



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**LUAN ALVES LIMA**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO EM SISTEMA DE  
TERRAÇOS EM REGIÃO SEMIÁRIDA**

**FORTALEZA**

**2018**

LUAN ALVES LIMA

VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO EM SISTEMA DE TERRAÇOS  
EM REGIÃO SEMIÁRIDA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo. Área de concentração: Manejo do Solo e da Água  
Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Mirian Cristina Gomes Costa.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- L698v Lima, Luan Alves.  
Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de terraços em região semiárida / Luan Alves  
Lima. – 2018.  
75 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Fortaleza, 2018.  
Orientação: Profa. Dra. Mirian Cristina Gomes Costa.
1. Krigagem. 2. Práticas mecânicas. 3. Terraceamento. I. Título.

CDD 631.4

---

LUAN ALVES LIMA

VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO EM SISTEMA DE TERRAÇOS  
EM REGIÃO SEMIÁRIDA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo. Área de concentração: Manejo do Solo e da Água

Aprovada em: 31/07/2018.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Mirian Cristina Gomes Costa (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. José Carlos de Araújo  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Ao meu avô Luiz Antônio Martins e meu pai  
Edmilson Alves Martins.

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela disposição e força em busca dos meus objetivos.

Ao meu pai Edmilson e minha mãe Francisca. À minha família, em especial Edileusa Martins, Silvanete Pinto, Lorenna Ramalho, Elionete Martins, Edilson Martins pelo suporte e incentivo, sempre. À D. Silvia, Mayara, Mayane e Átila pelo apoio e encorajamento durante essa etapa. A Helen pelo apoio e suporte desde o início dessa jornada.

À Universidade Federal do Ceará, ao Departamento de Ciências do Solo e Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo pelo conhecimento adquirido por meio do curso de mestrado. À CAPES, pelo apoio na concessão da bolsa de auxílio e apoio à pesquisa por meio do projeto Pró-Integração.

À minha orientadora, Mirian Cristina Gomes Costa pelos ensinamentos, cobranças, confiança contribuindo com meu crescimento pessoal e profissional.

Às professoras Aline Genú e Adriana Guirado pela participação e valiosas contribuições na elaboração do projeto de dissertação.

Ao Sr. Napoleão por disponibilizar área experimental para realização do estudo. Ao NUTEC - Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará pela disponibilidade para realização das análises químicas.

Aos professores e amigos da UFERSA, em especial Vânia Porto, Nildo Dias pelo apoio, incentivo e aprendizado durante e depois da graduação. Ao meu orientador da graduação e grande amigo, Francisco de Assis (Thikão), pela infinidade de conhecimentos repassados, pelo exemplo de vida e profissional e também ao grupo de pesquisa Irriganutri.

Aos funcionários do departamento, Edilson, Marilene, Camile, Fátima, Crisanto, Franzé, Antônio José e em especial à Deyse, técnica do Laboratório de Manejo do Solo pela sua paciência, amizade e inestimável contribuição para execução deste trabalho.

À minha turma Rodolfo, Rhayane, Esraelda, Raquel e Nathielly pelo conhecimento compartilhado e os bons momentos vivenciados. Aos amigos e colegas que contribuíram na execução desse trabalho: Rodolfo, Wilner Valbrun, Lucas de Sousa, Gustavo Henrique, Valeska, Rosângela, Ruan, Daniel Pontes, Caroline, Bruna, Ana Karla, Ryshardson, Erick, Mardones, Giordanio, Jader, Luilson, Lucas, Ronaldo.

Aos professores do Departamento de Ciências do Solo e do programa Pós-graduação em Ciência do Solo.

Ao professor Jaedson Cláudio Anunciato Mota pela amizade, disponibilidade em esclarecimento e pela participação na banca de defesa da dissertação. Ao professor José Carlos de Araújo pela aceitação e célebre participação na banca de defesa da dissertação.

A todos que de alguma forma contribuíram com meu crescimento e realização deste trabalho.

Muito Obrigado!

## RESUMO

Terraços são estruturas construídas ao longo do terreno, constituídas por um canal e um camalhão, com a finalidade de segmentar o comprimento das vertentes de modo a interceptar o escoamento superficial e o solo transportado pela erosão hídrica. Juntamente com o solo interceptado pelos terraços, há também material orgânico e insumos que tenham sido aplicados na área agrícola terraceada. Nesse sentido, fundamentou-se a hipótese de que, na medida em que se aproxima dos canais de terraços, há mais nutrientes e maior teor de matéria orgânica no solo, além de mais partículas finas. Objetivou-se com este trabalho verificar a variabilidade espacial de atributos químicos e físicos do solo, por meio da análise descritiva e geoestatística em uma área entre terraços em região semiárida. A pesquisa foi realizada em Iguazu (Canindé – CE), em uma área terraceada há onze anos, na bacia do rio Cangati. Foi realizada amostragem regular do tipo grade em 100 pontos, com 10 pontos espaçados a cada 2 metros na largura e a cada 5 metros no comprimento, em uma área 810 m<sup>2</sup> entre dois terraços. Após identificação e georreferenciamento, as amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m e levadas à UFC para realização das análises físicas e químicas. Quantificaram-se os atributos físicos: granulometria com fracionamento da areia, argila dispersa em água (ADA) e, calculado o grau de floculação (GF). Os atributos químicos avaliados foram: potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (CE), nitrogênio total (NT) fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na), alumínio trocável (Al), acidez potencial (H+Al) e carbono orgânico total (COT). Os atributos químicos calculados foram: soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC), acidez potencial (Al+H), saturação por bases (V%) e percentagem de saturação por sódio (PST%). Os dados foram submetidos à análise descritiva e geoestatística. Na análise geoestatística, foi feita a análise de dependência espacial, verificada pelo melhor ajuste dos semivariogramas seguido de interpolação pela krigagem ordinária utilizando o *Software* GS<sup>+</sup>. Os atributos físicos do solo apresentaram menor variação dos dados quando comparados aos químicos. A dependência espacial foi classificada como média e forte nos atributos físicos e químicos estudados, sendo a dependência espacial mais evidente com o aumento da profundidade do solo. Houve maiores teores de argila e maior grau de floculação em pontos próximos ao canal do terraço. A disposição aleatória da matéria orgânica, entre os terraços, permite rejeitar a hipótese de maiores valores encontrados à medida que se aproxima dos canais dos terraços. Por outro lado, aceita-se a hipótese de maiores teores de partículas finas (argila e GF) e disponibilidade de nutrientes (V% e P) localizados nas proximidades do canal de terraço,

melhorando os atributos de fertilidade e qualidade do solo. A variabilidade espacial dos atributos relacionados às frações granulométricas e acidez potencial (H+Al), constatada pelo uso da geoestatística na área entre terraços, evidencia a importância do manejo direcionado, de modo a garantir a qualidade do solo e dos cultivos agrícolas em áreas terraceadas no semiárido.

**Palavras-chave:** Krigagem. Práticas mecânicas. Terraceamento.

## ABSTRACT

Terraces are structures built along the terrain, constituted by a canal and a ridge, with the finality of to segment the length of the hillsides in order to intercept the runoff and soil transported by water erosion. Together with the intercepted soil by the terraces, there is also organic material and inputs which has been applied in the terraced agricultural area. In this sense, it was based the hypothesis that, there is spatial variability of the physical and chemical attributes of the soil with the practice of the terraces: as the terraces canals approaches, there is greater availability of nutrients, higher levels of organic matter and fine particles, improving fertility attributes and soil quality. The objective of this work was to verify the spatial variability of soil chemical and physical attributes, through the descriptive and geostatistical analysis in an area between terraces in the semi-arid region. The research was carried out in Iguaçu (Canindé - CE), in a terraced area eleven years ago, in the Cangati river basin. A regular sampling of the grid type was performed at 100 points, with 10 points spaced every 2 meters in width and every 5 meters in length, in an area 810 m<sup>2</sup> between two terraces. After identification and georeferencing, the soil samples were collected in the layers of 0.0 to 0.10 m and 0.10 to 0, 20 m and taken to the UFC for the physical and chemical analyzes. The following physical attributes were quantified: granulometry with sand fractionation, clay dispersed in water (CDW) and calculated the degree of flocculation (DF). he chemical attributes evaluated were: hydrogenation potential (pH), electrical conductivity (EC), total nitrogen (NT) phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), sodium (Al), potential acidity (H + Al) and total organic carbon (TOC). The chemical attributes evaluated were: hydrogenation potential (pH), electrical conductivity (EC), total nitrogen (NT) phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), sodium (Al), potential acidity (H + Al) and total organic carbon (TOC) The chemical attributes evaluated were: hydrogenation potential (pH), electrical conductivity (EC), total nitrogen (NT) phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), sodium (Al), potential acidity (H + Al) and total organic carbon (TOC). Data were submitted to descriptive analysis followed by geostatistical analysis. In the geostatistics, the analysis of spatial dependence was verified, verified by the best adjustment of semivariograms followed by interpolation by ordinary kriging using *GS<sup>+</sup> Software*. The physical attributes of the soil presented smaller variation of the data when compared to the chemical ones. Spatial dependence was classified as medium and strong in the physical and chemical attributes studied, with spatial dependence being more evident with increasing soil depth. There were higher clay contents and flocculation

degree at points close to the terrace channel. The random arrangement of organic matter between the terraces allows one to reject the hypothesis of higher values found as it approaches the canals of the terraces. On the other hand, the hypothesis of higher content of fine particles (clay and DF) and availability of nutrients (V% and P) located near the terrace canal, improving fertility and soil quality, is accepted. The spatial variability of the attributes related to the granulometric fractions and potential acidity (H + Al), verified by the use of geostatistics in the area between terraces, shows the importance of the directed management, in order to guarantee the quality of soil and agricultural crops in terraced areas in the semiarid.

**keywords:** Kriging. Mechanical practices. Terracing.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Localização da área de estudo no distrito de Iguaçú, Canindé – CE.....	31
Figura 2- Detalhe do estaqueamento (A) e georreferenciamento (B) dos pontos amostrais ....	33
Figura 3- Distribuição espacial das frações granulométricas (areia, silte e argila em %) do solo entre terraços nas camadas de 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m.....	46
Figura 4- Distribuição espacial das frações de areia grossa (%AG), areia média (%AM) e areia fina (%AF) do solo entre terraços nas camadas de 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m .....	47
Figura 5- Distribuição espacial da argila dispersa em água - ADA (%) e grau de flocculação - GF (%) do solo entre terraços nas camadas de 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m.....	49
Figura 6- Distribuição espacial dos valores de pH e condutividade elétrica no extrato da pasta saturada (CEes - $\text{dS m}^{-1}$ ) e teores de fósforo (P - $\text{mg kg}^{-1}$ ) nas camadas de 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m.....	52
Figura 7- Distribuição espacial de sódio (Na - $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) nas camadas de 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m.....	54
Figura 8- Distribuição espacial de Nitrogênio total (NT - $\text{g kg}^{-1}$ ) na camada de m e 0,10 a 0,20 m .....	55
Figura 9- Distribuição espacial de potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , nas camadas de 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m .....	56
Figura 10- Distribuição espacial da acidez potencial ( $\text{H}+\text{Al}$ - $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) e Carbono orgânico total (COT - $\text{g kg}^{-1}$ ) nas camadas de 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m.....	57
Figura 11-Distribuição espacial da capacidade de troca de cátions (CTC - $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), saturação por bases (V%) e porcentagem de sódio na CTC (PST - %) nas camadas de 0,0 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m .....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Estatística descritiva dos atributos físicos do solo entre terraços nas camadas de 0,0 a 0,10 m e 0,10 m a 0,20 m .....	38
Tabela 2- Estatística descritiva dos atributos químicos do solo entre terraços nas camadas de 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m .....	41
Tabela 3- Modelos e parâmetros dos semivariogramas para os atributos químicos do solo entre terraços nas camadas de 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m .....	44
Tabela 4- Modelos e parâmetros dos semivariogramas para os atributos químicos do solo entre terraços nas camadas de 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m .....	50

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	17
2.1 O que é o semiárido .....	17
2.2 Solos da região semiárida .....	18
2.2.1 <i>Principais características</i> .....	18
2.2.2 <i>Uso inadequado e degradação dos solos</i> .....	19
2.2.3 <i>Erosão do solo</i> .....	20
2.3 Práticas conservacionistas de manejo de solos.....	22
2.4 Variabilidade de atributos de solo associada às práticas mecânicas de conservação .....	25
2.5 Geoestatística como ferramenta de análise da variabilidade dos atributos do solo.....	27
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	31
3.1 Localização e caracterização da área de estudo.....	31
3.2 Amostragem e coleta de solo .....	32
3.3 Variáveis analisadas .....	34
3.3.1 <i>Análises físicas</i> .....	34
3.3.2 <i>Análises químicas</i> .....	34
3.4 Análises estatísticas .....	35
3.4.1 <i>Estatística descritiva</i> .....	35
3.4.2 <i>Análise geoestatística</i> .....	36
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	38
4.1 Estatística descritiva .....	38
4.1.1 <i>Atributos físicos</i> .....	38
4.1.2 <i>Atributos químicos</i> .....	41
4.2 Análise geoestatística.....	44
4.2.1 <i>Atributos físicos</i> .....	44
4.2.2 <i>Atributos químicos</i> .....	50
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	61
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	62

## 1 INTRODUÇÃO

As regiões semiáridas estão presentes em diferentes locais do mundo, como em grandes extensões do continente africano, alguns países asiáticos (China e Índia) e em quase toda Austrália; já no continente sul-americano, destaca-se o nordeste brasileiro. Embora essas regiões estejam distribuídas em locais distintos no globo terrestre com suas peculiaridades, apresentam muitas características em comum. Em geral, apresentam chuvas limitadas e irregulares, altas temperaturas e solos rasos susceptíveis à salinização e à erosão.

A erosão é um processo natural, mas que tem sido acelerado por atividades antrópicas, resultando em significativas perdas de solo no mundo. Em grande parte dos países africanos a erosão do solo é um dos aspectos que limita a produção agrícola e causa danos ambientais. No nordeste brasileiro esse cenário não é diferente e o uso inadequado das terras, representado pelo desmatamento, plantio morro abaixo e sobrepastejo, tem agravado esse fenômeno. As áreas disponíveis à agropecuária não possuem condições ótimas ao cultivo, de modo que esse acaba sendo feito, muitas vezes, em terrenos mais íngremes em que há maior vulnerabilidade aos processos erosivos. É neste cenário que as práticas de conservação do solo são imprescindíveis por viabilizar a produção de alimentos sem exaurir os recursos naturais.

Dentre as práticas de conservação do solo existem as mecânicas nas quais se enquadram os terraços. Terraços são estruturas construídas em áreas com declive mais acentuado, visando segmentar o comprimento das vertentes para reduzir o escoamento superficial e o transporte de solo que caracterizam a erosão hídrica. Ao reduzir o escoamento superficial e viabilizar maior infiltração de água no solo, o terraceamento melhora as condições para a agricultura, contribuindo para a convivência com o semiárido. Deve-se ainda ressaltar que o terraceamento contribui para o sequestro de carbono e para a regulação dos corpos hídricos, exercendo função substancial frente às mudanças climáticas e o equilíbrio ambiental.

Em áreas terraceadas supõe-se que haja variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo. A variação nos teores de matéria orgânica, de nutrientes e das frações granulométricas do solo pode resultar em locais da área agrícola com maior fertilidade e umidade do solo, o que pode influenciar no desenvolvimento, estabilidade e rendimento dos cultivos. No contexto das regiões semiáridas, em que os eventos de veranicos são comuns e o cultivo predominante é o de sequeiro, e em que busca-se uma agricultura com a menor adição de insumos possível, o conhecimento da distribuição dos atributos do solo em áreas

terraceadas é de grande utilidade. Mediante este conhecimento é possível planejar estratégias de cultivo e manejo do solo, proporcionando maior eficiência no uso das terras agrícolas em situações de semiaridez.

Diante do exposto, este trabalho fundamenta-se na hipótese de que existe variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo com a prática dos terraços: na medida em que se aproxima do canal de terraços há maior disponibilidade de nutrientes, maiores teores de matéria orgânica e de partículas finas, melhorando atributos de fertilidade e qualidade do solo.

Portanto, objetivou-se com o presente estudo verificar a variabilidade espacial de atributos químicos e físicos do solo, por meio da análise descritiva e geoestatística em uma área entre terraços em região semiárida.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 O que é o semiárido

O termo “Semiárido” foi inserido em 1977, na Conferência das Nações Unidas sobre Desertificação, em Nairobi, capital do Quênia. Um dos objetivos foi chamar a atenção do mundo para as regiões secas (áridas e semiáridas), como medida de “alerta” aos problemas enfrentados: perda de produtividade, comprometimento da produção de alimentos como consequência da desertificação, sendo proposta uma delimitação das zonas áridas e semiáridas do mundo de modo a estabelecer o Plano de Combate à Desertificação (UNESCO, 1979).

As regiões semiáridas são delimitadas com base em índice de aridez e depende de dois fatores principais: precipitação (P) e da perda máxima possível por evapotranspiração (ETP). Assim, com a redução da precipitação e aumento da evaporação, a aridez aumenta (MATALLO, 2003). O índice de aridez foi desenvolvido com base na metodologia realizada por Thornthwaite (1941) e ajustada por Penman (1953). É calculado pela relação de P/ETP, em que P é o valor médio da precipitação anual, e ETP é a evapotranspiração potencial média anual, variando de 0,005 (Hiperárido) a 0,65 (Subúmido e Úmido), sendo semiárido aquele entre 0,21 – 0,5 (UNESCO, 1979).

Aproximadamente 55% (79.500 milhões de quilômetros quadrados) da área terrestre consistem de zonas áridas e semiáridas; distribuídas em 150 países. (CARVALHO, 2002). Nessas regiões, vivem 20% da população mundial (ALAZARD *et al.*, 2015) e cerca de 1 bilhão de pessoas estão entre as mais pobres do planeta (ROCHA; SOARES, 2015).

Na América do Sul, cerca de 30% do território é constituído de zonas áridas e semiáridas abrangendo os países Chile, Perú, Bolívia, Argentina e Brasil (PRĂVĂLIE, 2016). O Semiárido brasileiro compreende os estados Alagoas, Bahia, Ceará, Minas Gerais, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe, totalizando 969.589,4 km<sup>2</sup> de extensão territorial (BRASIL, 2005). Com uma população de aproximadamente de 21 milhões (BRASIL, 2005), o semiárido nordestino destaca-se como mais populoso do mundo (AB’SABER, 1999).

O clima predominante da região é caracterizado pela variabilidade espacial e temporal das precipitações pluviais, que apresentam média anual de 750 mm e que são de alta intensidade (ANDRADE, 2016). O regime pluvial é dividido em duas estações: a úmida com período de 3 a 4 meses; e a seca correspondente aos demais meses, onde a evapotranspiração potencial pode chegar a 2.700 mm anuais (ARAÚJO FILHO, 2013). Apesar das limitações

climáticas existentes, o semiárido brasileiro é um dos semiáridos mais chuvosos do mundo, apresentando grande diversidade de ambientes, fauna e flora.

No ambiente semiárido há o predomínio de rochas cristalinas seguidas de áreas sedimentares; o relevo predominante vai desde o plano ao forte ondulado, com altitude de 400 a 500 metros, podendo apresentar, em alguns casos, regiões de até 1000 metros (CUNHA, 2010).

O bioma Caatinga é o predominante no semiárido brasileiro, representando 80% dessa região, exibindo diversidade de paisagens e tipo de vegetação, devido às condições geomorfológicas, climáticas e ações antrópicas, que influenciam a distribuição e riquezas de suas espécies vegetais (ARAÚJO FILHO, 2013). Pesquisas realizadas na região denotam cerca de 930 espécies vegetais registradas, das quais 380 são endêmicas. No entanto, o aumento do mercado regional e aumento da população contribuíram para mudanças na biodiversidade, principalmente das espécies nativas (CARVALHO, 2002).

Nesse contexto, é essencial, antes de qualquer atividade, considerar aspectos que comprometem o semiárido, dentre eles, destacam-se, a pressão sobre os recursos naturais e aumento da degradação das terras agrícolas (HUANG *et al.*, 2016).

## **2.2 Solos da região semiárida**

### ***2.2.1 Principais características***

As regiões semiáridas estão presentes em vários locais do mundo, apresentando características comuns, tais como: altas temperaturas, reduzida pluviosidade com estação chuvosa curta e chuvas intensas, altos níveis de insolação, solos pouco intemperizados, salinos e rasos, pequena produção de fitomassa, além de limitado acesso às tecnologias e ocorrência de pobreza (MAIA, *et al.*, 2006; CESANO *et al.*, 2012).

