



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA RURAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO



VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS EM
ARGISSOLO VERMELHO AMARELO SOB CULTIVO COM
ABACAXIZEIRO 'PÉROLA'

THIAGO DE SOUZA RIBEIRO

Areia, PB
2017

THIAGO DE SOUZA RIBEIRO

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS EM
ARGISSOLO VERMELHO AMARELO SOB CULTIVO DE
ABACAXIZEIRO ‘PÉROLA’**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para obtenção do título de “Doutor em Ciência do Solo”. Área de concentração: Solos em Agroecossistemas Familiares

Orientador: **Prof. Walter Esfrain Pereira**

Areia, PB

2017

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

R484v Ribeiro, Thiago de Souza.

Variabilidade espacial de atributos químicos em
Argissolo Vermelho Amarelo sob cultivo de abacaxizeiro
?Pérola? / Thiago de Souza Ribeiro. - Areia, Paraíba,
Brasil, 2017.

102f.

Orientação: Walter E Pereira.

Tese (Doutorado) - UFPB/CCA.

1. Geoestatística ; Ananas comosus; Manejo do solo. I.
Pereira, Walter E. II. Título.

UFPB/CCA-AREIA

THIAGO DE SOUZA RIBEIRO

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS EM
ARGISOLO VERMELHO AMARELO SOB O CULTIVO COM
ABACAXIZEIRO ‘PÉROLA’**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para obtenção do título de “Doutor em Ciência do Solo”. Área de concentração: Solos em Agroecossistemas Familiares

04 de agosto de 2017

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Walter Esfrain Pereira
CCA, UFPB
Orientador e Presidente da Banca

Prof. Dr. Bruno de Oliveira Dias
CCA, UFPB
Examinador interno

Prof.^a Dra. Vânia da Silva Fraga
CCA, UFPB
Examinadora interna

Prof. Dr. José Félix de Brito Neto
CCAA, UEPB
Examinador externo

Prof. Dr. José Valmir Feitosa
CCAB, UFCA
Examinador externo

DEDICATÓRIA

Agradeço a Deus todos os dias por ter me guiado em minhas decisões e dado forças para vencer os obstáculos que a vida me impôs durante este período acadêmico e por iluminar-me em momentos de dúvidas e dificuldades.

Ao meu pai, **Ricardo Aurélio de Andrade Ribeiro**, por toda atenção, dedicação, cuidado e ensinamentos que formaram a pessoa que sou hoje. A minha adorável mãe **Maria Aparecida de Souza Ribeiro**, a quem ofereço todo o meu amor, por sempre estar ao meu lado me incentivando, apoiando, oferecendo carinho e sábias palavras de conforto nos momentos mais críticos e, por suportar a dor da ausência, muito obrigado!

Ao meu querido irmão **Ricardo Aurélio de Andrade Ribeiro Júnior (Junim)**, pelo amor verdadeiro, amizade e que mesmo distante esteve sempre em meu coração.

Aos meus amados e inesquecíveis avôs, **Agenor Ribeiro** e **Paulo Barros**, e às minhas lindas avós **Maria do Carmo Ribeiro** e **Geralda Barros**, pela dedicação, atenção, amor e ensinamentos.

Aos meus tios **Gilson, Gilberto** (*in memoriam*) e **Luiz**, por todo o carinho e as tias, **Vera, Marta, Mércia, Lúcia Ribeiro** e **Socorro Andrade**, que sempre me ajudaram e estiveram ao meu lado dando forças para continuar no caminho.

Aos meus primos **Denisson e Daniele, Luciano e Lucélia, Netinho** e **Max** por sempre terem me apoiado nos momentos que mais precisei.

E a minha amada esposa **Marina Matias Ursulino** e minha linda e querida filha **Lívia Matias Ursulino Ribeiro**, que sempre terão o maior e melhor dos meus sentimentos, junto aos melhores momentos com toda a atenção guardados em meu coração.

“Nós preferimos acreditar, persistir e trabalhar muito.
Não é fácil, mas sempre possível.
Mais que isso, é gratificante vencer desafios,
encontrar saídas quando as portas estão fechadas,
cumprir metas e tornar o sonho em realidade.
Aprendemos, estamos crescendo e nos orgulhamos disso.
Sempre com humildade e nunca com arrogância”.

(Pedro Galhardi Neto)
Carpe diem.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba (CCA/UFPB), por meio da Comissão do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS), pela oportunidade de realização do curso de Doutorado;

Ao Prof. Walter Esfrain Pereira, pela orientação, paciência, críticas, sugestões e por seus ensinamentos sempre no momento oportuno, todo o apoio dado na realização da pesquisa, me auxiliando a vencer as barreiras e romper as dificuldades encontradas no decorrer do caminho.

Aos professores das disciplinas pelos ensinamentos valorosos, em especial: Ignacio Hernán Salcedo (*in memorian*), Heloísa Helena, Ivandro de França, Maria Arlene de Araújo Farias, Vânia da Silva Fraga, Bruno de Oliveira Dias aos demais que compõe o corpo docente do PPGCS. Ao Professor Dr. José Valmir Feitosa (CCAB, UFCA) e ao Prof. Dr. José Félix de Brito Neto (CCAA, UEPB) a quem agradeço por todas contribuições e pela participação na banca examinadora.

Aos funcionários do Laboratório de Análises Física e Química do Solo e Planta, Roberval e o Prof. Chico Ninha, Maely e Valdenia, Ednaldo Gerônimo, Cícero (Boy), Marielza e as secretárias Cida e Rosa Cláudia.

À Coordenação do Curso de Agronomia: secretário Arinaldo e ao coordenador Prof. Leossávio.

Aos Coordenadores do PPGCS Alexandre Paiva e Flávio Pereira.

Ao Diretor do Campus II, Prof. Manoel Bandeira.

Aos meus amigos de quarto: Severino do Ramo Nascimento dos Santos, Cosmo Rufino de Lima e João Tadeu de Lima Oliveira.

Aos amigos inesquecíveis: Abmael, Natan, O filho de seu Otto (Washington), Andinho, João Maria, os irmãos Herson e Heverson, Paulim, Kady, Jó, Daladier (boca), Nenen, Pedrinho e Sharly (*in memorian*).

Aos amigos de sempre: Severino, Tadeu, Cosmo, Renê, Luiz Leonardo, Doroteu, Cleiton, Gerlândio, Sabrina, Silvan, Edilberto, Dylamarck, Bruno Malaquias, Edson, Graça, Isaías, João Batista, Tamara, Cássio, Carlos Antônio, João Alberto, Luciano Raposo, Joel, Francisco Mesquita, Remí, Járisson, Marquinhos, Glêvia, Hallina, Micheli, Bala, Isnaldo, Jair, Paulo Assaré.

Considerando esta Tese como resultado de uma caminhada que não começou na UFPB, agradecer pode não ser tarefa fácil, nem justa. Para não correr o risco da injustiça,

agradeço de antemão a todos que de alguma forma passaram pela minha vida e contribuíram direta ou indiretamente para a concretização deste trabalho.

Aos Docentes do Departamento de Solos e Engenharia Rural, por todos os ensinamentos e contribuições durante o período de formação;

Aos meus amigos de turma do doutorado pelos bons momentos de aprendizado e descontração.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Capes, Brasil, pela bolsa de incentivo ao estudo concedido;

A todos, sem exceção, muito obrigado!!!

Importa que me glorie? Na verdade, não me convém.

Conheço um homem em Cristo, desse homem eu me gloriarei, mas de mim mesmo não me gloriarei, a não ser das minhas fraquezas. Pois ainda que me quisesse gloriar, não seria insensato, porque diria a verdade. Mas abstenho-me: para que ninguém me tenha em conta de mais do que vê em mim ou ouve dizer de mim. Demais, para que a grandeza das revelações não me levasse ao orgulho, foi-me dado um espinho na carne para me esbofetear e me livrar do perigo da vaidade. Três vezes roguei ao Senhor que o apartasse de mim. Mas ele me disse: “Basta-te a minha graça, pois é na fraqueza que se revela totalmente a minha força”. Portanto, prefiro gloriar-me das minhas fraquezas, para que habite em mim a força de Cristo. Eis porque sinto alegria nas fraquezas, nas afrontas, nas necessidades, nas perseguições, no profundo desgosto sofrido por amor de Cristo. Por que quando me sinto fraco, então é que sou forte.

(II Coríntios, cap. 12, 1-2;5-10.)

LISTA DE TABELA

Tabela 1. Estatística descritiva de atributos da fertilidade do solo em diferentes ciclos de cultivo com abacaxizeiro cv. ‘Pérola’ na profundidade de 0-20 cm (n=75).....	33
Tabela 2. Autovalores e proporção da variância explicada para cada componente dos atributos químicos cultivados com abacaxizeiro ‘Pérola’	42
Tabela 3. Autovetores de atributos químicos do solo cultivado com abacaxizeiro ‘Pérola’ em três componentes principais (CP1, CP2, CP3).....	43
Tabela 4. Estimativas dos parâmetros dos modelos dos semivariogramas ajustados para os atributos químicos do solo em área com quatro ciclos de cultivo de abacaxizeiro cv. ‘Pérola’ nas profundidades 0-20 cm.....	64
Tabela 5. Estimativas dos parâmetros dos modelos dos semivariogramas ajustados para os atributos químicos do solo em área com oito ciclos de cultivo de abacaxizeiro cv. ‘Pérola’ nas profundidades 0-20 cm.	65
Tabela 6. Resultados das validações internas e externas modelos espaciais dos atributos químicos do solo na profundidade 0-20 cm.	69

LISTA DE FIGURA

Figura 1. Exemplo de semivariograma.	11
Figura 2. Comparação dos modelos de semivariogramas.	12
Figura 3. Semivariograma demonstrativo a partir modelo matemático “wave”. $\sigma^2 =$ Variância; $d =$ distância.....	13
Figura 4. Localização da área experimental com oito ciclos de cultivo de abacaxi no município de Itapororoca, PB.	28
Figura 5. Unidade de mapeamento de solos do município de Itapororoca, PB.....	29
Figura 6. Box plot e histograma de frequência dos atributos pH (A) e P (B) para a camada de 0-20 cm de profundidade em áreas com quatro e oito ciclos de cultivos de abacaxizeiro.	38
Figura 7. Box plot e histograma de frequência dos atributos K (A) e Na (B) para a camada de 0-20 cm de profundidade em áreas com quatro e oito ciclos de cultivos de abacaxizeiro.	38
Figura 8. Box plot e histograma de frequência dos atributos Ca (A) e Mg (B) para a camada de 0-20 cm de profundidade em áreas com quatro e oito ciclos de cultivos de abacaxizeiro.	39
Figura 9. Box plot e histograma de frequência dos atributos Al (A) e H+Al (B) para a camada de 0-20 cm de profundidade em áreas com quatro e oito ciclos de cultivos de abacaxizeiro.	40
Figura 10. Box plot e histograma de frequência dos atributos MO (A) e CTC (B) para a camada de 0-20 cm de profundidade em áreas com quatro e oito ciclos de cultivos de abacaxizeiro.	41
Figura 11. Box plot e histograma de frequência dos atributos V% (A) e SB (B) para a camada de 0-20 cm de profundidade em áreas com quatro e oito ciclos de cultivos de abacaxizeiro.	41
Figura 12. Diagrama de ordenação produzido por análise de componentes principais na camada de 0-20 cm das características químicas em áreas com quatro e oito ciclos de cultivo com abacaxizeiro ‘Pérola’.	44
Figura 13. Localização da área experimental com oito ciclos de cultivo de abacaxi no município de Itapororoca, PB. Fonte: Google Earth, 2016.....	56
Figura 14. Unidade de mapeamento de solos do município de Itapororoca, PB.....	57

Figura 15. Distribuição espacial aleatória dos pontos selecionados para a validação interna (triângulo) e externa (círculos) na área com quatro e oito ciclos de abacaxizeiro.	59
Figura 16. Valores de K em função da distância (r) nas áreas com quatro e oito ciclos de cultivo com abacaxizeiro ‘Pérola’	63
Figura 17. Mapa de distribuição do pH em áreas de Abacaxizeiro com quatro (A) e oito (B) ciclos de cultivo na profundidade de 0-20 cm.	71
Figura 18. Mapa de distribuição do teor de P (mg dm^{-3}) em áreas de abacaxizeiro com quatro	72
Figura 19. Mapa de distribuição do teor de Mg ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) em áreas de abacaxizeiro com quatro (A) e oito ciclos (B) de cultivo na profundidade de 0-20 cm.	73
Figura 20. Mapa de distribuição do teor de Ca ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) em áreas de abacaxizeiro com quatro (A) e oito ciclos (B) de cultivo na profundidade de 0-20 cm.	73
Figura 21. Mapa de distribuição do atributo químico Na ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) em áreas de abacaxizeiro com quatro (A) e oito ciclos (B) de cultivo na profundidade de 0-20 cm.	74
Figura 22. Mapa de distribuição do teor de Al ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) em áreas de abacaxizeiro com quatro (A) e oito ciclos (B) de cultivo na profundidade de 0-20 cm.	75
Figura 23. Mapa de distribuição do teor de K ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) em áreas de abacaxizeiro com quatro (A) e oito ciclos (B) de cultivo na profundidade de 0-20 cm.	76
Figura 24. Mapa de distribuição teor de MO (g dm^{-3}) em áreas de abacaxizeiro com quatro (A) e oito ciclos (B) de cultivo na profundidade de 0-20 cm.	77
Figura 25. Mapa de distribuição dos atributos químicos SB ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) em áreas de abacaxizeiro com quatro (A) e oito ciclos (B) de cultivo na profundidade de 0-20 cm.	78
Figura 26. Mapa de distribuição dos atributos químicos CTC ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) em áreas de abacaxizeiro com quatro (A) e oito ciclos (B) de cultivo na profundidade de 0-20 cm.	79
Figura 27. Localização da área experimental com oito ciclos de cultivo de abacaxi no município de Itapororoca, PB. Fonte: Google Earth, 2016.....	89
Figura 28. Unidade de mapeamento de solos do município de Itapororoca, PB.....	90
Figura 29. Variogramas escalonados para os atributos químicos do solo em área com oito ciclos de cultivo com abacaxizeiro ‘Pérola’	94
Figura 30. Variograma escalonado médio dos modelos matemáticos wave + gaussiano. .	95

Figura 31. Variância de krigagem do teor de fósforo do solo em função da quantidade de amostras (n) em área com oito ciclos de cultivo com abacaxizeiro.	96
Figura 32. Variância de krigagem do pH do.....	96
Figura 33. Variância de krigagem do teor de potássio do solo em função da quantidade de amostras (n) em área com oito ciclos de cultivo com abacaxizeiro.	96
Figura 34. Variância de krigagem da capacidade de troca catiônica do solo em função da quantidade de amostras (n) em área com oito ciclos de cultivo com abacaxizeiro.	96
Figura 35. Variância de krigagem do variograma escalonado médio em função da quantidade de amostras (n) em área com oito ciclos de cultivo com abacaxizeiro.	97
Figura 36. Distribuição espacial da totalidade de locais amostrados em área com oito ciclos de cultivo com abacaxizeiro.	98
Figura 37. Distribuição espacial dos 16 locais indicados pelo método por anelamento simulado espacial para minimizar a variância de krigagem em área com oito ciclos de cultivo com abacaxizeiro.	98

SUMÁRIO

Resumo geral	xv
General abstract	xvi
1. Introdução Geral	1
2. Objetivo geral	3
3. Revisão de literatura	3
3.1. Características gerais do abacaxizeiro	3
3.2. Solos dos Tabuleiros Costeiros	5
3.3. Variabilidade espacial e o manejo do solo	6
3.4. Geoestatística	9
3.5. Amostragem espacial por anelamento simulado.....	14
4. Referência bibliográfica	18
CAPÍTULO I	23
ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM ÁREAS COM QUATRO E OITO CICLOS DE CULTIVO DO ABACAXIZEIRO ‘PÉROLA’	23
Resumo	24
Abstract	25
1. Introdução	26
2. Material e métodos	28
2.1. Localização da área experimental	28
2.2. Clima	28
2.3. Relevo e solos	29
2.4. Histórico do manejo tradicional nos pomares de abacaxi	29
2.5. Atributos químicos	30
2.6. Análise estatística	31
2.6.1. Estatística descritiva.....	31
2.6.3. Análise de componentes principais.....	32
3. Resultados e discussão	32
4. Conclusão	46
5. Referência bibliográfica	47
CAPÍTULO II	51

VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM DOIS CICLOS DE CULTIVO COM ABACAXIZEIRO ‘PÉROLA’	51
Resumo	52
Abstract	53
1. Introdução	54
2. Material e métodos	56
2.1. Localização da área experimental	56
2.2. Clima	56
2.3. Relevo e solos	57
2.4. Histórico do Manejo tradicional nos pomares de abacaxi	57
2.5. Amostragem georreferenciada	58
2.6. Atributos químicos	59
2.7. Estatística Espacial – Análise da distribuição dos padrões pontuais	60
2.7. Análises geoestatísticas	60
3. Resultados e discussão	63
3.1. pH.....	70
3.2. Fósforo (P)	71
3.3. Magnésio (Mg) e Cálcio (Ca)	72
3.4. Sódio (Na)	73
3.5. Alumínio (Al).....	74
3.6. Potássio (K)	75
3.7. Matéria orgânica (MO)	76
3.8. Soma de base (SB)	77
3.9. Capacidade de troca de cátions (CTC).....	78
5. Conclusão	79
6. Referência bibliográfica	80
CAPÍTULO III	85
ESQUEMA DE OTIMIZAÇÃO AMOSTRAL DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM ÁREA DE ABACAXIZEIRO	85
Resumo	86
Abstract	87

1. Introdução	88
2. Material e métodos	89
2.1. Localização da área experimental	89
2.2. Clima	90
2.3. Relevo e solos	90
2.4. Histórico do Manejo tradicional nos pomares de abacaxi	91
2.5. Amostragem georreferenciada	92
2.6. Atributos químicos	92
2.6. Análises dos dados	93
3. Resultados e discussão.....	94
5. Conclusão	99
6. Referência bibliográfica	100
7. Considerações Finais	102

RIBEIRO, T. S. **Variabilidade espacial de atributos químicos em Argissolo Vermelho Amarelo sob cultivo de abacaxizeiro ‘Pérola’**. Areia, Paraíba, Brasil. 2017. 102f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, Brasil.

Resumo geral

Apesar da importância da cultura do abacaxi na região dos Tabuleiros Costeiros da Paraíba, são poucas as informações sobre a avaliação da variabilidade espacial dos atributos químicos relacionados ao uso e manejo da fertilidade para esta cultura, onde predominam solos ácidos e de baixa fertilidade natural e não recebem um manejo adequado. No entanto, para se propor um manejo adequado é necessário se fazer um diagnóstico das áreas cultivadas. Nesse sentido, objetivou-se nesta pesquisa caracterizar e avaliar as relações entre os atributos químicos do solo na lavoura de abacaxi com quatro (A4) e oito (A8) ciclos da cultura no solo. As amostras deformadas de solos foram coletadas de um Argissolo Vermelho Amarelo em malha, com intervalos regulares de 10 m, totalizando 75 pontos amostrais por área de estudo na profundidade de 0-20 cm. Para a avaliação dos atributos químicos do solo foram medidos pH, P, K, Na, Ca, Mg, Al, H+Al, MO, CTC_{pH7}, SB e V%. Os dados foram submetidos a análises estatísticas descritivas seguidas de análise de componentes principais. Posteriormente foram ajustados a modelos geoestatísticos para relacionar a variabilidade e as distâncias de separação dos pontos amostrais, utilizados para interpolação por krigagem ordinária. Para obtenção de um único esquema amostral otimizado para todos os atributos químicos do solo na área com oito ciclos de cultivo foi utilizado o algoritmo anelamento simulado espacial (SSA - *Spatial Simulated Annealing*). Na área com quatro ciclos foi verificada acidez potencial média, baixo valor do pH e menores teores de matéria orgânica, soma de bases e saturação por bases do solo, revelando maior necessidade de práticas de correção do solo. Na área com oito ciclos os maiores teores de matéria orgânica do solo aliado a aplicação de fertilizantes proporcionaram maiores teores para a capacidade de troca de cátions, soma de bases, saturação por bases, carbono do solo e pH tendendo a média acidez. As formas de uso e manejo empregadas induziram a variabilidade espacial para a maioria dos atributos químicos do solo, sendo maior na área com quatro ciclos de cultivo com abacaxizeiro ‘Pérola’, evidenciando maior amplitude nos teores dos atributos. A partir de um esquema amostral inicial e com a determinação de um variograma escalonado médio foi possível determinar o número de 16 pontos a serem amostrados para minimizar a variância de krigagem na área de pesquisa.

Palavras chave: Geoestatística; Krigagem; *Ananas comosus*; Manejo do solo.

RIBEIRO, T. S. **Spatial variability of chemical attributes in yellow-red Ultisol under the cultivation of pineapple 'Pérola'**. Areia, Paraíba, Brazil. 2017. 102f. Thesis (Thesis in Soil Science). Agrarian Sciences Center of the Federal University of Paraíba, Brazil.

General abstract

Despite the importance of pineapple culture in Paraíba's coastal trays, there is little information about the evaluation of spatial variability of chemical attributes related to the use and management of fertility for this culture, where acid soils and Low natural fertility and do not receive adequate management. However, in order to propose proper management it is necessary to make a diagnosis of the cultivated areas. In this sense, it was aimed at this research to characterize and evaluate the relations between the chemical attributes of the soil in the pineapple crop with four (A4) and eight (A8) cycles of the culture in the soil. The deformed soil samples were collected from of an Ultisol in mesh, with regular intervals of 10 m, totaling 75 sampling points per study area at the depth of 0-20 cm. For the evaluation of the chemical attributes of the soil were measured PH, P, K , in, Ca, Mg, AL, H + al, MO, CTCpH7, SB and V%. The data were subjected to descriptive statistical analysis followed by the analysis of the main components. Subsequently it were adjusted to geostatistical models to relate the variability and the separation distances of the sampling points, used for interpolation by ordinary kriging. To obtain a single sampling scheme optimized for all chemical attributes of the soil in the area with eight cycles of cultivation was used the spatial simulated annealing algorithm (SSA). In the area with four cycles was verified an average potential acidity, low pH value and lower levels of organic matter, sum of bases and saturation by soil bases, revealing a greater need for soil correction practices. In the area with eight cycles the largest organic matter content of the soil allied to the application of fertilizers provided higher levels for the capacity of exchange of cations, sum of bases, saturation by bases, carbon of the soil and pH tending to average acidity. The forms of use and management employed induced spatial variability for most of the chemical attributes of the soil, being larger in the area with four cycles of cultivation with pineapple 'Pérola', showing greater amplitude in the levels of the attributes. From an initial sampling scheme and with the determination of an average scaled variograma it was possible to determine the number of 16 points to be sampled to minimize the variance of kriging in the search area.

Key words: Geostatistics; Kriging; *Ananas comosus*; Soil management.

