly accentuated the need for the use of natural resources, especially soil and water and can lead to degradation thereof, and the study of the attributes of the fundamental soil in the design and understanding of human impacts on the environment. Then, describe and map the land use and occupation with the spatial variability of its attributes is very important to put into practice the rational and proper management of exploitation of these resources. Therefore, the objective of this study was to map the use and occupation of land along with their physical-water and chemical attributes, using Geographic Information System and geostatistics, a spring recharge area of a perennial watershed shed in semi-arid conditions. The study area is inserted in the middle course of the river basin of Apodi-Mossoró River, located in the west of Rio Grande do Norte state, soil samples were taken at various points of the study area for the characterization and mapping of attributes evaluated. The use of geostatistics, coupled with the Geographic Information System, proved to be feasible for the spatial distribution of soil properties, contributing significantly to a more precise mapping of the attributes studied. The results indicated that the physical water soil attributes were less variable and more stable to human activities in the area, when compared to chemical attributes. In addition, the local vegetation, topography and relief interfered directly in the behavior of soil properties (chemical and physical water). The results showed a close relationship between the use and occupation of land and the spatial distribution of its attributes, indicating the impact of different human actions on the environment. Thus, it was possible to identify areas that should be preserved (springs, hill top, recharge areas, etc.), but are manejas and its natural conditions modified by human action. Thus, it is concluded that the spatial measurement of human impacts on the environment is crucial step for planning the use and occupation in a rational way, adopting conservation techniques of natural resources.

Keywords: Hydrology. Basin Apodi-Mossoró. Caatinga.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Localização da área de estudo com respectivas curvas de níveis.....	19
Figura 2.	Croqui de distribuição dos pontos amostrais.....	20
Figura 3.	Coleta de solo com estrutura indeformada.....	21
Figura 4.	Coleta de solo com estrutura deformada.....	21
Figura 5.	Mapa do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para o período de estiagem (Novembro de 2015).....	33
Figura 6.	Mapa do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para o período chuvoso (Fevereiro de 2016).....	34
Figura 7.	Vegetação no período de estiagem (Novembro 2015) e chuvoso (Fevereiro de 2016).....	34
Figura 8.	Mapa do uso e ocupação do solo.....	36
Figura 9.	Ilustração da vegetação caducifólia com formação de serapilheira na área de recarga.....	47
Figura 10.	Mapas da variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo: (a) Areia, (b) Silte, (c) Argila e (d) D_s	51
Figura 11.	Mapas da variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo: (a) D_p , (b) DTA, (c) CTA e (d) VTP.....	52
Figura 12.	Mapas da variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo: (a) θ_{PMP} (b) θ_{CC} e (c) PD.....	53
Figura 13.	Mapas da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo: (a) pH, (b) CE_{es} , (c) MO e (d) Ca^{2+}	54
Figura 14.	Mapas da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo: (a) Mg^{2+} , (b) Na^+ , (c) K^+ e (d) P.....	55
Figura 15.	Mapas da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo: (a) Al^{3+} e (b) SB.....	56
Figura 16.	Estatística descritiva gráfica para os dados de teor de areia (%) do solo na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....	72
Figura 17.	Estatística descritiva gráfica para os dados de teor de silte (%) do solo na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....	73

Figura 18.	Estatística descritiva gráfica para os dados de teor de argila (%) do solo na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....	74
Figura 19.	Estatística descritiva gráfica para os dados de densidade do solo (D_s) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....	75
Figura 20.	Estatística descritiva gráfica para os dados da densidade de partícula (D_p) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....	76
Figura 21.	Estatística descritiva gráfica para os dados do volume total de poros (VTP) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....	77
Figura 22.	Estatística descritiva gráfica para os dados da umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....	78
Figura 23.	Estatística descritiva gráfica para os dados da umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....	79
Figura 24.	Estatística descritiva gráfica para os dados da porosidade drenável (P_d) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....	80
Figura 25.	Estatística descritiva gráfica para os dados de disponibilidade total de água (DTA) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....	81
Figura 26.	Estatística descritiva gráfica para os dados de capacidade total de água (CTA) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....	82
Figura 27.	Estatística descritiva gráfica para os dados do potencial hidrogeniônico (pH) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....	83
Figura 28.	Estatística descritiva gráfica para os dados de condutividade elétrica (CE) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....	84

Figura 29.	Estatística descritiva gráfica para os dados de matéria orgânica (MO) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....	85
Figura 30.	Estatística descritiva gráfica para os dados de cálcio (Ca ²⁺) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....	86
Figura 31.	Estatística descritiva gráfica para os dados de sódio (Na ⁺) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....	87
Figura 32.	Estatística descritiva gráfica para os dados de magnésio (Mg ²⁺) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....	88
Figura 33.	Estatística descritiva gráfica para os dados de fósforo (P) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....	89
Figura 34.	Estatística descritiva gráfica para os dados de potássio (K ⁺) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....	90
Figura 35.	Estatística descritiva gráfica para os dados de alumínio (Al ³⁺) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....	91
Figura 36.	Estatística descritiva gráfica para os dados da soma de bases (SB) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Média de precipitação entre os anos de 2005 e 2015 para o município de Portalegre.....	12
Tabela 2.	Extensão e distribuição percentual das unidades de mapeamento em zona de recarga de micro bacia hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró.....	37
Tabela 3.	Análise estatística descritiva dos atributos físicos do solo na área de recarga de microbacia.....	40
Tabela 4.	Análise de estatística descritiva dos atributos químicos do solo na área de recarga de microbacia.....	40
Tabela 5.	Testes de normalidade, Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para os atributos físico-hídricos do solo.....	42
Tabela 6.	Testes de normalidade, Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para os atributos químicos do solo.....	42
Tabela 7.	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 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 químicos do solo.....	45

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 OBJETIVO GERAL.....	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3 REVISÃO DE LITERATURA	4
3.1 ÁGUA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO	4
3.1.1 Água subterrânea no semiárido	5
3.2 CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS DA ÁREA ESTUDADA	7
3.2.1 Formação geomorfológica e hidrografia da Serra de Portalegre	7
3.2.2 Solo	8
3.2.3 Vegetação	10
3.2.4 Clima	11
3.3 ÁREAS DE RECARGA: CARACTERIZAÇÃO E IMPORTÂNCIA.....	13
3.4 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E SEUS IMPACTOS SOBRE OS ATRIBUTOS DO SOLO	14
3.5 VARIABILIDADE ESPACIAL E MODELAGEM GEOESTATÍSTICA PARA ESPACIALIZAÇÃO DE ATRIBUTOS DO SOLO	16
3.5.1 Utilização de geotecnologias em diagnósticos ambientais	17
4 MATERIAL E MÉTODOS	18
4.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	18
4.2 PLANO AMOSTRAL.....	19
4.2.1 Amostragem de solo	20
4.3 ANÁLISES FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO	21
4.3.1 Textura	21
4.3.2 Densidade do solo	22
4.3.3 Densidade de partículas	22

4.3.4 Volume total de poros	23
4.3.5 Umidade do solo na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente.....	23
4.3.6 Disponibilidade total de água	23
4.3.7 Capacidade total de água do solo.....	24
4.3.8 Porosidade drenável	24
4.4 ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO	25
4.5 ESTATÍSTICA DESCRITIVA E ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS	25
4.5.1 Estudos variográficos	26
4.5.2 Análises dos modelos de semivariogramas	27
4.5.3 Suportes computacionais para as análises geoestatística.....	28
4.6 SUPORTES COMPUTACIONAIS PARA MAPEAMENTO DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI) E USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	29
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1 ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI)	31
5.2 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	35
5.3 ESTATÍSTICA DESCRITIVA E GEOESTATÍSTICA DOS ATRIBUTOS DO SOLO	37
5.4 MAPEAMENTO DOS ATRIBUTOS DO SOLO	46
6 CONCLUSÕES	57
REFERÊNCIAS.....	58
APÊNDICE A – ESTATÍSTICA DESCRITIVA GRÁFICA	72

1 INTRODUÇÃO

Em consequência do crescimento populacional, os recursos naturais são cada vez mais explorados, principalmente quando se trata de solo e água. O uso desordenado desses recursos pode levar a degradação dos mesmos, pois as ações antrópicas são responsáveis por modificações consideráveis nos ambientes naturais, tendo em vista sua influência quantitativa e qualitativa direta sobre os processos hidrológicos que envolvem a recarga de nascentes. Desse modo, é muito importante o desenvolvimento de métodos ligados à gestão e manejo dos recursos naturais solo e água para minimizar os impactos sobre estes.

A qualidade do solo pode ser modificada de acordo com o manejo empregado ao longo do tempo, nem sempre há preocupação em utilizá-lo de forma sustentável e as consequências são notórias, atingindo níveis críticos que refletem na degradação do meio ambiente.

O uso e ocupação do solo, em áreas de recarga, podem alterar a qualidade e a disponibilidade de água, os processos de impermeabilização ou compactação do solo reduzem a capacidade de infiltração e conseqüentemente afeta o armazenamento de água, promovendo o aumento do escoamento superficial e diminuindo a contribuição para o escoamento subterrâneo, fator importante na recarga de aquíferos.

É notório que estudos sobre o uso e ocupação do solo em áreas de recarga de nascentes são cada vez mais necessários, pois, atualmente, além dos dados referentes à dinâmica da água em áreas de recarga serem bastante escassos, a ação antrópica nessas áreas são cada vez mais intensas.

A região de Portalegre-RN encontra-se localizada em uma área de topo de morro, contribuindo efetivamente para a recarga de várias nascentes por onde afloram as águas subterrâneas existente na região, a presença de nascentes perenes proporciona ao local um microclima diferenciado das condições semiáridas, com maior intensidade de precipitações pluviométricas e uma grande diversidade de flora e fauna. O uso e ocupação do solo sem planejamento têm gerado vários problemas ambientais, como o desmatamento, descarte inadequado de resíduos sólidos, impermeabilização de grandes áreas entre outras atividades que podem degradar o meio ambiente.

A geoestatística está sendo utilizada de forma crescente em estudos ambientais, associadas a tecnologias de sistemas de informações geográficas (SIGs), auxiliando a avaliação e a compreensão do comportamento espacial dos recursos naturais, permitindo

assim, identificar áreas que necessitam de uma atenção diferenciada quando se trata do manejo e conservação do solo e água. Tendo em vista que é necessário adotar práticas que permitam uma exploração controlada desses recursos, com a utilização da geoestatística e dos SIGs é possível à elaboração de mapas temáticos que permitem analisar os atributos avaliados, esses métodos são cada vez mais utilizados para a mensuração de impactos ambientais, definindo áreas que necessitam de manejo diferenciado.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Diante do exposto, o objetivo desse trabalho foi mapear atributos do solo, juntamente com o uso e ocupação do mesmo, numa zona de recarga de aquífero, com a utilização de Sistema de Informações Geográficas (SIG) e geoestatística, para fins de identificar impactos da ação antrópica no meio.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Mapeamento dos atributos físico-hídricos e químicos do solo;
- Mapeamento do uso e ocupação na área;
- Comparação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada no período seco e chuvoso.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 ÁGUA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

A água é essencial à vida, entre todos os elementos que compõem o universo é quem melhor simboliza a existência do homem (Magalhães, 2004). Contudo, apesar de ser abundante no planeta, a água possui uma pequena disponibilidade para consumo humano. Relata-se que 97,5% da água disponível no planeta é salgada, sendo, portanto, inadequada para uso sem tratamento, geralmente considerado inviável economicamente. Assim, a água doce corresponde a pouco mais de 2,5% do volume total desse recurso, e apenas uma pequena parcela (0,3%) se apresenta sob forma facilmente utilizável pelo homem como os rios e lagos (Shiklomanov, 1998).

O Brasil pode ser considerado um país privilegiado no que se refere à quantidade de água disponível em seu território, onde são encontrados cerca de 13,7% da água doce superficial disponível no Planeta e 34,9% da disponibilidade nas Américas (Chow et al., 1988). Possui ainda, em parte de seu território, a maior reserva de água doce subterrânea, o Aquífero Guarani, com 1.195.200 km² (Rebouças et al., 2002). Porém, a distribuição geográfica desses recursos, superficiais ou subterrâneos, é bastante irregular, por exemplo, a região Norte, com 6,98% da população, dispõe de 68,50% da água do País, enquanto o Nordeste, com 28,91% da população, possui apenas 3,30% (Barros & Amin, 2008).

Sendo assim, o Nordeste é a região brasileira mais afetada pela escassez de água, a situação é mais insustentável para o semiárido que possui uma extensão territorial de 980.133.079 km², abrigando 1.135 municípios de oito estados da região Nordeste (Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia) mais o norte de Minas Gerais (Salomão et al., 2011).

Conforme Suassuna (2012), o nordeste semiárido possui alguns potenciais hídricos, o Rio Grande do Norte, com acumulação de 4,3 bilhões de m³, distribuídos em cerca de 44 represas, dispõe de áreas sedimentares importantes (Formação Barreira e Dunas, além do Arenito Açú), com volume de água estimado em cerca de 230 km³/ano, possui, ainda, a terceira maior represa do nordeste – Armando Ribeiro Gonçalves, com cerca de 2,4 bilhões de m³, a qual, poderia suprir com 200 litros/habitante/dia, toda população norte-rio-grandense pelos próximos 20 anos.

Porém, devido à suas dimensões geográficas e qualidades naturais diferenciadas, o nordeste possui apenas 3% das águas doces do país. Cerca de 63% dos recursos hídricos estão

localizados na bacia hidrográfica do rio São Francisco e 15% na bacia do rio Parnaíba, que juntos correspondem a 78% da água na região, enquanto as bacias dos rios intermitentes possuem apenas 22% agrupando-se em 450 açudes com capacidade de cerca de um milhão de metros cúbicos. Somente 25% dessa água acumulada em açudes são aproveitadas devido à alta evaporação e ao mau gerenciamento (Brito et al., 2007).

As características edafoclimáticas e socioeconômicas do semiárido requerem prudência quanto à utilização e conservação dos recursos hídricos, a água torna-se fator limitante nessa região devido à variabilidade temporal das precipitações e das características geológicas dominantes, onde há predominância de solos rasos baseados sobre rochas cristalinas e, conseqüentemente, baixas trocas de água entre o rio e o solo adjacente.

O déficit hídrico do semiárido aumenta a cada ano, em virtude do crescimento da população que necessita de uma maior demanda de água, além de mudanças no ciclo hidrológico induzidas pelo uso e ocupação inadequados do solo; das modificações no estilo de vida da população local e da urbanização; e das alterações climáticas, crescendo assim a competição por água entre a agricultura, indústria e cidades (Soares & Campos, 2013).

Segundo Maia (2002) a escassez se dá, principalmente, pela deterioração da qualidade da água, que inviabiliza a utilização de importantes mananciais e ocasiona uma demanda superior à oferta. Neste sentido, a água, por constituir-se num bem de primeira necessidade, essencial à vida tanto em sua dimensão individual quanto coletiva, e por ser um recurso escasso e finito, agravado pelo uso predatório e desigual, coloca para as atuais gerações a necessidade urgente de desenvolver mecanismos de gestão e conservação (Pontes & Schramm, 2004).

3.1.1 Água subterrânea no semiárido

Águas subterrâneas é toda a água que ocorre abaixo da superfície de uma determinada área preenchendo os poros ou vazios intragranulares das rochas sedimentares ou as fraturas, falhas e fissuras das rochas compactas (Borghetti et al., 2004), são formadas através da infiltração e percolação no interior do subsolo pelas chuvas durante períodos de tempo extremamente variáveis. Elas constituem a parte oculta e mais lenta do ciclo hidrológico, parte da água que volta à superfície da Terra sob a forma de chuva se infiltra no solo através da ação da gravidade até atingir os aquíferos (Villar, 2008).

As rochas saturadas que permitem a circulação, armazenamento e extração de água são chamadas de aquíferos, geralmente estes possuem a capacidade de armazenar grande

quantidade de água. O aquífero é uma formação geológica que possui porosidade e permeabilidade suficientes para armazenar e transmitir quantidades significativas de água (Cleary, 1989; Rebouças, 2006).

Os recursos hídricos subterrâneos constituem-se em reserva estratégica de água para suprimento das demandas atuais e futuras, uma vez que representam uma quantidade cerca de 100 vezes maior que as águas superficiais no mundo (Borghetti et al., 2004). As reservas renováveis de água subterrânea no Brasil, ou seja, suas recargas efetivas alcançam $42.289 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e correspondem a 24 % do escoamento dos rios em território nacional (vazão média anual de $179.433 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) e 49 % da vazão de estiagem (considerada como a vazão de estiagem com 95 % de permanência). Somente os 27 principais aquíferos sedimentares, que ocupam 32 % da área do país, totalizam a $20.473 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Essa gigantesca vazão de água é distribuída, de forma simplificada, em dois grandes grupos, a saber: aquíferos de rochas e materiais sedimentares e aquíferos de rochas fraturadas (ANA 2005a, 2005b; Hirata et al., 2006).

De acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, 62% dos 8.656 distritos abastecidos utilizam as águas subterrâneas, sendo a extração realizada em 86% dos distritos através de poços profundos e 14% poços rasa ou escavada (IBGE, 2000a). O papel das águas subterrâneas é igualmente importante nos 1.192 distritos que não contam com abastecimento de água, já que constituem a principal fonte alternativa em 47% desses distritos (IBGE, 2000b). Além de atender diretamente à população, esses recursos são utilizados em grande escala na indústria e agricultura.

A importância desta fonte ganha maior destaque quando há predominância de escassez hídrica, como em algumas regiões no Nordeste brasileiro, conhecidas como Semiárido nordestino, que apresentam volumes anuais precipitados consideráveis, da ordem de 400 a 800 mm, no entanto possuem alta irregularidade de distribuição no tempo, provocando longas estiagens, com o ressecamento dos leitos de muitos rios e reduções drásticas nas lâminas d'água de reservatórios (Rebouças, 1997).

No semiárido, com predominância da área localizada sobre formações do tipo cristalino, com solos pouco profundos e de baixa capacidade de infiltração e armazenamento, a ocorrência de águas subterrâneas nessas regiões está limitada a fraturas e fissuras nas rochas e a zonas de aluviões dos rios, formadas pela deposição de sedimentos fluviais. Há de se ressaltar, entretanto, a existência de bacias sedimentares, de ocorrência localizada, com grande potencial hídrico (Montenegro & Montenegro, 2012).

Como os usos múltiplos da água são crescentes, a água subterrânea vem assumindo importância cada vez mais relevante como fonte de abastecimento, devido a uma série de fatores que restringem a utilização das águas superficiais, como sua escassez, poluição ou contaminação (Vivacqua, 2005). Para que esse uso seja sustentável, é necessário compreender como ocorrem os processos que promovem a recarga subterrânea dessas águas, e os fatores que o influenciam, para uma melhor gestão desses recursos.

3.2 CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS DA ÁREA ESTUDADA

3.2.1 Formação geomorfológica e hidrografia da Serra de Portalegre

As atividades de soerguimento e erosão do Planalto da Borborema, no período Terciário, deram origem a Formação Serra do Martins. Essa constituição sedimentar recobre as serras de Martins e Portalegre na porção sudoeste do Rio Grande do Norte e da Serra de Santana (Onofre Júnior, 2012).

Geomorfologicamente a região possui superfície tabular erosiva caracterizada por relevo residual de topo plano, limitada por escarpas erosivas. Na formação geomorfológica de Portalegre prevalecem formas aguçadas e de cume contínuo de relevo, com diferentes ordens de grandeza e de aprofundamento de drenagem, afastados por vales em “v”. Possuem como componentes da paisagem um relevo composto por Serras e pela Depressão Sertaneja no entorno (IDEMA, 2008) (SEPLAN, 2013).

A porção superior das serras do maciço em que estão assentados os municípios e a suas zonas de recarga, estando recobertas pela Formação Sedimentar Serra do Martins, possui alta capacidade de infiltração das águas pluviais, em virtude da porosidade dos grãos que constituem essa estrutura, influenciando para o preenchimento da zona saturada do perfil inferior do solo e contribuindo para a recarga natural dos aquíferos. Conseqüentemente, a origem das nascentes é influenciada por essa estrutura geológica, capaz de armazenar e em determinadas altitudes minar, a água contida no subsolo (Neres, 2014).

Quanto à hidrologia a cidade de Portalegre está totalmente inserida na bacia hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró. Em seu território a distribuição de água é proveniente de fontes superficiais e subterrâneas, resultantes das condições climáticas e da existência de um arcabouço geológico de estruturas do embasamento cristalino que atuam como depósitos naturais de água (Barros, 1998).

Conforme CPRM (2005), o regime hídrico superficial da localidade é caracterizado por cursos de água perene e intermitente que se condicionam por meio de drenagem

dendrítica, formando lagoas e pequenos riachos. Já o regime hídrico subterrâneo possui características hidrogeológicas intersticial, composto por rochas sedimentares originárias da Formação da Serra do Martins e Fissural, provenientes de rochas do embasamento cristalino, rochas metamórficas e ígneas.

Em suas estruturas subterrâneas estão inseridos os aquíferos Cristalino, Aluvião e Barreiras. Esses aquíferos são responsáveis pela origem e a manutenção de muitas nascentes encontradas no município. Neres (2014) relata a existência de cinco nascentes perenes, localizadas na vertente Norte a barlavento do platô de Portalegre, as quais afloram as águas subterrâneas existentes na região.

Para Miller Júnior (2013), os aquíferos são constituídos por camadas de areia, cascalho ou leito de rochas porosas saturadas, pelas quais fluem as águas subterrâneas. Na região são encontrados três tipos de aquíferos, o aquífero Cristalino congrega todas as rochas cristalinas, onde a acumulação de águas subterrâneas se torna possível quando a geologia local apresentar fraturas adicionadas e uma farta cobertura de solos residuais. Os poços perfurados apresentam uma vazão média de 3,05 m³/h e uma profundidade de até 60 m, com água comumente oferecendo alto teor salino de 480 a 1400 mg/l com restrições para uso humano e agrícola (IDEMA, 2008) (SEPLAN, 2013).

O aquífero Aluvião encontra-se disperso, sendo formado pelos sedimentos depositados nos leitos e terraços dos rios e riachos de maior porte. Esses depósitos caracterizam-se pela alta permeabilidade, boas condições de realimentação e uma profundidade média em torno de 7 metros. A qualidade da água geralmente é boa e pouco explorada (IDEMA, 2008) (SEPLAN, 2013).

O aquífero Barreiras é composto por arenitos finos e grosseiros, conglomerados, arenitos argilosos, caulínicos e ferruginosos níveis de cascalhos, lateritas e argilas variadas de coloração amarela a avermelhada. Este aquífero apresenta-se confinado, semi-confinado e livre em algumas áreas (IDEMA, 2008) (SEPLAN, 2013).

3.2.2 Solo

Na pedologia da região de estudo, registra-se quatro tipos de solos predominantes, mapeados e classificados conforme a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1971). De acordo com a atualização do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2013), na região serrana são encontrados Argissolos Vermelho-Amarelos, Luvisolos Crômicos, Neossolos Litólicos e os Latossolos Vermelho Amarelo.

Os Latossolos Vermelho Amarelo são 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. É muito utilizado para agropecuária apresentando limitações de ordem química e baixa quantidade de água disponível às plantas. 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 Neossolos Litólicos ocorrem principalmente nas áreas onde são encontrados afloramentos rochosos, são solos pouco desenvolvidos, rasos, não hidromórficos (sem a presença de água), apresentando horizonte A diretamente sobre a rocha ou horizonte C de pequena espessura. Esses solos possuem poucas alternativas de uso, pois sua pequena espessura com frequente ocorrência de cascalhos e fragmentos de rocha no seu perfil proporciona grande susceptibilidade à erosão, principalmente nas áreas de relevo acidentado, onde estes solos ocorrem com maior frequência, sendo as limitações mais comuns para este tipo de solo (Cunha et al., 2016).

Os Neossolos Litólicos normalmente estão confinados a paisagens mais íngremes e nos afloramentos naturais das encostas das serras (Guerra & Cunha, 2000). Enquanto que os Latossolos Vermelho Amarelo são encontrados nos mais variados domínios morfoestruturais e unidades de relevo.

Os Luvisolos são solos rasos a pouco profundos, com horizonte B textural (horizonte resultante de acumulação de argila decorrente de processos de iluviação) 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, 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 (Cunha et al., 2016).

Os Argissolos são solos medianamente profundos a profundos, moderadamente drenados, com horizonte B textural (horizonte diagnostico que caracteriza a classe de solo), de cores vermelhas a amarelas e textura argilosa, abaixo de um horizonte A ou E de cores mais claras e textura arenosa ou média, com baixos teores de matéria orgânica. Apresentam argila de atividade baixa e saturação por bases alta (proporção na qual o complexo de adsorção de um solo está ocupado por cátions alcalinos e alcalino-terrosos, expressa em percentagem, em relação à capacidade de troca de cátions). Desenvolvem-se a partir de diversos materiais de origem, em áreas de relevo plano a montanhoso. A maioria dos solos desta classe apresenta um evidente incremento no teor de argila, com ou sem decréscimo, do horizonte B (horizonte de máxima iluviação ou de máxima expressão das características do horizonte B) para baixo no perfil. A transição entre os horizontes A e B é, usualmente clara, abrupta ou gradual. Quando localizados em áreas de relevo plano e suave ondulado, estes solos podem ser usados para diversas culturas, desde que sejam feitas correções da acidez e adubação, principalmente quando se tratar de solos distróficos ou álicos. Em face da grande susceptibilidade à erosão, mesmo em relevo suave ondulado, práticas de conservação de solos são recomendáveis (Cunha et al., 2016).

Solos que possuem uma textura arenosa possibilitam uma maior infiltração de água, sendo dessa forma mais um fator propício à recarga natural subterrânea e a posterior formação de nascentes. Porém, há intensificação dos riscos de contaminação, necessitando de um manejo adequado para não comprometer as nascentes e suas zonas de recarga.

3.2.3 Vegetação

O semiárido brasileiro possui tipicamente o bioma caatinga, conforme Brainer et al. (2012), considerado o único bioma exclusivamente brasileiro, possuindo grande heterogeneidade com cerca de 932 espécies vegetais catalogadas.

A região do platô serrano Martins e Portalegre possui uma vegetação bastante diversificada, acomodando grupos de plantas com porte médio e espalhadas como se fossem pequenas frações suspensas da Mata Atlântica dentro da zona catingueira, se diferenciando um pouco dos padrões geográficos e ambientais do sertão potiguar, onde predomina plantas adaptadas a climas quentes e longos períodos de estiagem, sua aparência é de uma paisagem seca (Medeiros et al., 2012).

A vegetação predominante da região 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 (CPRM, 2005).

Algumas áreas se apresentam em aparente descontinuidade com o restante da flora ao redor, essa formação acompanha o curso hídrico do lençol freático que aflora em plena mata e desce encosta abaixo formando corredores úmidos, se mantém corrente e garante a clorofila da massa vegetal mesmo passado à estação chuvosa, provavelmente compondo um rico acervo do que restou da Mata Atlântica, onde ainda se encontra vegetação nativa, raramente resquícios pontuais desse tipo de formação florestal com tal semelhança são encontrados na região sertaneja, merecendo destaque para as serras (Medeiros et al., 2012).

3.2.4 Clima

O semiárido brasileiro apresenta-se como uma área deficitária de pluviosidade regular ao longo do ano. Em virtude de suas características ambientais, é necessário rever com cautela a exploração dos seus recursos naturais e atentar para um uso ordenado e racional da água. Para tanto, o conhecimento das suas características climáticas se fazem pertinentes, assim como os regimes e períodos da sua pluviosidade (Neres, 2014).

O clima da região semiárida apresenta bastante variabilidade, principalmente quando se refere à precipitação pluviométrica, com alguns anos considerados secos e outros extremamente chuvosos. Segundo Diniz (2014), os fenômenos que produzem chuvas no nordeste brasileiro podem ser classificados de grande escala, mesoescala e microescala, sendo os primeiros responsáveis pela maior parte da precipitação observada.

Conforme Neres (2014), os locais que estão em áreas de maiores altitudes possuem intensidades maiores de chuvas, pois massas de ar úmidas, provenientes de diferentes direções, esbarram em áreas de topografias mais elevadas e acidentadas, ocasionando as precipitações pluviométricas orográficas, intensificando as precipitações e criando microclimas com temperaturas mais brandas e com maior umidade. As chuvas orográficas são causadas inteira ou principalmente pela elevação do ar úmido sobre terreno elevado. No Rio Grande do Norte é possível observar esses fenômenos nas regiões do platô serrano Martins e Portalegre.

Nesses locais, em virtude da junção dos fatores topografia e pluviosidade, resulta em ambientes característicos de temperaturas mais amenas, formando-se um ecossistema chamado de brejo de altitude. Estas são ilhas de florestas úmidas estabelecidas na região

semiárida sendo cercadas por uma vegetação de caatinga. São “áreas de exceção” dentro da área do nordeste semiárido (Pôrto et al., 2004).

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 área de estudo pode ser classificada conforme essa 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).