Para compreender as características edáficas das regiões semiáridas, é preciso considerar que o solo é resultante da atuação dos fatores que controlam sua formação: material de origem, clima, biota, relevo e tempo (BRADY; WEIL, 2013). Esses processos, embora atuem de maneira conjunta, apresentam intensidades relativas, dependendo do ambiente em que estejam inseridos. Assim, um fator de formação do solo pode atuar de maneira mais efetiva do que outro, resultando, dessa forma, em diferentes solos formados para as distintas regiões.

A cobertura pedológica da região semiárida está intimamente relacionada com o clima,

material de origem, vegetação e o relevo (CORREIA *et al.*, 2011). Há uma diversidade de solos presentes nas regiões semiáridas do mundo. Kampen e Burford (1980) mostram que aproximadamente 33% da área de terra no Trópico do Semiárido (SAT) são ocupadas por Luvisolos (EMBRAPA, 2013), destes cerca de 32% encontram-se no semiárido africano e 38% no semiárido asiático. Mais da metade dos solos do semiárido é composto pelos Luvisolos (EMBRAPA, 2013), juntamente com os Planossolos (EMBRAPA, 2013; KAMPEN; BURFORD 1980). Ainda segundo Kampen e Burford (1980), os solos da América Latina representam 15% do total dos solos do SAT, com predomínio também dos Luvisolos e Planossolos.

Em regiões semiáridas existe grande diversidade de litologias e material originário, relevo e regime de umidade do solo e estes fatores resultam na presença de diversas classes de solos, as quais apresentam feições morfológicas e posições na paisagem (JACOMINE, 1996)

No semiárido brasileiro basicamente são encontradas as seguintes classes de solos: Latossolos, Neossolos Litólicos, Argissolos, Luvisolos, Neossolos Quartzarênicos, Neossolos Regolíticos, Neossolos Flúvicos, Planossolos, Chernossolos, Cambissolos, Vertissolos, Gleissolos e Plintossolos (CUNHA *et al.*, 2010).

Dessas classes de solos, algumas ocupam grande parte do semiárido brasileiro e apresentam características importantes que merecem destaque, como é o caso dos Luvisolos e os Neossolos Litólicos, que são rasos e muito suscetíveis à erosão. Os Neossolos Quartzarênicos e os Neossolos Regolíticos apresentam baixa retenção de umidade e baixa fertilidade devido, principalmente, à textura muito grosseira que resulta em altas taxas de infiltração; já os Planossolos contêm altos teores de sódio (CORREIA *et al.*, 2011).

A maioria dos solos do semiárido brasileiro são pouco desenvolvidos, rasos, de textura média a arenosa, com fertilidade natural relativamente alta, apresentando limitações ao uso, principalmente, em aspectos relacionados à água (deficiência), suscetibilidade à erosão, além de alta pedregosidade, rochosidade, salinidade, alcalinidade e problemas de drenagem, em alguns casos (PEREIRA; NETO, 2014).

### **2.2.2 Uso inadequado e degradação dos solos**

Levando em consideração a fragilidade dos solos do semiárido, seu uso inadequado associado a eventos ambientais tem levado à degradação dos mesmos. A degradação do solo pode ser definida como um processo que reduz sua capacidade atual ou potencial para produzir bens ou serviços (GALINDO *et al.*, 2008). Cerca de 33% dos solos do mundo estão degradados, sendo os principais problemas a salinização, compactação, acidificação,

contaminação e erosão (FAO, 2015).

Segundo Jara-Rojas *et al.* (2013), as causas da degradação das terras são variadas e complexas, uma vez que envolvem vários fatores, podendo ser agrupadas em três categorias principais: climática - que inclui aspectos relacionados à meteorologia como chuva e seca; biogeofísica - referindo-se ao relevo e tipo de solo; e de gestão - incluindo a escolaridade do agricultor, experiência e acesso aos serviços de extensão.

Na região semiárida nordestina o desmatamento e o aumento da exploração agrícola para o pastoreio e extração da madeira vêm, ao longo dos anos, provocando degradação do bioma Caatinga por meio da erosão e diminuição da fertilidade do solo, comprometendo todo o equilíbrio da região (MAIA *et al.*, 2006; OLIVEIRA; GALVÍNCIO, 2011).

No Ceará, em particular, o plantio morro abaixo é uma prática comum na agricultura e um dos principais fatores responsáveis pela degradação dos solos no Estado (SRH-CE/FUNCEME, 2010). Além disso, há outras práticas frequentes, tais como brocas, queimadas, destocamentos, desmatamentos para abertura de áreas de plantio e/ou retirada de madeiras para mais diversas finalidades (construção de moradias e prédios, lenha, cercas, currais, carvão, etc.), que também comprometem demasiadamente a sustentabilidade do semiárido, sobretudo das microbacias (SRH-CE/FUNCEME, 2010).

As regiões semiáridas são muito susceptíveis aos processos erosivos, pois as próprias características dos solos predominantes, paisagem, distribuição e intensidade de chuvas favorecem a erosão. Há estudos que mostram a importância do vento como agente erosivo em regiões áridas e semiáridas (YAN *et al.*, 2015). Entretanto, a erosão hídrica também é relevante, sendo as ravinas e voçorocas as mais destrutivas (RAHMATI *et al.*, 2017). Nas terras altas da Etiópia, a erosão hídrica é a principal causa de degradação (CHRISTOPH, 2014). Segundo Billi e Dramis (2003), o desenvolvimento de ravinas tem impactos negativos, pois envolve a perda de material e, em alguns casos, a deposição de grande quantidade de solo, podendo resultar em esgotamento do recurso natural básico, o solo.

### **2.2.3 Erosão do solo**

De acordo com Lal (2001), a erosão ocorre por meio de um processo de três etapas: desprendimento, transporte e deposição do solo. Bertoni e Lombardi Neto (2008) afirmam que a erosão é o processo de desprendimento e arraste acelerado das partículas do solo, causado pela água e pelo vento e, segundo Morgan (2005), quando a energia não é suficientemente capaz de causar mais transporte, ocorre a terceira etapa do processo erosivo -

a deposição. Embora a erosão seja um processo natural, algumas atividades humanas podem resultar em aumento acentuado das taxas de erosão, especialmente o uso insustentável das terras (LAL, 2001).

A erosão do solo é considerada um dos mais importantes processos da degradação de terras em todo o mundo e representa uma séria ameaça em diversos setores como, por exemplo, fornecimento de alimentos, segurança e proteção da saúde humana e dos ecossistemas naturais e desenvolvimento socioeconômico dos países (OLLOBARREN *et al.*, 2016).

Xu *et al.* (2016) afirmam que a erosão do solo tem sido reconhecida como a principal causa de degradação das terras e uma ameaça para a sustentabilidade dos ecossistemas agrícolas em todo o mundo. Benites *et al.* (1993), *apud* Correa *et al.* (2016), relatam que a erosão do solo na Argentina, Bolívia, Chile e Paraguai é responsável por uma média de 46% da extensão total de solos degradados por diferentes agentes erosivos.

A erosão dos solos é extremamente variável, temporal e espacialmente, estando condicionada pelas diferenças na superfície, ou seja, pelas características edafoclimáticas da região que afetam diretamente o escoamento superficial (SILVA; SANTOS, 2012). Em regiões áridas e semiáridas, a cobertura vegetal é importante nas alterações dos processos físicos e químicos do solo, uma vez que ausência ou a cobertura insuficiente da vegetação expõe os solos a eventos como a precipitação torrencial - de alta intensidade e curta duração nestas regiões - que modificam a camada superficial deixando-os mais susceptíveis à erosão (VÁSQUEZ-MÉNDEZ *et al.*, 2011).

No semiárido nordestino a maioria dos solos apresenta susceptibilidade aos processos erosivos (ARAÚJO FILHO, 2013). De acordo com Lal (2001) a suscetibilidade do solo aos agentes de erosão, a erodibilidade, é determinada pelas propriedades inerentes do solo como, por exemplo, textura, estrutura, teor de matéria orgânica, minerais de argila, troca de cátions e propriedades de retenção e transporte de água.

De acordo com Araújo Filho (2013), as classes de solos presentes na região semiárida brasileira apresentam um problema comum que é a fase acelerada de erosão, isto é, transporte, com taxa média de 29,7%. A substituição da cobertura vegetal pela agricultura e pecuária, a ocupação inadequada de áreas como encostas, e a utilização imprópria dos solos podem ocasionar processos erosivos acelerados (PEREIRA; NETO, 2014).

Diante disso, é indispensável a utilização dos recursos naturais de maneira adequada e sustentável. Portanto, é necessário lançar mão do uso de práticas de conservação do solo e da água.

### 2.3 Práticas conservacionistas de manejo de solos

A conservação do solo surgiu na antiguidade e sua institucionalização iniciou-se com as grandes secas e devastações ambientais que ocorreram no início do século XX (DUMANSKI, 2015). Ainda de acordo com Dumanski (2015), as abordagens para a conservação do solo que surgiram a partir destas experiências focaram em instrumentos tecnológicos e de engenharia prescritivas com finalidade de prevenir ou mitigar os impactos da erosão do solo sobre a produção agrícola, a renda dos agricultores e a segurança alimentar.

As práticas de conservação do solo e da água podem ser divididas em edáficas, vegetativas e mecânicas. As práticas edáficas, de acordo com Portela (2011), são aquelas que modificam o sistema de cultivo proporcionando, além do controle da erosão, a permanência ou melhoria a fertilidade do solo. Essas práticas, baseiam-se em três princípios: a eliminação ou controle das queimadas, adubação e correção do solo e rotação de culturas (LEPSCH, 2010).

As práticas vegetativas, de acordo com Lepsch (2010), são métodos de cultivo que visam controlar a erosão com o aumento da cobertura vegetal do solo. Cada planta apresenta características próprias, como arquitetura, sistema radicular, biomassa aérea e porte, que contribuirão de forma diferenciada na proteção do solo contra a ação direta dos agentes ativos (condições climáticas) e, conseqüentemente, dos processos erosivos (PORTELA, 2011).

Ainda de acordo com Lepsch (2010), as principais práticas vegetativas são: reflorestamento, formação e manejo adequado das pastagens, cultivo em faixas, controle das capinas e cobertura do solo com palha (“*mulch*”). Outra importante prática de conservação do solo de caráter vegetativo é o plantio direto.

O plantio direto desempenha importante papel na conservação do solo, como o sequestro de carbono (ALVAREZ *et al.*, 2014) e redução da emissão de gases do efeito estufa (TU; LI, 2017). Há outros benefícios indiretos nas propriedades do solo, tais como o aumento da qualidade biológica (aumento da variedade e do número de meso e microfauna do solo); melhoria das propriedades físicas (estrutura, permeabilidade, capacidade de retenção de umidade e da estabilidade do solo) e química com aumento da ciclagem de matéria orgânica no solo; bem como o armazenamento de nutrientes, liberando-os gradualmente para as culturas (ANDRADE *et al.*, 2010).

É importante destacar que, antes de qualquer coisa, o uso do solo deve respeitar sua capacidade. A exploração agrícola do solo deve ser feita segundo preceitos conservacionistas e também levar em consideração aspectos econômicos (LEPSCH, 2010), sociais e culturais

(CARVALHO *et al.*, 2017).

Nesse sentido, pode-se associar a atividade agrícola à atividade florestal. A agricultura com base nos princípios conservacionistas, a qual pertence à agrosilvicultura, cultivos especiais e sistemas de cultivo permanentes, promove a segurança alimentar, a redução da pobreza e agregação de valor na produção agrícola e animal, bem como amplia as oportunidades de mercado (DUMINSKI, 2006).

A utilização de estruturas artificiais para a redução da velocidade de escoamento da água sobre a superfície do solo, interferindo nas fases mais avançadas do processo erosivo é o que conceitua as práticas mecânicas de conservação de solo e água (PRUSKI *et al.*, 2009). Dentre as principais práticas mecânicas de conservação do solo, têm-se: as barragens de pedras ou “barragens sucessivas”, os cordões de pedras e os terraços.

As barragens de pedras são construídas em formato de arco romano deitado com pedras soltas, arrumadas em “cunha” nos tributários (riachos). Sua importância está na redução da magnitude dos danos oriundos do manejo inadequado da aptidão agrícola e das formas de uso do solo dentro das microbacias hidrográficas (OLIVEIRA, 2010).

Em áreas que contêm grande quantidade do material parental (pedras), pode-se utilizar esse tipo de material para servir como barreira física à erosão, constituindo os cordões de pedra em contorno. Esses cordões segmentam o comprimento dos declives, reduzindo o volume e a velocidade das enxurradas e, como consequência, forçam a deposição de sedimentos nas áreas onde são construídos formando patamares naturais (SILVA; SILVA, 1997), podendo proporcionar aparecimento de espécies nativas, devido ao acúmulo de sementes nesta posição dos cordões.

A eficiência dessa prática conservacionista é evidenciada por meio da retenção de sedimentos e, dependendo das condições edafoclimáticas do local, pode-se alcançar valores próximos a  $60 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de material retido (OLIVEIRA, 2010). Ainda de acordo com o mesmo autor, pode ocorrer aumento da profundidade efetiva pelo acúmulo de sedimentos e também melhoria nas propriedades físicas e químicas do solo em relação à área de remoção.

Hammad *et al.* (2006), estudando os efeitos dos cordões de pedras em algumas propriedades do solo, concluíram que o sistema de conservação em terraços reduziu o efeito negativo de chuvas intensas, resultando em menor quantidade de escoamento e erosão do que no sistema sem terraços. Na região semiárida da África, Zougmore *et al.* (2014) constataram que os cordões de pedras, quando aliados a outras práticas de manejo do solo, aumentaram a produtividade, cobertura vegetal além do sequestro de carbono, denotando importância principalmente no desenvolvimento da população que tem como fonte de renda a agricultura.

Para Bertoni e Lombardi Neto (2012), a palavra terraço é usada, em geral, para significar camalhão ou a combinação de camalhão e canal, construído em corte da linha de maior declive do terreno. Pruski *et al.* (2009) afirmam que o terraceamento consiste na construção de terraços (canal e um dique, ou camalhão) no sentido transversal à declividade do terreno, formando obstáculos físicos capazes de reduzir a velocidade do escoamento e disciplinar o movimento da água sobre a superfície do terreno.

O objetivo principal do terraceamento é, geralmente, reduzir a perda de solo, mas também contribuir para aumentar a umidade do solo por meio da melhoria da infiltração e da redução das taxas máximas de descarga dos rios (DORREN; REY, 2004).

Os terraços já fazem parte da paisagem agrícola em áreas montanhosas em todo o mundo, mostrando-se como estratégia de tornar uma área de alto declive em terra agricultável (JIANG *et al.*, 2016). Gu *et al.* (2012) afirmam que os campos de arroz em terraços adjacentes às aldeias com florestas formam parte das paisagens agrícolas tradicionais da Ásia. Especificamente, os terraços de Ifugão com cultivo de arroz, nas cordilheiras das Filipinas, foram registrados como Patrimônio Mundial em 1995 (CUI *et al.*, 2010).

Segundo Bertoni (1959), a utilização dos terraços em grande escala no Brasil iniciou-se pelo estado de São Paulo ainda na década de cinquenta. Desde então, essa prática importante para a conservação do solo foi foco de estudo por diversas instituições de pesquisas, possibilitando sua expansão no país.

Os terraços podem ser classificados quanto à função que desempenham (terraço de retenção; de drenagem; terraço misto), quanto à forma construtiva (Tipo Nichols ou Manghum), quanto à forma de movimentação de terra (base estreita, base média, base larga), quanto ao seu perfil e ao alinhamento (PRUSKI *et al.*, 2009). Os terraços podem ser construídos tanto de forma manual, utilizando implementos simples como enxadas, enxadões (OLIVEIRA, 2010), bem como de forma mais tecnificada, com uso de arados de aivecas ou de discos, terraceadores, arados gradeadores e motoniveladoras, sendo o arado mais utilizado nestes sistemas, apresentando como vantagem a construção e manutenção dos terraços pelos próprios agricultores (BERTONI; LOMBARDI NETO 2012).

De maneira geral, como relatado por Griebeler *et al.* (2000), para segurança e eficiência dos sistemas de terraceamento no controle da erosão, é primordial que seja feito estudo criterioso, de modo a conhecer as condições locais, como clima, solo, sistema de cultivo, culturas a serem implantadas, relevo e equipamento disponível. No entanto, são inúmeros benefícios dessa prática para os campos agrícolas, principalmente quando se trata de regiões de alto declive associadas à vulnerabilidade à erosão.

Bertoni (1959) afirma que o terraceamento é uma das práticas mais eficientes de controlar a erosão em terras cultivadas. Sua eficácia se torna ainda maior quando associada às outras práticas de conservação do solo e da água. Medidas de conservação do solo e da água, como os terraços, são frequentemente promovidas em regiões montanhosas a fim de reduzir a erosão, melhorar a produtividade do solo e aumentar o rendimento das culturas (POSTHUMUS; STROOSNIJDE, 2010; MESFIN, 2018).

Dessa forma, a mudança de uma agricultura convencional para uma agricultura com base nos princípios conservacionistas pode melhorar a estrutura, aumentar o carbono orgânico, minimizar os riscos de erosão, conservar a água, diminuir as flutuações na temperatura e melhorar a qualidade do solo (BUSARI *et al.*, 2015).

#### **2.4 Variabilidade de atributos de solo associada às práticas mecânicas de conservação**

Os atributos do solo não estão distribuídos uniformemente. Essa variabilidade está associada desde sua gênese, sendo resultado da atuação dos fatores de formação distribuídos, tanto no espaço, quanto no tempo.

Espacialmente a variabilidade ocorre de forma natural e é resultante de interações complexas entre geologia, topografia e clima (FERREIRA *et al.*, 2015). Considerando a variabilidade espacial das propriedades do solo em determinada área, é importante avaliar o potencial de produção dessa área, que pode servir como base para planejar estratégias de manejo e otimizar a rentabilidade, sustentabilidade e proteção do meio ambiente (ZHAO *et al.*, 2009; ZGÖZ *et al.*, 2012).

Com o passar do tempo, o uso do solo leva ao aumento da sua heterogeneidade, sobretudo quando está relacionado às práticas de desmatamento, preparo do solo, rotações de cultura, localização de aplicação de fertilizantes, ou seja, como esses fertilizantes são aplicados - em faixas ou em linhas (CAVALCANTE *et al.*, 2007).

Há diversos estudos em que foi investigada a variabilidade espacial dos atributos dos solos relacionados a outras práticas de manejo, como por exemplo, o plantio direto (CAVALCANTE *et al.*, 2011; DALCHIAVON *et al.*, 2012; RIBEIRO *et al.*, 2016; GUEDES FILHO *et al.*, 2016) e a adubação relacionada à produtividade das culturas (SANA *et al.*, 2014; FERRAZ *et al.*, 2015; MONTANARI *et al.*, 2016).

No entanto, há necessidade de estudar a variabilidade dos atributos do solo relacionada a outras práticas de manejo, como os terraços. Os terraços estão frequentemente associados a uma elevada variabilidade espacial na fertilidade do solo e na resposta da cultura devido à erosão do solo e ao processo de acumulação de sedimentos (VANCAMPENHOUT *et al.*,

2006). A acumulação de sedimentos se dá pela redistribuição ao longo do terreno, e ocorre preferencialmente em regiões mais baixas do terreno, resultando em variação das propriedades químicas do solo (NI; ZHANG, 2007).

De acordo com Dercon *et al.* (2003), as melhores práticas agronômicas e de manejo do solo devem ser integradas com os terraços. Ainda de acordo com esses autores, é importante compreender a variabilidade espacial das propriedades do solo em terraços de formação lenta (terraços de retenção, terraços mistos, por exemplo) a fim de desenvolver práticas de manejo integrado para melhorar o desempenho desta técnica de conservação de solo comumente usada em áreas mais declivosas.

Nesse sentido, Sandaña *et al.* (1998), avaliando as diferenças entre três terraços das idades Pleistoceno inferior, médio e superior, em Madrid e Guadalajara, chegaram à conclusão de que o aumento da translocação de argila e a lixiviação de carbonato de cálcio são evidentes quando são avaliados terraços mais recentes em relação aos terraços mais antigos estabelecidos no entorno do rio Henares. Resultados semelhantes também foram constatados no Sudoeste da China por Ni e Zhang (2007), que concluíram haver maior concentração de carbonato de cálcio nas regiões mais inferiores da área terraceada, podendo o cultivo influenciar a erosão e a dinâmica de outros elementos como o fósforo e o potássio.