1. Introdução Geral

A fruticultura é um dos componentes de destaque do agronegócio brasileiro, pois a partir de uma grande variedade de culturas, distribuídas em todo o país e em diversos tipos de climas, e vem conquistando resultados expressivos e gera uma série de oportunidades para os pequenos produtores (Terra, 2012).

O abacaxizeiro é a terceira frutífera tropical mais cultivada no mundo, sendo o Brasil um dos maiores produtores mundiais, com produção estimada em 1,6 bilhão de frutos numa área colhida de 105,3 mil ha⁻¹. O estado da Paraíba é um dos principais produtores, com cerca de 284 milhões de frutos numa área colhida de 15,7 mil ha (IBGE, 2017).

Na Paraíba, o cultivo do abacaxizeiro vem melhorando a economia local e alterando o panorama agrícola dessas áreas cultivadas, em que a principal cultivar utilizada no plantio é a Pérola (Souza et al., 2007). A região produtora de abacaxi está concentrada nas microrregiões litorâneas e em áreas de Tabuleiros Costeiros onde predominam solos de textura arenosa, ácidos e de baixa fertilidade natural, mas que não recebem um manejo químico adequado (Rodrigues et al., 2010; Silva et al., 2012). Dessa forma, o manejo adequado do solo para preservação dos atributos químicos são incipientes para a cultura do abacaxizeiro, por se considerar que a cultura é tolerante a solos ácidos e distróficos e que, por isso, seria pouco responsiva a melhorias químicas do solo (Correia et al., 2017).

O manejo do solo pode ser conceituado como sendo a capacidade em desempenhar suas funções, de maneira natural ou manejada para sustentar a produtividade das plantas e dos animais, manter ou melhorar a qualidade da água e do ar (Cunha et al., 2012). Esse manejo agrícola sob o aspecto químico do solo ganha relevância para as avaliações da extensão de uma degradação ou melhoria do solo, além de servir para identificar a sustentabilidade dos sistemas de manejo (Aratani et al., 2009).

Uma recorrente problemática no setor frutícola é o manejo edáfico, que envolve os diferentes tipos de cultura, as práticas culturais adotadas como: a limpa do terreno, o preparo do solo, rotações de culturas, a localização da aplicação dos fertilizantes, realização ou não de calagens e etc., essas inter-relações possibilitam uma nova condição de equilíbrio ao sistema solo, principalmente, quando este é manejado de forma homogênea, sem considerar a variabilidade espacial ocorrente numa mesma área e esta varia tanto no sentido horizontal como no vertical do solo (Silva Neto et al., 2011).

O manejo da adubação na região produtora da Mata Paraibana com base na realização de análise de solos é utilizado por apenas 25% dos que cultivam áreas até 20 ha,

sendo que 70% dos produtores possuem áreas cultivadas que variam de menos de dois hectares até 5 hectares evidenciando a agricultura familiar (Barreira Neto et al., 2013).

O cultivo do abacaxi exige uma demanda nutricional considerada alta em relação a outras culturas e depende de uma série de fatores, a exemplo os resíduos de abacaxi de cultivos anteriores, principalmente, para fatores físico-químicos, no qual dependendo da fertilidade do solo e da forma como esses resíduos são manejados, pode haver redução das doses de recomendação a partir do segundo cultivo com a cultura, além de possibilitar melhores taxas de infiltração, menores taxas de evaporação e maior volume de água armazenada no solo ao longo do ciclo do abacaxizeiro (Model, 2004a; Silva et al., 2009). Contudo, 75% dos produtores não usam adubação orgânica à base de esterco, embora 82% incorporem os restos culturais de abacaxi de cultivos anteriores ao solo (Brito Neto et al., 2008).

Na região da Mata Paraibana 83% dos produtores utilizam adubação química com macronutrientes em 2 a 3 aplicações, porém, com o uso de formulações comerciais sem a devida análise do solo, acentuando-se o diagnóstico da fertilidade do solo devido algumas características como a baixa capacidade de retenção do solo e por não caracterizar a real necessidade de reposição de nutrientes (Barreira Neto et al., 2013).

Essas variações edáficas fazem com que o sistema de amostragem varie consideravelmente, e grande parte desta, ocorre em função das inúmeras reações químicas que envolvem os elementos presentes na solução do solo, sendo assim, os atributos químicos possuem maior variação que os físicos e necessitam de uma amostragem maior para estimá-los dentro de uma mesma área (Cavalcante, et al., 2007).

O conhecimento da variação de atributos químicos é importante para o levantamento e manejo do solo, planejamento de esquemas de amostragem e gerenciamento de práticas agrícolas (Silva et al., 2010). No entanto, torna-se necessário o uso de ferramentas de geoestatística, pois a estatística clássica não permite observar a presença de dependência espacial, uma vez que ela não leva em consideração a distância na qual as amostras foram coletadas no campo (Silva Neto et al., 2011).

A geoestatística é uma ferramenta que objetiva encontrar a variabilidade e a dependência espacial dos atributos do solo como forma de detalhamento e descrição do que ocorre com as propriedades do solo (Vieira & Gregor 2005). Esta é baseada na Teoria das Variáveis Regionalizadas, em que o valor de uma determinada variável, em uma posição no campo, depende da sua localização e tem sido aplicada para determinar a variabilidade espacial e temporal dos atributos do sistema solo-planta-atmosfera, por meio do semivariograma e do interpolador geoestatístico denominado de krigagem (Terra, 2012).

A variabilidade espacial na caracterização química em áreas cultivadas nos Tabuleiros Costeiros demonstra que a produtividade agrícola de uma área é influenciada por vários fatores, dentre eles, a fertilidade dos solos, que podem ser naturalmente férteis ou se tornarem férteis por meio de um manejo químico adequado, e que o conhecimento dos valores de alcance e as localizações das áreas onde estão concentrados os maiores e/ou menores valores de determinado nutriente, são importantes para o planejamento do manejo da fertilidade do solo (Mendes et al., 2007).

No entanto, apesar da importância socioeconômica da cultura do abacaxi para o estado da Paraíba, são poucas as informações sobre a variabilidade dos atributos químicos relacionados ao uso e manejo dos solos desta cultura, podendo ainda, auxiliar no aperfeiçoamento de metodologias produtivas de pesquisas sobre a mesma.

Nesse sentido, objetivou-se analisar e caracterizar a relação entre dependência espacial dos atributos químicos do solo aplicando análises de geoestatística em áreas com quatro (A4) e oito (A8) ciclos de cultivo com abacaxizeiro ‘Pérola’ aplicando técnicas de variabilidade espacial com posterior obtenção de um esquema amostral otimizado para esse conjunto de dados extraídos.

2. Objetivo geral

Analisar e caracterizar a relação entre dependência espacial dos atributos químicos do solo aplicando análises de geoestatística em áreas com quatro (A4) e oito (A8) ciclos de cultivo com abacaxizeiro ‘Pérola’ aplicando técnicas de variabilidade espacial com posterior obtenção de um esquema amostral otimizado para esse conjunto de dados extraídos.

3. Revisão de literatura

3.1. Características gerais do abacaxizeiro

Originário da América Latina, mais precisamente do Brasil e Paraguai, o abacaxizeiro (*Ananas comosus* L. Merrill) pertence à família das bromeliáceas, as cultivares mais utilizadas são a Pérola e a Smooth Cayene, sendo a Pérola considerada a mais consumida *in natura*, graças às qualidades físicas e químicas de sua polpa (Brito Neto et al., 2008).

O fruto do abacaxi é caracterizado por um aglomerado de uma ou duas centenas de pequenos frutos também chamados de gomos, em torno de um mesmo eixo central, em que

cada “olho” ou “escama” da casca do abacaxi é um fruto verdadeiro que cresceu a partir de uma flor, e estes se fundem em um grande corpo, chamado infrutescência, no topo do qual se forma a coroa (Crestani et al., 2010).

A abacaxicultura paraibana sempre se destacou no cenário nacional, não só por suas qualidades nutricionais e organolépticas, mas também por sua rentabilidade e produtividade sendo o abacaxi a cultura considerada de maior expressão econômica dentro do setor frutícola para o estado da Paraíba, a produção é feita basicamente por pequenos produtores, em área cultivada inferior a cinco hectares, em condições de sequeiro e outra uma outra parte, com uso da irrigação, utilizando-se da cultivar Pérola, predominantemente, pois a abacaxicultura possibilita a geração de centenas de empregos diretos e indiretos durante todo o ciclo da cultura, necessitando-se da mão-de-obra humana para o seu cultivo (Brito Neto et al., 2008; Rodrigues et al., 2010).

Grande parte do cultivo do abacaxi no Nordeste se encontra nas unidades geoambientais litorâneas denominados “Tabuleiros Costeiros”, que possuem unidades de mapeamento compostos por classes taxonômicas como às classes dos Latossolos, Espodossolos, Neossolos, Luvisolos e Argissolos Amarelos que possuem por características a baixa fertilidade natural, baixa capacidade de retenção de cátions e água e no que diz às respeito as condições do relevo, estes variando de plano a suave ondulado, sendo uma peculiaridade particular destes solos a presença de horizontes subsuperficial endurecidos de profundidade e espessura variáveis (Corrêia et al., 2008a).

O preparo do solo para o cultivo de abacaxi atua de modo definitivo no desenvolvimento e estabelecimento da cultura, pois possibilita o crescimento adequado do sistema radicular da planta sem impedimentos, ocorrendo algumas operações agrícolas como arações e gradagens para que haja um aumento da profundidade efetiva do solo pela cultura.

O abacaxizeiro é considerado uma planta exigente, demandando quantidades de nutrientes que a maioria dos solos cultivados não consegue suprir integralmente, por essa razão, a prática da adubação é quase que obrigatória, nos plantios para fins comerciais. Em ordem decrescente de absorção de macronutrientes, o abacaxi apresenta a seguinte exigência: K>N>Ca>Mg>S>P, sendo necessário o estabelecimento de relações adequadas entre as doses desses nutrientes, tal procedimento, nem sempre considerado nas recomendações de adubação, consiste numa estratégia importante para assegurar o equilíbrio nutricional da cultura, visando a maximizar as produtividades física, econômica e de qualidade do fruto (Reinhardt et al., 2000; Silva et al., 2009; Rodrigues et al., 2013).

3.2. Solos dos Tabuleiros Costeiros

Os solos dos Tabuleiros Costeiros ocupam uma grande faixa de todo o litoral brasileiro que se estende desde ao norte do Estado do Amapá até as costas litorâneas do Estado do Rio de Janeiro sendo originário dos sedimentos provindo do Grupo Barreiras, ocupando uma área de aproximadamente 20 milhões de hectares. Nestas áreas geoambientais encontram-se as áreas de maior antropização do Nordeste, assim também, como áreas de uso agrícola e de exploração bastante intensificada; inicialmente por meio do extrativismo e posteriormente, pelos monocultivos como cana de açúcar ao longo de toda a costa, e principalmente, pela fruticultura como os cultivos de manga, abacaxi, banana, coqueiro anão-verde, cacau, e outras frutíferas, e há áreas destinadas a produção de grãos e pastagens (Jacomine, 1996; Correia et al., 2008).

Os Tabuleiros Costeiros exercem importante papel no cenário econômico do Nordeste, pois, além de gerar emprego e renda para a maioria da população através da atividade agrícola, a exemplo da fruticultura, que contribui com parte expressiva da receita proveniente desta atividade, atribui-se a esse favorecimento para expansão da fruticultura a predominância de extensas áreas de solo com relevo plano a suave ondulado, que permitem intensificar os cultivos contribuindo, assim, para elevação da produtividade das fruteiras e manutenção da relação custo/benefício das explorações, em patamares competitivos (Cintra et al., 2004; Vasconcelos et al., 2012).

Os solos ocorrentes predominantemente na região dos Tabuleiros Costeiros são os Latossolos, Argissolos acizentados, Espodossolos, Neossolos Quartzarênicos e os Plintossolos, todas as classes de solos desta região são caracterizados por possuírem sérias limitações químicas, como a baixa fertilidade natural e, por conseguinte baixa disponibilidade de reserva nutricional às plantas, além de serem caracterizados por apresentarem um endurecimento normalmente constatado nos horizontes A e topo do B, quando secos, sendo sua dureza tão expressiva que mereceu a adoção da adjetivação “coeso” para estes (Corrêa et al., 2008). É uma das maiores unidades de paisagem do Brasil, geralmente constituídos por materiais argilosos, argiloarenosos ou arenosos, bastantes intemperizados, tipicamente caulíníticos e pobres em Fe (Corrêa, et al., 2015).

“Horizonte coeso” é uma terminologia utilizada para designar um estado de coesão manifestado quando o solo está seco, que desaparece ou torna-se bem menos expressivo quando o solo está úmido, sendo que essas camadas ou horizontes fortemente adensadas ocorrem devido ao efeito cimentante da presença nos solos de elementos químicos como o silício, alumínio e Ferro podendo ser ainda atribuído a ocupação da matéria orgânica e as

argilas preenchendo os microporos e/ou a presença da caulinita devido a sua forma laminar (Moreau et al., 2006b). O conhecimento correto sobre os horizontes coesos pode permitir implantação mais racional e maior desenvolvimento de culturas nas áreas de ocorrência de solos dessa natureza (Corrêa, et al., 2008).

Existem ainda outras duas feições morfológicas que são inerentes às regiões dos Tabuleiros Costeiros denominados de fragipã e duripã ocorrentes em áreas depressivas das paisagens. Fragipã e duripã diferenciam-se quanto ao grau de coesão, no primeiro o fragmento seco torna-se menos resistente quando imerso em água, podendo desenvolver fraturas, com ou sem desprendimento de pedaços, e se esboroa em curto espaço de tempo, já no segundo, a cimentação é suficientemente forte, de modo que fragmentos secos não se esboroam, mesmo durante prolongado período de umedecimento (Moreau et al., 2006b).

As florestas das paisagens dos Tabuleiros Costeiros sofreram intensa fragmentação desde os primórdios da colonização brasileira, as áreas de remanescentes florestais são escassas e nas suas áreas alteradas predominam cultivos perenes a semiperenes, considerando a fragilidade desses solos ante o revolvimento da camada arável, característica associada à mineralogia caulinítica da fração argila (Gomes et al., 2012).

O uso dos solos dos tabuleiros para o desenvolvimento agrário deve ser acompanhado de estudos e pesquisas que visem resolver, entre outros impasses, principalmente aqueles relacionados pela presença de horizontes coesos, pois as práticas edáficas adotadas nessas regiões muitas vezes são exercidas de maneira uniforme, tanto físico quanto químico, trazendo problemas nas estratégias de manejo, em virtude da variabilidade espacial e temporal dos atributos do solo relacionados ao sistema produtivo (Cintra et al., 2004).

Os sistemas de manejos podem promover um rearranjo dos atributos químicos, físicos e biológicos nos solos dos Tabuleiros Costeiros sendo que a fertilidade dessas áreas é dependente dos teores de material orgânico e o complexo sortivo de nutrientes influenciados pela prática de adubações e correções da camada arável dos solos, pois a CTC desses solos, geralmente, é maior em horizontes mais superficiais onde se encontram maior índice de matéria orgânica do que em horizontes subjacentes (Gomes et al., 2012).

3.3. Variabilidade espacial e o manejo do solo

Desde o início do século XX, a variabilidade do solo, e conseqüentemente dos seus atributos, tem preocupado pesquisadores pelo fato dela apresentar alterações nos resultados

de pesquisa relacionados à produtividade, mesmo o solo sendo considerado homogêneo em parcelas experimentais (Andrade et al., 2005).

No planejamento agrícola, as condições iniciais dos solos possuem relevada importância, pois estes apresentam naturalmente heterogeneidade e sua variabilidade espacial, horizontal e vertical, é dependente dos fatores de formação e dos relacionados ao manejo do solo (Souza et al., 2001). Essa heterogeneidade é uma característica intrínseca dos solos, porém o cultivo resulta em alterações aumentando ainda mais a variabilidade nos seus atributos (Santos et al., 2006).

Assim, o conhecimento da variabilidade dos atributos do solo, no espaço e no tempo, é considerado, atualmente, o princípio básico para o manejo localizado das áreas agrícolas, em qualquer que seja sua escala (Grego & Vieira, 2005). É base na busca de melhorar a rentabilidade dos cultivos que se adotam novas ferramentas técnicas ao manejo de forma a obter eficiência associado à redução de custos de produção com aumento no retorno financeiro, dentre as quais a agricultura de precisão surge cada vez mais presente em áreas agrícolas comerciais, pois une relações espaciais a uma variável do sistema produtivo, adicionando crescente competitividade e menor impacto ambiental (Carvalho et al., 2013).

O manejo da fertilidade do solo se inicia na amostragem do solo com a análise química e baseia-se nos teores médios dos nutrientes, implicando em aplicações excessivas em determinadas áreas do campo e insuficientes em outras (Cavalcante et al., 2007). Sendo assim, a análise química composta resultaria em um único resultado para toda uma área, desconsiderando totalmente a variabilidade existente e considerando as demais variáveis como semelhantes numa área amostral.

A coleta de amostras de solo georreferenciadas permite espacializar os atributos químicos, com o auxílio das ferramentas de geoestatística, sendo frequentemente utilizada, visando identificar zonas com restrições químicas, que possam limitar o rendimento da cultura (Amado et al., 2009).

Dessa forma a geoestatística é utilizada na agricultura de precisão para analisar os fatores envolvidos nos sistemas produtivos, sendo que esta difere da estatística clássica por considerar que os dados amostrados são dependentes espacialmente. Por meio da geoestatística é possível identificar se há ou não dependência espacial para os fatores analisados, possibilitando a criação de mapas temáticos que auxiliam na tomada de decisões na lavoura (Carvalho et al., 2013).

A importância da variabilidade espacial dos atributos químicos se torna mais determinante em áreas onde, o solo se encontra sob uso intensivo e contínuo e naquele sujeito a diferentes tipos de manejo (Carvalho et al., 1998). A análise geoestatística pode indicar

alternativas de manejo não só para reduzir os efeitos da variabilidade na produção das culturas, como também para aumentar a possibilidade de se estimarem respostas de atributos químicos do solo em função de determinadas práticas de manejo (Silveira et al., 2000).

As acentuadas variações nos teores de nutrientes no solo, frequentemente encontrados numa gleba, decorrem do cultivo intensivo e do uso indiscriminado de fertilizantes (Werner, 2004). Algumas variáveis apresentam características sobre variabilidade, em geral, o pH do solo, via de regra, tem sido o atributo de menor variabilidade e o P e K os de variabilidade mais elevada (Silva et al., 2007; Machado et al., 2007).

A dependência espacial dos atributos químicos do solo tem sido reportada variando entre moderada e forte e os modelos matemáticos de semivariograma mais comumente ajustados são o esférico e exponencial (Zanão Junior et al., 2007).

Os mapas de variabilidade espacial dos atributos do solo fornecem informações importantes para o estabelecimento de práticas de manejo adequado do solo e das culturas, visto que o comportamento das plantas tende a acompanhar a distribuição espacial e a variação de nutrientes no solo (Campos et al., 2009).

A recomendação de nutrientes é baseada em teores médios da fertilidade do solo, os quais podem ser subestimados ou superestimados, o conhecimento detalhado da variabilidade espacial dos atributos químicos, por meio da geoestatística, pode otimizar a aplicação dos mesmos, melhorando dessa maneira o sistema de manejo da adubação (Cavalcante et al., 2007).

Terra (2012) constatou que a partir das análises da variabilidade espacial dos atributos do solo permitiu delimitar as zonas homogêneas dos mesmos, indicando que os futuros manejos diferenciados de práticas agrícolas para o pomar de pessegueiros deverão se basear na distribuição espacial das variáveis promovendo assim a racionalização de insumos e água no sistema produtivo.

Em trabalho sobre a variabilidade espacial de atributos de solos em unidades de manejo nas áreas de produção integrada de coco, Gomes et al. (2008) verificaram que a maioria dos atributos estudados apresenta elevado grau de heterogeneidade, principalmente no horizonte mais superficial do solo, como evidenciado pelos valores de alcance e com os valores médios de P, K e Ca+Mg claramente influenciados por correções e adubações sistemáticas realizadas na área de plantio (coberturas e fertirrigação). Nesse caso, evidenciando que as variabilidades espaciais químicas exigem práticas de manejo de água e solo diferenciados.

3.4. Geoestatística

Cientistas da área de solos se preocupam com o problema de variação espacial e temporal dos solos desde o começo do século, mas somente nas décadas de 50 e 60, com o avanço na teoria de estatística espacial, é que os cientistas começaram a perceber a potencialidade deste instrumento para o manuseio de dados quantitativos, facilitando a compreensão da variabilidade do solo (Carvalho et al., 2002).

Em ciência do solo, a maior parte das propriedades do solo possui dependência espacial, isso significa que os valores assumidos por uma determinada variável numa determinada posição definida na área de estudo, varia de acordo com a direção e a distância de separação entre as amostras vizinhas (Panosso et al., 2008).

A geoestatística surgiu para o estudo de variáveis regionalizadas, ou seja, o estudo de uma função espacial numérica, que varia de um local para outro, com continuidade aparente e cujos valores são relacionados com a posição espacial que ocupam (Faraco et al., 2008).

Uma variável regionalizada é uma variável distribuída no espaço ou no tempo cujos valores são considerados como realizações de uma função aleatória (ou processo aleatório, ou campo aleatório, ou processo estocástico) (Camargo & Fuks, 2001).

Uma dada variável regionalizada $Z(x_i)$, para qualquer posição x_i dentro da área “S”, pode ser considerada como sendo a realização do conjunto de variáveis aleatórias $Z(x_i)$. Esse conjunto de variáveis é chamado de função aleatória, $Z(x_i)$ (Terra, 2012).

As variáveis regionalizadas são constituídas por um duplo aspecto contraditório. Pela sua característica “aleatória” apresenta irregularidades e variação imprevisível de um ponto para outro e pela sua característica “estrutural” apresenta relações existentes entre os pontos no espaço motivadas pela sua gênese (Landin et al., 2006). Em outras palavras, seria impossível prever com exatidão se o teor de determinado elemento nutritivo do solo é alto (aspecto aleatório), mas é provável que se encontre alto teor próximo a alto teor de determinado elemento nutritivo (aspecto estrutural).

A geoestatística utiliza uma função espacial numérica denominada de semivariância, que varia de um local para o outro dependendo da distância da amostragem, com uma continuidade aparente cuja variação não pode ser representada por uma função matemática simples. Fundamenta-se em conceitos básicos da estatística clássica, mas leva em consideração as coordenadas geográficas dos pontos amostrais e a dependência espacial entre as amostras, havendo assim, uma alta probabilidade de os pontos amostrais próximos terem valores semelhantes (Assumpção et al., 2007).

