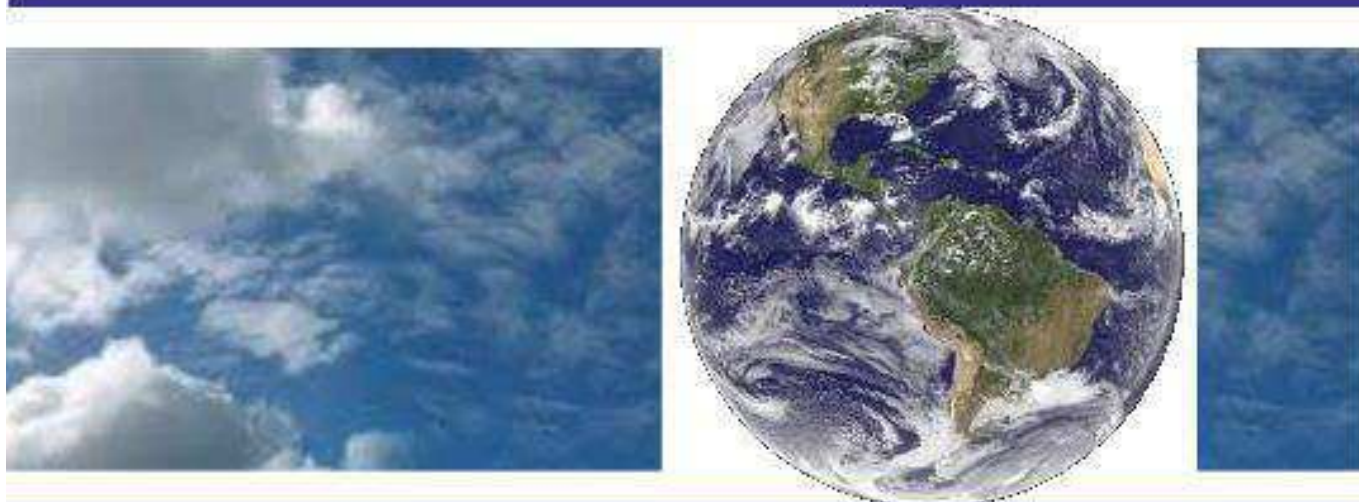


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
METEOROLOGIA**



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Antônia Silânia de Andrade**

**ANÁLISE DO PADRÃO DE DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE  
VARIÁVEIS PEDOLÓGICAS NO CARIRI ORIENTAL DO  
ESTADO DA PARAÍBA**

**Campina Grande, fevereiro de 2020**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE DO PADRÃO DE DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE  
VARIÁVEIS PEDOLÓGICAS NO CARIRI ORIENTAL DO ESTADO DA  
PARAÍBA**

ANTÔNIA SILÂNIA DE ANDRADE

**ORIENTADOR:** PROF. DR. MADSON TAVARES SILVA

CAMPINA GRANDE – PB

Fevereiro, 2020

ANTÔNIA SILÂNIA DE ANDRADE

**ANÁLISE DO PADRÃO DE DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE  
VARIÁVEIS PEDOLÓGICAS NO CARIRI ORIENTAL DO ESTADO DA  
PARAÍBA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande, seguindo às exigências para obtenção do Título de Mestre em Meteorologia.

Área de concentração: **Agrometeorologia**

Subárea: Estatística aplicada

CAMPINA GRANDE – PB

Fevereiro, 2020

A553a

Andrade, Antônia Silânia de.

Análise do padrão de distribuição espacial de variáveis pedológicas no Cariri Oriental do Estado da Paraíba / Antônia Silânia de Andrade. – Campina Grande, 2020.

89 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2020.

"Orientação: Prof. Dr. Madson Tavares Silva".

Referências.

1. Atributos do Solo. 2. Geoestatística. 3. Produtividade. I. Silva, Madson Tavares. II. Título.

CDU 631.4(043)

ANTÔNIA SILÂNIA DE ANDRADE

ANÁLISE DO PADRÃO DE DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE VARIÁVEIS  
PEDOLÓGICAS NO CARIRI ORIENTAL DO ESTADO DA PARAÍBA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 19/02/2020

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. MADSON TAVARES SILVA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. ROBERTO ALAN FERREIRA ARAÚJO  
Departamento de Engenharia Civil  
Centro Universitário de Patos

“Embora ninguém possa voltar atrás e  
fazer um novo começo, qualquer um pode  
começar agora e construir um novo fim.”

**Chico Xavier**

## **AGRADECIMENTOS**

Um dia fiz uma escolha! Decidi enfrentar um mundo desconhecido, de pessoas desconhecidas, de hábitos desconhecidos, optei por conhecer quem sou e o que poderia vir a ser! Esse desconhecido me fascina, me faz ir além e nessa busca me deparei com pessoas que deixaram suas marcas em minha vida, contribuíram significativamente de modo que hoje, as levo no lugar que reservei para os poucos, os especiais, que considero parte constituinte de mim, no meu coração, que a cada batida faz perceber que estou viva e pulsa em mim o desejo de viver e viver pelo que acredito e por minhas escolhas.

Agradeço a DEUS, por me amparar nos momentos difíceis, me dando força interior para superar as dificuldades, mostrando os caminhos nas horas incertas e me suprindo em todas as minhas necessidades;

A minha família em especial meus pais, Francisco e Bernadete, pela vida e educação, além do apoio e amor incondicional.

Ao meu orientador Madson Tavares. Obrigada por apostar em mim, por se fazer sempre presente. Sua competência e dedicação me inspiram, são marcas que levarei para a vida! Gratidão!

Agradeço a todos os amigos (Welinagila, Mariana, Lívia, Kamilla e Romero) pela ajuda e compreensão nos momentos difíceis, pelas ricas discussões, pelo constante apoio e estímulo e por tantas outras coisas que, por vezes, somente bons amigos podem fazer por nós.

Ao meu namorado, pelo companheirismo e amizade, por está sempre apoiando e incentivando a nunca desistir dos meus planos e objetivos;

Ao programa de pós-graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande (UF CG); e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo apoio concedido para a concretização desse trabalho;

Enfim, agradeço a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para minha qualificação profissional.

**OBRIGADA!**

# ANÁLISE DO PADRÃO DE DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE VARIÁVEIS PEDOLÓGICAS NO CARIRI ORIENTAL DO ESTADO DA PARAÍBA

## RESUMO

O solo é um sistema dinâmico e complexo a ser estudado, que demanda para fins de pesquisa um considerável número de amostras e análises. Com os métodos estatísticos multivariados podem-se criar condições mais favoráveis ao analisar as amostras e a redução e simplificação estrutural dos dados. Tendo como objetivo geral da pesquisa avaliar o padrão de distribuição espacial de variáveis pedológicas (químicas e físicas) no Cariri Oriental do Estado da Paraíba. Para alcançá-lo primeiro foi analisar os atributos químicos e físicos do solo por meio de técnicas de estatística descritiva e a partir da análise fatorial (AF) e assim determinar um índice de produtividade do solo. Avalizaram-se os atributos químicos e físicos, e em seguida, os dados foram submetidos a análises estatísticas multivariadas, utilizando também os Modelos de Regressivo Clássico (RC); Regressão Espacial Auto regressivo (MEAR) e Erro Espacial (MEE) no intuito de avaliar a variabilidade e caracterizar a dependência espacial entre alguns atributos do solo na área de estudo e investigar a associação entre a produtividade do algodão e do feijão com variáveis agrometeorológicas. Quando analisa-se os atributos após a rotação varimax, a porosidade define a relação entre o volume de poros e o volume total de solo, sofrendo influência tanto da textura como da estrutura do solo a verificar o dendograma constata-se que todos os grupos se diferenciaram entre si com base na resposta conjunta dos atributos físicos e químicos. Quanto ao IPS apresenta uma avaliação simultânea e integrada dos indicadores de solo, recomendando-se que sua aplicação considere fundamentalmente a classificação pedológica, com especial atenção à textura do solo e a classificação climática. Por fim, a estimativa de parâmetros dos modelos ajustados foi obtida utilizando o método de Máxima Verossimilhança. A avaliação do desempenho dos modelos foi realizada com base no coeficiente de determinação ( $R^2$ ), no máximo valor do logaritmo da função verossimilhança e no critério de informação bayesiano de Schwarz (BIC). Este estudo também permitiu verificar a correlação e autocorrelação espacial entre a produtividade do algodão, do feijão e dos elementos agrometeorológicos, por meio da análise espacial, usando de técnicas como o índice I de Moran. O estudo pôde demonstrar que, por meio dos indicadores de desempenho utilizados, os modelos MEAR e MEE ofereceram resultados melhores em relação ao modelo de regressão múltipla clássica.

**Palavras-Chave:** Atributos do Solo; Geoestatística; Produtividade.



# ANALYSIS OF THE SPATIAL DISTRIBUTION PATTERN OF PEDOLOGICAL VARIABLES IN THE ORIENTAL CARIRI OF THE STATE OF PARAÍBA

## ABSTRACTS

Soil is a dynamic and complex system to be studied, which requires a considerable number of samples and analyzes for research purposes. With multivariate statistical methods, more favorable conditions can be created by analyzing the samples and the reduction and structural simplification of the data. Having as general objective of the research to evaluate the pattern of spatial distribution of pedological variables (chemical and physical) in the Eastern Cariri of the State of Paraíba. To achieve this, it was first to analyze the chemical and physical attributes of the soil through descriptive statistics techniques and from factor analysis (AF) and thus determine a soil productivity index. Chemical and physical attributes were evaluated, and then the data were subjected to multivariate statistical analysis, also using the Classic Regressive Models (RC); Spatial Regression Auto regressive (MEAR) and Spatial Error (MEE) in order to assess variability and characterize the spatial dependence between some soil attributes in the study area and investigate the association between cotton and bean productivity with agrometeorological variables. When analyzing the attributes after varimax rotation, porosity defines the relationship between the pore volume and the total volume of soil, being influenced by both the texture and the structure of the soil verifying the dendrogram, it appears that all groups are differentiated between them based on the joint response of physical and chemical attributes. As for the IPS, it presents a simultaneous and integrated assessment of the soil indicators, recommending that its application consider fundamentally the pedological classification, with special attention to the soil texture and the climatic classification. Finally, the parameter estimation of the adjusted models was obtained using the Maximum Likelihood method. The performance evaluation of the models was performed based on the coefficient of determination ( $R^2$ ), the maximum value of the likelihood function logarithm and the Schwarz Bayesian information criterion (BIC). This study also allowed to verify the correlation and spatial autocorrelation between the productivity of cotton, beans and agrometeorological elements, through spatial analysis, using techniques such as Moran's index I. The study was able to demonstrate that, using the performance indicators used, the MEAR and MEE models offered better results in relation to the classic multiple regression model.

**Keywords:** Soil attributes; Geostatistics; Productivity.

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1

Figura 1. Fluxograma da dissertação. ....	22
Figura 2. Mapa de solos da microrregião do Cariri Oriental.....	36
Figura 3. Variabilidade da distribuição dos componentes físicos do solo para a área de estudo. .....	44
Figura 4. Variabilidade da distribuição do carbono orgânico e da matéria orgânica do solo da área de estudo. ....	45
Figura 5. Scree plot - Curva da variância dos fatores. ....	47
Figura 6. Distribuição dos fatores F1 (Químico) x F2 (Físico), mostrando a relação dos atributos químicos e físicos do solo na área de estudo (A) e distribuição os pontos observados de acordo com as cargas fatoriais (B). ....	49
Figura 7. Distribuição da frequência acumulada dos percentis do IPS.....	51
Figura 8. Distribuição espacial das variáveis (A) Matéria Orgânica (%) – MO; e (B) Nitrogênio (%) – N, na Microrregião do Cariri Oriental da Paraíba. ....	53
Figura 9. Distribuição espacial das variáveis granulométricas (A) Areia (%); e (B) Silte (%), na Microrregião do Cariri Oriental da Paraíba. ....	54
Figura 10. Distribuição espacial das variáveis (A.) Fósforo - P; e (B.) Potássio – k, na Microrregião do Cariri Oriental da Paraíba.....	55
Figura 11. Distribuição espacial das variáveis (A.) Densidade do Solo – Ds; e (B.) Porosidade total – Pt, na Microrregião do Cariri Oriental da Paraíba. ....	56
Figura 12. Dendrograma de agrupamento das interações entre as áreas analisadas.....	57

## LISTA DE TABELAS

### CAPITULO 2 - ANÁLISE MULTIVARIADA DE ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DE SOLOS DO SEMIÁRIDO DA PARAÍBA

**Tabela 1.** Estatística descritiva dos atributos químicos e físicos dos solos da microrregião do Cariri Oriental..... **Erro! Indicador não definido.**4

**Tabela 2.** Estatística do teste Kaiser Meyer Olkin – KMO para adequação da amostra ... **Erro! Indicador não definido.**3

**Tabela 3.** Variância total explicada pelos fatores. .... **Erro! Indicador não definido.**5

**Tabela 4.** Fatores extraídos por componentes principais, destacando os atributos químicos e físicos do solo com cargas superiores a 0,6..... **Erro! Indicador não definido.**5

**Tabela 5.** Matriz de componentes após cargas rotacionadas pelo método VARIMAX..... 47

### CAPITULO 3 - MODELO DE REGRESSÃO ESPACIAL PARA ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DO ALGODÃO E DO FEIJÃO REGIÃO DO CARIRI ORIENTAL PARAIBANO

**Tabela 1.** Classificação da intensidade da correlação.....71

**Tabela 2.** Modelos de regressão ajustados para produção de Algodão de acordo com as variáveis de Clima na microrregião do Cari Oriental da Paraíba.....78

**Tabela 3.** Modelos de regressão ajustados para produção de Algodão de acordo com as variáveis de Solo na microrregião do Cari Oriental da Paraíba.....78

**Tabela 4.** Modelos de regressão ajustados para produção de Feijão de acordo com as variáveis de Clima na microrregião do Cari Oriental da Paraíba.....79

**Tabela 5.** Modelos de regressão ajustados para produção de Feijão de acordo com as variáveis de Solo na microrregião do Cari Oriental da Paraíba..... 80

## Sumário

<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>13</b>
<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1. JUSTIFICATIVA.....	16
2. OBJETIVO GERAL .....	17
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	18
3.1 Variações de parâmetros do solo .....	18
3.2 Variabilidades Espaciais de Atributos Físicos e Químicos do Solo.....	18
3.3 Geoestatística como ferramenta de pesquisa na agricultura .....	19
3.4 Análise multivariada .....	20
4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	22
5. REFERÊNCIAS.....	23
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>30</b>
<b>ANÁLISE MULTIVARIADA DE ATRIBUTOS FÍSICOS E</b>	<b>30</b>
<b>QUÍMICOS DE SOLOS DO SEMIÁRIDO DA PARAÍBA .....</b>	<b>30</b>
RESUMO .....	30
ABSTRACT .....	31
1. INTRODUÇÃO .....	32
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
2.1 Área de estudo .....	35
2.2 Atributos de solos.....	37
2.3 Análises estatísticas.....	38
<b>2.3.1 Estatística descritiva.....</b>	<b>38</b>
2.4 Análise fatorial (AF) .....	38
2.5 Índice de produtividade do solo (IPS).....	40
2.6 Métodos geoestatísticos.....	41
<b>2.6.1 Interpolação por Inverse Distance Weighted (IDW).....</b>	<b>41</b>
2.7 Análise de agrupamento hierárquico (AA).....	42
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	44
4. CONCLUSÕES .....	59
5. REFERÊNCIAS.....	60
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>65</b>
<b>MODELO DE REGRESSÃO ESPACIAL PARA ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE</b>	<b>65</b>
<b>AGRÍCOLA NA REGIÃO DO CARIRI ORIENTAL PARAIBANO .....</b>	<b>65</b>
RESUMO .....	65
ABSTRACT .....	66

1. INTRODUÇÃO .....	67
2. MATÉRIAS E MÉTODOS .....	69
2.1 Área de estudo .....	69
2.2 Dados.....	69
2.3 Índice I de Moran (I) .....	70
<b>2.3.1 Diagrama de Espalhamento de Moran .....</b>	<b>70</b>
2.4 Modelos de Regressão Espacial.....	72
<b>2.4.1 Regressão Clássica (RC).....</b>	<b>72</b>
<b>2.4.2 Modelo espacial Auto regressivo (MEAR).....</b>	<b>72</b>
<b>2.4.3 Modelo de erro espacial (MEE) .....</b>	<b>73</b>
<b>2.4.5 Seleção de modelos .....</b>	<b>74</b>
3. RESULTADOS E DISCURSÕES .....	75
4. CONCLUSÕES .....	84
5. REFERENCIAS.....	85
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>88</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>88</b>
ANEXO.....	89

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos têm mostrado a importância de se medir e obter atributos da variação espacial e temporal de atributos do solo que afetam o rendimento de espécies vegetais, com o objetivo de aperfeiçoar o gerenciamento do processo de produção agrícola (Bognola *et al.*, 2008).

Os solos agricultáveis das regiões tropicais, por estarem expostos a condições climáticas intensas, necessitam de proteção contínua. Nas regiões semiáridas, que são caracterizadas por altas temperaturas, reduzida pluviosidade e solos pouco intemperizados, a situação é ainda mais delicada. Somadas a essas condições edafoclimáticas, observa-se no semiárido brasileiro a adoção de sistemas agrícolas totalmente extrativistas e que, por estar inserido nessa condição, configura-se em um ambiente extremamente frágil, tanto do ponto de vista ambiental quanto socioeconômico (Sánchez, 2001; Maia *et al.*, 2006).

Os principais determinantes ambientais da produtividade agrícola são o clima, a topografia, material de origem e o solo. Numerosos estudos têm sido conduzidos para verificar as relações existentes entre o crescimento das produções agrícolas e os atributos físicos, químicos e biológicos dos solos, principais responsáveis pelo potencial produtivo de uma área (Schneider, 2008). Quando os fatores climáticos e fisiográficos se mantêm constantes, mediante procedimento adequado de estratificação, o solo é o fator que tem relação com o crescimento vegetal (Ralston, 1967). Os atributos do solo são um dos fatores que podem influenciar na qualidade final da produção agrícola, por sua interferência na taxa de crescimento das áreas agricultáveis e, conseqüentemente, na qualidade da matéria prima produzida (Rigatto; Dedecek; Mattos, 2004).

A determinação dos atributos do solo é um fator básico na condução para o planejamento da produção agrícola, evitando a degradação de seus atributos, visando à produção sustentável (Ortiz *et al.*, 2006) e, sobretudo contribuindo para a aplicação de técnicas de precisão.

A aplicação de técnicas de geoestatística permite modelar e descrever a variabilidade espacial dos atributos do solo (Siqueira *et al.*, 2010; Oliveira *et al.*, 2015a), favorecendo a construção de mapas de isolinhas com o nível de detalhe desejável para maior compreensão das relações entre o solo e as espécies vegetais. O conhecimento da variabilidade espacial e temporal dos atributos do solo que afetam a produção e a produtividade das culturas permite

realizar intervenções precisas, para obter o máximo rendimento de acordo com as potencialidades do solo e dos demais fatores ambientais locais (Pelissari; Caldeira; Santos, 2014).

Outra maneira de avaliar os atributos do solo é com o uso da estatística multivariada. Esta ferramenta permite obter informações e interpretações que poderiam não ser perceptíveis com o uso da análise estatística univariada (Cruz; Regazzi, 2001). Estudos na ciência do solo, nos quais muitas informações necessitam ser interpretadas, adotaram a estatística multivariada e a integraram com a estatística espacial (Facchinelli; Sacchi; Mallen, 2001; Boruvka *et al.*, 2007).

O uso de técnicas multivariadas associadas à geoestatística tem permitido abordagens eficientes, principalmente por considerar, segundo Silva *et al.* (2010), simultaneamente, a variação espacial de um número elevado de variáveis que influenciam os sistemas de produção agrícola.

Os levantamentos dos recursos naturais têm se desenvolvido em trabalhos de grande importância na direção da utilização de um determinado recurso, como também para subsidiar os estudos direcionados para o mapeamento e gerenciamento ambiental (Francisco, 2010). Para a FAO (1976), a avaliação de terras é o processo de estimar o desempenho (aptidão) da terra, quando usada para propósitos específicos, envolvendo execução e interpretação de levantamentos e estudos das formas de relevo, solos, vegetação, clima e outros aspectos da terra. Seu objetivo é identificar e proceder à comparação dos tipos de uso da terra mais promissores, em termos da aplicabilidade aos objetivos da avaliação (Calderano Filho *et al.*, 2007).

De acordo com Calderano Filho *et al.* (2007), todos têm como ponto de partida as unidades de mapeamento provenientes dos levantamentos pedológicos, em que a interpretação e a avaliação da eficiência é feita considerando-se grupos ou tipos de utilização das terras. Esses sistemas situam as terras mediante o tipo de utilização, evidenciando uma indicação de uso correto e adequado de uma determinada superfície de terra, tanto em função da viabilidade de melhoramento frente aos fatores básicos de limitação de uso como em função dos graus de limitação que porventura ocorram após a utilização de práticas agrícolas.

A aptidão pedológica refere-se às potencialidades e limitações distintas dos solos para a produção das culturas de forma sustentável, inter-relacionando parâmetros e atributos (Silva *et al.*, 2013). Na avaliação do potencial de um determinado ambiente para produção de lavouras nas condições naturais basicamente são consideradas as exigências das culturas em relação ao solo e em relação ao clima (Marques *et al.*, 2010).

Conforme Sousa *et al.* (2003), a produção agrícola é fortemente influenciada pelas condições edafoclimáticas do local e tem sido um dos principais fatores limitantes da produção. E dependendo da disponibilidade e da qualidade dos solos, a capacidade produtiva do setor agrícola pode tornar-se mais limitante. De acordo com Amorim Neto *et al.* (1997), técnicas de identificações de áreas aptas com base em informações do solo e clima propiciam a definição dos ambientes oportunos para exploração agrícola, contribuindo com a redução dos riscos de degradação do ambiente.

Conforme Silva *et al.* (2013), conhecer, caracterizar e espacializar os potenciais e as restrições dos ambientes, numa escala adequada, possibilitam ordenar os espaços de forma racional e essenciais no planejamento de atividades agrícolas. A aplicação desses conhecimentos nas atividades rurais pode minimizar os efeitos da degradação dos recursos solo, água e vegetação.

Mapas pedológicos em escalas generalizadas, englobando todo um território, possibilitam a visualização de grandes áreas, integrando a distribuição espacial e a variação existente na população dos solos, constituindo registros importantes na caracterização dos recursos, na direção de planejamentos regionais do uso da terra (Rossi e Oliveira, 2000).

A principal exigência para se estabelecer o potencial de uso de um solo provém de um conjunto de interpretações do próprio solo e do meio onde ele se desenvolve (Ranzini, 1969). Tais interpretações pressupõem a disponibilidade de certo número de informações preexistentes, que têm que ser fornecidas por levantamentos adequados da área de estudo, ou de levantamentos pedológicos preexistentes. Para que as informações contidas nos levantamentos sejam mais bem utilizadas, é necessário a partir destes levantamentos, que sejam compostos mapas temáticos interpretativos baseados nos critérios da classificação técnica utilizada (Ramalho Filho e Be Ek, 1995).

Portanto, a cartografia de solos é imprescindível à conservação e ao gerenciamento dos recursos naturais; sua execução requer o conhecimento pedológico, a compilação de dados ambientais (clima, geologia, vegetação e relevo) (Carvalho et al., 2008).



## 1. JUSTIFICATIVA

Uma série de fatores, dentre eles, os processos de intemperismo, as características climáticas da área e a topografia da região entre outros fatores. Haja vista que essas texturas são estimadas com métodos mais sofisticados, ainda apresentam incertezas relativas à sua representatividade espacial.

Com o uso da análise multivariada é possível que o pesquisador disponha de vários atributos a serem analisados e estudar ao mesmo tempo suas relações para então tirar conclusões amplas a respeito de um determinado sistema de manejo. A grande vantagem é que essas técnicas apresentam uma abordagem mais abrangente do estudo em questão e que através da avaliação simultânea podem-se fornecer informações mais precisas a respeito das variáveis estudadas (Almeida Júnior, 2012). Além disso, possibilita que se faça uma síntese da dimensão de análises com múltiplas respostas com o objetivo de simplificar seu entendimento, visualização e interpretação e ainda reter informações suficientes para uma adequada representação dos resultados (Santos, 2010).

Assim, com base no exposto, estudos que busquem analisar o padrão de distribuição espacial de variáveis pedológicas (químicas e físicas) no Cariri Oriental do Estado da Paraíba, que favorecerão o conhecimento e a melhor compreensão dos efeitos das variáveis, tanto para melhorias nas modelagens da variabilidade espacial quanto à produtividade do solo. Essas informações viabilizarão medidas mais eficazes para a tomada de decisões em relação ao uso do solo e preencher lacunas ainda existentes nesta área do conhecimento.