Os parâmetros de qualidade do solo variam em áreas terraceadas devido ao relevo, material de origem e principalmente das práticas adotadas, podendo aumentar as taxas de erosão nas seções dos terraços (LI; LINDSTROM, 2001). Dercon *et al.* (2003), ao estudarem a variabilidade espacial das propriedades do solo em terraços na região dos Andes no Equador, observaram que houve alta variabilidade espacial das propriedades do solo em terraços. Esses autores afirmam ainda que, apesar do padrão e da magnitude da variação espacial serem dependentes do local, ficou claro que a fertilidade do solo aumentou da parte superior para a parte inferior, tomando como base as linhas de contorno dos terraços.

Damene *et al.* (2012), estudando o impacto dos terraços agrícolas na manutenção da fertilidade do solo na Etiópia, observaram que devido à erosão e lixiviação de sais solúveis do declive superior e acúmulo no pé da encosta, o pH do solo e as bases trocáveis aumentaram com a diminuição da inclinação do terreno. Nesse estudo, os autores chegaram à conclusão de que os terraços reduzem as perdas de solo e de nutrientes causadas pela erosão.

Kagabo *et al.* (2013), avaliando o efeito da erosão sobre o gradiente de fertilidade do solo e os rendimentos de batata e milho em terraços de formação lenta (terraços de retenção, terraços mistos, por exemplo), notaram que os valores de carbono orgânico, nitrogênio total e fósforo disponível foram sempre maiores nas partes inferiores dos terraços e diminuíram nas

porções superiores. Vancampenhout *et al.* (2006), pesquisando a magnitude dos gradientes de fertilidade dos solos em terraços progressivos entre os taludes de pedra na Etiópia, também verificaram efeito significativo para o fósforo disponível, nitrogênio total e carbono orgânico, sendo os maiores valores encontrados nas zonas inferiores.

Em cultivo de arroz no noroeste do Vietnã, Schmitter *et al.* (2010) observaram que a água de irrigação carregada de sedimentos enriquece a fertilidade do solo depositando sedimentos finos ricos em carbono orgânico, especialmente nos campos localizados na posição inferior.

Desse modo, o conhecimento da variabilidade do solo nos terraços é um importante determinante nas práticas de manejo, de maneira a evitar a perda da fertilidade do solo pelos processos de fluxo de água e carreamento dos nutrientes, interferindo no crescimento e rendimento das culturas.

## **2.5 Geoestatística como ferramenta de análise da variabilidade dos atributos do solo**

A distribuição dos atributos do solo não se dá de forma homogênea, ou seja, existe variabilidade destes atributos tanto no espaço quanto no tempo. Em se tratando de terraços, essa variação é ainda maior, pois está diretamente relacionada com a distribuição do solo no relevo, que será condicionada pelo fluxo e intensidade de água no perfil do solo. Assim, quando se pretende estudar os atributos do solo em sistemas de terraços, devem-se utilizar modelos estatísticos que considerem essa variação existente, sendo a geoestatística uma importante ferramenta para estudar esse tipo de variabilidade.

A geoestatística teve sua origem na África do Sul, quando Krige (1951) trabalhando com dados de concentração de ouro constatou que para explicar a variância dos teores obtidos era necessário considerar as distâncias entre as amostras. Doze anos depois, Matheron (1963), tomando como base as descobertas já realizadas pelo engenheiro de minas Krige em 1951, desenvolveu uma teoria que chamou de Teoria das Variáveis Regionalizadas, que considera a localização geográfica e a dependência espacial e assim surgiu a geoestatística.

Yamamoto e Landim (2013) afirmam que a geoestatística é um método estatístico que permite a caracterização espacial de variáveis de um dado fenômeno mediante estudo da sua distribuição e variabilidade espaciais, incluindo também as incertezas associadas.

Com a análise geoestatística é possível organizar os dados disponíveis espacialmente de acordo com a semelhança entre vizinhos georreferenciados (GREGO *et al.*, 2014). Em outras palavras, a inferência da continuidade espacial pode ser realizada tendo como base a

estatística entre dois pontos e a ferramenta utilizada para medir essa variabilidade é denominada semivariograma (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

O semivariograma utiliza uma função numérica que denominada semivariância, cuja funcionalidade é avaliar a dependência espacial da característica de interesse em função da distância entre pontos amostrados, tendo como base a estatística clássica, diferindo por considerar as coordenadas geográficas dos pontos amostrados (LANDIM, 2006; ASSUMPCÃO *et al.*, 2007).

Para construção do semivariograma são usadas as diferenças ao quadrado dos valores obtidos, assumindo-se uma estacionalidade nos incrementos e, para isso, é essencial o número suficiente de pares de modo a tonar o resultado consistente – geralmente 30 pares (LANDIM, 2006).

A partir dos dados da semivariância é gerado o gráfico – semivariograma. O gráfico é composto, como já mencionado anteriormente, pela semivariância (eixo “Y”) com a distância (eixo “X”). Os parâmetros que compõe os semivariogramas são alcance (A), patamar (C’), patamar parcial (C) e efeito pepita (C<sub>0</sub>) (LANDIM, 2006).

O alcance é onde, em uma dada distância, a semivariância se torna parcialmente constante; representa o momento em que as amostras apresentam correlacionadas espacialmente (CAON, 2012; CAMARGO, 1998).

Quando o valor do semivariograma corresponde a seu alcance (A), denomina-se patamar (C’) (CAMARGO, 1998). A partir deste ponto, a diferença da semivariância entre os pares de pontos não existirá, independe da distância, diz-se então que não há dependência espacial (CAMARGO, 1998). O Patamar parcial (C), também conhecido como contribuição, é a diferença entre o patamar (C’) e o efeito pepita (C<sub>0</sub>) (LANDIM, 2006).

Teoricamente, o efeito pepita é definido como sendo o valor em que a semivariância é igual a zero. No entanto, na prática, refere-se àqueles valores muito próximos de zero (BOHLING, 2005). Representa a irregularidade do semivariograma para distâncias inferiores à menor distância entre os pontos amostrais (CAMARGO, 1998), que pode ser atribuída a erros de medição ou coleta de dados em intervalos insuficientes e pequenos para o fenômeno de estudo (CRESSIE, 1991; CAMARGO, 1998; LANDIM, 2006).

Após a construção do semivariograma é necessário ajustá-lo a um modelo teórico que, por sua vez, definirá os parâmetros (alcance, patamar, patamar secundário, efeito pepita) que melhor representem seus dados amostrais (LANDIM 2006).

Entre os modelos mais usados, estão o modelo esférico, exponencial e gaussiano, todos estes com patamar e o modelo potencial, sem patamar (LANDIM, 2006). Em estudos

agronômicos, com destaque para a ciência do solo, os modelos mais utilizados para ajustes dos semivariogramas experimentais são esférico, exponencial e gaussiano (VIEIRA, 2000). Essa fase é muito importante e deve ser feita cautelosamente, de modo a obter uma boa análise geoestatística (LANDIM, 2006).

Cambardella *et al.* (1994) sugeriram avaliar a variabilidade dos dados por meio de sua dependência, sendo proposto, portanto, o índice de dependência espacial (IDE) amplamente utilizado nos trabalhos em que a geoestatística é adotada para melhor explicar a variabilidade da variável em estudo.

Dessa forma, para fins de cálculo, o IDE é dado pela razão entre o efeito pepita ( $C_0$ ) em relação ao patamar ( $C_0 + C$ ). Posteriormente, o IDE é classificado em forte ( $IDE < 25\%$ ), moderado ( $25\% > IDE < 75\%$ ) e fraco ( $> 75\%$ ) (CAMBARDELLA, 1994). Se, eventualmente, o IDE, foi igual a 100%, diz que ocorreu o fenômeno denominado, efeito pepita puro, ou seja, denota um fenômeno que não é completamente conhecido, por falta de informação, mas não necessariamente refere-se um fenômeno com independência espacial, aleatório (YAMAMOTO, LANDIM, 2013).

Zimback (2001), utilizando a proporção fornecida pelo programa  $GS^+$ , adaptou os limites propostos por Cambardella *et al.* (1994), e estabeleceu como IDE fraco quando a razão é igual ou inferior a 25%; IDE moderado quando a razão é superior a 25% e inferior a 75% e IDE forte quando essa relação é maior que 75%.

Uma das vantagens do uso da geoestatística é a capacidade de conseguir estimar dados em áreas que não foram realizadas amostragens, isso se dá com uso de interpoladores, dos quais a krigagem é a mais utilizada, sobretudo, nos estudos em ciências agrárias. O método de interpolação recebe esse nome em homenagem a Daniel Krige, pioneiro com seus trabalhos na área da mineração em meados dos anos 50, no continente Africano (KRIGE, 1951).

Conceitualmente, a krigagem é um processo de estimativa de valores de variáveis distribuídas no espaço e/ou tempo, com base nos valores adjacentes quando considerados interdependentes pela análise variográfica (YAMAMOTO, LANDIM, 2013). Dentre as metodologias de estimativas existentes em geoestatística, a krigagem ordinária é a mais usual (LANDIM, 2006) e tem como objetivo a modelagem espacial do fenômeno de interesse, em outras palavras, determinar a distribuição e a variabilidade existente (YAMAMOTO, LANDIM, 2013).

Uma das razões do sucesso do uso da krigagem ordinária, além das observadas quando do uso em mineração, é o fato de que fornece estimativas imparciais e com variância mínima (CAMARGO, 1998; YAMAMOTO; LANDIM, 2013; OLIVEIR; WEBSTER, 2014).

Dentre outros fatores, o tamanho amostral é um ponto importante, sendo o nível de detalhamento obtido pela distância entre os pontos de amostragem e dependente tanto da propriedade a ser analisada quanto do tamanho da área amostrada (SIBALDELLI *et al.*, 2015).

Há vários trabalhos em que foi utilizada a geoestatística para avaliar a variabilidade espacial dos atributos dos solos (GUIMARÃES *et al.*, 2016, SANA *et al.*, 2014; RIBEIRO *et al.*, 2016; FERRAZ *et al.*, 2015; OLIVEIRA *et al.*, 2013; SANTOS *et al.*, 2017).

De acordo com BUKAK *et al.* (2012), a variabilidade de atributos do solo está diretamente relacionada aos fatores de formação do solo, bem como a paisagem e suas derivações no ambiente (terço superior, médio e inferior); sendo influenciada pela dinâmica da água e relevo.

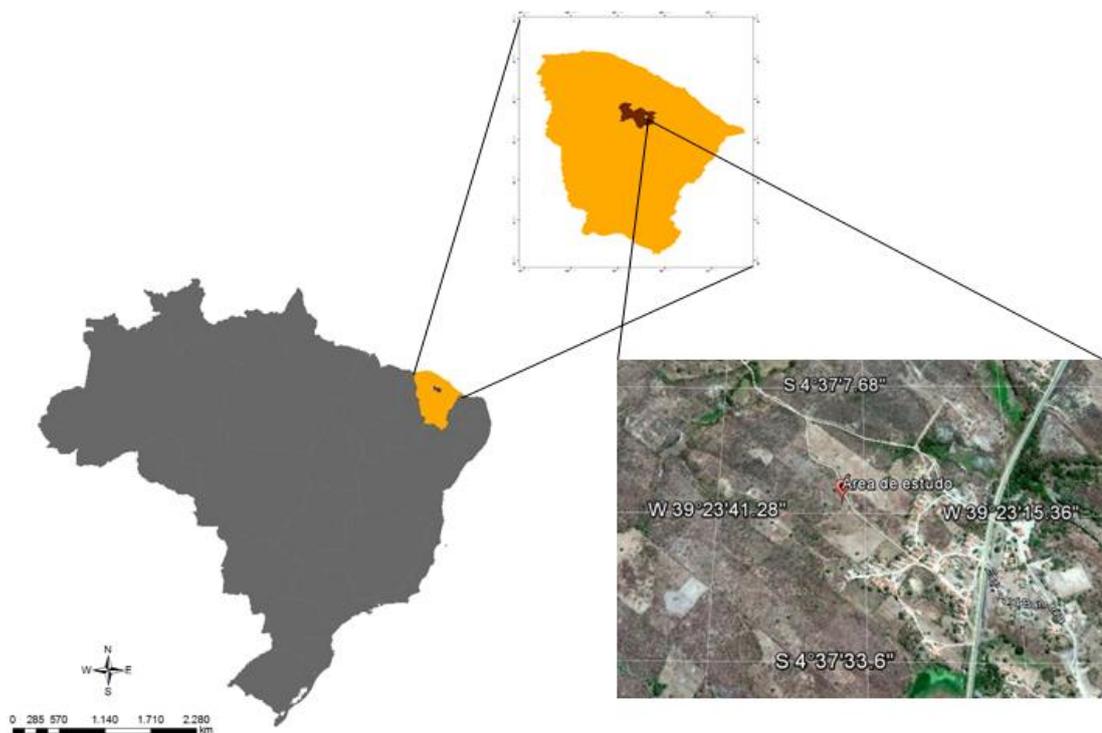
Nesse sentido, quando se pretende avaliar a variabilidade dos atributos do solo em práticas de conservação do solo, em particular os terraços, é aplicável também o uso da geoestatística, uma vez que essa variação depende da dinâmica da água e também do relevo. Na literatura, são poucos os trabalhos que abordam essa variabilidade associada à prática dos terraços, sendo, portanto, um campo ainda a ser explorado, com potencial de gerar informações que possibilitem melhor manejo do solo e da água, sobretudo nas regiões semiáridas.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

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

A pesquisa foi realizada no segundo semestre de 2017, em área pertencente à microbacia do rio Cangati. A comunidade em questão foi a de Iguaçu, distrito do município de Canindé, Ceará, Brasil, situada cerca de 140 km de Fortaleza, com coordenadas geográficas 4°37'39" de latitude sul e 30°23'15" de longitude oeste.

**Figura 1-** Localização da área de estudo no distrito de Iguaçu, Canindé – CE



Fonte: Ryshardson Geovane, 2017.

O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, enquadra-se no tipo BSw'h', caracterizado como quente e semiárido. A temperatura média é de cerca de 24°C, podendo alcançar os 34°C; a precipitação média anual situa-se em torno de 750 mm, sendo as chuvas concentradas no período de fevereiro a abril, podendo se estender até maio (SRH-CE/FUNCEME, 2010).

O relevo caracteriza-se por maciços residuais e depressões sertanejas; a vegetação predominante da região é caatinga arbustiva aberta e/ou densa e floresta subtropical subcaducifólia tropical pluvial (IPECE, 2017).

Especificamente, na bacia do rio Cangati predominam, em sua grande maioria, os Luvisolos Crômicos e Neossolos Litólicos (SRH-CE/FUNCEME, 2010). Com base nessas informações, o solo da área de estudo é um Luvisolo Crômico.

Os terraços de retenção foram construídos em 2006, pelos próprios agricultores da comunidade, sob coordenação da Secretaria de Recursos Hídricos do estado do Ceará (SRH) por meio do Projeto de Desenvolvimento Hidroambiental (PRODAM), sendo este executado com recursos do Banco Mundial, no período de 1999 a 2009 (OLIVEIRA, 2010). Estão distanciados com espaçamentos e variando de 15 a 20 metros, a depender da declividade do terreno.

O principal objetivo do projeto com a implantação dos terraços foi evitar a perda de solo por erosão e, concomitantemente a isto, favorecer a infiltração de água no perfil do solo, de modo a possibilitar a produção agrícola em terras antes impróprias ao cultivo.

A área em que os terraços estão localizados compreende 5 ha, sendo cerca de 70% em pousio com predomínio vegetação caatinga, em níveis distintos de regeneração. A declividade da área é variável, sendo no local de estudo variando 9 a 16%.

A área vinha de cultivos sucessivos há 4 anos sem adoção de práticas conservacionistas do solo, com o preparo do solo com o uso do fogo para o cultivo das principais culturas (*Zea mays* L. e *Vigna unguiculata* L.). Após a conclusão dos terraços, que aconteceu no final de 2006 e início de 2007, não houve cultivo, deixando o solo em pousio de modo a buscar a recomposição da fertilidade da propriedade para melhor rendimento das culturas.

Com isso, houve o surgimento de espécies nativas na área, tais como mufumbo (*Cobretum leprosum*), jurema preta (*Mimosa hostilis*), marmeleiro (*Cróton sonderianus*), pinhão Manso (*Jatropha curcas*) e algumas espécies mais rasteiras com destaque para o bamburral (*Hyptis umbrosa*). No período de estiagem é comum o agricultor inserir animais na área, tais como cavalo (*Equus caba*) e asno (*Equus asinus*) para alimentar-se de vegetação remanescente nesta época do ano, prática frequentemente utilizada pelos agricultores no semiárido, principalmente com caprinos, ovinos e bovinos.

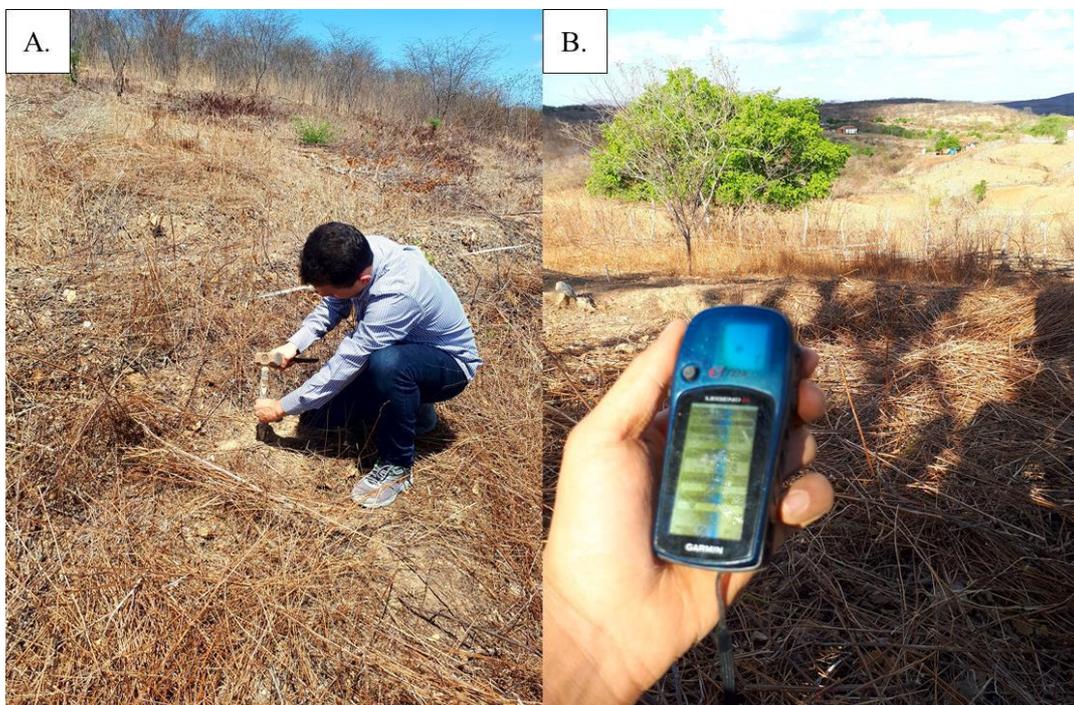
### **3.2 Amostragem e coleta de solo**

As coletas de solo foram realizadas no segundo semestre de 2017. A amostragem foi do tipo regular em uma área de 810 m<sup>2</sup>, com dimensões 18 m (largura) x 45 m (comprimento),

correspondendo a área entre dois terraços. A grade foi estabelecida da seguinte forma: na largura os pontos foram estabelecidos a cada dois metros, enquanto que ao longo do comprimento os pontos foram estabelecidos a cada cinco metros.

Nos pontos de intercessão da malha foram fixados marcadores (estacas), devidamente identificados, com a numeração sequencial referente a cada ponto amostral, de modo a facilitar a localização, bem como o processo de amostragem. Esses pontos, após identificados, foram georreferenciados utilizando o aparelho GPS de navegação modelo Garmin eTrex 10 (Figura 2).

Figura 2- Detalhe do estaqueamento (A) e georreferenciamento (B) dos pontos amostrais



Fonte: Autor.

Para realização das análises físicas (granulometria) e químicas, em cada ponto amostral (100 pontos), identificado e georreferenciado, foram coletadas amostras de solo, com estrutura deformada em duas camadas (0,0 a 0,1 m; 0,1 a 0,2 m), totalizando 200 amostras.