Com base no banco de dados da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN, 2016) foram obtidas as médias das precipitações pluviométricas dos últimos dez anos (2005 a 2015), para o município de Portalegre, apresentadas na Tabela 1, a média pluviometria anual entre os anos avaliados foi de 1067,02 mm, com as máximas entre os meses de janeiro e maio, período considerado chuvoso para a região.

O ano mais chuvoso para o município de Portalegre foi o ano de 2009 com 1915,00 mm, já em 2010 o município teve a sua menor precipitação de 623,7 mm (EMPARN, 2016).

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

Meses (Janeiro a Dezembro)	Média máxima nos anos (mm) (2005 a 2015)	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
Mai	395,9/2009	179,33
Junho	214/2013	49,80
Julho	96,7/2009	29,03
Agosto	116/2009	15,83
Setembro	0	0
Outubro	65/2010	5,91
Novembro	25,7/2013	4,79
Dezembro	98,2/2013	23,31
Total		1067,02

Fonte: Adaptado da EMPARN (2016).

3.3 ÁREAS DE RECARGA: CARACTERIZAÇÃO E IMPORTÂNCIA

As áreas de infiltração são conhecidas como áreas de recarga. O aumento da infiltração de água passa, fundamentalmente, pelas áreas de cobertura vegetal da bacia hidrográfica contribuinte. Portanto, é preciso ter uma boa cobertura vegetal nas partes mais altas do terreno, para que a água da chuva não escorra na forma de enxurrada, mas infiltre, emergindo nas minas ou nos olhos d'água, nas partes mais baixas do terreno (Santana, 2003).

As áreas de recarga são fundamentais para definir a potencialidade hídrica da bacia hidrográfica, podendo ser a área acumulada de drenagem em área plana (projeção horizontal), acima da cota altimétrica da nascente e inclusa entre seus divisores de águas (divisores topográficos) (Junqueira Júnior et al., 2010).

Nas condições de regiões com relevo acidentado, sem cobertura vegetal, sujeitas a práticas de uso e ocupação que favorecem as enxurradas, a recarga ocorre mais lentamente e de maneira limitada (Rebouças et al., 2006). A atividade antrópica é um elemento que pode interferir no processo de recarga através da alteração das condições de permeabilidade do solo, da redistribuição espacial de recarga (decorrente de construções e atividades em áreas urbanas), do desmatamento ou troca da cobertura nativa por vegetação de necessidade hídrica naturalmente incomum (Ferreira, 2014).

Com o aumento dos espaços edificados no âmbito de uma bacia hidrográfica e o aumento do escoamento superficial, o processo de erosão de solos se torna acelerado acarretando em um maior desprendimento das partículas do solo em suspensão e transportando rejeitos desse processo para as águas. Este diminui a sua capacidade de infiltração e tem sua qualidade alterada, resultando no assoreamento dos mananciais, reduzindo a capacidade de armazenamento, implicando assim na diminuição do aporte subterrâneo necessário para abastecer as áreas semiáridas em situações de escassez extrema (Nascimento, 2013).

Embora haja o consenso da importância dos recursos hídricos subterrâneos, principalmente, no que tange o abastecimento urbano, industrial e agrícola ainda existem atividades humanas que causam impactos negativos sobre eles. A falta de políticas de zoneamento, planejamento e ordenamento territorial causam a impermeabilização das áreas naturais de recarga e concentram o fluxo superficial da água gerando problemas como enchentes e inundações. Associado a falta de recarga, causada pela impermeabilização,

encontramos a sobre-exploração da água subterrânea que pode causar o esgotamento do recurso inviabilizando-o para posterior utilização (Barbosa & Mattos, 2008).

A degradação ambiental nas áreas de recarga, provocada por desmatamentos desordenados, compactação e erosão de solos, não só afeta o potencial de evapotranspiração (e conseqüente produção de água limpa para o ciclo hidrológico), como também provoca escorrimentos superficiais excessivos, que carregam sedimentos e dejetos, os quais irão depositar-se nos grandes reservatórios, tendo como resultado o assoreamento e a poluição ambiental (Santana, 2003).

Para que se mantenham as reservas de água subterrâneas é necessário que ocorra o processo de recarga, a recarga natural dos aquíferos depende do regime pluviométrico (quantidade de chuvas) e do equilíbrio que se estabelece entre a infiltração, escoamento e evaporação. As áreas de recarga são extremamente importantes para a manutenção da qualidade e quantidade das águas subterrâneas. Portanto, é fundamental que estas áreas sejam protegidas, evitando-se o desmatamento, o uso incorreto dos solos e a instalação de atividades potencialmente poluidoras.

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

Com a evolução de suas técnicas, a humanidade vem transformando de forma cada vez mais intensa os ecossistemas. Nos dias atuais, em todo o mundo, para que ocorra o crescimento e desenvolvimento dos centros urbanos, é necessária uma intervenção na paisagem, alterando fatores bióticos e abióticos. Entretanto, a intervenção na paisagem natural anterior à sua habitação produz impactos sobre essas áreas (Riceto, 2010).

As ações antrópicas têm gerado grandes impactos nas paisagens através do intenso processo de substituição das áreas naturais por diversos tipos de uso do solo e da fragmentação das áreas com cobertura florestal (Matsushita et al., 2006). Diversos fatores estão diretamente ligados a este processo, podendo influenciar a disponibilidade e a qualidade dos recursos naturais, além de afetar a biodiversidade em grandes áreas do planeta (Mendoza et al., 2011). Uma dessas causas é a exploração intensa de áreas com agricultura e pecuária familiares, muito comum na região semiárida do nordeste brasileiro. Esse tipo de atividade pode provocar perda da biodiversidade, queda na fertilidade do solo e a intensificação dos processos erosivos (Vanzela et al., 2010).

O solo é 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. Seus atributos variam de um lugar para outro, apresentando continuidade espacial, dependendo das características do material de origem e do manejo adotado (Grego et al., 2005).

Bertol et al. (2000) relata que as propriedades físicas do solo precisam ser monitoradas visto que o uso intensivo ou acima da capacidade de suporte pode provocar mudanças indesejáveis, como aumento da densidade do solo, redução do teor de matéria orgânica, diminuição da porosidade, tamanho de agregados, taxa de infiltração de água e resistência a penetração das raízes (Camargo & Alleoni, 1997). Souza et al. (2004), Eguchi et al. (2002) e Pocay (2000) relatam que as frações texturais apresentam estabilidade, ou seja, se modificam pouco ao longo do tempo, apresentando baixo coeficiente de variação.

Para Souza et al. (2004), o solo funciona como um reservatório dinâmico de água, onde suas características podem influenciar a capacidade de armazenamento de água, principalmente quando se trata de infiltração, uma vez que está diretamente relacionada a atributos do solo que governam de forma direta o processo de recarga de nascentes. O manejo do solo pode afetar diretamente o equilíbrio das condições de infiltração de água.

No tocante a conservação do solo, a densidade do solo é um dos atributos físicos de maior destaque em virtude de refletir, especialmente, as condições de compactação do solo, a qual é influenciada pelo manejo empregado (Dias Júnior, 2000). O aumento do conteúdo volumétrico de sólidos proporciona uma redução drástica na macroporosidade, na quantidade de água prontamente disponível e na aeração (Alvarenga et al., 1996).

As alterações decorrentes do uso e da ocupação do solo também podem alterar diretamente a sua estrutura e atividade biológica, e conseqüentemente, os seus atributos químicos que possuem bastante vulnerabilidade a modificações, a retirada da vegetação natural aliados aos fatores climáticos e manejo do solo adotado, podem intensificar a degradação do mesmo (Costa et al., 2015).

A ocupação inadequada dos espaços, além da desconfiguração da paisagem e demais impactos pode resultar na diminuição da recarga dos aquíferos, onde a desordenada ocupação e a impermeabilização dificultam a recarga do lençol freático. Desta forma percebe-se a importância do disciplinamento do uso e ocupação do solo visando à conservação ambiental e como medida de controle contra a poluição e preservação de vidas futuras.

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

Para Bertol et al. (2000), os atributos do solo precisam ser monitorados, pois o uso intensivo deste recurso pode provocar mudanças indesejáveis no seu comportamento físico-hídrico. Nesse sentido, a variabilidade espacial desses atributos deve ser bem conhecida, visando minimizar os erros na amostragem e no manejo do solo, que demanda considerável tempo e apreciável custo, principalmente, porque as propriedades hidráulicas do solo sofrem extensa variabilidade espacial e estão sujeitas às frequentes alterações no tempo (Loyola & Prevedello, 2003). Os atributos do solo variam entre pontos relativamente próximos em área de mesma unidade taxonômica, muitas vezes de forma significativa. Em consequência dessas variações o uso do valor médio é, às vezes, de pouca utilidade, podendo conduzir a decisões equivocadas, principalmente no sistema solo-água-plantas (Macedo et al., 1998).

Por conta disso, várias ferramentas de geoestatística são empregadas para estudar a variabilidade espacial dos atributos do solo e podem, potencialmente, conduzir a práticas que permitam um melhor entendimento do processo de interação entre o sistema solo-plantas-atmosfera (Vieira et al., 1981; Timm et al., 2000; Wendroth et al., 2001; Ortiz, 2002; Hurtado, 2004; Rocha, 2004; Faulin, 2005; Carvalho, 2006; Moreti, 2006; Lemos Filho, 2010).

O conhecimento da variabilidade espacial de um solo, além de caracterizar uma região, gera uma estimativa do parâmetro sem viés, sendo possível planejar de maneira mais eficaz a implantação de malhas de amostragem (Mulla et al., 1992; Ortiz, 2002; Roque, 2003).

A geoestatística é definida como sendo a aplicação da teoria das funções aleatórias para o reconhecimento e estimação de fenômenos naturais (Journel & Huijbregts, 1991), ou o estudo das variáveis numéricas distribuídas no espaço.

A utilização de modelagem geoestatística permite identificar a existência ou não de dependência espacial entre as observações, podendo ser aplicada em mapeamentos, orientação de futuras amostragens e modelagens, permitindo, assim, estimar o valor do atributo em locais não amostrados, facilitando a gestão dos recursos naturais. Na análise geoestatística, a variabilidade espacial é profundamente avaliada e modelada, para em seguida se empregar técnicas apropriadas de estimativas, cujos resultados serão imagens representativas da distribuição no espaço, das propriedades que estão sendo analisadas (Sturaro, 1993).

No campo da física do solo é comum encontrar variáveis distribuídas espacialmente. Para o estudo destas variáveis são usados diversos procedimentos geoestatísticos de estimação e simulação, a partir de um conjunto de amostras localizadas no domínio espacial em que o

fenômeno se manifesta em condições consideradas representativas de sua realidade. Estes procedimentos permitem a descrição e caracterização das variáveis estudadas, primeiro, proporcionando valores estimados em locais de interesse e segundo, gerando mapas de superfície ou isolinhas para uma melhor visualização do fenômeno.

A obtenção de informações a respeito da variabilidade espacial dos atributos do solo é de grande importância para avaliação da recarga de aquíferos, levantamento, mapeamento e classificação de solos, desenvolvimento de esquemas mais adequados de amostragens, entre outros, visando à melhoria das condições de manejo e o incremento de produtividade das culturas (Souza, 1992).

Gomes (2005) relata que a qualidade estrutural dos solos tem sido associada às condições favoráveis a infiltração e movimento de água no perfil do solo. O estudo da variabilidade de atributos do solo pela geoestatística, tem se mostrado uma ferramenta adequada 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.

3.5.1 Utilização de geotecnologias em diagnósticos ambientais

O geoprocessamento pode ser entendido como conjunto de técnicas que permitem coletar, manipular, armazenar e tratar dados georreferenciados em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas), podendo realizar uso integrado dos mesmos (Rosa, 2009). Possuindo a vantagem de possibilitar uma abordagem múltipla e rapidez na geração de resultados relevantes.

As ferramentas computacionais para Geoprocessamento, chamadas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), permitem realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georeferenciados. Na perspectiva moderna de gestão do território, toda ação de planejamento, ordenação ou monitoramento do espaço deve incluir a análise dos diferentes componentes de ambiente, incluindo o meio físico-biótico, a ocupação humana e seu interrelacionamento. Os SIGs oferecem uma variedade de ferramentas para processar os dados ambientais, que permitem a expressão de procedimentos lógicos e matemáticos sobre as variáveis georeferenciadas com uma economia de expressão e uma repetibilidade impossível de alcançar em análises tradicionais (Camara et al., 1998).

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.

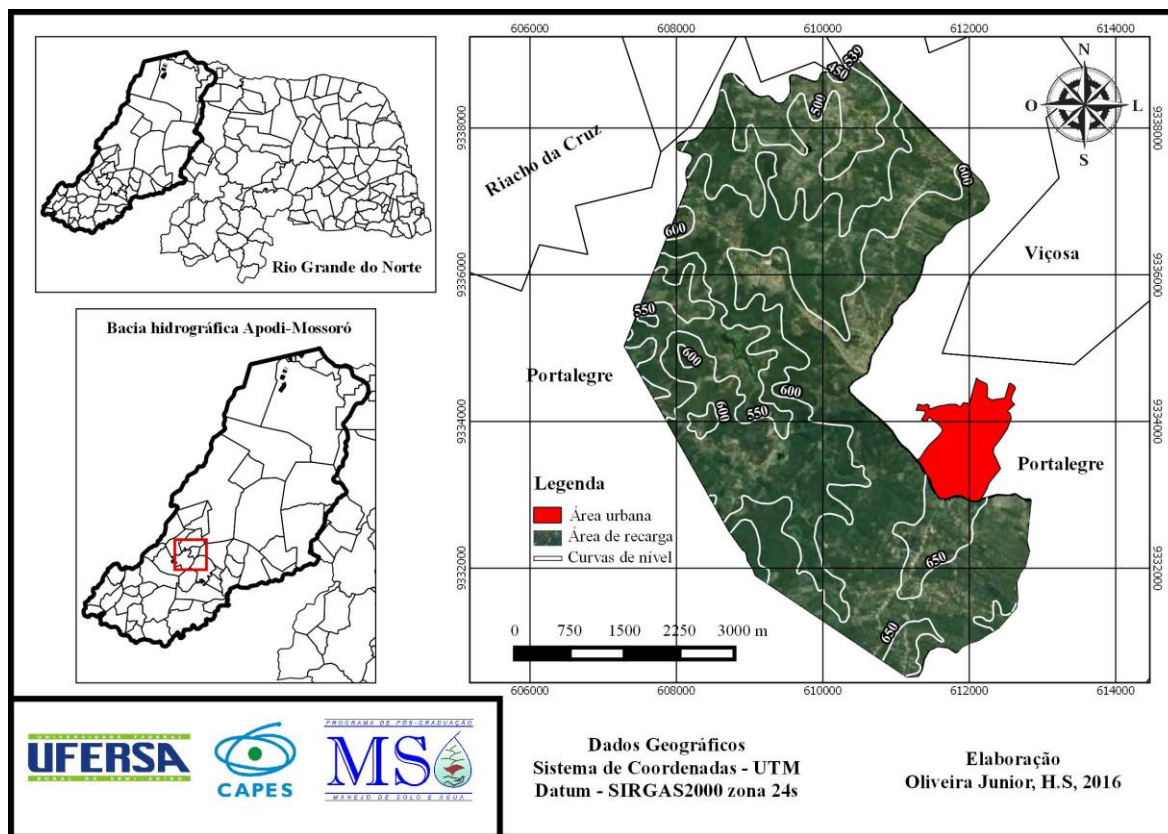
A utilização do geoprocessamento em trabalhos de levantamento de solos mostra-se importante ferramenta para análise geoestatística e cruzamento dos diversos planos de informações gerados a partir dos atributos ambientais (Assad et al., 1998; Scull et al., 2005; Pedron et al., 2006a). Como consequência natural, o uso de Geoprocessamento em projetos ambientais requer o uso intensivo de técnicas de integração de dados. Os estudos ambientais, para serem feitos de forma adequada, requerem a combinação de ferramentas de análise espacial, processamento de imagens, geoestatística e modelagem numérica de terreno (Camara et al., 1998).

O mapeamento de uso e a ocupação das terras com a utilização de técnicas de geoprocessamento constituem instrumento de grande importância visto que auxilia no diagnóstico acerca dos tipos de uso, podendo subsidiar ações de planejamento ambiental, conforme constatado por Carvalho & Lacerda (2006), Ferreira (2006), Silva et al. (2009), Chaves et al. (2010).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O trabalho foi conduzido numa zona de recarga de microbacia hidrográfica perene de vertente, com aproximadamente 2.594 ha, localizada no médio curso da bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró, no oeste do estado do Rio Grande do Norte. A área está situada no município de Portalegre, inserido na Mesorregião Oeste Potiguar (coordenadas 06°01'26,4" Sul e 37°59'16,8" Oeste), com área de 110,1 km², localizada sobre um maciço cristalino a 642 m de altitude média, limitando-se com os municípios de Riacho da Cruz, Taboleiro Grande, Viçosa, Serrinha dos Pintos, Francisco Dantas e Martins, inseridos na Microrregião de Pau dos Ferros (IDEMA, 2008).



Fonte: Google Earth (2015).

Figura 1. Localização da área de estudo com respectivas curvas de níveis.

Segundo Rocha et al (2009), nas áreas serranas próximo as nascentes predomina o clima do tipo AW, caracterizado por um clima tropical chuvoso com verão seco e estação chuvosa no outono, conforme a classificação climática de Köppen, com médias pluviométricas anuais entre 800 e 1.200 mm.

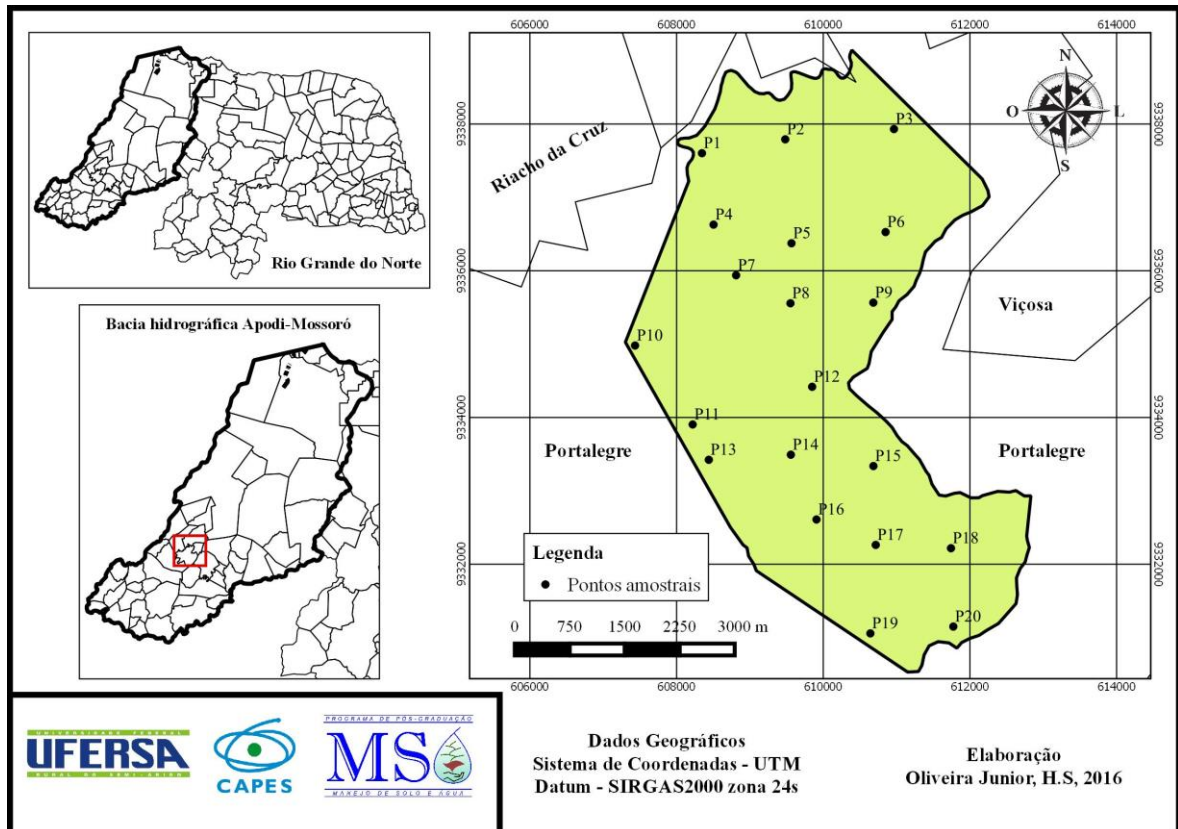
Conforme dados do IDEMA (2008), as temperaturas médias anuais, correspondem à máxima de 36,0 °C; média de 28,1 °C; e mínima de 21,0 °C; com uma umidade relativa média anual de 66%.

4.2 PLANO AMOSTRAL

Para elaboração do plano amostral, realizou-se a delimitação da área de recarga da microbacia hidrográfica através da sobreposição de curvas de nível a imagens de satélite, além disso, de acordo com a existência de divisores topográficos observou-se a área de chapada contribuinte para infiltração de água.

Foi estabelecido um grid sobre a área de recarga da microbacia hidrográfica, onde cada ponto georreferenciado (GPS) do grid corresponde a um ponto amostral no campo,

correspondendo a 20 (vinte) pontos amostrais, a distância entre os pontos amostrais foi influenciada pela dificuldade de acesso e a existência de reservatórios de água. Em cada ponto coletou-se amostras de solo deformadas e indeformadas, considerando a profundidade no perfil do solo de 0,00 - 0,30 m.



Fonte: Google Earth (2015).

Figura 2. Croqui de distribuição dos pontos amostrais.

4.2.1 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, o excesso de solo presente na amostra foi retirado e os anéis foram tampados e, posteriormente, levados ao laboratório de Análise de Solo, Água e Planta (LASAP) da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) com o cuidado para manter a estrutura e a umidade do solo.



Fonte: Acervo do pesquisador (2015).

Figura 3. 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. As amostras 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 (2015).

Figura 4. Coleta de solo com estrutura deformada.

4.3 ANÁLISES FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO

As determinações de textura, densidade do solo e densidade de partículas foram feitas no Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta da UFRSA, os procedimentos foram realizados com três repetições, com exceção a densidade do solo.

4.3.1 Textura

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta, utilizando o dispersante químico (Hexametáfosfato de sódio). Foram utilizadas amostras com estrutura deformada, coletadas na superfície (0,00-0,30 m) e após secas ao ar, desagregadas e passadas em peneira com 2 mm de abertura de malha (TFSA). A análise granulométrica foi realizada seguindo o manual de métodos de análise de solo da Embrapa (Donagema et al., 2011).

4.3.2 Densidade do solo

A densidade do solo (D_s) é a relação entre a massa de uma amostra de solo seco a 105°C e a soma dos volumes ocupados pelas partículas sólidas e os poros (Equação 1). Assim, a densidade do solo é inversamente proporcional ao volume, ou seja, ao compactar uma amostra, a massa permanece constante e o volume diminui, por consequência a densidade do solo aumenta, sendo, portanto um indicador do grau de compactação de um solo. As densidades em solos arenosos oscilam entre 1400 a 1800 kg m⁻³, e em solos mais argilosos oscilam entre 900 a 1600 kg m⁻³ (Reichardt & Timm, 2004). A D_s foi determinada pelo método do anel volumétrico, com auxílio de um amostrador do tipo “Uhland” e anéis com dimensões conhecidas.

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

em que:

D_s – densidade do solo, g cm⁻³;

M_{ss} – massa de solo seco a 105 °C, g, e

v – volume do anel, cm³.

4.3.3 Densidade de partículas

A densidade de partículas (D_p) é a relação entre a massa de determinada amostra de solo e o volume ocupado pelas partículas do mesmo. A D_p foi determinada pelo método do balão volumétrico utilizando-se álcool, considerando apenas o volume de solo ocupado efetivamente pelas partículas, sem levar em consideração o espaço poroso, sendo seu valor determinado pela expressão, apresentada na Equação 2.

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

em que:

D_p – densidade de partículas, g cm⁻³;

M_s – massa de solo, g, e

v_s – volume de sólidos, cm³.

4.3.4 Volume total de poros

A porosidade do solo representa a porção do solo em volume, não ocupada por sólidos, sem referir-se a tamanho e distribuição dos mesmos. A porosidade total calculada ou volume total de poros (VTP) pode ser obtido em porcentagem pela expressão, apresentada na Equação 3:

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

em que:

VTP – volume total de poros, %;

D_p – densidade de partículas, $g\ cm^{-3}$;

D_s – densidade do solo, $g\ cm^{-3}$.

4.3.5 Umidade do solo na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente

Para a determinação da Umidade do solo na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente as amostras de solo foram encaminhadas ao Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta da Embrapa Semi-Árido, em Petrolina – PE, onde se obteve a relação entre o potencial matricial e a quantidade de água presente no solo por meio do método da centrífuga. As amostras deformadas coletadas na camada de 0,00-0,30 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 de 10 e 1500 KPa, para a determinação da capacidade de campo e do ponto de murcha permanente respectivamente; 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).

4.3.6 Disponibilidade total de água

A água compreendida entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, 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), Eq. 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;

D_s – densidade do solo, g cm⁻³.

4.3.7 Capacidade total de água do solo

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, Eq. 4:

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

em que:

CTA – capacidade total de água no solo, mm;

Z – profundidade efetiva do sistema radicular, cm.

4.3.8 Porosidade drenável

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), Eq. 5:

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

em que:

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

VTP – volume total de poros, decimal;

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

4.4 ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO

Foram analisados os seguintes atributos químicos: pH em água, na proporção de 1:2,5; condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes); 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 chama; e matéria orgânica do solo (MOS), por titulação com sulfato ferroso amoniacal 0,005 M depois de aquecida em chapa uniforme com dicromato de potássio 0,02 M. A partir das análises realizadas foi obtido a soma de bases (SB).

As análises químicas do solo foram feitas no Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta da UFERSA, os procedimentos foram realizados com três repetições para todos os parâmetros, sendo determinados segundo o manual de métodos de análises de solo da Embrapa (Donagema et al., 2011).

4.5 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 às variáveis teores de silte, areia e argila, densidade do solo, densidade de partículas, umidade na capacidade de campo (θ_{cc}), umidade no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}), porosidade drenável, capacidade total de retenção de água, água totalmente disponível, pH em água, condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes), cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}), alumínio (Al^{3+}), fósforo (P), sódio (Na^+), potássio (K^+), matéria orgânica do solo (MO) e soma de bases (SB).

A estatística descritiva foi realizada no intuito de observar o comportamento da distribuição dos dados, desconsiderando 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 de uma avaliação da distribuição espacial dos pontos em função da latitude e da longitude, por meio de gráficos de tendência. Segue-se a identificação de dados discrepantes (outliers) por meio de gráficos box plot 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.

4.5.1 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:

$C_0 + C_1$ – patamar;

a – alcance;

h – 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.

4.5.2 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

coeficiente de determinação e o 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 – efeito pepita;

C_1 – variância estruturada;

$C_0 + C_1$ – 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.

4.5.3 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 11:

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

em que:

$z^*(x_0)$ – variável interpolada;

λ_i – pesos associados aos pontos vizinhos;

$z(x_i)$ – 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 12 (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 – distância entre o i -ésimo ponto de vizinhança e o ponto amostrado;

X_p – variável interpolada;

X_i – valor da variável i -ésima localidade vizinha.

Partindo da krigagem e do IDW, foram elaborados os mapas de variabilidade espacial, das propriedades físico-hídricas 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.

4.6 SUPORTES COMPUTACIONAIS PARA MAPEAMENTO DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI) E USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

Para a elaboração do Mapa do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), foi utilizado o software livre QGIS versão 2.8.9 (2016). 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 data de novembro de 2015, disponibilizado no web site do Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais – INPE.

O LANDSAT 8 possui resolução espacial de 30 m nas bandas multiespectrais, de 15 m na pancromática e de 100 m nas bandas do termal. Sua resolução radiométrica é de 16 bits e seu período de revisita é de 16 dias. O LANDSAT 8 teve um aumento de resolução espectral, em relação aos sensores anteriores, contando agora com 11 bandas (USGS, 2014).

A plataforma LANDSAT-8 opera com dois instrumentos imageadores: Operacional Land Imager (OLI), com as bandas 1 a 7 e 9 multiespectrais e a banda 8 pancromática, e o Thermal Infrared Sensor (TIRS), com as bandas 10 e 11. Novas bandas foram criadas, tais como, a nova banda 1 (coastal aerosol) que é útil para estudos costeiros, de água e aerossol e a nova banda 9 (cirrus) é útil para a detecção de nuvens (USGS, 2015).

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). Conforme Shimabukuro (1998), o NDVI é muito utilizado na estimação de biomassa, cobertura vegetal e na detecção de mudanças de padrão de uso e cobertura do solo.

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

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{R}}{\text{NIR} + \text{R}} \quad (13)$$

em que:

NDVI – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada;

NIR – refletância no comprimento de onda correspondente ao Infra Vermelho Próximo (0,76 a 0,90 μm);

R – 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 et al., 2011).