Semivariograma é uma ferramenta básica de suporte as técnicas de krigagem, pois permite representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço (Camargo et al., 2002), e que pode ser estimado pela seguinte equação:

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

Sendo: $\hat{\gamma}(h)$ = é a estimativa da semivariância experimental; $N(h)$ = número de pares de observações $Z(x_i)$ e $Z(x_i+h)$ separados por uma distância h . Analisando a equação, pode-se verificar que quanto mais próximos estiverem os pontos amostrados, maior será a semelhança entre eles e, portanto, menor a estimativa da semivariância. Quanto mais distantes estiverem os pontos amostrados, menor será a semelhança e, conseqüentemente, maior a sua estimativa (Terra, 2012).

O semivariograma é representado por três parâmetros: o patamar, o efeito pepita e o alcance.

O alcance (a) é a distância dentro do qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente.

Patamar (C_1) é o valor do semivariograma correspondente a seu alcance (a). Ocorre que deste ponto em diante, não existe mais dependência espacial entre as amostras, porque a variância da diferença dos pares de amostras torna-se aproximadamente constantes (Figura 1).

Efeito pepita (C_0) é definido como a descontinuidade do semivariograma na origem e é utilizado para explicar a variação do atributo para distâncias menores que a considerada na grade de amostragem e erros de medição (Camargo & Fuks, 2001).

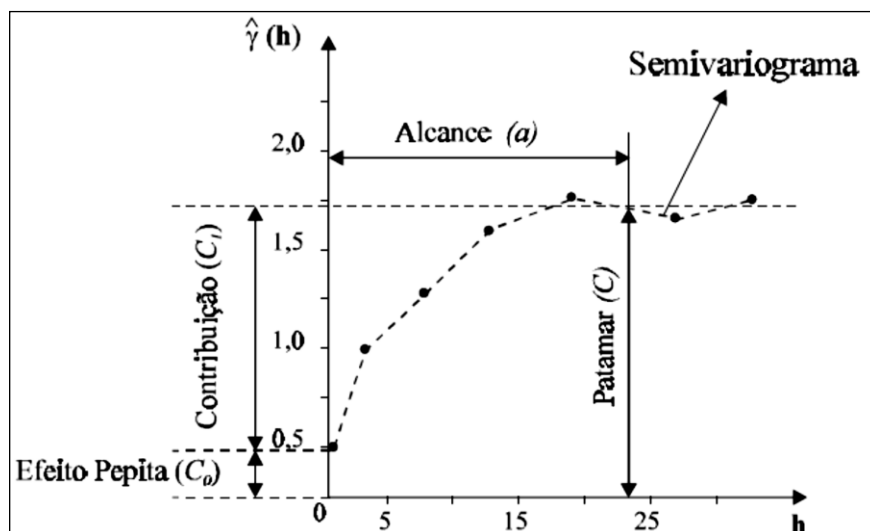


Figura 1. Exemplo de semivariograma.

O processo de ajuste de um modelo de semivariograma consiste em escolher o número de estruturas (modelos de semivariogramas), os tipos de modelos e a determinação dos parâmetros: efeito pepita, alcance e patamar de cada estrutura, sendo que um modelo de semivariograma é uma função que determina a variabilidade espacial para qualquer distância e direção (Machado et al., 2004, Landin et al., 2006).

Entre os modelos disponíveis, existem aqueles com patamar e sem patamar, e os modelos que possuem patamar são denominados de modelos de transição, sendo que a escolha do modelo irá depender do comportamento de $\gamma(h)$ em função da distância h (Machado et al., 2004; Terra, 2012). Entre os vários modelos disponíveis (Figura 2), estes são os mais comuns com patamar:

O modelo gaussiano

$$\hat{\gamma}(h) = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & h = 0 \\ C_0 + C \left[1 - \exp\left(-\frac{3h^2}{A^2}\right) \right] & h > 0 \end{array} \right\}$$

Que se caracteriza por apresentar uma curva parabólica junto à origem e a tangente nesse ponto é horizontal, o que indica pequena variabilidade para curtas distâncias; “A” corresponde ao alcance prático igual à distância segundo a qual 95% da soleira foi alcançada (Machado et al., 2004; Landin et al., 2006; Terra, 2012).

Modelo esférico

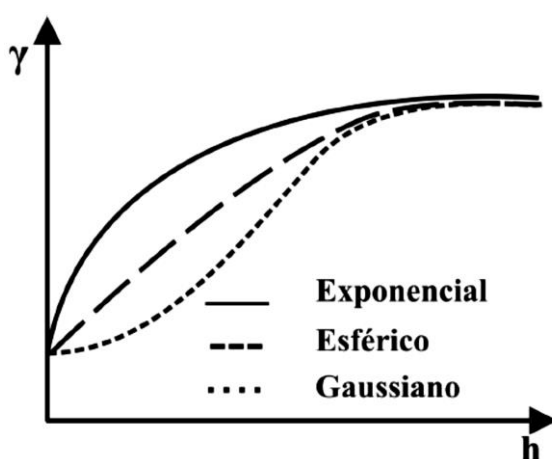
$$\gamma(h) = \{C_0 + C \begin{cases} 0 & h = 0 \\ \frac{3h}{2A} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{A^3} & 0 < h \leq A \\ C + C_0 & h > A \end{cases}\}$$

Neste modelo a inclinação da tangente junto à origem ($h \cong 0$) é $3C/2a$; é o modelo mais comum, podendo-se afirmar que equivale à função de distribuição normal da estatística clássica. Ou seja, O modelo esférico tem comportamento linear perto da origem e atinge o patamar a uma distância igual ao alcance, denotado por A . A contribuição é denotada por C . (Machado et al., 2004; Landin et al., 2006).

Modelo exponencial

$$\hat{\gamma}(h) = \{C_0 + C \begin{cases} 0 & h = 0 \\ 1 - \exp(-\frac{3h}{A}) & h > 0 \end{cases}\}$$

Neste modelo a inclinação da tangente junto à origem é C/A ; C é a assíntota de uma curva exponencial e pode ser equalizada junto à soleira; “ A ” corresponde ao alcance prático igual à distância segundo a qual 95% da soleira foi alcançada. Ou seja, caracteriza-se por ter um comportamento linear perto da origem. O alcance prático, denotado por “ A ”, no qual o valor do semivariograma é igual a 95% do patamar (Machado et al., 2004; Landin et al., 2006).



Fonte: (Reis, 2013).

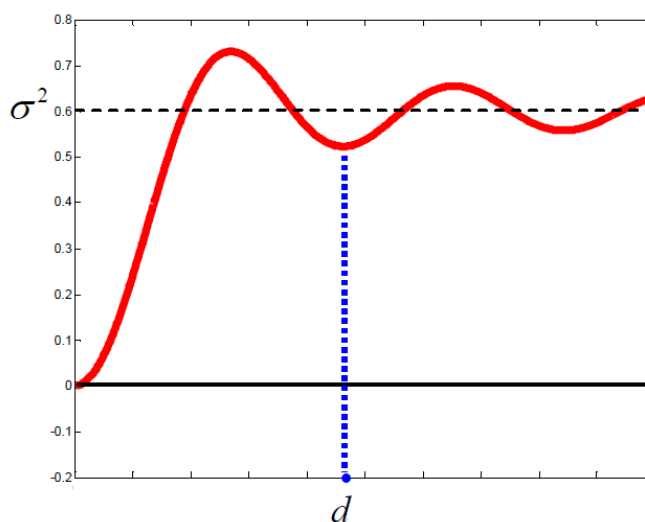
Figura 2. Comparação dos modelos de semivariogramas.

Modelo sine wave

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

Em que C_0 é o efeito pepita, $C_0 + C_1$ é o patamar, “h” a distância e “a” é o alcance do semivariograma.

O modelo wave é usado para modelar o comportamento periódico. Esse tipo de fenômeno é encontrado onde há uma série de sucessões oscilando entre baixa e alta concentração referente a atributos do solo em áreas de revolvimento de solo, em áreas susceptíveis a alagamentos, por exemplo. A figura 3 é ligeiramente uma parábola na origem, embora não tanto quanto o modelo gaussiano. Depois de atingir um máximo, o gráfico oscila para cima e para baixo em uma onda senoidal que vai posteriormente diminuindo a amplitude. A equação para o modelo de efeito senoidal é uma combinação do modelo exponencial com um modelo senóide (Smith, 2014).



Fonte: Smith, 2014.

Figura 3. Semivariograma demonstrativo a partir modelo matemático “wave”. σ^2 = Variância; d = distância.

Os modelos de ondas senoidais são usados para comportamento periódico. Na análise de séries temporais do ambiente é comum considerar que a maioria da periodicidade e a sua fonte não é estocástico, ou seja, não é aleatório, e em vez disso pode ser assumido como sendo determinista. Então, seguindo uma abordagem de séries temporais, o efeito sazonal pode ser modelado parametricamente e removido antes de outros efeitos sejam estimados (Smith, 2014).

Os semivariogramas não são restritos a uma estrutura monotônica; estes podem apresentar segmentos decrescentes ou cíclicos, os quais são chamados “efeitos senoidais”; referidas estruturas não monotônicas podem ou não apresentar patamar; ter as amplitudes de ondas reduzidas e serem isotrópicos ou anisotrópicos (Pyrz e Deutsch, 2005).

Carvalho et al. (2009) comparou o ajuste do modelo matemático de efeitos senoidais e constatou que o mesmo se mostrou apropriado para o ajuste de dados de precipitação pluvial anual média em áreas do estado de São Paulo.

A partir da determinação de um gráfico, conhecido como semivariograma, em que se relacionam a distância entre as amostras com a respectiva função semivariância, ajusta-se um modelo teórico que fornece os parâmetros necessários para determinar a estrutura de variabilidade espacial e, posteriormente, a interpolação de valores em qualquer posição na área em estudo por meio da técnica conhecida como krigagem (Assumpção et al., 2007).

Essa krigagem é conhecida como o processo de estimativa de valores de variáveis distribuídas no espaço, e/ou no tempo, a partir de valores adjacentes enquanto considerados como interdependentes pelo semivariograma, ou seja, é um método de interpolação geoestatística que estima os valores da variável para locais não amostrados, expressando os resultados em forma de mapas de isolinhas ou de superfície tridimensional (Landin et al., 2006; Terra, 2012).

A krigagem usa informações a partir do semivariograma para encontrar os pesos ótimos a serem associados às amostras que irão estimar um ponto, uma área ou um bloco. Como o semivariograma é uma função da distância entre locais de amostragens, mantendo o mesmo número de amostras, os pesos são diferentes de acordo com o seu arranjo geográfico (Landin et al., 2006).

Há algumas vantagens inerentes a krigagem, dentre as quais podemos citar uma maior precisão e fidelidade aos dados originais, possibilitando estabelecer mapas da área experimental para a variável que se pretende estudar e também é considerado o melhor estimador por que produz menor variância do erro e não tendencioso (Vieira et al., 2011).

3.5. Amostragem espacial por anelamento simulado

A descrição da variabilidade espacial de qualquer atributo que é georreferenciado em mapas temáticos depende substancialmente da precisão dos resultados da análise geoestatística e da viabilidade experimental em termos da disposição de recursos para a coleta de dados e a medição de variáveis, portanto, é necessário elaborar um esquema de amostragem reduzida, que possa minimizar os custos operacionais necessários e ao mesmo

tempo maximizar a qualidade dos resultados obtidos nas previsões espaciais para localizações não amostradas (Guedes et al., 2014).

Assim, a análise dos padrões de complementaridade permite identificar regiões potencialmente importantes, nas quais podem ser realizados estudos mais detalhados. Uma abordagem matematicamente simples para tentar resolver esse problema é usar uma estratégia sequencial, que consiste em encontrar inicialmente a área mais rica, e selecioná-la como a primeira área do sistema.

Feito isso, e partindo-se do princípio que o objetivo é representar os dados pelo menos uma vez, pode-se assumir que os dados que ocupam essa primeira área estão representados no sistema. O próximo passo é encontrar a próxima área que contenha o maior número do valor do atributo diferente dos que já estão na primeira área selecionada, ou seja, que seja ao máximo complementar à área já incluída e por isso, se diz complementaridade (Diniz-Filho et al., 2009).

Para isso, existem diversos algoritmos para tentar maximizar as ligações internas ou minimizar as ligações externas, mas o algoritmo sequencial não fornece necessariamente a solução ótima, sendo possível realizar análises mais sofisticadas para encontrar redes de complementaridade através de procedimentos não sequenciais, como o algoritmo anelamento simulado (Diniz-Filho et al., 2009).

De maneira geral, o anelamento simulado busca soluções ótimas que atendam o objetivo proposto, comparando conjuntos inteiros de áreas, procurando inicialmente selecionar um conjunto aleatório de áreas e a cada iteração desse conjunto é comparado com outras áreas adicionando, excluindo e/ou trocando áreas, então, a simulação por anelamento que, por comparar as áreas e não apenas adicioná-las, sendo que esse algoritmo tende a uma solução ótima, minimiza custos ao selecionar a menor área necessária para atingir o objetivo proposto mesmo que esteja mais próxima ou adjacente às reservas existentes no sistema (Anacleto et al., 2005).

Segundo Guedes et al. (2014), há algumas fases para estabelecer a implementação do algoritmo, que definiu o tamanho da amostragem e desenho amostral ideal, descritos a seguir:

Na fase inicial (zero), o tamanho d_0 amostragem inicial deve ser de 15% do o número de pontos na grade inicial. O valor da temperatura inicial é ajustado para 1 e o cronograma geométrico de arrefecimento será igual a $t_i + 1 = 0,9 \times t_i$.

Fase 1, de forma simples e aleatório, seleciona-se uma área d_0 de tamanho reduzido dentro da grade inicial para uma amostragem.

Fase 2, para o desenho amostral, um modelo exponencial será ajustado usando a probabilidade máxima do método, e a predição espacial dos valores da variável em localizações na rede original serão realizadas utilizando um método de interpolação geoestatística chamado krigagem. Uma função objetivo para S_i é em seguida calculada. Os projetos ótimos serão gerados de forma independente, com objetivo e funções distintos. No primeiro processo (TS1), o objetivo será medido para maximizar a precisão de uma Precisão geral, que é usado para medir a semelhança entre os mapas e está presente na Equação 2 (Anderson et al, 2001; De Bastiani et al., 2012).

$$AO = \sum_{j=l}^r x_{jj} / N,$$

Sendo N é o valor para a área total e x_{jj} são os elementos na diagonal da matriz de erro.

Cada elemento x_{jk} nesta matriz representa a área total de cada parte que pertence à classe j ($j = 1, \dots, R$) de valores no mapa modelo (um mapa que expressa a variabilidade espacial de valores previsto nas localizações de grade iniciais obtidos através dos pontos de amostragem resultantes do processo de otimização) e para a classe K ($K = 1, \dots, R$) de valores no mapa referência (um mapa que expressa a variabilidade espacial de valores exibidos na grade inicial).

No segundo processo de otimização a função objetivo a ser minimizada será a soma de erro quadrático da previsão espacial.

Fase 3, um novo desenho amostral S_{i+1} será registrado quando um ponto será escolhido aleatoriamente e substituído por um outro ponto escolhido aleatoriamente nos arredores.

Fase 4, a função objetivo será calculado para o desenho amostral S_{i+1} na mesma forma como descrito para a fase 2.

Fase 5, a variação da função objetivo entre os sistemas de amostragem será calculada pela expressão. Se o objetivo é minimizar a soma do erro quadrático da previsão espacial, a nova solução S_{i+1} serão aceitos com a probabilidade descrito na Equação 3.

$$P[\text{aceitar } S_{i+1}] = \begin{cases} 1 & \text{se } \Delta_i \leq 0 \\ \exp\left(\frac{-\Delta_i}{t_i}\right) & \text{se } \Delta_i > 0 \end{cases} \quad (3)$$

No entanto, se o objetivo é o de maximizar a precisão global, a nova solução S_{i+1} serão aceitos com a probabilidade descrito na Equação 4.

$$P[\text{aceitar } S_{i+1}] = \begin{cases} 1, & \text{se } \Delta_i \geq 0 \\ \exp\left(\frac{\Delta_i}{t_i}\right), & \text{se } \Delta_i < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Fase 6, para o atual tamanho da amostragem d_m , o processo de otimização será concluído se a critério estabelecido for alcançado. Caso contrário, a programação descrito na fase de arrefecimento deverá ser zero aplicada para o valor da temperatura atual seguido por $i = i+1$, e um retorno à fase 3.

Fase 7, se o valor da precisão global para o primeiro processo de otimização, com tamanho d_m , é igual a 0,85, o que corresponde a um nível elevado de semelhança entre os dois mapas (Anderson et al, 2001; De Bastiani et al, 2012) o processo de otimização está terminado. Para a otimização do processo de TS2, esse será concluído quando há resumido erro quadrático da previsão espacial correspondeu a 15% do mesmo cálculo para o projeto de menor amostragem.

Num estudo sobre a comparação de mapas de variabilidade espacial da resistência do solo à penetração (RSP) construído com e sem covariação usando a modelo linear espacial (SLM) em que De Bastiani et al. (2012), realizaram análises de RSP na camada de 0,2-0,3 m de profundidade por meio de um modelo espacial linear (SLM), em que se consideraram as camadas de 0,0-0,1 m e 0,1-0,2 m como covariáveis, obtendo um modelo de estimação e um mapa temático por krigagem universal, assim, constataram que a modelagem da RSP na camada de 0,2-0,3 m de profundidade é muito importante para estimar o RSP em termos de camadas anteriores em setores não amostrados na área experimental e que as exatidões medidas apresentadas permitiram a realização da comparação entre o mapa temático univariada usando krigagem ordinária e o mapa temático usando o SLM com krigagem universal. Os valores índice revelou a existência de similaridade entre as construções de ambos os mapas.

Marchant et al. (2009) avaliaram o monitoramento espacial de fósforo total em uma área de conservação de água na Flórida através de métodos não estacionários em coletas realizadas em 1991 e 2003 e constataram que os modelos de segunda ordem convencionais estacionários não representam com precisão as previsões de fósforo total presente nas áreas de conservação de água e que modelos não estacionários prevê no mapeamento um avanço

de fósforo total no interior da região que não é evidente nas previsões do modelo estacionário.

Lark (2002) em pesquisa sobre amostragem espacial otimizada do solo para a estimativa do variograma por máxima verossimilhança constatou que estas simulações mostram que otimizar a configuração da amostragem de pontos em relação as funções objetivos derivado da máxima verossimilhança como estimador de parâmetros do variograma pode melhorar a eficiência de estimativa, isto é visto principalmente na estabilidade do erro do estimador kriging e no erro das estimativas das matrizes otimizadas.

4. Referência bibliográfica

AMADO, T. J. C.; PES, L. Z.; LEMAINSKI, C. L. & SCHENATO, R. B. Atributos químicos e físicos de latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 831-843, ago. 2009.

ANACLETO, T. C. S.; FERREIRA, A. A.; DINIZ-FILHO, J. A. F.; FERREIRA, L. G. Seleção de áreas de interesse ecológico através de sensoriamento remoto e de otimização matemática: um estudo de caso no município de Cocalinho, MT. **Acta Amazonica**. v. 35, n. 4, p. 437-444, 2005.

ANDERSON, J. F.; E.E. HARDY, J. T. ROACH, and R. E. WITMER. **A land use and land cover classification system for use with remote sensor data**. Geological Scope Professional Paper 964, Geologic Scope. Washington, USA. 41 pp. 2001.

ANDRADE, A. R. S. de.; GUERRINI, I. A.; GARCIA, C. J. B.; KATEZ, I.; GUERRA, H. O. C. Variabilidade espacial da densidade do solo sob manejo da irrigação. **Ciência Agrotécnica**, v. 29, n. 2, p. 322-329, 2005.

ARATANI, R. G.; FREDDI, O. da S.; CENTURION, J. F.; ANDRIOLI, I. Qualidade física de um Latossolo Vermelho acriférrico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.677-687, 2009.

ASSUMPCÃO, R. A. B.; URIBE-OPAZO, M. A.; SOUZA, E. G.; JOHANN, J. A. Uso da krigagem indicatriz na avaliação da probabilidade de produtividade de grãos de soja (*Glicínia max*) segundo os padrões regional, estadual e nacional. **Acta Scientiarum**, (29), 165-171, 2007.

BARREIRO NETO, M.; LACERDA, J. T. de; SOUSA, K. W. de; FRANCO, C. F. de O. e LEITE, G. L. Disponibilidade de tecnologias apropriadas e políticas de suporte à produção de abacaxi na Paraíba. **Tecnologia e Ciência Agropecuária**, v. 7, n.3, p. 65-70, set. 2013

BRITO NETO, J. F. de; PEREIRA, W. E.; SÁ SOBRINHO, R. G. de; BARBOSA, J. A.; SANTOS, D. P. dos; Aspectos produtivos da abacaxicultura familiar e comercial no estado da Paraíba. **Revista Caatinga**, v.21, n.4, p. 43-50, 2008.

CAMARGO, E. C. G; FUKS, S. D. (2001). Geostatística: fundamentos e aplicações. In: CÂMARA, G. **Geoprocessamento: teoria e aplicações**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro>> Acesso em: jun. de 2016.

CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA. G. T.; SOUZA, Z. M.; MONTANARI, R. Planejamento agrícola e implantação de sistema de cultivo de cana-de-açúcar com auxílio de técnicas geoestatísticas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.3, p.297-304, 2009.

CARVALHO, J.R.P.; SILVEIRA, P.M. & VIEIRA, S.R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 1151-1159, 2002.

CARVALHO, O.S.; GASCÓ, J.M.; LOPÉZ, F.G. & REQUEJO, A.S. Variabilidade espacial de algumas propriedades químicas e físicas de um solo submetido a diferentes sucessões de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 497-503, 1998.

CARVALHO, L. C. L.; SILVA, F. M.; SILVA FERRAZ, G. A.; SILVA, F. C.; STRACIERI, J. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e características agronômicas da cultura do café. **Coffee Science**, v. 8, n. 3, p. 265-275, 2013.

CARVALHO, J. R. P.; VIEIRA, S. R.; GREGO, C. R. Comparação de métodos para ajuste de modelos de semivariograma da precipitação pluvial anual. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.4, p.443-448, 2009.

CAVALCANTE E. G. S.; ALVES M. C.; SOUZA, Z. M. de; 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.

CINTRA, F. L. D.; PORTELA, J. C.; NOGUEIRA, L. C. Caracterização física e hídrica em solos dos tabuleiros costeiros no distrito de irrigação Platô de Neópolis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 08, p. 45-50, 2004.

CORREIA, A. F.; MAROSTEGA, T. N.; ARAÚJO, K. L.; ZEVIANI, W. M.; SERAFIM, M. E.; NEVES, L. G. Atributos químicos do solo com o uso de gesso e milho de cobertura em cultivares de abacaxizeiro. **Revista de Ciências Agrárias/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**. v. 60, n. 1, p. 25-32, 2017.

CORREIA, G. G.; MOURA, R. F.; RODRIGUES, J. J. V.; BARROS, M. F. C.; CORREIA, K. G. Caracterização da capacidade de retenção e disponibilidade de água em solos de tabuleiro costeiro paraibanos. **Revista Caatinga**, v. 21, n. 3, p. 156-162, 2008.