## **2. OBJETIVO GERAL**

Avaliar o padrão de distribuição espacial de variáveis pedológicas (químicas e físicas) no Cariri Oriental do Estado da Paraíba.

### **2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analisar os atributos químicos e físicos do solo por meio de técnicas de estatística descritiva.
- A partir da análise fatorial (AF) determinar um índice qualitativo de produtividade do solo.
- A partir da análise de agrupamento (AA) determinar padrões homogêneos de distribuição dos atributos do solo.
- Avaliar a variabilidade espacial dos atributos do solo e de variáveis climáticas a partir de técnicas de análise espacial.

### **3. REVISÃO DE LITERATURA**

#### **3.1 Variações de parâmetros do solo**

As variações de parâmetros do solo são devido às diferentes intensidades de atuação dos processos de sua formação e também à intervenção antrópica. A produtividade agrícola de uma área é influenciada por vários fatores, dentre eles, a fertilidade dos solos, os quais podem ser naturalmente férteis ou se tornarem férteis por meio de manejo adequado (Mendes et al., 2007).

O estudo da variabilidade espacial das propriedades dos solos é de fundamental importância em áreas onde o solo está submetido a diferentes manejos, sendo assim a análise geostatística pode indicar alternativas não apenas para a diminuição dos efeitos da variabilidade do solo na produção das culturas, mas também para aumentar a possibilidade de se estimarem respostas dos atributos do solo em função de determinadas práticas de manejo (Trangmar et al., 1985; Ovalles; Rey, 1994). Além disso, a eficiência das estratégias de amostragem do solo pode ser ampliada com a incorporação de um modelo de variabilidade espacial (Brus, 1993).

#### **3.2 Variabilidades Espaciais de Atributos Físicos e Químicos do Solo**

Áreas consideradas pedologicamente semelhantes podem apresentar variabilidade distinta em atributos quando submetidas às diferentes práticas de manejo. Portanto o manejo inadequado pode alterar os atributos químicos, físicos, mineralógicos e biológicos, com impacto principalmente nas camadas superficiais do solo (Marques Júnior et al., 2000).

O conhecimento da variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo torna-se, então, importante para definir as práticas a serem adotadas desde que a produtividade se associe com os atributos químicos, como acidez disponibilidade de nutrientes, e físicos, como granulometria e escassez ou excesso de água (Souza et al., 2001; Cerri & Magalhães, 2012).

Segundo Souza (2004), a variabilidade espacial dos solos está presente desde a sua formação e continua após o solo atingir o seu estado de equilíbrio dinâmico. Este fato dá-se porque o próprio material de origem não é uniforme em toda sua extensão, fazendo com que ocorra uma variação espacial e constante dos atributos do solo.

Em relação às propriedades físicas do solo, a maioria dos estudos tem exibido ampla diversidade de resultados, com variação de local para local, com presença ou ausência de continuidade espacial, possivelmente associada ao sistema de manejo de solo, de culturas adotado e das características naturais do solo, relacionado com os fatores e processos de formação dos solos (Grego; Vieira, 2005).

Portanto o registro da variabilidade espacial de atributos granulométricos é considerado um importante instrumento para o uso na otimização das aplicações de insumos, no auxílio do planejamento do controle da erosão, aumento da produtividade e consequente diminuição dos problemas ambientais (Wilding; Drees, 1983).

### **3.3 Geoestatística como ferramenta de pesquisa na agricultura**

A geoestatística é um ramo da estatística espacial que se baseia na teoria das variáveis regionalizadas. Ela parte do princípio que a diferença de valor entre duas observações quaisquer é função da distância e da direção em que ocorre este afastamento entre os pontos de medida, ou seja, a dependência espacial manifesta-se como uma correlação entre as amostras que diminui à medida que a distância entre os pontos amostrais aumentam e desaparece completamente quando a distância entre os pontos é suficientemente grande, os quais, neste caso, são considerados estatisticamente independentes (VIEIRA, 2000).

A análise geoestatística é utilizada para identificar a distribuição e o padrão espacial das características estudadas, definindo modelos de semivariograma teóricos que exibem a autocorrelação da variável em diferentes direções e distâncias de separação. O uso da geoestatística tem como objetivo estudar a variabilidade espacial de atributos físicos e químicos do solo, assim como do rendimento das culturas (Lima et al., 2007). A krigagem ordinária é o método de interpolação mais usado em geoestatística (Pereira et al., 2013) e utiliza um estimador de interpolação linear imparcial e com variância mínima garante uma estimativa mais precisa dos dados (Aquino et al., 2012).

Para Souza et al. (2009a) quando um atributo do solo apresenta variação de um lugar para outro com algum grau de continuidade, a geoestatística é a ferramenta mais indicada para ser utilizada, pois permite uma visão com base na dependência espacial, o que é importante para o planejamento adequado do manejo do solo.

Em termos gerais, a presente análise permite identificar a existência da variabilidade e distribuição espacial de variáveis do solo, constituindo assim um importante instrumento na análise e descrição detalhada dos atributos do solo (Campos et al., 2007). No geral, o uso da

mesma implica na definição de um plano de amostragem, para o qual se define número e espaçamento dos pontos onde as amostras serão coletadas. Na literatura essa definição varia muito, conforme estudos de Alves et al. (2014), Lima et al. (2015), Cunha et al. (2017), Santos et al. (2012), Oliveira Junior et al. (2011) e Bottega et al. (2013), os mesmos utilizaram 28; 49; 88; 126; 135 e 181 pontos, respectivamente no estudo de diversos atributos físicos e químicos do solo, tais como: condutividade hidráulica, densidade do solo, porosidade, textura, frações granulométricas areia, argila e silte, teores de cálcio, magnésio e fósforo.

O semivariograma é uma função matemática fundamental na aplicação da respectiva análise geoestatística, ele determina, sobretudo a dependência entre duas variáveis aleatórias regionalizadas locais, levando em consideração à auto correlação em função da distância e da direção delas (Mello; Oliveira, 2016).

Uma opção de análise da variabilidade espacial dos atributos é associar ao uso de técnicas de análise multivariada, que visa à redução dimensional do número de variáveis, à geoestatística. A redução e a simplificação do número de variáveis, criando novas variáveis interpretativas, permitirão uma maior facilidade de interpretação dos mapas (Silva et al., 2010).

### **3.4 Análise multivariada**

Segundo Silva et al. (2012) a análise multivariada combinada com a geoestatística é eficiente para quantificar e determinar a estrutura de dependência espacial da fertilidade do solo e da produtividade. Córdoba et al. (2012) complementam que os modelos geoestatísticos tradicionais, que se baseiam no conceito de autocorrelação para a indicação da presença de correlações ou semelhanças entre as observações pertencentes no espaço, dispõem de efeito variável. Microvariações do terreno podem provocar variações geoespaciais dos atributos do solo (Aquino et al., 2015) e, desse modo, a adição de técnicas estatísticas são necessárias, pois a maioria dos solos pode mudar tanto espacialmente, quanto também ao longo do tempo (Souza et al., 2006). Neste sentido, o uso de técnicas de análise univariada e multivariada pode explicar tanto as relações dos atributos do solo em comparação aos ambientes, como também as intercorrelações entre as variáveis, e identificar quais os atributos do solo que mais discriminam os ambientes.

Métodos de análise univariada são normalmente aplicados visando à identificação das diferenças entre tratamentos, considerando individualmente cada atributo avaliado. Tais

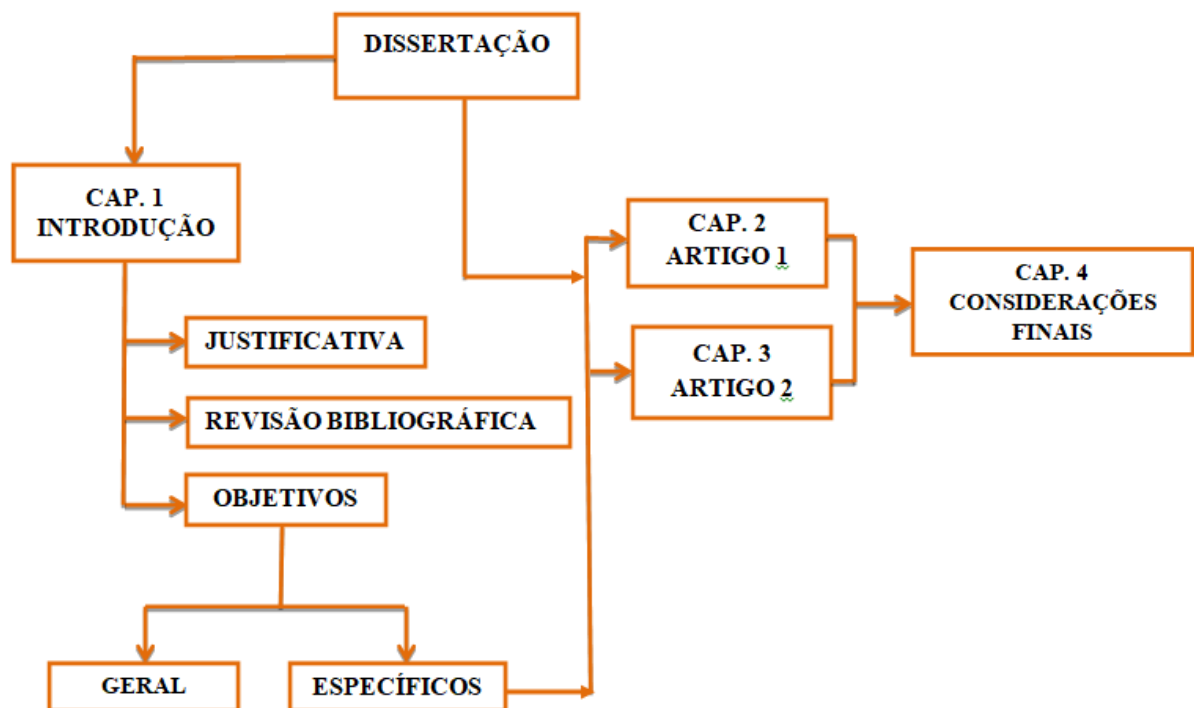
métodos não consideram o efeito simultâneo dos parâmetros, dessa forma quando se tem um grande número de variáveis envolvidas, eleva-se, muitas vezes, a dimensão do problema, ao ser analisado por meio de métodos estatísticos univariados (Silva et al., 2015). Uma opção de utilizada para facilitar o trabalho com dados que apresentam grande número de variáveis é pelo uso de análise multivariada (Silva et al., 2010). As análises estatísticas multivariadas, como a fatorial em componentes principais são ferramentas que permitem resumir todas as informações contidas em um determinado número de variáveis originais em grupos menores, denominados fatores, cujas combinações lineares explicam o máximo da variância contida nas variáveis originais (Hair et al., 2007).

Quando o objetivo é a comparação entre os ambientes para diferentes variáveis simultaneamente, uma opção é o uso de análise de variância multivariada. De modo geral, as técnicas de estatísticas multivariadas são utilizadas para simplificação dos dados por meio da redução de sua dimensão, agrupamentos dos dados, estudo da dependência entre os dados e a construção de testes de hipóteses. Para isso, existem as técnicas de análise fatorial e de componentes principais.

Na análise fatorial, há presença de erro, ao qual representa uma parcela da variância das variáveis não explicadas pelos valores comuns (Reis, 2001). Assim, se alguma das variáveis apresentar uma combinação linear dos fatores, com autovalores (valores comuns) próximos de zero, sua contribuição para explicar a variância dos dados será pequena, de tal forma que a retirada dessas componentes não implicará em perda significativa de informação (Cunha, 2016).

#### 4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A devida dissertação será elaborada de acordo com a seguinte estrutura: O **Capítulo 1** apresentará a introdução, justificativa e objetivos. O **Capítulo 2** apresentará uma análise estatística dos atributos químicos e físicos dos solos da microrregião do Cariri Oriental e a determinação do índice de produtividade do solo. No **Capítulo 3** tratará de avaliar a variabilidade espacial dos atributos do solo e de variáveis de climáticas a partir de técnicas de análise espacial, utilizando o índice de I Moran e modelos de regressão espacial. Trazendo a análise da série temporal das culturas na área de estudo, mostrando mapa de produtividade acumulada ao longo dos anos e o índice de I Moran. O **Capítulo 4** exibirá as considerações finais da dissertação assim como sugestões para trabalhos posteriores. A seguir apresenta-se fluxograma da organização da dissertação (Figura 1).



Ativar c

**Figura 1.** Fluxograma da dissertação.

## 5. REFERÊNCIAS

ALVES, S. M. F.; QUEIROZ, D. M.; ALCÂNTARA, G. R.; REIS, E. F. Variabilidade espacial de atributos físico-químicos do solo usando técnicas de análise de componentes principais e geostatística. *Bioscience Journal*, v. 30, n. 1, p. 22-30, 2014.

AMORIM NETO, M. DA S.; BELTRÃO, N. E. DE M.; MEDEIROS, J. DA C. Indicadores edafoclimáticos para o zoneamento do algodoeiro arbóreo. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 10, 199, Piracicaba. Anais...Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1997. p. 369-371.

AQUINO, R. E.; CAMPOS, M. C. C.; JUNIOR, J. M.; OLIVEIRA, I. A.; TEIXEIRA, D. B.; CUNHA, J. M. Use of scaled semivariograms in the planning sample of soil physical properties in southern Amazonas, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 39, n. 2, p. 21-30, 2015.

AQUINO, R. F.; SILVA, M. L. N.; FREITAS, D. A. F. de; CURI, N.; MELLO, C. R. de; AVANZI, J. C. Spatial variability of the rainfall erosivity in southern region of Minas Gerais state, Brazil. *Ciência e Agrotecnologia, Lavras*, v. 36, n. 5, p. 533-542, 2012.

BOGNOLA, I.; RIBEIRO JÚNIOR, P.; SILVA, E.; LINGAU, C.; HIGA, A. Modelagem uni e bivariada da variabilidade espacial de rendimento de *Pinus taeda* L. *Revista Floresta*, v. 38, n. 2, p. 373-385, 2008.

BORUVKA, L.; MLÁDKOVÁ, L.; PENÍZEK, V.; DRÁBEK, O.; VASÁT, R. Forest soil acidification assessment using principal component analysis and geostatistics. *Geoderma, Amsterdam*, v.140, p.374-382, 2007.

BOTTEGA, E.L.; QUEIROZ, D.M.; PINTO, F.A.C.; SOUZA, C.M.A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. *Revista Ciência Agrônômica, Fortaleza*, v.44, n.1, p.1-9, 2013

BRUS, D. J. Incorporating models of spatial variation in sampling strategies for soil. Tese (Doutorado) Wageningen, Agricultural University, 1993. 211p.

CALDERANO FILHO, B.; GUERRA, A. J. T.; PALMIERI, F.; ARGENTO, M. S. F.; CORREIA, J. R.; RAMALHO FILHO, A. Aptidão agroecológica de terras: proposta de avaliação em paisagens



rurais montanhosas ocupadas por pequenos agricultores na serra do mar. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, v.24, n.1/3, p.39-75, 2007.

CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MONTANARI, R.; SIQUEIRA, D. S. Variabilidade espacial da textura de solos de diferentes materiais de origem em Pereira Barreto, SP. *Revista Ciência Agronômica*, v. 38, n. 2, p. 149-157, 2007.

CARVALHO, L. G. DE; OLIVEIRA, M. S. DE; ALVES, M DE C.; VIANELLO, R. L.; SEDIYAMA, G. C.; CASTRO NETO, P.; DANTAS, A. A. A. Clima. In: SCOLFORO, J. R. S.; CARVALHO, L. M. T.; OLIVEIRA, A. D. Zoneamento ecológico-econômico do Estado de Minas Gerais. Lavras: Editora UFLA, 2008. 161p. Disponível em: <http://www.zee.mg.gov.br/>. Acesso em: 27 de junho de 2019.

Cerri, D. G. P.; Magalhães, P. S. G. Correlation of physical and chemical attributes of soil with sugarcane yield. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.47, p.613-620. 2012.

CÓRDOBA, M.; BRUNO, C.; BALZARINI, M.; COSTA, J. L. Análisis de componentes principales con datos georreferenciados Una aplicación en agricultura de precisión. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias / Universidade Nacional de Cuyo, Mendoza*, v. 44, n. 1, p. 27-39, 2012

CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J. Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. 2.ed. rev. Viçosa: UFV, 2001. 390p.

CUNHA, J. M. Atributos do solo e emissão de CO<sub>2</sub> em Terra Preta Arqueológica preservada e sob cultivo em Novo Aripuanã, Amazonas, Brasil. 2016. 98p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT, Cuiabá, 2016.

CUNHA, J. M.; GAIO, D. C.; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; SILVA, D. M. P.; LIMA, A. F. L. Atributos físicos e estoque de carbono do solo em áreas de Terra Preta Arqueológica da Amazônia. *Revista Ambiente & Água*. v. 12, n. 2, p. 263-281, 2017

FACCHINELLI, A.; SACCHI, E.; MALLIN, L. Multivariate statistical and GIS based approach to identify heavy metal sources in soils. *Environmental Pollution*, London, v.114, n.3, p. 313-324. 2001.  
FAO. A Framework for Land Evaluation. In: FAO. *Soils Bulletin*, 3. Rome, 1976. 72p

FRANCISCO, P. R. M. Classificação e mapeamento das terras para mecanização do Estado da Paraíba utilizando sistemas de informações geográficas. 122f. Dissertação (Manejo de Solo e Água). Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba. Areia, 2010.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de propriedades físicas de solo em uma parcela experimental. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.29, n.2, p.169 - 177, 2005.

HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R.L.; BLACK, W.C. *Análise multivariada de dados*. 5.ed. Porto Alegre: Bookman, 593p. 2007.

LIMA, C. G. da R.; CARVALHO, M. de P.; MELLO, L. M. M. de; LIMA, R. C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de forragem, a porosidade total e a densidade do solo de Pereira Barreto (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1233-1244, 2007.

LIMA, F. V.; SILVINO, G. S.; MELO, R. S. S.; ELDER CUNHA LIRA, E. C.; RIBEIRO, T. S. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em área de encosta sob processo de degradação. *Revista Caatinga*, Mossoró, v. 28, n. 4, p. 53 – 63, 2015.

MAIA, S. M. F.; XAVIER, F. A. S.; OLIVEIRA, T. S.; MENDONÇA, E. S. & ARAÚJO FILHO, J. A. Impactos de sistemas agroflorestais e convencional sobre a qualidade do solo no semiárido cearense. *Revista Árvore*, Viçosa, v.30, n.5, p.837-848, 2006.

MARQUES JÚNIOR, J.; SANCHEZ, R. B.; PEREIRA, G. T.; CORÁ, J. E. Variabilidade espacial de propriedades químicas e físicas de LATOSSOLOS em áreas de cerrado sob cultivo de café, em Patrocínio, MG. In: BALASTREIRE, L. A. (ed) *O estado-da-arte da agricultura de precisão no Brasil*. Piracicaba: L. A. Balastreire, p.105-112, 2000.

MARQUES, F. A.; ARAÚJO FILHO, J. C. DE; BARROS, A. H. C.; LOPES, E. H. B.; BARBOSA, G. M. N. Aptidão pedoclimática das culturas dos feijões caupi e comum para o estado de Alagoas. In: *Congresso Brasileiro de Ciência do solo*, 33, Uberlândia, 2010. *Anais...Uberlândia: RBCS*, 2010. p.1-4  
MELLO, Y. R.; OLIVEIRA, T. M. N. *Análise Estatística e Geoestatística da Precipitação Média para o Município de Joinville (SC)*. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, n. 2, 229-239, 2016.

MENDES, A. M. S.; DUDA, G. P.; LIMA, J. A. G.; AMORIN, L. B. Variabilidade espacial das características químicas de um Cambissolo cultivado com mamão no semiárido do Rio Grande do Norte. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*. Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, v. 7 n.2, p.169-174. 2007.

MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de LATOSSOLOS sob cultivo de cana-de açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.40, n.1, p.69-77, 2005.

OLIVEIRA I.A.; CAMPOS, M.C.C; MARQUES JUNIOR, J; AQUINO, R.E; TEIXEIRA, D.B; SILVA, D.M.P. Use of Scaled Semivariograms in the Planning Sample of Soil 49 Physical Properties in Southern Amazonas, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.39, n.1, p.31-39, 2015b.

OLIVEIRA JUNIOR, J. C.; SOUZA, L. C. P.; MELO, V. F; ROCHA, H. O. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de solos da formação Guabirotuba, Curitiba (PR). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, n. 5, p. 1481-1490, 2011

ORTIZ, J.L.; VETTORAZZI, C.A.; COUTO, H.T.Z.; GONCALVES, J.L.M. Relações espaciais entre o potencial produtivo de um povoamento de eucalipto e atributos do solo e do relevo. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, n.72, p.67-79, 2006.

OVALLES, F.; REY, J. Variabilidad interna de unidades de fertilidad en suelos de la depresión del Lago de Valencia. *Agronomia Tropical*. Venezuela, v. 44: n.1, p.41- 65, 1994.

PELISSARI, A. L.; CALDEIRA, S. F.; SANTOS, V. S. Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo em povoamento de *Tectona grandis*. *Cerne*, Lavras, v. 20, n. 3, p. 377-384, 2014.

PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. de; TEIXEIRA, D. de B.; MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J. Optimization of the sampling scheme for maps of physical and chemical properties estimated by kriging. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 1128-1135, 2013.

RALSTON, C.W. Recognition and mapping of site types for afforestation. In: *FAO Word Symposium on man-made forest and their industrial importance*. Proceedings. Canberra, 1967. v.1, p.172-87.

RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K. J. Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras. 3.a ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1995. 65p.

RANZINI, G. Manual de levantamento de solos. Editora Edgard Blucher Ltda. São Paulo, 1969, 2. ed. 128p

REIS, E. Estatística multivariada aplicada. 2ª ed. Lisboa: Edições Sílabo, 2001. 343p

RIGATTO, P. A.; DEDECEK, R. A.; MATTOS, J. L. M. Influência dos atributos do solo sobre a qualidade da madeira de *Pinus taeda* para produção de celulose Kraft. *Revista Árvore*, Viçosa, v.28, n.2, p. 267-273 ,2004.

ROSSI, M.; OLIVEIRA, J. B. de. O mapa pedológico do Estado de São Paulo. O Agrônomo, v.52, n.1, 2000.

SÁNCHEZ, M. D. Panorama dos sistemas agroflorestais pecuários na América Latina. In: CARVALHO, M. M.; ALVIM, M. J. & CARNEIRO, J. C. Sistemas agroflorestais pecuários: opções de sustentabilidade para áreas tropicais e subtropicais. Juiz de Fora: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de leite, 2001. p.9-17.

SANTOS, L. A. C. dos; CAMPOS, M. C. C.; COSTA, H. S.; PEREIRA, A. R. Caracterização de solos em uma topos sequência sob terraços aluviais na região do médio rio Madeira (AM). *Ambiência*, v. 8, n. 2, p. 319-331, 2012.

SCHNEIDER, P. R. Introdução ao manejo florestal. 2. ed. Santa Maria: FACOSUFISM, 2008. 566 p.  
SERVAIN, J.; WAINER, I.; AYINA, H. L.; ROQUET, H. Relationship between the simulated climatic variability modes of the tropical Atlantic, *International Journal of Climatolol*, [s.l.], v. 20, n. 9, p. 939-953, 2000.

SILVA, A. B. da; AMARAL, A. J. do; SANTOS, J. C. P. dos; GOMES, E. C.; MARQUES, F. A.; OLIVEIRA NETO, M. B. de. Potencial pedológico do Estado de Alagoas para o cultivo de cana-de-açúcar em manejo com alta tecnologia. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 34, Florianópolis. Anais...Florianópolis, 2013.

SILVA, E. N. S.; MONTANARI, M.; PANOSSO, A. R.; CORREA, A. R.; TOMAZ, P. K.; FERRAUDO, A. S. Variabilidade de atributos físicos e químicos do solo e produção de feijoeiro cultivado em sistema de cultivo mínimo com irrigação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 39, p.598-607, 2015

SILVA, E. N. S.; MONTANARI, R.; PANOSSO, A. R.; CORREA, A. R.; TOMAZ, P. K.; FERRAUDO, A. S. Variabilidade de atributos físicos e químicos do solo e produção de feijoeiro cultivado em sistema de cultivo mínimo com irrigação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 39, n. 2, p. 598-607, 2015.

SILVA, M. O.; FREIRE, M. B. G. S.; MENDES, A. M. S.; FREIRE, F. J.; CAMPOS, M. C. C.; AMORIM, L. B. Discriminação de diferentes classes de solos irrigados com águas salinas, na região de Mossoró, RN, com o uso de análise multivariada. *Ambiência*, v. 6, n. 2, p. 261-270, 2010

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S. Multivariate analysis and geostatistics of the fertility of a humic rhodic hapludox under coffee cultivation. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 467-474, 2012.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; XAVIER, A. C. TEIXEIRA, M. M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um latossolo vermelho-amarelo húmico cultivado com café. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Viçosa, v. 34, p. 15-22, 2010.