Logo após a coleta, o solo foi acondicionado em sacos plásticos devidamente fechados, identificados e transportados até casa de secagem de solos pertencente ao Departamento de Ciências do Solo (DCS) da Universidade Federal do Ceará (UFC), onde foram secos ao ar. Posteriormente, foi feito o destorroamento e peneiramento das amostras de solo, em peneira cuja abertura da malha é de 2 mm, obtendo assim a terra fina seca ao ar (TFSA) utilizada nas análises químicas e de granulometria.

### 3.3 Variáveis analisadas

Com o intuito de avaliar a variabilidade espacial dos atributos do solo foram analisados os atributos físicos: granulometria (GEE; BAUDER, 1986), argila dispersa em água e calculado o grau de floculação (EMBRAPA, 1997), e os químicos (pH, condutividade elétrica (CE), nitrogênio total (NT) fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na), alumínio (Al), acidez potencial (H+Al) e carbono orgânico total (COT) conforme metodologia de Donagema *et al.* (2011) .

#### 3.3.1 Análises físicas

A análise granulométrica foi realizada de acordo com a metodologia de Gee e Bauder (1986), utilizando o método da pipeta. A fração areia, após quantificação, foi fracionada em agitador mecânico contendo peneiras, obtendo assim areia grossa (1 – 0,50 mm), média (0,5 – 0,25 mm) e fina (0,25 – 0,105 mm), estas foram pesadas e classificadas de acordo com a classe de cada peneira.

Para determinação da argila dispersa em água foi adotado o procedimento semelhante ao da análise textural, excetuando o dispersante químico (NaOH), sendo utilizado como dispersante água destilada (AZAMBUJA *et al.*, 2012). Posteriormente, com os valores de argila total e argila dispersa em água, foi calculado o grau de floculação (EMBRAPA, 1997), conforme equação 1:

$$GF = 100 * (AT - ADA) / AT, \quad (1)$$

Sendo, *GF* Grau de Floculação (%), *AT* Argila Total (%) e *ADA* Argila Dispersa em Água (%).

#### 3.3.2 Análises químicas

Todas as análises químicas e cálculos foram realizados conforme métodos descritos em Donagema *et al.* (2011).

O pH foi analisado em água, numa relação de 1:2,5 entre solo e água destilada, respectivamente, e determinado pela análise potenciométrica introduzindo o eletrodo na

solução do solo. A condutividade elétrica (CE) foi realizada mediante a extração da pasta de saturação e determinada utilizando um condutivímetro digital.

O nitrogênio total foi determinado pelo método semimicro Kjeldahl, que consiste na determinação por acidimetria ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), depois de realizada a extração em câmara de difusão com solução sulfúrica.

O fósforo (P), sódio ( $\text{Na}^+$ ) e potássio ( $\text{K}^+$ ) foram extraídos com a solução de Mehlich-1 ( $\text{HCl}$  0,05 N e  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,025 N). O fósforo (P) foi determinado utilizando o fotocolorímetro (colorimetria), enquanto o sódio ( $\text{Na}^+$ ) e potássio ( $\text{K}^+$ ) foram determinados por fotômetro de chama.

Após a extração com  $\text{KCl}$  (1N), o cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e o magnésio ( $\text{Mg}^+$ ) foram determinados por absorção atômica (ICP-OES). Para a acidez potencial (H+Al), utilizou-se o extrator acetato de cálcio a pH 7,0 e a determinado por titulação com hidróxido de sódio. O alumínio trocável foi extraído com solução de  $\text{KCl}$  (1N) e determinado por titulação alcalina com  $\text{NaOH}$  (0,025N). O carbono orgânico total (COT) foi determinado pelo método de oxidação da matéria orgânica via úmida utilizando o dicromato de potássio em meio sulfúrico e submissão das amostras a uma fonte externa de calor para extração e determinação pela titulação do excesso de dicromato de potássio com solução de sulfato ferroso amoniacal (DONAGEMA *et al.*, 2011).

De posse das análises químicas, calculou-se a soma de bases (SB) pelo somatório de Ca, Mg, K e Na; a capacidade de troca de cátions (CTC) pelo somatório entre a soma de bases (SB) e a acidez potencial (Al+H); a saturação por bases (V%) calculada pela relação entre SB e a capacidade de troca de cátions a pH 7,0; e a percentagem de saturação por sódio (PST%) pela divisão do  $\text{Na}^+$  pela CTC.

### **3.4 Análises estatísticas**

#### ***3.4.1 Estatística descritiva***

Os dados foram submetidos à análise descritiva, calculando-se a média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação, valor máximo, valor mínimo, assimetria e coeficiente de curtose. Os dados foram relacionados com as coordenadas para seguimento com análise geoestatística.

### 3.4.2 Análise geoestatística

O início da análise geoestatística foi realizado pela construção dos semivariogramas, de modo a permitir verificação da dependência espacial. A semivariância de uma variável regionalizada é expressa como:

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

Na fórmula,  $N(h)$  expressa os pares de valores medidos  $[Z(x_i) - Z(x_i + h)]$ , separados pela distância  $h$  (VIEIRA, 2000).

Os semivariogramas foram ajustados, utilizando programa  $GS^+$  (ROBERTSON, 2008), aos modelos teóricos que melhor explicaram a variabilidade existente além de serem fundamental para realização da krigagem. Nesse sentido, os semivariogramas ajustaram-se aos modelos:

Modelo Esférico:

$$\gamma(h) = \begin{cases} Co + C \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right], \dots 0 \leq h \leq a \\ C + Co, \dots h > a \end{cases} \quad (3)$$

Modelo exponencial

$$\gamma(h) = Co + C \left[ 1 - e^{-3(h/a)} \right], \dots 0 < h < d \quad (4)$$

Modelo Gaussiano

$$\gamma(h) = Co + C \left[ 1 - e^{-3(h/a)^2} \right], \dots 0 < h < d \quad (5)$$

Modelo Linear sem patamar

$$\gamma(h) = Co + Ah^B, \dots 0 < B < 2 \quad (6)$$

As variáveis são semivariância ( $\gamma(h)$ ), efeito pepita ( $C_0$ ), patamar parcial ( $C$ ), distância máxima da definição do semivariograma ( $d$ ), alcance ( $a$ ), os parâmetros A e B referem-se às constantes que definem o modelo. O modelo linear sem patamar, não apresenta em seu cálculo o parâmetro C, possibilitando o processo de interpolação mesmo sem a presença do estabelecimento do limite (GUIMARÃES, 2004).

Além disso, foi verificado o índice de dependência espacial (IDE), calculado pela relação entre o efeito pepita ( $C_0$ ) e o patamar ( $C + C_0$ ). Com base nesse cálculo, realizou-se a classificação proposta por Zimback (2001), a qual tem como referência os limites propostos por Cambadella *et al.* (1994). Nesse sentido, Zimback (2001) estabelece IDE fraco quando a razão é igual ou inferior a 25%; IDE moderado quando a razão é superior a 25% e inferior a 75% e IDE forte quando essa relação é maior que 75%.

Para visualizar a distribuição e variabilidade das variáveis trabalhadas no presente estudo, realizou-se a construção dos mapas dos atributos do solo, utilizando o método da Krigagem com auxílio do programa GS<sup>+</sup> (ROBERTSON, 2008).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Estatística descritiva

#### 4.1.1 Atributos físicos

A análise descritiva dos dados referentes aos atributos físicos do solo entre terraços nas camadas de 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Estatística descritiva dos atributos físicos do solo entre terraços nas camadas de 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m

Atributo	Unid	Min	Máx	Média	Mediana	D.P.	CV	Assim.	Curt.
0,0 – 0,1 m									
Areia	%	61,9	85,7	73,7	74,3	3,7	5,0	-0,5	1,8
<u>AG</u>	%	22,4	46,3	30,8	30,5	4,1	13,4	0,3	2,4
<u>AM</u>	%	17,4	23,8	20,7	20,3	1,4	6,6	0,7	0,1
<u>AF</u>	%	33,6	57,1	48,5	48,8	4,2	8,7	-0,2	2,7
Silte	%	10,6	24,9	18,9	18,9	2,7	14,1	-1,8	0,5
Argila	%	2,4	17,1	7,4	6,9	2,7	36,2	2,4	1,8
ADA	%	0,9	7,7	4,0	3,6	1,7	42,3	-1,7	-0,4
GF	%	7,0	85,3	45,8	47,5	18,3	39,8	3,8	-1,0
0,1 – 0,2 m									
Areia	%	34,4	81,8	70,0	70,4	5,3	7,6	-0,3	21,1
<u>AG</u>	%	19,5	43,3	27,9	27,9	3,0	10,6	0,0	7,0
<u>AM</u>	%	18,3	24,8	21,5	21,6	1,3	6,0	-0,3	0,0
<u>AF</u>	%	34,6	60,1	50,6	50,3	3,1	6,2	0,4	6,5
Silte	%	6,6	52,5	21,2	21,7	4,9	23,1	-0,3	18,6
Argila	%	4,1	15,7	8,7	8,5	2,3	26,1	0,3	0,9
ADA	%	1,0	9,3	4,8	4,5	1,5	32,0	0,5	0,9
GF	%	4,9	84,9	43,2	42,7	17,1	39,5	0,1	-0,3

AG- areia Grossa; AM- Areia média; AF- Areia Fina; ADA – Argila Dispersa em Água; GF- Grau de Flocculação; Unid – unidade; Min- mínimo; Máx – Máximo; D.P- Desvio Padrão, CV – Coeficiente De Variação; Assim – Assimetria; Curt- Curtose.

Quanto à classificação textural, em ambas as profundidades, o solo foi classificado como Franco-arenoso, sendo a fração areia mais expressiva em superfície. Nesse tipo de solo, Luvisolos, existe mais areia na superfície e mais argila em profundidade e estão relacionados à classe do solo, isto é, aos aspectos da gênese dessa classe de solo (OLIVEIRA *et al.*, 2009; EMBRAPA, 2013). A dinâmica da água, que é variável de acordo com o manejo, também influencia no predomínio de areia na superfície e argila em subsuperfície, como relatado por

outros autores (SALDAÑA *et al.*, 1998; NI; ZHANG, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2009; SCHMITTER *et al.* 2010).

Em relação à argila dispersa em água e grau de floculação, observaram-se valores médios menores de ADA e maiores para o GF nas duas camadas de solo avaliadas. Há relação inversamente proporcional entre ADA e GF já bem relatada por Castro Filho *et al.* (1998), ao afirmarem que a ADA é a porção da argila total que se dispersa com a água e, por ser resultado da desagregação, além de provocar entupimento de poros e redução da permeabilidade ao ar (MOTA *et al.*, 2015), representa também sérios problemas ambientais podendo comprometer a qualidade do solo e dos recursos hídricos (CZYZ; DEXTER, 2015; BASGA *et al.*, 2018).

Analisando os dados das camadas superficial e subsuperficial, se constata que o GF na superfície é maior. Um importante aspecto responsável pela maior floculação na camada superficial é a presença de matéria orgânica, proveniente tanto da deposição de animais (LIU; ZHOU, 2017) bem como da vegetação existente mediante deposição de restos vegetais, o que favorece, efetivamente, a atividade microbiana sobre a matéria orgânica e o processo de formação e estabilidade de agregados (BRONICK; LAL, 2005).

Um dos parâmetros bastante utilizado para inferir a respeito da variabilidade de determinado atributo é o coeficiente de variação (CV). Nesse sentido, conforme classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980), coeficientes inferiores a 12% são considerados baixos, médios entre 12 e 52% e acima de 52% são altos.

A variabilidade dos dados foi considerada baixa para todos constituintes da fração areia para as duas profundidades estudadas, excetuando a AG na camada de 0,0 – 0,1 m. Rosemary *et al.* (2017), ao avaliar o impacto do uso da terra na variação espacial das propriedades do solo, também constataram variação baixa para fração areia. Para os demais atributos encontrados neste trabalho, observou-se variação média (Tabela 1).

Comparando os valores de CV de argila e silte em relação a areia, observa-se aumento gradativo no coeficiente de variação para estes constituintes granulométricos, o que denota que esta fração é mais susceptível a alterações. Além disso, com aumento da profundidade, as frações argila e argila dispersa em água apresentaram menor variação dos dados quando comparadas aos dados encontrados para a camada superficial, evidenciado tendência desta fração ser translocada e acumulada em horizontes inferiores (MOREAU *et al.*, 2006), fato que na superfície ainda é passível de maiores variações a depender, dentre outros fatores, das práticas de manejo e uso do solo (BASGA *et al.*, 2018).

Em sistemas de cultivo em áreas terraceadas o processo de remoção da camada

superficial provoca redistribuição de sedimentos e acúmulo em regiões mais baixas, resultando em variações tanto químicas quanto físicas do solo (VANCAMPENHOUT *et al.*, 2006; NI; ZHANG, 2007).

Os dados apresentaram grande amplitude entre os valores máximos e mínimos, com destaque para o grau de floculação. Essa abrangência dos resultados revela a variabilidade existente na área e indica que possíveis erros podem ser tomados quando se considera os métodos clássicos de avaliação dos resultados para tomada de decisão no manejo (YAMAMOTO; LANDIM, 2013; GREGO *et al.*, 2014). No que se refere ao GF a significativa amplitude dos resultados é decorrente dos diversos fatores que possibilitam sua formação como bem relatado anteriormente.

Os atributos físicos do solo nas camadas de 0,0 a 0,1 e 0,1 a 0,2 m exibiram resultados de média e medianas próximos, indicando proximidade ou tendência à normalidade, isto é, o ponto central é similar à média, não ocorrendo interferência de valores discrepantes (CAMBARDELLA *et al.*, 1994).

Analisando os atributos físicos nas duas camadas de solo quanto aos coeficientes de assimetria e curtose, constatou-se predomínio de valores positivos, situando-se todos próximos a zero, com algumas exceções, indicando tendência à normalidade e aptidão à análise geoestatística dos dados. Entretanto, apesar de ser uma característica desejável, Cressie (1991) afirma que a distribuição normal dos dados não é critério limitante à realização da análise geoestatística, podendo ser realizada mesmo que estes não apresentem distribuição normal.

#### 4.1.2 Atributos químicos

Os resultados da análise estatística descritiva dos dados referentes aos atributos químicos do solo entre terraços estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Estatística descritiva dos atributos químicos do solo entre terraços nas camadas de 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m

Atributo	Unid	Min	Máx	Média	Mediana	D.P	CV	Assim.	Curt.
0,0 – 0,1 m (n=100)									
pH	-	5,6	7,1	6,2	6,2	0,2	3,3	0,2	4,4
CE <sub>es</sub>	dS m <sup>-1</sup>	0,0	2,9	0,3	0,3	0,3	95,3	0,3	68,6
NT	g kg <sup>-1</sup>	0,2	5,7	0,7	0,6	0,6	79,9	1,7	70,2
P	mg kg <sup>-1</sup>	2,5	63,6	16,1	10,6	13,4	83,3	1,2	2,1
Na	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,3	1,2	0,5	0,4	0,1	30,1	0,5	15,6
K	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,1	0,7	0,2	0,2	0,1	58,5	1,0	5,6
Ca	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	8,3	26,9	15,1	15,3	3,1	20,8	-0,2	1,1
Mg	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	1,2	6,5	3,6	3,6	0,8	23,5	0,1	1,5
(H +Al)	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	1,0	5,3	2,9	2,8	1,0	36,0	0,2	-0,7
COT	g kg <sup>-1</sup>	3,4	29,6	9,0	8,4	3,4	37,8	0,5	14,1
SB	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	11,8	32,9	19,3	19,5	3,7	19,0	-0,1	1,1
CTC	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	14,9	36,4	22,2	22,6	3,9	17,4	-0,3	0,9
V	%	69,5	95,5	87,0	87,6	4,7	5,5	-0,4	1,5
PST	%	1,3	5,8	2,1	2,0	0,6	28,7	0,8	15,5
0,1 – 0,2 m (n=100)									
pH	-	6,0	7,1	6,4	6,4	0,2	3,5	0,0	0,1
CE	dS m <sup>-1</sup>	0,1	0,5	0,2	0,1	0,1	46,7	1,0	3,0
NT	g kg <sup>-1</sup>	0,2	1,2	0,5	0,4	0,2	44,3	0,3	1,6
P	mg kg <sup>-1</sup>	0,1	60,5	7,4	2,4	11,3	152,7	1,3	7,1
Na	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,3	0,8	0,4	0,5	0,1	18,9	-0,2	1,4
K	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,1	1,1	0,3	0,3	0,1	41,9	0,3	7,7
Ca	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	9,2	21,0	14,3	14,4	2,7	19,3	-0,2	-0,8
Mg	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	1,1	3,1	1,9	1,9	0,4	20,4	-0,2	0,8
(H +Al)	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,5	5,1	2,6	2,5	1,0	38,8	0,4	-0,6
COT	g kg <sup>-1</sup>	1,3	13,7	6,1	5,9	2,3	37,6	0,3	1,6
SB	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	11,6	24,0	17,0	17,1	2,8	16,7	-0,2	-0,7
CTC	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	13,7	26,0	19,6	19,7	2,8	14,5	-0,2	-0,9
V	%	69,8	97,8	86,5	87,3	5,3	6,1	-0,5	0,0
PST	%	1,8	3,8	2,3	2,2	0,4	16,9	0,8	3,6

Unid – unidade; Min- mínimo; Máx – Máximo; D.P- Desvio Padrão, CV – Coeficiente de Variação; Assim – Assimetria; Curt- Curtose.

Considerando as médias dos atributos químicos do solo nas duas profundidades (Tabela 2), verifica-se que o pH levou o solo à classe de acidez baixa, como valores situados próximo a neutralidade, enquanto a acidez potencial foi média e com ausência de alumínio

(RIBEIRO *et al.*, 1999; UFC, 1993). Além disso, não foram constatados problemas de salinidade assim como de sodicidade (RICHARDS, 1954; EMBRAPA, 2013). Por outro lado, os teores de carbono orgânico total e os valores de V% e CTC foram classificados como muito bons (RIBEIRO *et al.*, 1999; UFC, 1993), evidenciando alta fertilidade química, sobretudo na camada superficial do solo (0,0 - 0,10 m).

Analisando os atributos químicos do solo quanto à variação dos dados, segundo a classificação Warrick e Nielsen (1980), constatou-se maior variabilidade em superfície (0,0 – 0,1 m). Nessa camada, foram verificados altos valores de CV para CE, NT, P, Na, K; baixos para pH e V% e médios para os demais atributos. Por outro lado, em subsuperfície (0,1 – 0,2 m), com exceção do pH e V% (CV baixo) e P (CV alto), todos os demais atributos apresentaram CV classificado como médio, indicando tendência à homogeneidade dos atributos em profundidade.

Variações mais acentuadas em superfície são decorrentes, dentre outros fatores, do tempo de pousio que possibilitou o desenvolvimento de vegetação de regeneração, distribuída aleatoriamente na área, e com constituição e exigências variáveis (NASCIMENTO *et al.*, 2018). Artur *et al.* (2014) afirmam existir maior interação entre cobertura vegetal e os atributos do solo evidenciada pela decomposição e menores perdas de nutrientes. Adicionalmente, a presença de animais na área de estudo no período de estiagem, aportando material orgânico aleatoriamente ao solo por meio dos excrementos animais, também contribuiu com a variação dos atributos, sobretudo quanto ao P (LIU; ZHOU, 2017). Warrick e Nielsen (1980) relatam que a grande variabilidade para esses atributos é comum, pois resultam de práticas de manejo e características intrínsecas do solo.

Além disso, como a área está localizada em relevo acentuado, o próprio fluxo da água proveniente da precipitação pode ter influenciado na distribuição dos nutrientes na área, afetando de modo mais evidente a camada superficial do solo (ARTUR *et al.*, 2014).

Os menores valores de CV foram constatados para pH e V% em ambas as profundidades. Em relação ao pH, por ser expresso escala logarítmica, espera-se variações mínimas para este atributo do solo quando se refere a áreas relativamente pequenas e com mesmo manejo (SALDAÑA *et al.*, 1998; SANA *et al.*, 2014; DALCHIAVON *et al.*, 2012). A acidez potencial foi originária pelos íons  $H^+$ , visto que os valores para os teores de alumínio, quando constatados, foram inexpressíveis, o que é comum nesses tipos de solo no semiárido (OLIVEIRA *et al.*, 2009).

Quanto aos baixos valores de CV para V%, essa redução é resultado da “diluição” na variação dos dados pelo próprio cálculo, que envolve uma relação direta entre soma de bases

e a acidez potencial. Esse resultado indica que, em ambas as camadas, houve pouca heterogeneidade da soma de bases; muito embora, isoladamente, as bases tenham apresentando coeficiente de variação médio. A partir disso, é possível inferir que avaliações detalhadas devem ser feitas no momento da adubação para plantio, sendo necessário avaliar cada nutriente (bases) de modo a evitar problemas à qualidade do solo e, conseqüentemente, desbalanço nutricional às plantas.