CORRÊA, M. M.; KER, J. C.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; CURI, N.; TORRES, T. C. P. Caracterização física, química, mineralógica e micromorfológica de horizontes coesos e fragipãs de solos vermelhos e amarelos do ambiente tabuleiros costeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32; p. 297-313, 2008a.

CORRÊA, M. M.; KER, J. C.; ARAÚJO FILHO, J.C.; CAMÊLO, D. L. Formas de ferro, silício e, alumínio na gênese de fragmentos e horizontes coesos dos tabuleiros costeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 39; p. 940-949, 2015.

CUNHA, E. de Q.; STONE, L. F.; FERREIRA, E. P. de B.; DIDONET, A. D. & Moreira, J. A. A. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo sob produção orgânica impactados por sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.16, n.1, p.56-63, 2012.

CRESTANI, M.; BARBIERI, R. L.; HAWERROTH, F.J.; CARVALHO, F. I. F. de, OLIVEIRA, A. C. de. Das Américas para o Mundo - origem, domesticação e dispersão do abacaxizeiro. **Ciência Rural**, v. 40, p. 1473-1483, 2010.

DE BASTIANI, F.; URIBE-OPAZO, M. A. and DALPOSSO, G. H. Comparison of maps of spatial variability of soil resistance to penetration constructed with and without covariables using a spatial linear model. **Engenharia Agrícola** (Impresso) v. 32, p. 394-404, 2012.

DINIZ-FILHO, J. A. F.; TERRIBILE, L. C.; OLIVEIRA, G. de; RANGEL, T. F. L. V. B. Padrões e processos ecológicos e evolutivos em escala regional. **Megadiversidade**, v. 5, p. 5-16, 2009.

FARACO, M. A.; URIBE-OPAZO, M. A.; DA SILVA, E. A. A.; JOHANN, J. A.; BORSSOI, J.A. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 463-476, 2008.

GUEDES, L. P. C.; URIBE-OPAZO, M. A.; RIBEIRO JUNIOR, P. J. Optimization of sample design sizes and shapes for regionalized variables using simulated annealing. **Ciencia e Investigación Agraria**. v. 41(1), p. 33-48, 2014.

GOMES, J. B. V.; BOLFE, E. L.; CURI, N.; FONTES, H. R.; BARRETO, A. C.; VIANA, R. D. Variabilidade espacial de atributos de solos em unidades de manejo em área piloto de produção integrada de coco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2471-2482, 2008.

GOMES, J. B. V.; ARAÚJO FILHO J. C.; CURI, N. Solos de tabuleiros costeiros sob florestas naturais e sob cultivo. **Pesquisa Florestal Brasileira**. v. 32; p. 233-246, 2012.

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

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Rio de Janeiro, LSPA, 2014. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/cgi-bin/prtabl>> Acesso em 15 de maio de 2017.

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

LARK, R. M. Optimized Spatial Sampling of Soil for Estimation of the Variogram by Maximum Likelihood. **Geoderma**, v.105, p. 49-80, 2002.

MACHADO, L.O.; LANA, A.M.Q.; LANA, R.M.Q.; GUIMARÃES, E.C.; FERREIRA, C.V. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas sob sistema plantio convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 591-599, 2007.

MACHADO, P. L. O. de A.; BERNARDI, A. C. de C. e SILVA, C. A. Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio. In: Valencia, L.I.O.; MEIRELLES, M.S.P e BETTINI, C. **Geoestatística aplicada a agricultura de precisão**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, p. 202. 2004.

MARCHANT, B. P., NEWMAN, S., CORSTANJE, R., REDDY, K. R., OSBORNE, T. Z., & LARK, R. M. Spatial monitoring of a non-stationary soil property: Phosphorus in a Florida water conservation area. **European Journal of Soil Science**, v. 60, p. 757-769, 2009.

MENDES, A. M. S.; DUDA, G. P.; LIMA, J. A. G.; AMORIM, L. B. do. Variabilidade espacial de características químicas de um Cambissolo cultivado com mamão no semiárido do Rio Grande do Norte. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**. v. 7, n. 2, 2007.

MODEL, N. S. Preparo do Solo e Manejo da Cobertura Vegetal Para o Abacaxizeiro Cultivado no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 10, n. 1-2, p. 91-100, 2004a.

MOREAU, A.M.S.S.; COSTA, L.M.; KER, J.C. & GOMES, F.H. Gênese de horizonte coeso, fragipã e duripã em solos do tabuleiro costeiro do sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30; p. 1021-1030, 2006b.

PANOSSO, A. R.; PEREIRA, G. T.; MARQUES JÚNIOR, J. ; LA SCALA JÚNIOR, N. Variabilidade espacial da emissão de CO₂ em Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar em diferentes sistemas de manejo. **Engenharia Agrícola**, v. 28, p. 227-236, 2008.

PYRCZ, M. J.; DEUTSCH, C. V. The whole story on the hole effect. http://www.gaa.org.au/pdf/gaa_pyrzc_deutsch.pdf. 01 setembro. 2016.

REINHARDT, D.H. 2000. A planta e o seu ciclo. In: D. H. REINHARDT, L. F. da S. Souza, e J. R. S. Cabral. **Abacaxi. Produção: Aspectos técnicos**. p. 13-14. Org. Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia. Brasília. (Frutas do Brasil. 7).

REIS, C. P. dos. Simulação dos fatores que afetam as predições obtidas por Krigagem Ordinária. 2013. 45 f. **Dissertação** - (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG.

RODRIGUES, A. A.; MENDONÇA, R. M. N.; SILVA, A. P.; SILVA, S. M. Nutrição mineral e produção de abacaxizeiro ‘Pérola’, em função das relações K/N na adubação. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 35, n. 2, p. 625-633, 2013b.

RODRIGUES, A. A.; MENDONÇA, R. M. N.; SILVA, A. P. da; SILVA, S. de M.; PEREIRA, W. P. Desenvolvimento vegetativo de abacaxizeiros ‘pérola’ e ‘smooth cayenne’ no estado da Paraíba. **Revista Brasileira Fruticultura**, v. 32, n. 1, p. 126-134, Março 2010.

SANTOS, M.L.; CARVALHO, M.P.; RAPASSI, R.M.A.; MURAISHI, C.T.; MALLER, A.; MATOS, F.A. Correlação linear e espacial entre produtividade de milho e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto do cerrado brasileiro. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 28, p. 313-321, 2006.

SILVA, F. M. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos e da produtividade na cultura do café. **Ciência Rural**, v. 37, p. 401-407, 2007.

SILVA, F, M, da; SOUZA, Z. M. de; FIGUEIREDO, C. A. P. de; VIEIRA, L. H. de S.; OLIVEIRA, E. de. Variabilidade espacial de atributos químicos da cultura do café em duas safras agrícolas. **Ciência agrotécnica**, v. 32, n. 1, p. 231-241, 2008.

SILVA, A. P.; ALVAREZ, V. H.; SOUZA, A. P.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F.; DANTAS, J. P. Sistema de recomendação de fertilizantes e corretivos para a cultura do abacaxi - Fertcalc-abacaxi. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1269-1280, 2009.

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

SILVA, A. L. P. da; SILVA, A. P. da; SOUZA, A. P. de; SANTOS, D.; SILVA, S. de M.; SILVA, V. B. da. Resposta do Abacaxizeiro 'Vitória' a Doses de Nitrogênio em Solos de Tabuleiros Costeiros da Paraíba. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 447-456, 2012.

SILVA NETO, S. P. et al. Análise espacial de parâmetros da fertilidade do solo em região de ecótono sob diferentes usos e manejos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, n. 2, p. 541-552, abr/jun. 2011.

SILVEIRA, P. M.; ZIMMERMANN, F. J. P.; SILVA, S. C.; CUNHA, A. A. Amostragem e variabilidade espacial de características químicas de um latossolo submetido a diferentes sistemas de preparo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 2057-2064, 2000.

SMITH, T. E. (2014). Notebook on spatial data analysis [online]. <http://www.seas.upenn.edu/ese502>.

SOUZA, Z. M.; SILVA, M. L. S.; GUIMARÃES, D. T. S.; CARVALHO, M. P.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 25, p. 699-707, 2001.

TERRA, V. S. S Variabilidade espacial e temporal de atributos agrônômicos em pomar de pessegueiro. 2012. 103 f. **Tese (Doutorado)** - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

WERNER, V. Utilização de recursos de agricultura de precisão na geração de mapas de atributos, mapas de produtividade e aplicação de insumos à taxas variáveis. 2004. 125p. **Dissertação (Mestrado)** – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

VIEIRA, S. R.; DECHEN, S. C. F.; SIQUEIRA, G. M.; DUFRANC, G. Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos relacionados com o estado de agregação de dois Latossolos cultivados no sistema de semeadura direta. **Bragantia**, v. 70, n. 1, p. 185-195, 2011.

ZANÃO JÚNIOR, L.A.; LANA, R.M.Q.; GUIMARÃES, E.C. Variabilidade espacial do pH, teores de matéria orgânica e micronutrientes em profundidades de amostragem num Latossolo vermelho sob semeadura direta. **Ciência Rural**, n. 37, p. 1000-1007, 2007.

CAPÍTULO I

ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM ÁREAS COM QUATRO E OITO CICLOS DE CULTIVO DO ABACAXIZEIRO ‘PÉROLA’

Resumo

Os atributos químicos do solo apresentam ampla variação resultante dos fatores de formação, uso e manejo do solo, sendo a produtividade das culturas dependente dos mesmos. Nesse sentido, objetivou-se nesta pesquisa caracterizar e avaliar os atributos químicos do solo na lavoura de abacaxi com quatro (A4) e oito (A8) ciclos da cultura. A pesquisa foi desenvolvida na cidade de Itapororoca, PB. As amostras deformadas de solos foram coletadas de um Argissolo Vermelho Amarelo em malha, com intervalos regulares de 10 m, sendo coletada três amostras de solos por ponto amostral, totalizando 75 pontos amostrais por área de estudo na profundidade de 0-20 cm. As variáveis analisadas para a determinação dos atributos químicos foram pH, P, K, Na, Ca, Mg, Al⁺, H+Al, MO, CTC_{pH7}, SB e V%. Os dados foram submetidos a análise estatística descritiva seguida de uma análise de componentes principais. Na área manejada com quatro ciclos foi verificada acidez elevada e toxicidade leve por alumínio. Os maiores teores de fósforo e potássio foram encontrados na área com quatro ciclos. Na área com quatro ciclos foi encontrada acidez potencial média, que associado ao baixo valor do pH e menores teores carbono, matéria orgânica, soma de bases e saturação por bases do solo, revelou maior necessidade de práticas de correção do solo. Na área com oito ciclos, os maiores teores de matéria orgânica do solo aliado à aplicação de fertilizantes proporcionam maiores teores para a capacidade de troca de cátions, soma de bases, saturação por bases, carbono do solo e pH tendendo a média acidez. Nesta área verificou melhores condições ao cultivo do abacaxizeiro. A análise de componentes principais permitiu identificar três grupos relacionados com os atributos da fertilidade do solo, da acidez do solo e com os teores de fósforo e potássio.

Palavras chave: Geoestatística; Krigagem; *Ananas comosus*; Manejo do solo.

Abstract

The soil's chemical attributes have extensive variation resulting from the factors of formation, use and soil management, and the productivity of cultures dependent on them. In this sense, it aimed at this research to characterize and evaluate the chemical attributes of the soil in the pineapple crop with four (A4) and eight (A8) cycles of culture. The survey was developed in the city of Itapororoca, PB. The deformed soil samples were collected from of an Ultisol in mesh, with regular intervals of 10 m, three samples of soils per sample point, totaling 75 sampling points per study area at the depth of 0-20 cm. The variables analyzed for determining chemical attributes were pH, P, K, Na, Ca, Mg, Al, H + Al, C, MO, CTC_{pH7}, SB, and V%. The data were submitted to descriptive statistical analysis followed by a major component analysis. In the area managed with four cycles was verified high acidity and light toxicity by aluminium. The highest levels of phosphorus and potassium were found in the area with four cycles. In this area was found an average potential acidity, that associated with low pH value and lower carbon levels, organic matter, sum of bases and saturation by ground bases, revealed greater need for soil correction practices. In the area with eight cycles, the largest organic matter concentration of the soil allied to the application of fertilizers provide greater levels for the capacity of exchange of cations, sum of bases, saturation by bases, carbon of the soil and pH equivalent to the average acidity. In this area it has verified better conditions for cultivation of pineapple. The analysis of principal components has allowed to identify three groups related to soil fertility attributes, soil acidity, and phosphorus and potassium concentrations.

Key words: Geostatistics; Kriging; *Ananas comosus*; Soil management.

1. Introdução

Os sistemas de gestão do solo desempenham papel importante na agricultura sustentável e na qualidade ambiental, pois as práticas agrícolas têm maior efeito sobre a direção e o grau de alterações nas propriedades do solo. Nos cultivos que envolvem práticas de preparo convencional, uso contínuo de fertilizantes e uso inadequado da irrigação causam frequentemente modificações na qualidade do solo (Kilic et al., 2012).

A região dos Tabuleiros Costeiros que acompanham todo o litoral paraibano é a área responsável por grande parte da produção de abacaxi, devido às condições favoráveis de clima e solo para a lavoura desta frutífera. Porém, apesar do estado paraibano ser um dos maiores produtores do país é possível perceber uma série de problemáticas no cultivo convencional como o uso de mudas de baixa qualidade, ausência de práticas conservacionistas do solo, adubação sem critérios técnicos, aplicação de diversas formulações não apropriadas à cultura, irrigação sem planejamento técnico e uso intensivo de herbicidas pré-emergentes (Santos, 2013).

O preparo convencional no qual o revolvimento do solo se repete a cada ciclo de cultura, afeta diretamente as características químicas do solo, ocasionando a rápida degradação dos resíduos vegetais de culturas anteriores presente na parte superficial do solo e diminuindo os teores de carbono orgânico total e a capacidade de troca catiônica, com reflexos na retenção de cátions ao solo (Souza e Alves, 2003).

O revolvimento do solo pode contribuir para aumentar a acidez dos mesmos, pois influencia na distribuição de nutrientes no perfil do solo, de modo que, Ca, Mg, K e P são mais uniformemente distribuídos na camada arável do solo sob preparo convencional, o que faz com que rapidamente sejam absorvidos pela cultura, dessa forma, a saturação por bases (concentração de Ca, Mg e K trocáveis) tende a diminuir na camada arável e, possivelmente, aumenta a atividade do Al em solução, o que favorece a acidificação do solo (Ciotta et al., 2002).

Em cultivos agrícolas a deficiência de cálcio, magnésio e fósforo e a elevada concentração de alumínio constituem uma das maiores limitações aos cultivos comerciais de frutíferas, sendo necessário o uso intensivo de corretivos e fertilizantes (Siqueira Neto et al., 2009).

Além do emprego de novas tecnologias no cultivo do abacaxizeiro, as exigências nutricionais específicas de cada cultivar desta espécie e a reserva de nutrientes no solo são fatores que devem ser levados em conta na definição das necessidades de adubação da cultura em determinada região, muitas das recomendações de adubação são generalizadas,

independentemente das cultivares, e demonstram que as diferenças de respostas às adubações ocorrem não só em função das condições edafoclimáticas de cada região, mas também das variedades cultivadas (Oliveira et al., 2015).

A adubação é um fator que influencia diretamente na produtividade e na qualidade do abacaxizeiro, podendo ser limitante se o elemento químico essencial estiver em baixa quantidade no solo ou for fornecido por meio da adubação numa quantidade insuficiente (Krause et al., 2013). A dissolução dos fertilizantes fosfatados e a nitrificação dos nitrogenados amoniacais ou amídicos podem contribuir para a acidificação da camada superficial do solo, principalmente quando se consideram longos períodos de cultivo sem reaplicação de calcário, ou quando altas doses de fertilizantes são aplicadas ao solo (Ciotta et al., 2002; Ernani et al., 2001).

Uma forma de se evitar o uso excessivo de fertilizantes é a utilização de matéria orgânica em conjunto com a adubação mineral, além de aumentar sua eficiência, resulta em diversos benefícios, nos aspectos físicos, químicos e biológicos do solo, além da sua influência sobre as características químicas do solo envolvem o aumento na capacidade de troca catiônica, diminuindo os efeitos nocivos do alumínio trocável e pode aumentar a capacidade de absorção de outros nutrientes, sendo que sua sensibilidade às práticas de manejo determina que esta seja considerada uma das principais propriedades na avaliação da qualidade do solo (Singh et al., 2010).

Para analisar a estrutura da fertilidade dos solos, é necessária a avaliação dos diversos nutrientes, o que, muitas vezes, ao ser realizado por meio de métodos estatísticos univariados, eleva a dimensão do problema, além de onerar o processo. Uma opção de análise para esses tipos de dados é o uso de análise multivariada, mais especificamente, a análise de componentes principais, com a vantagem de facilitar a interpretação. Seu objetivo é explicar a estrutura da variância e da covariância de um vetor aleatório, composto de p -variáveis aleatórias, por meio da construção de combinações lineares das variáveis originais (Silva et al., 2010).

Como no Brasil a aplicação de insumos é baseada em teores médios da fertilidade do solo, os quais podem ser subestimados ou superestimados, sendo assim, o conhecimento detalhado da variabilidade espacial dos atributos da fertilidade química, pode otimizar a aplicação localizada de corretivos e fertilizantes, melhorando assim o controle do sistema de produção das culturas e contaminações ambientais (Cavalcante et al., 2007).

Desta forma, objetivou-se nesta pesquisa caracterizar e avaliar os atributos químicos do solo na lavoura de abacaxi com quatro e oito ciclos da cultura.

2. Material e métodos

2.1. Localização da área experimental

Esta pesquisa foi realizada no município de Itapororoca, PB, no sítio Lagoa de Fora ($6^{\circ}48'38''$ latitude Sul e $35^{\circ}17'48''$ longitude Oeste) em duas cultivadas com abacaxi (Figuras 4). Dentre os produtores do município, selecionaram-se duas áreas com 0,5 hectares com as características para os ciclos de cultivos desejados. A área denominada A4 com quatro ciclos de cultivos subsequentes, enquanto que a área denominada A8 com oito ciclos subsequentes.

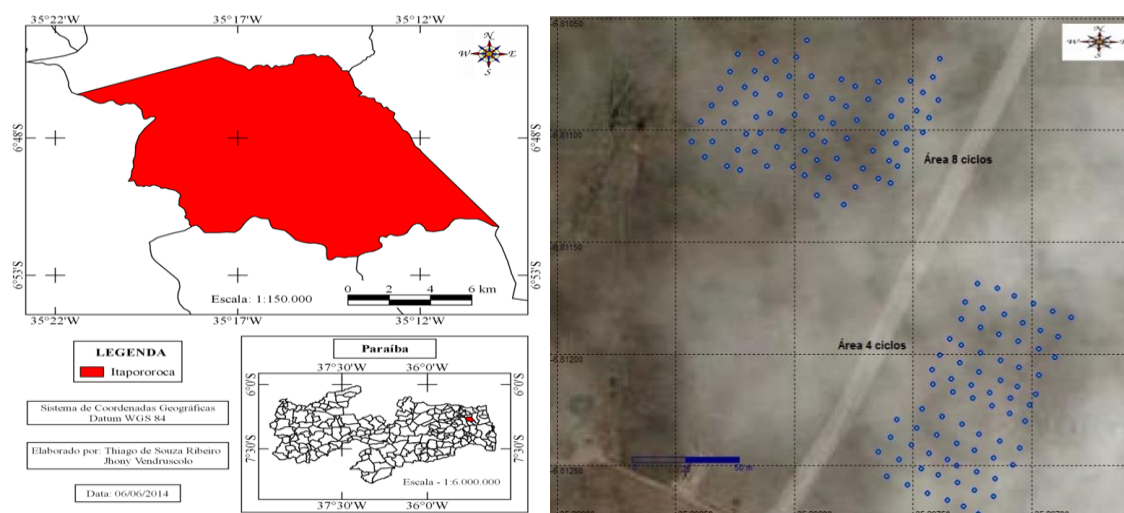


Figura 4. Localização da área experimental com oito ciclos de cultivo de abacaxi no município de Itapororoca, PB.

Fonte: Google Earth, 2016.

2.2. Clima

Segundo a classificação de Köppen, predomina o clima do tipo As', caracterizada por ser quente e úmido, com chuvas de outono a inverno, estação seca podendo atingir entre cinco e seis meses, pluviosidade média anual entre 1500 mm, concentradas nos meses de março a agosto e com período seco entre setembro e fevereiro. A umidade relativa do ar, em termos de valores médios anuais, varia de 80 a 85%. A insolação nos meses de janeiro a julho de 7 às 8 horas diárias e nos meses de agosto a dezembro de 8 às 9 horas diárias (Leonardo et al., 2013; Barbosa, 2006).

2.3. Relevo e solos

As áreas selecionadas se inserem na unidade geambiental litorânea dos Tabuleiros Costeiros. O município possui unidades de mapeamento de solos (AQd, PE12, PV3, NC4), compostos por classes taxonômicas como os Neossolos, Luvisolos e Argissolos Amarelos, no entanto, as áreas onde as amostras foram coletadas situam-se na classe dos Argissolos Vermelho Amarelo eutrófico (Figura 5).

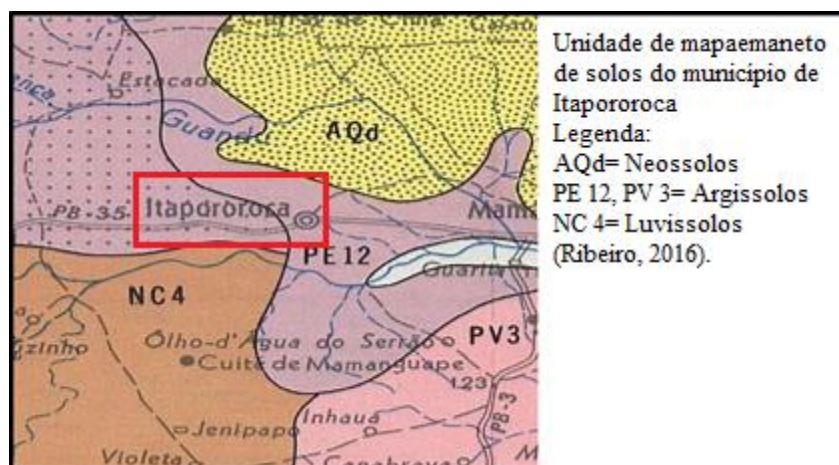


Figura 5. Unidade de mapeamento de solos do município de Itapororoca, PB.