SILVA, S.A.; LIMA, J.S.S.; XAVIER AC, TEIXEIRA, M.M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo húmico cultivado com café. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa v.34, n.1, p.15-22, 2010.

SIQUEIRA, D. S. Suscetibilidade magnética para a estimativa de atributos do solo e mapeamento de áreas sob cultivo de cana-de-açúcar. 75 f. 2010. 53 Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2010.

SOUSA, R. F. de; CORDÃO SOBRINHO, F. P.; BELTRÃO, N. E. de M.; FERNANDES, M. de F.; SANTOS, M. J. dos; M OTTA, J. D. Aptidão pedoclimática da cultura do algodão herbáceo na área do assentamento Boa Vitoria – Bananeiras, PB. In: Congresso Brasileiro de Algodão, 4, Goiânia, 2003. Anais...Goiânia, EMBRAPA, 2003.

SOUZA, C. K., MARQUES JÚNIOR, J.; MARTINS FILHO, M. V.; PEREIRA, G. T. Influência do relevo e erosão na variabilidade espacial de um LATOSSOLO em Jaboticabal (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, n.6, p.1067-1074, 2003.

SOUZA, J. G.; Beltrão, N. E. de M.; Santos, J. W. dos. Fisiologia e produtividade do algodoeiro em solo encharcado na fase de plântula. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.36, p.425-430, 2001.

SOUZA, Z. M. de; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Spatial variability of the physical and mineralogical properties of the soil from the areas with variation in landscape shapes. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, Curitiba, v. 52, n. 2, p. 305-316, 2009a.

SOUZA, Z. M. Variabilidade espacial e atributos de um latossolo sob diferentes formas do relevo. 2004. 141f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP, Jaboticabal.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.28, n.6, p.937-944, 2004.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MONTANARI, R.; CAMPOS, M. C. C. Amostragem de atributos químicos e físicos em área com variação nas formas do relevo. *Científica*, v. 34, n. 3, p. 249-256, 2006.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; WADE, M. K.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy*, San Diego, v. 38, n. 1, p. 45-94, 1985.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F., ALVAREZ, V.H., SCHAEFER, G.R. (Ed.). *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-54.

WILDING, L. P.; DREES, L. R. Spatial variability and pedology. In: *Pedogenesis and soil taxonomy: I concept and interactions*. New York: Elsevier, 1983. p.83-116.

## CAPÍTULO 2

### ANÁLISE MULTIVARIADA DE ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DE SOLOS DO SEMIÁRIDO DA PARAÍBA

#### RESUMO

A maioria dos solos do Semiárido Nordestino são Neossolos Litólicos e os Luvisolos, que por sua vez são solos que apresentam limitações agrícolas, quanto à infiltração de água bem como pela pedregosidade devido serem pouco profundos. O objetivo deste trabalho foi analisar os atributos químicos e físicos do solo por meio de técnicas de estatística descritiva e a partir da análise fatorial (AF) determinar um índice qualitativo de produtividade do solo. Foram coletadas 40 amostras de solo na microrregião do Cariri Oriental da Paraíba. Avalizaram-se os atributos químicos e físicos, e em seguida, os dados foram submetidos a análises estatísticas multivariadas e o tratamento de dados foi desenvolvido no software Qgis 3.6, que possui ferramentas geoestatísticas com o interpolador escolhido para este estudo, Inverse Distance Weighted (IDW). O estudo mostra que quando analisa-se os atributos após a rotação varimax, a porosidade define a relação entre o volume de poros e o volume total de solo, sofrendo influência tanto da textura como da estrutura do solo a verificar o dendograma constata-se que todos os grupos se diferenciaram entre si com base na resposta conjunta dos atributos físicos e químicos, não sendo verificadas diferenças dentro da área de estudo. O IPS apresenta uma avaliação simultânea e integrada dos indicadores de solo, recomenda-se que sua aplicação considere fundamentalmente a classificação pedológica, com especial atenção à textura do solo e a classificação climática, essencial para a interpretação dos valores obtidos, por fim, os mapas temáticos dos atributos químicos do solo (M.O, N, P e K), dos atributos físicos do solo foram gerados a fim de representarem a distribuição espacial dos mesmos. Ressalta-se que a amplitude dos dados após a interpolação é menor que a dos dados originais, pois o interpolador suaviza a distribuição, isto é, aumenta os valores mínimos e diminui os máximos.

**Palavras-chave:** pedologia; análise multivariada; microrregião do Cariri Oriental.

## ABSTRACT

The majority of the soils in the Northeastern Semi-Arid are Litossilic Neosols and Luvisols, which in turn are soils that have agricultural limitations, in terms of water infiltration as well as stony due to being shallow. The objective of this work was to analyze the chemical and physical attributes of the soil by means of descriptive statistics techniques and from the factor analysis (AF) to determine a qualitative index of soil productivity. Forty soil samples were collected in the Cariri Oriental da Paraíba microregion. Chemical and physical attributes were evaluated, and then the data were subjected to multivariate statistical analysis and the data treatment was developed using the Qgis 3.6 software, which has geostatistical tools with the interpolator chosen for this study, Inverse Distance Weighted (IDW). The study shows that when analyzing the attributes after varimax rotation, the porosity defines the relationship between the volume of pores and the total volume of soil, being influenced by both the texture and the structure of the soil to verify the dendrogram it appears that all groups differed from each other based on the joint response of physical and chemical attributes, with no differences within the study area. The IPS presents a simultaneous and integrated assessment of soil indicators, it is recommended that its application consider fundamentally the pedological classification, with special attention to the texture of the soil and the climatic classification, essential for the interpretation of the values obtained, finally, the maps thematic of the chemical attributes of the soil (MO, N, P and K), of the physical attributes of the soil were generated in order to represent their spatial distribution. It is noteworthy that the amplitude of the data after the interpolation is less than that of the original data, since the interpolator smooths the distribution, that is, it increases the minimum values and decreases the maximum values.

**Keywords:** pedology; multivariate analysis; microregion of the Eastern Cariri.



## 1. INTRODUÇÃO

Diversos avanços tecnológicos têm possibilitado o desenvolvimento de uma variedade de técnicas de observação do ambiente, e estimulando estudos ligados à distribuição espacial de classes e propriedades de solo (Caten *et al.*, 2011). Um dos requisitos para a melhor gestão ambiental do solo é o conhecimento das variáveis que caracterizam esse recurso natural, e em particular de seus atributos físicos e químicos. As vantagens do domínio dessas informações envolvem várias aplicações relacionadas com a produtividade de culturas, modelos de conservação de solo, zoneamento ambiental, assoreamento de curso d'água, compactação do solo e definição de zonas de manejo, entre outras.

Mesmo existindo informações acerca dos solos na região semiárida, como os levantamentos exploratórios e outros estudos dessa temática (Santos *et al.*, 2012) é sempre valido a realização de pesquisas sobre características dos diferentes solos representativos em uma escala mais detalhada (Mota e Valladares, 2011). Estudos de caracterização de solos em regiões ainda pouco exploradas, além de disponibilizarem informações mais precisas sobre diversas classes de solos ao longo do território nacional, permitem sistematizar informações sobre as propriedades dos solos, que poderão servir de subsidio para o desenvolvimento de práticas de manejo e uso sustentável (Santos *et al.*, 2012).

Vários fatores que condicionam o movimento da água no solo têm sido relatados por diversos autores, como a matéria orgânica, selamento superficial (Brandão *et al.*, 2006), e umidade inicial (Ribeiro, 2001). Outros fatores de relevância no estudo da infiltração são o manejo, a porosidade, a densidade (Guimarães *et al.*, 2013) e a variabilidade espacial do solo (Zimmermann *et al.*, 2008). A caracterização e o maior entendimento destas dependências tornam-se fundamentais para permitir um melhor entendimento dos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem nos solos (Fiorin, 2008).

Segundo Fidalski *et al.* (2007), os estudos que quantificam a qualidade do solo, de modo geral, apresentam inúmeras variáveis, as quais são descritas por meio de análises estatísticas univariadas, que comprometem, possivelmente, as interpretações e as conclusões destes, por não ser explorada a existência da dependência entre as variáveis analisadas. A interação destes atributos pode ser estudada pelos métodos estatísticos multivariados, que permitem o agrupamento das populações com características similares e permitem a obtenção de um melhor entendimento das variações dos processos que ocorrem no solo (José *et al.*, 2013).

Coimbra *et al.* (2007) citam que o caráter multivariado dos dados oriundos de estudo nas ciências biológicas, ecológicas, agrônomicas e muitos outros tipos, associados ao desenvolvimento contínuo da tecnologia computacional, tem levado ao crescente interesse no uso de métodos multivariados. Além disso, a análise multivariada (AM) considera a dependência entre as variáveis-respostas (covariância), fato que na análise univariada não é considerado. Os autores ainda ressaltam que o uso de apenas uma variável pode ser uma simplificação perigosa, não expondo de forma adequada as verdadeiras causas de variações específicas aos dados do estudo, e deixando fora da análise a importante informação de covariabilidade entre as variáveis.

De acordo com Hair Jr. et al. (2009), a AM refere-se a todas as técnicas estatísticas que analisem simultaneamente várias medições em indivíduos ou objetos que estejam sob investigação. Assim a AM pode ser considerada como qualquer análise simultânea de mais de duas variáveis. Dessa forma, alguns estudos têm aplicado técnicas multivariadas para avaliação das variáveis do solo e encontrado resultados satisfatórios. Assim, o entendimento do comportamento dos atributos do solo permite o estabelecimento de práticas adequadas de manejo do solo.

Os métodos multivariados são escolhidos de acordo com os objetivos da pesquisa. Quando o interesse é verificar como as amostras se relacionam, ou seja, o quanto estas são semelhantes, destacam-se dois métodos: análise fatorial e a análise de agrupamento hierárquico (Vicini, 2005).

A análise fatorial (AF) consiste em um conjunto de técnicas estatísticas cujo objetivo é representar ou descrever um número de variáveis iniciais a partir de um menor número de variáveis hipotéticas (Reis, 1997). De acordo com Artes (1998), refere-se a uma técnica estatística multivariada que a partir da estrutura de dependência existente entre as variáveis de interesse (em geral representada pelas correlações ou covariâncias entre essas variáveis), possibilita a criação de um conjunto menor de variáveis (variáveis latentes, ou fatores) obtidas como função das variáveis originais. Além disso, é possível saber o quanto cada fator está associado a cada variável e o quanto o conjunto de fatores explica a variabilidade geral dos dados originais, possibilitando a redução do número de variáveis iniciais com a menor perda possível de informação (Vicini, 2005).

Os fatores explicam parte da variabilidade total dos dados expressa através da soma das variâncias das variáveis originais. As variáveis com uma maior variabilidade (variância) podem vir a ser predominantes na construção dos fatores, mascarando, eventualmente, a presença de variáveis com menor variabilidade. Nesses casos, sugere-se trabalhar com as

variáveis padronizadas, cujas variâncias são iguais a um e cujas covariâncias correspondem às correlações entre as variáveis originais (ARTES, 1998).

A análise de agrupamento (AA), assim como a AF, também consiste em um conjunto de técnicas de estatística multivariada. Sua função básica está no agrupamento de indivíduos com base em suas características. A análise de agrupamento classifica os indivíduos de modo que cada um é semelhante aos outros no agrupamento em relação a alguns critérios de seleção (variáveis) predeterminados. Os agrupamentos resultantes exibem elevada homogeneidade dentro do grupo e elevada heterogeneidade entre os grupos (HAIR et al., 2005; MARDIA *et al.*, 1997). O resultado da aplicação desta técnica culmina em um gráfico (dendograma) no qual é possível verificar as fusões sucessivas dos indivíduos, formando diversos grupos até que se forme um único grupo.

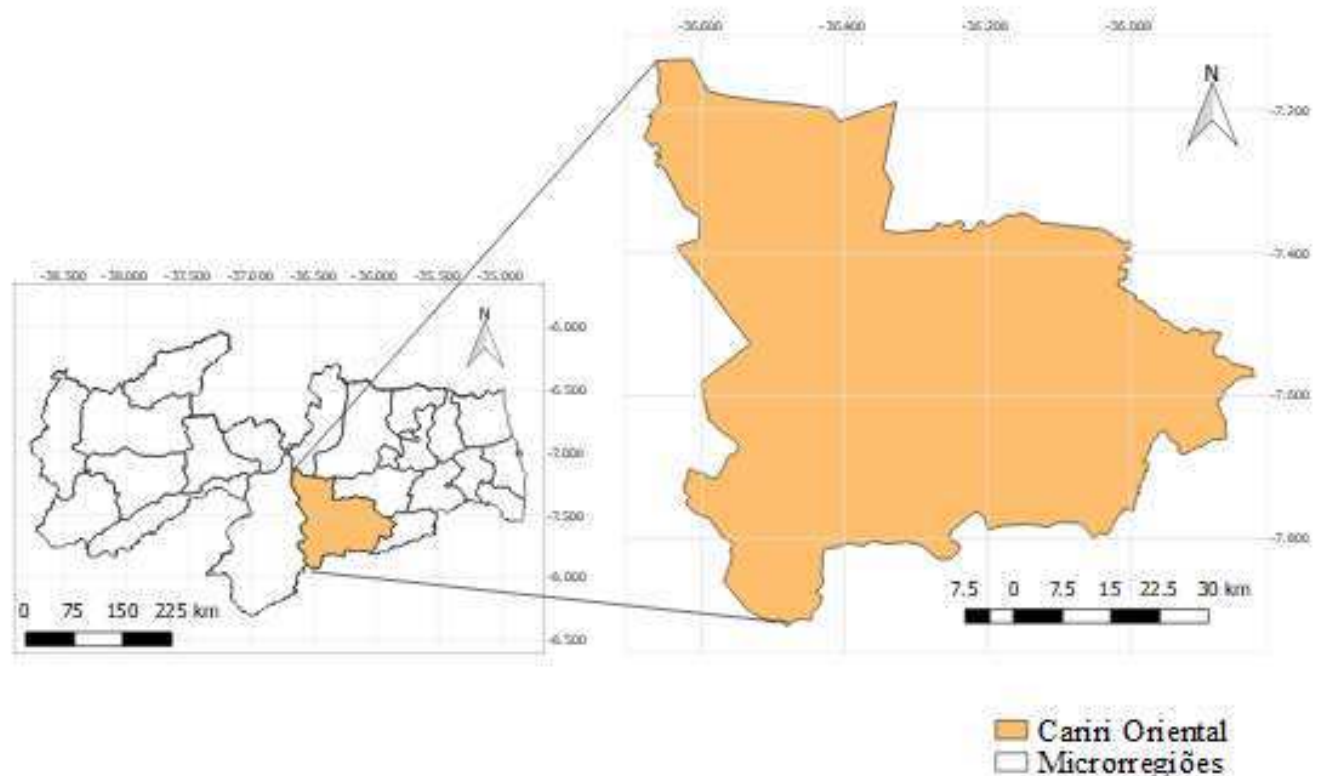
De acordo com Santos (2010), a inicialização no uso da técnica consiste em formular o problema de aglomeração definindo as variáveis nas quais se baseará o processo de aglomeração. É neste passo que se fixa o critério de homogeneidade. A inclusão de uma ou mais variáveis sem importância poderá distorcer o resultado final da análise e levar a grupos homogêneos distintos. Portanto, o conjunto de variáveis escolhido deve descrever a semelhança entre objetos em termos relevantes para os objetivos a serem alcançados pela pesquisa.

Neste sentido o estudo tem como objetivo analisar os atributos químicos e físicos do solo por meio de técnicas de estatística descritiva, a partir da análise fatorial (AF) determinar um índice qualitativo de produtividade do solo e a partir da análise de agrupamento (AA) determinar padrões homogêneos de distribuição dos atributos do solo.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada na microrregião do Cariri Oriental do Estado da Paraíba (Figura 1), constituída por 12 municípios. De acordo com o censo do (IBGE 2015) a microrregião possui uma área de 4.219,150 km<sup>2</sup>, com população estimada de 63.704 habitantes (IBGE 2010).

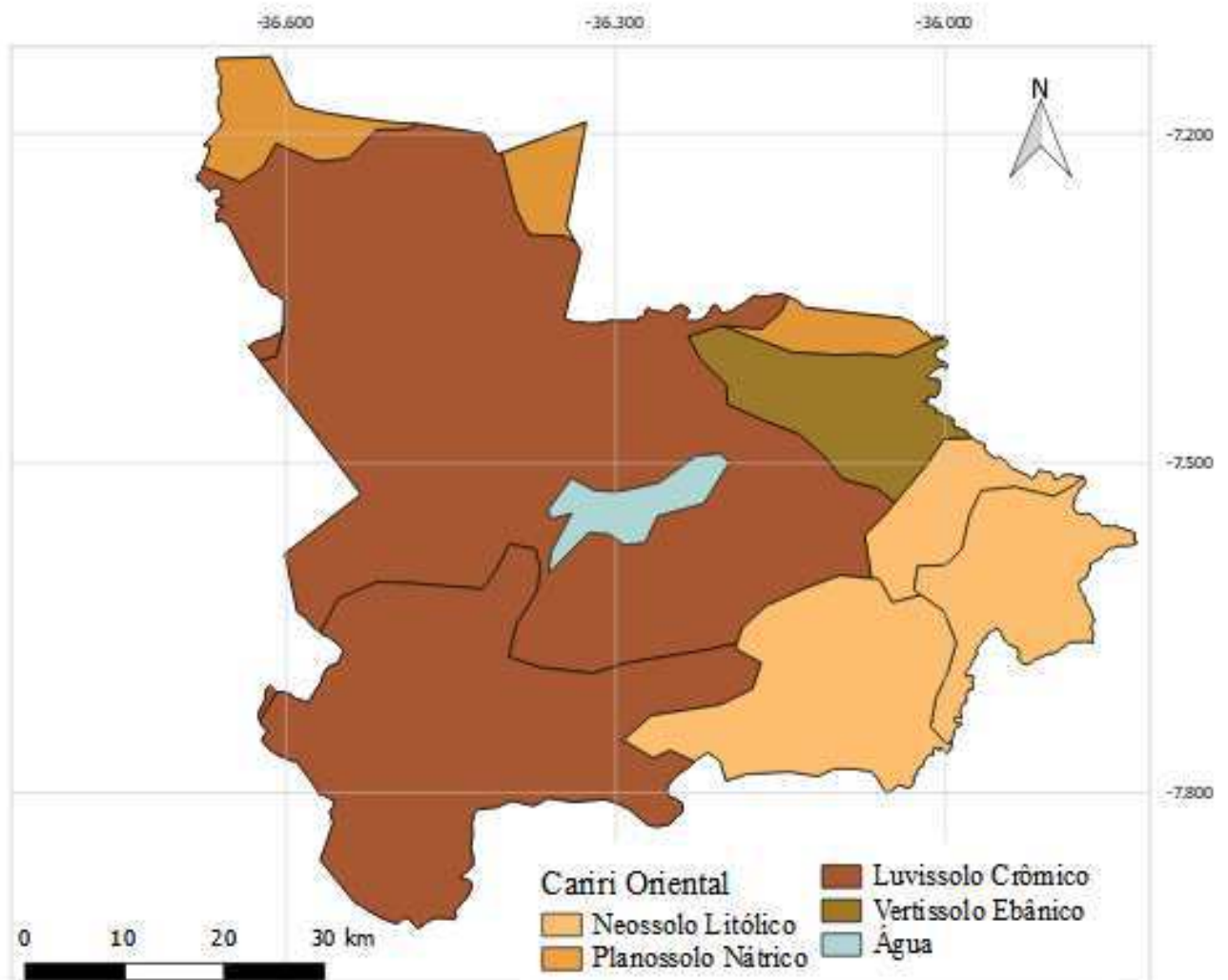


**Figura 1.** Localização da microrregião do Cariri Oriental.

Segundo a classificação de Köppen, a microrregião apresenta classificação climática Bsh- semiárido quente, correspondendo à área mais seca do Estado com precipitações médias anuais muito baixas (média de 500 mm) e uma estação seca que pode atingir onze meses. O município de Cabaceiras apresenta índices pluviométricos inferiores a 300 mm. As médias de temperatura são superiores a 24° C e a umidade relativa do ar inferior a 75%. Apresenta os mais baixos índices pluviométricos do Estado. A esta limitação climática, associam-se fortes limitações edáficas (solos salinos, rasos e pedregosos) que influenciam substancialmente a atividade agrícola com repercussões na ocupação do espaço regional (Paraíba, 2010).

A vegetação típica da região é a Caatinga, classificada pela SUDENE em dois tipos: hiper e hipoxerófila. A ocorrência de um ou outro tipo depende das condições climáticas e edáficas. A região possui relevo acentuado principalmente nas proximidades do Rio Paraíba e seu afluente denominado de Taperoá, onde existe um sistema de falhas e fraturas que atingem as rochas locais (Paraíba, 2010).

Os solos em geral, são rasos e pedregosos, predominando os Bruno Não Cálculos e os Litólicos (Figura 2). Os Neossolos Litólicos são em geral rasos, com espessura inferior a 50 cm, possuindo, uma estreita camada de material terroso sobre a rocha, ocorrendo mais frequentemente, em áreas de relevo acidentado. São classificados como solos com grande potencial para aproveitamento hidroagrícola, embora necessite de um manejo eficiente devido sua tendência à salinização e à sodificação (Paraíba, 2010).



**Figura 2.** Mapa de solos da microrregião do Cariri Oriental.

## 2.2 Atributos de solos

Foram coletadas, em toda área de estudo 40 amostras de solos na profundidade de 0 a 20 cm, para quais foram realizadas as análises físicas e químicas no Laboratório de Irrigação e Salinidade, LIS da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Os atributos avaliados são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Estatística descritiva dos atributos químicos e físicos dos solos da microrregião do Cariri Oriental.

Atributos	Média	Mediana	Máximo	Mínimo	Desvio-padrão	Variância
Potássio (meq/100g de solo)	0,42	0,44	0,64	0,11	0,16	0,03
Carbono Orgânico (%)	0,92	0,84	1,85	0,40	0,37	0,14
Matéria Orgânica (%)	1,58	1,44	3,19	0,69	0,64	0,41
Nitrogênio (%)	0,09	0,08	0,18	0,02	0,04	0,00
Fósforo Assimilável (mg/100g)	1,44	1,55	2,02	0,67	0,41	0,17
pH H <sub>2</sub> O (1:2.5)	6,84	6,83	8,00	5,50	0,65	0,43
Cond. Elétrica (mmhos/cm)	0,26	0,13	1,50	0,08	0,31	0,09
Areia (%)	62,49	63,65	88,50	45,20	9,61	92,42
Silte (%)	27,84	27,35	50,30	3,80	10,43	108,82
Argila (%)	9,74	8,70	23,10	1,50	5,43	29,48
Densidade do Solo (g/cm <sup>3</sup> )	1,37	1,37	1,65	1,17	0,12	0,01
Densidade de Partículas (g/cm <sup>3</sup> )	2,68	2,69	2,73	2,61	0,03	0,00
Porosidade (%)	48,75	49,26	55,77	39,46	4,57	20,93

Foi realizada a análise exploratória dos dados obtidos, a fim de verificar a existência de dados discrepantes (outliers), pois a existência desse tipo de dados pode interferir significativamente nos resultados das análises estatísticas.

As análises foram realizadas usando o programa R versão 3.2.1 (R Development Core Team, 2015), utilizando o pacote de dados geoR (Ribeiro Júnior; Diggle, 2001).

A granulometria foi analisada a partir da metodologia descrita pela EMBRAPA, (1997). As frações granulométricas foram determinadas a partir de proporções de areia, silte e argila pelo método da pipeta e expressas em %. A densidade de partículas do solo (D<sub>p</sub>) foi determinada pelo método do balão volumétrico e a densidade do solo (D<sub>s</sub>) determinada pelo método da proveta para amostra deformada, ambas expressas em g cm<sup>-3</sup>. A porosidade total (P<sub>t</sub>) foi determinada a partir da relação entre a densidade do solo e a densidade de partículas expressa em (%).

Os atributos químicos avaliados foram os teores de fósforo (P) e potássio (K) a partir da extração dos elementos com Mehlich-1, sendo o P determinado por colorimetria em presença do ácido ascórbico como catalisador e expresso em ( $\text{mgdm}^{-3}$ ), enquanto que K determinado por fotometria de emissão de chama, expressos em ( $\text{cmolc dm}^{-3}$ ). Todos os métodos utilizados nas análises podem ser encontrados em EMBRAPA, 1997. A matéria orgânica do solo (MO) foi determinada através da oxidação da matéria orgânica pelo dicromato de potássio, segundo o método Walkley-Black descrito por Mendonça e Matos (2005) e expressa em (%). O pH em água foi determinado potenciométricamente na suspensão cuja proporção de solo-líquido foi de 1:2,5 com tempo de reação de 30 minutos e agitação da suspensão antes da leitura (EMBRAPA, 1997). A Condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes) foi medida no extrato da pasta de saturação preparada segundo método descrito por Richards (1954) e expressa em ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ). O carbono orgânico total do solo (COT), determinado a partir da análise de concentração da matéria orgânica no solo em função do teor do carbono orgânico, utilizando-se do método titulação após oxirredução por via úmida – conhecido como método Walkley-Black (EMBRAPA, 1997).