De modo geral, o solo apresentou valores de pH situando-se em uma faixa que favorece o bom desenvolvimento vegetal. Também foi observada alta fertilidade do solo com valores de CTC mais expressivos em superfície, possivelmente influenciado pelo maior teor de matéria orgânica. Os valores de V% altos revelam que os coloides do solo estão sendo ocupados pelas bases que são essenciais ao desenvolvimento vegetal, sem ação negativa do alumínio, uma vez que a presença deste elemento não foi constatada nas análises químicas.

A maioria dos valores de atributos químicos do solo apresentou valores positivos e próximos a zero para coeficiente de assimetria e curtose nas duas profundidades, refletindo a tendência à normalidade dos dados.

## 4.2 Análise geoestatística

### 4.2.1 Atributos físicos

Os atributos físicos do solo apresentaram ajuste aos modelos teóricos dos semivariogramas, evidenciando a existência de dependência espacial, independente da profundidade (Tabela 3).

Tabela 3 - Modelos e parâmetros dos semivariogramas para os atributos físicos do solo entre terraços nas camadas de 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m

Atributo	Modelo	Efeito Pepita (Co)	Patamar (Co+C)	Alcance (m)	C/(Co+C) <sup>(2)</sup> (%)	CDE <sup>(3)</sup>
0 – 0,1 m (n=100)						
Areia	Exponencial	6,5	15,8	25,9	58,5	Média
AG	Exponencial	2,6	29,6	153,0	70,4	Média
AM	Gaussiano	1,1	2,2	20,8	50,0	Média
AF	Linear	6,9	18,2	22,7	62,0	Média
Silte	Exponencial	4,1	8,2	25,1	50,0	Média
Argila	Gaussiano	2,6	8,9	11,1	70,3	Média
ADA	Gaussiano	0,5	3,2	10,1	82,4	Forte
GF	Exponencial	240,5	485,4	66,7	48,3	Média
0 – 0,2 m (n=100)						
Areia	Gaussiano	19,4	38,7	21,3	94,7	Forte
AG	Exponencial	3,6	10,5	34,8	65,5	Média
AM	Gaussiano	1,1	2,2	20,5	50,5	Média
AF	Exponencial	5,0	12,3	43,3	59,6	Média
Silte	Esférico	0,5	6,5	10,0	92,5	Forte
Argila	Esferico	0,5	6,5	10,0	92,5	Forte
ADA	Exponencial	1,1	2,7	14,2	60,5	Média
GF	Exponencial	39,1	304,7	5,1	87,2	Forte

AG- areia Grossa; AM- Areia média; AF- Areia Fina; ADA – Argila Dispersa em Água; GF- Grau de Floculação; <sup>(2)</sup> - Grau de dependência espacial; <sup>(3)</sup> - Classe de dependência espacial (ZIMBACK, 2001; CAMBARDELLA *et al.* 1994).

Os semivariogramas dos atributos físicos ajustaram-se aos modelos exponencial e gaussiano nas duas profundidades, linear e esférico na camada superficial e subsuperficial, respectivamente. Özgöz *et al.* (2012), também encontraram melhores ajustes do semivariogramas ao modelo exponencial ao estudar a variabilidade de atributos físicos do solo em cultivo de arroz. Melhores ajustes de modelos exponenciais para os atributos físicos do solo podem ser explicados pelo comportamento parabólico dos dados, ou seja, não ocorre

grande variação a curtas distâncias sendo mais visíveis a distâncias maiores, evidenciando uma variabilidade espacial altamente regular (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

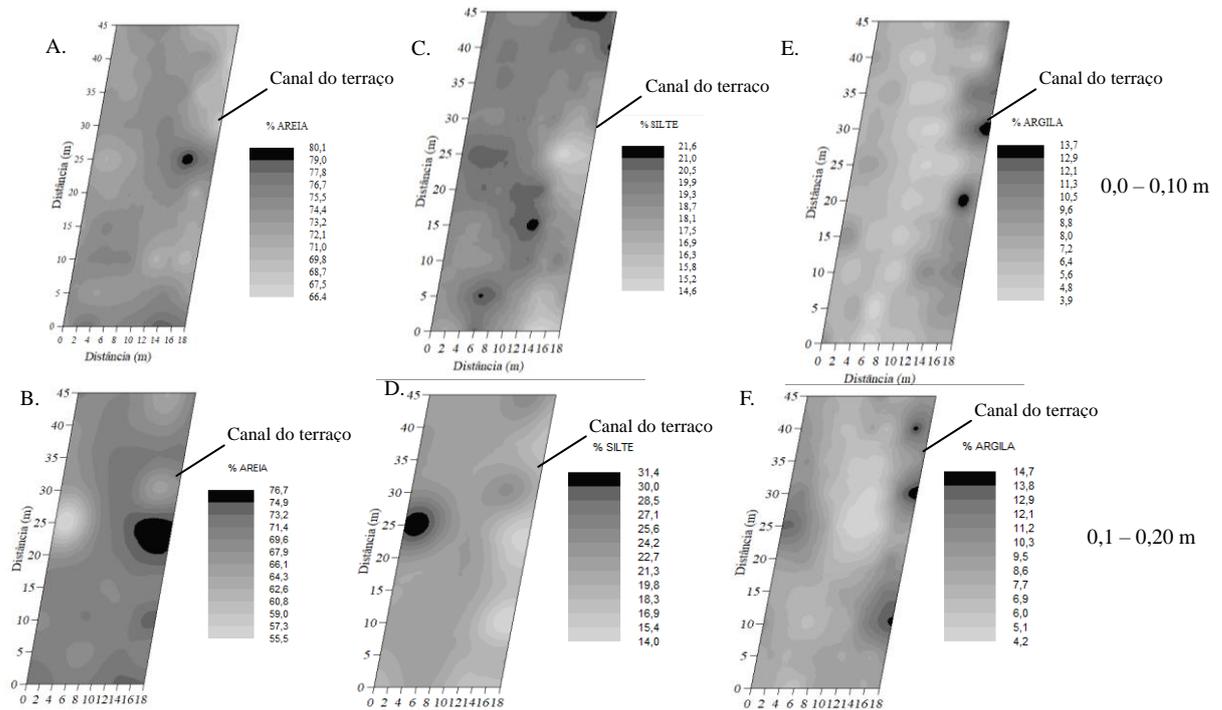
Por outro lado, analisando separadamente alguns atributos, observam-se ajustes a modelos diferentes ao se comparar as profundidades estudadas (Tabela 3). Corá *et al.* (2004), relatam que a existência dos valores distintos para o alcance, em ambas as profundidades de solo, revela a ocorrência de variabilidade tanto vertical quanto horizontal entre as profundidades.

Analisando os valores de alcance para os atributos físicos, constaram-se valores elevados, ocorrendo ligeira redução média em profundidade. Porém, todos os valores situaram-se acima dos pontos amostrais, indicando o limite máximo a partir do qual a dependência espacial não terá mais efeito. Esses resultados favorecem a interpolação dos dados e permitem inferir a respeito da variabilidade de cada atributo mediante as profundidades (VIEIRA, 2000; YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

A dependência espacial foi classificada como média em superfície, com exceção para a argila dispersa em água (forte). Em subsuperfície os atributos areia, silte, argila e grau de floculação apresentaram dependência forte, apresentando valores de grau de dependência espacial de 94,7; 92,5; 92,5 e 87,2%, respectivamente.

Mediante interpolação dos dados pela krigagem ordinária (VIEIRA *et al.*, 1993; YAMAMOTO; LANDIM, 2013) foram obtidos os mapas de distribuição espacial dos atributos físicos do solo, os quais permitem visualizar e interpretar a distribuição dos referidos atributos na área de estudo. Os mapas possibilitaram a visualização dos atributos físicos entre os terraços. Analisando conjuntamente os constituintes da fração granulométrica (areia, silte e argila), observa-se que estes exibiram distribuição heterogênea tanto ente eles quanto em profundidade (Figura 3).

Figura 3- Distribuição espacial das frações granulométricas (areia, silte e argila em %) do solo entre terraços nas camadas de 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m



Fonte: Autor.

Apesar de ter ocorrido, predominantemente, mais argila na zona próxima ao canal de terraço (distância de 18 m), foram observados pontos específicos da área com maiores teores de argila (Figuras 3E e 3F), denotando tendência de transporte das partículas de argila para esta região devido ao relevo e microrrelevo da área.

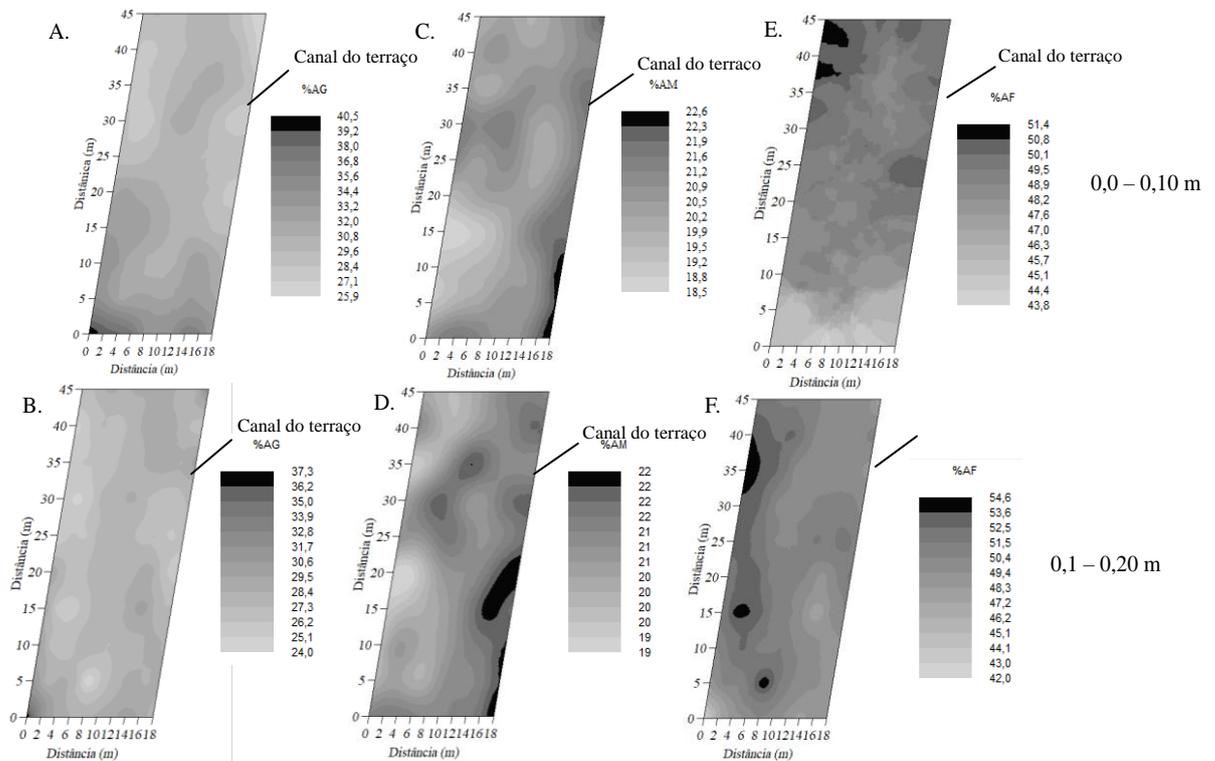
Embora os terraços reduzam substancialmente a deposição de sedimentos nas partes mais baixas do relevo, a remoção seletiva das partículas ainda ocorre (DEMENE *et al.*, 2012), podendo interferir na qualidade do solo. Os maiores teores de argila observados na proximidade do canal do terraço influenciam aspectos importantes para a condução dos cultivos agrícolas em região semiárida, como por exemplo, a maior retenção de água no solo.

As configurações do relevo e microrrelevo influenciam não só na dinâmica da água, mas também na fertilidade do solo (Artur *et al.* 2014). Além disso, o cultivo agrícola pode interferir na qualidade do solo em sistemas de terraços. Li e Lindstrom (2001), estudando parâmetros de qualidade do solo ao longo de encostas íngremes e terraços, verificaram melhores parâmetros de qualidade de solo nas zonas inferiores do terreno. Resultados semelhantes também foram constatados por Schmitter *et al.* (2010), os quais verificaram maior deposição de sedimentos mais finos em campos localizados na posição inferior de terraços cultivados com arroz.

No tocante ao fracionamento da areia, constatou-se maior representatividade desta fração em superfície em relação à camada inferior, apresentando distribuição heterogênea com a profundidade (Figura 4A a 4F).

Apesar da heterogeneidade da %AG nota-se que esta fração se concentrou na camada superior do solo (0,0 – 0,1 m), com maiores valores localizadas entre os pontos de intercessão (0 a 6 m na largura e 0 a 20 m em comprimento). Em Luvissoles do semiárido brasileiro, é comum a presença de materiais de textura mais grosseira em superfície, como resultado da resistência aos agentes de intemperismo, geralmente associado ao quartzo (OLIVEIRA *et al.*, 2009).

Figura 4- Distribuição espacial das frações de areia grossa (%AG), areia média (%AM) e areia fina (%AF) do solo entre terraços nas camadas de 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m



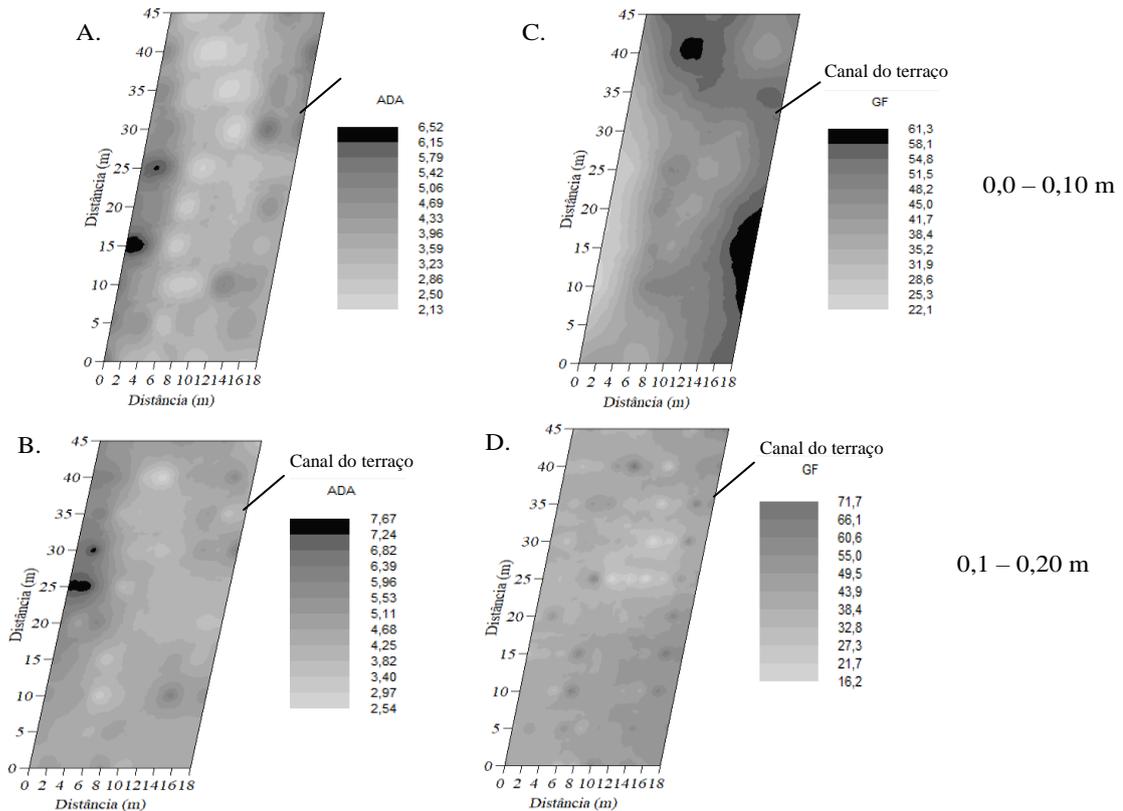
Fonte: Autor.

Com aumento da profundidade do solo, as partículas mais finas tornam-se mais expressivas na fração areia, sendo a %AM arranjada de forma semelhante em ambas as profundidades. Por outro lado, a %AF apresentou disposição heterogênea nas duas camadas estudadas (Figuras 4E e 4F). Na camada superficial, os maiores valores foram localizados em toda extensão do terraço a partir da distância de 10 m (comprimento). Em subsuperfície, os maiores valores para %AF concentraram-se na porção superior no terraço, ou seja, próximo à linha onde foram coletadas as amostras (comprimento) e largura de 9 metros.

Esses resultados evidenciam participação majoritária de areia fina, em profundidade, na constituição da fração areia na área. Além disso, a percentagem de AF próximo ao camalhão (acompanhando o comprimento distanciado a cada 5 metros) pode estar associada à movimentação e translocação dessas partículas provenientes do camalhão adjacente, uma vez que a coleta de solo foi realizada próximo ao camalhão. Adicionalmente, é possível que os processos erosivos que ocorreram na área antes da implantação dos terraços, tenham provocando essa diferença quanto a distribuição das frações granulométricas, incluindo a areia fina. É importante destacar que, culturalmente, os agricultores da região semiárida brasileira utilizam como práticas de preparo do solo desmatamento, seguido de queimada do material remanescente da vegetação (ARAÚJO FILHO, 2013). Quando isso é associado às características edafoclimáticas que favorecem a erosão, têm-se as condições que podem ter contribuído para a disposição das frações granulométricas do solo.

Em relação a argila dispersa em água (ADA) e grau de floculação (GF), os resultados foram divergentes. Ao passo em que na porção superior da área terraceada constataram-se maiores valores de argila dispersa em água para as duas profundidades, o grau de floculação foi menor, apresentando floculação maior nas distâncias mais próximas ao canal do terraço (Figuras 5A, B, C e D). Além do maior teor de argila próximo ao canal do terraço, o maior GF constatado nessa área também sinaliza para melhores condições estruturais do solo que também contribuem com maior retenção de água.

Figura 5- Distribuição espacial da argila dispersa em água - ADA (%) e grau de floculação - GF (%) do solo entre terraços nas camadas de 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m



Fonte: Autor.

Vale destacar que em subsuperfície houve maior grau de floculação, fato que pode estar associado com a translocação de argila para os horizontes inferiores (OLIVEIRA *et al.*, 2009), sendo esta fração granulométrica essencial na floculação de partículas de solo em regiões semiáridas (VAEZI *et al.*, 2018). Além disso, maiores valores de cálcio, magnésio associados à baixa concentração de sódio podem ter contribuído com maior expressividade do grau de floculação nessa camada.

A floculação das partículas de solo é o primeiro processo para a formação e estabilidade de agregado, que por sua vez irá influenciar na estrutura do solo (BRONICK; LAL, 2005), dinâmica da água e fertilidade do solo.

#### 4.2.2 Atributos químicos

Na Tabela 4 estão apresentados os modelos de ajuste e os parâmetros dos semivariogramas que demonstram a dependência espacial existente para os atributos químicos do solo entre terraços nas duas camadas de solo estudadas (0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m).