2.4. Histórico do manejo tradicional nos pomares de abacaxi

A pesquisa foi realizada no município de Itapororoca, mesorregião da Mata Paraibana, pertencente à região dos Tabuleiros Costeiros. Nessa localidade o manejo edáfico para o cultivo com abacaxizais inicia-se pela instalação da lavoura de abacaxi, onde a maior parte dos produtores utiliza a cultivar ‘Pérola’ por características de melhor aceitação mercadológicas. Na primeira área selecionada, a lavoura do quarto ciclo de abacaxi havia sido plantada no mês de novembro de 2014 e na lavoura com oito ciclos de cultivo com abacaxi, a plantação ocorreu no mês de outubro de 2014. Nas áreas cultivadas os terrenos variam de plano a suave ondulado, típico da região e possui características de serem arenoso e ou argilo arenosos com boa capacidade de drenagem. O processo de seleção das mudas não segue um padrão por tamanho e, geralmente, são utilizadas mudas dos próprios cultivos da área. O preparo do solo consiste em gradagens e arações até 30 cm de profundidade, limpa do terreno e amontoa dos leirões para facilitar o desenvolvimento das raízes. A maior parte dos sistemas de plantio e espaçamento adotados pelos produtores são dispostas em fileiras

duplas, com espaçamento 0,9 x 0,40 x 0,40 m, totalizando numa densidade de, aproximadamente, 19.200 plantas em 0,5 ha.

Para evitar a incidência de pragas e doenças, os produtores fazem o controle fitossanitário da lavoura de abacaxi, principalmente, a utilização de inseticidas e fungicidas, de modo que o preparo das caldas para a aplicação de produtos químicos ocorre através de pulverizações 60 dias após o plantio de inseticidas registrado para a cultura e para controle de cupim e cochonilha. Para o controle do fusarium é utilizado o fungicida Folicur, pulverizado diretamente na flor na época de frutificação em torno de 35 a 45 dias após a indução floral.

Os controles de plantas daninhas foi realizados através de campinas manuais com maior intensidade nos primeiros meses após o plantio, para evitar a maior competição com o abacaxi. A depender da intensidade de infestação por plantas infestantes, foram necessárias de seis a 12 capinas manuais durante todo o ciclo da cultura somados ao uso de herbicidas foliares.

As adubações realizadas pelos produtores locais consistem no fornecimento dos macronutrientes NPK, pela utilização de formulações comerciais que ocorreram parceladamente, com aplicações que variam de duas a três vezes ao longo do ciclo de cultivo. Normalmente, a primeira aplicação ocorre por volta de 60 dias após o plantio com NPK. Para a segunda e terceira aos 180 e 270 dias após o plantio, respectivamente com N e K. O fósforo é aplicado uma única vez na primeira adubação de cobertura.

Esses procedimentos de manejo do solo e tratos culturais foram os que os produtores das áreas selecionadas realizaram havendo pouca variação de uma prática para a outra entre as áreas de cultivo.

2.5. Atributos químicos

A amostragem nas áreas com quatro e oito ciclos de cultivo com abacaxi foram realizadas entre janeiro e fevereiro de 2015, foi realizada em malha com espaçamento regular de 10 metros entre os pontos nas linhas de cultivo, utilizando-se GPS Garmin GPSMAP 60Csx, sendo amostrada uma área de 0,5 ha. As amostras de solos foram coletadas na profundidade de 0-20 cm.

As amostras de solos foram coletadas nas respectivas áreas aos 100 dias após a primeira adubação para caracterização das mesmas e, antes da indução floral do abacaxi, para as determinações das análises do solo. Em cada ponto de amostragem foram coletadas, com a utilização de um trado, três sub-amostras de solo, na linha de plantio da cultura. Essas

sub-amostras foram misturadas para compor uma amostra composta representativa de cada ponto de amostragem, o que totalizou 75 amostras compostas nas áreas com quatro e oito ciclos de cultivo de abacaxi, totalizando 150 amostras compostas.

Após a coleta, as amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas, peneiradas e maceradas, caracterizando a fração terra fina seca ao ar (TFSA). As análises foram realizadas no Laboratório de Química e Fertilidade do Solo do DSER, CCA, UFPB, Areia, PB. As características químicas avaliadas foram os teores de Ca, Mg, K, Na, Al, H+Al, P; assim como a soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), matéria orgânica (MO) e saturação por bases (V%). Foram determinados também o pH (1:2,5 em água) de acordo com EMBRAPA (1997).

2.6. Análise estatística

2.6.1. Estatística descritiva

Na análise exploratória dos dados, foram calculadas medidas de posição (mínimo, máximo, média, mediana), medida de dispersão (variância e erro padrão).

Foi aplicado o teste Anderson-Darling para verificar a normalidade dos dados, de acordo com a seguinte equação:

$$AD^2 = -n - n^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n (2 \cdot i - 1) \cdot [\ln(P_i)) + \ln(1 - P_{n+1-i})] \quad (2)$$

Sendo: P probabilidade que uma variável normal padronizada seja menor do que $(X_i - \bar{x})/s$; n é o número de amostras; \bar{x} é a média da amostra; s é o desvio padrão da amostra.

Valores elevados de AD^2 indicam que a distribuição da amostra é diferente de uma população normal. A probabilidade de se aceitar uma hipótese nula, da estatística AD é dada por Snedecor e Cochran (1989) pela seguinte equação:

$$p = 1 - (1 - \alpha)^n \quad (3)$$

Sendo α o nível de significância (5%); n é o número de amostras. Se o valor “p” para o teste Anderson-Darling for menor do que o nível de significância conclui-se que os dados não seguem uma distribuição normal.

As análises foram realizadas no software SAS University 3.4 (Cody, 2015). Para a elaboração do gráfico Boxplot e histograma de frequência, empregou-se o pacote estatístico R versão 3.2.5 (R Core Team, 2016).

2.6.3. Análise de componentes principais

Foi aplicada análise de componentes principais (CPs), com finalidade de descrever as inter-relações entre as variáveis. As variáveis associadas aos CPs foram identificadas com base na correlação de Pearson ser igual ou maior a 0,5 entre os escores dos CPs e as variáveis de forma individual.

3. Resultados e discussão

Os resultados da análise descritiva dos atributos químicos do solo para os diferentes ciclos de cultivo com abacaxi são apresentados na Tabela 1. Na área com quatro ciclos de cultivo as variáveis que apresentaram distribuição normal foram pH, P, Na, Al, H+Al e MO. Na área com oito ciclos de cultivo apenas as variáveis K, H+Al e MO apresentaram distribuição normal. A falta de normalidade dos dados provavelmente ocorreu devido à aplicação não uniforme de adubos na forma de distribuição pelos agricultores na linha de cultivo ou mesmo pelas diferentes formas de uso e manejo do solo, ocorrendo assim, no campo, locais com menores teores de nutrientes e outros com maiores (Silva Neto et al., 2011). Silveira Junior et al. (2014) em estudo sobre a distribuição de atributos químicos do solo em áreas sob diferentes usos agrícolas constataram a não normalidade para as variáveis pH, P, K, Ca, Mg, Al e MO. Em pesquisa sobre a variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos Carvalho et al. (2002) constataram a não normalidade para o P e K nas profundidades de 5 a 20 cm em áreas preparadas com arado e grade aradora.

Os testes de Anderson-Darling têm altos valores, muito distantes de zero ($P > 0,05$), portanto é aceita a hipótese nula de normalidade, e em função da comprovação da não normalidade dos dados, o desvio padrão não é uma medida confiável para análise da variabilidade dos dados (Albiero et al., 2012). Silveira Junior et al. (2014) atribuem a anormalidade no conjunto de dados à excessiva variação na área de estudo relacionada aos efeitos dos diferentes manejos adotados nos preparos dos solos.

Tabela 1. Estatística descritiva de atributos da fertilidade do solo em diferentes ciclos de cultivo com abacaxizeiro cv. ‘Pérola’ na profundidade de 0-20 cm (n=75)

Variável/ estatística	Quatro ciclos de plantio (A4)								Oito ciclos de plantio (A8)								
	Mín	Máx	\bar{x}	$s\bar{y}$	Moda	Med	A-D	λ	Mín	Máx	\bar{x}	$s\bar{y}$	Moda	Med	A-D	λ	t (p)
pH	4,05	5,50	4,64	0,03	4,66	4,66	>0,25	-1	4,27	5,66	4,80	0,03	4,59	4,74	0,02	1	0,017
P ¹	8,13	29,1	14,48	0,58	11,67	13,66	0,04	0	2,83	9,03	5,07	0,18	4,11	4,89	<0,005	0	<,0001
K ¹	47,95	245,75	95,02	4,77	91,38	91,00	<0,005	0	24,89	164,77	83,52	3,24	73,04	80,73	>0,25	0	0,312
Na ²	1,11	693,10	266,29	21,77	13,57	286,17	0,04	0	330,45	1486,41	657,07	23,72	532,16	609,74	<0,005		<,0001
Ca ²	0,10	7,17	0,58	0,12	0,18	0,35	<0,005	0	0,25	2,85	1,09	0,07	0,80	0,91	<0,005		0,004
Mg ²	1,11	44,63	6,80	1,39	0,66	1,52	<0,005		1,79	43,19	20,87	1,70	9,24	17,49	<0,005		<,0001
Al ²	0,05	0,95	0,59	0,02	0,66	0,66	0,06	0	0,15	1,10	0,53	0,03	0,45	0,47	0,007	1	0,740
H+Al ²	3,14	5,45	4,16	0,06	3,88	4,21	>0,25	0	2,15	5,11	4,06	0,07	3,88	4,12	>0,25	1	0,962
MO ³	6,86	16,74	10,60	0,21	11,05	10,71	>0,25	1	8,83	19,40	15,28	0,32	13,36	15,68	>0,25	1	<,0001
CTC _{pH7} ²	4,16	51,29	11,81	1,44	5,44	6,32	<0,005	0	6,14	49,03	26,33	1,76		22,44	<0,005	-1	<,0001
SB ²	0,61	45,84	7,66	1,44	0,99	2,02	<0,005	0	2,76	44,52	22,26	1,74		18,60	<0,005	-0,5	<,0001
V ⁴	13,89	91,34	45,00	3,23		35,70	<0,005	3	44,91	92,39	79,32	1,51		82,70	<0,005	0	<,0001

¹: (mg dm⁻³); ²: (cmolc dm⁻³); ³: (g dm⁻³); ⁴: (%); Mín: Mímino; Máx: Máximo; \bar{x} : Média; $s\bar{y}$: Erro Padrão; Med: Mediana; P: Fósforo; K: Potássio; Na: Sódio; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; Al: Alumínio; H+Al: Hidrogênio mais Alumínio; M.O: matéria orgânica; CTC_{pH7}: capacidade de troca de cátions a pH 7; SB: soma de base; V: saturação por base; A-D: Probabilidade do teste de normalidade de Anderson-Darling; λ : Potência utilizada para a transformação de Box-Cox; t (p): Probabilidade das médias dos ciclos de cultivos serem diferentes com base no teste t por permutação, (n=100000).

Os valores de média e mediana dos atributos químicos pH, P, Al, H+Al, MO em ambas as áreas, acrescentando o K nesta última, apresentaram-se valores próximos constatando a aproximação normal dos dados (Tabela 1). Campos et al. (2007) também encontraram valores próximos para média e mediana para as variáveis pH, K, SB, V% e MO na profundidade de 0 a 25 cm com distribuição simétrica analisando a dependência espacial de atributos químicos em área cultivada. Esta grande amplitude de valores observados revela os problemas que podem ocorrer quando se usa a média das variáveis para a realização do manejo da fertilidade do solo, ou seja, quando a análise de solo, da maneira como é feita atualmente, usando-se a amostra composta, para recomendar adubação, havendo desuniformidade na sua aplicação, causando prejuízos econômicos (Mello et al., 2006).

Cambardella et al. (1994) afirmaram que isto pode ser um indicativo de que essas medidas de tendência central não são dominadas por valores atípicos em suas distribuições. Assim, alguns autores Silva et al. (2010), Freddi et al. (2006), Corá e Beraldo (2006) relatam que medidas de tendência central (média e mediana) não são parâmetros eficientes para caracterizar fenômenos que apresentam dependência espacial por se tratar de estimadores muito influenciados por valores extremos e, assim, capazes de ocultar variações significativas.

A classificação dos teores médios dos atributos químicos do solo foi baseada em Ribeiro et al. (1999). Os baixos teores para as variáveis pH (4,64 e 4,80) e Ca (0,58 e 1,09) nas áreas A4 e A8, respectivamente, revelam que independente do tempo de cultivo esses atributos não se modificaram em função do tempo de cultivo nas áreas de abacaxi, assim, a área A8 apresentou maiores valores em relação a esses dois atributos em relação a área A4 (Tabela 1).

O baixo valor para o pH (acidez elevada) demonstra a baixa fertilidade natural nas áreas dos Tabuleiros Costeiros demonstrando a necessidade da correção do solo em ambas as áreas de cultivo. O abaixamento do pH pode estar relacionado com o uso de fertilizantes nitrogenados, comuns em cultivos com abacaxizeiro, principalmente aqueles que contêm N na forma amoniacal ou amídica (sulfato de amônio e, ou, ureia), que geram íons H^+ ao serem nitrificados no solo (Theodoro et al., 2003). Cavalcante et al. (2007) analisando a variabilidade espacial dos atributos químicos sob diferentes usos e manejos constataram baixo valor para o pH (5,2) em cultivo sob sistema convencional.

Em pesquisa avaliando o efeito de diferentes doses de N e K nas características químicas do solo Oliveira et al. (2015), verificaram que com o aumento das doses de N, ocorreu o decréscimo linear do pH do solo no final do ciclo de cultivo e observou que no processo de absorção de nutrientes do solo pela planta, existe o fenômeno fisiológico de

extrusão de H^+ , que resulta na queda do pH da solução externa, mostrando que não apenas o fertilizante nitrogenado, mas também o cultivo do abacaxizeiro sem adubação eleva a acidez do solo.

As variáveis Al e H+Al foram classificados como médio em ambos os ciclos de cultivo (A4 e A8) revelando uma leve toxicidade por alumínio (Tabela 1). Silva Neto et al. (2011) relatam que valores médios a alto de íons de H^+ e Al^{3+} tornam a fertilidade do solo restritiva ao crescimento de plantas, uma vez que o complexo de troca do solo encontra-se ocupado por esses. Oliveira et al. (2015) avaliando a influência de doses de N e K sobre os atributos químicos do solo ao final de um ciclo de cultivo de abacaxi, verificaram que com o aumento da acidez os teores de Al e H+Al aumentaram e houve diminuição nos teores de Ca e Mg.

Para as variáveis K, Mg, MO, CTC, SB e V a classificação foi alto para os dois ciclos de cultivos analisados (Tabela 1). O teor de K ($95,02 \text{ mg dm}^{-3}$) é maior na área manejada com quatro ciclos quando comparado com oito ciclos de cultivo ($83,52 \text{ mg dm}^{-3}$), assim são próximos, e em ambas as áreas de cultivo os teores de Ca foram baixo. É provável que os altos teores de K na camada de 0 a 20 cm, em função das adubações e exigência da cultura do abacaxi, estejam promovendo alterações não só na absorção de Ca, mas também de Mg, ou mesmo favorecendo a lixiviação desses dois cátions no solo, em razão da competição por sítios do complexo de troca de cátions (Nogara Neto et al., 2011; Santi et al., 2012).

Analisando os teores da CTC, SB e V% verificou-se que estes foram inferiores na área com quatro ciclos ($11,81; 7,66 \text{ cmolc dm}^{-3}$ e 45%, respectivamente) quando comparado com a área oito ciclos de cultivo que passaram para $26,33; 22,26 \text{ cmolc dm}^{-3}$ e 79%, respectivamente (Tabela 1). Isso ocorreu, provavelmente, devido ao maior tempo de cultivo, que possibilitou o aumento no solo das concentrações dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} . Maia (2013) analisando a qualidade ambiental em solo com diferentes ciclos de cultivo também constatou aumento da CTC, SB e V% nas áreas com 8, 9 e 10 ciclos de cultivo em relação aquelas com 3, 4 e 5 ciclos de cultivo e atribuiu o aumento em função dos teores de Ca e Mg. Estudos evolutivos demonstram que os teores de Ca e Mg contribuem para o aumento da soma de bases e é indicativo da adição de compostos orgânicos nos solos (Lima et al., 2007). Portanto, o equilíbrio nutricional entre esses dois elementos, mais os teores de K, no complexo de troca promoveria ganhos de produtividade nos cultivos agrícolas em decorrência da homogeneização de sua distribuição de aplicação.

Ao verificar a variabilidade espacial dos atributos químicos sob diferentes usos e manejos do solo, Cavalcante et al. (2007) constataram teores de médio a alto para as

variáveis K, Ca, Mg e V% em sistemas de preparo convencional, respectivamente, 0,15; 2,45; 1,0 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e 56,7%. Os sistemas de cultivo agrícola tendem a apresentar valores mais alto das propriedades químicas do solo (pH, P, Ca^{+2} , Mg^{+2} , SB, $\text{CTC}_{\text{pH } 7}$ e V%) visto que nessas áreas são realizadas adubações e correções sistematicamente (Silva Neto et al.,2011). Mello et al. (2006) também ressaltam a constatação de maiores valores para os atributos químicos na camada superficial devido, provavelmente, a maior presença de matéria orgânica, da CTC e as constantes realizações de adubações.

Avaliando o teor de MO nas áreas de cultivo com ciclos diferentes com a cultura do abacaxi, foi observado o maior valor na área A8 (15,28 g dm^{-3}) em relação a área A4 (10,60 g dm^{-3}). Esse maior valor no teor de MO na área de maior ciclo de cultivo ocorre, provavelmente, devido ao maior aporte de resíduos orgânicos pelos cultivos anteriores do abacaxizeiro na mesma área aliado à maior taxa da relação C/N da cultura. O abacaxizeiro possui uma relação C/N de 44/1 o que pode ser considerado recalcitrante no solo, ou seja, sua constituição é fibrosa, (Kiel, 1981) e de acordo com Boer et al. (2008) ressaltam que a dinâmica da decomposição é um processo biológico e que dentre os fatores citam a qualidade, quantidade e dimensão das partículas orgânicas disponíveis, principalmente no que refere à relação C/N e de constituintes mais resistentes à decomposição microbiana, de modo que essas características colaboram para a permanência dos resíduos no solo.

Em pesquisa realizada para verificar o teor de matéria orgânica em solos cultivados com abacaxi 'Pérola' foi constatado por Pontes et al. (2012) que o teor de MO no solo apresentou valores maiores na primeira camada de 0 a 10 cm decrescendo em profundidade. Os autores atribuem o maior teor na camada mais superficial devido aos maiores valores da matéria orgânica total e ao sistema radicular do abacaxizeiro que se concentra até a profundidade de 20 cm no solo. Costa et al. (2008) ressaltam que culturas que apresentam grande aporte de resíduos vegetais, tendem a acumular maiores teores de material orgânico com o tempo de cultivo. Amaral et al. (2015) relatam o fato de os resíduos culturais do abacaxi terem adicionado matéria orgânica ao solo, principalmente pelas folhas, compensando assim, os possíveis problemas decorrentes do tempo de uso do solo e do manejo inadequado.

O fósforo foi classificado como alto na área com quatro ciclos de cultivo (14,48 mg dm^{-3}) e médio na área oito ciclos de cultivo (5,07 mg dm^{-3}), valores estes superior (quatro ciclos) e inferior (oito ciclos) aos encontrados por Mello et al. (2006) em Argissolo Vermelho Amarelo intensamente cultivado, no qual obteve 11,8 mg dm^{-3} de fósforo de na camada de 0 a 20 cm.

Para o desenvolvimento adequado da cultura do abacaxi Oliveira et al. (2015) recomendam uma adubação fosfatada até 15 mg dm^{-3} de fósforo no solo de modo que ao final do ciclo de cultivo do abacaxizeiro, as concentrações de fósforo no solo passaram para a faixa considerada adequada. Aular et al. (2014) não observaram efeito positivo das doses de fósforo no crescimento, na produção e na qualidade dos frutos de abacaxi, mesmo com a baixa disponibilidade do nutriente no solo.

Nas figuras box-plot dos atributos químicos na área de quatro ciclos de cultivo, verificou-se a presença de uma maior quantidade de dados discrepantes para 10 atributos químicos: pH, P, K, Ca, Al, H+Al, Mg, CTC, MO e SB o que dificulta a utilização da análise geoestatística, pois esta se apresenta melhor sob normalidade, apenas as variáveis Na e V% não apresentaram dados discrepantes (Figuras 6 a 11). Na área com oito ciclos de cultivo a presença de valores assimétricos ocorreu nos atributos pH, P, K, Na, Ca, Al e H+Al, nas demais variáveis não houve discrepância de dados entre os atributos químicos do solo (Figuras 6 a 11).

Na área com quatro ciclos, os valores de pH com média de 4,64 e mediana de 4,66 apresentaram-se bem próximos, mas também há presença de “outliers” ou valores discrepantes, mas que não influenciaram no teste de normalidade (Figura 6A). Na área com oito ciclos, a distribuição dos dados teve distribuição simétricas indicada pela posição da linha da mediana no centro do retângulo sendo o valor da mediana de 4,74, tendo média de 4,88 (Figura 6A).

Analisando os teores de fósforo em ambas as áreas de cultivo, podemos verificar que os teores de fósforo apresentaram maiores amplitudes na área com quatro ciclos, os dados variaram entre 11 e 17 mg dm^{-3} com mediana de $13,66 \text{ mg dm}^{-3}$ contendo valores discrepantes e, dessa forma, maior variação quando comparado à área com oito ciclos (Figura 6B). Nesta área os teores de fósforo foram menores que a área com quatro ciclos e mesmo com menor amplitude os dados foram simétricos concentrados em torno da mediana de $4,89 \text{ mg dm}^{-3}$.

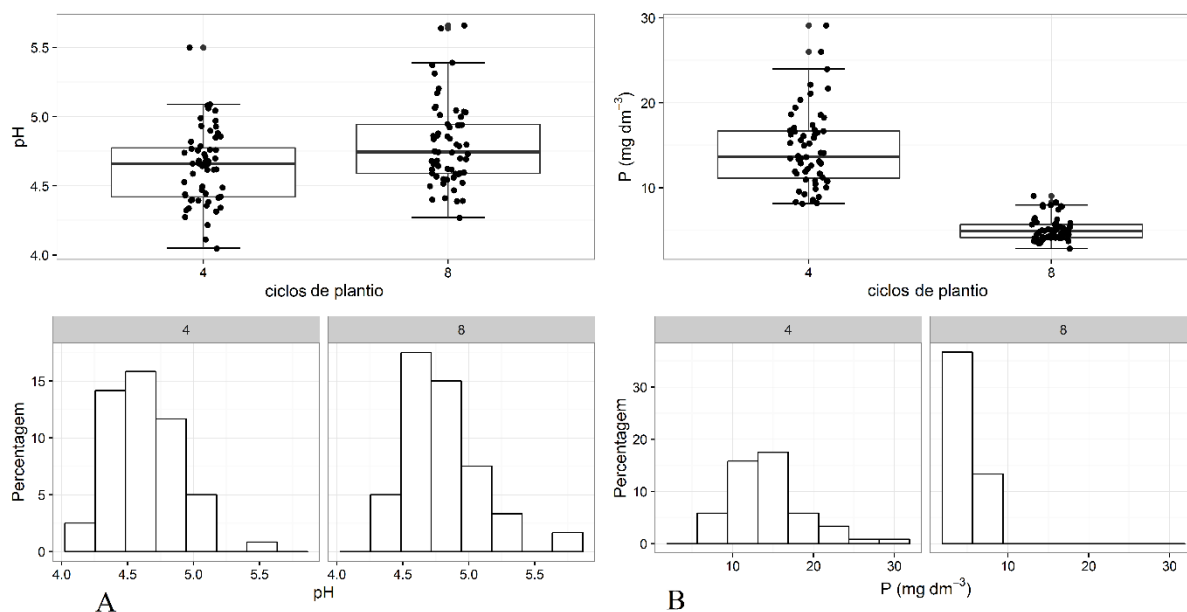


Figura 6. Box plot e histograma de frequência dos atributos pH (A) e P (B) para a camada de 0-20 cm de profundidade em áreas com quatro e oito ciclos de cultivos de abacaxizeiro.