### **2.3 Análises estatísticas**

A análise estatística foi então realizada em duas etapas: (i) estatística descritiva clássica, a qual assume que os dados observados são independentes uns dos outros não considerando sua localização no espaço e (ii) análise multivariada que consiste em empregar técnicas estatísticas para verificar semelhanças entre as variáveis na tentativa de agrupá-las usando-se os atributos físicos e químicos.

#### **2.3.1 Estatística descritiva**

Nesta etapa foram determinadas, as seguintes medidas de posição (média, mediana, valor máximo e mínimo), de dispersão (desvio padrão, variância e coeficiente de variação), permitindo caracterizar as posições centrais e de dispersão dos dados, além de expressar a forma de distribuição.

### **2.4 Análise fatorial (AF)**

A análise Fatorial (AF) foi utilizada para identificar as relações existentes entre o conjunto de variáveis observáveis, definidas como dependentes, e uma variável latente ou fator (Corrar et al., 2007; Hair et al., 2009). Tal técnica possibilitou identificar as dimensões isoladas da estrutura dos dados para então determinar o grau em que cada variável é explicada

por cada dimensão ou fator (Manly, 2008). A composição do modelo de análise fatorial foi estimada a partir da Eq.1.

$$X_i = a_i F + \varepsilon_i \quad (1)$$

Onde:

$X_i$ : variável analisada padronizada (média zero e desvio padrão 1)

$a_i$ : é uma constante (carga fatorial)

F: Fator (com média zero e desvio-padrão 1) comum a todas as variáveis

$\varepsilon_i$ : erro (que é específico de cada variável).

O grau das correlações simples com as correlações parciais foi estimado utilizando-se a estatística proposta pelo teste Kaiser Meyer Oklin (KMO) de acordo com a Eq. 2.

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

em que:  $r_{ij}^2 =$  para todo  $i \neq j$  é o coeficiente de correlação original entre variáveis;  $a_{ij}^2$  é o quadrado dos elementos fora da diagonal da matriz anti-imagem da correlação e este corresponde ao coeficiente de correlação parcial.

Com intuito de redistribuir a variância dos primeiros fatores para os demais e atingir um padrão fatorial mais simples e teoricamente mais significativo foi utilizado a técnica de rotação dos fatores a partir do método "Varimax" (HAIR *et al.*, 2009). Assim, foi necessário testar se a matriz de correlações é uma matriz identidade e avaliar a possível adequação da análise fatorial. Logo, utilizou-se o teste de esfericidade de Bartlett a partir da Eq.3.

$$X^2 = - \left[ n - 1 - \frac{1}{6}(2p + 5) \right] \sum_{i=1}^p \ln \lambda_i \quad (3)$$

em que:  $\lambda_i$  representa a variância explicada por cada fator; n é o número de observações; p, o número de variáveis envolvidas no processo.

A cumunalidade foi utilizada como critério para validação das variáveis no ajuste do modelo fatorial e foi determinada pela estimativa da variância de  $X_i$  explicada através dos fatores comuns e foi determinada seguindo a Eq.4.



$$h_i^2 = a_{i1}^2 + a_{i2}^2 + \dots + a_{im}^2 \quad (4)$$

De acordo com o número de observações que fazem parte do conjunto de dados analisados torna-se necessário a delimitação ou a seleção das dimensões que possam descrever com maior grau a variabilidade presente na análise. No presente estudo foi utilizada a técnica de raiz latente como método restritivo para limitar a quantidade de fatores.

## 2.5 Índice de produtividade do solo (IPS)

O IPS foi definido como uma combinação linear dos escores fatoriais e a proporção da variância explicada por cada fator em relação à variância dos fatores comuns que descrevem as principais características pedológicas da área de estudo a partir da Eq. 5. Para melhor detalhamento da metodologia propõe-se consultar (Bryman; Cramer, 2001)

$$F_{ij} = b_1 x_{i1} + b_2 x_{i2} + \dots + b_p x_{ip} \quad (5)$$

Em que:  $F_{ij}$  é a variável dependente não observável, mas que pode ser estimada por intermédio da técnica de análise fatorial fazendo uso da matriz do vetor X de variáveis observáveis.

A matriz  $F_{ij}$  de regressão a ser estimada a partir dos n escores fatoriais pode ser prejudicada devido à magnitude e/ou devido às unidades de medida das variáveis dependentes x. Neste caso, torna-se necessário substituir a matriz original  $x_{is}$  pela matriz de variáveis padronizadas  $W_{ij}$  e estimados seguindo a Eq. 6:

$$W_{ij} = \frac{(x_i - \bar{x})}{s} \quad (6)$$

Em que:  $x_i$  é o valor observado;  $\bar{x}$  é o valor médio e  $s$  é o desvio padrão das observações.

Assim a estimativa do IPS foi obtida de acordo com a Eq. 7:

$$IPS = \sum_{j=1}^q \left( \frac{\lambda}{\sum_j \lambda_j} \times FP_{ij} \right), 0 \leq IPS \leq 1 \quad (7)$$

Em que:  $\lambda_i$  representa a variância explicada por cada fator;  $\sum_j \lambda_j$  é a soma total da variância explicada pelo conjunto de fatores comuns e  $FP_{ij}$  é o escore padronizado para se obter os valores positivos dos escores originais essenciais para hierarquizar as observações.

A escala hierárquica de classificação do solo corresponde aos quantis estatísticos determinados pela frequência das observações:  $0 \geq \text{IPS} < 0,30$  = Produtividade inexistente,  $0,30 \geq \text{IPS} < 0,33$  = Produtividade muito baixa;  $0,33 \geq \text{IPS} < 0,42$  = Produtividade baixa;  $0,42 \geq \text{IPS} < 0,54$  = Produtividade média;  $0,54 \geq \text{IPS} < 0,67$  = Produtividade moderada;  $0,67 \geq \text{IPS} < 0,85$  = Produtividade alta.

## 2.6 Métodos geoestatísticos

O tratamento de dados foi desenvolvido no software Qgis 3.6, que possui ferramentas geoestatísticas com o interpolador escolhido para este estudo, Inverse Distance Weighted (IDW).

### 2.6.1 Interpolação por Inverse Distance Weighted (IDW)

O método Inverse Distance Weighted (IDW) prediz um valor para algum local não medido utilizando-se os valores amostrados à sua volta, que terão um maior peso do que os valores mais distantes, ou seja, cada ponto possui uma influência no novo ponto, que diminui na medida em que a distância aumenta (Jakob; Young, 2006). Desta forma, a influência de cada ponto é proporcional ao inverso da distância do nó da malha.

O sistema IDW pode ser caracterizado como um interpolador tanto suaviza-te quanto exato, do tipo global, razoavelmente fiel aos dados amostrados, com rápida velocidade de processamento e que não estima valores do ponto vizinho amostrado maiores ou menores que os quantitativos máximos e mínimos dos dados informados (Landim, 2000).

Para aplicação do método IDW, alguns parâmetros de interpolação devem ser inseridos. Os números mínimos e máximos de vizinhos na interpolação determinam, respectivamente, a quantidade mínima e máxima de pontos que influenciam na estimativa dos valores. Foi definido um intervalo de no mínimo 5 vizinhos e no máximo 10 vizinhos.

O valor do expoente permite controlar o significado dos pontos conhecidos nos valores interpolados com base na distância do ponto de saída. Foi definido o valor 2, indicado por Landim (2000), como o padrão. O estimador IDW é dado pela Equação 8:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{h_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^\beta}} \quad (8)$$

Sendo, Z: valor interpolado para o nó do reticulado,  $Z_i$ : valor do ponto amostrado vizinho ao nó,  $h_{ij}$ : distância entre o nó da grade e  $Z_i$ ,  $\beta$ : expoente de ponderação, n: número de pontos amostrados utilizados para interpolar cada nó.

## 2.7 Análise de agrupamento hierárquico (AA)

A técnica hierárquica de agrupamento consiste em uma série de sucessivos agrupamentos ou sucessivas divisões de elementos, em que os elementos são agregados ou desagregados. Os grupos, na técnica hierárquica, são geralmente representados por um diagrama bidimensional chamado de dendograma ou diagrama de árvore. Nesse diagrama, cada ramo representa um elemento, enquanto a raiz representa o agrupamento de todos os elementos. Para identificação das similaridades do conjunto, foi realizada esta técnica, calculando-se a distância euclidiana para o conjunto das treze variáveis, e utilizando-se o algoritmo de Ward (1963) para a obtenção dos agrupamentos similares (Freddi *et al.*, 2008). O resultado da análise foi apresentado em um dendograma, na identificação dos agrupamentos.

A medida de dissimilaridade mais utilizada em agrupamentos é a distância euclidiana, mesmo existindo diversas outras medidas. Uma discussão específica de várias dissimilaridades é retratada em Duran e Odell, (1974). Segundo Wilks (2006) esta função é empregada como critério para medir a distância entre dois pontos ou para designar o quanto eles são similares, de acordo com a equação abaixo:

$$d_{ij} = [x_i - x_j] = \left[ \sum_{k=1}^n (x_{i,k} - x_{j,k})^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

Em que:  $i \neq k = 1, \dots, n$  (total de elementos amostrais);  $X_{ij}$  é o elemento observado da  $j$ -ésima variável do elemento amostral  $i$ ;  $X_{kj}$  é o elemento observado da  $j$ -ésima variável do elemento amostral  $k$ .

O método de classificação hierárquico foi utilizado nesse trabalho, cujo critério de agrupamento foi o de Ward. Tal método dispõe-se de uma análise de variância para mensurar a distância entre os grupos (Schunk Silva; Nery, 2000). O método hierárquico de Ward procura por partições que minimizem a perda associada a cada agrupamento (Everitt, 1974; Bussab et al., 1990; Mingoti, 2005). A perda é calculada mediante diferença entre a soma dos erros quadráticos de cada padrão e a média da partição em que está contido, conforme Equação 10:

$$SQD = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \quad (10)$$

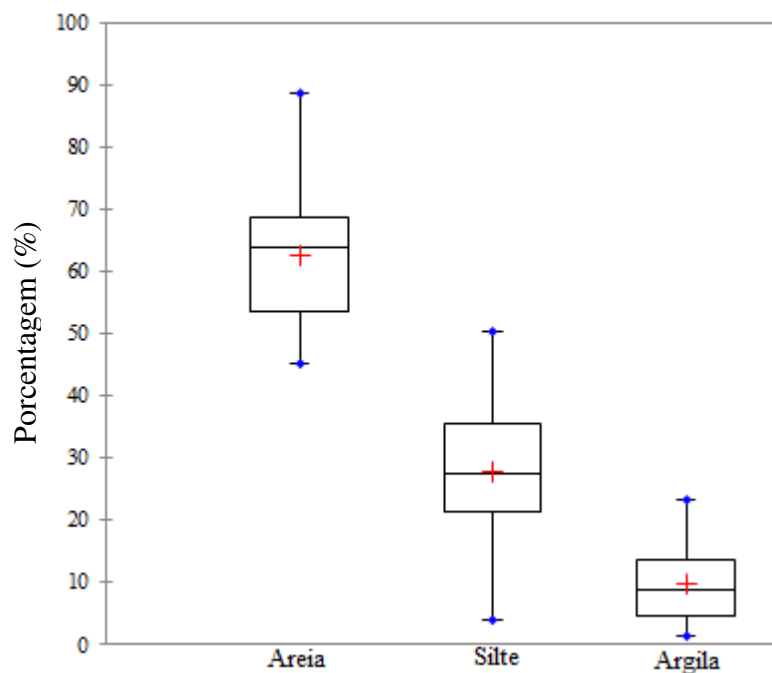
em que:

$n$  é o número total de elementos do agrupamento e

$x_i$  é o  $i$ -ésimo elemento do agrupamento.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

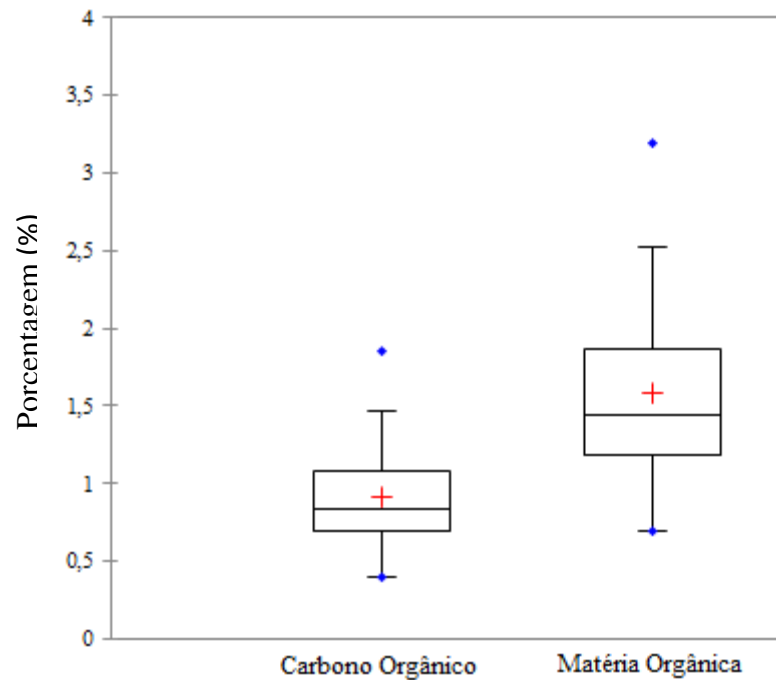
A partir da análise física do solo foi possível verificar que os solos da área de estudo possuem, em média, textura franco arenosa, com percentuais de areia variando de 45,2 a 88,5% (Figura 3), o que confere com o material de origem referente às rochas areníticas predominando os solos Bruno Não Cálcicos e os Litólicos. As partículas de menor tamanho como argila e, principalmente silte, foram encontradas em quantidades relativamente pequenas, sendo 9,7% a média de argila e 27,8% a média de silte.



**Figura 3.** Variabilidade da distribuição dos componentes físicos do solo para a área de estudo.

As pequenas quantidades de argila associadas as grandes porções arenosas garantem uma boa permeabilidade aos solos estudados, uma vez que em áreas com muita argila a possibilidade de obstrução dos poros é potencializada, diminuindo significativamente a permeabilidade do solo (Santos *et al.*, 2012a).

Na Fig.4 verifica-se que o teor de carbono orgânico total se situou no intervalo de 0,45-1,9-. Para os níveis de matéria orgânica no solo (MO), está se apresentou uma faixa média de 1,57, o que pode ser verificado na Fig. 4. O acréscimo de MO, decorre pelo fato da taxa de decomposição das palhas e outros materiais mantidos na superfície do solo. Em consequência, a alteração no teor de MO, tanto em quantidade como em qualidade, tem implicações graduais nas alterações do pH, conforme Zanão Júnior *et al.* (2007).



**Figura 4.** Variabilidade da distribuição do carbono orgânico e da matéria orgânica do solo da área de estudo.

A matéria orgânica do solo influencia direta e indiretamente todas as características do solo, de modo que a diminuição do carbono orgânico total está associada à degradação física dos solos, e seu incremento através do manejo adequado modifica a capacidade de carga dos solos, que se tornam menos vulneráveis à compactação (Blanco-Canqui *et al.*, 2009; Viana, *et al.*, 2011).

Com os dados padronizados, estabelece-se a matriz de correlação (Anexo 1) com o intuito de verificar o percentual de correlações significativas entre as variáveis e qual a relevância dessas correlações para as análises posteriores (Neto, 2013). A princípio foi realizado a interpretação da matriz de correlação, Análise Fatorial (AF) e Análise de Agrupamento (AA), com base nos atributos do solo, bem como a interação entre as variáveis.

Com o estudo de correlação entre os atributos do solo, verificou-se que a matriz de correlação (Anexo 1) de todas as variáveis estudadas de forma isolada, apresentou elevado número de correlações fortes e significativas ( $P < 0,05$ ). Esse fato comprova a viabilidade do uso da AF e AA no estudo dos atributos do solo.

Portanto de acordo com os resultados obtidos na (Tabela 2) foi possível avaliar a partir do Teste de Kaiser Meyer Olkin – KMO os padrões existentes entre as correlações entre os atributos do solo estudados. A estatística do teste indicou um valor na ordem de 0,562,

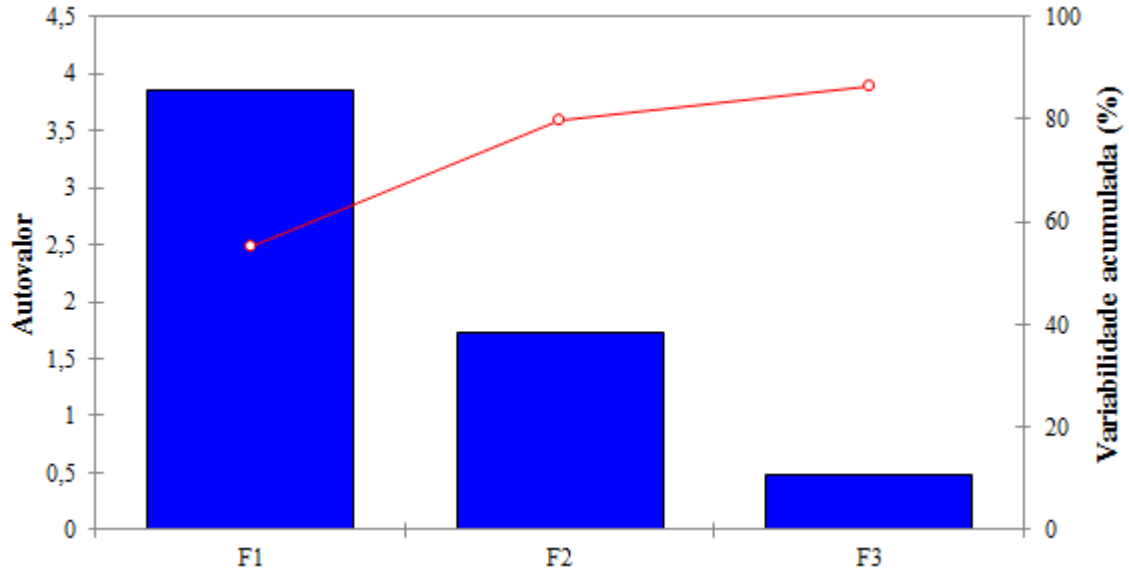
indicando a existência de correlações parciais entre pares de variáveis, e assim de acordo com (Hair *et al.*, 2009) quando analisado o padrão de correlação entre as variáveis, a matriz de correlações deve exibir a maior parte dos coeficientes com valor acima de 0,50, torna-se possível à aplicação da análise fatorial (AF) ao conjunto de observações. O teste de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) varia entre 0 e 1. Quanto mais perto de 1 melhor. Palant (2007) sugere 0,6 como um limite razoável. Friel (2009) sugere a seguinte escala para interpretar o valor da estatística KMO: entre 0,90 e 1 excelente; entre 0,80 e 0,89 bom; entre 0,70 e 0,79 mediano; entre 0,60 e 0,69 medíocre; entre 0,50 e 0,59 ruim e entre 0 e 0,49 inadequado. Já Hair *et al* (2006) sugerem 0,50 como patamar aceitável.

**Tabela 2.** Estatística do teste Kaiser Meyer Olkin – KMO para adequação da amostra

<b>Variáveis</b>	<b>KMO</b>
<b>Potássio</b>	0,375
<b>Carbono Orgânico</b>	0,695
<b>Matéria Orgânica</b>	0,697
<b>Nitrogênio</b>	0,761
<b>Fósforo Assimilável</b>	0,405
<b>pH</b>	0,600
<b>Cond. Elétrica</b>	0,451
<b>Areia</b>	0,447
<b>Silte</b>	0,466
<b>Argila</b>	0,390
<b>Densidade do Solo</b>	0,638
<b>Densidade de Partículas</b>	0,444
<b>Porosidade</b>	0,624
<b>KMO</b>	0,562

Após a verificação da adequação da base de dados e tomados os atributos que são passíveis da aplicação da AF foi possível extrair os fatores principais que irão compor a capacidade de explicação da variância total do conjunto de dados. Além disso, o número de fatores a ser extraído foi estabelecido de forma a explicar acima de 70% da variância total dos dados (Neto, 2013).

A partir da Figura 5 verifica-se a distribuição do Scree test que descreve a dispersão do número de fatores em função da curva da variância de cada fator buscando assim identificar o momento de linearidade da curva.



**Figura 5.** Scree plot - Curva da variância dos fatores.

Ainda como critério de escolha do número de fatores para descrição do conjunto de observações utilizou-se a soma da variância acumulada para determinar a quantidade de fatores que devem ser extraídos. Hair *et al.* (2006) sugerem o patamar de 60% como sendo aceitável. A partir dos resultados do teste de esfericidade identificaram-se inicialmente apenas dois fatores de influência na variável dos atributos do solo. Estes fatores definem a combinação linear entre as variáveis dos atributos do solo, as quais apresentam capacidade de explicar 79,60% da variabilidade total existente entre as variáveis dependentes (Tabela 3).

Os autovalores obtidos na AF com o intuito também de maximizar a variância dentro de cada fator, adotou-se o método de rotação VARIMAX com o objetivo de detectar quais variáveis representam melhor os fatores e com isso facilitar a interpretação dos resultados. O primeiro fator (F1) explicou 55,01% da variância total, fator este constituído de atributos químicos. O segundo fator (F2) explicou 24,58% da variância contendo os atributos físicos. O método de rotação refere-se ao método matemático que rotacional os eixos no espaço geométrico. Isso torna mais fácil estabelecer quais variáveis são carregadas em quais componentes, ou seja, o principal objetivo da rotação dos fatores é tornar o resultado empírico encontrado mais facilmente interpretável, conservando as suas propriedades estatísticas.



**Tabela 3.** Variância total explicada pelos fatores.

Fatores	Condições iniciais		Componentes rotacionados	
	Variabilidade	% Variância	Variabilidade	% Variância
	Autovalor	(%)	acumulada	acumulada
F1	3,85	55,01	55,01	43,99
F2	1,72	24,58	79,60	35,61
F3	0,48	6,86	86,46	-

A capacidade de explicação ou de retenção dos atributos pelos fatores está associados diretamente ao valor da comunalidade; tais valores são significativos quando ( $h^2 > 0,6$ ) calculados após ajuste da rotação Ortogonal VARIMAX explicam a intensidade da variabilidade total de cada variável ou conjunto de fatores (Tabela 4).

**Tabela 4.** Fatores extraídos por componentes principais, destacando os atributos químicos e físicos do solo com cargas superiores a 0,6.

Atributos	Químico (F1)	Físico (F2)	Comunalidade
CO	<b>0,981</b>	0,180	0,995
MO	<b>0,981</b>	0,181	0,994
N	<b>0,985</b>	0,157	0,995
Areia	-0,176	<b>-0,764</b>	0,615
Silte	-0,066	<b>0,751</b>	0,568
Ds	-0,268	<b>-0,850</b>	0,794
Pt	0,279	<b>0,730</b>	0,611

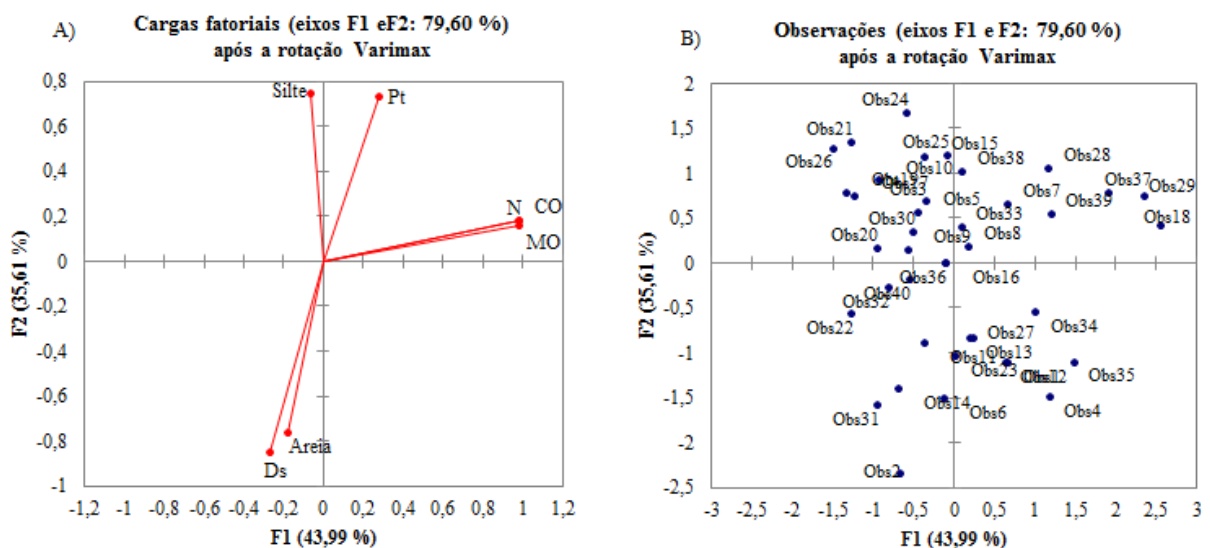
CO.: Carbono Orgânico; MO.: Matéria Orgânica; N.: Nitrogênio; Ds.: Densidade do Solo; Pt.: Porosidade Total

Da observação da comunalidade, vê-se que 99,5% da variância da variável CO é explicada pelos dois fatores comuns, enquanto apenas 56,7% da variância da silte é explicada por esses mesmos fatores. O complemento desses valores, denominado unicidade, indica o quanto os fatores comuns falham em explicar a variância total unitária da variável.