É fundamental a execução da correção atmosférica nas imagens de satélite, pois a energia eletromagnética ao atingir a atmosfera é por esta espalhada, e parte desta energia espalhada retorna para o espaço, contaminando a energia refletida ou emitida pela superfície e que é detectada pelos sensores orbitais (Ponzoni et al., 2010). Os efeitos diretos por conta da absorção e do espalhamento atmosférico produzem a alteração do brilho da cena e a diminuição de contraste entre os alvos (Antunes, et al., 2012), sendo assim nas imagens utilizadas foram realizadas as correções radiométricas.

Utilizando-se software QGIS versão 2.8.9 (2016) foram efetuadas operações de georreferenciamento, mosaico, recorte, segmentação e classificação supervisionada de imagem. Foram utilizadas imagens de alta resolução na identificação e classificação das imagens servindo como apoio à etapa de coleta de amostras para elaboração de mapa de uso e ocupação do solo. As viagens a campo possibilitaram a identificação das áreas representadas nas imagens de satélite.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI)

Os mapas das Figuras 5 e 6, 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 área de recarga de uma microbacia hidrográfica no semiárido. O verde escuro representa as regiões com valores de NDVI relativamente altos, estando associado à vegetação mais densa, o amarelo representa as regiões com pouca vegetação, e o vermelho está associado à ausência de vegetação ou água. Neles, é possível verificar redução da cobertura vegetal na área de recarga durante o período de estiagem, pois a vegetação predominante na área é de espécies vegetais com características caducifólias (perda das folhas na época seca). Conforme Melo et al., (2011) a caatinga sofre considerável variação na fitomassa durante o ano, especialmente quando se compara a vegetação no período chuvoso com o de estiagem. Também se pode observar que, o NDVI sofreu acréscimo de aproximadamente 68,46% da estação seca para a chuvosa, evidenciando à alta capacidade de crescimento vegetativo do bioma caatinga num pequeno espaço de tempo (novembro 2015 – fevereiro 2016) em resposta a presença de umidade (chuvas), conforme

Tabela 1. Os meses chuvosos (Janeiro e Fevereiro de 2016) apresentaram precipitação média de 303,00 mm, sendo 268,8 mm em Janeiro e 34,2 mm em Fevereiro (EMPARN, 2016).

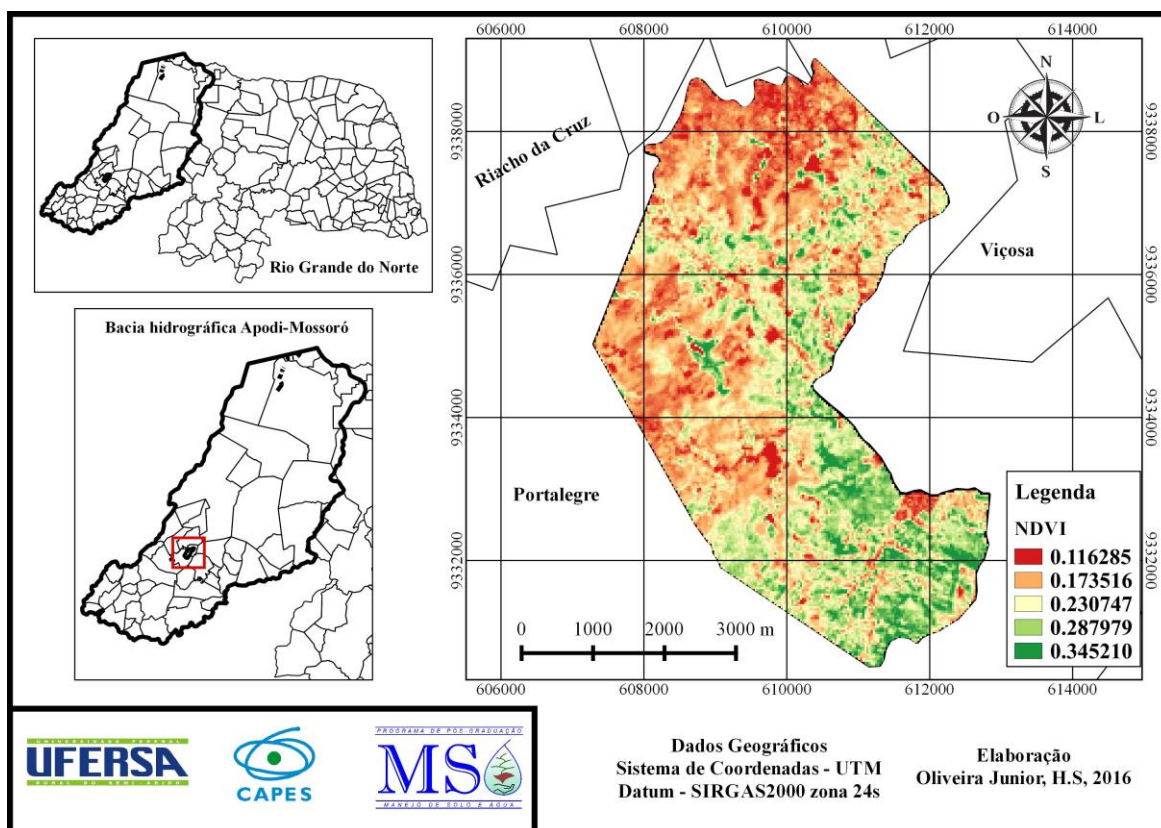
Os valores do NDVI oscilam de -1 a +1, quanto mais próximo de +1, maior a densidade da cobertura vegetal, ou seja, ela se apresenta em seu estágio denso, úmida e bem desenvolvida (Jarlan et al., 2008; Costa et al., 2007). A água tem refletância na banda 3 maior que na banda 4, portanto, apresenta valores negativos, próximos a -1 no NDVI. As nuvens refletem de forma semelhante no visível e no infravermelho próximo, portanto, espera-se que o valor do pixel seja bem mais próximo de zero. O solo nu sem vegetação, ou com vegetação rala e esparsa, apresenta valores positivos, mas não próximos de +1 (Poelking et al., 2007).

Analisando a Figura 5, do período de estiagem, onde o NDVI para a área de recarga foi menor, é possível identificar de forma nítida uma maior intensidade vegetativa nas áreas próximas as regiões onde são encontradas as nascentes perenes, essa condição proporciona uma maior umidade, além de ser região de barlavento com ocorrência de precipitações pluviométricas orográficas. Essas zonas de recarga estão localizadas num capeamento sedimentar sobre um maciço serrano de elevada altitude (aproximadamente 716 metros), tendo influência das condições edafoclimáticas da região, com um clima mais ameno e com precipitações mais frequentes. Além disso, os solos encontrados nessas áreas 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 6) com o mapa de uso e ocupação do solo (Figura 8), 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 exposto, agricultura e caatinga manejada os valores de NDVI apresentaram-se menores, evidenciando, portanto, que o uso e ocupação do solo pela ação antrópica influenciam, de forma direta, no índice de cobertura foliar da área recarga e, conseqüentemente, nos atributos do solo, o que, provavelmente, afetará na recarga hídrica do aquífero. Pode-se perceber que os menores valores estão geralmente associados às respostas quando os solos estão mais evidentes, tendo em vista que a vegetação, nos períodos de déficit hídrico encontra-se sem biomassa foliar. De acordo com Guimarães (2009) a perda da folhagem da maioria das espécies no período de estiagem e sua recuperação no período das chuvas é um dos fenômenos da Caatinga. Os índices de vegetação são muito sensíveis à atividade fotossintética e as espécies de caatinga apresentam diversos

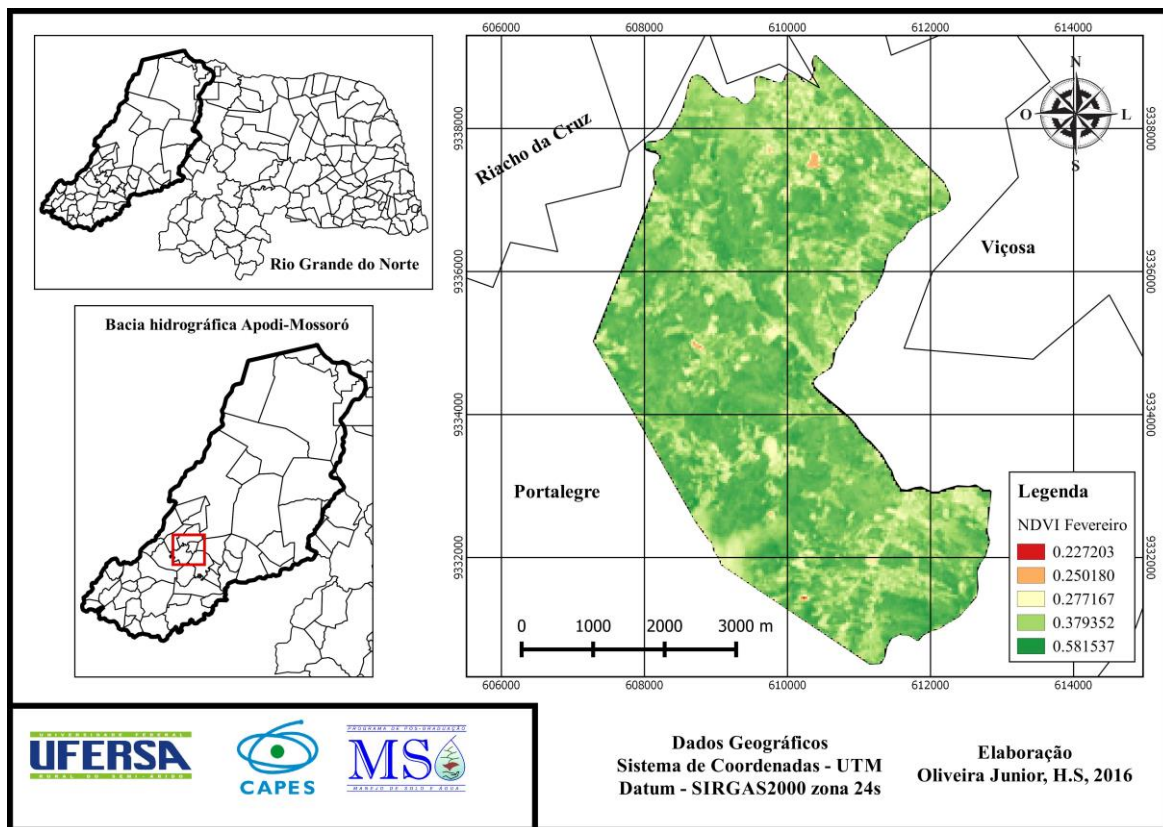
mecanismos adaptativos à captação e uso da água (Coppin et al., 2004; Maldonado, 2005), a detecção de mudanças da vegetação de Caatinga, pode, muitas vezes, estar influenciada por diferenças das condições de umidade.

No período de estiagem o NDVI apresentou valores entre 0,34 e 0,11 semelhantes aos resultados encontrados por Silva (2016) no município de Gado Bravo-PB, onde o NDVI ficou entre 0,5 e 0,1 em grandes áreas do município, e em vários locais, se assemelham a de áreas de solo exposto, ficando entre 0,3 e 0,1, pois a perda das folhas reduz drasticamente as atividades fotossintéticas, assim como a absorção da radiação solar na região espectral do vermelho, assemelhando-se à reflectância da banda espectral infravermelho próximo, tornando assim o NDVI próximo à zero.



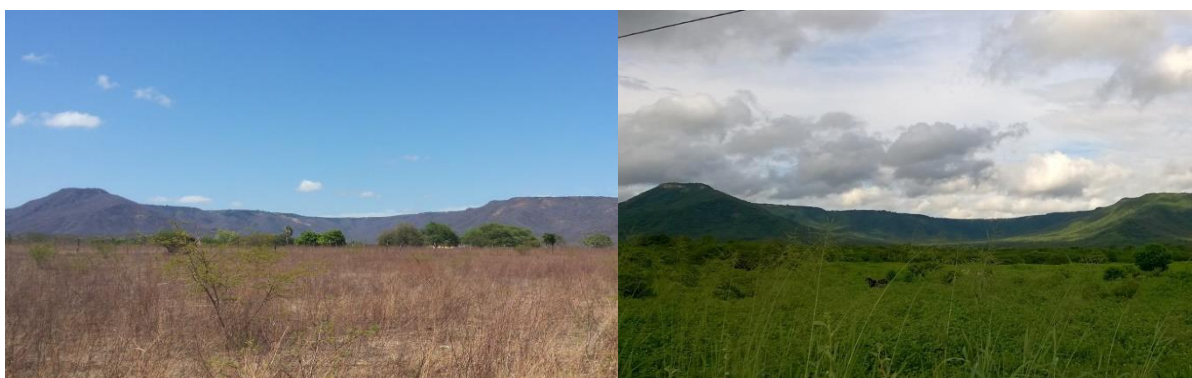
Fonte. Acervo do pesquisador (2016).

Figura 5. Mapa do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para o período de estiagem (Novembro de 2015).



Fonte. Acervo do pesquisador (2016).

Figura 6. Mapa do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para o período chuvoso (Fevereiro de 2016).



Fonte. Acervo do pesquisador (2016).

Figura 7. Vegetação no período de estiagem (Novembro 2015) e chuvoso (Fevereiro de 2016).

5.2 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

A Figura 8 apresenta o mapa de uso e ocupação do solo para a área de recarga estudada, nele percebe-se uma diversidade do uso do solo na região, como vilarejos (1,53%), agricultura (4,79%), caatinga preservada (22%), caatinga manejada (69,61%), reservatórios de água (1,19%) e solo exposto (0,88%), esses valores em percentuais assim como as classes de uso do solo na área de recarga, podem ser observados na Tabela 2. Considerando a caatinga manejada como uma área onde houve modificações na paisagem natural através de interferências antrópicas, no mapa de uso e ocupação da área de recarga, a presença da caatinga manejada destaca-se em mais da metade da área, o que mostra a vulnerabilidade da área a degradações ambientais principalmente nos recursos naturais solo e água.

Ainda é possível constatar que há uma maior incidência de caatinga manejada entorno dos reservatórios de água, corroborando com Melo et al., (2011) que identificou em uma microbacia hidrográfica que áreas próximas a reservatórios de água sofrem maior impacto com a supressão da cobertura vegetal, uma vez que os açudes contribuem para o adensamento populacional e exploração dos recursos naturais.

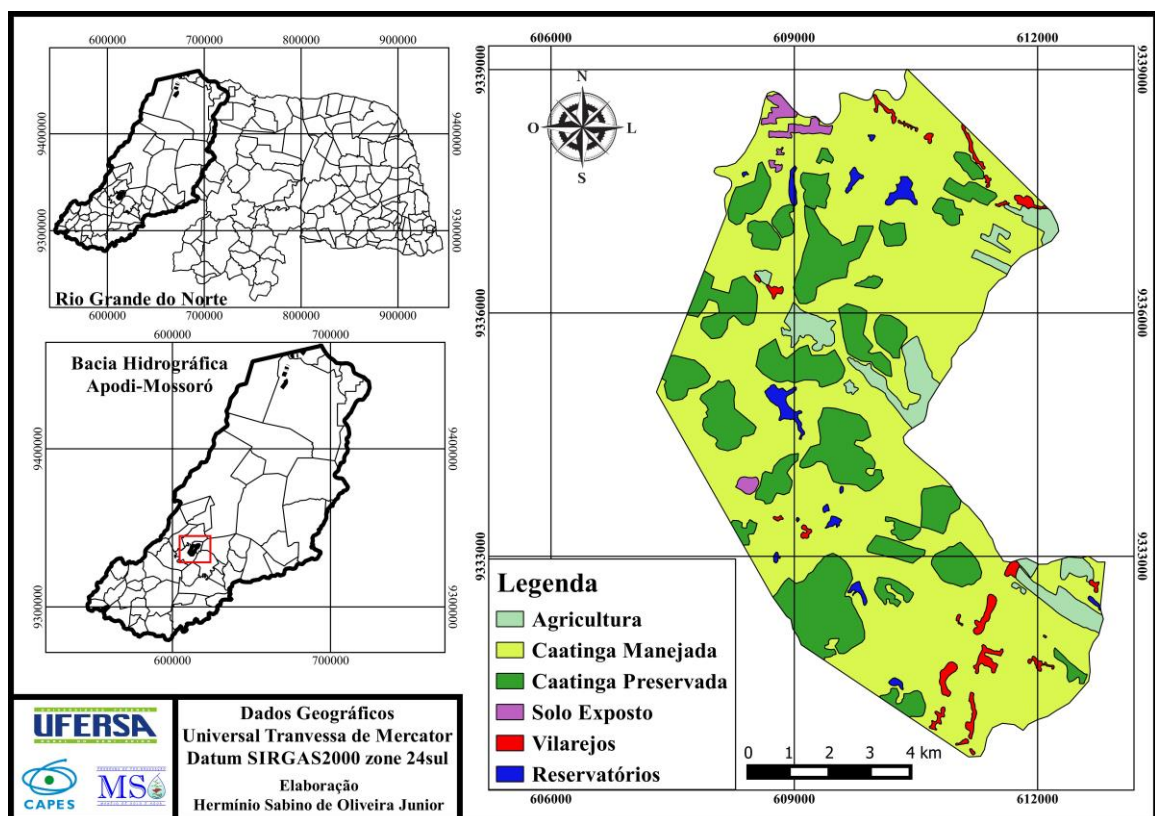
O manejo do solo para a realização de práticas agrícolas nas regiões de chapada, provavelmente em função das melhores condições edafoclimáticas (presença de Latossolo e maior índice pluviométrico) e topográficas, contribuem para um maior impacto negativo na produção de água das nascentes perenes existentes na área, pois esses locais são zonas de recarga de aquíferos que alimentam essas nascentes. De acordo com Castro et al. (1999), a vegetação é importante para a estabilidade das vertentes formadoras de nascentes, aumentando a infiltração da água no solo e evitando a erosão. Para Tabai (2002), as matas de topos de morros funcionam como verdadeiras esponjas, absorvendo grande parte da água das chuvas e liberando-a lentamente para o solo, propiciando a infiltração e a percolação no perfil. Desta forma, a presença de vegetação favorece a recarga dos aquíferos. Na Figura 8 apresenta-se o mapeamento do uso atual do solo na área de recarga gerado a partir da classificação da imagem através do reconhecimento da área.

No mapa de uso e ocupação do solo, é possível identificar que há uma maior concentração de caatinga manejada e agricultura nas regiões próximas as nascentes. Fato que pode ser explicado pela possível proximidade do lençol freático com a superfície do solo nessas regiões, proporcionando uma maior umidade do solo nesses locais, o que pode servir de incentivo para a intensificação de atividades agrícolas nessas áreas. Conforme Neres

(2014), em estudo realizado sobre aspectos hidrodinâmicos e macroscópicos como subsídio à conservação das nascentes de Martins e Portalegre, são encontradas cinco nascentes na região de Portalegre.

A imagem de NDVI da Figura 5 (período de estiagem) corrobora com a afirmação da possível proximidade do lençol freático com a superfície do solo nessas regiões de proximidade das nascentes, pois é possível visualizar claramente uma maior densidade vegetal nessas áreas.

Ainda em relação ao mapa de uso e ocupação do solo (Figura 8), nota-se que na área estudada há uma fragmentação da vegetação nativa, consequência da expansão desordenada das ações antrópicas na região, resultando na formação de verdadeiras “ilhas” de caatinga preservada. Esse fato pode ocasionar consequências severas para a redução da biodiversidade local, principalmente no que se refere à fauna. Além disso, evidencia a prática do uso desorganizado (não planejado) dos solos da área em questão, que constitui uma zona de recarga, área que, por lei, deveria ser preservada, pois conforme o Código Florestal brasileiro (2012) as áreas existentes no entorno das nascentes e dos olhos d’água, em qualquer situação topográfica, no raio mínimo de 50 (cinquenta) metros, são consideradas Área de Preservação Permanente.



Fonte: Acervo do pesquisador (2016).

Figura 8. Mapa do uso e ocupação do solo.

Tabela 2. Extensão e distribuição percentual das unidades de mapeamento em zona de recarga de micro bacia hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró.

Unidade de Mapeamento	Área em (ha)	Percentual (%)
Caatinga preservada	575,78	22,00
Caatinga manejada	1821,68	69,61
Reservatório de água	31,01	1,19
Solo exposto	22,90	0,88
Agricultura	125,46	4,79
Vilarejos	40,14	1,53
Total	2.617,00	100,00

5.3 ESTATÍSTICA DESCRITIVA E GEOESTATÍSTICA DOS ATRIBUTOS DO SOLO

Na Tabela 3 e 4 encontra-se a estatística descritiva para as análises dos atributos físicos e químicos do solo, para os atributos físicos foram analisados a Densidade do solo (Ds), Densidade de partículas (Dp), Volume total dos poros (VTP), Umidade do solo na capacidade de campo (θ_{CC}) e no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), Disponibilidade total de água (DTA), Capacidade total de água do solo (CTA), Porosidade drenável (PD) e frações de areia, silte e argila, para os atributos químicos foram analisados pH; condutividade elétrica do extrato de saturação (CE_{es}); cálcio (Ca^{2+}); magnésio (Mg^{2+}); alumínio (Al^{3+}); fósforo (P); sódio (Na^{+}); potássio (K^{+}); matéria orgânica (MO); e soma de bases (SB) nos 20 pontos amostrais distribuídos na área de recarga.

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 físicos que obtiveram baixa variação foram à Ds e a Dp, para os atributos (Areia, Silte, Argila, θ_{CC} , θ_{PMP} , VTP, DTA, CTA) a variação foi classificada como média, e apenas a PD apresentou CV superior a 60%, considerado alto. Os atributos Ds e Dp possuem maior homogeneidade na área estudada quando comparado aos demais atributos físico-hídricos, pois os mesmo apresentaram os menores valores de CV, sendo 10,90% e 5,35%, respectivamente (Tabela 3).

Resultados semelhantes foram obtidos por Junqueira Júnior (2006), em que os atributos físicos θ_{CC} , θ_{PMP} , VTP, CTA, apresentaram média variabilidade, em estudo que

analisou o escoamento de nascentes associado à variabilidade espacial de atributos físicos e uso do solo em uma bacia hidrográfica de cabeceira do Rio Grande - MG.

Já os atributos químicos do solo não apresentaram valores de CV classificados como de baixa variação ($CV < 12\%$). Os atributos pH, CE_{es} , MO e Mg^{2+} foram classificados como de média variação, conforme seus valores de CV ($12 < CV < 60\%$), e os demais atributos (Ca^{2+} , Na^+ , P, K^+ , Al^{3+} , SB) classificaram-se como de alta variação ($CV > 60\%$). Ainda é possível notar que o pH, com coeficiente de variação igual a 12,15 %, tem a menor variação quando relacionado com os demais atributos químicos estudados, isso demonstra uma maior homogeneidade dos valores encontrados (Tabela 4).

Os resultados (Tabelas 3 e 4) 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 à 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, um baixo valor de desvio padrão indica que os dados tendem a estar próximos a média (Oliveira et al., 2009).

Observando-se as Tabelas 3 e 4, 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 geostatística.

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^{3+} .

Os gráficos dos Histogramas de Frequência, Curvas de Probabilidade Normal e BoxPlot, para os atributos do solo estudados na área de recarga, contidos em Apêndices nas Figuras 16 a 36, 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).

Tabela 3. Análise estatística descritiva dos atributos físicos do solo na área de recarga de microbacia.

Atributos	Areia ----- (%)	Silte ----- (%)	Argila ----- (%)	D _s (g cm ⁻³)	D _p (g cm ⁻³)	VTP (%)	θ _{CC} (%)	θ _{PMP} (%)	PD (%)	DTA (mm/cm)	CTA (mm)
μ	63,74	15,53	20,73	1,47	2,43	39,51	24,70	14,92	14,81	0,98	19,56
η	66,15	16,80	17,18	1,44	2,42	38,24	23,62	13,40	17,08	0,91	18,28
σ	17,56	7,90	12,33	0,16	0,13	4,89	8,19	6,38	8,90	0,29	5,75
CV	27,55	50,87	59,48	10,90	5,35	12,38	33,13	42,73	60,07	29,39	29,39
V _{max}	85,25	32,51	47,36	1,76	2,65	49,57	38,25	28,51	28,56	1,57	31,37
V _{mín}	29,46	6,11	7,91	1,16	2,25	30,80	13,31	4,22	0,34	0,58	11,65
Cur	-0,67	-0,66	-0,13	-0,31	-1,16	-0,05	-1,25	0,05	-1,26	-0,31	-0,31
Ass	-0,69	0,48	1,04	-0,04	0,13	0,55	0,32	0,71	-0,13	0,75	0,75

Média (μ), mediana (η), valor máximo e mínimo (V_{max} e V_{mín}), desvio padrão (σ), coeficientes de variação (CV), assimetria (Ass) e curtose (Cur).

Tabela 4. Análise de estatística descritiva dos atributos químicos do solo na área de recarga de microbacia.

Atributos	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	5,48	0,49	16,98	2,92	50,33	1,91	3,88	137,44	0,21	5,39
η	5,48	0,45	15,19	2,24	7,17	1,79	1,68	63,24	0,00	3,78
σ	0,67	0,13	7,32	2,30	72,84	1,07	3,51	155,39	0,40	3,38
CV	12,15	26,52	43,10	78,87	144,71	55,95	90,38	113,06	191,96	62,71
V _{max}	6,67	0,95	40,12	8,70	180,78	5,40	13,96	647,49	1,58	12,11
V _{mín}	4,41	0,37	9,02	0,53	4,28	0,77	1,68	28,88	0,00	1,79
Cur	-1,13	7,66	4,49	1,37	-0,49	5,23	2,20	5,26	7,17	-0,57
Ass	0,11	2,56	1,92	1,45	1,22	1,94	1,64	2,13	2,55	0,85

Média (μ), mediana (η), valor máximo e mínimo (V_{max} e V_{mín}), desvio padrão (σ), coeficientes de variação (CV), assimetria (Ass) e curtose (Cur).

As análises exploratórias dão uma ideia sobre a adequação, ou não, dos dados experimentais a uma distribuição normal. Porém, só é possível atestar a real normalidade, ou não, por meio de teste de aderência à normalidade, como os de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk. As Tabelas 5 e 6 apresentam os resultados desses testes (Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk) para os atributos físicos e químicos do solo, sendo o teste de Shapiro-Wilk o mais recomendado, pois a amostra possui menos de 50 observações (Lawles, 1982; Maroco, 2007).

Os testes de normalidade são utilizados para determinar se um conjunto de dados de uma dada variável aleatória é bem modelado por uma distribuição normal ou não, ou para calcular a probabilidade da variável aleatória subjacente estar normalmente distribuída. Através do *p-value*, encontrado após a aplicação do teste, é possível saber a probabilidade de ocorrerem valores da estatística específica daqueles testes mais extremos que o observado, supondo a hipótese nula verdadeira. Se o *p-value* for menor que o nível de significância, então a hipótese nula é rejeitada. Em outras palavras, o *p-value* corresponde ao menor nível de significância que pode ser assumido para rejeitar a hipótese nula. Sendo assim, há significância estatística quando o *p-value* é menor que o nível de significância adotado (Sampaio, 2013).

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. Entretanto, Folegatti (1996) relata que para o ajuste de semivariogramas, a normalidade dos dados não é necessária, mas desejável. Caso a distribuição não seja normal, mas seja razoavelmente simétrica, podem-se admitir as hipóteses necessárias à construção do semivariograma.

Conforme os resultados expostos na Tabela 5, 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), onde o *p-value* é menor que 0,05 a hipótese de nulidade (H_0) é rejeitada, ou seja, os dados não apresentam normalidade, conforme descreve Oliveira et al.(2009).

Tabela 5. Testes de normalidade, Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para os atributos físico-hídricos do solo.

Atributos	----- Kolmogorov-Smirnov -----			----- Shapiro-Wilk -----	
	p-value	p-lilliefors	K-S	p-value	W
Areia	0,20	0,10	0,17967	0,0612*	0,90906
Silte	0,20	0,10	0,17973	0,0602*	0,90869
Argila	0,20	0,01	0,24161	0,0061 ^{NS}	0,85369
Ds	0,20	0,20	0,12065	0,9369*	0,98022
Dp	0,20	0,20	0,13409	0,1859*	0,93420
VTP	0,20	0,20	0,14592	0,2499*	0,94095
θ_{CC}	0,20	0,05	0,19758	0,1041*	0,92111
θ_{PMP}	0,20	0,20	0,16132	0,2647*	0,94228
P_d	0,20	0,20	0,14935	0,2355*	0,93958
DTA	0,20	0,20	0,13068	0,1025*	0,92076
CTA	0,20	0,20	0,13068	0,1025*	0,92076

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

Já para os dados dos atributos químicos do solo (Tabela 6), apenas para o atributo pH o *p-value* indicou que seus 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 químicos do solo.