Tabela 4 – Modelos e parâmetros variográficos para os atributos químicos do solo entre terraços nas camadas de 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m

Atributo	Modelo	Efeito Pepita (Co)	Patamar (Co+C)	Alcance (m)	C/(Co+C) <sup>(2)</sup> (%)	CDE
0 - 0,1 m (n=100)						
PH	Exponencial	0,004	0,04	2,9	90,0	Forte
CE	Gaussiano	0,03	0,09	23,3	60,0	Média
NT	-	-	-	-	-	-
P	Esférico	34,9	178,8	7,7	80,5	Forte
Na	Esférico	0,01	0,02	18,6	50,8	Média
K	Esférico	0,0	0,01	2,0	99,9	Forte
Ca	Exponencial	5,4	10,7	13,0	50,0	Média
Mg	Exponencial	0,1	0,8	7,3	85,6	Forte
(H +Al)	Esférico	0,2	1,2	9,1	83,8	Média
COT	Esférico	0,5	11,7	3,8	95,7	Forte
SB	-	-	-	-	-	-
CTC	Exponencial	5,6	16,2	8,1	65,7	Média
V	Exponencial	7,8	23,0	7,4	66,0	Média
PST	Esférico	0,0	0,4	2,0	99,7	Forte
0 - 0,2 m (n=100)						
PH	Exponencial	0,00	0,05	6,2	82,4	Forte
CE	Exponencial	0,002	0,005	9,1	60,3	Média
NT	Exponencial	0,01	0,04	11,5	70,1	Média
P	Exponencial	37,2	135,4	7,8	72,5	Média
Na	Exponencial	0,001	0,006	4,2	82,9	Forte
K	Exponencial	0,004	0,02	4,9	76,6	Forte
Ca	Esférico	0,4	7,3	5,1	95,0	Forte
Mg	Esférico	0,03	0,2	5,2	79,3	Forte
(H +Al)	Esférico	0,2	1,2	9,7	85,2	Forte
COT	Exponencial	0,3	5,0	4,1	93,2	Forte
SB	Esférico	3,1	14,6	6,6	79,1	Forte
CTC	Esférico	1,8	6,9	3,5	73,3	Forte
V%	Esférico	7,2	30,3	9,5	76,2	Forte
PST	-	-	-	-	-	-

<sup>(2)</sup> - Grau de dependência espacial; <sup>(3)</sup> - Classe de dependência espacial (ZIMBACK, 2001; CAMBARDELLA *et al.* 1994).

Os atributos químicos do solo apresentaram dependência espacial, com exceção do nitrogênio total e SB em superfície (0,0 – 0,1 m) e PST na camada subsuperficial (0,1 – 0,2 m). Em relação ao ajuste dos semivariogramas para os atributos químicos do solo nas duas camadas, predominou os modelos teóricos: exponencial e esféricos, ocorrendo também adequação ao modelo gaussiano (Tabela 4). Em estudos agronômicos, sobretudo em relação à planta e solo, os melhores ajustes são realizados utilizando os modelos matemáticos esférico, exponencial e gaussiano (VIEIRA, 2000). Outros autores, estudando a variabilidade dos atributos químicos do solo, também constataram melhores ajustes com esses modelos (ARTUR *et al.*, 2014; SIBALDELLI *et al.*, 2015; ZHAO *et al.*, 2009; SANTOS *et al.*, 2017).

Para os atributos nitrogênio total (NT), soma de bases (SB) e porcentagem de sódio trocável (PST), nas profundidades 0,0 – 0,1 m e 0,1 – 0,2 m, respectivamente, não foi verificada dependência espacial. Os semivariogramas não se ajustaram aos modelos teóricos, denotando aleatoriedade desses atributos na área, independente das distâncias. Esses resultados podem estar associados à malha de amostragem que pode ter sido insuficiente para quantificar estes atributos em suas respectivas profundidades. Além disso, interferências podem ocorrer tanto durante a amostragem quanto nos procedimentos de medições, condicionando para ocorrência arbitrária dessas variáveis (CAMARGO *et al.*, 2000).

Os atributos químicos do solo apresentaram média e forte dependência espacial nas duas profundidades. No entanto, essa dependência foi mais pronunciada em subsuperfície apresentando valores de grau de dependência maiores para a maioria dos atributos e classificando-os como dependência espacial forte (Tabela 4).

A forte dependência espacial em profundidade revela que os atributos químicos em profundidade estão menos sujeitos a fatores que podem influenciar sua distribuição na área, quando se compara à superfície do solo. Adicionalmente, na superfície do solo há maior influência dos fatores externos (vegetação, presença de animais, deposição de resíduos, erosão, precipitação, temperatura) que podem interferir na disposição dos atributos químicos na área (VANCAMPENHOUT *et al.*, 2006; CHRISTOPH, 2014).

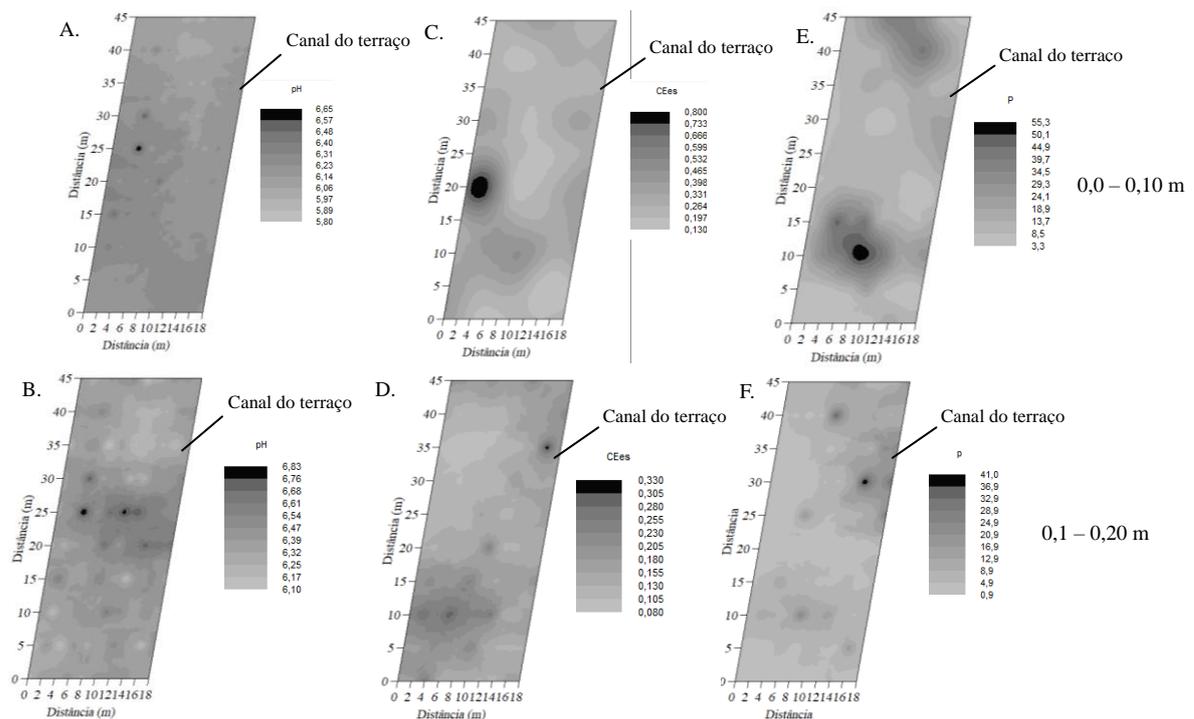
Especificamente em áreas terraceadas, Dercon *et al.* (2003) afirmam que, em alguns casos, devido à ação de processos erosivos, pode ocorrer remoção da camada superficial comprometendo a fertilidade do solo nessa camada. Nesse cenário, estratégias são necessárias com objetivo de recuperar a fertilidade do solo como a adição matéria orgânica e calagem (DERCON *et al.*, 2003), deixando-o apto ao cultivo agrícola além de evitar problemas ambientais em áreas circunvizinhas (MORGAN, 2005; LAL, 2001).

Os dados referentes aos atributos químicos do solo foram submetidos a krigagem ordinária e obtidos os mapas de variabilidade espacial dos atributos químicos (VIEIRA *et al.*, 1993; YAMAMOTO; LANDIM, 2013) nas camadas de 0,0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m.

De maneira geral, os atributos químicos do solo apresentaram maior heterogeneidade na distribuição na camada superficial, constatando-se os maiores valores para esses atributos e também formando maior número de classes (Figuras 1 a 11). Essa condição está relacionada à maior concentração de matéria orgânica em superfície, influenciado tanto no processo de alocação e fornecimento desses atributos na área.

Desse modo, analisando a distribuição espacial dos atributos pH, CEes e P, observa-se distinção no arranjo conforme a profundidade estudada. No entanto, o pH, tanto em superfície quanto subsuperfície, apresentou distribuição homogênea, com discretos valores mais altos, em profundidade, na porção central do terraço (Figuras 6A e 6B).

Figura 6- Distribuição espacial dos valores de pH e condutividade elétrica no extrato da pasta saturada (CEes -  $\text{dS m}^{-1}$ ) e teores de fósforo (P -  $\text{mg kg}^{-1}$ ) nas camadas de 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m



Fonte: Autor.

Os valores de pH encontrados na área foram classificados como de acidez baixa, sendo os valores dispostos próximos a neutralidade, estando dentro da faixa adequada para maioria das culturas (SOUZA *et al.*, 2007). Em regiões semiáridas, os elevados valores de pH são decorrentes da diversidade litológica da região, com predomínio de rochas cristalinas e sedimentares e quando associados a condições limitantes de água na região, resultam em solos

férteis com pH em torno da neutralidade (ARAÚJO FILHO, 2013; ROMERO; FERREIRA, 2016; MELO FILHO; SOUZA, 2006).

Na proximidade do terraço observa-se valores de pH menores do que aqueles observados na parte mais alta do terreno (Figura 6A) e está relacionado ao fato de, na posição superior, existir maiores teores de íons do terraço que podem está na forma de sal elevando os valores de pH. Além disso, como nessa região do terraço (próximo ao canal do terraço) ocorrem melhores condições de crescimento e desenvolvimento vegetal, o surgimento de espécies nativas, nesses locais, pode ter gerado acidez e valores de pH menores do que aqueles observados na parte superior do terraço.

A condutividade elétrica apresentou maiores valores em superfície nas proximidades do camalhão e se deve a presença dos íons nessa camada do solo (Figura 6C e 6D). Dentre os íons que constituem os sais solúveis estão o Ca, Mg e Na, na forma de cloretos, sulfatos e bicarbonatos (GHEYI *et al.*, 2017). Assim, em regiões semiáridas, devido às baixas precipitações e elevadas evapotranspiração, esses sais são acumulados nas camadas de solo. Ao considerar os limites estabelecidos por Richards (1954), neste estudo não foram constatados problemas de salinidade que poderiam causar danos ao solo e ao cultivo agrícola. Acerca disso, Klar (1988) salienta que valores de  $CE_{es}$  situados entre 0 e  $2 \text{ dS m}^{-1}$  não representam riscos potenciais aos cultivos agrícolas, no entanto, devem ser monitorados de modo a evitar problemas ao longo do tempo.

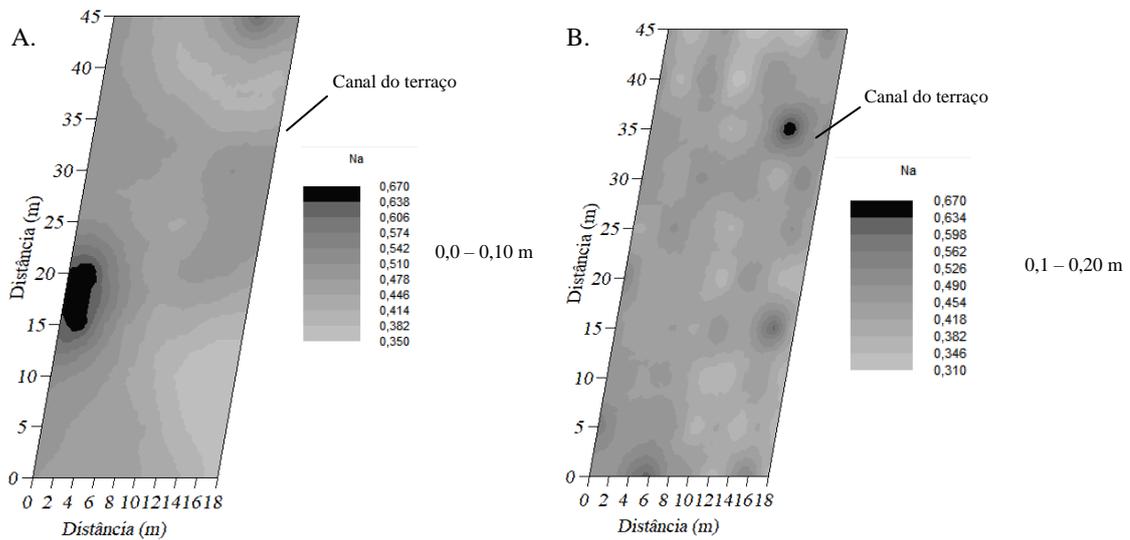
Constataram-se valores mais acentuados de fósforo na camada superficial, com concentração em alguns pontos (Figura 6E e 6F). No entanto, a maioria da área apresentou teores de P no solo situados entre 2,8 a  $14,1 \text{ mg dm}^{-3}$ , considerados como baixo e médio, respectivamente, de acordo com a classificação o estado do Ceará (UFC, 1993). Em subsuperfície, os maiores teores de P foram obtidos nas zonas próximas aos canais de terraços, entre as distâncias (20 a 35 no comprimento) e nas distâncias maiores na largura (18 m), apresentando agrupamento semelhante aos valores de argila, localizados próximos a esta porção do terreno. Como na área não foi constatada presença de alumínio e os menores valores de pH nas proximidades do canal do terraço, podem está ajudando a disponibilizar P ligado a cálcio. Raij (1981), relata que o fósforo no solo é condicionado pelo pH e tipo e quantidade de minerais existentes na argila, ocorrendo em solos neutros ou calcários, fosfato de cálcio.

Variações mais acentuadas em superfícies são decorrentes tanto da interação com os componentes vegetais (ARTUR *et al.* 2014), quanto da deposição de resíduos de animais influenciando nos altos valores de P. Nesse sentido, Liu e Zhou (2017), estudando os efeitos

de diferentes adubos em terraços no semiárido chinês, concluíram que a adição de esterco promove melhoria na fertilidade do solo bem como em suas propriedades estruturais. Mesfin et al. (2018) relatam que o terraceamento quando associado às práticas de manejo da fertilidade do solo oferece grande capacidade de tornar terras, antes, improdutivas em áreas agricultáveis com alto potencial produtivo, além de contribuir com a manejo sustentável das áreas agrícolas.

Os teores de sódio foram mais expressivos na camada superficial no terço superior da área terraceada, ao passo que na camada subsuperficial houve distribuição uniforme, praticamente em toda porção do terreno (Figura 7A e 7B).

Figura 7- Distribuição espacial de sódio ( $\text{Na} - \text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) nas camadas de 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m

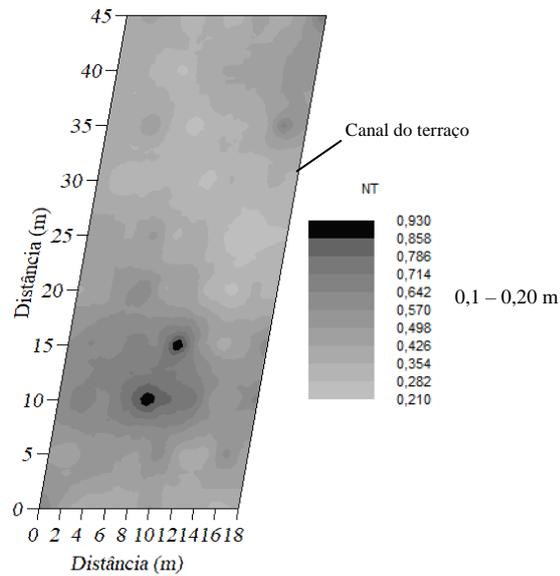


Fonte: Autor.

Os teores de sódio constatados no presente estudo foram considerados baixos, não apresentando riscos à disponibilidade de outras bases tampouco riscos de ordem física (RICHARDS, 1954; PAES *et al*, 2013), causando problemas estruturais ao solo.

O nitrogênio total na camada de 0,1 – 0,2 m apresentou distribuição bem dividida, sendo que da metade da área para a porção inicial (distâncias menores) houve maior concentração deste elemento com redução dos valores na outra seção do terreno. Na Figura 8 visualiza-se a distribuição homogênea para este atributo com ligeira redução nas extremidades dos pontos inferiores do terreno, condicionada pela redução do carbono orgânico total (COT) nesta posição do terraço.

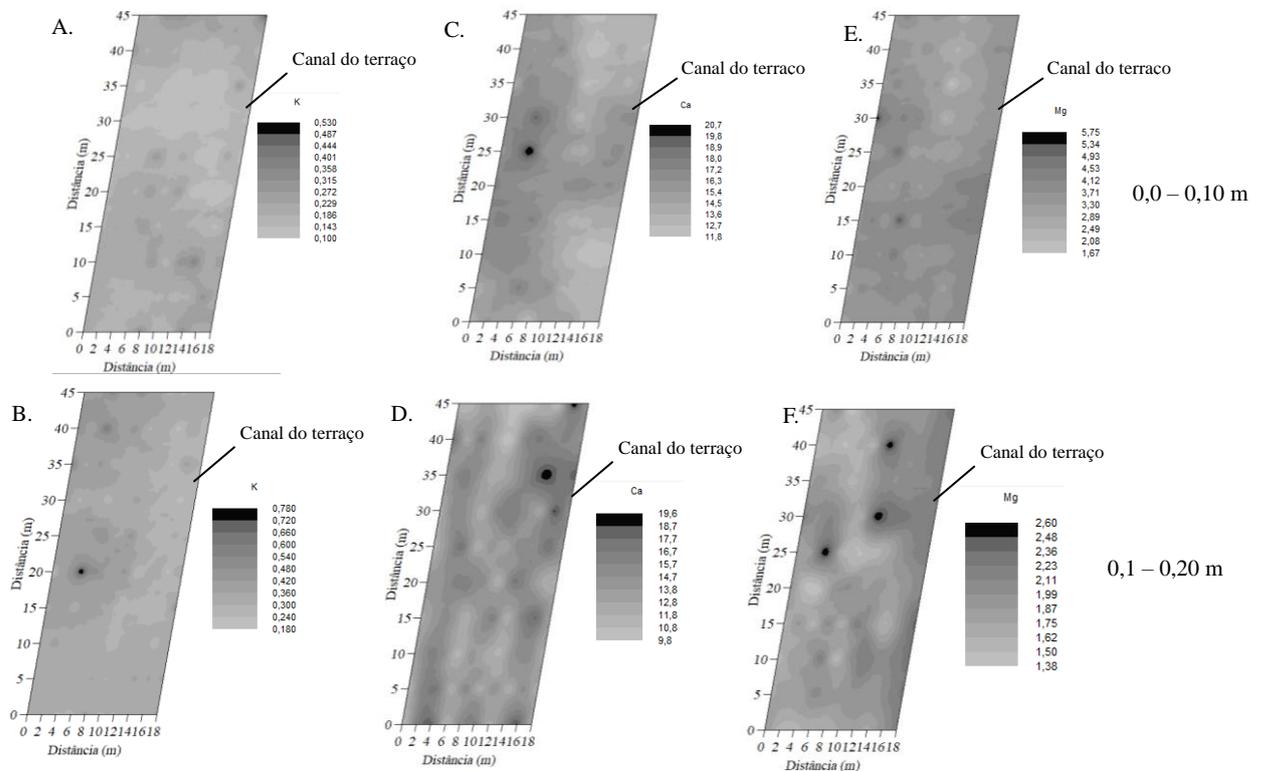
Figura 8- Distribuição espacial de Nitrogênio total (NT -  $\text{g kg}^{-1}$ ) na camada de 0,10 a 0,20 m



Fonte: Autor.

Quanto aos teores de K, Ca e Mg, observa-se que houve pouca variação em sua distribuição na área, sobretudo em superfície. Já com o aumento da profundidade, essa variabilidade foi mais expressiva (Figura 9). Cabe destacar que o K (0,1 – 0,2 m) e o Ca (0,0 – 0,1 m) apresentaram moderada redução nos valores localizados próximos ao canal do terraço (Figura 9A, 9B, 9C e 9D).