Quando analisamos os atributos após a rotação varimax (Figura 6) nota-se a porosidade total (Pt) variou de 39,4 a 55,7%, com uma média de 48,7%. Determinante na formação da porosidade, a textura explica a ocorrência de poros grandes em solos arenosos, os quais também apresentam baixa porosidade total comparados a solos mais argilosos devido ao maior volume de microporos nestes últimos. De acordo com Freire (2006), uma porosidade de 50% é esperada para solos de textura franca e de 40 a 60% para solos arenosos. Assim,

pode-se inferir que o Pt se apresenta abaixo do esperado em alguns pontos, mas em termos médios está de acordo com o intervalo esperado.

A densidade do solo (Ds) sofre influência da textura, estrutura e do grau de compactação, fornecendo a medida da relação existente entre a massa de uma amostra de solo seca e a soma dos volumes ocupados pelas partículas e pelos poros (volume total). A Ds encontrada foi de 1,1 a 1,6 g cm<sup>-3</sup> e CV de 8,9%, classificada como de baixa variabilidade, concordando com os resultados de Carvalho et al. (2003) e Santos et al. (2012b) que encontraram CV abaixo de 10% para este atributo. Para solos arenosos a Ds varia de 1,3 a 1,8 g cm<sup>-3</sup>, o que correspondem às análises granulométricas apresentadas anteriormente. Por ser um atributo dependente de outros fatores que influenciam a disposição das partículas do solo, a Ds é capaz de fornecer indicações sobre a sua influência em propriedades como infiltração e retenção de água, permitindo analisar o estado de conservação do solo.



**Figura 6.** Distribuição dos fatores F1 (Químico) x F2 (Físico), mostrando a relação dos atributos químicos e físicos do solo na área de estudo (A) e distribuição os pontos observados de acordo com as cargas fatoriais (B).

A porosidade total (Pt) apresentou correlação positivo com o F2, enquanto a Ds e o teor de areia se correlacionaram negativamente com esse fator. O silte apresentou correlação negativo com o F1. As demais variáveis se comportaram de maneira positiva para ambos os fatores F1 e F2. A análise fatorial possibilitou resumir a informação contida em atributos químicos e físicos dos solos e identificar a estrutura das relações entre essas variáveis e a distribuição nos solos, por se tratar de variáveis de grande importância para o conhecimento prévio da área de estudo.

### Índice de Produtividade do Solo (IPS)

Os métodos para a construção de índices são diversos, todavia com a utilização da AF foi possível verificar que todas as variáveis são significativamente importantes para compor os fatores, e explicar as interrelações existentes e a estrutura de covariância proveniente da correlação de cada variável e seu respectivo fator.

Da observação das comunalidades (Tabela 5), vê-se que as principais variáveis com maior capacidade de explicar cada um dos quatro fatores: no fator 1 (F1) = Carbono Orgânico (99,2%); Matéria Orgânica (99%) e Nitrogênio (97,9%); Fator 2 (F2) = Silte (100%); Fator 3 (F3) = Fósforo (78%); Fator 4 (F4) = Porosidade Total (100%) mostrando que boa parte das variâncias dessas variáveis foi explicada pelos respectivos fatores de agregação, podendo, assim, caracterizar a dinâmica da produtividade da microrregião.

O fator 1 representa a parte comum mais abrangente das variáveis observadas, podendo ser associado ou nomeado como índice de produtividade do solo (IPS). Adotou-se o procedimento de rotação ortogonal produziu cargas fatoriais após a rotação da matriz de dados, que possibilitou a associações das variáveis a um determinado fator.

**Tabela 5.** Matriz de componentes após cargas rotacionadas pelo método VARIMAX.

Variáveis	F1	F2	F3	F4	Comunalidade final
Potássio	0,089	-0,057	<b>0,528</b>	-0,047	0,292
Carbono Orgânico	<b>0,976</b>	-0,072	0,166	0,088	0,992
Matéria Orgânica	<b>0,975</b>	-0,075	0,164	0,090	0,990
Nitrogênio	<b>0,966</b>	-0,081	0,163	0,114	0,979
Fósforo Assimilável	-0,057	0,199	<b>0,801</b>	0,309	0,780
pH H <sub>2</sub> O	-0,086	-0,053	0,292	<b>0,660</b>	0,531
Areia	-0,199	<b>0,850</b>	0,073	-0,152	0,791
Silte	-0,168	<b>-0,910</b>	0,281	0,254	<b>1,000</b>
Argila	<b>0,600</b>	0,146	-0,400	-0,218	0,588
Densidade do Solo	-0,177	0,610	0,091	<b>-0,686</b>	0,884
Densidade de Partículas	<b>-0,192</b>	0,106	-0,180	0,024	0,081
Porosidade Total	0,231	-0,466	-0,176	<b>0,836</b>	<b>1,000</b>

Após a avaliação dos resultados da análise fatorial é possível à construção de um ou mais fatores de escala a partir da constatação da existência de determinadas dimensões. O interesse é examinar os dados amostrais em termos dessas dimensões, ao invés de examinarmos cada variável separadamente identificando assim quatro principais forças concorrentes que atuam sobre o processo de produtividade do solo na microrregião do Cariri Oriental Paraibano. Duas são motivadas por variáveis que caracterizam as componentes químicas do solo, definidas pelos fatores F1 e F3, e as outros dois fatores são representados

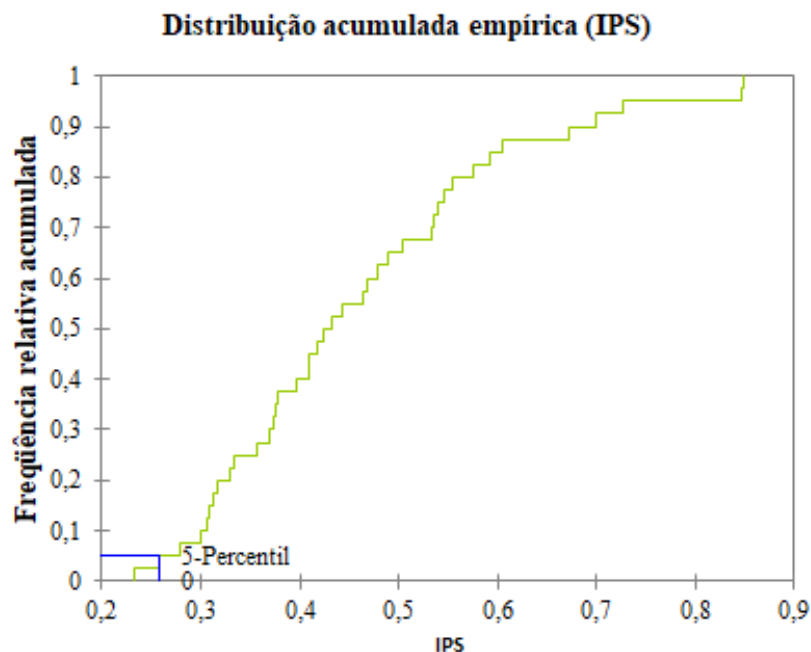
por F2 e F4, caracterizada por variáveis que refletem o comportamento físico do solo na região.

Como o IPS representa uma variável estatística, com contribuições preponderantes das variáveis MO, N, Areia, Silte, P, K e Pt, as variações do IPS mostrou-se bastante associadas às alterações da qualidade do solo. Diferentes usos de solos podem provocar alterações nas relações entre as variáveis.

As funções do IPS consistem em avaliações simultâneas após a definição do comportamento dos indicadores e distribuição de seus pesos. O IPS é a soma do desempenho individual de cada função, e cada função é individualmente o reflexo de um determinado conjunto de atributos.

Verifica-se na Fig.7 que o primeiro quartil apresenta uma variação entre 0 a 0,30, sendo assim classificado pelo IPS com produtividade inexistente, o segundo e terceiro quartil a frequência acumulada varia de 0,30 a 0,33 e 0,33 a 0,42 respectivamente, que de acordo com o IPS é classificado como produtividade muito baixa e produtividade baixa.

No quarto e quinto quartil aponta uma frequência de distribuição do IPS entre 0,42 e 0,67, sendo considerada uma produtividade de média a moderada. Por fim no sexto quartil foi possível verificar que a distribuição do IPS relacionada com frequência acumulada, apresentou variação de 0,67 a 0,85, classificada de acordo com o IPS com produtividade alta.



**Figura 7.** Distribuição da frequência acumulada dos percentis do IPS

Portanto, embora o IPS apresente uma avaliação simultânea e integrada dos indicadores de solo, com base nos resultados deste estudo, recomenda-se que sua aplicação considere fundamentalmente a classificação pedológica, com especial atenção à textura do solo e a classificação climática, essencial para a interpretação dos valores obtidos.

### **Variabilidade espacial dos parâmetros pedológicos**

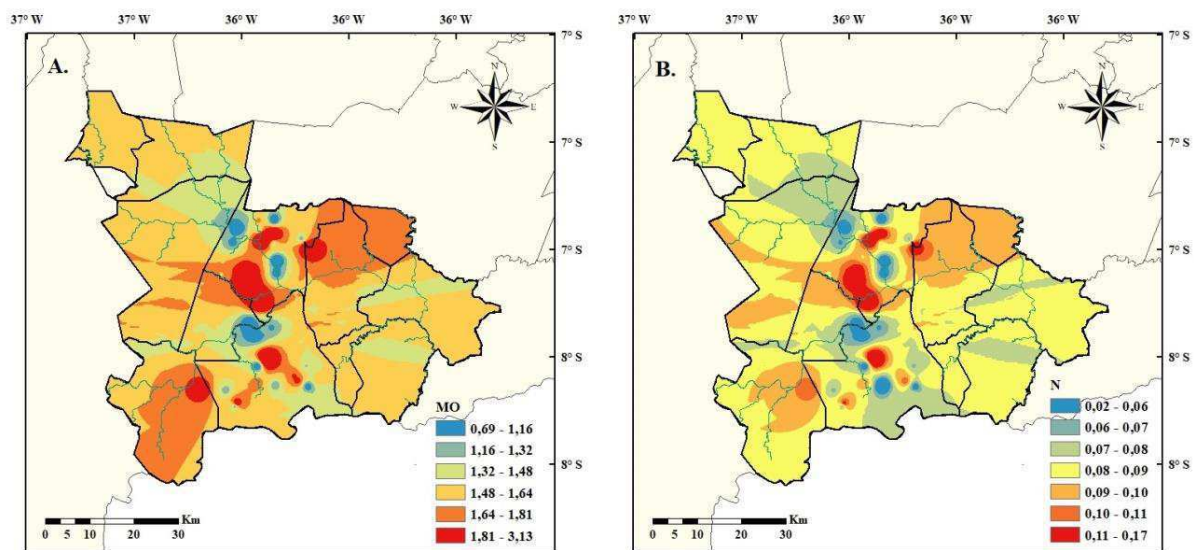
Mapas temáticos dos atributos químicos do solo (M.O, N, P e K), dos atributos físicos do solo foram gerados a fim de representarem a distribuição espacial dos mesmos. Ressalta-se que a amplitude dos dados após a interpolação é menor que a dos dados originais, pois o interpolador suaviza a distribuição, isto é, aumenta os valores mínimos e diminui os máximos.

A manutenção e melhoria da qualidade do solo em sistemas de cultivo contínuo é fundamental para garantir a produtividade agrícola e a qualidade ambiental para as gerações futuras. Nesse sentido, a matéria orgânica (Figura 8A) desempenha um papel importante, sendo considerada a principal indicadora da qualidade do solo, servindo de base para sustentabilidade agrícola (Lal, 2004). A quantidade de MO depende da entrada de material orgânico, da sua taxa de mineralização, da textura do solo e do clima, entre outros fatores. Esses fatores interagem de modo que o teor de MO tende em direção a um valor de equilíbrio em áreas sob vegetação nativa (Khorramdel et al., 2013).

Portando quando nos referimos à matéria orgânica do solo temos que entender que ela constitui a base fundamental para a produtividade agrícola sustentável, pois através dos seus efeitos diretos, é capaz de modular as condições químicas e físicas do solo, e consequentemente, a eficiência nutricional, sendo considerada uma importante indicadora da qualidade do solo. As influências mais evidentes da MO em relação às condições físicas do solo são: estabilização da temperatura do solo, favorecendo as plantas; aumento da capacidade de retenção de água no solo, favorecendo o desenvolvimento das raízes, principalmente em regiões com riscos de veranicos; melhor estabilidade dos agregados e redução do escoamento de água superficial, diminuindo os riscos de erosão (Conceição et al., 2005). Quanto maior a quantidade de resíduos orgânicos retornados para o solo, maior a cobertura da superfície do solo e maior a proteção da estrutura do solo contra perturbações naturais e antropogênicas (Blanco-Canqui & Lal, 2009).

Na Fig. 8B a qual representada a variável nitrogênio (N), cujos compostos reagem rapidamente no solo, sendo, portanto, um nutrientes dinâmicos (D'Andrea et al., 2004, Nascente et al., 2011). A maior parte do N (mais de 90%) está na fração orgânica do solo, a

qual constitui um grande reservatório de formas mais prontamente disponíveis, como a nítrica e a amoniacal. Estas formas minerais, apesar de representarem pequena parcela do N total, são de extrema importância, do ponto de vista nutricional, já que são elas as absorvidas pelos vegetais e microorganismos (Fageria et al., 2011). Sendo assim o conhecimento das quantidades de nitrogênio é fundamental para que possam ser efetivamente incorporadas ao sistema de produção agrícola.



**Figura 8.** Distribuição espacial das variáveis (A) Matéria Orgânica (%) – MO; e (B) Nitrogênio (%) – N, na Microrregião do Cariri Oriental da Paraíba.

Os mapas de distribuição dos atributos granulométricos do solo (Figura 9) mostram que o maior conteúdo de areia está localizado na metade superior esquerda da área (região leste), enquanto os maiores conteúdos de silte estão presentes na parte superior esquerda da área (Noroeste), superior direita (Nordeste) e inferior esquerda (sudoeste).

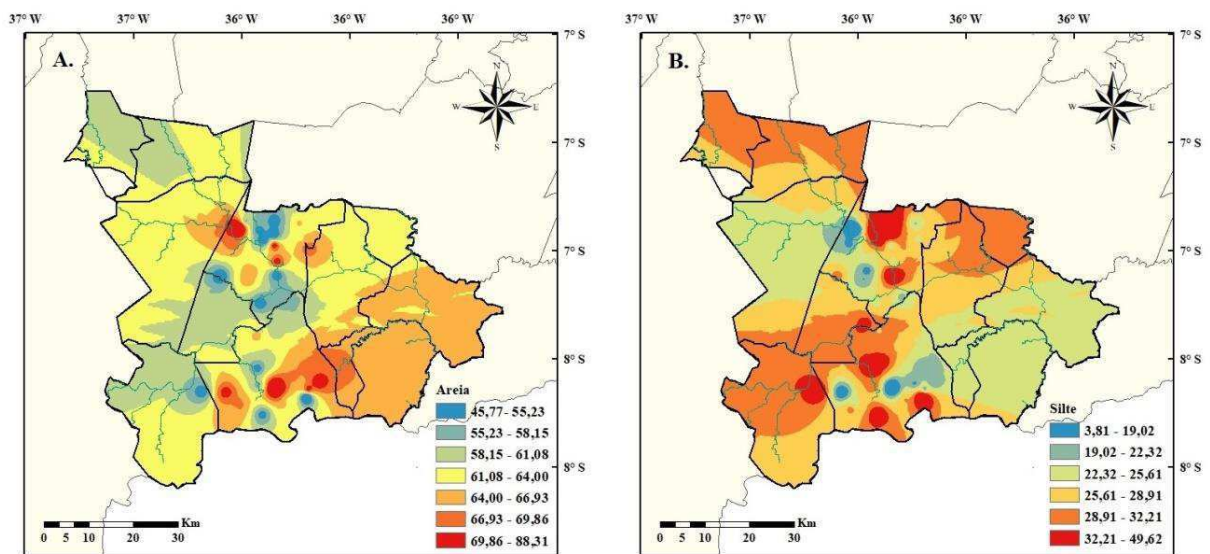
Os Solos da área de estudo apresentam em sua maioria textura arenosa (Figura 9A) – A textura, é um dos principais indicadores de qualidade e produtividade dos solos, uma vez que influencia na dinâmica da adesão e coesão entre as partículas de solo bem como o manejo dos solos, que, por sequencia influencia a resistência do solo à tração bem como a dinâmica da água no solo.

Este parâmetro físico apresenta uma concepção padrão atual baseada no princípio de que um solo para ser considerado produtivo deve apresentar uma textura argilosa (Santos et al., 2003a). Este paradigma se originou no passado, pois solos de textura arenosa eram de pouca relevância para a agricultura, decorrente das suas limitações de manejo, como:

deficiência em fertilidade, alta susceptibilidade à erosão, contaminação das águas subterrâneas e deficiência hídrica quando em sequeiro (Ramalho Filho; Beek, 1995).

É pertinente ressaltar ainda que segundo Donagemma et al. (2016), solos arenosos, são mais propensos a degradação e à perda da capacidade produtiva quando comparados aos solos argilosos, em condições ambientais similares; este fato aumenta a sustentação em relação aos dogmas criados para com os solos arenosos. Porém, esta concepção vem mudando atualmente, em função dos avanços nos sistemas de produção e manejo, tornando viáveis as atividades agrícolas nesses solos.

Os atuais sistemas de manejo do solo tornaram os solos produtivos independente da textura do solo. Este fato pode ser observado no estudo realizado por Santos et al. (2003a), por exemplo, onde o autor revelou que a produtividade da soja apresentou resultados superiores em solos de textura média e arenosa, quando comparados aos argilosos. É importante salientar ainda que o efeito positivo ou negativo do tipo de textura depende ainda das exigências de desenvolvimento do tipo de cultura.



**Figura 9.** Distribuição espacial das variáveis granulométricas (A) Areia (%); e (B) Silte (%), na Microrregião do Cariri Oriental da Paraíba.

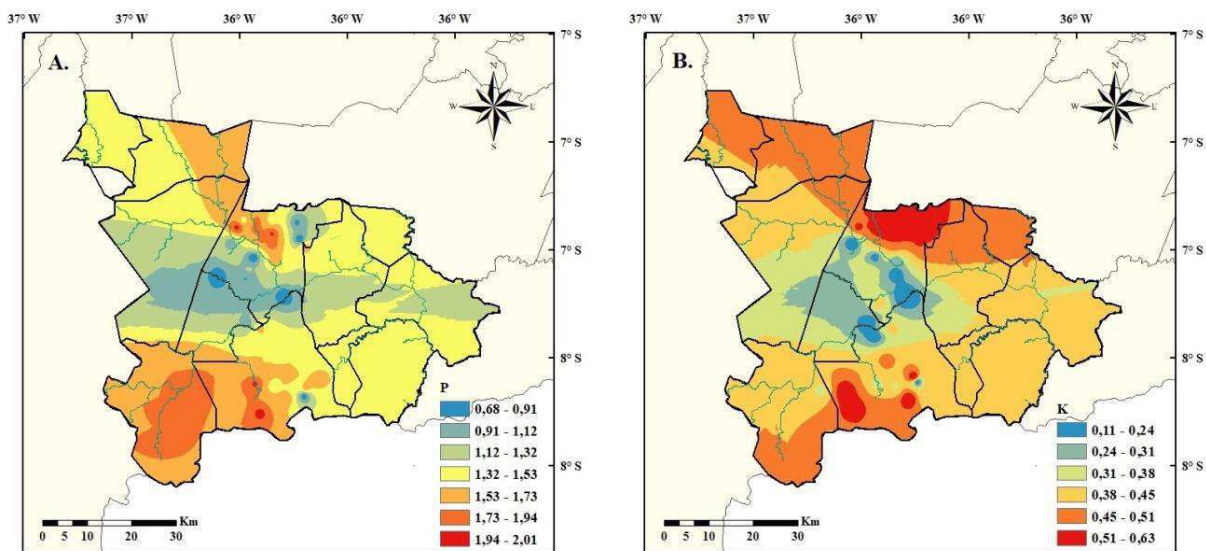
Verifica-se no mapa de variabilidade espacial do teor de P disponível (Figura 10A), a dinâmica do fósforo no solo está associada a fatores ambientais que controlam a atividade dos microrganismos, os quais imobilizam ou liberam os íons ortofosfato, e às propriedades físico-químicas e mineralógicas do solo. Assim, em solos jovens e nos moderadamente intemperizados, como os Vertissolos e os Neossolos (solos presentes na área de estudo), ainda ocorre fósforo em minerais primários, mas a maior parte deste elemento se encontra na forma

orgânica ou na forma mineral (Santos et al., 2018). O fósforo no solo também atuar como fonte ou dreno para a solução do solo, dependendo das suas características mineralógicas, das condições ambientais, da adubação e do manejo do solo.

Portanto, a análise visual do mapa (Figura 10A) permite observar o predomínio na parte inferior da área em estudo. Sobre a variação do teor de P pode ser atribuída, a fatores como sistema de semeadura direta e adubação, havendo, portanto, pouco espalhamento do nutriente além da área adubada, o que pode ser atribuído, em parte, ao fato do fósforo ser distribuído em linhas, provocando uma maior variabilidade quando comparado a outros elementos, devido a pouca mobilidade do nutriente além da área adubada.

O potássio (Figura 10B) por sua vez tem funções muito importantes na agricultura, pois é responsável por ativar a catálise biológica – enzimas e promove o metabolismo do nitrogênio (N) e a síntese de proteínas, nas plantas verdes; tem funções reguladoras da osmose – absorção e perda de água e promove a síntese do açúcar e a sua ida para os tecidos de armazenagem.

Logo o potássio e fósforo revestem-se de grande importância na agricultura brasileira, pelas características dos seus solos.



**Figura 10.** Distribuição espacial das variáveis (A.) Fósforo - P; e (B.) Potássio – k, na Microrregião do Cariri Oriental da Paraíba.

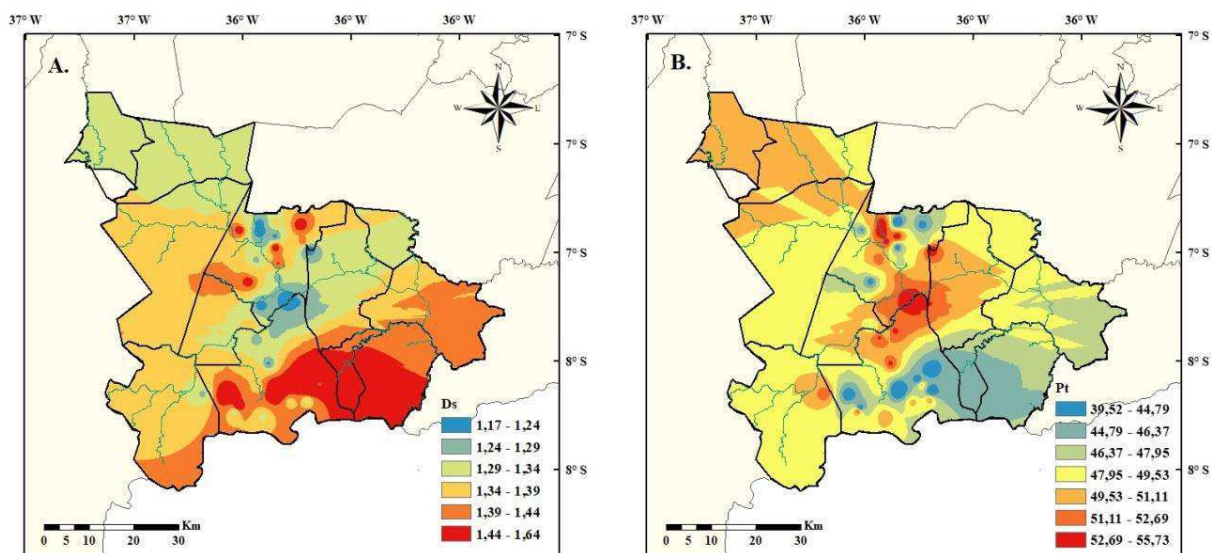
Na Fig.11 o fator 4 (F4) explica 14,36% da variabilidade total e correlaciona-se mais fortemente com a porosidade total (0,87) e de forma negativa com a densidade do solo (-0,68), ou seja, quanto maior a porosidade total menor a sua densidade do solo, sendo esta



prontamente influenciada pela diminuição da macroporosidade. Sendo assim, o F4 reflete a porosidade e a densidade do solo.