Atributos	----- Kolmogorov-Smirnov -----			----- Shapiro-Wilk -----	
	p-value	p-lilliefors	K-S	p-value	W
pH	0,20	0,20	0,11660	0,6175*	0,96358
CE	0,15	0,01	0,24891	0,0001 ^{NS}	0,71158
MO	0,10	0,01	0,27046	0,0014 ^{NS}	0,81459
Ca^{2+}	0,20	0,05	0,20789	0,0021 ^{NS}	0,82481
Na^+	0,01	0,01	0,36136	0,0000 ^{NS}	0,61640
Mg^{2+}	0,20	0,15	0,16769	0,0020 ^{NS}	0,82329
P	0,05	0,01	0,33478	0,0000 ^{NS}	0,69671
K^+	0,10	0,01	0,26604	0,0001 ^{NS}	0,71949
Al^{3+}	0,05	0,01	0,32537	0,0000 ^{NS}	0,60272
SB	0,20	0,05	0,22596	0,0092 ^{NS}	0,86401

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

Nas Tabelas 7 e 8, apresentam-se os resultados das análises geoestatísticas para os atributos do solo, onde é possível observar os valores do efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C), alcance (A) e grau de dependência espacial (GD) dos atributos físicos e químicos do solo para os modelos testados (exponencial, esférico e gaussiano) pela máxima verossimilhança.

Empregando-se a escala de dependência espacial determinada por Cambardella et al. (1994), verificou-se que, para todos os semivariogramas obtidos, exceto para o atributo DTA no modelo exponencial e CTA no modelo gaussiano, 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.

Conforme 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.

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 para os atributos físico-hídricos, foram o esférico e exponencial, sendo o gaussiano o que menos se adequou. 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. Para os atributos químicos do solo, os três modelos matemáticos dos semivariogramas teóricos testados (exponencial, esférico e gaussiano), se adequaram aos dados dos semivariogramas experimentais.

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 7 e 8, 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 área de recarga. Esses resultados mostram que os alcances apresentaram valores bem variados, porém

semelhantes entre os atributos físico-hídrico e químico do solo. No entanto, a amplitude entre os valores máximo e mínimo dos alcances foi maior para os atributos físico-hídricos do solo, variando de 840,00 a 7110,00 metros, quando comparados aos atributos químicos do solo (que variaram de 1288,65 a 5064,00 metros).

Tabela 7. 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	20,20	327,50	2820,00	6,17
	Esférico	16,70	326,10	2630,00	5,12*
	Gaussiano	39,60	325,90	2235,35	12,15
Silte	Exponencial	7,20	65,83	2700,00	10,94
	Esférico	3,00	65,56	2510,00	4,58*
	Gaussiano	7,90	65,58	2147,74	12,05
Argila	Exponencial	7,60	150,90	840,00	5,04
	Esférico	0,10	151,00	1490,00	0,07*
	Gaussiano	9,90	150,90	1091,19	6,56
Ds	Exponencial	0,00001	0,0289	1716,00	0,034*
	Esférico	0,00001	0,0272	1227,00	0,037
	Gaussiano	0,00001	0,0284	1094,66	0,035
Dp	Exponencial	0,00001	0,0204	3834,00	0,049*
	Esférico	0,00001	0,0190	2724,00	0,053
	Gaussiano	0,00001	0,0188	2000,52	0,053
VTP	Exponencial	0,010	24,09	1560,00	0,042
	Esférico	0,010	23,94	1270,00	0,042
	Gaussiano	0,010	24,29	1108,51	0,041*
θ_{CC}	Exponencial	0,10	81,14	4470,00	0,123*
	Esférico	0,10	73,46	2900,00	0,136
	Gaussiano	2,40	71,96	2061,14	3,34
θ_{PMP}	Exponencial	5,20	42,89	2130,00	12,12
	Esférico	1,20	41,84	1700,00	2,87*
	Gaussiano	4,40	41,87	1454,92	10,51
Pd	Exponencial	6,80	83,60	3150,00	8,13
	Esférico	4,60	78,52	2200,00	5,86
	Gaussiano	4,50	78,88	1784,01	5,70*
DTA	Exponencial	0,0328	0,1096	7110,00	29,93
	Esférico	0,0049	0,0866	2170,00	5,66*
	Gaussiano	0,0128	0,0875	1887,94	14,63
CTA	Exponencial	7,80	40,45	4680,00	19,28
	Esférico	2,00	34,86	2170,00	5,74*
	Gaussiano	20,53	41,07	4416,73	49,99

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 químicos do solo.

Atributo	Modelo	C_0	$C_0 + C$	A (m)	$GD=(C_0/C_0+C) \times 100$ (%)
pH	Exponencial	0,001	0,483	1758,00	0,2070*
	Esférico	0,035	0,469	1569,00	7,4627
	Gaussiano	0,032	0,472	1288,65	6,7797
CE	Exponencial	0,00001	0,02052	2553,00	0,0487*
	Esférico	0,00001	0,01982	2004,00	0,0505
	Gaussiano	0,00001	0,02012	1690,48	0,0497
MO	Exponencial	0,10	61,02	2439,00	0,1639*
	Esférico	2,80	58,95	2051,00	4,7498
	Gaussiano	5,30	59,23	1676,63	8,9482
Ca	Exponencial	0,20	7,409	5064,00	0,0027
	Esférico	0,01	7,763	4004,00	0,0001*
	Gaussiano	0,01	7,624	2946,22	0,0001*
Na	Exponencial	0,010	5,049	2760,00	0,000198
	Esférico	0,010	5,128	2640,00	0,000195
	Gaussiano	0,010	5,165	2113,10	0,000193*
Mg	Exponencial	10,00	5145,00	2130,00	0,1944
	Esférico	10,00	5188,00	2180,00	0,1928
	Gaussiano	10,00	5196,00	1732,05	0,1925*
P	Exponencial	0,010	11,20	1755,00	0,0893
	Esférico	0,010	11,07	1614,00	0,0903
	Gaussiano	0,010	11,22	1357,93	0,0891*
K	Exponencial	1380,00	24030,00	2010,00	5,7428
	Esférico	640,00	23720,00	1780,00	2,6981*
	Gaussiano	1440,00	23760,00	1506,88	6,0606
Al	Exponencial	0,0105	0,1590	2820,00	6,6038
	Esférico	0,0049	0,1568	2390,00	3,1250*
	Gaussiano	0,0114	0,1568	1991,86	7,2704
SB	Exponencial	0,010	11,04	2640,00	0,0906
	Esférico	0,010	11,16	2520,00	0,0896*
	Gaussiano	0,010	11,13	1922,58	0,0898

5.4 MAPEAMENTO DOS ATRIBUTOS DO SOLO

Nas Figuras 10 a 12 são apresentados os mapas da variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos: teor de areia, silte e argila; densidade do solo (Ds); densidade de partícula (Dp); disponibilidade total de água (DTA); capacidade total de água no solo (CTA); volume total de poros (VTP); umidade na capacidade de campo (θ_{CC}); umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e porosidade drenável (PD); e os atributos químicos: potencial hidrogeniônico (pH); condutividade elétrica (CE); matéria orgânica (MO); cálcio (Ca^{2+}); magnésio (Mg^{2+}); sódio (Na^+); potássio (K^+); fósforo (P); alumínio (Al^{3+}) e soma de bases (SB), que foram obtidos por meio de Krigagem dos dados.

Comparando o mapa de densidade do solo (Ds) (Figura 10d) com o de matéria orgânica (MO) (Figura 13c) na área de recarga 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 11c); DTA (Figura 11b); VTP (Figura 11d); θ_{PMP} (Figura 12b) e θ_{CC} (Figura 12a).

Analisando-se o mapa referente a MO (Figura 13c), percebe-se uma maior concentração desse atributo em área preservada, onde há condições favoráveis ao acúmulo de serapilheira, fato que promove a redução da Ds e da CTA e aumento do VTP, possibilitando condições favoráveis à recarga. Moraes et al. (2003) relata que a presença de matéria orgânica é de suma importância, pois atenua o impacto das gotas de chuva, evitando a compactação e o salpicamento do solo (que ocasiona o selamento superficial), altera a distribuição de poros, facilita a infiltração e conseqüentemente cria condições favoráveis de recarga dos aquíferos.

Ainda relacionando a serapilheira ao teor de MO no solo, corrobora com essa correlação o mapa da Figura 5 (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para o período de estiagem, Novembro de 2015), onde se percebe que áreas com menores valores de NDVI coincidem com áreas de maiores teores de MO (Figura 13c). Ou seja, áreas onde ocorreram maiores perdas de folhas da vegetação, que é predominantemente de plantas caducifólias, também apresentaram maiores valores de MO, reforçando o papel da serapilheira para manutenção das boas características físicas e químicas do solo, uma vez que a MO também tem papel fundamental da fertilização dos mesmos.



Fonte: Acervo do pesquisador (2015).

Figura 9. Ilustração da vegetação caducifolia com formação de serrapilheira na área de recarga.

Para Stevenson (1994), a quantidade de água armazenada no solo é influenciada pelo teor de matéria orgânica, a mesma pode reter até 20 vezes sua massa em água, tornando-se um atributo extremamente importante principalmente para a região semiárida, que possui elevado déficit hídrico, pois favorece o controle de perdas de água por evaporação, além de regular a temperatura e manter a atividade biológica do solo (Silva & Mendonça, 2007).

Rawls et al. (2003) afirma que em virtude do teor e da composição da MO influenciarem na estrutura e propriedades absortivas do solo, as diversas práticas de usos agrícolas alteram o teor de MO e conseqüentemente, a retenção de água.

Verifica-se que a D_s na área de recarga varia de $1,20 \text{ g cm}^{-3}$ a $1,76 \text{ g cm}^{-3}$ (Figura 10d), 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, vilarejos e agricultura (Figura 10d). 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.

De acordo com Junqueira Júnior (2006), atributos como a densidade do solo e o teor de matéria orgânica herdaram influência do manejo empregado no uso e ocupação solo. Por isso, tais atributos podem ser considerados bons indicadores das condições de uso, ocupação e equilíbrio dos recursos presentes nas áreas de recarga.

A distribuição espacial do atributo VTP na área de recarga é apresentada pela Figura 11d, seus valores não apresentam grande variação, estando entre 39,5 a 41,5%. Fazendo-se

associação da distribuição do VTP com Ds, MO e CTA, nota-se grande relação entre estes, principalmente na região central da área de recarga, que onde há menor Ds observa-se uma maior MO, VTP e CTA, visto que a matéria orgânica proporciona uma melhor estruturação e maior retenção de água no solo.

Na Figura 12c apresenta-se a distribuição espacial da porosidade drenável (PD), nela observa-se que os maiores valores de PD são encontrados na região periférica da área de recarga, situada a barlavento, exatamente nas áreas próximas as localizações das nascentes. O comportamento espacial do teor de Areia (Figura 10a) também foi semelhante ao comportamento da PD, ou seja, onde ocorreram maiores valores de PD também ocorreram maiores valores do teor de Areia. Esse fato pode ser explicado pela predominância de latossolos na área de estudo, pois os mesmos 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 10a, 10b e 10c, respectivamente. Essas frações apresentaram variabilidade espacial na área, sendo seus teores entre 84 e 28%; 32 e 4% e 48 e 6%, respectivamente.

Confrontando esses mapas, nota-se que, nas áreas com elevados teores percentuais de areia, apresentaram menores teores de silte e argila, confirmando a relação inversa desses atributos. Os maiores percentuais de areia foram registrados nas regiões periféricas a nordeste, leste e sudeste da área da zona de recarga estudada, exatamente nas proximidades das localizações das nascentes. É conhecido que, solos com textura arenosa apresentam predominância dos macroporos, que por sua vez, induzem a uma elevada capacidade de infiltração e uma baixa possibilidade de retenção de água, facilitando as recargas dos aquíferos. Este fato é facilmente percebido para área de estudo por meio do mapa de VTP e PD (Figuras 11d e 12c).

Em relação aos teores das frações silte e argila, verifica-se que, as maiores concentrações ocorreram nas regiões de menores altitudes (noroeste, oeste e sudoeste) da zona de recarga estudada. Isso, possivelmente, se deve ao carreamento desses sedimentos, mais leves em relação a areia, das partes mais elevadas para as partes mais baixas da área, originando o acúmulo destas partículas. Ao contrário dos solos arenosos, solos com textura argilosa são constituídos principalmente por microporos, onde a velocidade de infiltração é

menor, porém, há uma maior retenção de água nessas camadas mais superficiais do solo, fato que pode reduzir as recargas nos aquíferos. Este fato é facilmente percebido para área de estudo por meio dos mapas de CTA e DTA (Figuras 11c e 11b). Além disso, essas características argilosas do solo podem favorecer uma maior retenção de água acima da superfície do mesmo, o que torna essas áreas propícias à construção de estruturas hidráulicas de armazenamento de águas superficiais, como barreiros, açudes e barragens. O mapa de uso e ocupação do solo na área de recarga estudada, da Figura 8, corrobora com essa afirmação, visto que é possível visualizar 13 reservatórios nas regiões de solos mais argilosos e nenhum nas regiões de solos mais arenosos.

A densidade de partículas (D_p), Figura 11a, é um atributo inerente ao solo e sua variação ocorre em razão da mineralogia e do teor de matéria orgânica, na área de recarga esse atributo também possui variação espacial, com valores entre 2,64 e 2,24 g cm⁻³. Os maiores valores são encontrados na região periférica da área de recarga próximo as nascentes, justamente onde se observa uma maior concentração de areia, mostrando a influência dessa fração na D_p do solo. Ferreira (2010), relata que 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.

As espacializações (krigagem) dos atributos químicos estudados na área de recarga encontram-se dispostos da seguinte forma: pH - Figura 13a; CE - Figura 13b; MO - Figura 13c; Ca²⁺ - Figura 13d; Mg²⁺ - Figura 14a; Na⁺ - Figura 14b; K⁺ - Figura 14c; P - Figura 14d; Al³⁺ - Figura 15a; SB - Figura 15b.

O pH do solo indica se a reação nele é ácida, neutra ou alcalina, a escala varia de 0 a 14, sendo que um valor de pH igual a 7 indica que ele é neutro, acima e menor que 7 indica pH alcalino e ácido, respectivamente (Melo, 2013). O mesmo influencia, de forma indireta, o desenvolvimento das culturas, evidenciado pelas mudanças na solubilidade dos elementos essenciais e tóxicos existentes no solo, alterando a disponibilidades dos mesmos, e a atividade e diversidade de microrganismos do solo (Chaves, 2006).

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 área estudada onde os valores de pH variaram de 6,2 a 4,2 (Figura 13a), evidenciando a presença de alumínio.

Confrontando os mapas de alumínio (Figura 15a) com o do pH (Figura 13a), percebe-se aumento do teor de Alumínio em locais onde os solos apresentaram uma forte acidez potencial, comportamento natural conforme descrito por Portugal et al. (2010).

Conforme Coelho (1973), outra causa da acidez é o cultivo intensivo, 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 dessas bases trocáveis, ficando em seu lugar íons de hidrogênio. A erosão também pode ser outra causa, 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.

Outro comportamento que chama atenção na variação espacial dos atributos químicos do solo, foi o fato de oito, dos dez, atributos estudados (Mg^{2+} , K^+ , P, Ca^{2+} , Na^+ , Al^{3+} , CEes e SB) apresentarem maiores valores coincidentes com algumas regiões de altitudes mais baixas, provavelmente em função do carreamento e acúmulo desses elementos nessas áreas. 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 1) 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.

Ainda em relação aos atributos químicos do solo, verificou-se que nas áreas de recarga, onde há predominância de textura arenosa, apresentaram menores valores para todos os nutrientes lixiviáveis, inclusive para a SB e CEes. Ou seja, a boa drenagem (verificada nos mapas de VTP e PD, Figuras 11d e 12c, respectivamente) e a elevada altitude, comparada as demais áreas da zona de recarga estudada (mapa da Figura 1), favoreceram a lixiviação e o carreamentos desses atributos. Outro ponto que explica esse comportamento são as características dos latossolos, que 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).

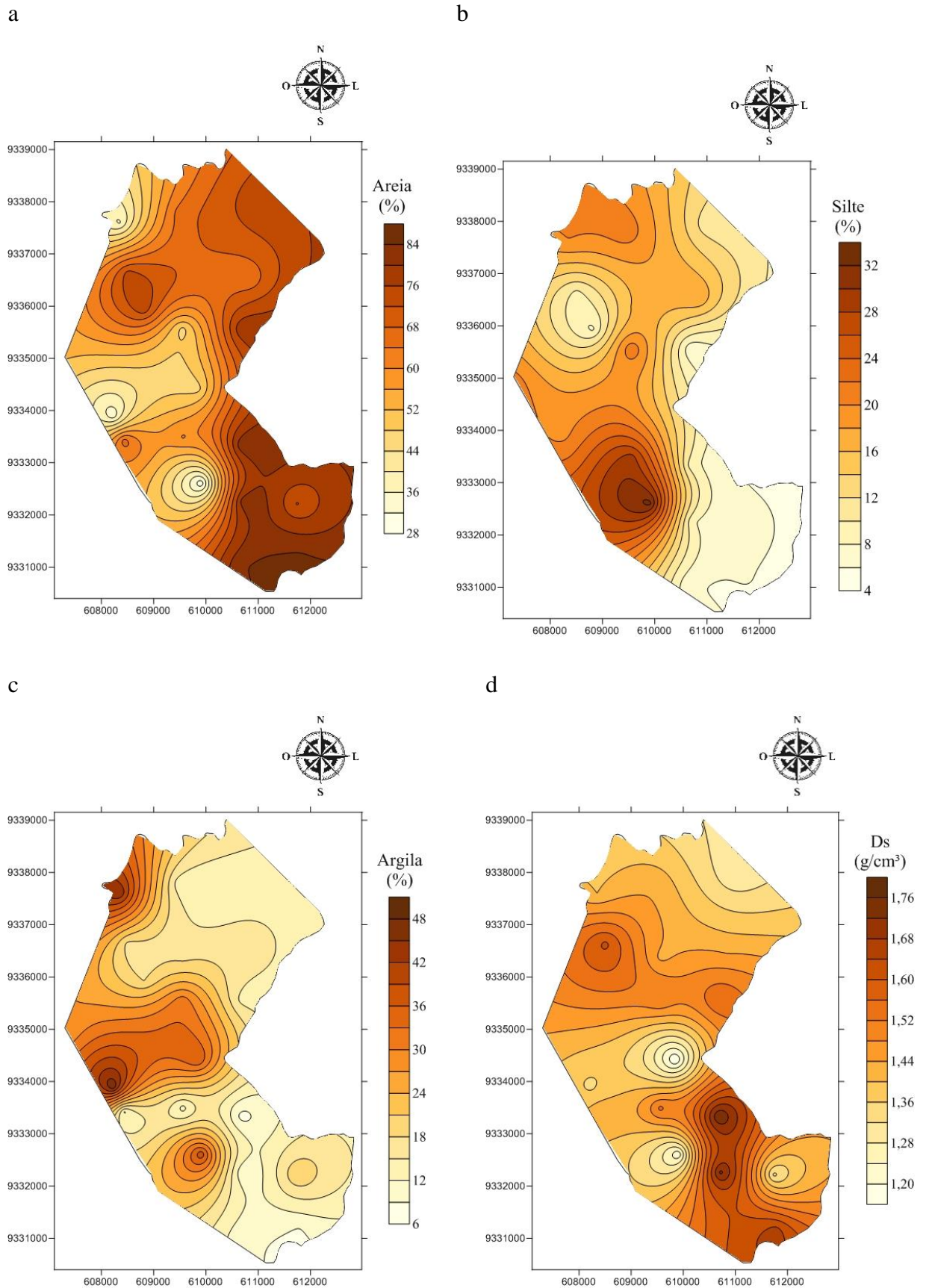


Figura 10. Mapas da variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo: (a) Areia, (b) Silte, (c) Argila e (d) D_s .

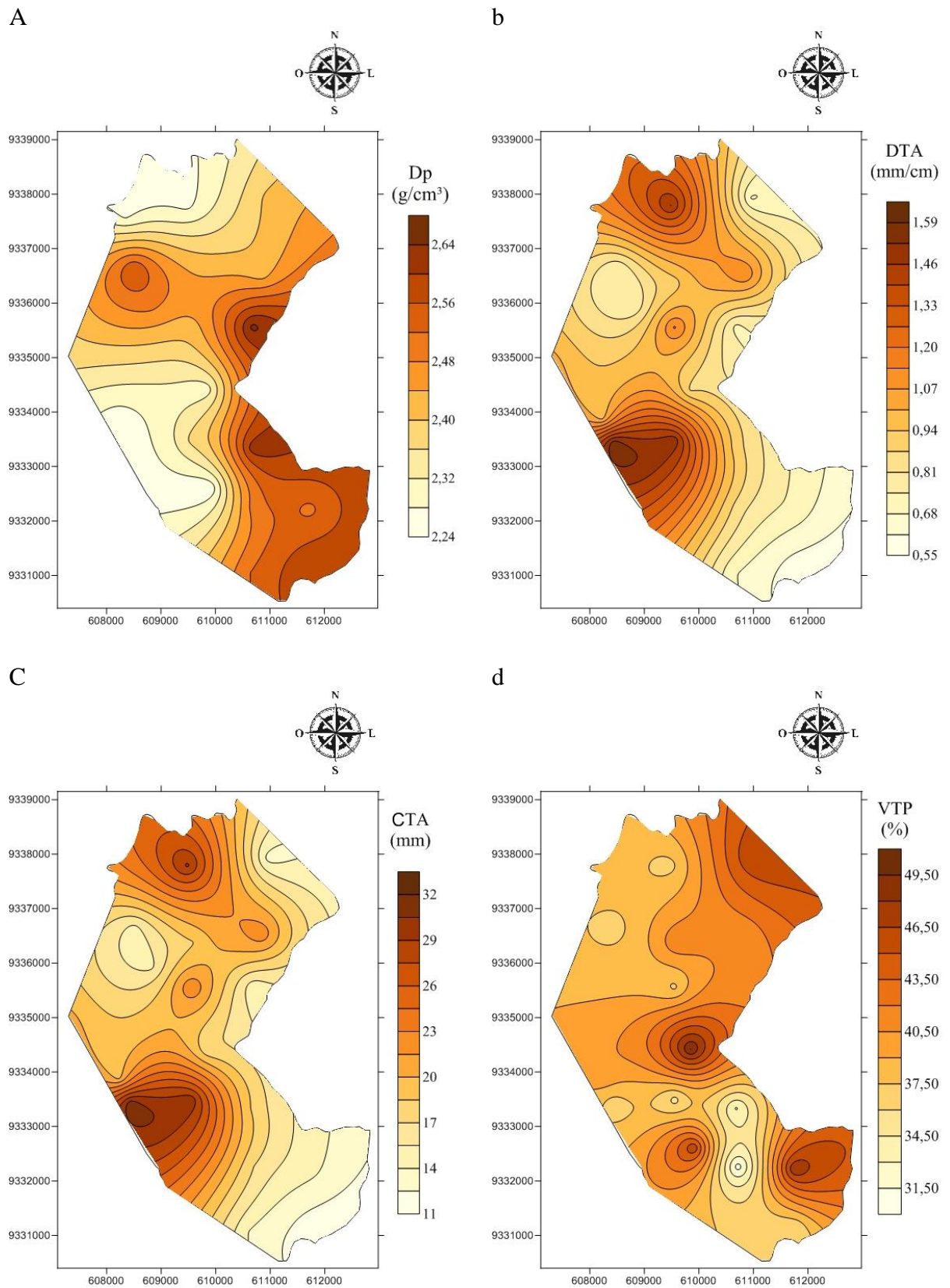


Figura 11. Mapas da variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo: (a) D_p , (b) DTA, (c) CTA e (d) VTP.

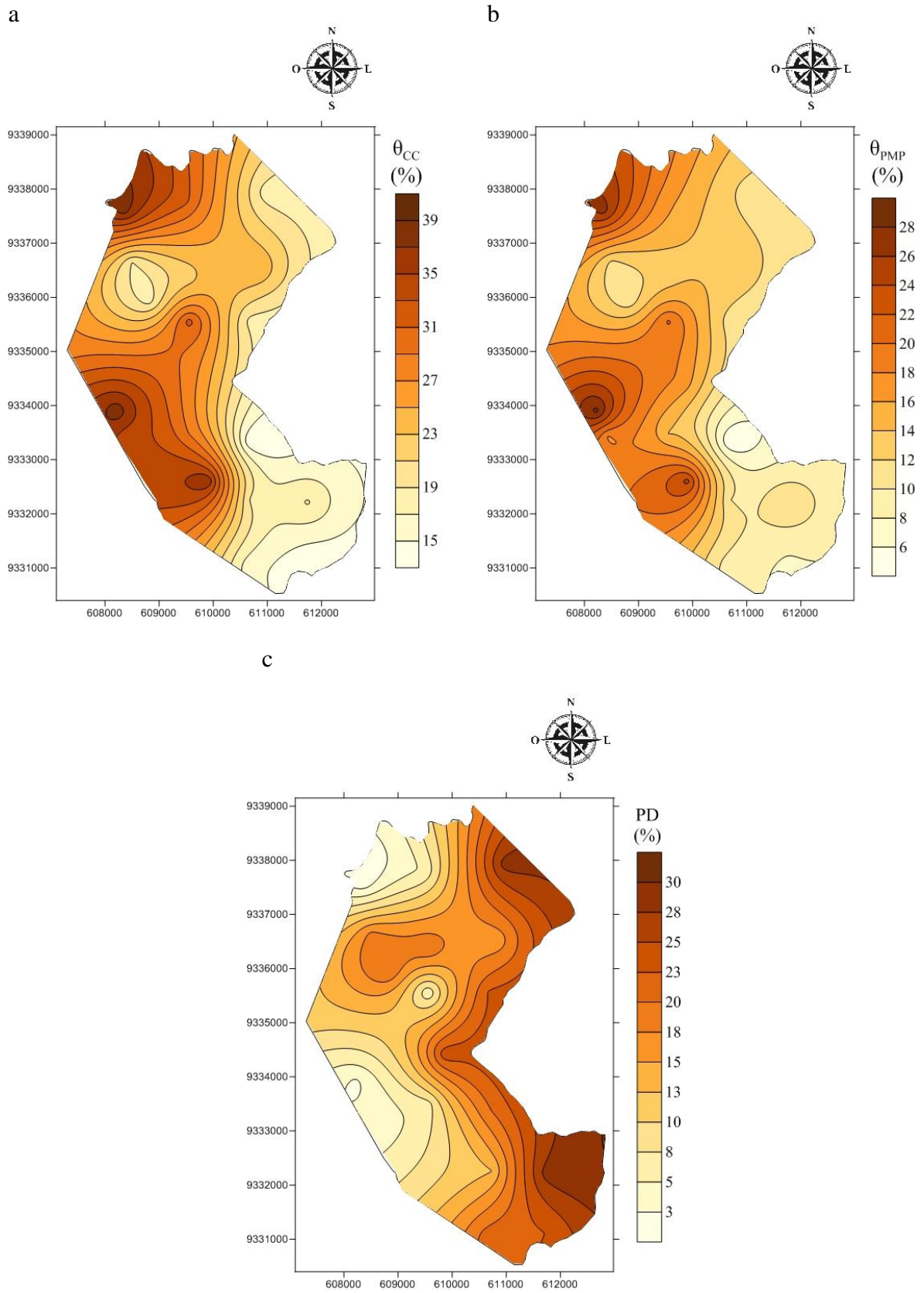


Figura 12. Mapas da variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo: (a) θ_{PMP} (b) θ_{CC} e (c) PD.