Na Figura 7A verifica-se a distribuição dos teores de K, com amplitudes muito próximas em ambas as áreas com quatro e oito ciclos que apresentaram mediana de 91 e 80,73 mg dm⁻³ respectivamente. Na Figura 7A verifica-se que o Na foi o único atributo na área A4 que não apresentou valores discrepantes, a mediana ficou em torno 286,17 cmol_c dm⁻³, enquanto que na área A8 a mediana foi maior 532,16 cmol_c dm⁻³, mas com valores bastante discrepantes de modo que os dados foram positivamente assimétricos estando entre 500 e 750 cmol_c dm⁻³.

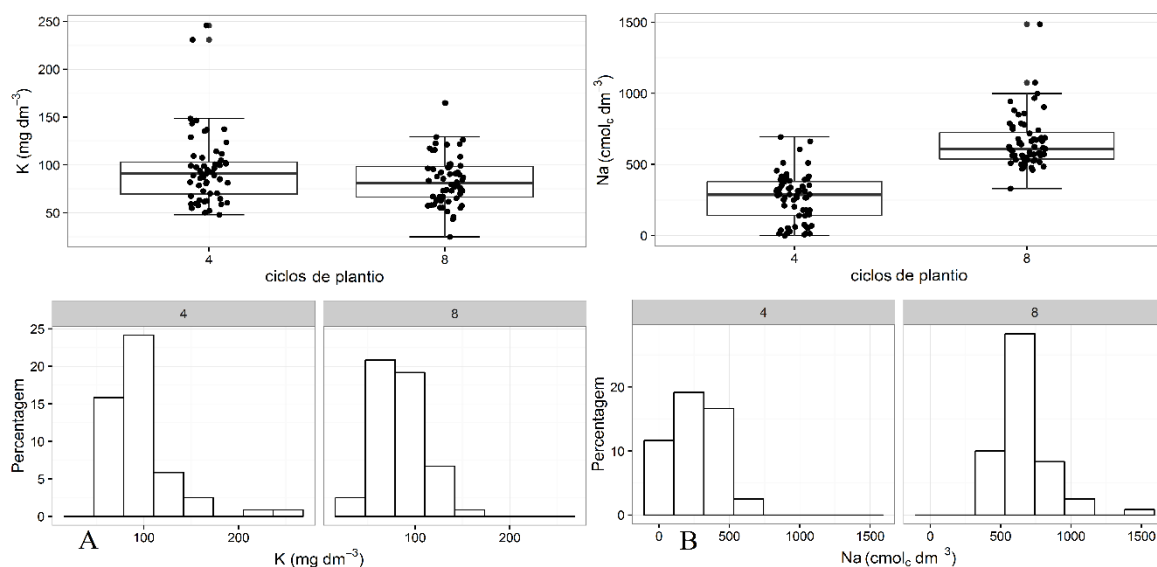


Figura 7. Box plot e histograma de frequência dos atributos K (A) e Na (B) para a camada de 0-20 cm de profundidade em áreas com quatro e oito ciclos de cultivos de abacaxizeiro.

Para os teores de Ca na área com quatro ciclos a distribuição dos dados foram assimetricamente positivos com mediana 0,35 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, ainda assim apresentou menor amplitude quando comparado a área com oito ciclos que obteve mediana de 0,91 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$. Ambas as áreas apresentaram valores discrepantes para o Ca (Figura 8A). Para o atributo químico Mg, a área oito ciclos não apresentou valores discrepantes e demonstrou maior variação na distribuição dos dados quando comparado a área com quatro ciclos (Figura 8B). O valor para mediana na área com oito ciclos foi 17,49 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, já para a área com quatro ciclos, para o mesmo atributo, o valor para mediana foi 1,52 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$.

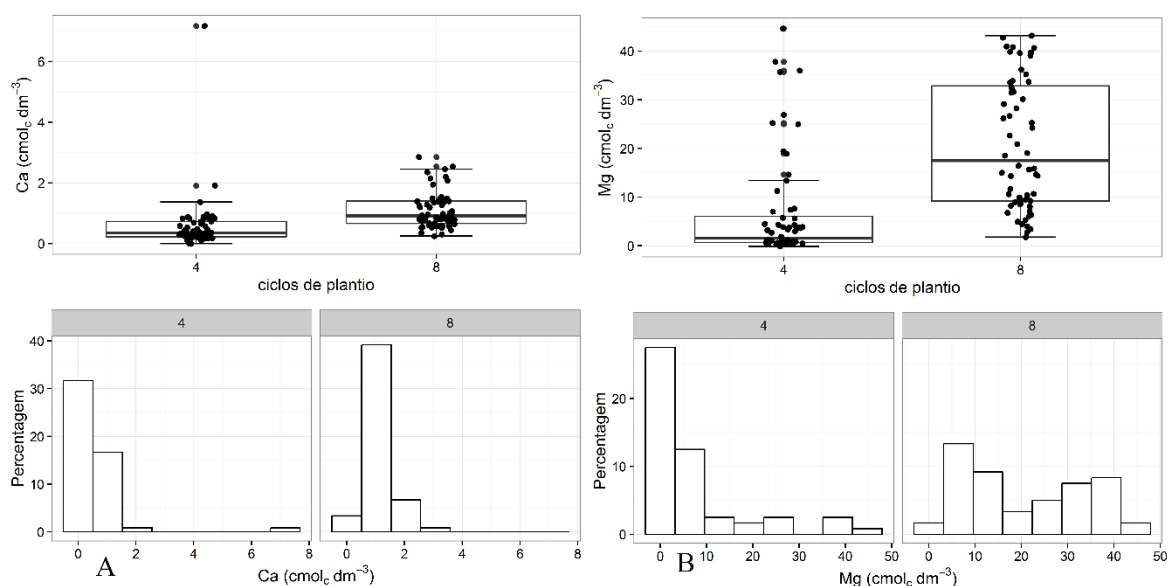


Figura 8. Box plot e histograma de frequência dos atributos Ca (A) e Mg (B) para a camada de 0-20 cm de profundidade em áreas com quatro e oito ciclos de cultivos de abacaxizeiro.

Na Figura 9A o teor de Al apresentou menor variação na distribuição dos dados variando entre 0,5 a 0,8 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ com mediana de 0,66 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ quando comparado com a área com oito ciclos que demonstrou maior variação na distribuição e mediana menor (0,47 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$). Ambas as áreas apresentaram valores discrepantes, sendo que na área com quatro ciclos os valores situaram abaixo da mediana, de modo contrário na área com oito ciclos os valores discrepantes apresentaram-se acima dos valores da mediana. Os teores de H+Al variaram entre 3,9 e 4,5 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ na área com quatro ciclos e com menor amplitude, enquanto que na área A8 os teores variaram 3,7 a 4,5 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ e ambas as áreas apresentaram valores discrepantes (Figura 9B).

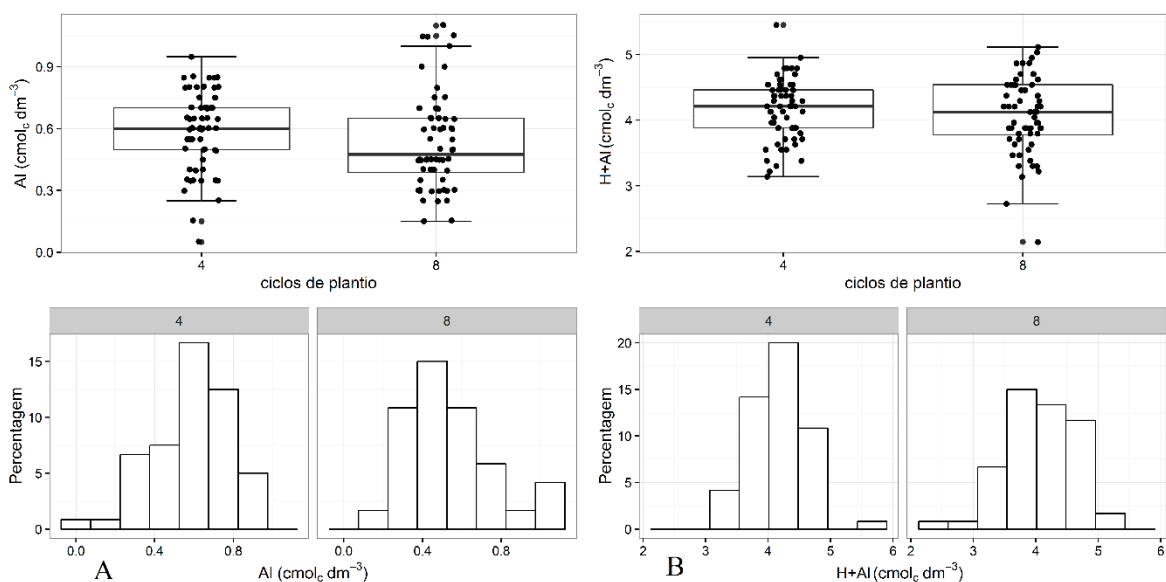


Figura 9. Box plot e histograma de frequência dos atributos Al (A) e H+Al (B) para a camada de 0-20 cm de profundidade em áreas com quatro e oito ciclos de cultivos de abacaxizeiro.

Para os atributos químicos MO, CTC, saturação por bases e soma de bases na área oito ciclos não apresentaram valores discrepantes e demonstraram maiores variações na distribuição dos dados nas variáveis MO, CTC e soma de bases quando comparado a área quatro ciclos, exceção para a saturação por bases (Figuras 10A e 10B; 11A e 11B). Para a área quatro ciclos apenas a variável saturação por bases não apresentou valores discrepantes e obteve maior amplitude em relação a área com oito ciclos (Figura 11A). Os valores para mediana na área com oito ciclos foram 15,68 g Kg⁻¹, 22,44 cmol_c dm⁻³; 82,70 % e 18,6 cmol_c dm⁻³ respectivamente, para os atributos MO, CTC, saturação por bases e soma de bases. Na área com quatro ciclos, para os mesmos atributos, os valores para mediana foram 10,71 g kg⁻¹; 6,32 cmol_c dm⁻³; 35,7% e 2,02 cmol_c dm⁻³, respectivamente (Figuras 10A e 10B; 11A e 11B).

Essa grande amplitude de valores revelou os problemas que podem ocorrer quando se usa a média dos valores dos atributos como base para a tomada de decisão sobre a realização do manejo químico do solo, ou seja, em alguns locais, a dose recomendada de fertilizante ou corretivo estará subdimensionada; em outros, será adequada e, em outros, poderá haver aplicação excessiva de determinado fertilizante ou corretivo (Reis, 2010). Isto resulta em prejuízos econômicos, tanto pela aplicação desnecessária, quanto pelo desequilíbrio entre as quantidades de nutrientes que serão disponibilizados para as plantas, além do efeito deletério que essa prática pode ocasionar sobre o meio ambiente (Corá et al., 2004). Alves et al. (2014) verificaram a existência de pontos com valores bem discrepantes

em relação aos demais, como é o caso dos atributos químicos Al, H+Al (acidez potencial), P, Zn, CTC e saturação por base.

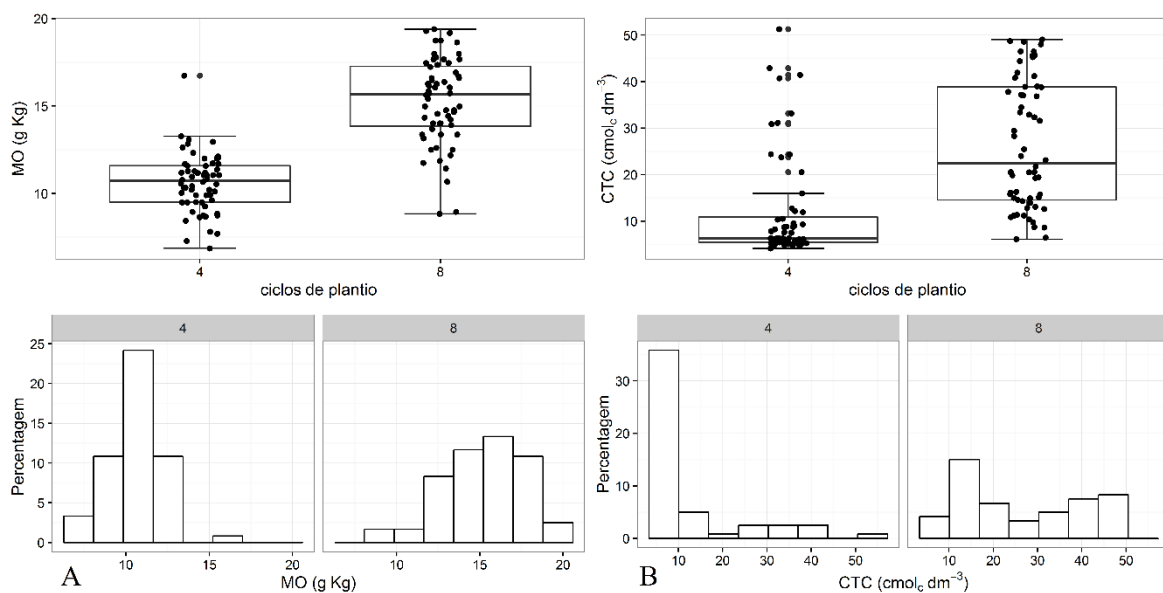


Figura 10. Box plot e histograma de frequência dos atributos MO (A) e CTC (B) para a camada de 0-20 cm de profundidade em áreas com quatro e oito ciclos de cultivos de abacaxizeiro.

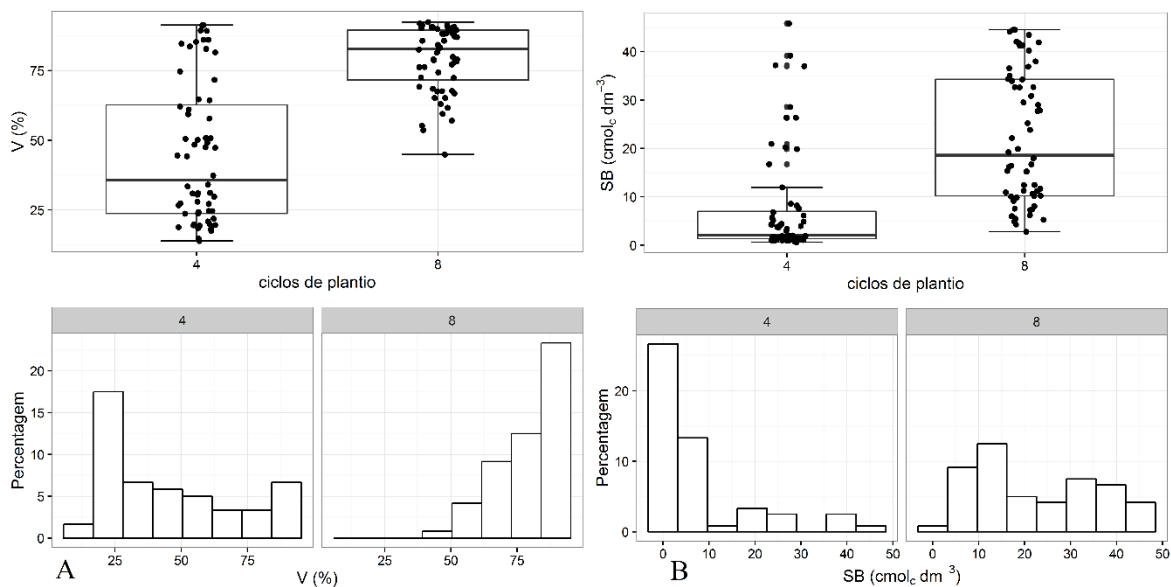


Figura 11. Box plot e histograma de frequência dos atributos V% (A) e SB (B) para a camada de 0-20 cm de profundidade em áreas com quatro e oito ciclos de cultivos de abacaxizeiro.

Quanto à análise de componentes principais (ACP), verificou-se variância acumulada de 71,7% com três primeiros componentes principais (Tabela 2).

Tabela 2. Autovalores e proporção da variância explicada para cada componente dos atributos químicos cultivados com abacaxizeiro ‘Pérola’

Componentes principais	Autovalores	Proporção (%)	Cumulativa (%)
1	5,38	44,8	44,8
2	1,74	14,4	59,3
3	1,49	12,4	71,7

A componente principal 1 é um contraste entre P, Na, Ca, Mg, MO, soma de bases, CTC e saturação por bases que apresentam autovetores positivos, com exceção para o teor de fósforo, com autovetor negativo (Tabela 3). A componente principal 2 é um contraste dos atributos indicadores de acidez do solo H+Al (0,445), Al (0,577), pH (-0,478) e Ca (-0,282) como segundo componente principal da variância dos dados. A componente principal 3 é um contraste entre os atributos fósforo e potássio. Isso mostra, que de 14 variáveis, passaram-se a utilizar três componentes, havendo, redução de dimensionalidade das variáveis originais, com perda de explicação de 28,3%.

Loss et al. (2009) utilizando a análise de componentes principais dos atributos químicos e físicos de um Argissolo Vermelho Amarelo encontraram variância acumulada de aproximadamente 73% para os dois primeiros componentes, sendo que o eixo um foi capaz de explicar 49,54% e o eixo dois; 23,43%. Cunha et al. (2012) analisando os atributos químicos, físicos e biológicos em áreas sob cultivo orgânico e convencional constataram por meio da análise de componentes principais variância acumulada nos primeiros três componentes de 83,5%, tendo o primeiro explicado 52,9% da variância total, o segundo 16,6% e o terceiro 14,0%, dos quais os maiores índices de correlação dos atributos químicos foram MO, K, P e Ca.

Os autovetores entre as variáveis e os componentes principais, nota-se que para a componente principal 1 (Tabela 3) os atributos relacionados a CTC, soma de bases, carbono, saturação por bases e Mg foram aqueles com maior correlação apresentando autovetores positivos, dessa forma, essa componente sofreu influência positiva da fertilidade do solo, uma vez que esses atributos representam a porção fértil do solo. Para a CP2 os atributos que apresentaram maiores correlações foram aqueles relacionados a H+Al, Al, Ca com autovetores positivos e pH com autovetor negativo. Loss et al. (2009) encontraram correlação com o eixo CP1, em que Carbono orgânico total, K e P apresentaram autovetores positivos, enquanto CTC, SB e Ca+Mg apresentaram autovetores negativos observando que a maior parte da variância acumulada é explicada pelas variáveis químicas do solo. Silva et

al. (2010) verificou que o CP1 explicou 42% da variabilidade dos dados e correlacionou-se de maneira elevada e negativa com os atributos químicos pH, K, Ca, Mg, SB, t e V.

Tabela 3. Autovetores de atributos químicos do solo cultivado com abacaxizeiro ‘Pérola’ em três componentes principais (CP1, CP2, CP3)

Atributos químicos	Autovetores		
	CP1	CP2	CP3
pH	0,16	-0,47	-0,03
P (mg dm ⁻³)	-0,21	-0,12	0,57
K (mg dm ⁻³)	0,07	-0,21	0,54
Na (cmolc dm ⁻³)	0,29	-0,03	-0,34
Ca (cmolc dm ⁻³)	0,27	-0,28	0,15
Mg (cmolc dm ⁻³)	0,39	0,18	0,15
Al (cmolc dm ⁻³)	-0,15	0,57	-0,06
H+Al (cmolc dm ⁻³)	0,01	0,44	0,36
MO (g dm ⁻³)	0,33	0,03	-0,09
CTC (cmolc dm ⁻³)	0,39	0,17	0,17
SB (cmolc dm ⁻³)	0,39	0,16	0,15
V (%)	0,38	0,03	-0,05

A matéria orgânica, a soma de bases, Mg, Ca, Mg, saturação por bases e CTC apresentaram maiores valores na área com oito ciclos de cultivo, possivelmente, devido ao maior emprego da adubação realizada nesta área em função do número de ciclos da cultura, favorecendo esses atributos que representam a fertilidade do solo (Figura 12).

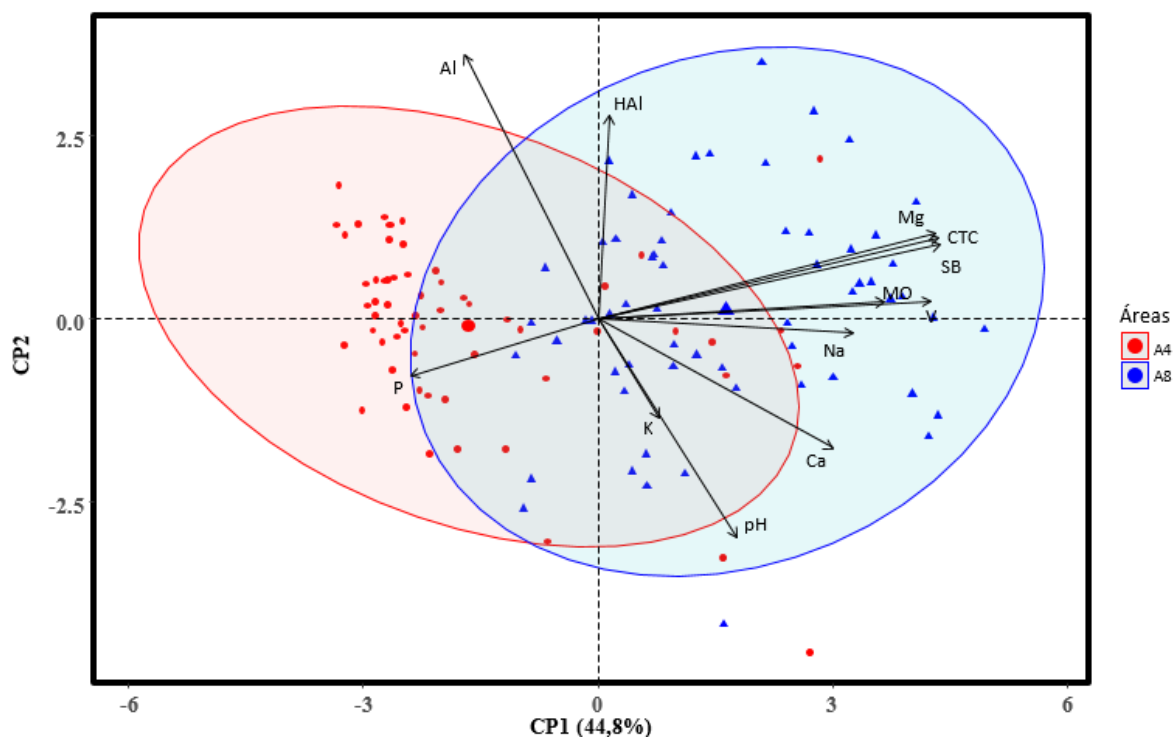


Figura 12. Diagrama de ordenação produzido por análise de componentes principais na camada de 0-20 cm das características químicas em áreas com quatro e oito ciclos de cultivo com abacaxizeiro 'Pérola'.