Sabendo que a densidade do solo (Figura 11A) expressa relação entre a quantidade de massa de solo seco e o volume do mesmo (considerando o espaço poroso), e está relacionado à sua estruturação, o manejo incorreto pode propiciar à perda dessa estrutura, levando-o à compactação, alterando a distribuição desses poros na matriz do solo, pois a porosidade é inversamente proporcional à densidade; aumentando, ainda, os valores desse índice (Tormena et al., 2002). Considerando que o manejo do solo altera suas propriedades físicas, imprescindíveis ao oferecimento de condições favoráveis ao desenvolvimento produtivo. Deste modo é importante ressaltar que a densidade do solo é uma das propriedades física que indica o estado de degradação deste recurso natural, interfere na dinâmica de água e de nutrientes, como também na penetração e crescimento de raízes.

A porosidade total (Pt) expressa na Fig. 11B, que faz menção ao espaço não ocupado por sólidos, mas por água e ar, desempenha papel fundamental no comportamento físico-hídrico do solo (aeração, condução e retenção de água, penetração das raízes) propiciando ou não, o aproveitamento dos nutrientes disponíveis, além de consistir em um potencial indicador de degradação do solo (Wendling et al., 2012).

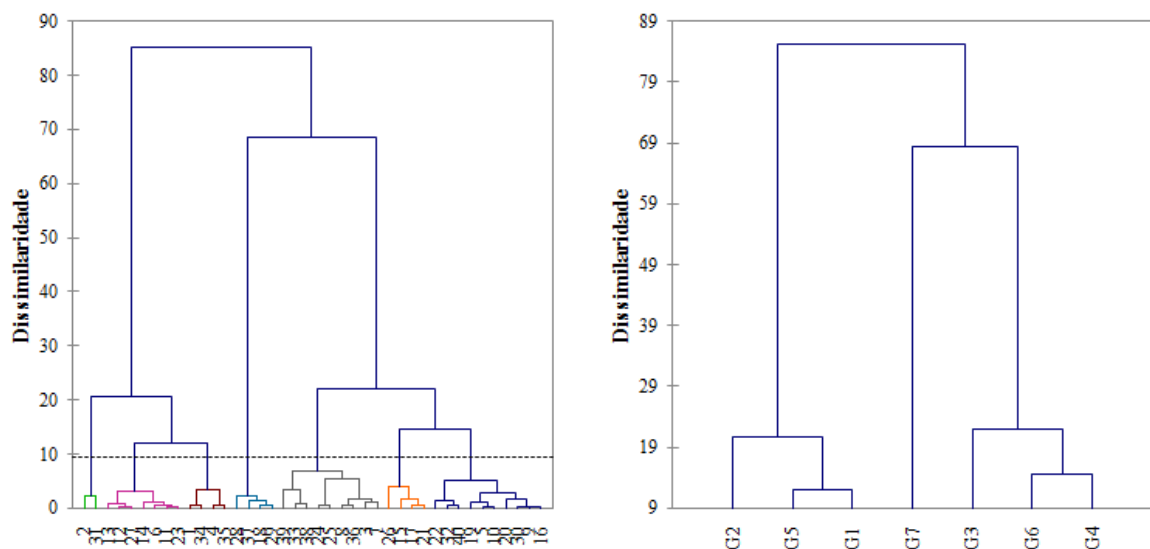


**Figura 11.** Distribuição espacial das variáveis (A.) Densidade do Solo – Ds; e (B.) Porosidade total – Pt, na Microrregião do Cariri Oriental da Paraíba.

Após a distribuição espacial das variáveis do solo na área de estudo, foi realizada a análise de agrupamento com base nos atributos com maior poder de discriminação, visando agrupar as áreas que mais se assemelham no comportamento de determinados atributos.

Foram construídos dendogramas utilizando a distância euclidiana como medida de dissimilaridade e o método de Ward como algoritmo de agrupamento (Neto, 2013). Além disso, considerou-se o nível máximo de dissimilaridade entre os grupos como sendo o ponto de corte (linha de corte) em 10% do valor máximo da distância de formação dos grupos, ou seja, os indivíduos pertencentes a um determinado grupo possuem grau de afinidade acima de 60% (Figura 12). De acordo com o observado, verifica-se no dendograma que todas as áreas se diferenciaram entre si com base na resposta conjunta dos atributos físicos e químicos.

Os grupos formados estão apresentados na Fig.12, que evidenciam a formação de sete agrupamentos, baseados no corte feito na maior distância entre grupos. Dentro de cada agrupamento têm-se variáveis com características similares e entre os agrupamentos verificam-se características distintas.



**Figura 12.** Dendrograma de agrupamento das interações entre as áreas analisadas.

Considerando somente os atributos relevantes (carga > 0,6) nos dois fatores, sendo que o 1º fator apresenta características predominantes de caráter químico, ou seja, e constituído por atributos químicos e o 2º fator por características físicas, realizou-se a AA, levando-se em conta as diferentes variáveis. Onde os G1, G3, G4 e G7 englobando as variáveis N, MO, CO e Pt, sendo assim estes grupos apresentam características semelhantes em si com predominância de atributos químicos, apresentando maior representatividade da área pois, estar presente em 67,5% dos pontos analisados; tornando-se mais claro quando verifica-se os valores médios de N, MO e CO sendo, 0,96, 0,92 e 0,92 respectivamente. Os G2 e G6 formados pelas variáveis Ds e areia, atributos físicos, exibem maior relação com a densidade do solo por apresentarem solos com características mais arenosas, como ocorrido na profundidade de 0,0-0,2 m.

Por fim com a formação de sete grupos distintos: G1, G2, G3, G4, G5, G6 e G7 englobando os atributos químicos e físicos do solo, nota-se que houve uma separação maior entre as variáveis, o que demonstra que à medida que diminui o nível de fusão, a similaridade das variáveis aumenta. Isso significa que a variação entre grupos diminui e a variação dentro do grupo aumenta. A diferenciação dos grupos foi marcante, mostrando as particularidades de cada variável, pois as características dos atributos de um mesmo grupo são semelhantes e diferentes do comportamento de outros agrupamentos.

#### 4. CONCLUSÕES

1. O uso das técnicas de análises multivariadas foi eficiente para verificar as similaridades ou as diferenças, com base nos atributos químicos e físicos do solo da área estudada.
2. A análise fatorial possibilitou resumir a informação contida em atributos químicos e físicos dos solos e identificar a estrutura das relações entre essas variáveis.
3. O IPS apresenta uma avaliação simultânea e integrada dos indicadores de solo, com base nos resultados deste estudo, recomenda-se que sua aplicação considere fundamentalmente a classificação pedológica, com especial atenção à textura do solo e a classificação climática, essencial para a interpretação dos valores obtidos.
4. Com a análise de agrupamento foi possível identificar sete grupos de variáveis onde todos os grupos se diferenciaram entre si com base na resposta conjunta dos atributos físicos e químicos.

## 5. REFERÊNCIAS

- ARTES, R. Aspectos estatísticos da análise fatorial de escalas de avaliação. *Revista de Psiquiatria Clínica, Edição Especial*, v.25, n.5, p.223-228, 1998.
- BLANCO-CANQUI, H.; STONE, L. R.; SCHLEGEL, A. J.; LYON, D. J.; VIGIL, M. F.; MIKHA, M. M.; STAHLMAN, P. W.; RICE, C. W. No-till induced increase in organic carbon reduces maximum bulk density of soils. *Soil Science Society of America Journal, Madison*, v. 73, p. 1871-1879, 2009.
- BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. Crop residue removal impacts on soil productivity and environmental quality. *Critical Reviews in Plant Science*, v.28, p.39–163, 2009.
- BRANDÃO, V.S.; CECÍLIO, R.A.; PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D. *Infiltração de água no solo*. Viçosa: UFV, 120p. 2006.
- BRYMAN, A., CRAMER, D. *Quantitative data analysis with SPSS release 10 for windows: A guide for social scientists*. New York, NY, US: Routledge. 2001.
- CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A.; SANTOS, M. L. M. Estatística multivariada aplicada à diminuição do número de preditores no mapeamento digital do solo. *Revista Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.46, n.5, p.554-562, 2011
- CONCEIÇÃO, P.C.; AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; SPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.777-788, 2005.
- CORRAR, L. J.; PAULO, E.; DIAS FILHO, J. M. (coord.). *Análise multivariada para cursos de Administração, Ciências Contábeis e Economia*. São Paulo: Atlas, 2007.
- D'ANDRÉA, A. F. et al. Carbon and nitrogen storage, and inorganic nitrogen forms in a soil under different management systems. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, DF, v. 39, n. 2, p. 179-186, 2004.
- DONAGEMMA, Guilherme Kangussu et al. Characterization, agricultural potential, and perspectives for the management of light soils in Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, [s.l.], v. 51, n. 9, p.1003-1020, set. 2016.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA CNPS, 1997. 212p. Documentos, 1.

EPSTEIN, E. & BLOOM, A. Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas. 2.ed. Londrina: Planta, 2006. 403p.

FAGERIA, N. K. et al. Growth and mineral nutrition of field crops. Boca Raton: CRC Press, 2011.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A. & SACAPIM, C. A. Espacialização vertical e horizontal dos indicadores de qualidade para um Latossolo Vermelho cultivado com citros. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.31, n.1, p.9-19, jan./fev. 2007.

FIORIN, T. T. Estimativa da infiltração de água no solo a partir de pedofunções. Santa Maria: UFSM. 2008. 116p. Tese de Doutorado

FREIRE, O. Solos das regiões tropicais. Botucatu: Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 271 p. 2006.

GUIMARÃES, R. M. L.; BALL, B. C.; TORMENA, C. A.; GIAROLA, N. E. F. B.; SILVA, A. P. Relating visual evaluation of soil structure to other physical properties in soils of contrasting texture and management. Soil & Tillage Research, v.127, p.92-99, 2013.

HAIR, Jr; BLACK, W. C; BABIN, B. J; ANDERSON, R. E e TATHAM, R. L. Multivariate Data Analysis. 6ª edição. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2006.

HAIR, J. J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. Análise multivariada de dados. 5.ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 593p.

IBGE 2010-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.Contagem da população 2010. Disponível em: <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=250053>. Acessado em 1 de junho de 2019.

IBGE 2015-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=250053>. Acessado em 1 de junho de 2019.

JAKOB, A. A. E.; YOUNG, A. F. O uso do método de interpolação espacial das análises sociodemográficas. IN: Anais do XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais, Caxambu-MG: ABEP, 2006, p. 1-22.

JOSÉ, J. V.; REZENDE, R.; FREITAS, P. S. L.; HONGYU, K.; PERBONI, A.; MARQUES, P. A. A.; DIAS, C. T. S.; COELHO, R. D. Análise multivariada e geoestatística de variáveis físico-hídricas de diferentes solos. *Water Resources Research* v.2, n.3, p.121-129, Sept.-Dec., 2013.

KHORRAMDEL, S.; KOOCHEKI, A.; MAHALLATI, M.N.; KHORASANI, R.;GHORBANI, R. Evaluation of carbon sequestration potential in corn fields with different management systems. *Soil & Tillage Research*, v.133, p.25-31, 2013.

LAL, R. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global. *Science*, v.304, p.1623, 2004.

LANDIM, P. M. B. Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática, Texto Didático 02, 20p, 2000. Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>

LIMA, C. G. R.; CARVALHO, M. P.; MELLO, L. M. M. & LIMA, R. C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de forragem, a porosidade total e a densidade do solo de Pereira Barreto (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.31, n.6, p.1233-1244, 2007

MARDIA, A. K. V.; KENT, J. T. & BIBBY, J. M. *Multivariate analysis*. London: Academic Press, 1997, 518p.

MENDONÇA, E. S. e MATOS, E. S. *Matéria orgânica do solo: métodos de análises*. Brasília: ABEAS, 2005. 107p.

MOTA, L. H. S. O., e VALLADARES, G. S. Vulnerabilidade à degradação dos solos da Bacia do Acaraú, Ceará. *Revista Ciência Agronômica*, 42 (1), pp. 39-50, (2011).

NASCENTE, A. S. et al. Produtividade do arroz de terras altas em função do manejo do solo e da época de aplicação de nitrogênio. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 60-65, 2011.

NETO, O. N. S. *Análise Multivariada dos Atributos Físicos e Químicos de um Cambissolo Cultivado sob Práticas de Manejo Sustentável da Caatinga*. Mossoró-RN: UFESA. 2013.73p. Dissertação de Mestrado.

PALLANT, J. SPSS Survival Manual. Open University Press, 2007.

PARAÍBA. Governo do Estado. Secretaria de Desenvolvimento Territorial. Plano Territorial de Desenvolvimento Rural sustentável – PTDRS. Território do Cariri Oriental – PB. Resumo executivo 2010-2020. 2010. 68p

RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K.J. Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras. 3.ed. rev. Rio de Janeiro: EMBRAPA CNPS, 65p. 1995.

REIS, E. Estatística Multivariada Aplicada. Lisboa: Sílabo, 1997. 343p.

RIBEIRO JR., P. J.; DIGGLE, P. J. The geoR package functions for geostatistical data analysis. R.News, v.1, p.15-18, 2001.

RICHARDS, L. A. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agriculture Handbook, United States Department of Agriculture, n.60, 1954. 160p.

SANTOS, D. R. dos; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. Cienc. Rural vol.38 no.2 Santa Maria, 2008

SANTOS, J.Z.L. Fertilizantes fosfatados e produção da soja em solos com diferentes capacidades tampão de fosfato. Revista de Brasileira de Ciência do Solo, v. 27, p. 639-646, 2003a.

SANTOS, P. R. Atributos do solo em função dos diferentes usos em perímetro irrigado do sertão de Pernambuco. 2010. 112f. Tese (Doutorado Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife-PE.

SANTOS, D. DOS; SOUZA, E.G. DE; NÓBREGA, L.H.P.; BAZZI, C.L.; GONÇALVES JÚNIOR, A.C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho após cultivo de soja. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 16, n. 8, p. 843–848, 2012.

SANTOS, J. C. B.; JÚNIOR, V. S. S.; CORRÊA, M. M.; RIBEIRO, M. R.; ALMEIDA, M. C.; BORGES, L. E. P. Caracterização de Neossolos Regolíticos da região do semiárida do estado de Pernambuco. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 36 (3), pp. 683-69, 2012.



TORMENA, C. A.; BARBOZA, M. C.; COSTA, A. C. S.; GONÇALVES, C. A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. *Revista Scientia Agrícola*, São Paulo, v.59, n.4, p.795-801. 2002.

VIANA, E. T.; BATISTA, M. A.; TORMENA, C. A.; COSTA, A. C. S.; INOUE, T. T. Atributos físicos e carbono orgânico em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 35, p. 2105-2114, 2011.

VICINI, L. *Análise multivariada da teoria à prática*. 2005. 215 f. Monografia (Especialização em Estatística e Modelagem Quantitativa) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS.

WENDLING, B.; VINHAL-FREITAS, I. C.; OLIVEIRA, R. C.; BABATA, M. M; BORGES, E. N. Densidade, agregação e porosidade do solo em áreas de conversão do cerrado em floresta de pinus, pastagem e plantio direto. *Bioscience Journal*, Uberlândia, v. 28, Supplement 1, p. 256-265,2012.

YEMEFACK, M.; ROSSITER, D. G.; NJOMGANG, R. Multi-scale characterization of soil variability within an agricultural landscape mosaic system in southern Cameroon. *Geoderma*, v. 125, n. 1-2, p. 117-143, 2005.

ZANÃO JÚNIOR LA et al. 2007. Variabilidade espacial do pH, teores de matéria orgânica e micronutrientes em profundidades de amostragem num Latossolo Vermelho sob semeadura direta. *Ciência Rural* 37: 1000-1007.

ZIMMERMANN, B.; ZEHE, E. N.; HARTMANN, K.; ELSENBEER, H. Analyzing spatial data: An assessment of assumptions, new methods, and uncertainty using soil hydraulic data. *Water Resources Research*, v.44, p.1-18, 2008.

### CAPÍTULO 3

## MODELO DE REGRESSÃO ESPACIAL PARA ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA NA REGIÃO DO CARIRI ORIENTAL PARAIBANO

### RESUMO

Este trabalho apresenta o Modelo Regressivo Clássico (RC); Modelo de Regressão Espacial Auto regressivo (MEAR) e Modelo do Erro Espacial (MEE) no intuito de avaliar a variabilidade e caracterizar a dependência espacial entre alguns atributos do solo na microrregião do Cariri Oriental da Paraíba e investigar a associação entre a produtividade do algodão e do feijão com variáveis agrometeorológicas relacionadas à precipitação pluvial, temperatura média. O estudo foi realizado com os dados das safras dos anos agrícolas de 2000-2017, da microrregião do Cariri Oriental da Paraíba. A estimativa de parâmetros dos modelos ajustados foi obtida utilizando o método de Máxima Verossimilhança. A avaliação do desempenho dos modelos foi realizada com base no coeficiente de determinação ( $R^2$ ), no máximo valor do logaritmo da função verossimilhança e no critério de informação bayesiano de Schwarz (BIC). Este estudo também permitiu verificar a correlação e autocorrelação espacial entre a produtividade do algodão, do feijão e dos elementos agrometeorológicos, por meio da análise espacial, usando de técnicas como o índice I de Moran. O estudo pôde demonstrar que, por meio dos indicadores de desempenho utilizados, os modelos MEAR e MEE ofereceram melhores resultados em relação ao modelo de regressão múltipla clássica.

**Palavras-chave:** Variabilidade; Produtividade; Análise espacial.

## ABSTRACT

This work presents the Classic Regressive Model (RC); Spatial Regression Auto Regression Model (MEAR) and Spatial Error Model (MEE) in order to assess variability and characterize the spatial dependence between some soil attributes in the Cariri Oriental Paraíba micro region and investigate the association between cotton productivity and of beans with agrometeorological variables related to rainfall, average temperature. The study was carried out with the data of the harvests of the agricultural years of 2000-2017, of the microregion of Cariri Oriental da Paraíba. The estimation of parameters of the adjusted models was obtained using the Maximum Likelihood method. The performance evaluation of the models was performed based on the coefficient of determination ( $R^2$ ), the maximum value of the likelihood function logarithm and the Schwarz Bayesian information criterion (BIC). This study also allowed to verify the correlation and spatial autocorrelation between the productivity of cotton, beans and agrometeorological elements, through spatial analysis, using techniques such as Moran's index I. The study was able to demonstrate that, using the performance indicators used, the MEAR and MEE models offered better results in relation to the classic multiple regression model.

**Keywords:** Variability; Productivity; Spatial analysis.

## 1. INTRODUÇÃO

O solo é um dos principais recursos de um sistema de produção agroindustrial, sendo extremamente importante o conhecimento de seus atributos para a realização de um manejo adequado, para a expressão de sua capacidade produtiva. Sendo assim, o levantamento pedológico se enquadra como uma ferramenta indispensável para a realização deste manejo (Soria, 2014).

Os processos e atributos do solo que determinam o desempenho e a produção das culturas, bem como o impacto da agricultura ao ambiente variam no espaço e no tempo. Estes atributos físicos e químicos do solo podem ser espacialmente correlacionados, conduzindo para que a dependência espacial explique a influência dos fatores e processos de sua formação, assim como do seu manejo. Desta forma, este conhecimento pode contribuir para o aumento da produtividade agrícola, e o mapeamento dos atributos do solo numa área torna-se importante tanto para a recomendação de práticas de manejo do solo, como para a avaliação dos efeitos da agricultura sobre a qualidade ambiental. Com isso, o efeito das alterações nos atributos físicos e químicos do solo provocados por diferentes manejos do solo e sua correlação com a variabilidade espacial, e principalmente temporal sobre a produtividade das culturas, ainda não estão bem elucidados (Soria, 2014).

A análise espacial de área compõe um conjunto de procedimentos cujo objetivo é encontrar um modelo inferencial que incorpore explicitamente as relações espaciais constituintes de um fenômeno. Normalmente, a modelagem é iniciada pela análise exploratória de dados espaciais associada à visualização dos dados por meio de gráficos e mapas, e posteriormente, identificam-se padrões de dependência espacial das variáveis em estudo. Almeida et al. (2008) ressaltam que a análise exploratória de dados espaciais trata diretamente de efeitos decorrentes da dependência espacial e da heterogeneidade espacial.

Estendendo o estudo para a análise espacial multivariada com dados de área, é possível utilizar modelos de regressão espacial linear por meio da regressão espacial múltipla, que permite constatar a relação entre uma variável dependente e diversas variáveis independentes envolvidas, considerando a localização onde foram coletados os dados. Se constatada tal relação, busca-se ajustar um modelo estatístico que permita descrever uma determinada variável em relação às demais, considerando a localização dos dados (Lourenço; Landim, 2004).

Silva et al (2012) avaliou os impactos das alterações climáticas sobre o zoneamento agrícola de risco climático da cultura da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do

Brasil, combinado com técnicas de geoprocessamento (SIG) o modelo de balanço hídrico identificando as áreas das quais a cultura poderá sofrer restrições de rendimento devido às mudanças climáticas. Silva et al (2011) realizou estudo semelhante para a cultura do feijão caupi cultivado no nordeste do Brasil, identificando áreas regionais onde a cultura do feijão caupi sofrerá redução de rendimento devido às mudanças climáticas

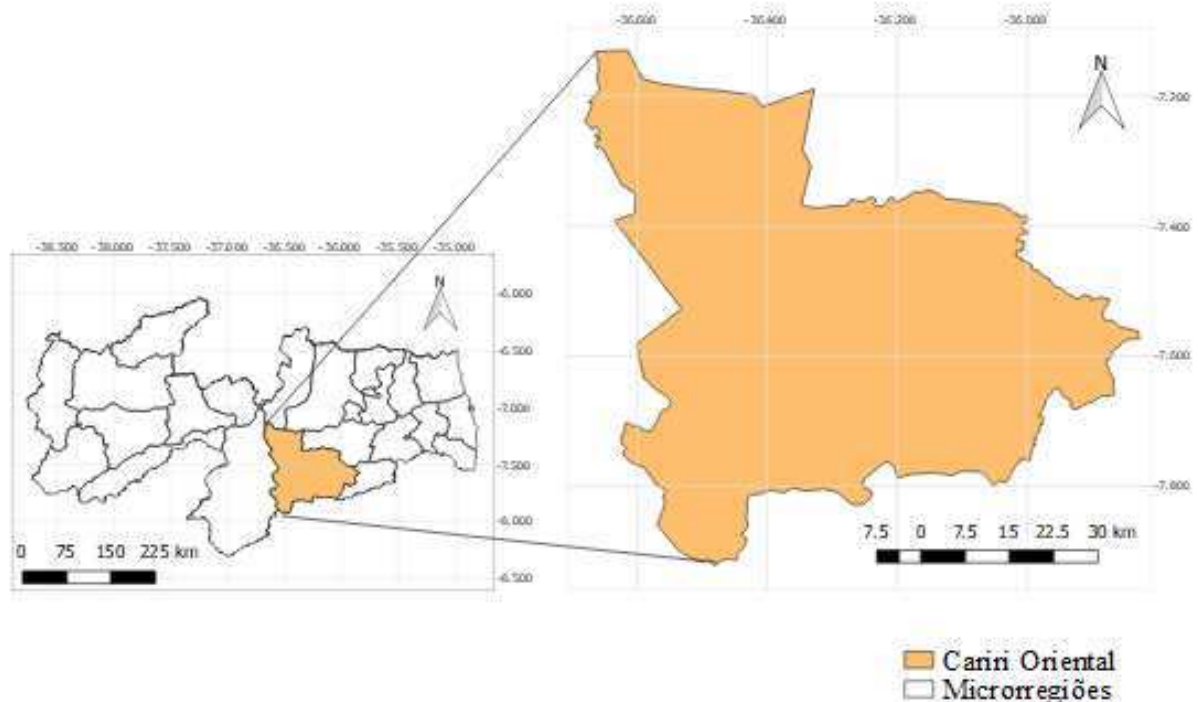
Pesquisas realizadas por Silva et al (2011), avaliou o impacto das mudanças climáticas no algodoeiro herbáceo (*Gossypium hirsutum* L. *latifolium* Hutch) cultivado no Nordeste do Brasil a partir de estimativas da disponibilidade de terras aptas para a atividade agrícola de sequeiro. Silva et al (2011), verificou o monitoramento climático e a produção agrícola de grãos nos estados da Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará nos últimos vinte anos, comparando a variabilidade interanual da produção agrícola e da precipitação pluvial para os estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Paraíba.

Portanto o presente estudo teve por objetivo avaliar a variabilidade e caracterizar a dependência espacial entre alguns atributos físicos e químicos dos solos na microrregião do Cariri Oriental da Paraíba, bem como estudar as correlações lineares e espaciais para identificar as interações entre tais atributos na produção do algodão herbáceo e do feijão caupi.