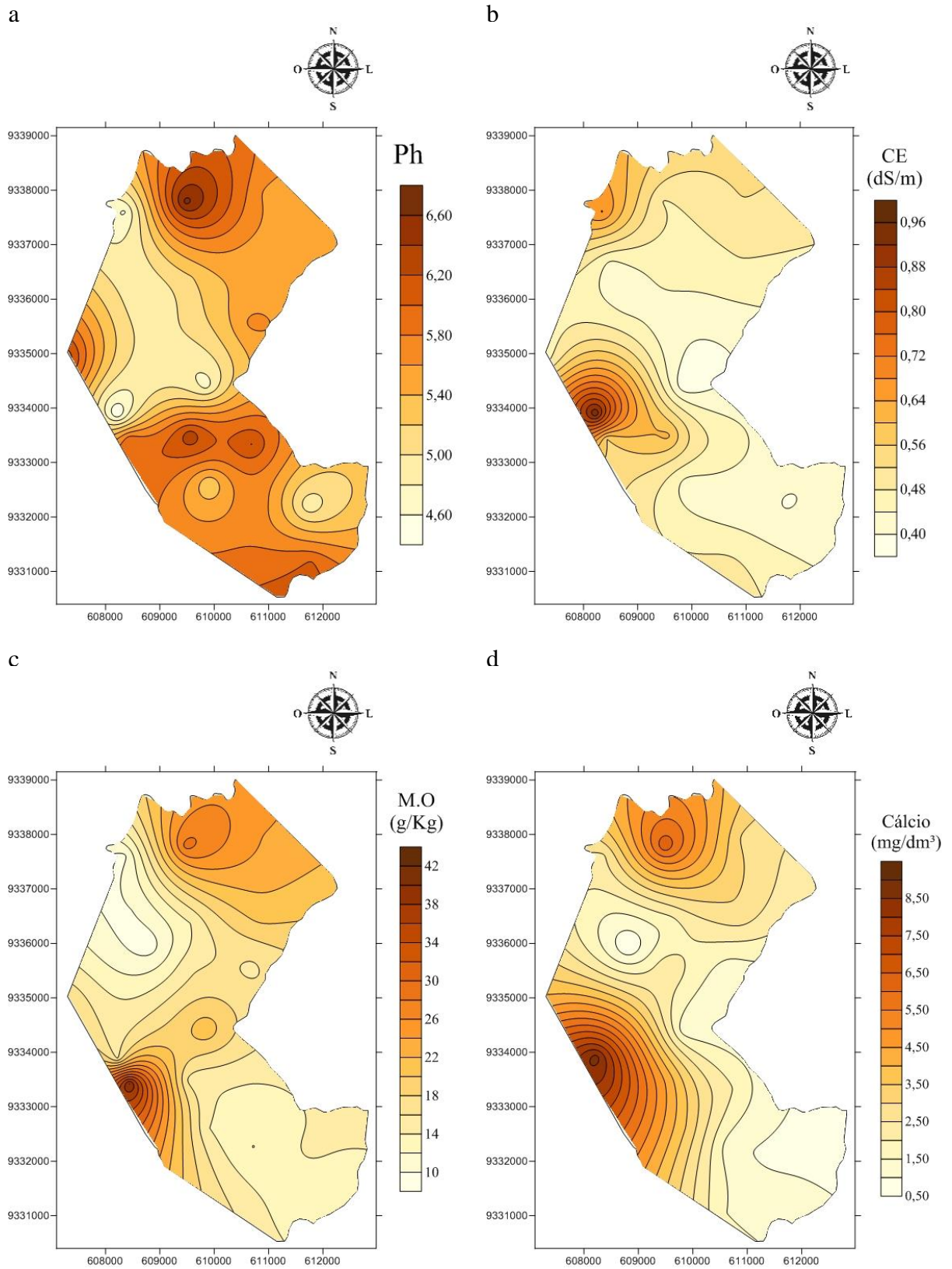


Figura 13. Mapas da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo: (a) pH, (b) CE_{es}, (c) MO e (d) Ca²⁺.

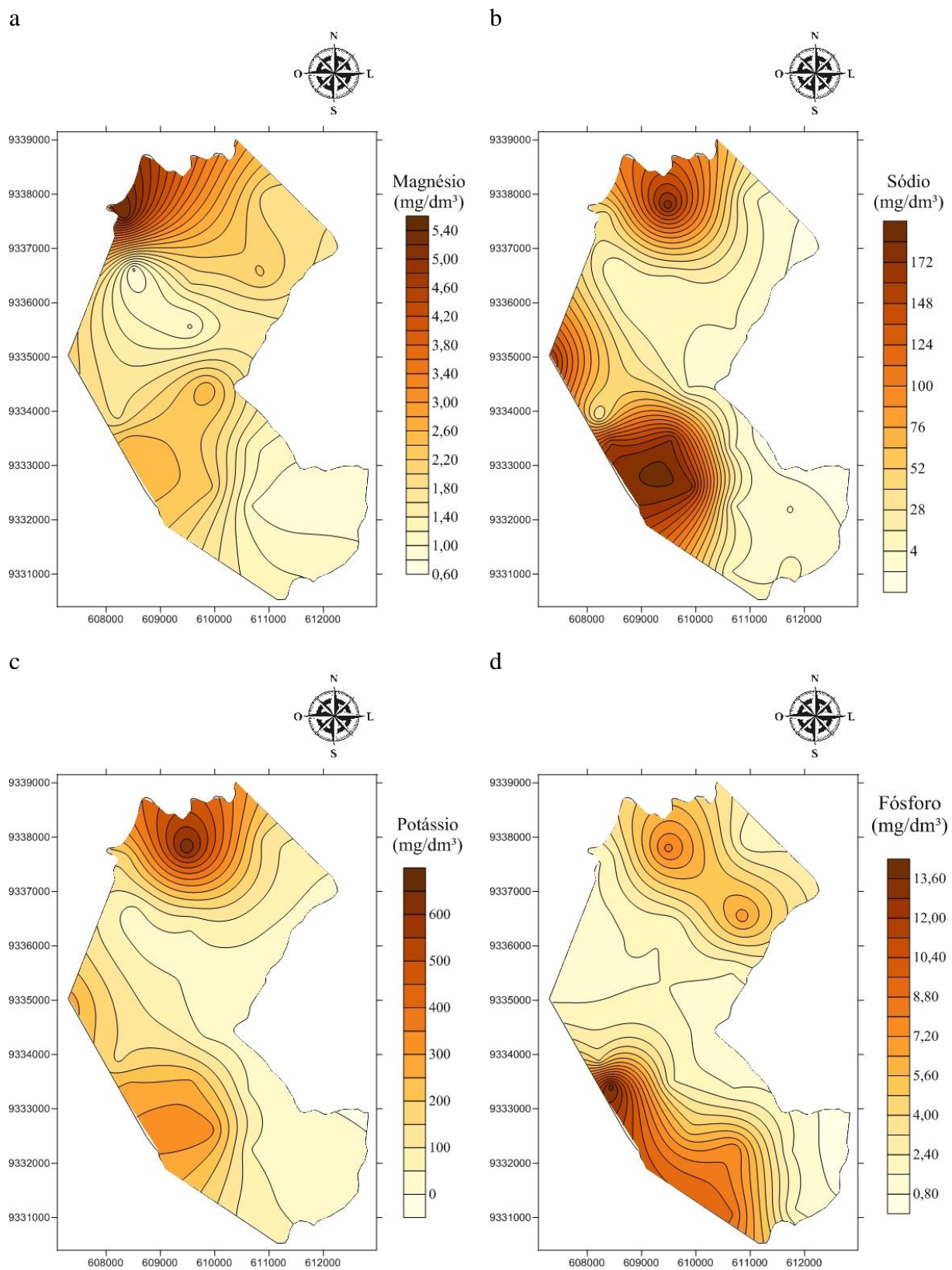


Figura 14. Mapas da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo: (a) Mg^{2+} , (b) Na^+ , (c) K^+ e (d) P.

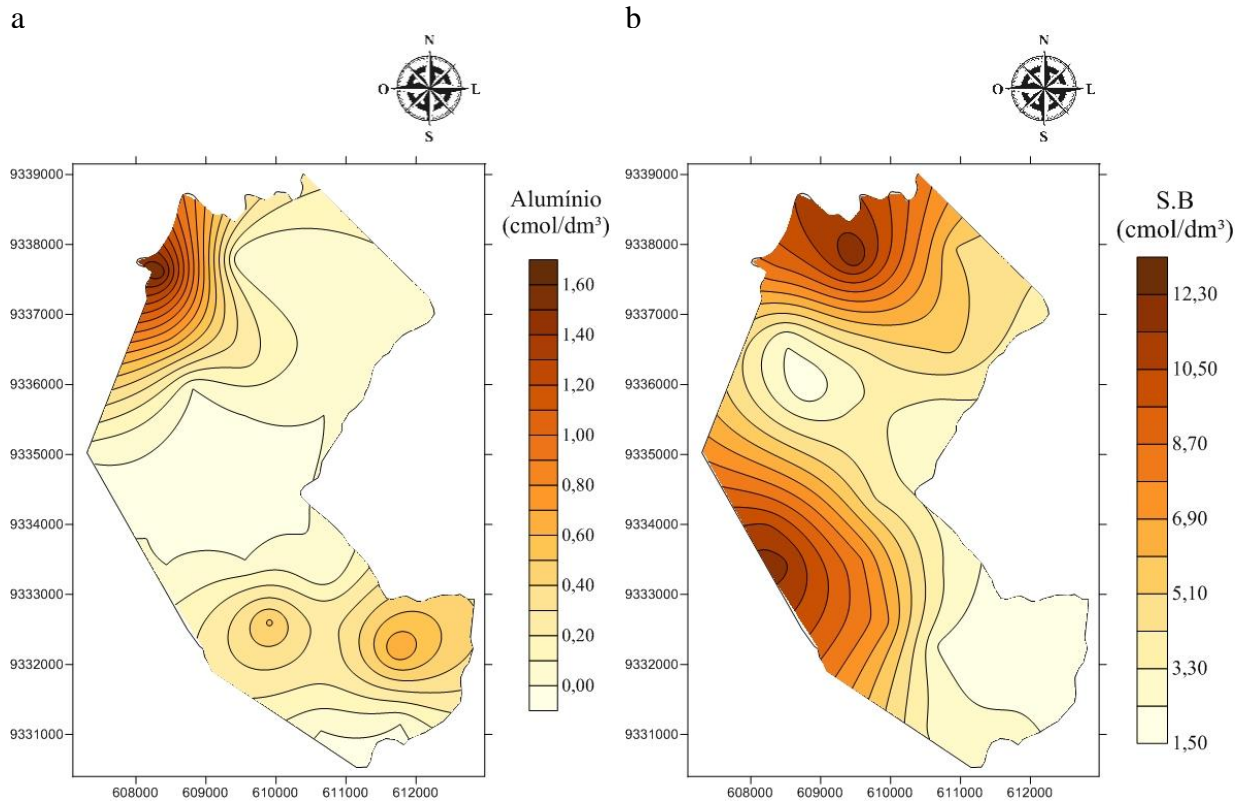


Figura 15. Mapas da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo: (a) Al^{3+} e (b) S.B.

6 CONCLUSÕES

A utilização da geoestatística foi adequada para a mensuração da dependência espacial dos atributos do solo numa área de recarga, sendo os modelos teóricos, exponencial e esférico, os que apresentaram melhores resultados para os atributos físico-hídricos, já para os atributos químicos do solo os três modelos testados (exponencial, esférico e gaussiano), se adequaram aos dados dos semivariogramas experimentais. 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 na área de recarga.

A característica caducifólia da caatinga presente na área de recarga, associada à 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 área de recarga em resposta a pluviosidade.

A topografia e o relevo da área de recarga 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 áreas de recarga, além de contribuírem de forma primorosa para o planejamento racional do uso e ocupação do solo.

REFERÊNCIAS

- Abelardo A. A. Montenegro & Suzana M. G. L. Montenegro. Recursos Hídricos em Regiões Áridas e Semiáridas. Campina Grande: INSA- Instituto Nacional do Semiárido, 2011. 440 p. ISBN 978-85-64265-011. In: Olhares sobre as políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido. Disponível em: <www.insa.gov.br/wpcontent/themes/insa.../recursos-hidricos-//.pdf>. Acesso em: 24 de janeiro. 2016.
- Agência Nacional de Águas (ANA). 2005a. Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil. Brasília. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/sprtew/recursoshidricos.asp>>
- Agência Nacional de Águas (ANA). 2005b. Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil. Brasília. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/sprtew/recursoshidricos.asp>>
- 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/CONT000g05ip3qr0wx5ok0q43a0r3t5vjo4.html>. Acesso em: 26 Jan. 2016.
- Alvarenga, C. R.; Costa, L. M.; Moura Filho, W.; Regazzi, A. J. Crescimento de raízes de leguminosas e camadas de solo compactadas artificialmente. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.20, n.2, p.319-326, 1996.
- Antunes, M. A. H.; Debiasi, P.; Costa, A. R. da & Gleriani, J. M. (2012). Correção Atmosférica de Imagens Alos/Avnir-2 Utilizando o Modelo 6S. Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto ISSN: 1808-0936. Revista Brasileira de Cartografia. No 64/4: 531-539.
- 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.
- Barbosa, C. M. de S; Mattos, A.; Conceitos e diretrizes para recarga artificial de aquíferos. In: XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 12p. 2008. Natal, RN.
- Barros, S. D. S. Aspectos Morfo-Tectônicos nos Platôs de Portalegre, Martins e Santana/RN. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica). Programa de Geodinâmica e Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 1998.
- Barros, F. G. N.; Amin, M. M. Água: um bem econômico de valor para o Brasil e o mundo. Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional (G&DR), v. 4, n. 1, p. 75-108, jan-abr/2008, Taubaté, SP, Brasil.

- Basso, 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 cv. Mott. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.35, n.5, p.1047- 1054, 2000.
- Borghetti, M.R.B.; Borghetti, J.R.; Filho, E.F.R. Aquífero Guarani: a verdadeira integração dos países do Mercosul. Curitiba: Fundação Roberto Marinho/Itaipu Binacional, 2004.
- Borghetti, N.; Borghetti, J. R.; Rosa, E. F. F. Aquífero Guarani – A verdadeira integração dos países do Mercosul. Curitiba, 2004.
- Brainer, M. S. C. P. et. al. Manejo Florestal: uma possibilidade de parceria entre calcinadores e apicultores na Chapada do Araripe (PE). Revista Informe Rural ETENE, Fortaleza, v.6, n.3, nov. 2012. Disponível em:
<http://www.bnb.gov.br/content/aplicacao/etene/etene/docs/ire_ano6_n3.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2016.
- Brito, L. T. L.; Silva, A. S.; Porto, E. R. Disponibilidade de água e a gestão dos recursos hídricos. In: Potencialidades da água de chuva no semi-árido brasileiro. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2007. p. 12-32.
- Camara, G.; Medeiros, J. S.; Geoprocessamento para projetos ambientais. 2ª ed. São José dos Campos, 1998.
- 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.
- Camargo, O. T. de; Alleoni, L. R. F. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. Piracicaba: ESALQ/USP. 1.ed. 1997. 132p.
- 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, F. A.; Lacerda, M. P. C. Monitoring environmental impact of land use: Evaluating an agricultural area of Distrito Federal, Brazil. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v.36, p.25-29, 2006.
- Castro, P. S. Bacias de cabeceira: Verdadeiras caixa d'água da natureza. *Ação ambiental*. Viçosa. V. 1. n. 3. p. 9-11. dez./jan. 1999.
- Chaves, A. A. A.; Lacerda, M. P. C.; Kato, E.; Goedert, W. J.; Ramos, M. L. G. Uso das terras da parte norte da bacia do rio Descoberto, Distrito Federal, Brasil. *Bragantia*, v.69, p.711- 718, 2010.
- Chaves, L. H. G.; Chaves, I. B.; Silva, P. C. M.; Vasconcelos, A. C. F. Variabilidade de propriedades químicas do solo aluvial da Ilha de Picos, *Biologia e Ciências da Terra*, v.6, p.13-19. 2006.
- Chow V.T.; Maidment D.R.; Mays L.W.; *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Publishing Company, 1988.
- Cleary, R., Águas Subterrâneas. In: Associação Brasileira de Recursos Hídricos Engenharia hidrogeológica. Rio de Janeiro: Editora da UFRJ, 1989. Coleção ABRH de Recursos Hídricos
- Novo Código Florestal Brasileiro, Lei Nº 12.651, 2012. Disponível em:
http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm
- Coelho, F. S. Fertilidade do solo. 2. ed. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1973. 384 p.
- Coppin, P.; Jonckheere, I.; Nackaerts, K.; Muys, B.; Lambin, E. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International Journal of Remote Sensing*, v.25, n.9, p.1565-1596, 2004.
- Costa, F. H. dos S.; Souza Filho, C. R. de Risso, A. Análise temporal de NDVI e mapas potenciais naturais de erosão na região do Vale do Ribeira, São Paulo. In. Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto, 13., 2007, Florianópolis. Anais. Florianópolis: INPE, 2007. CD-ROM.
- Costa, C. D. de O.; Alves, M. C.; Sousa, A. de P. Atributos químicos dos solos sob diferentes usos e manejos em uma sub-bacia no noroeste do estado de São Paulo. *Scientia Agraria Paranaensis – SAP*, Paraná, v. 14, n. 2, abr./jun., p. 119-126, 2015.
- 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.

- Cunha, T. J. F.; SÁ, I. B.; Petrere, 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.
- Dias Júnior, M. de S.; Bertoni, J. C.; Bastos, A. R. R. Física do solo: Curso de Pós-Graduação em Solos e Nutrição Mineral de Plantas. Lavras: UFLA, 2000. 147p. Notas de aulas teóricas.
- Diniz, M. T. M.; Medeiros, S. C.; Cunha, C. J. Sistemas atmosféricos atuantes e diversidade pluviométrica em Sergipe. Boletim Goiano de Geografia, Goiânia, v.34, n. 1, p.17-34, jan./abr. 2014. Disponível em:
<<http://www.revistas.ufg.br/index.php/bgg/article/view/29313>>.
Acesso em: 20 jan. 2016.
- 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).
- Eguchi, E. S.; Silva, E. L. da; Oliveira, M. S. de. Variabilidade espacial da textura e da densidade de partículas em um solo aluvial no Município de Lavras, MG. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.6, n.2, p.242-246, 2002.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte, Mapa exploratório – Reconhecimento de solos do município de Portalegre, RN (1:500.000). Recife: EMBRAPA/SUDENE, 1971. Disponível em:
<http://189.124.135.176/monitoramento/monitoramentoboletim1.php>
Acesso em 15 jan. 2016
- 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 fev. 2016.
- Faulin, G. C. Variabilidade espacial do teor de água e sua influência na condutividade elétrica do solo. 2005. 53 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

- Ferreira, G. T. O uso de técnicas geoestatísticas para o mapeamento da vulnerabilidade natural do Aquífero Guarani em área de recarga. Aplicação na região de Ribeirão Bonito-SP. 2014. 97p. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro.
- Ferreira, C. S. Avaliação temporal do uso e ocupação das terras na Bacia do São Bartolomeu, DF. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária/UnB, 2006. 115p. Dissertação Mestrado
- 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.
- Folegatti, M.V. Estabilidade temporal e variabilidade espacial da umidade e do armazenamento de água em solo siltoso, 1996. Piracicaba, 84p. Tese (Livre - Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- 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)- UFPA, Lavras, MG.
- 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.
- Guerra. A. J. T.; Cunha. S. B.(Org.) Geomorfologia e Meio Ambiente. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2000. 372p.
- Guimarães, A. P. Dinâmica da resposta espectral da vegetação de caatinga na bacia hidrográfica do açude Soledade, utilizando técnicas de sensoriamento remoto. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba. Areia, 2009.
- Hirata, R, Zobbi, J., Fernandes, A. & Bertolo, R. 2006. Hidrogeología del Brasil: una breve crónica de las potencialidades, problemática y perspectivas. Boletín Geológico y Minero 217(1): 25-36.
- Hurtado, A.L.B. Variabilidade da condutividade hidráulica do solo em valores fixos de umidade e de potencial matricial. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2004. 94p. (Tese de Doutorado)
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico: Tabela 5 - Distritos, total e abastecidos, por tipo de captação, segundo as Grandes Regiões, Unidades da Federação, Regiões Metropolitanas e Municípios das Capitais 2000a
Disponível em:

http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaoadevida/pnsb/abastecimento_d_e_agua/abagua05.shtm. Acesso em: 20 janeiro 2016.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico Tabela 2 - Distritos, total e sem rede geral de abastecimento de água, por principal solução alternativa, segundo as Grandes Regiões, Unidades da Federação, Regiões Metropolitanas e Municípios das Capitais. 2000b Disponível em:

http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaoadevida/pnsb/abastecimento_d_e_agua/abagua02.shtm. Acesso em: 20 janeiro 2016.

Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do RN. Perfil do Seu Município: Portalegre. 2008. Disponível em:

<http://adcon.rn.gov.br/ACERVO/idema/DOC/DOC000000000013907.PDF>

Acesso em: 26 jan. 2016

Jarbas, T.; SÁ, I. B.; Petreire, V. G.; Taura; T. A. Agencia Embrapa de Informação Tecnológica - AGEITEC. Disponível em:

<https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/bioma_caatinga/arvore/CONT000g5twggzh02wx5ok01edq5scvvo0oy.html>. Acesso em: 26 Jan. 2016.

Jarlan, A. B.; Mangiarotti, A. B.; Mougin, A.; Mazzega, C. D.; Hiernaux, A.; Dantec, A. Assimilation of SPOT/VEGETATION NDVI data into a Sahelian vegetation dynamics model. *Remote Sensing of Environment*. New York, v. 112, n. 4, p. 1381-1394, Apr. 2008.

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.

Junqueira Júnior, J. A.; de Mello, C. R.; da Silva, A. M.; Comportamento hidrológico de duas nascentes associadas ao uso do solo numa sub-bacia hidrográfica de cabeceira. In: XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 15p. 2010. São Luís, MA.

Journel, A. G.; Huijbregts, C. J. *Mining geostatistics*. London: Academic Press, 1991. 600 p.

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.
- Loyola, J.M.T.; Prevedello, C.L. Modelos analíticos para predição do processo da redistribuição da água no solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 27, p. 783-787, 2003.
- Macedo, J. R.; Otonni Filho, T. B.; Meneguelli, N. A. Variabilidade de características físicas, químicas e físico-hídricas em solo Podzólico Vermelho-Amarelo de Seropédica, RJ. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.33, p.2043-2053, 1998.
- Magalhães, P. C. O custo da água gratuita. In: Ciência Hoje, v. 36, nº 211, 2004, p.45-49.
- Maia, A. P. A. Gestão de recursos hídricos em Pernambuco: o comitê de Bacia Hidrográfica do Rio Pirapama. Dissertação (Mestrado em Gestão e Políticas Ambientais). Recife, UFPE, 2002.
- Maldonado, F. D. Desenvolvimento e avaliação de uma metodologia de detecção de mudanças na cobertura vegetal do semiárido. 311p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto). São José dos Campos: INPE, 2005.
- Maroco, J. Análise Estatística com utilização do SPSS. 3ª Ed. Lisboa: Edições Silabo Ltda, 2007. 824p.
- Matsushita, B.; Xu, M.; Fukushima, T. Characterizing the changes in landscape structure in the Lake Kasumigaura, Japan using a high-quality GIS dataset. Landscape and Urban Planning, v.78, p.241-250, 2006.
- 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.; Descrição da geodiversidade como subsídio ao zoneamento ambiental: estudo de caso em Portalegre-RN. GEOTemas, Pau dos Ferros, Rio Grande do Norte, Brasil, v 2, n. 2, p. 17-33, jul./dez., 2012.
- 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, O espaço geográfico em análise. Curitiba, Departamento de Geografia – UFPR, v.23, p. 520-533, 2011.

- 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.
- 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.; Batista, J. L. F.; Ribeiro Júnior, P. J.; Oliveira, M. S. Ajuste e seleção de modelos espaciais de semivariogramas visando à estimativa volumétrica de *Eucalyptus grandis*. Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 1, n. 69, p. 25-37, 2005.
- 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/..](http://www.geografia.ufpr.br/raega/) Acesso em: 31 Jan. 2016.
- Melo, G. W. Adubação e manejo do solo para a cultura da videira. Disponível em:< <http://www.cnpuv.embrapa.br/publica/sprod/viticultura/adubvid.html>> Acesso em: 17 fev. 2016.
- Mendoza, M. E.; Granados, E. L.; Geneletti, D.; Pérez-Salicrup, D. R.; Salinas, V. Analysing land cover and land use change process at watershed level: A multitemporal study in the Lake Cuitzeo Watershed, Mexico (1975-2003). Applied Geography, v.31, p.237-350, 2011.
- Miller Júnior, G. T. Ciência Ambiental. Tradução de All Tasks. 11. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013. 501 p.
- Moraes, J. M.; Schuler, A. E.; Guandique, M. E. G.; Milde, L. C.; Groppo, J. D.; Martilelli, A. L.; Victoria, R. L. Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v.8, n.1, p.61-70, 2003.
- Montenegro, A. A. A.; Montenegro, S. M. G. L.; Recursos Hídricos em Regiões Semiáridas: estudos e aplicações. Editores: Hans Raj Gheyi, Vital Pedro da Silva Paz, Salomão de Sousa Medeiros, Carlos de Oliveira Galvão (Org.). Olhares sobre as políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido. Campina Grande, PB: Instituto Nacional do Semiárido, Cruz das Almas, BA: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2012.

- Moreti, D. Avaliação espaço-temporal de processos do balanço de água em um solo com citros. 2006. 139 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- Mulla, D. J.; Batí, A. U.; Hammond, M. W.; Benson, J. A. A comparison of winter wheat yield and quality under uniform versus spatially variable fertilizer management. *Agriculture Ecosystems & Environment*, Amsterdam, v. 38, n. 4, p. 301-311, Mar. 1992.
- Nascimento, F. R. Os recursos hídricos e o trópico semiárido no Brasil. *Revista Geographia*, Niterói, v.14, n. 28, p. 82-109, 2013. Disponível em: <http://www.uff.br/geographia/ojs/index.php/geographia/article/view/554/348>. Acesso em: 18 fev. 2016.
- Neres, S. C. T.; Nascentes da Região Serrana de Martins e Portalegre: aspectos hidrodinâmicos e macroscópicos como subsídios a conservação. Dissertação (Mestrado em Ciências Naturais). Programa de Pós-Graduação em Ciências Naturais da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, 2014.
- 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.
- Onofre Júnior, M. Martins a cidade e serra. Texto disponibilizado no blog Vento Nordeste em quinta-feira, 16 de ago. 2012. Disponível em: <http://papjerimum.blogspot.com.br/2012/08/a-casa-de-pedra-em-martins-maior.html>. Acesso em: 19 jan. 2016.
- Ortiz, G. C. Aplicação de métodos geoestatísticos para identificar a magnitude e a estrutura da variabilidade espacial de variáveis físicas do solo. 2002. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2002.
- 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

- Pocay, V. G. Relações entre pedoforma e variabilidade espacial de atributos de Latossolo sob cultivo intensivo de cana-de-açúcar. Jaboticabal: FCAV/UNESP. 2000. 177p. Dissertação Mestrado
- Poelking, E. L., Lauermann, A., Dalmolin, R. Imagens CBERS na geração de NDVI no estudo da dinâmica da vegetação em período de estresse hídrico. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13., 2007. Anais... Florianópolis, INPE, 2007. CD-ROM.
- Pontes, C. A. A.; Schramm, F. R. Bioética da proteção e papel do Estado: problemas morais no acesso desigual à água potável. Cadernos de Saúde Pública. Rio de Janeiro, 2004, v. 20, n. 5, p. 1319-1327.
- Ponzoni, F. J. & Shimabukuro, Y. E. Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação. São José dos Campos, SP: Ed. Parêntese, 2010, 136p.
- Pôrto, K. C.; Cabral, J. JP.; Tabarelli, M. (Org.) Brejos de altitude em Pernambuco e Paraíba: história natural, ecologia e conservação. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2004. 324 p. Disponível em: <<http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/5151>>. Acesso em: 20 jan. 2016.
- 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.
- QGIS Development Team, 2016. QGIS 2.8. Geographic Information System User Guide. Open Source Geospatial Foundation Project. Electronic document: http://docs.qgis.org/2.8/pdf/pt_BR/QGIS-2.8-UserGuide-pt_BR.pdf
- Rawls, W. J.; Pachepsky, Y. A.; Ritchie, J. C.; Sobecki, T. M.; Bloodworth, H. Effect of soil organic carbon on soil water retention. Geoderma, v.116, p.61-76, 2003.
- Rebouças, A. da C. Água na Região Nordeste: desperdício e escassez. Revista do Instituto Estudos Avançados, São Paulo, v. 11, n. 29, p. 127-154, jan./abr. 1997.
- Rebouças, A. C.; Braga, B.; Tundisi, J.G. (Eds.). Águas doces do Brasil: capital ecológico, uso e conservação. 3. ed. rer. ampl. Escrituras, Editora e Distribuidora de Livros Ltda., 2002.
- Rebouças, Aldo C. Águas Subterrâneas, In: Águas doces no Brasil: Capital ecológico, uso e conservação. Org. Aldo da C. Rebouças, Benedito Braga, José Galizia Tundisi. 3ed, São Paulo: Escrituras editora, 2006.
- Reichardt, K.; Timm, L. C. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. São Paulo: Manole, 2004. 478.

- Ribeiro Júnior, P. J.; Diggle, P. J. GeoR: a package for geostatistical analysis. R-NEWS, London, v. 1, n. 2, p. 15-18, 2001.
- Riceto, A. As áreas de preservação permanente (app) urbanas: sua importância para a qualidade ambiental nas cidades e suas regulamentações. Revista da Católica: ensino, pesquisa e extensão, v. 2 nº4, p. 01-10, 2010.
- Rocha, G. C. Estabilidade temporal da distribuição espacial da armazenagem, do gradiente de potencial total e do potencial mátrico da água, em um solo cultivado com citros. 2004. 117 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- Rocha, A. B. d. et al. Mapeamento Geomorfológico da Bacia do Apodi Mossoro-RN-NE do Brasil. Mercator, Revista de Geografia da UFC. Fortaleza, CE, ano 08, n. 16, p. 201-216, 2009.
- Roque, M. W. Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos em solos de uma transeção perpendicular a um dreno natural. 2003. 138 p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.
- Rosa, R. Introdução ao Sensoriamento Remoto. 7ª ed. Uberlândia: EDUFU, 2009.
- Salomão, S. M. et al. (Org.) Recursos Hídricos em Regiões Áridas e Semiáridas. Campina Grande: INSA- Instituto Nacional do Semiárido, 2011. 440 p. ISBN 978-85-64265-011. Disponível em: <www.insa.gov.br/wp-content/themes/insa.../recursos-hidricos-//.pdf>. Acesso em: 24 de janeiro. 2016.
- Sampaio, F. S. Estudo da distribuição de velocidades em aglomerados de galáxias: teste de normalidade e metanálise de Fisher. 2013. 53 p. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, BA.
- Santana, D. P. Manejo Integrado de Bacias Hidrográficas. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. 63p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 30).
- Santos, Humberto Carvalho dos, et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2013.
- Scull, 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.
- Secretaria do Estado do Planejamento e das Finanças do Rio Grande do Norte- SEPLAN. Perfil do Rio Grande do Norte, 2013. Disponível em: <<http://www.seplan.rn.gov.br/arquivos/download/PERFIL%20DO%20RN.pdf>>. Acesso em 08 dez. 2015.