Os maiores teores de MO, CTC e soma de bases ocorreram, provavelmente, em razão do grande aporte de resíduos orgânicos promovido pelo abacaxizeiro, sendo que nos solos sob cultivos o aumento do consumo do carbono pode ser atribuído ao tipo de sistema de produção e manejo adotados, nos manejos em que o revolvimento do solo é maior ocorre possivelmente uma maior decomposição da matéria orgânica devido a exposição e o fracionamento, isso pode explicar a baixa influência na área quatro ciclos de cultivo, o que favorece ao ataque de microrganismos, tendo sua redução associada ao manejo inadequado do solo, principalmente pela ausência de adubação de manutenção (Jakelaitis et al., 2008). Silva et al. (2010) verificou uma maior influência de atributos relacionado a acidez do solo, pois a primeira componente relacionou de modo positivo com Al, H+Al e saturação por alumínio e de maneira elevada e negativa com pH, K, Ca, Mg, soma de bases, CTC efetiva e saturação por bases.

O solo da área quatro ciclos apresentou o menor valor de pH (4,05) e maiores de Al e H+Al sendo que a cultura cresce e solos com baixa e média acidez do solo (Figura 12), constatando a influência maior da acidez nessa componente, podendo-se dizer que nessa área o cultivo apresenta-se menos propício ao desenvolvimento satisfatório do abacaxizeiro, com valores inadequados dos atributos relacionado com a fertilidade, sendo necessário a aplicação de métodos corretivos do solo e adubações adequadas. Segundo Souza et al. (2007)

reconhece-se que o abacaxizeiro se desenvolve melhor em solos ácidos indicando-se, normalmente, a faixa de pH de 4,5 a 5,5 como a mais recomendada, sendo que, dependendo da variedade cultivada, o mesmo pode se estabelecer em pH abaixo de 4,5. Silva et al. (2010) ressalta que quando os teores de Al^{3+} se elevam, ocorre um menor desenvolvimento radicular das culturas, promovendo a redução da fertilidade do solo, caracterizada pela baixa disponibilidade dos demais nutrientes na área de cultivo.

Por outro lado, o solo da área com quatro ciclos apresentou maiores teores de fósforo (Figura 12). Esse maior acúmulo de fósforo na camada de 0 a 20 cm pode ser explicado possivelmente, devido ao fornecimento das adubações que foram realizadas, de maneira inadequada, provavelmente, tenha sido aplicada em excesso na superfície, principalmente, na área quatro ciclos, ressaltando que os teores de fósforo foram classificados como alto, nesta área, e média na área com oito ciclos, esse fator aliado ao acumulado em menor quantidade pela planta e a baixa mobilidade do fósforo no solo que tende a acumular bem até os 20 cm de profundidade estão em conformidade com o trabalho de Ernani et al. (2001) que constataram um grande acúmulo de fósforo de maneira significativa até 20 cm de profundidade, e verificou que apesar da baixa mobilidade, o fósforo aplicado sobre a superfície transloucou-se alguns centímetros em profundidade, possivelmente pela sua grande concentração em superfície, com provável saturação dos sítios de adsorção.

Os autores destacam que em condições de campo, solos mais cultivados tendem a favorecer uma maior descida do P em profundidade e relatam em virtude da alta concentração de P, as reações de precipitação devem assumir maior importância que as de adsorção química, e demonstram que quando P em solos ácidos (4,7) são incorporados pode haver a adsorção e a formação de precipitados com Fe, Al e Ca.

Badolto et al. (2009) verificaram incremento significativo no acúmulo de P nas folhas do abacaxizeiro quando foi aumentado o quantitativo de matéria orgânica através dos ácidos húmicos. Theodoro et al. (2003) relatam que concorre para obtenção de altos teores de P no solo é o seu suprimento via matéria orgânica, proporcionado com a liberação causada pela elevação do pH, além daquele que foi adicionado pela adubação.

4. Conclusão

Na área manejada com quatro ciclos foi verificada acidez elevada e toxicidade leve por alumínio. Os maiores teores de fósforo e potássio foram encontrados na área com quatro ciclos.

Na área com quatro ciclos foi encontrada acidez potencial média, que associado ao baixo valor do pH e menores teores carbono, matéria orgânica, soma de bases e saturação por bases do solo, revelou maior necessidade de práticas de correção do solo.

Na área com oito ciclos, os maiores teores de matéria orgânico do solo aliado à aplicação de fertilizantes proporcionam maiores teores para a capacidade de troca de cátions, soma de bases, saturação por bases, carbono do solo e pH tendendo a média acidez. Nesta área verificou melhores condições ao cultivo do abacaxizeiro.

A análise de componentes principais permitiu identificar três grupos relacionados com os atributos da fertilidade do solo, da acidez do solo e com os teores de fósforo e potássio.

5. Referência bibliográfica

ALBIERO, D.; MACIEL, A.J. da S.; MILAN, M.; MONTEIRO, L. de A.; MION, R.L. Avaliação da distribuição de sementes por uma semeadora de anel interno rotativo utilizando média móvel exponencial. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 01, p. 86-95, 2012.

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

AMARAL, U. do; MAIA, V. M.; PEGORARO, R. F.; KONDO, M. K. e MAIA, L. C. B. Matéria seca, conteúdo de carbono e nitrogênio em cultivo de abacaxizeiro 'pérola' irrigado. **Interciencia**, v. 40, p. 639-643, 2015.

AULAR, J.; CASARES, M.; NATALE, W. Nutrição mineral e qualidade do fruto do abacaxizeiro e do maracujazeiro. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 36, n. 4, p. 1046-1054, dezembro, 2014.

BARBOSA, F. de A. dos R. Medidas de proteção e controle de inundações urbanas na bacia do rio Mamanguape – PB. 116 f. 2006. **Dissertação** (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa.

BALDOTTO, L. E. B.; BALDOTTO, M. A.; GIRO, V. B.; CANELLAS, L. P.; OLIVARES, F. L. e BRESSAN-SMITH, R. Desempenho do abacaxizeiro 'Vitória' em resposta à aplicação de ácidos húmicos durante a aclimação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 979-990, 2009.

BOER, C. A.; ASSIS, R. L.; SILVA, G. P.; BRAZ, A. J. B. P.; BARROSO, A. L. L.; CARGNELUTTI FILHO, A.; PIRES, F. R. Biomassa, decomposição e cobertura do solo ocasionada por resíduos culturais de três espécies vegetais na região centro-oeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 843-851, 2008.

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 America Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

CAMPOS, M. C. C. Marques Júnior, J.; PEREIRA, G. T. e FREITAS, E. V. de S. Dependência espacial de atributos químicos em área cultivada com cana-de-açúcar em Pereira Barreto, SP. **Revista Ciência Agronômica**, v. 38, n. 4, p. 350-359, 2007.

CARVALHO, J.R.P.; SILVEIRA, P.M. & VIEIRA, S.R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 1151-1159, 2002.

CAVALCANTE E. G. S.; ALVES M. C.; SOUZA, Z. M. de; 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.

CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; FONTOURA, S. M. V.; ALBUQUERQUE, J. A.; WOBETO, C. Acidificação de um latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 4, p. 1055-1064, 2002.

- CODY, R. **An introduction to SAS University Edition**. Cary, NC: SAS Institute Inc. 2015.
- COSTA, F. de S.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; MIELNICZUK, J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 323-332, 2008.
- CORÁ, J. E.; BERVALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo antes e após calagem e fosfatagem em doses variadas na cultura de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n.2, p. 374-387, 2006.
- CORÁ, J. E.; PEREIRA, G. T.; BERVALDO, 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**, v. 28, n.6, p. 1013-1021, 2004.
- CUNHA, E. Q.; STONE, L. F.; FERREIRA, E. P. B.; DIDONET, E. D.; MOREIRA, J. A. A. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo sob produção orgânica impactados por sistema de cultivo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 56-63, 2012.
- EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997. 212p.
- ERNANI, P. R.; STECKLING, C. e BAYER, C. Características químicas de solo e rendimento de massa seca de milho em função do método de aplicação de fosfatos, em dois níveis de acidez. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 939-946, 2001.
- FREDDI, O.S.; CARVALHO, M.P.; VERONESI JÚNIOR, V. & CARVALHO, G.J. Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. **Engenharia Agrícola**, v. 26, p.113-121, 2006.
- JAKELAITIS, A.; SILVA, A. A. da; SANTOS, J. B. dos; VIVIAN, R. Qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 38, p. 118-127, 2008.
- KIEHL, E. J. **Preparo do composto na fazenda**. Casa da Agricultura, Campinas: v.3, n.3, p.6-9, 1981.
- KILIC, K.; KILIC, S.; KOCYIGIT, R. Assessment of spatial variability of soil properties in areas under different land use. **Bulgarian Journal of Agricultural Science**, v.18, p.722-732, 2012.
- KRAUSE, W.; STORCK, L.; LÚCIO, A. D.; NIED, A. H. e GONÇALVES, R. Q. Tamanho ótimo de amostra para avaliação de caracteres de frutos de abacaxizeiro em experimentos com adubação usando parcelas grandes. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 35, p. 183-190, 2013.
- LEONARDO, F. A. P.; PEREIRA, W. E.; SILVA, S. M.; COSTA, J. P. Teor de clorofila e índice spad no abacaxizeiro cv. Vitória em função da adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 35, n. 2, p. 377-383, 2013.

LIMA, H. V.; OLIVEIRA, T. S.; OLIVEIRA, M. M.; MENDONÇA E. S. e LIMA, P. J. B. F. Indicadores de qualidade do solo em sistemas de cultivo orgânico e convencional no Semiárido Cearense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 31, p. 1085-1098, 2007.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; SCHULTZ, N.; ANJOS, L. H. C. dos; SILVA, E. M. R. Atributos químicos e físicos de um Argissolo Vermelho-Amarelo em sistema integrado de produção agroecológica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 68-75, 2009.

MATOS, A. P. de; SANCHES, N. F.; SOUZA, L. F. da S.; ELIAS JUNIOR, J.; TEIXEIRA, F. A. e SIEBENEICHLER, S. C. 2007a. Produção integrada de abacaxi no Tocantins. Proc. **IX Seminário Brasileiro de Produção Integrada de Frutas e I Seminário sobre Sistema Agropecuário de Produção Integrada**. G.R. Nachtigall & S. de S. Sebben, eds. Bento Gonçalves, p. 51-59.

MELLO, G.; BUENO, C. R. P.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial das propriedades físicas e químicas do solo em áreas intensamente cultivadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 294-305, 2006.

NOGARA NETO, F.; ROLOFF, G.; DIECKOW, J.; MOTTA, A.C.V. Atributos de solo e cultura espacialmente distribuídos relacionados ao rendimento do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1025-1036, 2011.

OLIVEIRA, A. M. G.; NATALE, W.; ROSA, R. C. C.; JUNGHANS, D. T. Adubação N-K no abacaxizeiro ‘brs imperial’ - ii - efeito no solo, na nutrição da planta e na produção. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 37, n. 3, p. 764-773, setembro 2015.

PONTES, J. R. V. de; SANTOS, J. A. dos; SILVA, H. da M.; SOUSA, L. S. Estoque de carbono em solos cultivados com abacaxi no sul do Pará. In: III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. **Anais**. IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 19 a 22 de novembro. 2012. p. 1-2.

R Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

REIS, F. C. Variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos de Argissolo sob diferentes usos e ocupação na Microbacia do Córrego Fazenda Glória, Taquaritinga – SP. 58 f., 2010. **Dissertação** (Mestrado). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal-SP.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5. Aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359p.

SANTI, A. L.; AMADO, T. J. C.; CHERUBIN, M. R.; MARTIN, T. N.; PIRES, J. L.; FLORA, L. P. D.; BASSO, C. J. Análise de componentes principais de atributos químicos & físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, p.1346-1357, 2012.

SANTOS, J. C. dos. O uso do agrotóxico: o caso do cultivo de abacaxi no município de Sapé. 56 f., 2013.: **Monografia** (Graduação em Bacharelado e Licenciatura em Geografia) - Universidade federal da Paraíba, João Pessoa.

SILVA NETO, S. P.; SANTOS, A. C.; LEITE, R. L. L.; DIM, V. P.; CRUZ, R. S.; PEDRICO, A.; NEVES NETO, D. N. Análise espacial de parâmetros da fertilidade do solo em região de ecótono sob diferentes usos e manejos. **Semina**. Ciências Agrárias, v. 32, p. 541-552, 2011.

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

SILVA, A. P.; ALVAREZ, V. H.; SOUZA, A. P.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F.; DANTAS, J. P. Sistema de recomendação de fertilizantes e corretivos para a cultura do abacaxi - fertcalc-abacaxi. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n.5, p. 1269-1280, 2009.

SILVEIRA JUNIOR, O.; SANTOS, A. C.; SANTOS, P. M.; ROCHA, J. M. L.; ALEXANDRINO, E. Distribuição espacial de atributos químicos do solo em áreas sob diferentes usos agrícolas. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 22, n. 5, p. 442-455, 2014.

SINGH, V.; SINGH, B.; SINGH, Y.; THIND, H. S. e GUPTA, R. K. Need based nitrogen management using the chlorophyll meter and leaf colour chart in rice and wheat in South Asia: a review. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 88, p. 361-380, 2010.

SIQUEIRA NETO, M.; PICCOLO, M. de C.; SCOPEL, E.; COSTA JUNIOR, C. da; CERRI, C.C; BERNOUX, M. Carbono total e atributos químicos com diferentes usos do solo no Cerrado. **Acta Scientiarum**. Agronomy, v. 31, p. 709-717, 2009.

SNEDECOR G. W, COCHRAN W. G. **The binomial distribution**. In: Snedecor, G. W., Cochran, W. G., eds. *Statistical Methods*. ed. 7. Ames: Iowa State University Press, 1980; 124-128.

SOUZA, Z. M.; ALVES, M. C. Propriedades químicas de um Latossolo Vermelho distroférico de cerrado sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 01, p. 133-139, 2003.

Souza, C. B.; Silva, B. B.; Azevedo, P. V. Crescimento e rendimento do abacaxizeiro nas condições climáticas dos Tabuleiros Costeiros do Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, p.134-141, 2007.

THEODORO, V. C. A.; ALVARENGA, M. I. N.; GUIMARÃES, R. J.; SOUZA, C. A. S. Alterações químicas em solo submetido a diferentes formas de manejo do cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 1039-1047, 2003.

CAPÍTULO II

VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM DOIS CICLOS DE CULTIVO COM ABACAXIZEIRO ‘PÉROLA’

Resumo

A variabilidade dos atributos químicos do solo sofre influências de fatores intrínsecos à formação do solo como também de fatores extrínsecos como as práticas de manejo. O conhecimento sobre tal comportamento permite o uso do solo de maneira mais eficiente. Nesse sentido, objetivou-se nesta pesquisa analisar a variabilidade espacial de atributos químicos de um Argissolo Vermelho Amarelo em áreas com quatro e oito ciclos de cultivo com abacaxizeiro 'Pérola' utilizando técnicas geoestatísticas. Para o efeito, amostras deformadas de solos foram coletadas em malha, com intervalos regulares de 10 m, sendo coletadas amostras em 75 pontos por área de estudo na profundidade de 0-20 cm. Foram determinados os valores de pH, P, K, Na, Ca, Mg, Al, H+Al, MO, CTC_{pH7}, SB e V%. Inicialmente, foram ajustados modelos geoestatísticos para relacionar a variabilidade e as distâncias de separação dos pontos amostrais, utilizados para interpolação por krigagem ordinária. Para a validação dos modelos ajustados, foram escolhidos aleatoriamente 15 pontos amostrais para validação externa e 60 pontos amostrais para a validação interna. Foi calculada a proporção do efeito pepita em relação ao patamar para a determinação do grau de dependência espacial dos atributos químicos do solo. A dependência espacial variou de forte a baixa variabilidade para as áreas com diferentes ciclos de cultivo com abacaxi e possibilitou o mapeamento através de ferramentas geoestatísticas, com exceção do H+Al e da saturação por bases. Os maiores alcances foram 32, 45, 49 e 39 metros apresentados pelo pH, sódio, soma de bases e capacidade de troca de cátions, respectivamente, na área com quatro ciclos de cultivo. O maior alcance na área com oito ciclos foi para o teor de matéria orgânica, correspondente a 70 metros. O teor de alumínio foi o atributo com menor alcance, 18,7 m, na área com oito ciclos. Na área com quatro ciclos, os menores alcances foram para os teores de potássio e magnésio. As formas de uso e manejo empregadas induziram a variabilidade espacial para a maioria dos atributos químicos do solo, sendo maior na área com quatro ciclos de cultivo com abacaxizeiro 'Pérola', evidenciando maior amplitude nos teores dos atributos. Por tanto, a quantidade de ciclos de cultivo do abacaxizeiro é importante para se definir as distâncias entre os pontos amostrais.

Palavras-chave: Preparo do solo; Classe de solo; Geoestatística; Atributos do solo; Amostragem de solo.

Abstract

The variability of the chemical attributes of the soil suffers influences of factors intrinsic to the formation of the soil as well as of extrinsic factors as the management practices. The knowledge about such behavior allows the use of the soil in a more efficient way. In this sense, it was aimed at this research to analyze the spatial variability of chemical attributes of an Ultisol in areas with four and eight cycles of cultivation with pineapple 'pearl' using geostatistics techniques. For this purpose, deformed soil samples were collected in mesh with regular intervals of 10 m and samples were collected at 75 points per study area at the depth of 0-20 cm. The values of PH, P, K, N, Ca, Mg, AL, H + al were determined. , MO, CTCpH7, SB and V%. Initially, geostatistical models were adjusted to relate the variability and separation distances of the sampling points, used for interpolation by ordinary kriging. For the validation of the adjusted models, there were randomly chosen 15 sampling points for external validation and 60 sampling points for internal validation. The proportion of the nugget effect was calculated in relation to the plateau for determining the degree of spatial dependence of the chemical attributes of the soil. Spatial dependence varied from strong to low variability for areas with different pineapple cultivation cycles and enabled mapping through geostatistical tools, with the exception of H + Al and base saturation. The largest ranges were 32, 45, 49 and 39 meters presented by PH, sodium, sum of bases and capacity of exchange of cations, respectively, in the area with four cycles of cultivation. The largest range in the area with eight cycles was for the organic matter content, corresponding to 70 meters. The aluminium content was the attribute with less range, 18.7 m, in the area with eight cycles. In the area with four cycles, the smallest ranges were for the potassium and magnesium levels. The forms of use and management employed induced spatial variability for most of the chemical attributes of the soil, being larger in the area with four cycles of cultivation with pineapple 'Pérola', showing greater amplitude in the levels of the attributes. Therefore, the amount of cultivation cycles of the pineapple is important to define the distances between the sampling points.

Key words: Tillage; Soil class; Geostatistics; Soil attributes; Soil sampling.

1. Introdução

A cultura do abacaxizeiro representa ótimas perspectivas econômica no cenário nacional e também mundial, tendo o Brasil a segunda maior produção de abacaxi no mundo, contudo, a abacaxicultura no Nordeste é incipiente, como é o caso do pólo agrícola no litoral paraibano com esta cultura, e assim, em um cenário cada vez mais competitivo, se faz necessário adotar práticas culturais e novas tecnologias, assim também como, programas de análises que auxiliem numa maior precisão de aplicação e uso desses insumos para obtenção de melhores rendimentos, já que a planta possui características morfológicas que possibilitam a convivência ao clima semiárido, podendo ser produzida nessas áreas sem grandes restrições (Silva et al., 2015).

São solos com baixa fertilidade, entretanto, uma vez já estabelecido o manejo da área a distribuição dos fertilizantes e a exigência nutricional da cultura já pode ser suprida pelo material residual, havendo então a necessidade de georeferenciar as áreas para otimizar e reduzir os custos da adubação.

Um dos pressupostos básicos às técnicas de manejo sítio-específico adotadas na agricultura de precisão é o conhecimento da variabilidade dos atributos do solo, dentre eles os químicos, conhecer e quantificar a variação das propriedades químicas dos solos, tem relativa importância, uma vez que os mesmos são sistemas dinâmicos e abertos e estão em constantes modificações (Silveira Junior et al., 2014; Santi et al., 2012)

Os diversos atributos químicos do solo comportam-se de forma bastante diferenciada ao longo das áreas cultivadas, devido, entre outros fatores, às alterações provocadas pelo manejo agrícola, de forma que, os atributos químicos apresentam maior variação que os físicos em uma área cultivada e, devido a esse fato, o uso de amostragens aleatórias, empregando a média para caracterizar determinado atributo no solo, pode resultar em avaliações inexatas (Silva et al., 2010).

Uma dessas tecnologias que pode ser utilizada é a agricultura de precisão, termo dado para uma forma de gestão das culturas, na qual as áreas de produção são manejadas com a aplicação de insumos em taxas variáveis, visando aumentar a produtividade, melhorar a eficiência da aplicação de corretivos e fertilizantes, otimizar o uso dos recursos e reduzir o impacto da agricultura ao meio ambiente, buscando sanar problemas que podem vir a depreciar a qualidade e a produtividade da lavoura por falta ou excesso de nutrientes essenciais (Corá et al., 2004; Montanari et al., 2008).

Neste novo cenário agrícola, as investigações agronômicas estão explorando o uso de computadores e tecnologias de satélites aplicados como ferramentas em escala de campo,

incluindo monitores georreferenciados de produtividade e dados de sensoriamento remoto (Montezano et al., 2006). A exemplo o uso de ferramentas geoestatísticas capazes de realizar análises mais precisas e específicas considerando sua posição espacial, demonstrando a variabilidade dos atributos no solo.

Estes atributos químicos do solo se comportam de forma bastante diferenciada por apresentarem variabilidade resultante dos processos de formação, além disso, variam conforme as alterações provocadas pelo manejo agrícola e uso das terras, pelas diversas formas de relevo e ainda pelos processos erosivos (Artur et al., 2014; Souza et al., 2008).