Figura 9- Distribuição espacial de potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), em  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ , nas camadas de 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m

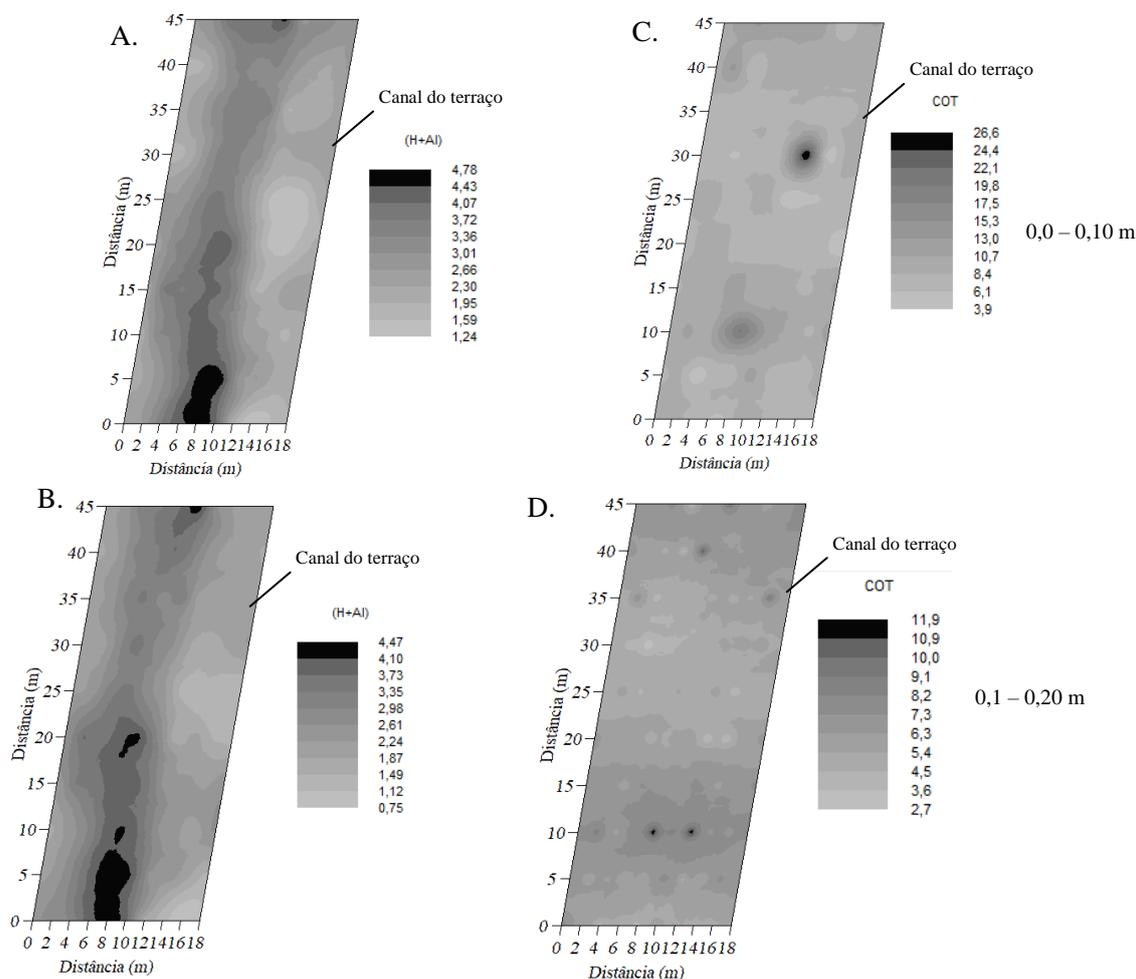


Fonte: Autor.

Os teores desses elementos estão diretamente relacionados, dentre outros fatores, com o processo de intemperismo do solo. Pedrotti *et al.* (2015) relatam que em regiões semiáridas ocorre transformação lenta devido aos longos períodos sem chuvas, mas suficiente para liberar da estrutura cristalina dos minerais parte destes cátions e contribui para a manutenção de suas concentrações em níveis relativamente elevados, tanto no complexo de troca quanto na solução do solo.

A acidez potencial exibiu resultados similares nas duas profundidades estudadas, predominando, em superfície, maiores valores de acidez potencial (Figura 10). Em ambas as profundidades, os maiores valores foram concentrados nas zonas centrais à esquerda (distâncias menores de comprimento).

Figura 10- Distribuição espacial da acidez potencial ( $H+Al - \text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) e Carbono orgânico total (COT -  $\text{g kg}^{-1}$ ) nas camadas de 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m



Fonte: Autor.

Acidez potencial mais elevada em superfície está relacionada com a matéria orgânica do solo, uma vez que o alumínio não apresentou representatividade na área. Desse modo, Cardoso (2011) em suas observações relatam que a matéria orgânica também pode contribuir substancialmente com a geração de acidez em solos tropicais. É importante salientar que a acidificação está relacionada com a perda das bases trocáveis (COSTA *et al.*, 2017) que pode ocorrer tanto pela remoção pelas raízes dos vegetais (BRADY; WEIL, 2013) quanto pela ação da água, fato que pode ser evidenciado no presente estudo. Neste trabalho, a ação da água causou remoção de partículas finas e predomínio de areia (Figura 3), nos pontos superiores dos terraços resultando em perda das bases trocáveis, ficando os íons  $H^+$  adsorvidos as partículas do solo, gerando mais acidez.

No que se refere aos teores de carbono orgânico total, embora a camada superficial (Figura 10C) tenha apresentado maiores valores, a distribuição ocorreu sem muita heterogeneidade, sendo os valores situados em torno da média (Tabela 2) com concentração

em alguns pontos específicos. Essa concentração muito provavelmente está associada à deposição de resíduos dos animais que, por vezes, transitam na área. Tal fato pode ser relacionado com os elevados valores de fósforo, que por sua vez também foram elevados nesses pontos. A matéria orgânica nesses sistemas de manejo além de contribuir com incremento de fertilidade, melhorias na qualidade física contribuem com o estoque de carbono e mitigar os efeitos do aquecimento global (LIU; ZHOU, 2017).

Resultados semelhantes também foram constatados na camada subsuperficial (Figura 10D), porém com arranjo espacial distinto. Apesar da ocorrência de valores relativamente elevados para os teores de carbono orgânico nas zonas próximas ao canal de terraço, não houve tendência de acúmulo deste elemento nesta posição do terreno, denotando distribuição consideravelmente uniforme, em termos de extensão.

Essa uniformidade pode estar fortemente relacionada com o tempo de pousio em que a área se encontra, de modo que ao logo das variações de tempo, condições climáticas podem ter contribuído com esses resultados. Lal (2016) afirma que existem também, em profundidade, interações carbono orgânico com as raízes das plantas e os microrganismos do solo, exibindo maior estabilidade nesta condição. Em estudo realizado em caatinga degradada no semiárido brasileiro, Almeida *et al.* (2017) observaram que 10 anos de pousio possibilitou reduções no escoamento, perdas de solo e carbono orgânico, contribuindo para maiores estoques de carbono em áreas de vegetação caatinga.

Em estudo realizado por Menezes *et al.* (2012), os valores médios de carbono orgânico do bioma caatinga estão próximos a  $9,3 \text{ g kg}^{-1}$ , estando acima do COT encontrado no presente trabalho para a maior parte da área. Esses resultados são justificáveis pelo fato de a área, antes da implantação dos terraços, ter sofrido preparo de solo convencional com desmatamento seguido de queimada, sem reposição da matéria orgânica. Esses fatores, quando associados a altas temperaturas e oscilações do regime pluviométrico, acabam acelerando a decomposição da matéria orgânica, podendo ainda essa ser carregada pelos processos erosivos. Ainda que, nas condições do estudo, apresentasse fragmentos de vegetação da caatinga, encontrava-se em processo de recomposição com pouco aporte de matéria orgânica sobre o solo.

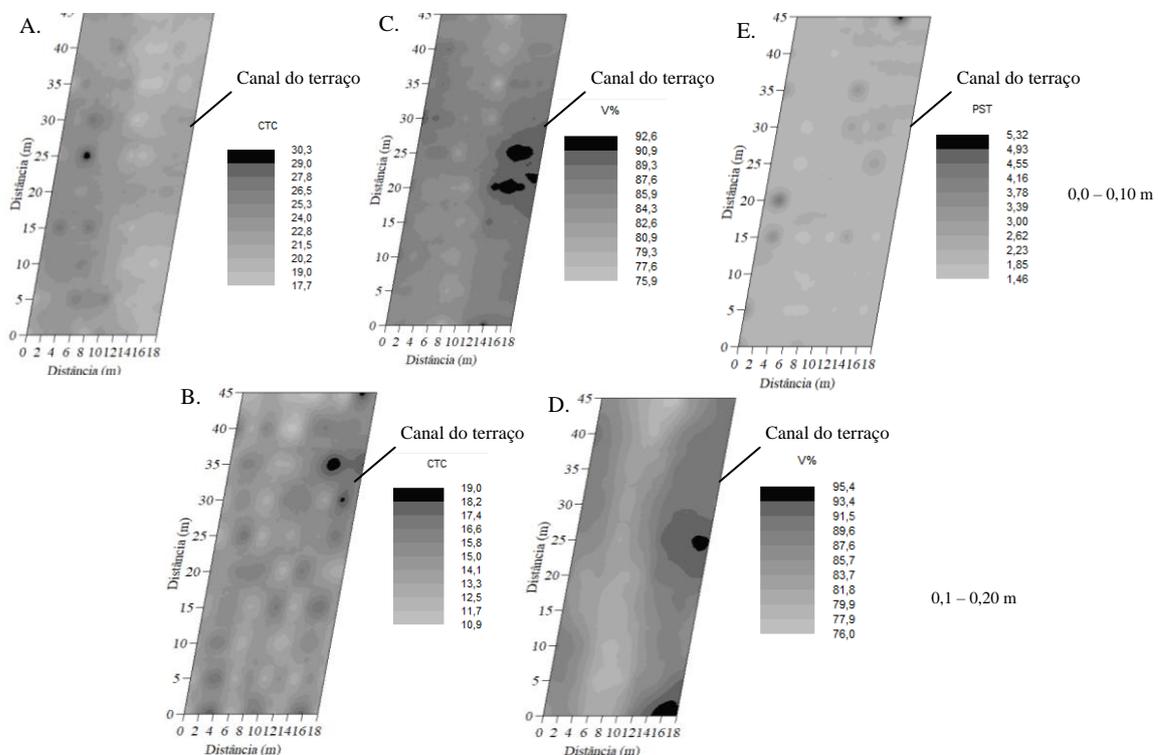
Fatores como a qualidade da matéria orgânica e interações com as partículas de solo podem influenciar processos químicos, físicos, biológicos contribuindo com a melhoria da qualidade do solo. Dick *et al.* (2008) relatam que a contribuição da matéria orgânica está condicionada não apenas pela quantidade, mas principalmente pela qualidade. Nesse contexto, apesar de não ter ocorrido tendência de concentração de carbono orgânico total nas porções mais próximas ao canal do terraço, a quantidade presente de COT pode ter interagido com as

partículas de argila nesta posição e ter influenciado, preponderantemente, para maior cimentação do solo, melhorando características estruturais do solo.

Vale salientar que a adoção da prática de terraços, além de possibilitar o cultivo agrícola (POSTHUMUS; STROOSNIJDE, 2010) em áreas susceptíveis à degradação (BERTONI; LOMBARDI NETO 2012), sobretudo pela erosão (PRUSKI *et al.*, 2009), há redução de contaminação de recursos hídricos e de suas mais variadas consequências (CHAPAGAIN; RAIZADA, 2017).

A capacidade de troca de cátions apresentou distribuição mais uniforme em superfície, situando-se da zona superior ao terraço ocupando extensões centrais mais estreitas no sentido do canal do terraço (Figura 11A). Nas extremidades desta posição, foram observados os menores valores de CTC (19 a 20  $\text{cmol}_c\text{dm}^{-3}$ ). Contrariamente, na camada subsuperficial (Figura 11B) a distribuição ocorreu de maneira mais uniforme, em termos quantitativos, para este atributo, porém com maior quantidade de classes. Os maiores valores nessa camada foram verificados, coincidentemente, com os maiores valores de argila total.

Figura 11- Distribuição espacial da capacidade de troca de cátions (CTC -  $\text{cmol}_c\text{dm}^{-3}$ ), saturação por bases (V%) e porcentagem de sódio na CTC (PST - %) nas camadas de 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m



Fonte: Autor.

Para V% observou-se maiores concentrações nos pontos mais próximos ao canal do terraço (distâncias entre 14 a 18 m na largura) (Figura 11C, 11D). Na camada 0,0 – 0,1 m ocorreram maiores valores de V%, no entanto apresentaram a mesma tendência de distribuição da camada subsuperficial do solo. Em termos médios, os valores de V% foram considerados como muito bom (RIBEIRO *et al.*, 1999). Contudo, esses valores foram mais pronunciados nas posições próximas ao canal do terraço e quando associados aos teores de argila (Figura 3E e 3F) também nessa posição, possibilitam maior produtividade e resiliência às condições de ausência de água por curtos períodos de tempo, observação bastante comum entre os agricultores que cultivam nessas áreas.

Para PST houve distribuição superficial mais homogênea, ainda que tenha apresentado valores acima da média para PST, essa distribuição ocorreu de forma isolada (Figura 11E). Apesar disso, os valores obtidos de PST não representaram riscos de sodicidade, conforme classificação estabelecida por Richards (1954). A PST pode interferir diretamente na estrutura do solo, principalmente na porosidade, dificultando a infiltração de água no solo, deixando o solo mais susceptível à erosão (PAES *et al.*, 2013). Nesse contexto, os resultados deste estudo são satisfatórios, tanto do ponto de vista de fertilidade do solo quanto da conservação do solo e da água.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados dos atributos físicos (teores de argila e grau de flocculação) e químicos (saturação por bases (V%) e fósforo), permitem aceitar a hipótese de maiores teores de partículas finas e disponibilidade de nutrientes localizados nas proximidades do canal de terraço, melhorando os atributos de fertilidade e qualidade do solo.

A disposição de matéria orgânica ocorre de forma aleatória na área entre os terraços, rejeitando-se a hipótese de maiores valores encontrados à medida que se aproxima do canal do terraço.

A variabilidade espacial dos atributos físicos (frações granulométricas) e químicos, com destaque para acidez potencial (H+Al), constatada pelo uso da geoestatística na área entre terraços, evidencia a importância do manejo direcionado, de modo a garantir a qualidade do solo e dos cultivos agrícolas em áreas terraceadas no semiárido.

## REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. N. Sertões e sertanejos: uma geografia humana sofrida. **Estudos Avançados**, v.13, p. 7-59, 1999.
- ALMEIDA, C. L.; ARAÚJO, J. C.; COSTA, M. C. G.; ALMEIDA, A. M. M. ANDRADE MAIA, E. Fallow Reduces Soil Losses and Increases Carbon Stock in Caatinga. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. 1-10, 2017.
- ALVAREZ, C.; ALVAREZ, C. R.; COSTANTINI, A.; BASANTA, M. Carbon and nitrogen sequestration in soils under different management in the semi-arid Pampa (Argentina). **Soil and Tillage Research**, v.142, p. 25- 31, 2014.
- ANDRADE, A. G.; FREITAS, P. L.; LANDERS, J. Aspectos gerais do manejo e conservação do solo e da água e as mudanças ambientais. In: PRADO, R. B.; TURETTA, A. P. D.; ANDRADE, A. G. (org). **Manejo e conservação de água no contexto das mudanças ambientais**. Rio de Janeiro: EMBRAPA. Solos. 2010. p. 1-23.
- ANDRADE, M. E. O Semiárido cearense e suas águas. In: ANDRADE, E. M.; PEREIRA, O. J.; DANTAS, F. E. R. (org.). **SEMIÁRIDO e o manejo dos recursos naturais: uma proposta de uso adequado do capital natural**. Fortaleza: Expressão gráfica e Editora, 2016. p. 55 – 62.
- ANUNCIATO MOTA, J. C.; ALENCAR, T. L.; ASSIS JÚNIOR, R. N. Alterações Físicas de um Cambissolo Cultivado com Bananeira Irrigada Na Chapada Do Apodi, Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p.1015-1024, 2015.
- ARAÚJO FILHO, J. A. **Manejo pastoril sustentável da caatinga** Recife, PE: Projeto Dom Helder Camara, 2013. 200 p.
- ARTUR, A. G.; OLIVEIRA, D. P.; COSTA, M. C. G.; ROMERO, R. E.; SILVA, M. V. C.; FERREIRA, T. O. Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, associada ao microrrelevo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, p.141–149, 2014.
- ASSUMPÇÃO, R. A. B.; URIBE-OPAZO, M. A.; GODOY, E.; JOHANN, J. A. Uso da krigagem indicatriz na avaliação da probabilidade da produtividade de soja segundo os padrões regional, estadual e nacional. **Acta Scientiarum: Agronomy**, vol. 29, p.165-171,

2007.

AZAMBUJA, A. V.; ROSA JUNIOR E. J.; ROSA, Y. B. C. J.; SERRA, A. P.; ROSA, C. B. C. J.; COTRIM, C. R. Influência da irrigação e culturas antecessoras em características físicas de um Latossolo Vermelho Distroférico e na cultura da soja. **Revista de Ciências Exatas e da Terra**, v. 1, p. 9-20, 2012.

BASGA, S. D.; TSOZUE, D.; TEMGA, J. P.; BALNA, J.; NGUETNKAM, J. P. Land use impact on clay dispersion/flocculation in irrigated and flooded vertisols from Northern Cameroon. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 6, p. 237 – 244, 2018.

BENITES, J. R.; SAINTRAIN, D.; MORIMOTO, K. **Degradación de suelos y producción agrícola en Argentina, Bolivia, Brasil, Chile y Paraguay**. FAO (1993) (<http://www.fao.org/docrep/t2351s/t2351s00.htm> (accessed August 2014)) *apud* CORREA, S W.; MELLO, C. R.; CHOU, S. C.; CURI, N. NORTON, L. D. Soil erosion risk associated with climate change at Mantaro River basin, Peruvian Andes. **Catena**. v. 147, p. 110 - 134, 2016.

BERTONI, J. ; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. São Paulo. Ícone. 2008. 355 p.

BERTONI, J. O espaçamento dos terraços em culturas anuais, determinado em função das perdas por erosão. **Bragantia**, v. 18, p. 113-140, 1959.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. 8ª ed. São Paulo: Icone, 2012, 355p.

BOHLING, G. **Introduction to geostatistics and variogram analysis**. Kansas Geological Surve, 2005. 20f. Disponível em:<http://people.ku.edu/~gbohlining/cpe940/Variograms.pdf>.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. Cap. 14. Erosão do solo e seu controle. p. 551-590.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Nova delimitação do Semiárido brasileiro**. Brasília, DF, 2005. 32 p.

BRONICK, C. J; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, p.3 – 22, 2005.

BUKAK, D. L.; PASSOS, R. B.; ANDRADE, F. V. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob cafeeiro Conilon: relação com textura, matéria orgânica e relevo. **Bragantia**, v. 71, p. 538-547, 2012.

BUSARI, M. A.; KUKAL, S. S.; KAUR, A.; BHAT, R.; DULAZI, A. A. Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment. **International Soil and Water Conservation Research**. v. 2, p. 119 - 129, 2015.

CAMARGO, E.C.G. Geoestatística: fundamentos e aplicações. In: CÂMARA, G. & MEDEIROS, J.S. (eds). **Geoprocessamento para projetos ambientais**. São José dos Campos: INPE, 1998. Disponível em: <[http:// ww.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis\\_ambiente/5geoest.pdf](http://ww.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/5geoest.pdf)>. Acesso em: 10 SETEMBRO de 2017.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of American Journal**, v. 58, p. 1501-1511, 1994.

CAON, D. **Espacialização e mapeamento da fertilidade em diferentes camadas do solo e densidades amostrais**. Guarapuava: Unicentro, 2012. 56f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Agronomia) Universidade Estadual do centro Oeste, Guarapuava, 2012.

CARDOSO, E. L. Qualidade química e física do solo sob vegetação arbórea nativa e pastagens no Pantanal Sul-Mato-Grossense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p.613-622, 2011.

CARVALHO, A. E. M.; LIMA, L. A.; OLIVEIRA, L. S.; COSTA, M. C. G. Diagnóstico do uso e conservação do solo em região de reforma agrária no semiárido. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.12, p. 568-573, 2017.

CARVALHO, J. O. Environment and population in the semiarid Northeast. In: Hogan D. J, Berquó E, Costa H. S. M. (ed.). **Population and environment in Brazil: Rio+10**. CNPD (National Population and Development Commission of Brazil), Campinas, 2002. p. 77–124.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PADANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num latossolo roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p.527-538, 1998.

CAVALCANTE, E. G. S.; ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 237-243, 2011.

CAVALCANTE, E. G. S.; ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1329-1339, 2007.

CESANO, D.; BURNEY, J. .; RUSSELL, J.; ROVERE, E. LA.; OBERMAIER, M.; CORRAL, T.; NEVES, C. Mudanças climáticas no semiárido da Bahia e estratégias de adaptação da coalizão Adapta Sertão para a agricultura familiar. **Inclusão Social**, v. 6, p. 88–104, 2012.

CHAPAGAIN, T.; RAIZADA, M. Agronomic Challenges and Opportunities for Smallholder Terrace Agriculture in Developing Countries. **Frontiers in Plant Science**, v.8, p. 1-15, 2017.

CHRISTOPH, S. **Spatial and temporal impacts of stone bunds on soil physical properties: a case study in the northern Ethiopian highlands**. 2014. 149f. Thesis (Master) - University of Natural Resources and Life Sciences. Vienna, 2014.