## 2. MATÉRIAS E MÉTODOS

### 2.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada na microrregião do Cariri Oriental do Estado da Paraíba (Figura 1), constituída por 12 municípios. De acordo com o censo do (IBGE 2015) a microrregião possui uma área de 4.219,150 km<sup>2</sup>, com população estimada de 63.704 habitantes (IBGE 2010).



**Figura 1.** Localização da microrregião do Cariri Oriental.

A região caracteriza-se por temperaturas elevadas (médias anuais em torno de 26°), baixas amplitudes térmicas (Nascimento e Alves, 2008) e escassez de chuvas, apresentando grande variabilidade tanto no tempo como no espaço, apresentando uma média anual da precipitação em torno de 587 mm com desvio padrão de  $\pm 230$  mm (Sena et al. 2012).

### 2.2 Dados

Foram utilizados dados climáticos de estações meteorológicas inseridas na área de estudo monitoradas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Para estas localidades foram utilizadas séries temporais de dados de oriundos do período de 2000-2017.

Para análise de produção foram utilizados dados do Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA) para as culturas do algodão herbáceo e do feijão caupi.

### 2.3 Índice I de Moran (I)

O índice I de Moran ( $I$ ) é um mecanismo estatístico para se verificar a dependência espacial de determinada variável, tal índice é um dos mais utilizados para este fim e estimado pela seguinte expressão, assim como Almeida et al. (2008) (Equação 1):

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (1)$$

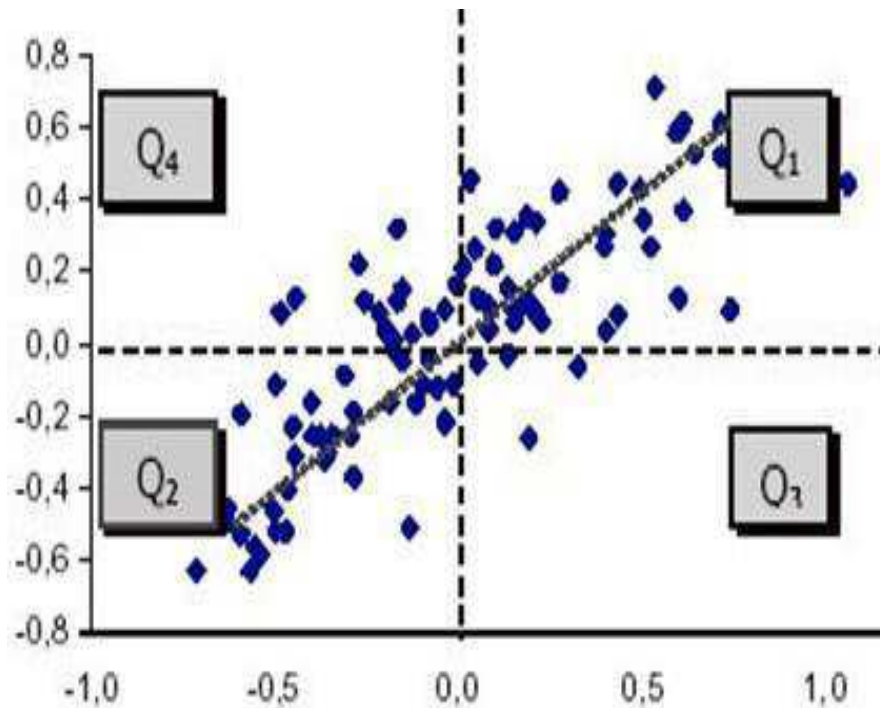
em que:  $n$  é o número de observações;  $w_{ij}$  é o elemento na matriz de vizinhança para o par  $i$  e  $j$ ;  $W$  é a soma dos ponderadores da matriz  $y_i$  e  $y_j$  são desvios em relação à média;  $\bar{y}$  é a média

Esse índice mede a autocorrelação espacial a partir do produto dos desvios em relação à média, isto é, o índice I de Moran é uma medida global da autocorrelação espacial, pois indica o grau de associação espacial presente em um conjunto de dados. Tal índice varia em um intervalo (-1,1), caso apresente independência espacial seu valor é zero (0), valores positivos (entre 0 e +1) indicam correlação direta, isto é, associação perfeita a dependência espacial, e valores negativos (entre 0 e -1) indicam correlação inversa, ou seja, refere-se a dispersão perfeita.

#### 2.3.1 Diagrama de Espalhamento de Moran

O diagrama de espalhamento de Moran (Moran Scatterplot Map) é uma maneira de visualizar a dependência espacial. Constituído por valores normalizados (valores de atributos subtraídos de sua média e divididos pelo desvio padrão), este gráfico permite analisar a variabilidade espacial de uma variável (Câmara et al., 2004)

Este diagrama de espalhamento é dividido em quatro quadrantes (Q1, Q2, Q3 e Q4). Cada quadrante é interpretado por:



**Figura 2.** Diagrama de Espalhamento de Moran

- Q1: Localizado na parte superior direita, mostra as áreas que apresentam altos valores para variável em análise cercada por áreas vizinhas que também apresentam valores acima da média para a variável em análise. Esse quadrante é classificado como alto-alto (AA, + +).
- Q2: Localizado na parte inferior esquerda, mostra as áreas que apresentam baixos valores para variável em análise cercada por áreas vizinhas que também apresentam valores abaixo da média para variável em análise. Esse quadrante é classificado como baixo-baixo (BB, - -).
- Q3: Localizado na parte inferior direita, mostra as áreas que apresentam altos valores para variável em análise cercada por áreas vizinhas que apresentam valores abaixo da média para variável em análise. Esse quadrante é classificado como alto-baixo (AB, + -).
- Q4: Localizado na parte superior esquerda, mostra as áreas que apresentam baixos valores para variável em análise cercada por áreas que apresentam valores acima da média para a variável em análise. Esse quadrante é classificado como baixo-alto (BA, - +).



## 2.4 Modelos de Regressão Espacial

### 2.4.1 Regressão Clássica (RC)

Um modelo de regressão (Eq. 1) baseia-se no interesse em avaliar a relação de uma variável ( $Y$ ) em relação às variáveis independentes ou covariáveis ( $X$ ), isto é, o relacionamento entre duas ou mais variáveis de forma que uma delas possa ser explicada ou ter seu valor predito por meio de outras variáveis (Corrar et al., 2007). No caso de dados espaciais, havendo autocorrelação espacial, o modelo gerado deve incorporar a estrutura espacial, já que a dependência entre as observações afeta a capacidade de explicação do modelo (Câmara; Monteiro, 2004).

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon_i , \quad (2)$$

em que:  $Y_i$  é uma observação da variável dependente,  $X_1, X_2, \dots, X_n$  são as variáveis independentes,  $\beta = (\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$  são denominados como coeficientes de regressão correspondentes, e  $\varepsilon_i$  é o erro associado as observações da variável dependente.

A suposição de que as observações sejam independentes simplifica o modelo, mas no contexto de dados de área, esta simplificação é pouco provável que aconteça, por causa da possibilidade de dependência espacial entre os termos do erro. Uma alternativa é utilizar um modelo espacial auto regressivo misto (Spatial Lag Model), que atribui à variável resposta  $y_i$  a autocorrelação espacial ignorada. Outra alternativa é a aplicação de um modelo de erro espacial (Spatial Error Model), que considera os efeitos espaciais como um ruído, isto é, como um fator a ser removido (Lesage; Fischer, 2010).

### 2.4.2 Modelo espacial Auto regressivo (MEAR)

O modelo espacial auto regressivo, permite que as observações da variável dependente  $y_i$  na área  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) dependam de observações em áreas vizinhas com  $j \neq i$  (Câmara et al., 2004), assumindo a forma (Eq. 3):

$$Y_i = \rho \sum_{j=1}^n W_{ij} y_j + \sum_{q=1}^Q X_{iq} \beta_q + \varepsilon_i , \quad (3)$$

em que:  $\varepsilon_i$  é o erro,  $W_{ij}$  é o  $(i, j)$ -ésimo elemento da matriz espacial de ordem  $n$  (isto é,  $n$  por  $n$ ). O escalar  $\rho$  é um parâmetro (a ser estimado) que vai determinar a intensidade da relação espacial auto regressiva entre  $y_i$  e  $\sum_j W_{ij}y_j$ , esse parâmetro possui como interpretação o efeito médio da variável dependente relativo à vizinhança espacial na região em questão. O vetor  $Wy$  é conhecido como lag espacial, a matriz  $X$  contém as observações das variáveis independentes e o vetor  $\beta$  possui coeficientes para as variáveis independentes.

### 2.4.3 Modelo de erro espacial (MEE)

O modelo de erro espacial ocorre quando a dependência espacial é obtida através do processo de erros, em que os erros das diferentes áreas podem apresentar covariância espacial (Bivand; Piras, 2015), determinado pela expressão (Eq. 4):

$$\varepsilon_i = \rho \sum_{j=1}^n W_{ij}\varepsilon_j + u_i , \quad (4)$$

em que:  $\rho$  é o parâmetro auto regressivo que indica a intensidade da autocorrelação espacial entre os resíduos da equação observada, esse parâmetro mensura o efeito médio dos erros dos vizinhos em relação ao resíduo da região em questão e  $u_i$  é o termo do erro aleatório, tipicamente assumindo ser *i.i.d.* A autocorrelação espacial nesses modelos de erro espacial aparece nos termos de erro.

Em notação matricial pode ser escrita (Eq. 5):

$$\varepsilon = \lambda W\varepsilon + \mathbf{u} \quad (5)$$

Assumindo  $|\lambda| < 1$ , chega-se na seguinte expressão (Eq. 6):

$$\varepsilon = (\mathbf{I} - \lambda W)^{-1}\mathbf{u} \quad (6)$$

Inserindo a expressão acima no modelo de regressão clássica, chega-se ao seguinte modelo de erro espacial (Eq. 7):

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\beta + (\mathbf{I} - \lambda W)^{-1}\mathbf{u} \quad (7)$$

Com  $E[\mathbf{u}\mathbf{u}'] = \sigma^2\mathbf{I}$ , sendo que a matriz de variâncias e covariâncias é definida da seguinte forma (Eq. 8):

$$E[\varepsilon\varepsilon'] = \sigma^2(\mathbf{I} - \lambda W)^{-1}(\mathbf{I} - \lambda W')^{-1} \quad (8)$$

O MEE é caracterizado como uma junção do modelo de regressão clássica com o modelo auto regressivo espacial em termos do erro  $\varepsilon$ . Portanto, seu valor esperado é igual ao modelo de regressão clássica.

#### 2.4.5 Seleção de modelos

Segundo Dobson e Barnett (2011) o algoritmo de ajuste deve ser aplicado não apenas para um modelo, mas sim para vários modelos de um conjunto bem amplo que deve ser relevante para a natureza das observações que se pretende analisar. Se o processo é aplicado a um único modelo, não levando em consideração possíveis modelos alternativos, existe o risco de não se obter modelos mais adequados aos dados. Similarmente aos modelos de regressão usual, pelo critério de Akaike, deve-se encontrar um submodelo para o qual a quantidade abaixo seja minimizada (Eq. 9):

$$AIC = D(y; \hat{\mu}) + 2p , \quad (9)$$

em que:  $D(y; \hat{\mu})$  é a distância entre o logaritmo da função de verossimilhança do modelo saturado ( $q$  parâmetros) e do modelo sob investigação ( $p$  parâmetros) avaliado na estimativa de máxima verossimilhança  $\hat{\beta}$ . Um valor pequeno para a função desvio indica que, para um número menor de parâmetros, tem-se um ajuste tão bom quanto o ajuste com o modelo saturado.

Na interpretação dos valores do coeficiente de correlação gerados pelos modelos estatísticos, os mesmos foram classificados de acordo com Rowntree e O'Hehir (1981) e são apresentados na Tabela 1:

**Tabela 1.** Classificação da intensidade da correlação.

<b>Classificação</b>	<b>Intervalo</b>
Muito fraca	0,0 – 0,2
Fraca	0,2 – 0,4
Moderada	0,4 – 0,7
Forte	0,7 – 0,9
Muito forte	0,9 – 1,0

Fonte: Rowntree e O'Hehir (1981); adaptado: Autor (2020)

### 3. RESULTADOS E DISCURSÕES

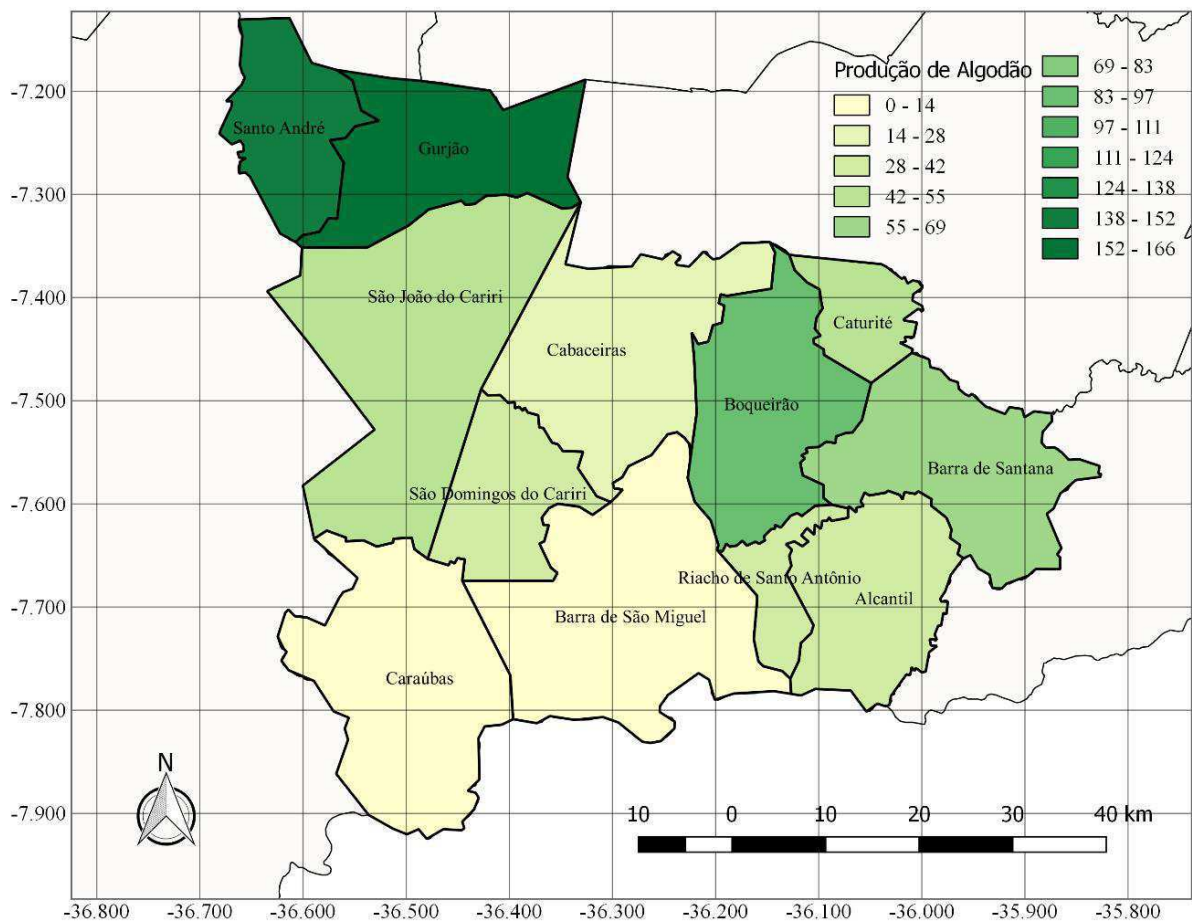
A variabilidade temporal e espacial da precipitação se constitui em uma das características marcantes do semiárido, sendo um fator importante para o desenvolvimento da região do Cariri Oriental paraibano. Sabendo disso, foi realizada uma análise detalhada do comportamento do solo e de variáveis meteorológicas em escala temporal e espacial, para melhor compreender a forma de atuação na produção de algodão herbáceo e feijão caupi, além de verificar as diferenças existentes em anos de eventos extremos de precipitação e seus impactos para a região.

O período chuvoso no Cariri Oriental concentrando-se nos meses de março, abril e maio enquanto os meses de setembro a novembro é caracterizado pelos menores índices pluviométricos. A contribuição dos meses de setembro a novembro para a precipitação anual não ultrapassa 1,5% (Sena, 2017). O comportamento observado para a região, também foi verificado por outros autores, tais como Silva (2014) e Sena et al. (2012) e Alves et al. (2015).

Segundo Sena (2017), devido à instabilidade climática da região, que impõe riscos à agricultura de sequeiro, na maioria das vezes se planta muito e se colhe pouco, sendo o prejuízo econômico ainda maior em anos de El Niño.

Na Fig. 3 verifica-se a distribuição da produção acumulada de algodão no Cariri Oriental ao longo de 17 anos, sendo perceptível que os municípios que apresentam maior produção são Gurjão com produção média de 9,76 toneladas por ano, mínima de uma tonelada e máxima de 48 toneladas ao ano e Santo André com produção máxima de 40 toneladas e com um média de 8,65 toneladas ao ano e os menores Caraúbas e Barra de São Miguel.

Consequentemente a baixa produção de algodão em alguns municípios na Cariri Oriental se deu por diversos fatores sendo eles, condições climáticas desfavoráveis, esgotamento do solo, manejo inadequado da cultura em questão entre outros. Essa série de fatores associadas ao longo período seca acaba por provocar uma baixa produtividade agrícola.



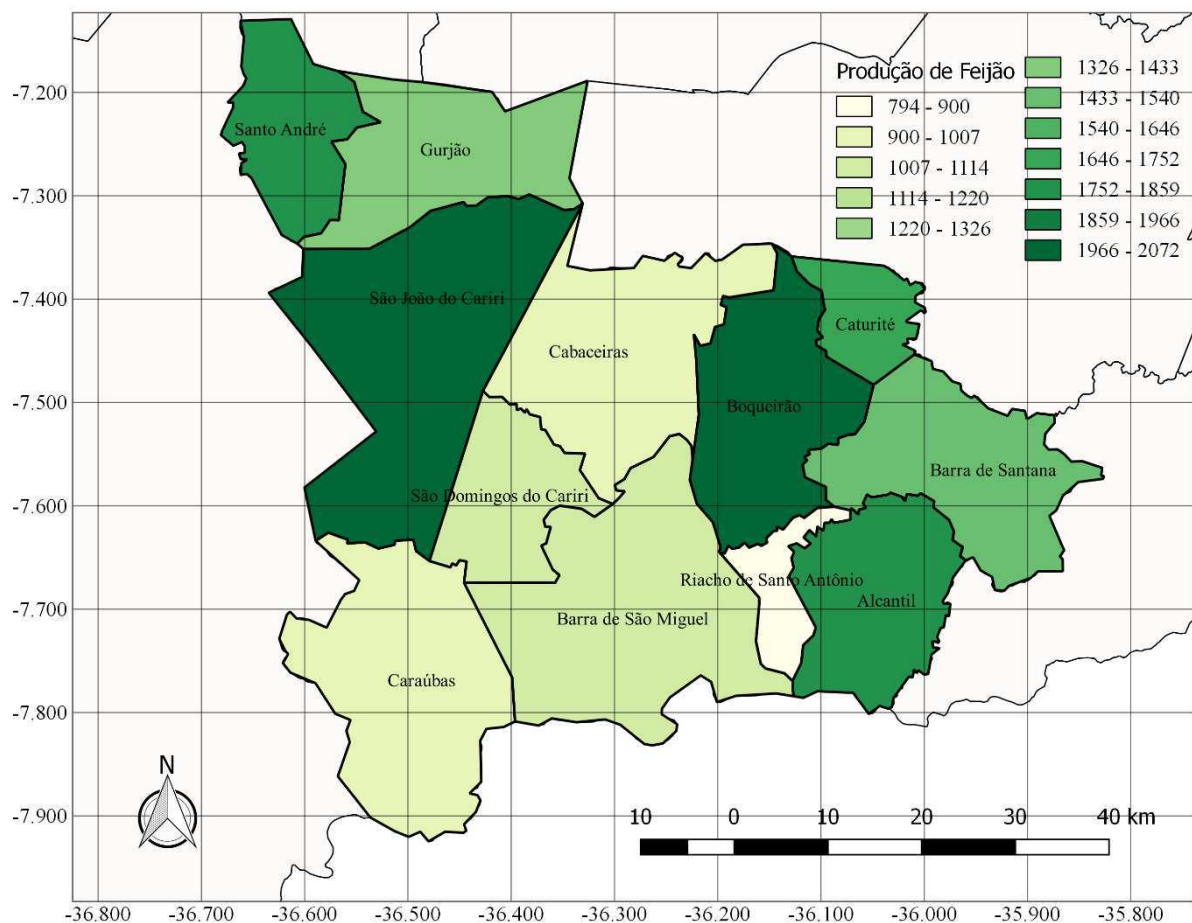
**Figura 3.** Produção acumulada de algodão em toneladas no período de 2000-2017 para microrregião do Cariri Oriental da Paraíba.

A agricultura desenvolvida na área de estudo é de subsistência e irregular devido à variabilidade da estação chuvosa da região semiárida. A maioria da produção é explorada em condições de sequeiro, sendo o feijão e o milho os cultivos de maior expressão econômica. Toda cultura plantada em sistema de sequeiro depende, inevitavelmente, da quantidade, da distribuição e da intensidade das chuvas. É altamente dependente das interações entre suas fases fenológicas e as variações interanuais do tempo e clima (Silva et al., 2002). Geralmente, estas culturas são cultivadas em consórcio entre elas ou com forrageiras, como capim búffel e/ou palma forrageira, alcançando bons índices de produtividade, principalmente quando a estação chuvosa anual ocorre normalmente (Silva Neto, 2004 e Sousa, 2006).

Silva et al. (2010), ressalta que um aumento da temperatura do ar afeta a disponibilidade de uma área agrícola adequada e, em particular, o grão de feijão nordeste do Brasil, recomendando-se que as variedades de feijão-caupi melhor adaptado a condições de alta temperatura deve ser implantadas na região. Os impactos das mudanças climáticas são

altamente variáveis no espaço e no tempo devido à variabilidade da temperatura do ar, precipitação, solo e vegetação em toda a região e a paisagem das áreas rurais no nordeste do Brasil é moldada com culturas que são bem adaptados ao clima semiárido como feijão-caupi, por exemplo, (Silva et al., 2010).

A Fig.4 evidencia os municípios que se destacam na produção de feijão, sendo os mais produtivos Boqueirão e São João do Cariri têm uma produção média ao ano de 114 e 57,55 de toneladas respectivamente. Outros municípios também apresentam uma boa produção acumulada a exemplo de Alcantil, Santo André, Caturité, Barra de São Miguel e Gurjão, no entanto a cidade de Riacho de Santo Antônio exibiu uma baixa produção de feijão quando comparados com as demais cidades.

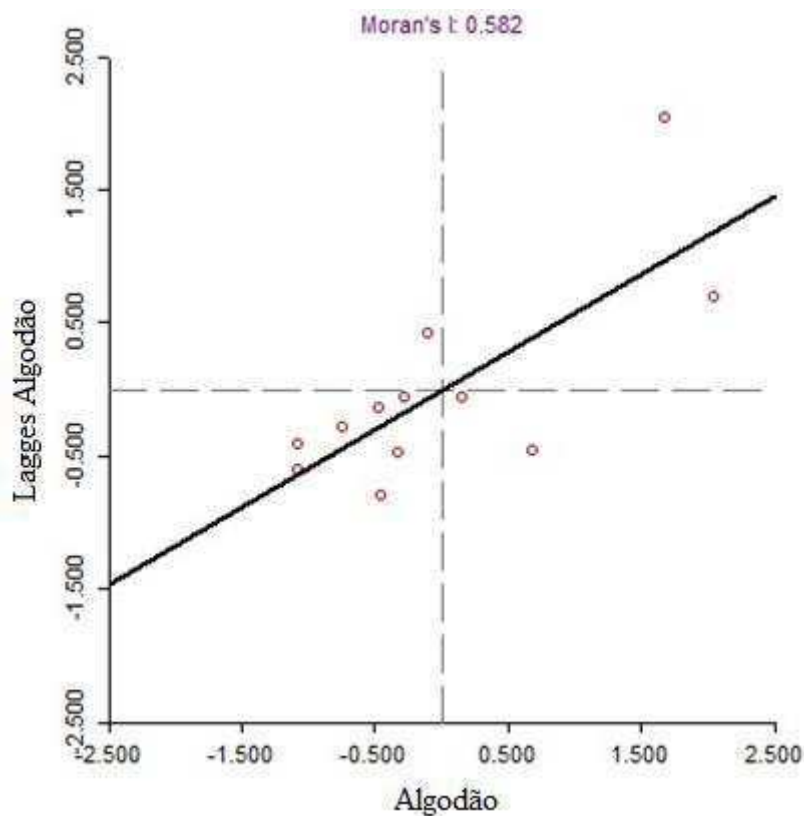


**Figura 4.** Produção acumulada de feijão em toneladas no período de 2000-2017 na microrregião do Cariri Oriental da Paraíba.