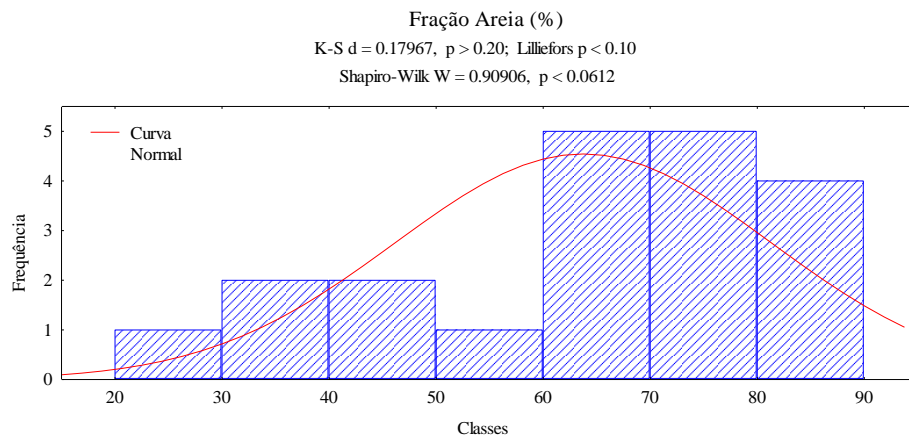
- Shiklomanov, I. World water resources: a new appraisal and assessment for the 21st century. IHP, UNESCO, 1998.
- Shimabukuro, Y. E. Índice de Vegetação e Modelo Linear de Mistura Espectral no Monitoramento da região do Pantanal. Pesquisa Agropecuária Brasileira. (33): 1729-1737, 1998.
- Silva, M. F. Uma análise do bioma caatinga no município de Gado Bravo-PB através do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada. Dissertação (Mestrado) - Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2016.
- 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).
- 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, M. T. G; Lacerda, M. P. C.; Chaves, A. A. A. Geotecnologia aplicada na avaliação do uso das terras da microbacia do ribeirão João Leite, Goiás. Pesquisa Agropecuária Tropical, v.39, p. 330-337, 2009.
- Silva, I. V.; Mendonça, E. D. Matéria orgânica do solo. In: Novais, R. F.; Alvarez V.; V. H.; Barros, N. F.; Fontes, R. L. F.; Cantarutti, R. B.; Neves, J. C. L. Fertilidade do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. Cap.6, p.275-374.
- Soares, R. B.; Campos, K. C. Uso e disponibilidade hídrica no semiárido do Brasil. Revista de Política Agrícola, Brasília, v.22, n. 3, p. 48-57, jul./ago./set. 2013. Disponível em: <<https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/767>>. Acesso em: 25 jan. 2016.
- Souza, L.S. Variabilidade espacial do solo em sistemas de manejo. Porto Alegre, 1992. 162p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- 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, Z. M.; Marques Júnior, J.; Pereira, G. T.; Moreira, L. F. Influência da pedofoma 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.
- Souza, Z. M.; Marques Júnior, J.; Pereira, G. T.; Barbieri, D. M. Variabilidade espacial da textura de um Latossolo Vermelho eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.24, n.2, p.309-319, 2004a.

- Stevenson, F. J. Humus chemistry: Genesis, composition and reactions. 2. Ed. New York, John Wiley & Sons, 1994. 443p.
- Sturaro, J.R. Mapeamento geoestatístico de propriedades geológico-geotécnicas obtidas de sondagens de simples reconhecimento. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.
- Suassuna, J. A Água no semiárido brasileiro: potencialidade e limitações. Revista Cidadania e Meio Ambiente (online). Texto disponibilizado em 26 Jul. 2012. Disponível em: <<http://www.ecodebate.com.br/2012/07/26/a-agua-no-semiarido-brasileiro-potencialidades-e-limitacoes-artigo-de-joao-suassuna/>>. Acesso em: 10 jan. 2016.
- Tabai, F. C. V. Manual de Procedimentos técnicos de restauração florestal em áreas de preservação permanente. Consórcio Intermunicipal das Bacias dos Rios PCJ - Piracicaba, 4p. 2002.
- Timm, L. C.; Oliveira, J. C. M.; Tominaga, T. T.; Cássaro, F. A. M.; Reichardt, K.; Bacchi, O. O. S. Soil hydraulic conductivity measurement on a sloping field. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campo Grande, v. 4, n. 3, p. 480-482, 2000.
- USGS. **Landsat Missions:** Using the USGS Landsat8 Product. U.S. Department of the Interior - U.S. Geological Survey – NASA, 2015.
- Site: <http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php>. Acesso em: 20/06/2016.
- Vanzela, L. S.; Hernandez, F. B.; Franco, R. A. M. Influência do uso e ocupação do solo nos recursos hídricos do Córrego Três Barras, Marinópolis. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.14, p.55-64, 2010.
- Villar, P.C. Gestão das áreas de recarga do Aquífero Guarani: o caso do município de ribeirão preto. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 184p. 2008.
- Vieira, S.R. Geoestatística em estudo de variabilidade espacial do solo. In: Novais, R.F.; Alvarez V., V.H. & Schaefer, C.E.GR., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.1-55.
- 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.

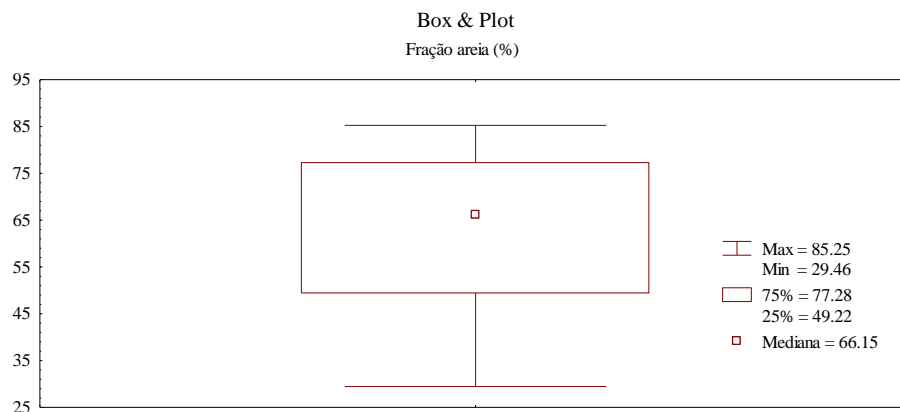
- Vieira, S. R.; Nielsen, D. R.; Biggar, J. W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. *Journal Soil Science Society of America*, Madison, v. 45, p. 1040- 1048, 1981.
- Vivacqua, M.C.R. Qualidade da água do escoamento superficial urbano: revisão visando o uso local. 2005. 185p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- Warrick, A. W.; Nielsen, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). *Applications of soil physics*. New York: Academic, 1980.
- Wendroth, O.; Jürschik, P.; Kersebaum, K. C.; Reuter, H.; Kessel, C. van; Nielsen, D. R. Identifying, understanding, and describing spatial processes in agricultural landscapes - four case studies. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v. 58, p. 113-127, 2001.

APÊNDICE A – ESTATÍSTICA DESCRITIVA GRÁFICA

(a)



(b)



(c)

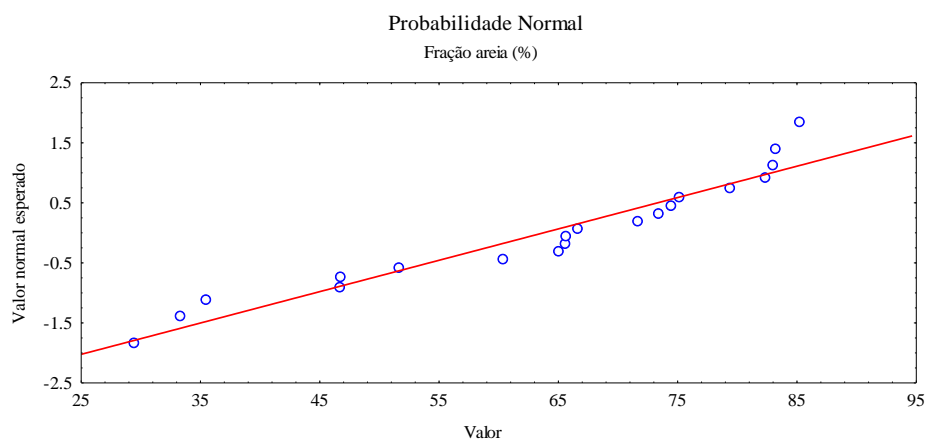
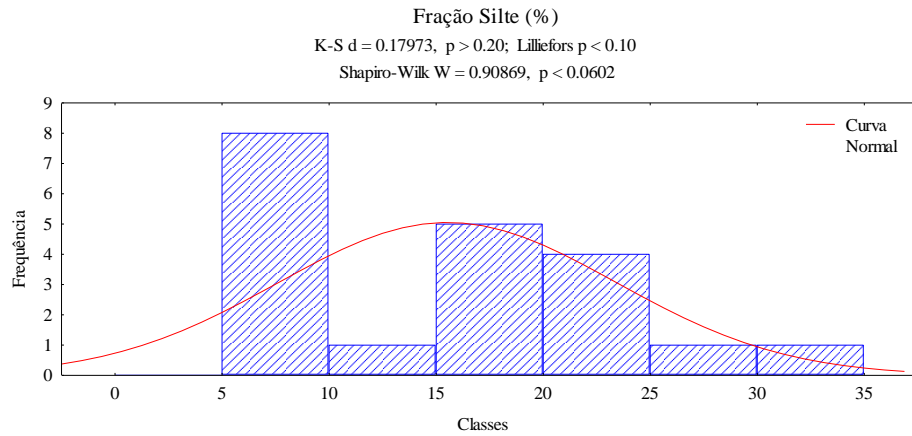
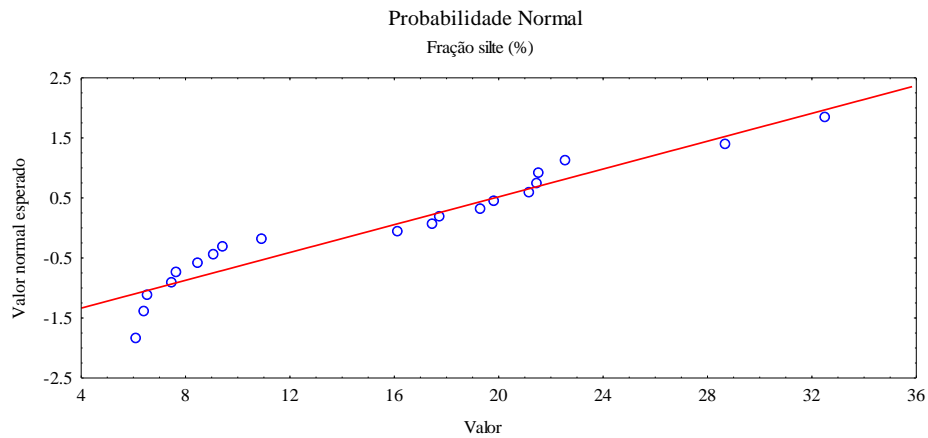


Figura 16. Estatística descritiva gráfica para os dados de teor de areia (%) do solo na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

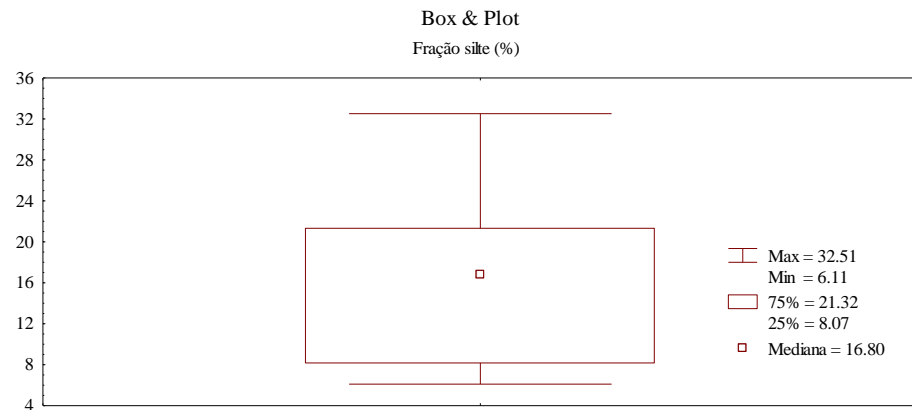
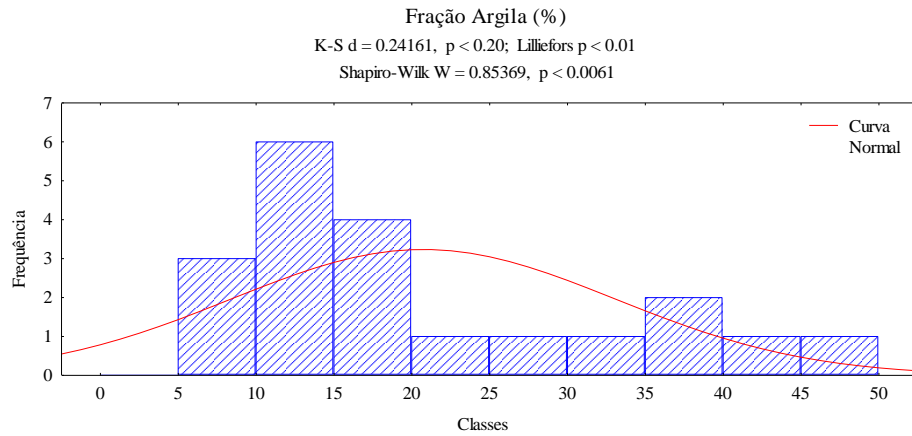
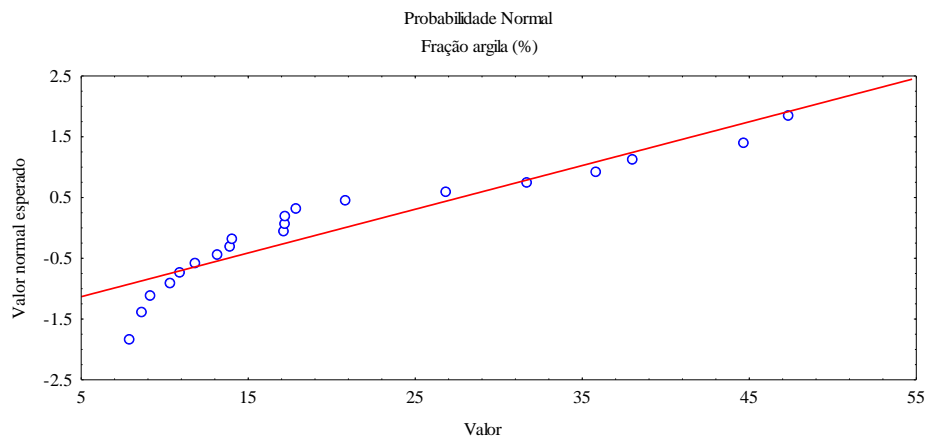


Figura 17. Estatística descritiva gráfica para os dados de teor de silte (%) do solo na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

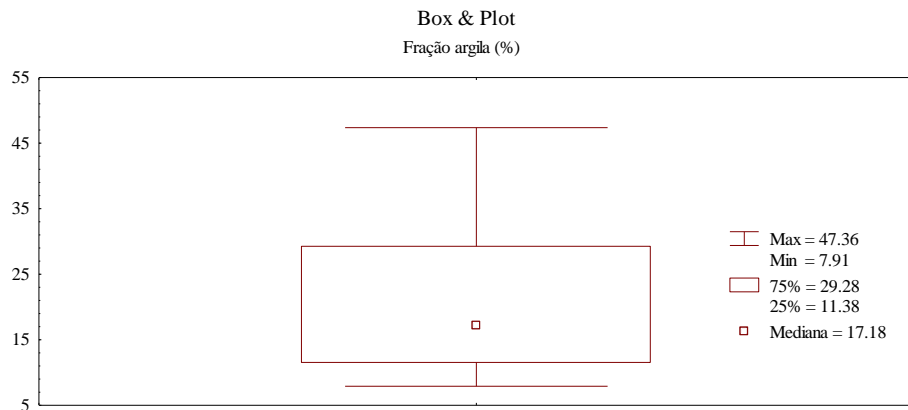
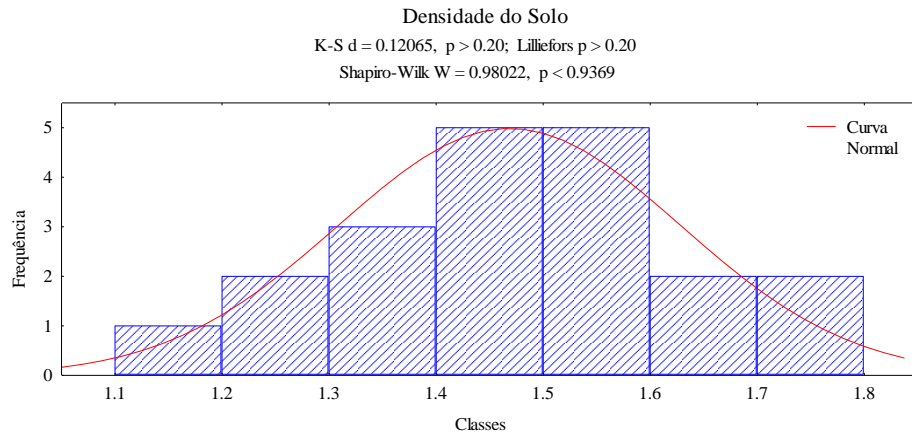
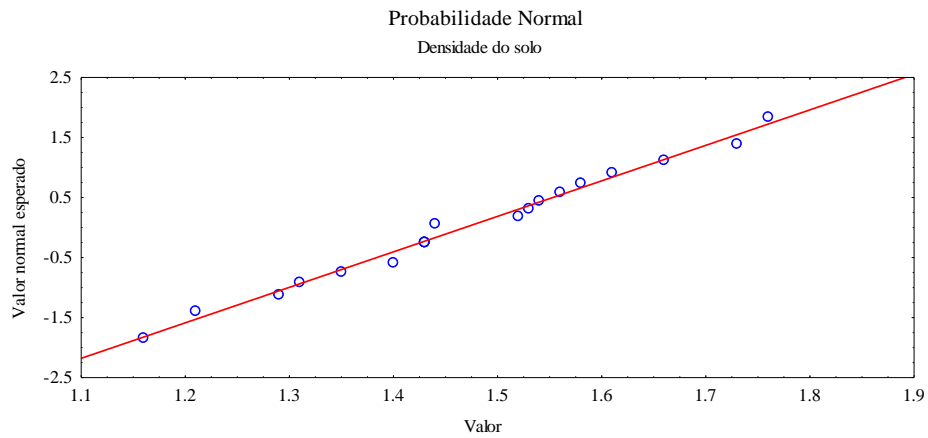


Figura 18. Estatística descritiva gráfica para os dados de teor de argila (%) do solo na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

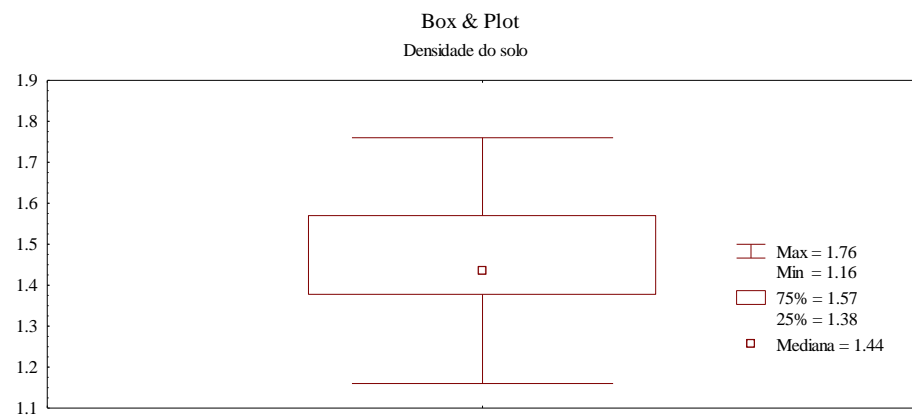
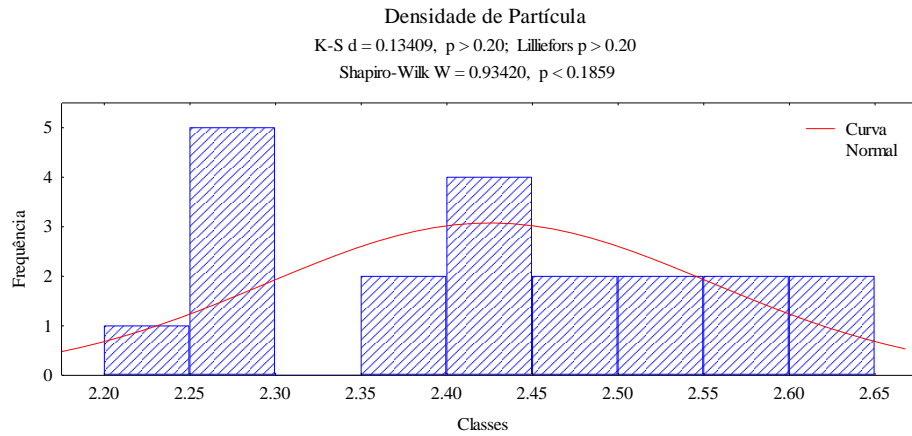
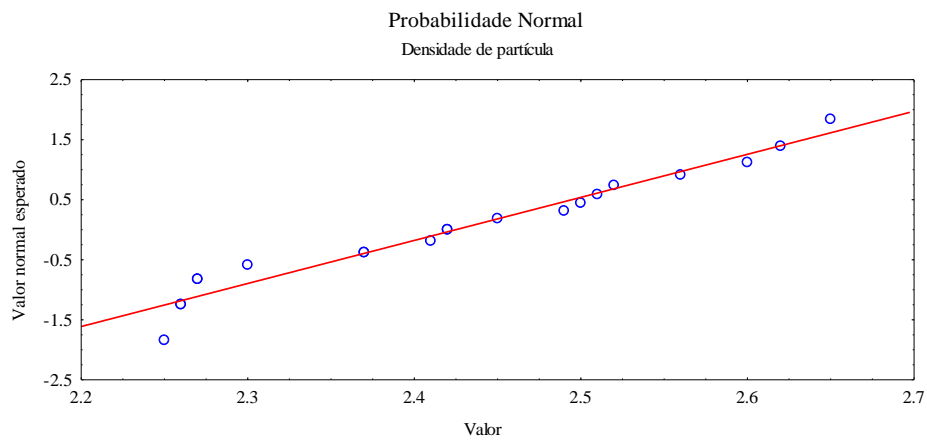


Figura 19. Estatística descritiva gráfica para os dados de densidade do solo (Ds) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

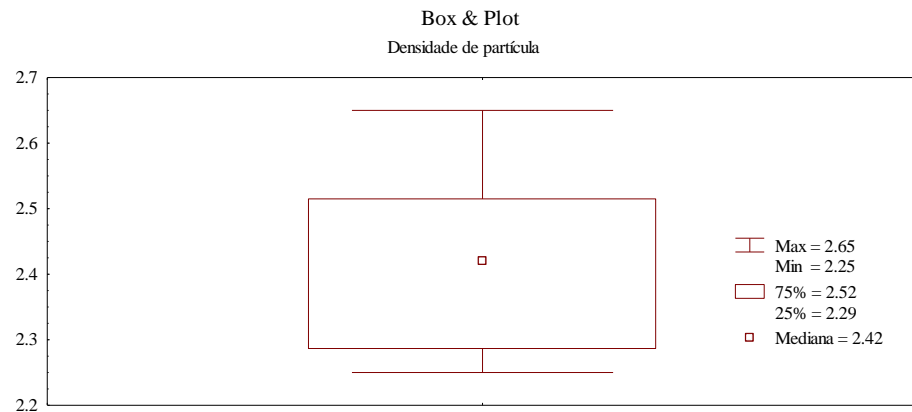
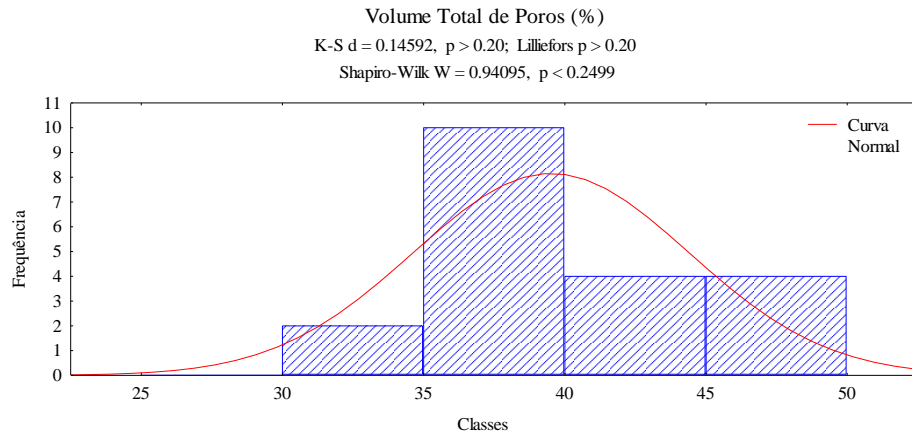
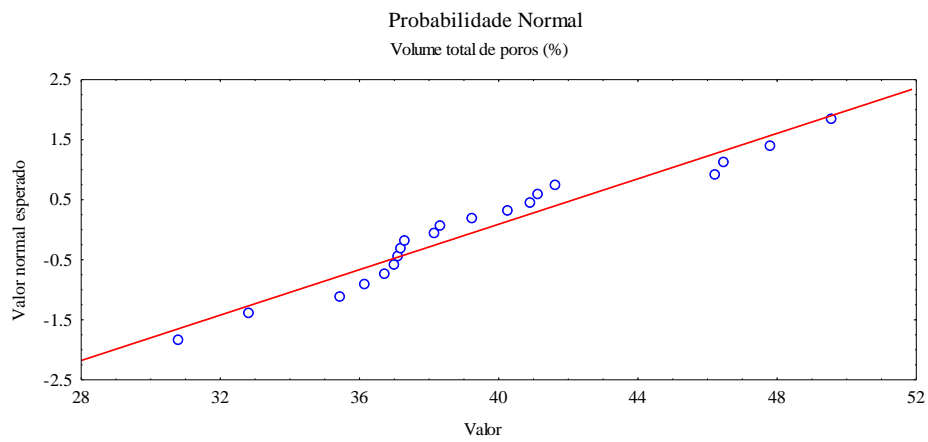


Figura 20. Estatística descritiva gráfica para os dados da densidade de partícula (D_p) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