CORÁ, J. E.; ARAUJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.6, p.1013-1021, 2004.

CORREIA, R. C.; KIILL, L. H. P.; MOURA, M. S. B. de; CUNHA, T. J. F.; JESUS JUNIOR, L. A. de; ARAUJO, J. L. P. **A região semiárida brasileira**. In: VOLTOLINI, T. V. (Ed.). Produção de caprinos e ovinos no Semiárido. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2011. cap. 1, p. 21-48.

COSTA, M. C. G.; TONINI, H.; MENDES FILHO, P. Atributos do Solo Relacionados com a Produção da Castanheira-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*). **Floresta e Ambiente**, v.24, p.1-10, 2017.

CRESSIE, N. A. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley, 1991. 900p.

CUI, B.; ZHAO, H.; LI, X.; ZHANG, K.; REN, H.; BAI, J. Temporal and spatial distributions of soil nutrients in Hani terraced paddy fields, Southwestern China. **Procedia Environmental**

**Sciences**. v.2, p.1032–1042, 2010.

CUNHA, T. J. F.; GIONGO, V.SILVA, D. J.; MENDES, A. M. S.; MELO, R. F.; OLIVEIRA NETO, M. B.; SILVA, M. S. L.; ALVAREZ, I. A. Principais solos do semiárido tropical brasileiro: caracterização, potencialidades, limitações, fertilidade e manejo. In: SA, I. B.; SILVA, P. C. G. **Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação**. Petrolina, PE: Embrapa Semiárido, 2010. p. 49-87.

CZYZ, E. A.; DEXTER, A. R. Mechanical dispersion of clay from soil into water: Readily-dispersed and spontaneously-dispersed clay. **International Agrophysics**, v.29, pg 31 – 37, 2015.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob Sistema Plantio Direto. **Revista Ciência Agronômica**, v.43, p. 453-461, 2012.

DAMENE, S.; TAMENE, L.; VLEK, P. L. G. Performance of Farmland Terraces in Maintaining Soil Fertility: A Case of Lake Maybar Watershed in Wello, Northern Highlands of Ethiopia. **Journal of Life Sciences**, v.6, p.1251-1261, 2012.

DERCON, G.; DECKERS, J.; GOVERS, G.; POESEN, J.; SÁNCHEZ, H.; VANEGAS, R.; RAMÍREZ, M.; LOAIZA, G. Spatial variability in soil properties on slow-forming terraces in the Andes region of Ecuador. **Soil & Tillage Research**, v.72 p.31–41, 2003.

DICK, D.P.; SILVA, L.B.; INDA, A.V.; KNICKER, H. Estudo comparativo da matéria orgânica de diferentes classes de solos de altitude do Sul do Brasil por técnicas convencionais e espectroscópicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2289-2296, 2008.

DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. (Org.). **Manual de métodos de análise de solos**. 2.ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p. (Embrapa Solos. Documentos, 132).

DORREN, L.; REY, F. A review of the effect of terracing on erosion. C. Boix-Fayons, A. Imeson (Eds.), **Briefing papers of the 2nd SCAPE workshop**. Cinque Terre, Italy, P.97–108, 2004. Disponível em < [http://www.ecorisq.org/docs/Dorren\\_Rey.pdf](http://www.ecorisq.org/docs/Dorren_Rey.pdf) > Acessado em 24 de novembro de 2016.

DUMANSKI, J. Evolving concepts and opportunities in soil conservation. **International Soil and Water Conservation Research**. v.3, p. 1–14, 2015.

EMBRAPA SOLOS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília-DF, 2013, 3 ed. 353p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 2ª edição, 1997. 212p.

FAO and ITPS. **Status of The World's Soil Resources (SWSR) – Main Report**. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy, 2015.

FAO. 1987. **Soil and water conservation in semi-arid areas**. N.W. Hudson. Boletines de suelos de la FAO No. 57. FAO, Roma. 172 p.

FERRAZ, G. A. S.; SILVA, F. M.; OLIVEIRA, M. S.; AVELAR, R. C.; SALES, R. S. Variabilidade espacial da dose de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O para adubação diferenciada e convencional em lavoura cafeeira. **Coffee Science**, Lavras, v.10, p.346 - 356, 2015.

FERREIRA, V.; PANAGOPOULOS, T.; ANDRADE, R.; GUERREIRO, C.; LOURES, L. Spatial variability of soil properties and soil erodibility in the Alqueva reservoir watershed. **Solid Earth**, v.6, p.383–392, 2015

GALINDO, I. C. L.; RIBEIRO, M. R.; SANTOS, M. F. A. V.; LIMA, J. F. W. F.; FERREIRA, R. F. A. L. Relações Solo-Vegetação em Áreas Sob Processo de Desertificação no Município de Jataúba, PE. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1283-1296, 2008.

GEE, G. W.; BAUDER, J. C. 1986. Particle-size analysis. In: Klute, A. (Ed). **Methods of soil analysis**, I. Physical and mineralogical methods. Madison. American Society of Agronomy, cap. 15, p. 383 -411.

GHEYI, H. R.; DIAS, N. S. DA.; LACERDA, C. F. DE; GOMES FILHO, E. **Manejo da salinidade na agricultura**: Estudos básicos e aplicados. 2.ed. Fortaleza: INCT Sal, 2016. 506p.

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P. de; VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada a agricultura de

precisão. In: BERNARDI, A. C. de C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L.H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). **Agricultura de precisão**: resultados de um novo olhar. Brasília: Embrapa, 2014. p.74-83.

GRIEBELER, N. P.; CARVALHO, D. F.; MATOS, A. T. Estimativa do custo de implantação de sistema de terraceamento, utilizando-se o sistema de informações geográficas. Estudo de caso: Bacia do rio Caxangá, PR. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, p.299-303, 2000.

GU, H.; JIAO, Y.; LIANG, L. Strengthening the socio-ecological resilience of forest-dependent communities The case of the Hani Rice Terraces in Yunnan, China. **Forest Policy and Economics**. v.22, p. 53–59, 2012.

GUEDES FILHO, O.; VIEIRA, S. R.; SIQUEIRA, G. M.; CHIBA, M. K. Spatial Variability Of The Granulometric Fractions And Of A Sandy Soil Chemical Attributes Under A No-Tillage System. **Journal of Geospatial Modelling**, v.2, p. 67-77, 2016.

GUIMARÃES, W. D.; JUNIOR, J. P.; MARQUES, SANTOS, N. T.; FERNANDES, R. B. A. Variabilidade espacial de atributos físicos de solos ocupados por pastagens. **Revista Ciência Agronômica**, v.47, p. 247-255, 2016.

HAMMAD, A. H. A.; BØRRESEN, T.; HAUGEN, L. E. Effects of rain characteristics and terracing on runoff and erosion under the Mediterranean. **Soil & Tillage Research**, v.87, 39–47, 2006.

HUANG, J.; YU, H.; GUAN, X.; WANG, G.; GUO, R. Accelerated dryland expansion under climate change. **Nature Climate Change**, v.6, p.166–172, 2016.

IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Perfil Básico Municipal 2017, Canindé**. Fortaleza-CE, 18p.

JARA-ROJAS, R.; BRAVO-URETA, B. E.; ENGLER, A.; DIAS, J. An analysis of the joint adoption of water conservation and soil conservation in Central Chile. **Land Use Policy**, v. 32, p. 292–301, 2013.

JIANG, Y.; LI, S.; CHEN, W.; CAI, D.; LIU, Y. The evolution of crop cultivation and paleoenvironment in the Longji Terraces, southern China: Organic geochemical evidence

from paleosols. **Journal of Environmental Management**, v.15, p.1 – 8, 2016.

KAGABO, D. M.; STROOSNIJDER, L.; VISSER, S. M.; MOORE, D. Soil erosion, soil fertility and crop yield on slow-forming terraces in the highlands of Buberuka, Rwanda. **Soil and Tillage Research**, v.128, p.23–29, 2013.

KAMPEN, J., BURFORD, J. R. Production systems, soil related constraints and potentials in the semi-arid tropics with special reference to India. In: **Priorities for Alleviating Soil Related Constraints to Food Production in the Tropics**. Los Banos, Laguna, Philippines, IIRI, 1980. p.141-165.

KLAR, A.E. A água no sistema solo–planta–atmosfera. 2.ed. São Paulo: Nobel, 1988. 408p.

KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand. **Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa**, v.52, p.151-163, 1951.

LAL, R. Soil health and carbon management. **Food and Energy Security**, v.5, p.212-222, 2016.

LANDIM, P. M. B. Sobre geoestatística e mapas. **Terra e Didática**, v.2, p.19-33, 2006.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 216p.

LI, Y.; LINDSTROM, M. J. Evaluating Soil Quality–Soil Redistribution Relationship on Terraces and Steep Hillslope. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p. 1500 – 1508, 2001.

LIU, C.; ZHOU, L. M. Soil organic carbon sequestration and fertility response to newly-built terraces with organic manure and mineral fertilizer in a semi-arid environment. **Soil & Tillage Research**, v.172, p. 39–47, 2017.

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 Semi-Árido Cearense. **Revista Árvore**, v.30, p.837-848, 2006.

MATALLO, H. A. desertificação no mundo e no Brasil. In: SCHENKEL, C. S.; MATALLO,

H. (org.). **Desertificação**. Brasília: UNESCO, 2003. p. 9-25.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, v. 58, p.1246–1266, 1963.

MELO FILHO, J. F.; SOUZA, A. L. V. O manejo e a conservação do solo do semi-árido baiano: desafios para sustentabilidade. **Revista Bahia Agrícola**, v. 07, p. 50-60, 2006.

MENEZES, R. S. C.; SAMPAIO, E. V. S. B.; GIONGO, V.; PÉREZ-MARIN, A. M. Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the Caatinga Biome. **Brazilian Journal of Biology**, v.72, p.643-653, 2012.

MESFIN, S.; TAYE, G.; DESTA, Y.; SIBHATU, B.; MURUTS, H.; MOHAMMEDBRHAN, M. Short-term effects of bench terraces on selected soil physical and chemical properties: landscape improvement for hillside farming in semi-arid areas of northern Ethiopia. **Environmental Earth Sciences**, v.77, p. 1-14, 2018.

MONTANARI, R.; LIMA, E., S.; LOVERA, L. H.; FERRARI, S., QUEIROZ, H., A. Correlação dos componentes vegetativos da cultura da pupunha e dos atributos químicos do solo. **Revista de Agricultura Neotropical**, v.3, p.25-33, 2016.

MOREAU, A. M. S. S.; KER, J. C.; COSTA, L. M.; GOMES, F. H. Caracterização de Solos de duas Toposseqüências em Tabuleiros Costeiros do Sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p.1007-1019, 2006.

MORGAN, R.P.C. **Soil erosion and conservation**. Blackwell Publishing, Inglaterra, 3.ed., 2005, 304p.

NASCIMENTO, C. D. V.; COSTA, M. C. G.; TOMA, R. S.; COOPER, M. Plant Components of Agroforestry System Have Different Contributions to Soil Fertility. **Journal of Agricultural Science**, v.10, n.4, 2018.

NI, S. J.; ZHANG, J. H. Variation of chemical properties as affected by soil erosion on hillslopes and terraces. **European Journal of Soil Science**, v.58, p.1285-1292, 2007.

OLIVEIRA, J. B. (Elab.) **Práticas inovadoras de controle edáfico e hidroambiental para o semiárido do Ceará**. Fortaleza: Secretaria de Recursos Hídricos, 2010. 190p.

OLIVEIRA, T. H.; GALVÍNCIO, J. D. Uso e cobertura do solo em áreas semiáridas do

nordeste do Brasil. **Revista de Geografia**, Recife, v. 28, 2011.

OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. **Catena**, v.113, p.56-69, 2014.

OLLOBARREN, P.; CAPRA, A.; GELSOMINO, A.; SPADA, C. L. Effects of ephemeral gully erosion on soil degradation in a cultivated área in Sicily (Italy). **Catena**. v. 145, p. 334 – 345, 2016.

ÖZGÖZ, E.; GÜNAL, H.; ÖNEN, BAYRAN, M.; ACİR, N. Effect of management on spatial and temporal distribution of soil physical properties. **Journal of Agricultural Sciences**, v.18, p. 77 – 91, 2012.

PAES, J. L. A.; RUIZ, H. A.; FERNANDES, R. B. A.; FREIRE, M. B. G. S.; BARROS, M. F. C. ROCHA, G. C. Dispersão de argilas em solos afetados por sais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, p.1135–1142, 2013.

PEDROTTI, A.; CHAGAS, R. M.; RAMOS, V. C.; PRATA, A. P. N.; LUCAS, A. A. T.; SANTOS, P. B. Causas e consequências do processo de salinização dos solos. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v.19, 2015.

PENMAN, H. L. The Physical Bases of irrigation Control, in **Report 13° Congresso internacional de Horticultura**, 11 p., Royal Horticultural Society, Lodon, 1953.

PEREIRA, R. A.; NETO, J. D. Estudo exploratório de solos e sistematização de unidades geoambientais em bacia hidrográfica no Semiárido brasileiro. **Boletim de Geografia**, Maringá, v. 32, p. 1-20, 2014.

PORTELA, J. C. Práticas Conservacionista do Solo e da Água. P.143 – 176. In: TOFANELLI, M. B. D. & SILVA, T. O. (ed.) **Manejo Ecológico e Conservação dos Solos e da Água no Estado de Sergipe**. São Cristovão, UFS, 2011. p. 143 – 176.

POSTHUMUS, H. & STROOSNIJDER, L. To terrace or not: the short-term impact of bench terraces on soil properties and crop response in the Peruvian Andes. **Environment, Development and Sustainability**, v.12 p.263–276, 2010.

PRĂVĂLIE, R. Drylands extent and environmental issues. A global approach. **Earth-Science Reviews**, v.161, p. 259 - 278, 2016.

PRUSKI, F. F.; GRIEBELER, N. P.; SILVA, OLIVEIRA, J. R. S. Práticas Mecânicas Para O Controle Da Erosão Hídrica Em Áreas Agrícolas. In: **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. PRUSKI, F. F. (editor) – 2 ed. Atualizada e ampliada. Viçosa, UFV, 2009. p.132-165.

RAHMATI, O.; TAHMASEBPOUR, N.; HAGHIZADEH, A.; POURGHASEMI, H. R.; FEIZIZADEH, B. Evaluating the influence of geo-environmental factors on gully erosion in a semi-arid region of Iran: An integrated framework. **Science of the Total Environment**. v. 579, p. 913 – 927, 2017.

RAIJ, B. V. **Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba: Instituto da Potassa/Instituto Internacional de Potassa. 1981, 142p.

RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; VICENTE, V.H.A. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Lavras, 1999. 359p.

RIBEIRO, L. S.; OLIVEIRA, I. R.; DANTAS, J. S.; SILVA, C. V.; SILVA, G. B.; AZEVEDO, J. R. Variabilidade espacial de atributos físicos de solo coeso sob sistemas de manejo convencional e de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.51, p.1699-1702, 2016.

RICHARDS, L. A. 1954. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington D.C., U.S. Salinity Laboratory. 160p. (USDA Agriculture Handbook, 60).

ROMERO, R. E.; FERREIRA, T. O. Morfologia e classificação dos solos predominantes no semiárido cearense. In: ANDRADE, E. M.; PEREIRA, O. J.; DANTAS, F. E. R. (org.). **SEMIÁRIDO e o manejo dos recursos naturais: uma proposta de uso adequado do capital natural**. Fortaleza: Expressão gráfica e Editora, 2016. p. 45 – 54.

ROBERTSON, G.P. **GS<sup>+</sup>** : geostatistics for the environmental sciences. Plainwell: Gamma Design Software, 2008.

ROSEMARY, F.; VITHARANA, U. W. A.; INDRARATNE, S. P.; WEERASOORIYA, R.; MISHRA, U. Exploring the spatial variability of soil properties in an Alfisol soil catena. **Catena**, v.150, 53–61, 2017.

SALDAÑA, A.; STEIN, A.; ZINCK, J. A. Spatial variability of soil properties at diferente

scales within three terraces of the Henares River. **Catena**, v.33, p.139–153, 1998.

SANA, R. S.; ANGHINONI, I.; BRANDÃO, Z. N.; HOLZCHUH, M. J. Variabilidade espacial de atributos físico-químicos do solo e seus efeitos na produtividade do algodoeiro. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.18, p. 994 – 1002, 2014.

SANTOS, R. O.; FRANCO, L. B.; SILVA, S. A.; SODRÉ, G. A.; MENEZES, A. A. Spatial variability of soil fertility and its relation with cocoa yield. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, p.88-93, 2017.

SIBALDELLI, R. N. B.; CARVALHO, J. F. C.; OLIVEIRA, M. C. N. Uso de geoestatística no estudo da variabilidade espacial da capacidade de troca de cátions do solo. **Global Science Technology**, Rio Verde, v.8, p.141 – 156, 2015.

SILVA, J. R. C.; SILVA, F. J. Eficiência de cordões de pedra em contorno na retenção de sedimentos e melhoramento de propriedades de um solo litólico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.22, p. 441- 446, 1997.

SILVA, R. M. ; SANTOS, C. A. G.; Análise das perdas de água e solo em um vertissolo cromado sob diferentes sistemas de manejo. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 32, p. 93-107, 2012.

SOUZA, D. M. G.; MIRANDA, L. N. OLIVEIRA, S. A. ACIDEZ DO SOLO E SUA CORREÇÃO. In. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. C.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. 5, p. 206-274.

SRH-CE/FUNCEME. **Avaliação geoambiental de práticas conservacionistas implantadas na microbacia do rio Cangati, Canindé-CE**. Fortaleza: Secretaria dos Recursos Hídricos do Ceará/FUNCEME, 2010.

THORNTHWAITE, C. W. **Atlas of Climatic Types in the United States**. Miscell Publ. N. 421, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 1941.

TU, C.; LI, F. Responses of greenhouse gas fluxes to experimental warming in wheat season under conventional tillage and no-tillage field. **Journal of Environmental Sciences**, v. 54, p.

314 – 327, 2017.

UFC - Universidade Federal do Ceará. **Recomendações de adubação e calagem para o estado do Ceará**. Fortaleza: UFC, 1993. 247p.

UNESCO. **Map of the World distribution of arid regions**, Paris, 1979. 54p.

VAEZI, A. R.; ESLAMI, S. F.; KEESSTRA, S. Interrill erodibility in relation to aggregate size class in a semi-arid soil under simulated rainfalls. **Catena**, v. 167, p. 385 – 398, 2018.

VANCAMPENHOUT, K.; NYSSSEN, J.; GEBREMICHAELB, D.; DECKERS, J.; POESEN, J.; HAILE, M.; MOEYERSONSE, J. Stone bunds for soil conservation in the northern Ethiopian highlands: Impacts on soil fertility and crop yield. **Soil and Tillage Research**, v.90, p.1–15, 2006.

VÁSQUEZ-MÉNDEZ, R.; VENTURA-RAMOS E.; OLESCHKO K.; HERNÁNDEZ-SANDOVAL L.; DOMÍNGUEZ-CORTÁZAR, M. A.; **Soil erosion processes in semiarid areas: the importance of native vegetation**. 2011. Disponível em <<http://cdn.intechweb.org/pdfs/23109.pdf>> Acesso em 06 de novembro de 2016.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVARES, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000.

Warrick, A. W.; Nielsen, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D. (ed). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. 385p.

XU, M.; LI, Q.; WILSON, G. Degradation of soil physicochemical quality by ephemeral gully erosion on sloping cropland of the hilly Loess Plateau, China. **Soil & Tillage Research**, v. 155, p. 9 – 18, 2016.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: Conceitos e Aplicações**. Oficina de Textos São Paulo, 2013. 215p.

YAN, Y.; WU, L.; XIN, X.; WANG, X.; YANG, G. How rain-formed soil crust affects wind erosion in a semi-arid steppe in northern China. **Geoderma**, v.249 - 250, p.79 – 86, 2015.

ZHAO, Y., XU, X., DARILEK, J. L., HUANG, B., SUN, W., SHI, X. Spatial variability

assessment of soil nutrients in an intense agricultural area, a case study of Rugao County in Yangtze River Delta Region, China. **Environmental Geology**. v.57(5), p.1089–1102, 2009.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114 f. Tese (Livre-Docência)- Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

ZOUGMORÉ, R.; JALLOH, A.; TIORO, A. Climate-smart soil water and nutrient management options in semiarid West Africa: a review of evidence and analysis of stone bunds and zaï techniques. **Agriculture & Food Security**, p.16, 2014.