Conhecendo as produções acumuladas das culturas algodão e feijão da microrregião do Cariri Oriental utilizou-se do índice de Moran com a finalidade de estimar o nível de

autocorrelação espacial entre os municípios que fazem parte da microrregião do Cariri Oriental da Paraíba.

O diagrama de Dispersão de Moran, Fig. 5, apresenta no seu eixo horizontal a Base de Exportação e no eixo vertical a defasagem da produção de algodão na microrregião do Cariri Oriental. Ao analisar a autocorrelação espacial global, o índice de Moran se manteve com autocorrelação positiva, como esperado de uma região conhecida por sua produção de algodão. O que significa dizer que os municípios de Gurjão e Santo André que apresentaram altos valores são vizinhos de municípios que também apresentaram altos valores na produção de algodão ou, de forma alternativa, que municípios que apresentaram baixos valores na Base de Exportação são circundados de municípios possuem também baixos valores no com relação a produção de algodão.

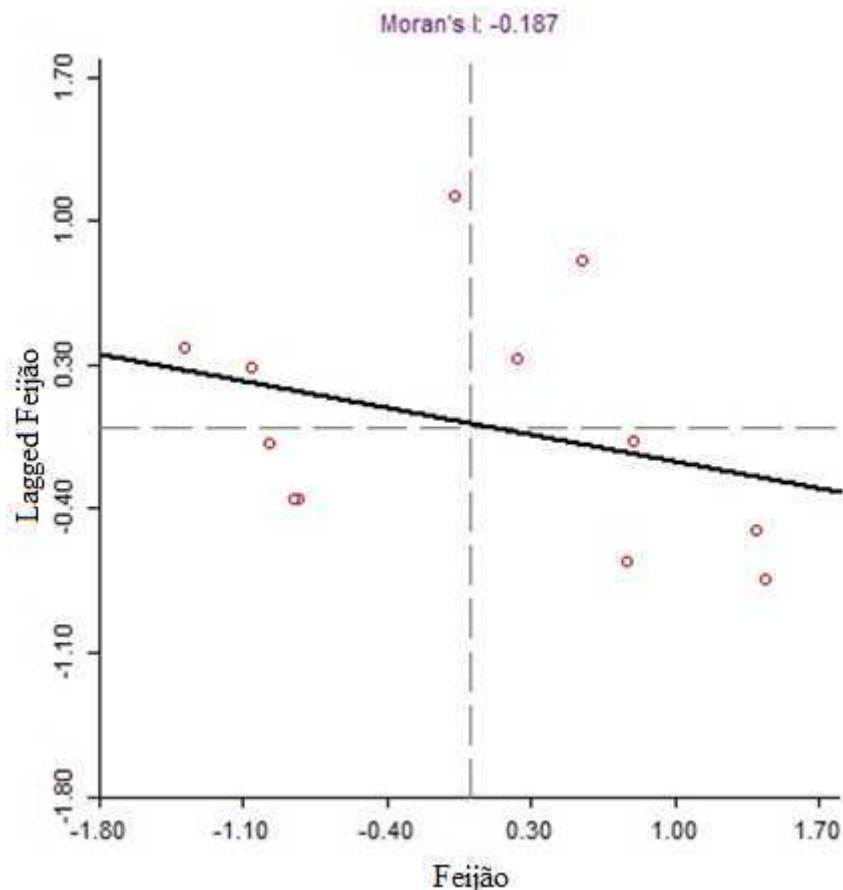


**Figura 5.** Diagrama de espalhamento do índice I de Moran para produção de algodão no Cariri Oriental do estado da Paraíba.

Sobre a Fig.6, é possível observar um conglomerado que apresenta autocorrelação espacial negativa, ou seja, as relações de vizinhança são do tipo Baixo-Alto e Alto-Baixo. Na tipologia Alto-Baixo, ou seja, aqueles municípios que apresentaram altos valores de produção de feijão e seus vizinhos baixos valores para mesma variável, e para a tipologia Baixo-Alto,

os municípios que apresentaram baixos valores da Base de Exportação e possuem vizinhos com altos valores na Base.

Nessa análise não houve municípios significativos estatisticamente que apresentassem altos valores na Base de Exportação e tivessem como circunvizinhos municípios com baixos valores para mesma variável.



**Figura 6.** Diagrama de espalhamento do índice I de Moran para produção de feijão no Cariri Oriental do estado da Paraíba.

A partir desse grau de autocorrelação pode-se inferir que, nos municípios das tipologias Alto-Alto e Baixo-Baixo, 1° e 3° quadrantes, a Base Exportadora possui grande relevância frente às atividades agrícolas desses municípios. Em outras palavras, o plantio das culturas algodão e feijão são relevantes nesses municípios frente aos demais tipos de lavouras ou à produção agropecuária.

Os modelos gerados para se analisar a variabilidades da produtividade do solo na microrregião do Cariri Oriental da Paraíba foram compostos por modelos de regressão clássica (RC), auto regressivo espacialmente (MEAR) e de erro espacial (MEE). Sendo este último à combinação dos dois primeiros.



Observando as repostas obtidas nos modelos de regressão espacial (Tabela 2), houve uma melhora significativa nos resultados para o modelo MEE responsável por explicar de 95% da variabilidade da influência de variáveis de clima na produtividade de algodão de acordo com o valor do critério AIC indicando uma correlação de forte e muito forte.

Analisando a predição das variáveis independentes (Tabela 2), a temperatura média e o índice de umidade foram a que obtiveram maior influência na estimativa produtividade do algodão, os valores dos seus coeficientes é negativo, isso indica que quanto maior for a temperatura média e o índice de umidade, menor será a produtividade de algodão, visto que a temperatura interfere diretamente na fase fenológica de crescimento e emergência do algodão, pois a velocidade de emergência depende fundamentalmente da temperatura ocorrendo a temperaturas médias da ordem de 32°C e a umidade no solo é essencial para germinação, início do desenvolvimento plantular e o período entre a formação dos primeiros botões florais ao início da abertura dos frutos (35 a 120 dias do ciclo de vida). As demais variáveis resultaram em um coeficiente positivo, indicando o inverso da temperatura média e do Iu, ou seja, a produtividade de algodão será maior na medida em que as variáveis obtiverem valores maiores.

O clima influi sob aspectos quantitativos e qualitativos na produção de algodão, caracterizado pelos diversos parâmetros que o compõe como chuva, temperatura, umidade, velocidade do vento e intensidade da luz, Portando conhecer de forma abrangente a área de estudo permite identificar quais são as condições favoráveis para o plantio na região, pois um clima desfavorável pode resultar em perdas significativas na produção do algodão. Analisando o cultivo do algodão herbáceo no sistema de sequeiro no Nordeste do Brasil no cenário de mudanças climáticas, Silva et al. (2012) verificaram que no cenário de aquecimento de 1,5 °C na temperatura média do ar a disponibilidade de áreas favoráveis ao cultivo do algodoeiro está diretamente relacionada com a maior oferta hídrica dos cenários de aumento na precipitação pluvial.

Diante disso, o plantio deve ser feito após estudos e análises significativas do clima aliado ao conhecimento dos solos, para que se possa realizar uma intervenção de maneira positiva na plantação e ser realizado no período mais propício para a região (Medeiros, 2006; Echer, 2014).

**Tabela 2.** Modelos de regressão ajustados para produção de Algodão de acordo com as variáveis climáticas na microrregião do Cari Oriental da Paraíba.

Covariáveis	RC	MEAR	MEE
Intercepto	1279.89	1288.81	1563.81
Isv	65.1366	56.0455	64.1285
Ia	352.633	373.536	384.292
Iu	-561.02	-608.96	-611.279
Ih	574.283	612.334	627.637
T_Med	-82.7993	-74.1927	-92.7132
R <sup>2</sup>	0.918737	0.924157	0.949506
AIC	110.276	111.586	107.194
BIC	113.186	114.98	110.104
$\rho$	-	0.188864	-0.811411

Índice de Seca da Vegetação – Isv; Índice de Aridez – Ia; Índice de Umidade – Iu; Índice Hídrico – Ih; Temperatura Média do Ar (°C) – T\_Med

A tabela 3 apresenta os modelos de regressão espacial ajustados para a produção de algodão, percebe-se que o modelo MEE foi o que melhor se ajustou, obtendo um resultado satisfatório para a produção de algodão, isso pode ser explicado pelo fato desse modelo incorporar a dependência espacial entre as variáveis, verifica-se que o valor de R<sup>2</sup> está maior que 50%, e que os critérios AIC e BIC são satisfatórios apresentados uma boa correlação das variáveis de solo.

A cultura do algodão deve ser cultivada como parte de um programa sistemático de rotação de culturas, em glebas aptas para culturas anuais, adotando-se operações e técnicas agrícolas que permitam obter o máximo retorno econômico, com um mínimo de efeitos deletérios sobre o ambiente. Para isso é necessário que o solo seja, profundos, porosos, bem drenados e de textura média e com uma faixa de pH entre 5,5 e 6,5 e uma alta taxa de oxigênio no solo.

**Tabela 3.** Modelos de regressão ajustados para produção de Algodão de acordo com as variáveis de Solo na microrregião do Cari Oriental da Paraíba.

Covariáveis	RC	MEAR	MEE
Intercepto	316.565	143.693	636.877
Ds	-2077.4	-1849.2	-1806.93
pH	217.223	206.581	134.855
CO	-610.57	-520.803	-577.093
Areia	26.4258	23.8182	23.7476
R <sup>2</sup>	0.846891	0.866019	0.906356
AIC	115.878	116.706	113.87
BIC	118.302	119.616	116.295
$\rho$	-	0.325922	-0.949267

Densidade do Solo – Ds; Carbono Orgânico – CO;

Sendo assim considerando as condições de clima e solo da microrregião de Cariri Oriental, para que a cultura do algodão se desenvolva de forma adequada é necessário que tenha muito calor, muita luminosidade e umidade regular no solo

Observam-se na Tabela 4 os modelos de regressão para a produção de feijão de acordo com as variáveis climáticas, nota-se que o modelo que melhor se ajustou foi o de auto regressivo espacialmente (MEAR), explicando 66% da variabilidade da produtividade.

É importante ressaltar que o feijoeiro é sensível tanto a baixas como a altas temperaturas, em baixas temperaturas: impede, atrasa ou reduz a germinação; reduz a altura e o crescimento dos ramos, conduzindo a produção de pequeno nº de vagens por planta enquanto que em altas temperaturas: provoca o aborto de flores, redução no vingamento e retenção de vagens; redução no número de sementes por vagem e favorece o surgimento de enfermidades, principalmente quando associadas a alta umidade relativa do ar. Portanto a temperatura média ótima durante o ciclo: 18 a 24°C (ideal de 21°C).

Já quando analisamos o índice hídrico e importante realçar que o excesso de água no solo prejudica a germinação e limita o desenvolvimento das raízes; pode favorecer a incidência de doenças; interfere durante as etapas de florescimento e frutificação por serem as fases mais sensíveis a má aeração do solo e por fim o excesso de água na fase de maturação pode prolongar o ciclo cultural e atrasar as operações de colheita, prejudicando assim a sua produção final.

**Tabela 4.** Modelos de regressão ajustados para produção de Feijão de acordo com as variáveis de climáticas na microrregião do Cari Oriental da Paraíba.

Covariáveis	RC	MEAR	MEE
Intercepto	17783.8	20696	17.5532
Alt	13.3372	26.062	17.5532
T_Med	-391.732	-264.946	-747.293
Irs	-1428.16	-2226.17	-1778.96
Ih	-321.904	-397.666	-345.081
R <sup>2</sup>	0.388041	0.661889	0.820733
AIC	183.844	181.019	168.094
BIC	186.268	183.928	170.518
$\rho$	-	-0.765397	-0.794214

Altitude – Alt, Temperatura Média – T\_Med, Índice de Repouso por Seca – Irs, Índice Hídrico

Verifica-se na Tabela 5 os modelos de regressão para variáveis de solo, vê-se que o modelo que melhor se ajustou foi o de auto regressivo espacialmente (MEAR), pois as covariáveis relacionadas ao solo apresentam 50% variabilidade da produção.

Um fator importante no cultivo do feijão a textura do solo, este deve ser de arenoso leve a argiloso pesada, contendo um bom teor de matéria orgânica e que ser bem arejado, além de possuir um pH de 5,0 a 6,5 (6,0 máximas produtividades).

**Tabela 5.** Modelos de regressão ajustados para produção de Feijão de acordo com as variáveis de Solo na microrregião do Cari Oriental da Paraíba.

Covariáveis	RC	MEAR	MEE
Intercepto	3737.19	-0.464948	5342.16
Areia	81.7841	4376.97	69.5572
pH	-2098.23	80.0152	134.777
Pt	139.794	156.884	-2187.62
R <sup>2</sup>	0.364587	0.502331	0.705539
AIC	182.295	0.502331	176.945
BIC	184.234	0.502331	178.884
$\rho$	-	-0.464948	-0.948132

Porosidade Total - Pt

É importante ressaltar que os impactos das alterações climáticas sobre a área de cultivo e a produtividade do feijão no Nordeste do Brasil usando modelagem agrometeorológica, Campos et al. (2010) observaram que o aumento na temperatura do ar pode afetar significativamente a disponibilidade de área agricultável das culturas de feijão no estado da Paraíba o mesmo resultado foi encontrado por Silva et al. (2010) que afirmam que o aumento na temperatura do ar afeta a disponibilidade de áreas agrícolas favoráveis e em particular a produtividade do feijão caupi no Nordeste do Brasil.

Após verificação de todas as tabelas foi possível notar que os modelos de regressão que melhor se adequa as culturas estudadas foram os modelos de auto regressão espacial (MEAR) e de erro espacial (MEE) apresentado intensidade de correlação de moderada a muito forte.

#### 4. CONCLUSÕES

1. Verificou-se autocorrelação espacial da produtividade do algodão e de feijão com os elementos agrometeorológicos, por meio da análise exploratória espacial por áreas, usando-se técnicas estatísticas, como o índice I de Moran. No caso global, houve autocorrelação espacial entre as regiões.
2. Aplicaram-se dois modelos de regressão espacial (MEAR e MEE) com efeitos globais que incorporam a dependência espacial apresentado intensidade de correlação de moderada a muito forte. Estes modelos apresentaram melhores resultados quando comparados ao modelo de regressão clássica, indicando que a inclusão da dependência espacial nos modelos melhora a estimativa da produtividade do algodão e do feijão na microrregião do Cariri oriental da Paraíba.
3. Portanto, de forma geral, os métodos estatísticos espaciais aplicados neste trabalho apresentaram-se eficientes na identificação de padrões de área, na quantificação da autocorrelação espacial, na correlação espacial e na aplicação das regressões espaciais.

## 5. REFERENCIAS

ALMEIDA, E. S. de; PEROBELLI, F. S.; FERREIRA, P. G. C. Existe convergência espacial da produtividade agrícola no Brasil. *Revista Economia e Sociologia Rural*, Brasília, v. 46, n. 1, p.31-52, 2008.

ALVES, T. L. B.; AZEVEDO, P. V.; FARIAS, A. A. Comportamento da precipitação pluvial e sua relação com o relevo nas microrregiões do Cariri Oriental e Ocidental do estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Geografia Física*, [s.1], v.08, n. 06, p. 1601-1614, 2015.

BRAGA, B.; Tundizi, J. G. Águas doces no Brasil - capital ecológico, usos múltiplos, exploração racional e conservação. São Paulo: IEA/USP, 2002. p. 65-116.

BIVAND R, PIRAS G “Comparing Implementations of Estimation Methods for Spatial Econometrics.” *Journal of Statistical Software*, v. 63, n. 18, p.1–36, 2015.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. Conceitos básicos em ciência da geoinformação. São José dos Campos: INPE, 346 p. 2004.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V.; DRUCK, S.; CARVALHO, M. S. Análise espacial e geoprocessamento. In: Druck, S.; Carvalho, M.S.; Câmara, G.; Monteiro, A.V.M. (eds). *Análise Espacial de Dados Geográficos*, Brasília, EMBRAPA, 2004.

CAMPOS, J. H. B. C.; SILVA, M. T.; SILVA, V. de P. R. da. Impacto do aquecimento global no cultivo do feijão-caupi, no Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.396-404, 2010.

CORRAR, L. J.; PAULO, E.; DIAS FILHO, J. M. (coord.). *Análise multivariada para cursos de Administração, Ciências Contábeis e Economia*. São Paulo: Atlas, 2007.

DOBSON, A J.; BARNETT, A. G. An introduction to generalized linear models." *Statistical Papers*, v.53, n.3, p. 805-806, 2011.

ECHER, F. R. O algodoeiro e os estresses abióticos: temperatura, luz, água e nutrientes. 123 p. Instituto Mato-Grossense do Algodão – IMAmt. ISBN: 978-85-66457-03-2. Cuiabá, MT, 2014.

LESAGE J.P., FISCHER M.M. Spatial Econometric Methods for Modeling Origin-Destination Flows. In: Fischer M., Getis A. (eds) Handbook of Applied Spatial Analysis. Springer, Berlin, Heidelberg. 2010.

LOURENÇO, R.W.; LANDIM, P.M.B. Análise de regressão múltipla espacial. Rio Claro: IGCE/DGA/Lab. Geomatemática, 2004. 34 p.

MEDEIROS, R. A. Simulação do crescimento e produção do algodoeiro com o programa Cotton 2k, 1.0. 2006. 78 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical). Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária. Universidade Federal de Mato Grosso, 2006.

NASCIMENTO, S.S.; ALVES, J.J.A. 2008. Ecoclimatologia do Cariri Paraibano. Revista Geográfica Acadêmica. V.2, n. 3 (xii). p. 28-41, 2008

ROWNTREE, D.; O'HEHIR, R. Statistics without tears: A primer for non-mathematicians. Penguin Harmondsworth, 1981.

SENA, J. P. O. Análise da precipitação pluviométrica em anos extremos no cariri paraibano e suas consequências na agricultura e cobertura vegetal. 2017. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

SENA, J.P.O.; Melo, J.S.; Lucena, D.B.; Melo, E.C.S. 2012. Comparação entre dados de chuva derivados do Climate Prediction Center e observados para a região do Cariri Paraibano. Revista Brasileira de Geografia Física. v. 2. p. 412-420.

SILVA, M. T. ; SILVA, V. P. R.; CAMPOS, J. H. B. da C.; OLIVEIRA, S. D. de. Variabilidade da área de cultivo do algodão herbáceo em sistema de sequeiro no nordeste do Brasil segundo cenários de mudanças climáticas. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 4, p. 448-464, 2011

SILVA, M. T. ; NÓBREGA, J. N. da; GOMES, O. M. ; BRITO, J. I. B. de. Estudo da relação entre monitoramento climático e a produção agrícola de grãos nos estados da Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 4, p. 433-447, 2010.

SILVA, M. T.; AMARAL, J. A. B. Zoneamento de risco climático para a cultura do amendoim no Estado do Rio Grande do Norte. Revista de Biologia e Ciências da Terra, v.7, p.93-99, 2007.

SILVA, V. de P. R. da; CAMPOS, J. H. B. C.; SILVA, M. T.; AZEVEDO, P. V. de. Impact of global warming on cowpea bean cultivation in northeastern Brazil. Agricultural Water Management, v.1, p.1-9, 2010.

SILVA, M.T.; SILVA, V. de P.R. da; AZEVEDO, P.V. de. O cultivo do algodão herbáceo no sistema de sequeiro no Nordeste do Brasil, no cenário de mudanças climática. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.16, p.80-91, 2012.

SILVA, V. de P. R. da; OLIVEIRA, S. D.; SANTOS, C. A. C.; SILVA, M. T. Risco climático da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, p.180-189, 2013.

SILVA NETO, A. F. da. Estudo das vulnerabilidades agroambientais frente aos eventos e nos e a construção social dos riscos em municípios do cariri ocidental -Paraíba: uma análise comparativa. 2004. 206 f. Tese (Doutorado) - Curso de Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2004.

SILVA, G. J. F. da. Estimativa de indicadores biofísicos para avaliação do processo de desertificação no município de São João do Cariri- PB. 2014.127 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Geografia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.

SORIA, J. E. Correlações lineares e espaciais entre atributos físico-químicos de solos de diferentes ambientes de produção de cana-de-açúcar no noroeste do Estado de São Paulo. 2014. 97 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Produção) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

SOUSA, P. de. Estudo da variabilidade da precipitação no estado do Paraná associado à anomalia da TSM no oceano pacífico. 2006. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2006.



## CAPÍTULO 4

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve o intuito de utilizar a união de técnicas estatísticas multivariadas juntamente com estatística espacial para avaliar o padrão de distribuição espacial de variáveis pedológicas (químicas e físicas) no Cariri Oriental do Estado da Paraíba.

De acordo com os resultados obtidos, a análise fatorial permitiu resumir a informação contida em treze variáveis compostas por atributos químicos e físicos do solo em apenas dois fatores, o que facilita a interpretação e utilização de outras técnicas. Pode-se concluir então, que o método foi eficaz e cumpriu os objetivos propostos que são os de resumo, sumarização dos dados e geração de escores para utilização na estatística espacial.

Com base na análise fatorial foi possível desenvolver o Índice de Produtividade do Solo (IPS) que apresenta uma avaliação simultânea e integrada dos indicadores de solo, com base nos resultados deste estudo, recomenda-se que sua aplicação considere fundamentalmente a classificação pedológica, com especial atenção à textura do solo e a classificação climática, essencial para a interpretação dos valores obtidos.

Com a estatística espacial se obteve um mapeamento dos fatores na microrregião do Cariri Oriental, mostrando a distribuição das diferentes variáveis de solo, assim informando regiões mais propícias a produção.

As técnicas de autocorrelação espacial mostraram resultados interessantes, pois, verificou-se autocorrelação espacial da produtividade do algodão e de feijão com os elementos agrometeorológicos, por meio da análise exploratória espacial por áreas, usando-se técnicas estatísticas, como o índice I de Moran. No caso global, houve autocorrelação espacial entre as regiões, detectando áreas de agrupamentos e áreas de transição.

Aplicaram-se dois modelos de regressão espacial (MEAR e MEE) com efeitos globais que incorporam a dependência espacial apresentado intensidade de correlação de moderada a muito forte. Estes modelos apresentaram melhores resultados quando comparados ao modelo de regressão clássica, indicando que a inclusão da dependência espacial nos modelos melhora a estimativa da produtividade do algodão e do feijão na microrregião do Cariri oriental da Paraíba.

Portanto, de forma geral, os métodos estatísticos espaciais aplicados neste trabalho apresentaram-se eficientes na identificação de padrões de área, na quantificação da autocorrelação espacial, na correlação espacial e na aplicação das regressões espaciais.

**ANEXO.** Matriz de correlação linear simples entre os atributos do solo.

Variáveis	K	CO	MO	N	P	pH	CE	Areia	Silte	Argila	Ds	Dp	Pt
K	<b>1</b>												
CO	0,164	<b>1</b>											
MO	0,162	<b>1,000</b>	<b>1</b>										
N	0,149	<b>0,983</b>	<b>0,983</b>	<b>1</b>									
P	<b>0,463</b>	0,094	0,092	0,070	<b>1</b>								
pH	0,044	0,024	0,026	0,067	<b>0,463</b>	<b>1</b>							
CE	0,287	0,246	0,244	0,280	<b>0,481</b>	0,141	<b>1</b>						
Areia	-0,020	-0,244	-0,246	-0,247	0,145	-0,112	-0,065	<b>1</b>					
Silte	0,158	-0,016	-0,012	-0,001	0,129	<b>0,326</b>	0,175	<b>-0,807</b>	<b>1</b>				
Argila	-0,130	<b>0,487</b>	<b>0,485</b>	<b>0,481</b>	<b>-0,333</b>	<b>-0,339</b>	-0,157	-0,101	<b>-0,467</b>	<b>1</b>			
Ds	-0,009	-0,258	-0,261	-0,276	0,024	<b>-0,441</b>	-0,029	<b>0,667</b>	<b>-0,654</b>	0,113	<b>1</b>		
Dp	-0,211	-0,240	-0,244	-0,262	0,086	-0,085	-0,168	0,033	-0,089	0,108	0,107	<b>1</b>	
Pt	-0,064	0,304	0,306	<b>0,326</b>	0,021	<b>0,483</b>	-0,034	<b>-0,578</b>	<b>0,551</b>	-0,037	<b>-0,939</b>	-0,010	<b>1</b>

K- Potássio; CO - Carbono Orgânico; MO – Matéria orgânica; N – Nitrogênio; P – Fosforo, pH<sub>H2O</sub> – em água; CE – Condutividade Elétrica; Ds – Densidade do Solo; Dp – Densidade da Partícula; Pt – Porosidade

Total. (Os valores em negrito são diferentes de 0 com um nível de significância  $\alpha=0,05$ )