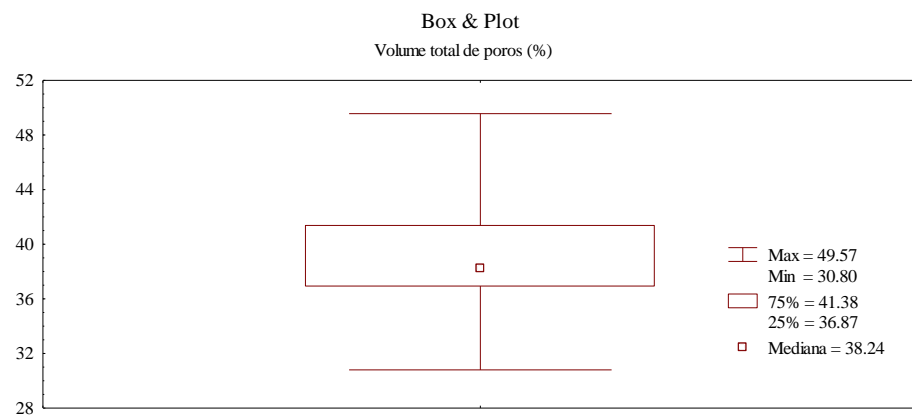
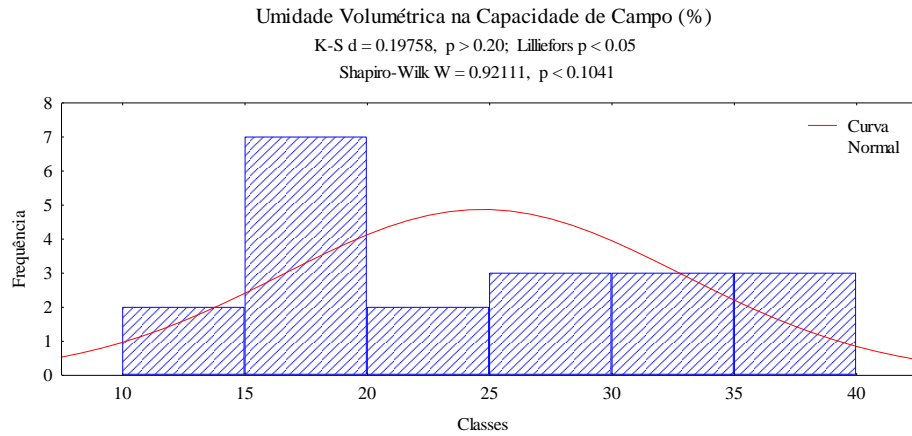
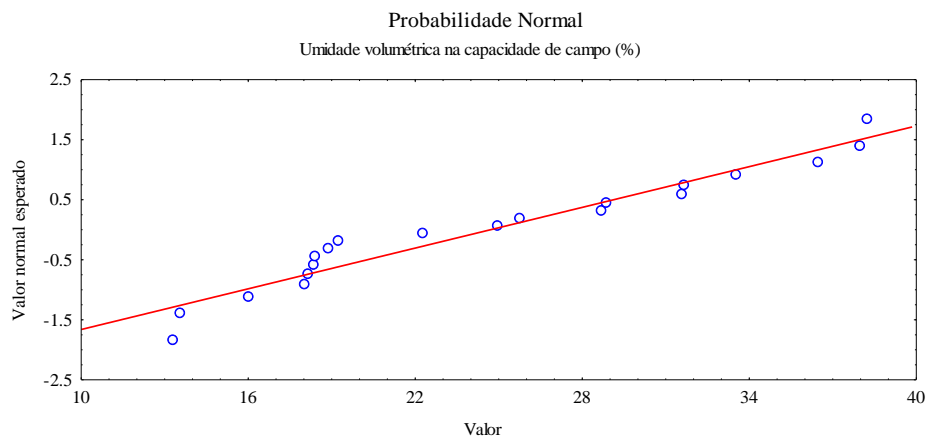


Figura 21. Estatística descritiva gráfica para os dados do volume total de poros (VTP) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

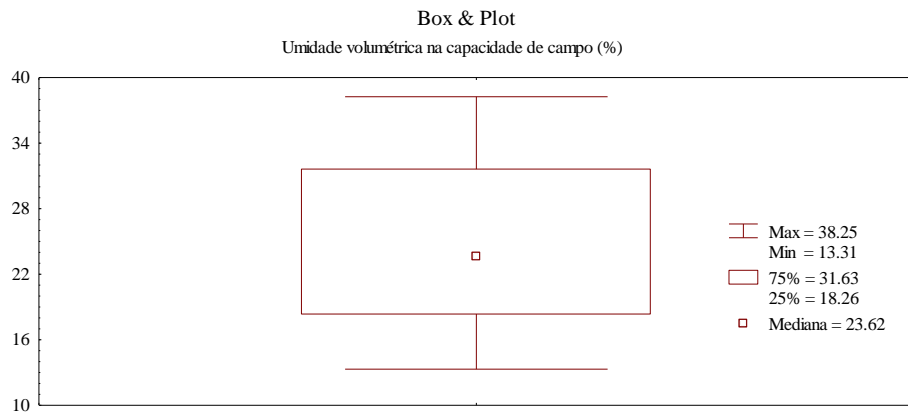
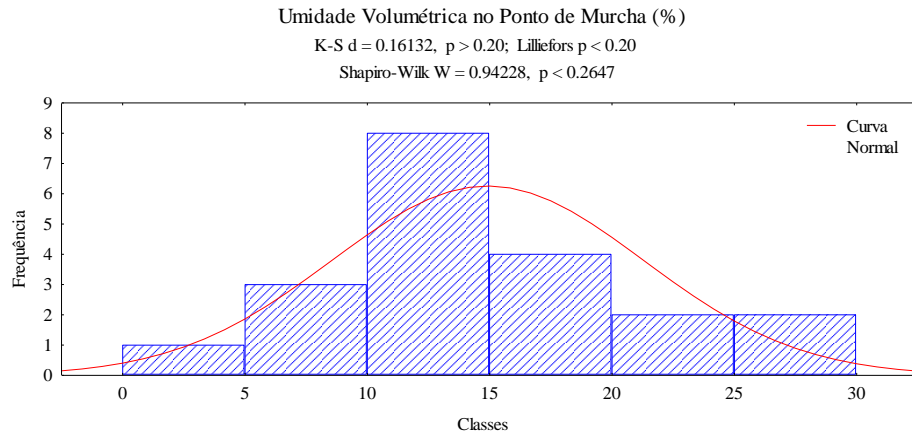
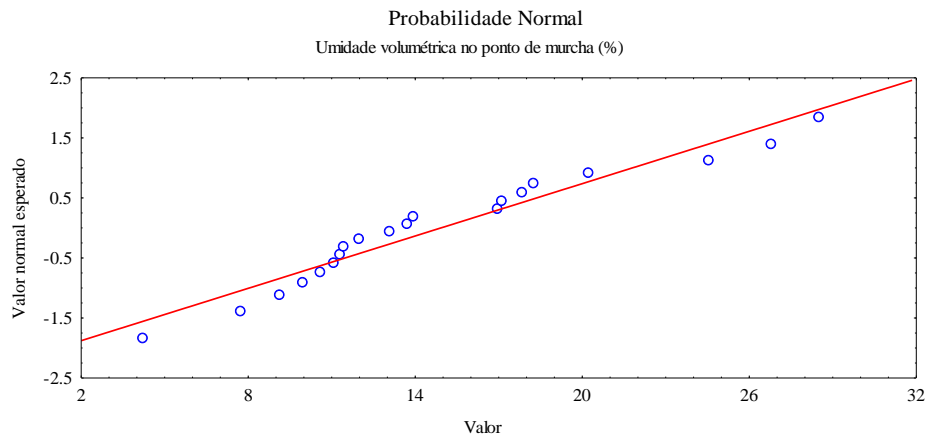


Figura 22. Estatística descritiva gráfica para os dados da umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

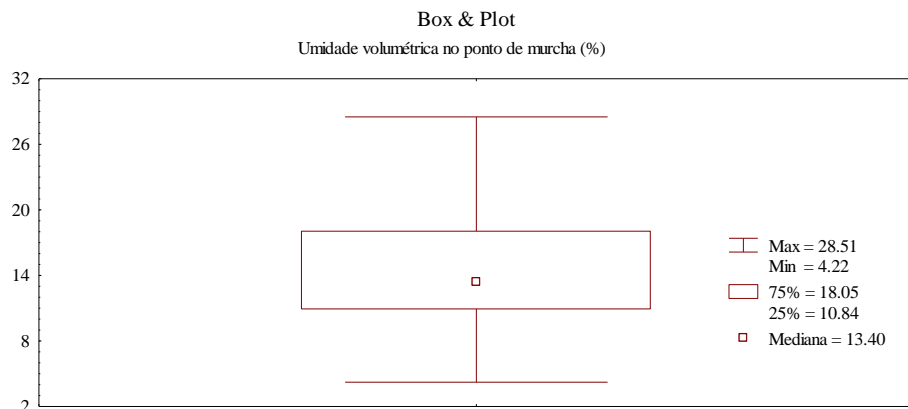
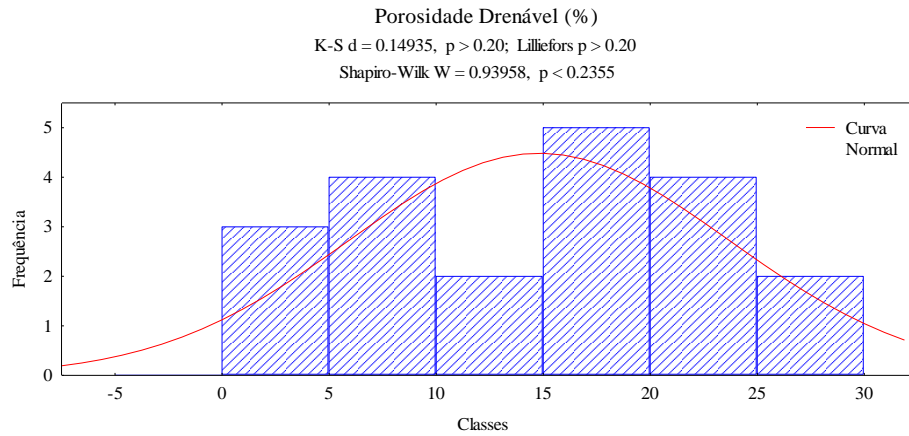
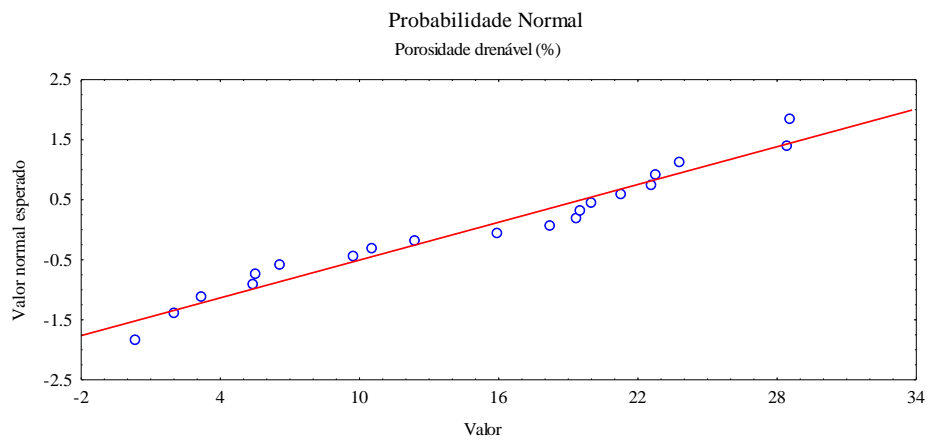


Figura 23. Estatística descritiva gráfica para os dados da umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

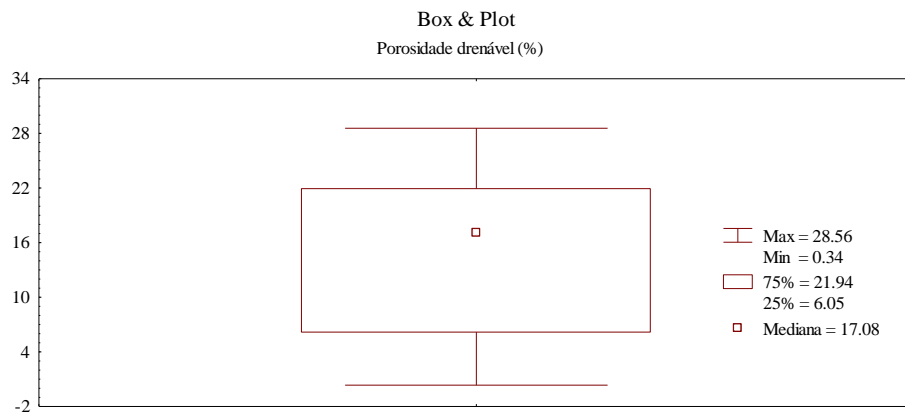
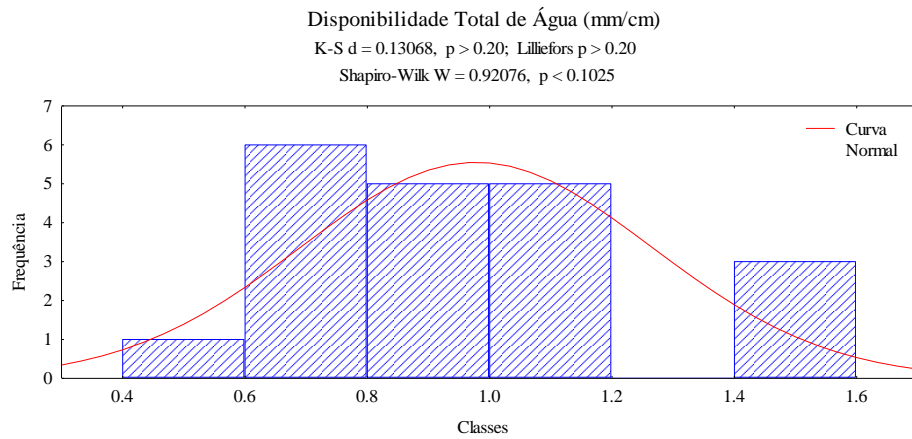
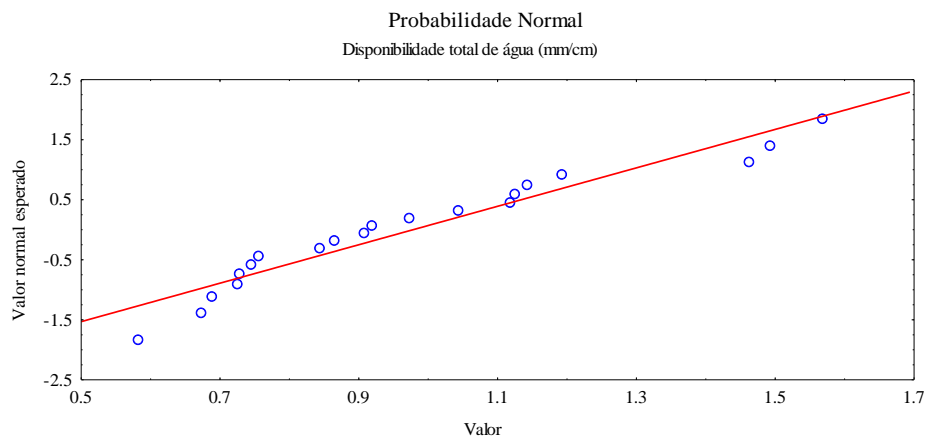


Figura 24. Estatística descritiva gráfica para os dados da porosidade drenável (P_d) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

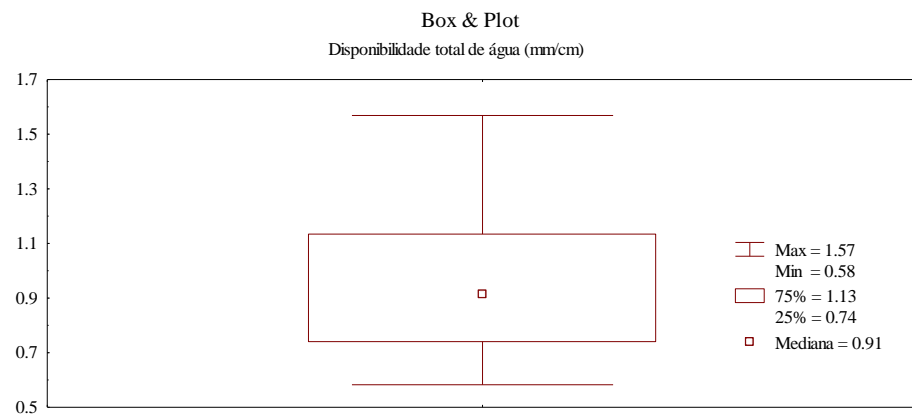
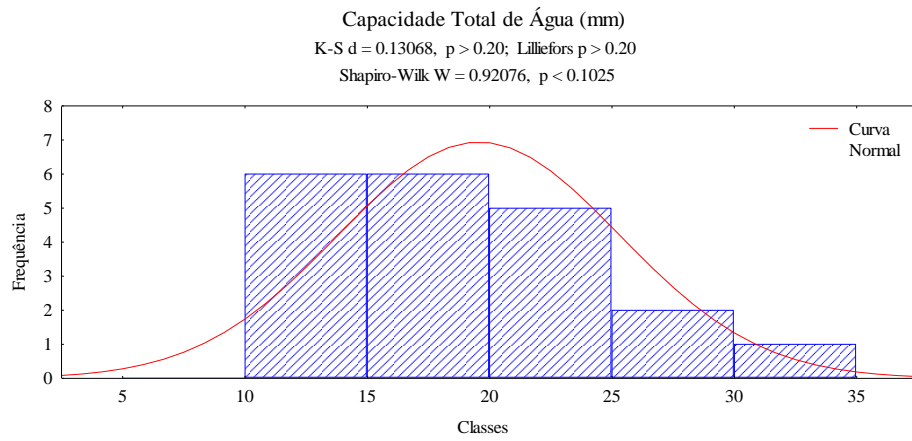
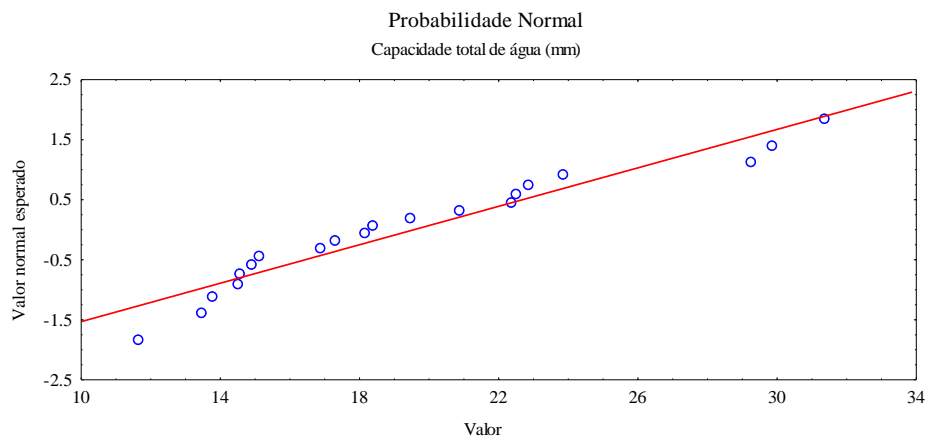


Figura 25. Estatística descritiva gráfica para os dados de disponibilidade total de água (DTA) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

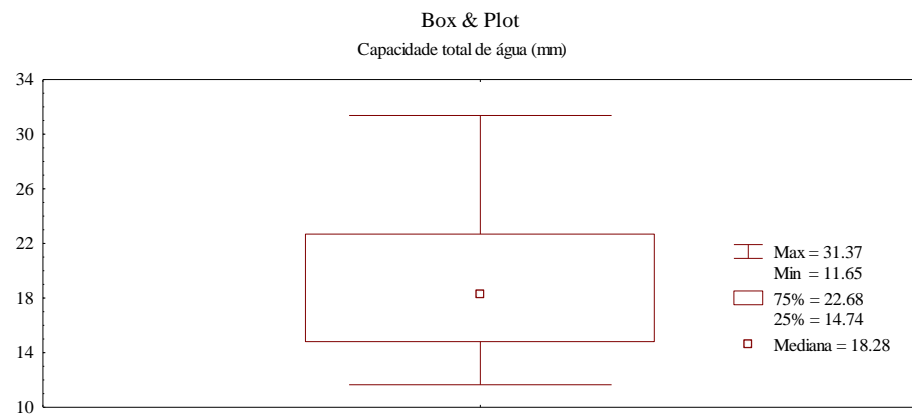
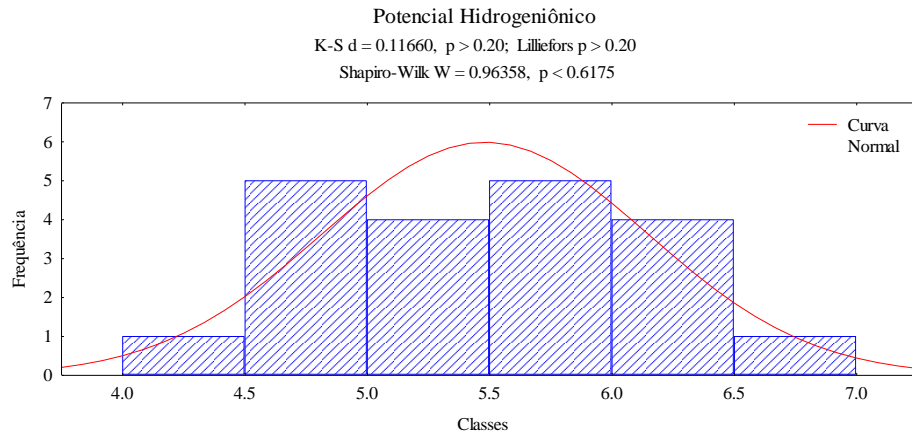
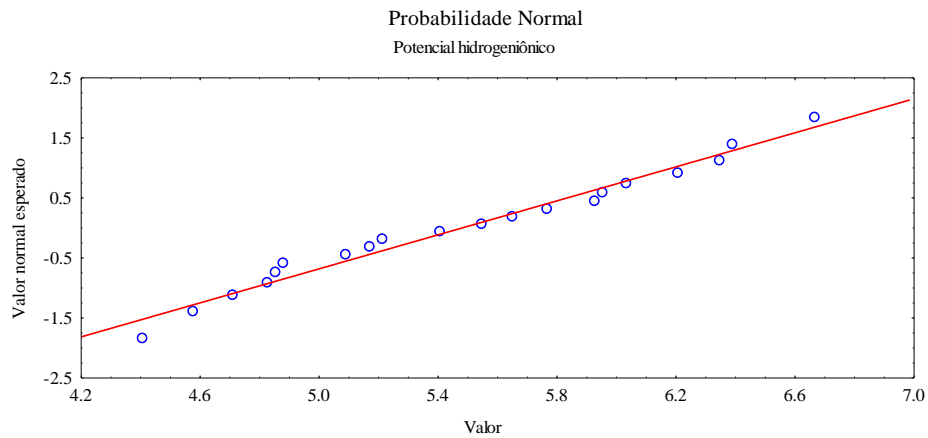


Figura 26. Estatística descritiva gráfica para os dados de capacidade total de água (CTA) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

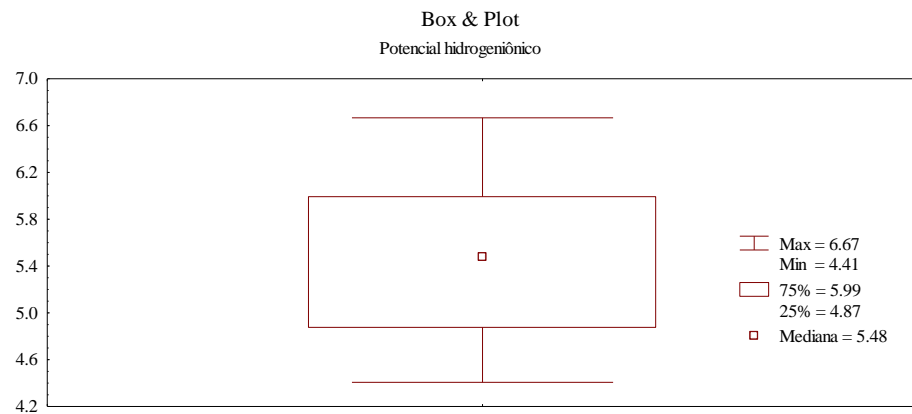
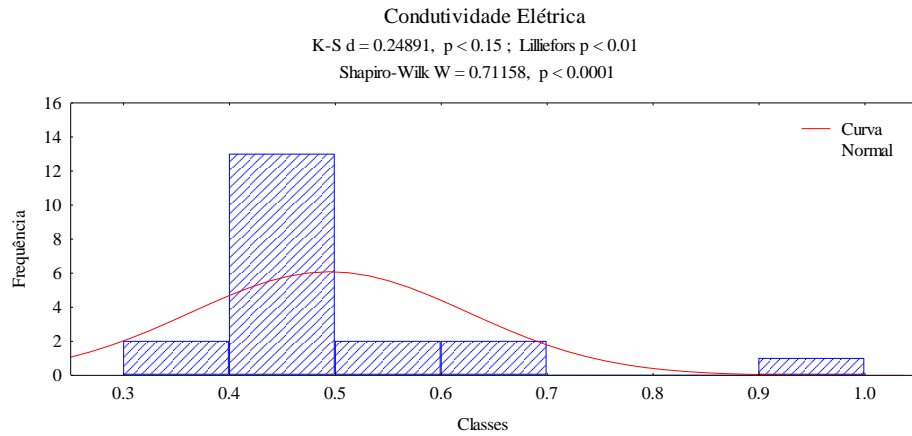
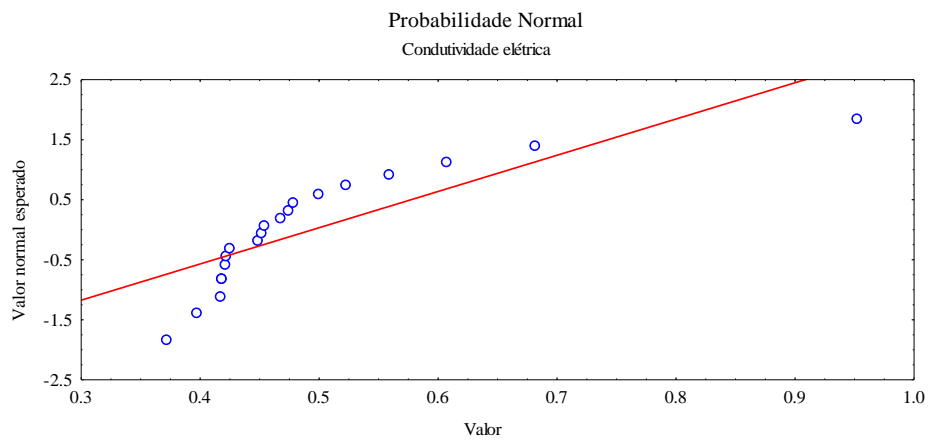


Figura 27. Estatística descritiva gráfica para os dados do potencial hidrogeniônico (pH) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

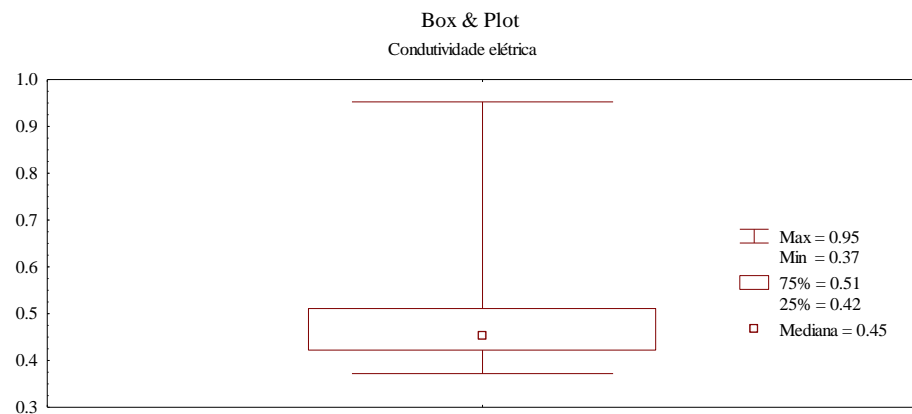
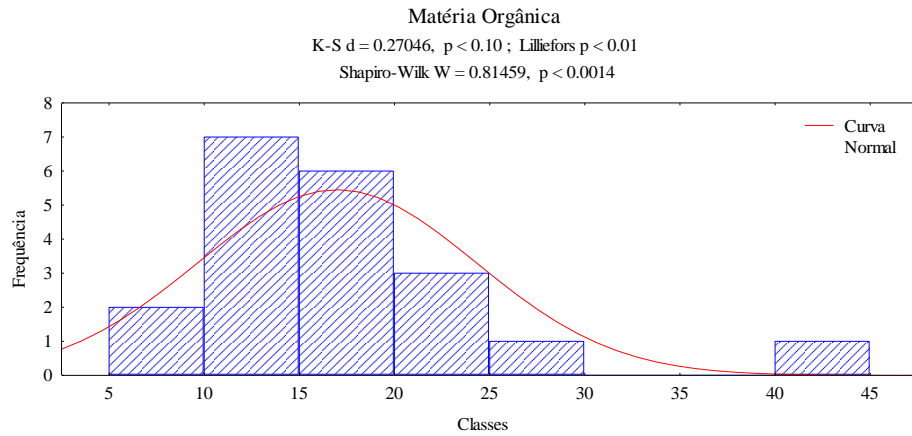
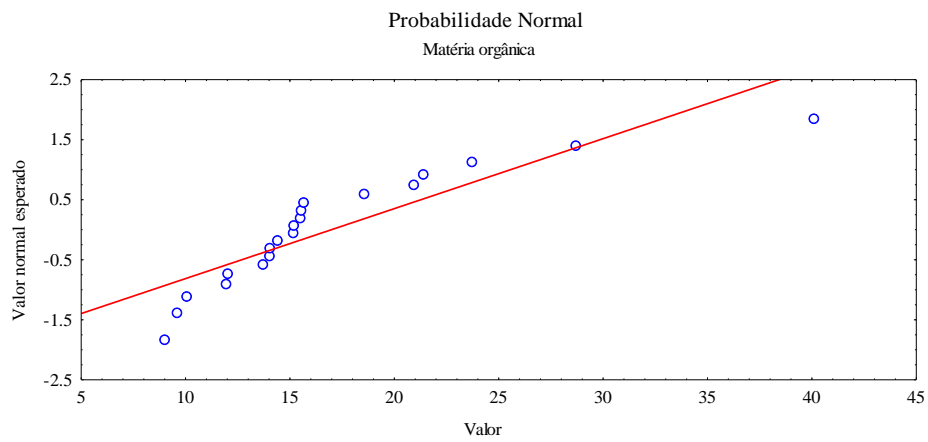


Figura 28. Estatística descritiva gráfica para os dados de condutividade elétrica (CE) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

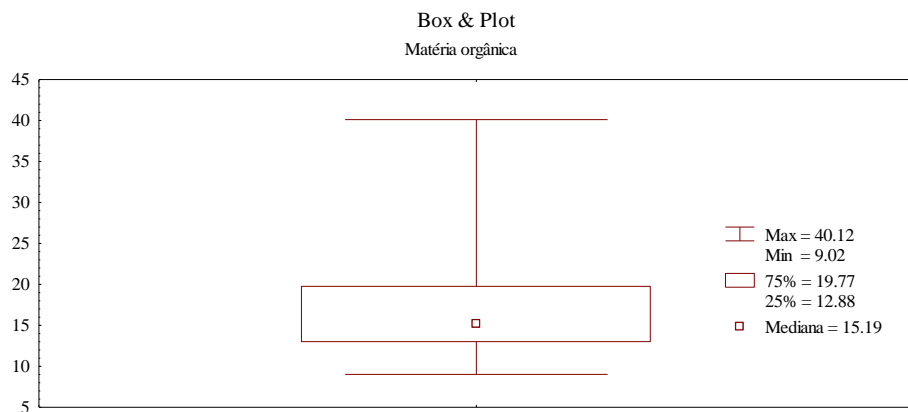
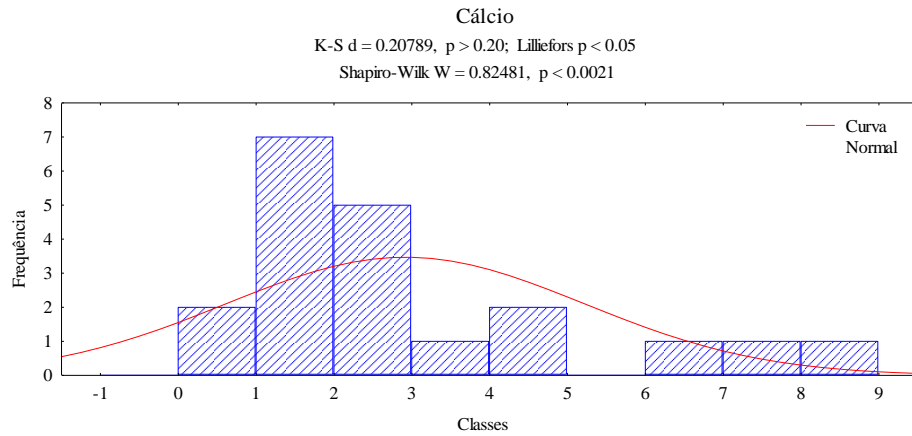
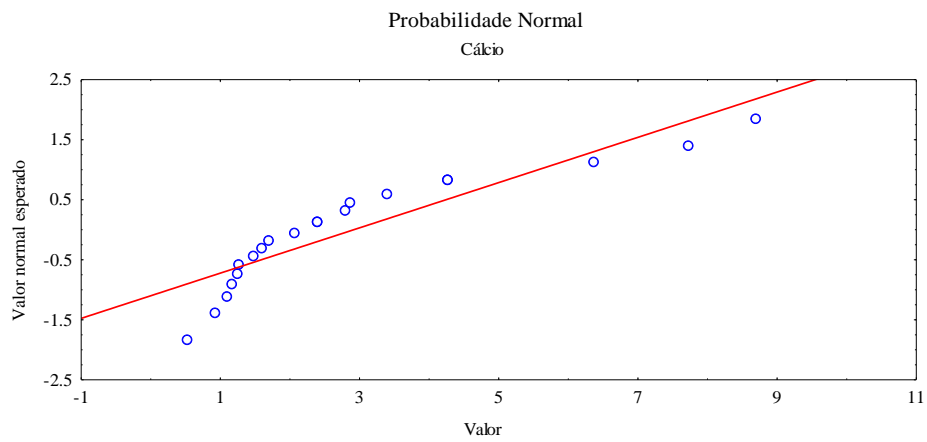


Figura 29. Estatística descritiva gráfica para os dados de matéria orgânica (MO) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

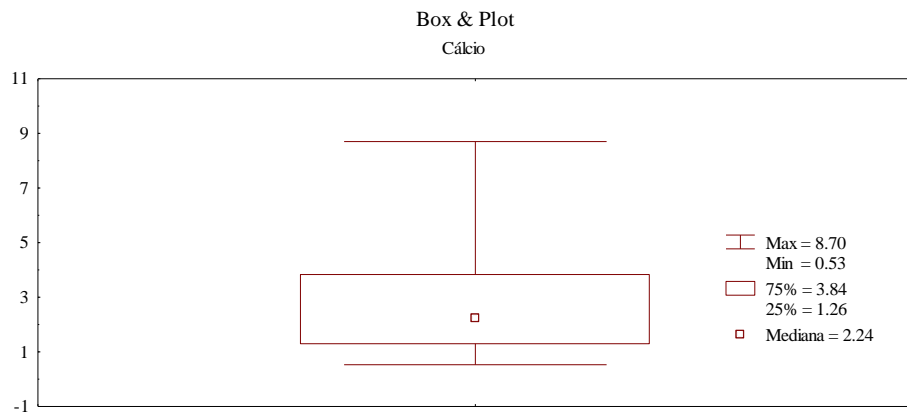
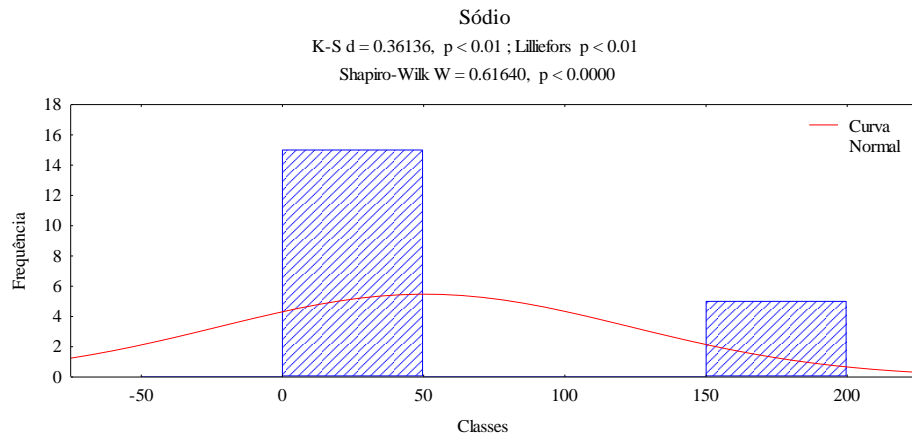
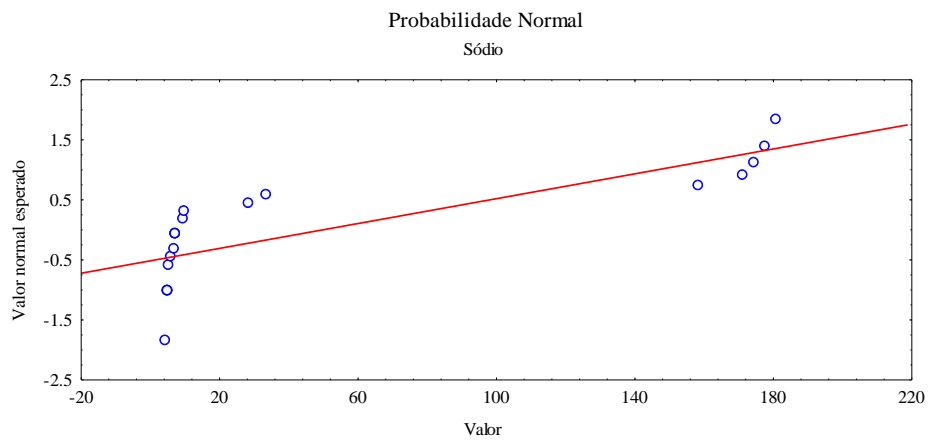


Figura 30. Estatística descritiva gráfica para os dados de cálcio (Ca^{2+}) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

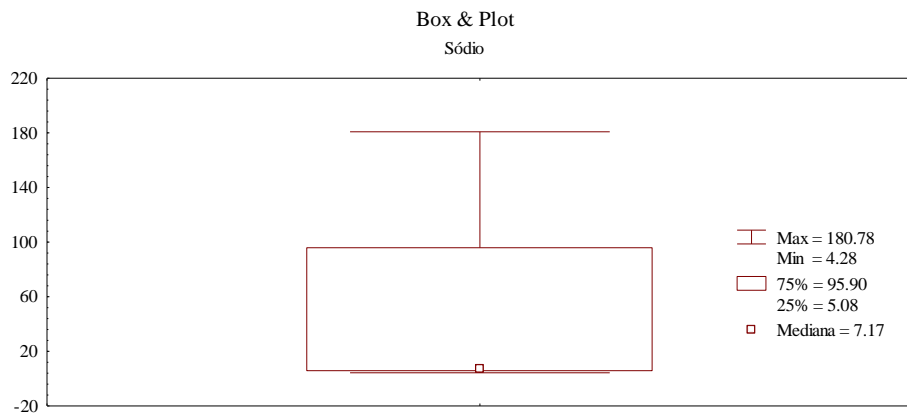
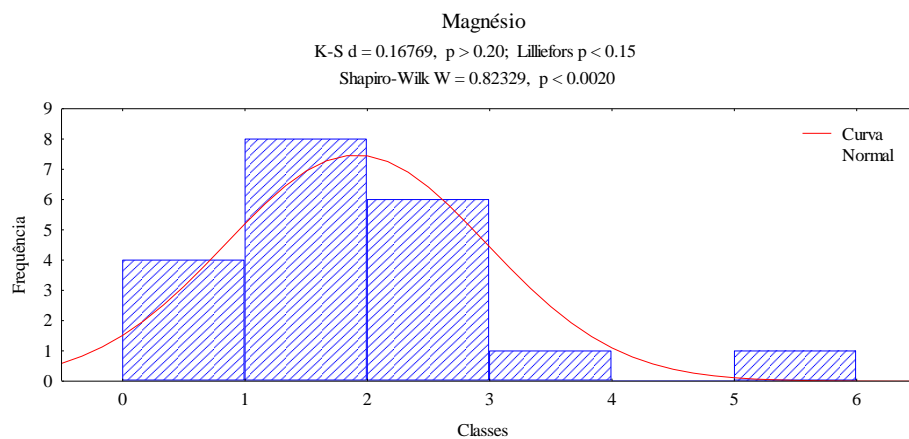
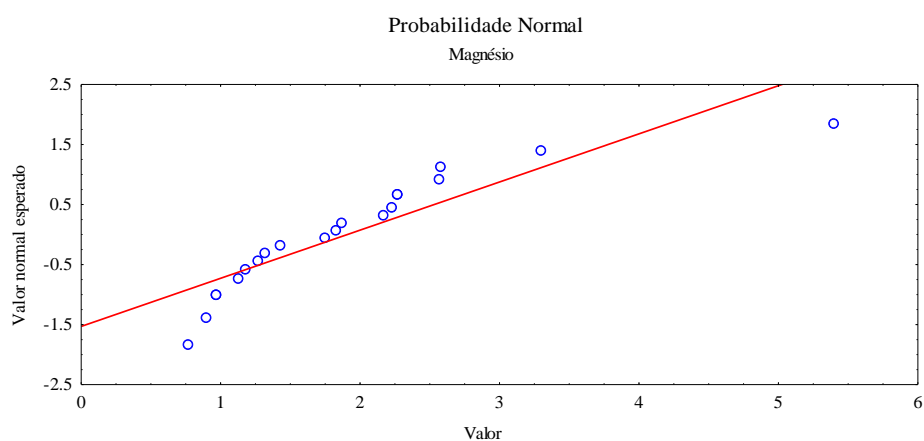


Figura 31. Estatística descritiva gráfica para os dados de sódio (Na^+) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

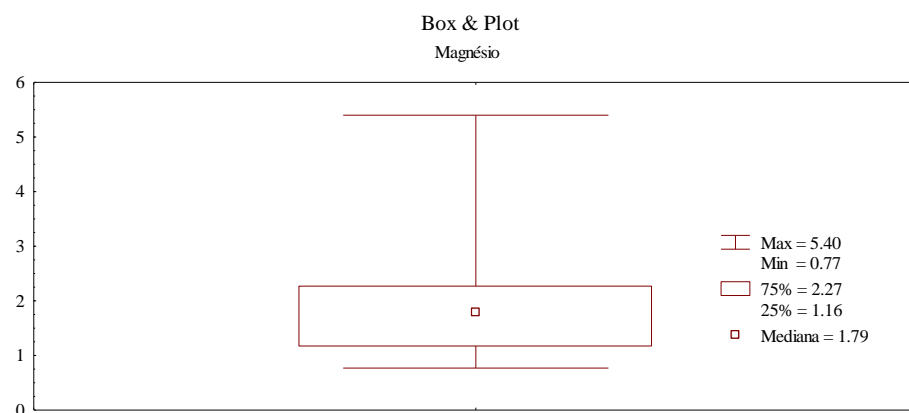
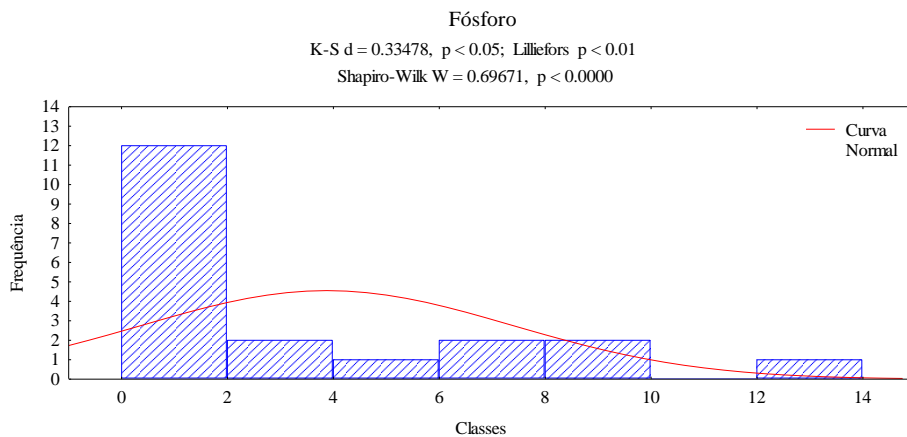
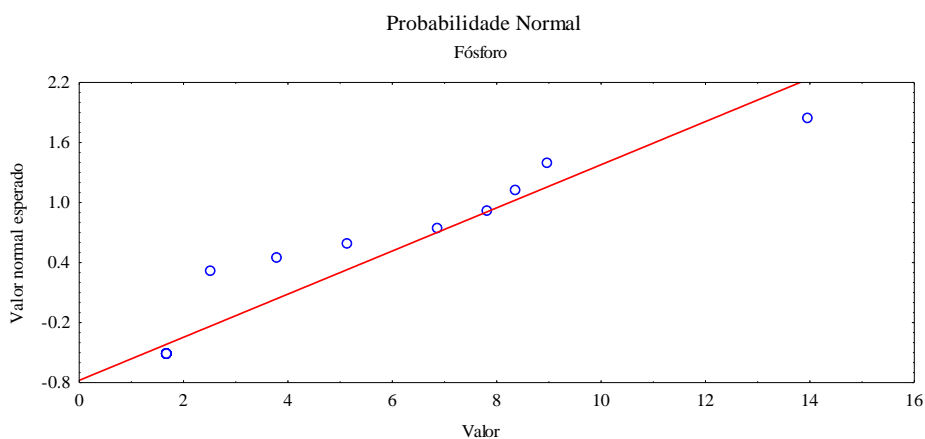


Figura 32. Estatística descritiva gráfica para os dados de magnésio (Mg^{2+}) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

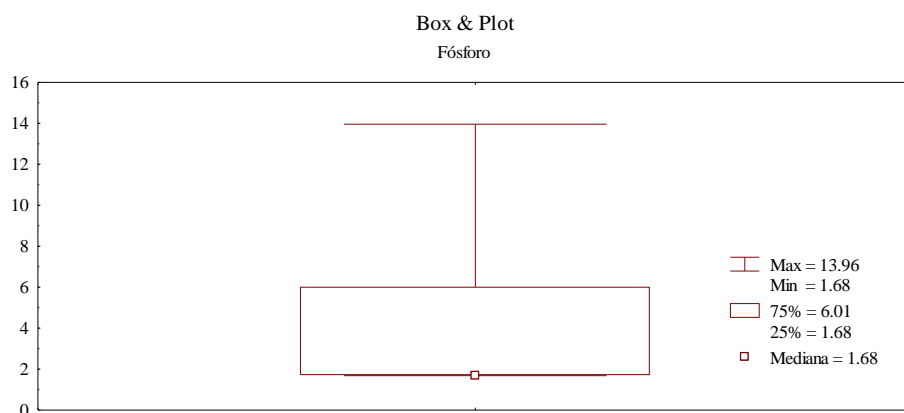
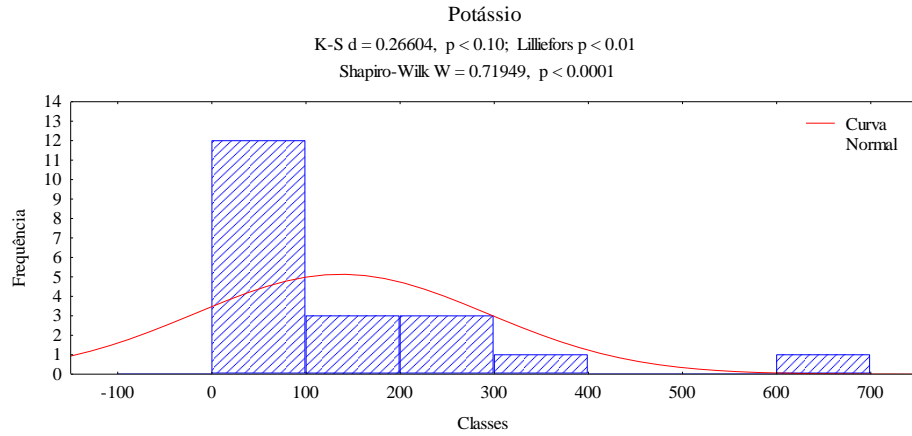
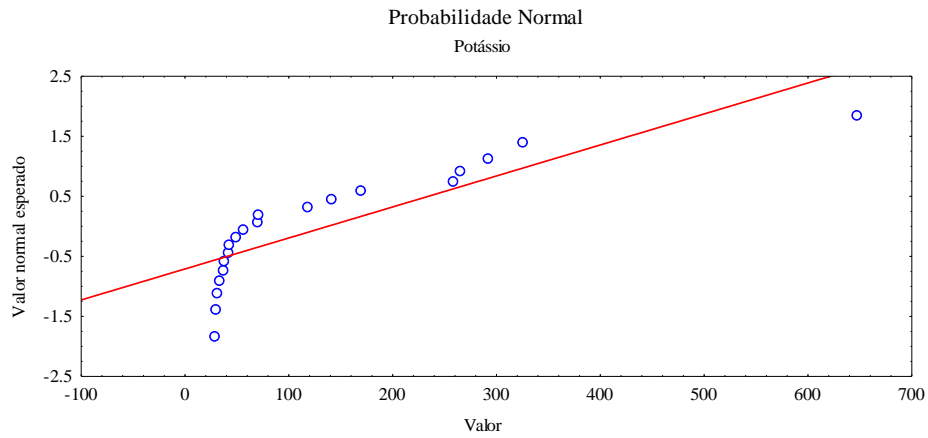


Figura 33. Estatística descritiva gráfica para os dados de fósforo (P) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

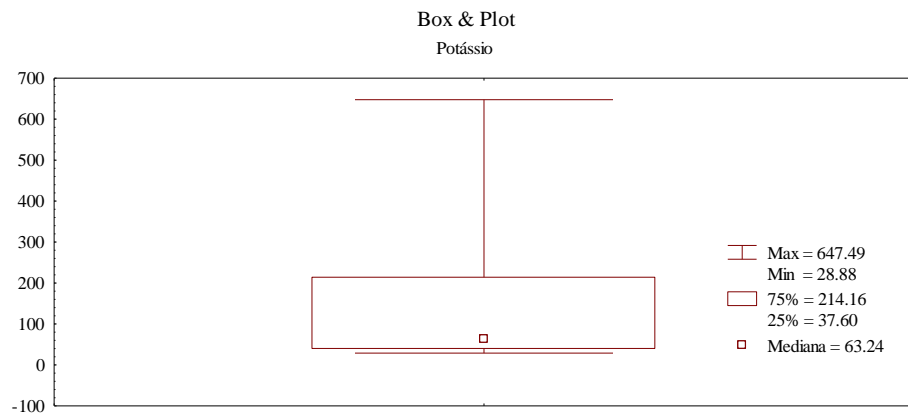
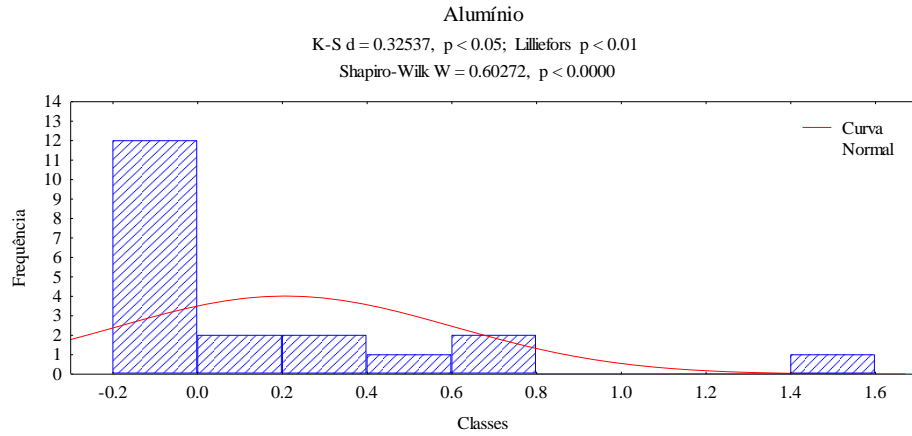
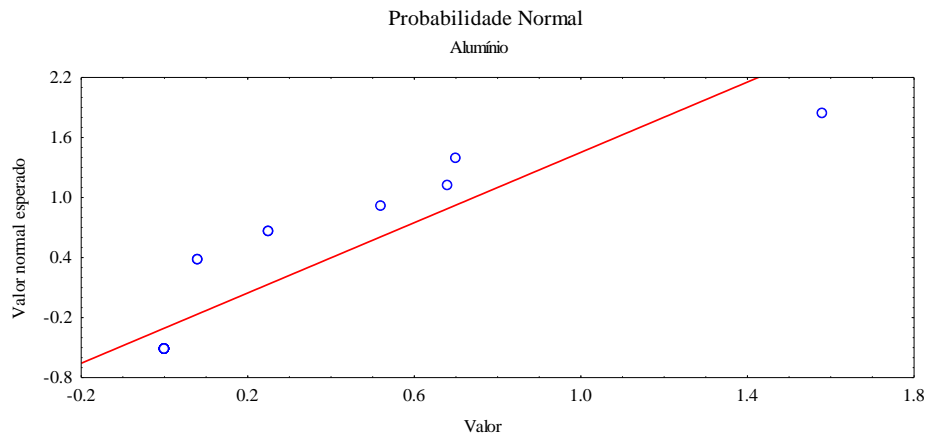


Figura 34. Estatística descritiva gráfica para os dados de potássio (K^+) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

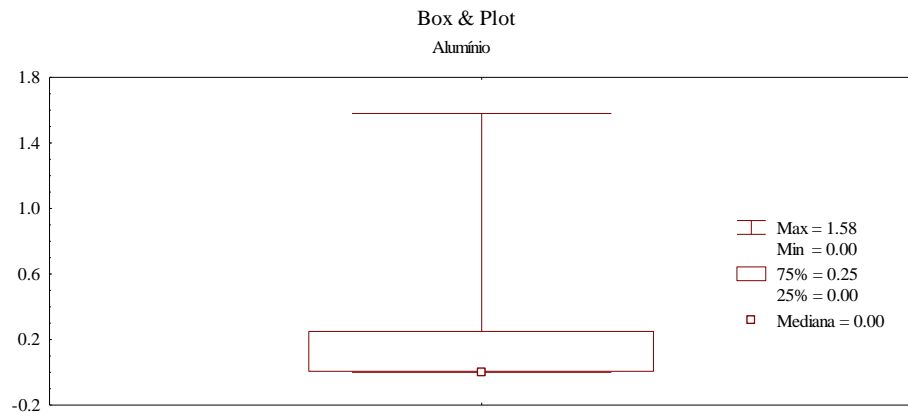
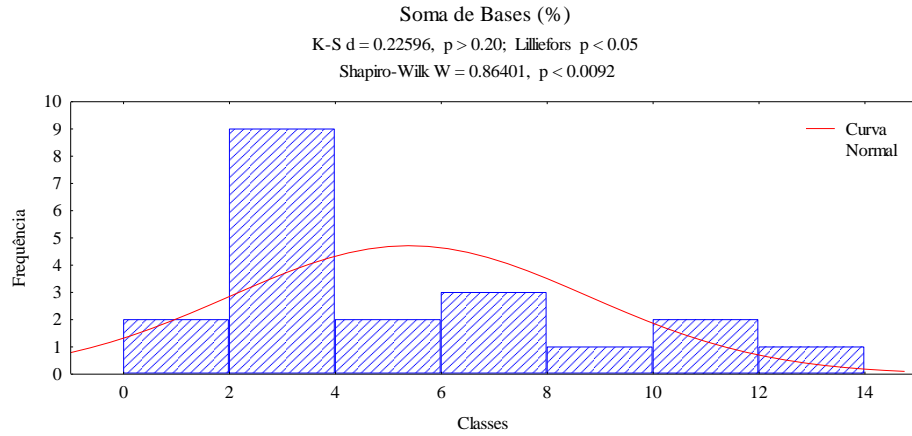
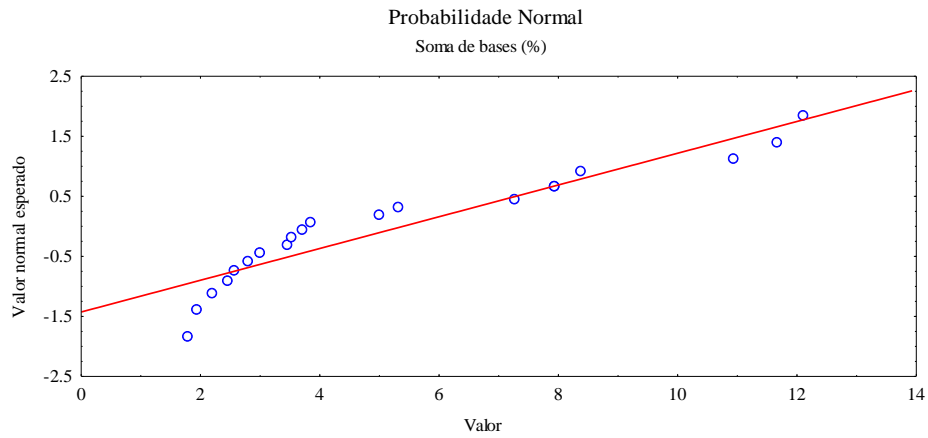


Figura 35. Estatística descritiva gráfica para os dados de alumínio (Al^{3+}) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.

(a)



(b)



(c)

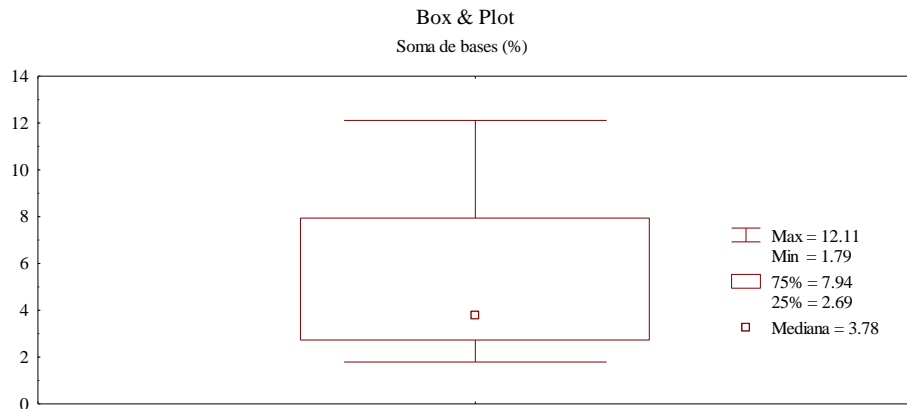


Figura 36. Estatística descritiva gráfica para os dados da soma de bases (SB) na área de recarga estudada: (a) histograma de frequência e curva normal; (b) curva de probabilidade normal e (c) gráfico Box & Plot.