O conhecimento das concentrações químicas dos nutrientes no solo é de fundamental importância para qualquer tipo de cultura, pois é fator primordial para a caracterização da fertilidade do solo e do estado nutricional das plantas, que são fatores determinantes da produtividade, mas a avaliação dessas características, mesmo em áreas homogêneas, apresenta variação espacial, mesmo a curtas distâncias, que pode influenciar a produtividade das culturas (Oliveira et al., 2009).

A geoestatística é uma ferramenta utilizada para estudar a variabilidade espacial, possibilitando a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados, considerando a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem (Silva et al., 2003). A coleta de amostras de solo georreferenciadas permite espacializar os atributos químicos, visando identificar zonas com restrições químicas que possam estar limitando o rendimento das culturas, e conseqüentemente, na produtividade da área (Amado et al., 2009).

Atualmente, um manejo no qual as práticas culturais são aplicadas uniformemente, com base na média, considerando a homogeneidade dos fatores de produção em todo o campo, porém, o desconhecimento pontual desses fatores pode proporcionar metas impróprias de produtividade com uso excessivo de insumos, tornando a produção ineficiente com altos custos e danos ambientais (Lima et al., 2010a).

Uma boa parte do erro total gerado nos resultados usados na recomendação de fertilizantes e corretivos é decorrente da amostragem no campo, sendo o restante atribuído a equívocos em análises no laboratório, essa constatação gera a necessidade de se conhecer a variabilidade de cada elemento nutricional, de acordo com o manejo do solo, a profundidade de coleta, entre outros fatores que a possam influenciar, e traçar um plano amostral adequado, segundo essa variabilidade individual, assim, alguns nutrientes necessitam de números maiores de amostras que outros para que se possa conhecer o seu comportamento em relação a uma determinada área (Zanão Júnior et al., 2010).

Apesar do estado da Paraíba ocupar lugar de destaque na produção nacional, ainda não consta como uma realidade a aplicação de técnicas de agricultura de precisão. Estudos sobre a variabilidade espacial do solo em cultivos com abacaxizeiros, podem ajudar a melhorar a eficiência do manejo e o planejamento das práticas agrícolas ao longo dos anos, principalmente, no uso de insumos, fertilizantes e planejamento agrícola.

Objetivou-se com esta pesquisa analisar a variabilidade espacial de atributos químicos de um Argissolo Vermelho Amarelo em áreas com quatro e oito ciclos de cultivo com abacaxizeiro ‘Pérola’ utilizando técnicas geoestatísticas.

2. Material e métodos

2.1. Localização da área experimental

Esta pesquisa foi realizada no município de Itapororoca, PB, no sítio Lagoa de Fora ($6^{\circ}48'38''$ latitude Sul e $35^{\circ}17'48''$ longitude Oeste) em dois pomares cultivados com abacaxi (Figuras 13). Dentre os produtores do município, selecionamos duas áreas com 0,5 hectares com as características para os ciclos de cultivos desejados. A área denominada A4 possui quatro ciclos de cultivos subsequentes, enquanto que a área denominada A8 possui oito ciclos subsequentes.

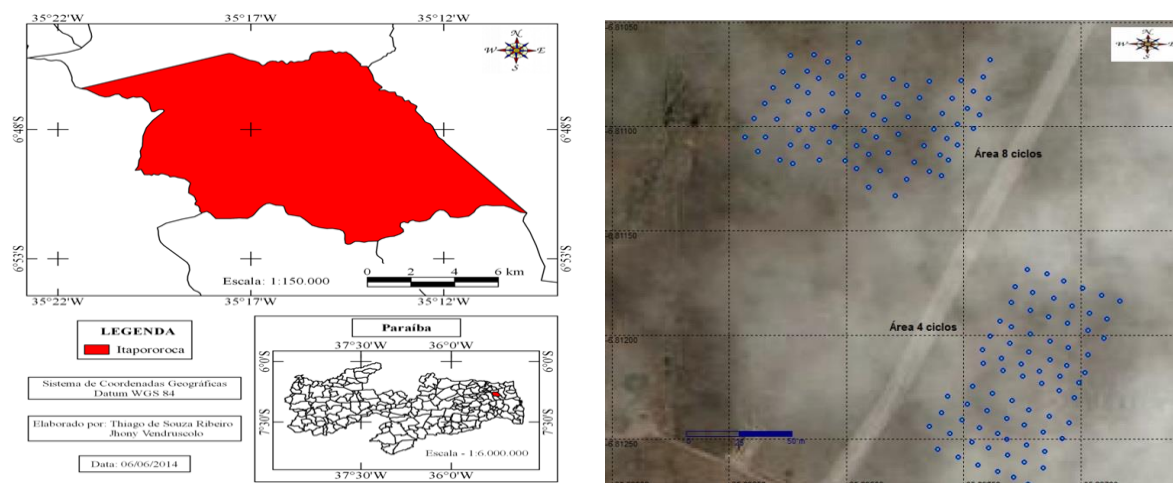


Figura 13. Localização da área experimental com oito ciclos de cultivo de abacaxi no município de Itapororoca, PB. Fonte: Google Earth, 2016.

2.2. Clima

Segundo a classificação de Köppen, predomina o clima do tipo As', caracterizada por ser quente e úmido, com chuvas de outono a inverno, estação seca podendo atingir entre

cinco e seis meses, pluviosidade média anual de 1500 mm, concentradas nos meses de março a agosto e com período seco entre setembro e fevereiro. A umidade relativa do ar, em termos de valores médios anuais, varia de 80 a 85%. A insolação nos meses de janeiro a julho de 7 a 8 horas diárias e nos meses de agosto a dezembro de 8 a 9 horas diárias (Leonardo et al., 2013; Barbosa, 2006).

2.3. Relevo e solos

As áreas selecionadas se inserem na unidade geoambiental litorânea dos Tabuleiros Costeiros. O município possui unidades de mapeamento de solos (AQd, PE12, PV3, NC4), compostos por classes taxonômicas como os Neossolos, Luvisolos e Argissolos Amarelos, no entanto, as áreas onde as amostras foram coletadas situam-se na classe dos Argissolos Vermelho Amarelo eutrófico (Figura 14).

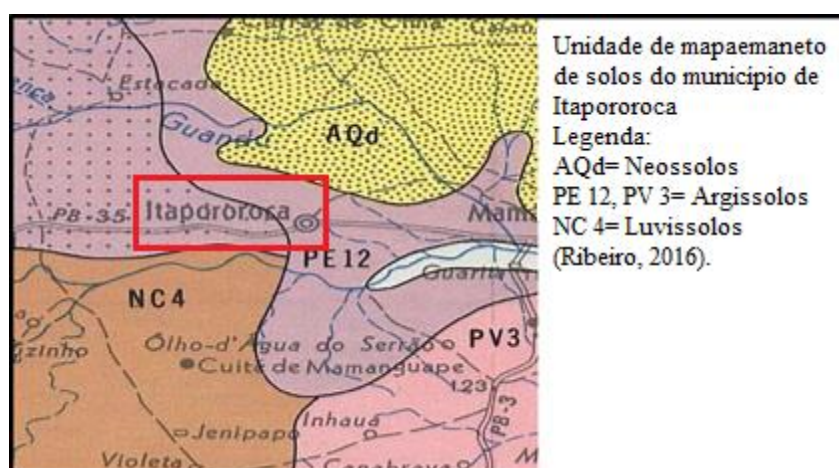


Figura 14. Unidade de mapeamento de solos do município de Itapororoca, PB.

2.4. Histórico do Manejo tradicional nos pomares de abacaxi

A pesquisa foi realizada no município de Itapororoca, mesorregião da Mata Paraibana, pertencente a região dos Tabuleiros Costeiros. Nessa localidade o manejo edáfico para o cultivo com abacaxizais inicia-se pela instalação da lavoura de abacaxi, onde a maior parte dos produtores utiliza a cultivar 'Pérola' por características de melhor aceitação mercadológicas. A instalação da lavoura de abacaxi para a área com quatro ciclos de cultivo ocorreu no mês de novembro de 2014 e para a área com oito ciclos de cultivo com abacaxi, a instalação da lavoura de abacaxi ocorreu no mês de outubro de 2014. Nas áreas cultivadas os terrenos variam de plano a suave ondulado, típico da região e possui características de

serem arenoso e ou argilo arenosos com boa capacidade de drenagem. O processo de seleção das mudas não segue um padrão por tamanho e, geralmente, são utilizadas mudas dos próprios cultivos da área. O preparo do solo consiste em gradagens e arações até 30 cm de profundidade, limpa do terreno e amontoa dos leirões para facilitar o desenvolvimento das raízes. A maior parte dos sistemas de plantio e espaçamento adotados pelos produtores é disposta em fileiras duplas, com espaçamento 0,9 x 0,40 x 0,40 m, totalizando numa densidade de, aproximadamente, 19.200 plantas em 0,5 ha.

Para evitar a incidência de pragas e doenças, os produtores fazem o controle fitossanitário da lavoura de abacaxi, principalmente, a utilização de inseticidas e fungicidas, de modo que o preparo das caldas para a aplicação de produtos químicos ocorre através de pulverizações 60 dias após o plantio de inseticidas registrado para a cultura e para controle de cupim e cochonilha. Para o controle do fusarium é utilizado o fungicida Folicur, pulverizado diretamente na flor na época de frutificação em torno de 35 a 45 dias após a indução floral.

Os controles de plantas daninhas são realizados através de campinas manual com maior intensidade nos primeiros meses após o plantio, para evitar a maior competição com o abacaxi. A depender da intensidade de infestação por plantas infestantes, são necessárias de seis a 12 capinas manuais durante todo o ciclo da cultura.

As adubações realizadas pelos produtores locais consistem no fornecimento dos macronutrientes NPK, pela utilização de formulações comerciais que ocorreram parceladamente, com aplicações que variam de duas a três vezes ao longo do ciclo de cultivo. Normalmente, a primeira aplicação ocorre por volta de 60 dias após o plantio com NPK. Para a segunda e terceira aos 180 e 270 dias após o plantio, respectivamente com N e K. O fósforo é aplicado uma única vez na primeira adubação de cobertura.

Esses procedimentos de manejo do solo e tratos culturais foram os que os produtores das áreas selecionadas realizaram havendo pouca variação entre as áreas de cultivo.

2.5. Amostragem georreferenciada

A amostragem nas áreas com quatro e oito ciclos de cultivo com abacaxi foi realizada entre janeiro e fevereiro de 2015. Foi realizada em malha com espaçamento regular de 10 m entre os pontos nas linhas de cultivo, utilizando-se GPS Garmin GPSMAP 60Csx, sendo amostrada uma área de 0,5 ha. As amostras de solos foram coletadas na profundidade de 0-20 cm.

As amostras de solos foram coletadas nas respectivas áreas após as adubações de reposições para caracterização das mesmas e, antes da indução floral do abacaxi, para as determinações das análises do solo. Em cada ponto de amostragem foram coletadas, com a utilização de um trado, três sub-amostras de solo, na linha de plantio da cultura. Essas sub-amostras foram misturadas para compor uma amostra composta representativa de cada ponto de amostragem, o que totalizou 75 amostras compostas nas áreas com quatro e oito ciclos de cultivo de abacaxi, totalizando 150 amostras compostas. Para avaliação da qualidade da análise semivariográfica dos dados foram escolhidas aleatoriamente 15 pontos amostrais para validação externa e 60 pontos amostrais para a validação interna, correspondentes a 20 e 80 %, respectivamente, dos 75 pontos amostrais em cada área de cultivo (Figura 15).

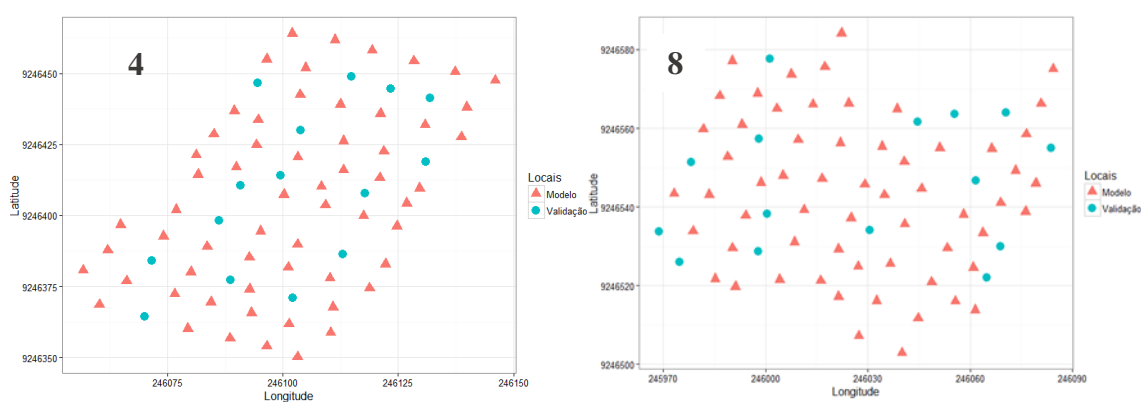


Figura 15. Distribuição espacial aleatória dos pontos selecionados para a validação interna (triângulo) e externa (círculos) na área com quatro e oito ciclos de abacaxizeiro.

2.6. Atributos químicos

As amostras de solos foram coletadas nas respectivas áreas após as adubações de reposições para caracterização das mesmas e, antes da indução floral do abacaxi, para as determinações das análises do solo. Em cada ponto de amostragem foram coletadas, com a utilização de um trado, três sub-amostras de solo, na linha de plantio da cultura. Essas sub-amostras foram misturadas para compor uma amostra composta representativa de cada ponto de amostragem, o que totalizou 75 amostras compostas nas áreas com quatro e oito ciclos de cultivo de abacaxi, totalizando 150 amostras compostas.

Após a coleta, as amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas, peneiradas e masseradas, caracterizando a fração terra fina seca ao ar (TFSA). As análises foram realizadas no Laboratório de Química e Fertilidade do Solo do DSER, CCA, UFPB, Areia, PB. As características químicas avaliadas foram os teores de Ca, Mg, K, Na, Al, H+Al, P; assim como a soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), matéria orgânica

(MO) e saturação por bases (V%). Foram determinados também o pH (1:2,5 em água) de acordo com EMBRAPA (1997).

2.7. Estatística Espacial – Análise da distribuição dos padrões pontuais

As análises estatísticas dos padrões de distribuições de pontos foram realizadas utilizando planilhas eletrônicas e o pacote de software estatístico R, base para o desenvolvimento de métodos formais que checam a significância dos resultados exploratórios. Empregou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov (KS) a 5% de probabilidade para testar a hipótese de normalidade. O modelo teórico mais simples (e bastante aplicado na prática) é conhecido como aleatoriedade espacial completa (“complete spatial randomness - CSR”). Este modelo divide a região de estudo A em subáreas S_i e modela a distribuição de eventos pontuais como um processo aleatório:

$$\{Z_i(u_i), u_i \in S_i : i = 1, \dots, n\}$$

Neste caso, considera-se $Z_i(u_i)$ como o número de eventos que ocorrem na subárea S_i . No modelo CSR, subentende-se que as ocorrências em cada subárea são não correlacionadas e homogêneas, e estão associadas à mesma distribuição de probabilidade de Poisson. Numa visão intuitiva, pode-se considerar que a posição dos eventos é independente e de que os eventos têm igual probabilidade de ocorrência em toda a região A . Isso significa que qualquer evento tem a mesma probabilidade de ocorrer em qualquer posição, e que a posição de qualquer evento é independente da posição do outro, não há interação entre eventos (Câmara e Carvalho, 2004; Carneiro et al., 2005).

Para conduzir todas as análises foram construídas funções utilizando a biblioteca *spatstat* disponível no *software R* (R CORE TEAM, 2016).

2.7. Análises geoestatísticas

Inicialmente, aplicou-se o teste de aleatoriedade espacial completa com finalidade de determinar a estrutura espacial das propriedades químicas do solo (Velasques et al., 2016; Ebert et al., 2016). Os dados foram analisados por meio de estatística descritiva e verificação da normalidade pelo teste de Anderson Darling ($p < 0,05$). Quando não atendida à pressuposição de normalidade os dados foram submetidos à transformação Box-Cox (Meloun et al., 2005).

Para a escolha dos modelos dos semivariogramas, como o gaussiano, exponencial, esférico e Wave, foi utilizado como critério o menor AIC (critério de índice de Akaike).

O modelo gaussiano tem comportamento parabólico perto da origem e aproxima-se ao patamar de forma assintótica, muitas vezes usado para modelar fenômenos extremamente contínuos. A contribuição é representada por C e o alcance prático por A. Sua formulação é dada por:

$$\hat{\gamma}(h) = \left\{ C_0 + C \begin{cases} 0 & h = 0 \\ 1 - \exp\left(-\frac{3h^2}{A^2}\right) & h > 0 \end{cases} \right\}$$

O modelo esférico tem comportamento linear perto da origem e atinge o patamar a uma distância igual ao alcance, denotado por A. A contribuição é denotada por C. Sua formulação é dada por:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C \left[\frac{3h}{2A} - \frac{1h^3}{2A^3} \right] & 0 < h \leq A \\ C + C_0 & h > A \end{cases}$$

O modelo exponencial caracteriza-se por ter um comportamento linear perto da origem. O alcance prático, denotado por A, no qual o valor do semivariograma é igual a 95% do patamar (Carmago e Fuks, 2001).

$$\gamma(h) = \left\{ C_0 + C \begin{cases} 0 & h = 0 \\ 1 - \exp\left(-\frac{3h}{A}\right) & h > 0 \end{cases} \right\}$$

O modelo wave é usado para modelar o comportamento periódico. Esse tipo de fenômeno é encontrado quando há periodicidade nos acontecimentos dos eventos pesquisados com oscilações entre baixa e alta, em caso específico, em concentrações referentes aos atributos dos solos. A equação para o modelo de efeito senoidal é uma combinação do modelo exponencial com um modelo senóide e o gráfico é ligeiramente uma parabólica na origem, embora não tanto quanto o modelo gaussiano que oscila para cima e para baixo em uma onda senoidal que vai posteriormente diminuindo a amplitude. Sua formulação é representada por parâmetros, em que C_0 é o efeito pepita, $C_0 + C_1$ é o patamar, “h” a distância e “a” é o alcance do semivariograma (Smith, 2014).

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

Obtidos o modelo mais adequado, foram encontrados os parâmetros efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C_1$) e o alcance (a). As análises descritas foram realizadas no software SAS University 3.4 (Cody, 2015).

Posteriormente, a interpolação de valores das propriedades do solo foi realizada empregando a krigagem universal. Para o efeito, utilizou-se a biblioteca gstat, disponível no pacote estatístico R (Bivand et al., 2013).

Foi calculado o grau de dependência espacial (GD) que, de acordo com Cambardela et al. (1994) e Zimback (2001), apresenta a seguinte proporção: dependência espacial forte até 25%; dependência moderada para resultados entre 25 até 75%; e dependência espacial baixa para resultados maiores do que 75%. Quando não há dependência espacial, a variável comporta-se de forma aleatória, sendo neste caso caracterizado por um semivariograma com efeito pepita puro, ou seja, o atributo não possui relação com a distância.

$$GD (\%) = \frac{C_0}{C_0 + C_1} \times 100$$

Sendo: GD, grau de dependência espacial; C_0 , efeito pepita; $C_0 + C_1$, patamar; A , alcance do semivariograma em metros (m); Os resultados do GD serão classificados da seguinte forma: Dependência espacial forte ($< 25\%$); Dependência espacial moderada, entre ($25\% < GD \leq 75\%$); Dependência espacial baixa ($> 75\%$).

A validação interna foi realizada através do método *k-fold* (Bivand et al, 2013). Já para validação externa foram utilizados em cada área 15 amostras do conjunto total de pontos, não incluídas nos cálculos da variabilidade espacial. Na validação foram avaliados: o coeficiente de determinação (R^2), erro médio (ME) e raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE).

Uma vez descrita a dependência espacial, as características dos semivariogramas foram usadas na construção de mapas para cada atributo por meio do método de interpolação por krigagem ordinária.

As análises foram realizadas com o software R (R CORE TEAM, 2016) e o PROC VARIOGRAM do software SAS University (Cody, 2015).

3. Resultados e discussão

O teste de probabilidade de Kolmogorov-Smirnov aplicado ao conjunto de dados para verificar a aleatoriedade espacial completa em duas dimensões nas áreas com quatro e oito ciclos de cultivo, apresentaram, respectivamente, valores de $p=0,99$ e $p = 0,85$. Na Figuras 16, podem ser observadas as distribuições espaciais para as áreas com quatro e oito ciclos de cultivo com abacaxizeiro ‘Peróla’, na qual pode-se verificar semelhança na análise da aleatoriedade, de modo que, ocorre um padrão de regularidade na distribuição espacial do atributo fósforo em ambas as áreas até uma distância de aproximadamente sete metros.

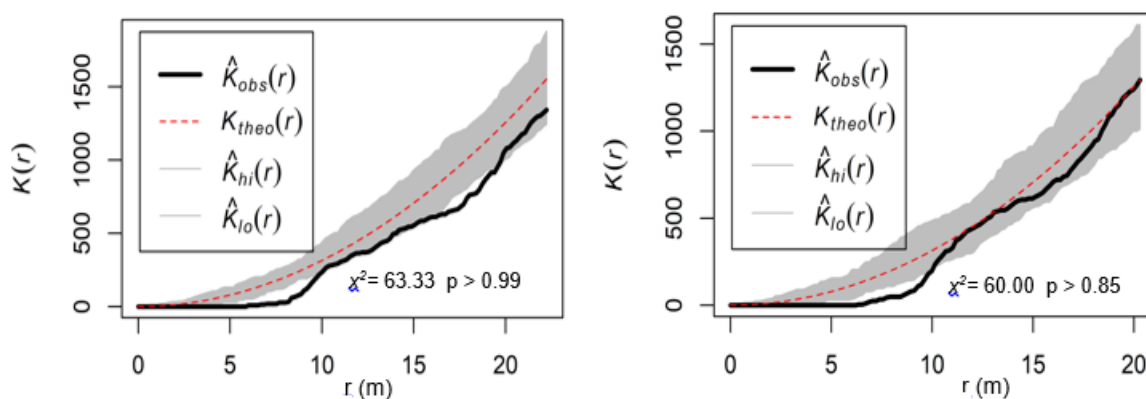


Figura 16. Valores de K em função da distância (r) nas áreas com quatro e oito ciclos de cultivo com abacaxizeiro ‘Pérola’.

Posteriormente, verifica-se que aumento acentuado para distâncias maiores a 10 metros, atribuindo-se uma tendência de características de agrupamento dos eventos a partir dessa distância. Esse resultado é corroborado por Câmara e Carvalho (2004) que afirmaram que se o dado apresenta tendências para agrupamentos, os traçados no gráfico estarão acima da linha de 45 graus, ao passo que para padrões de regularidade os traçados ficarão abaixo da linha de 45 graus. Se um padrão de eventos pontuais apresentarem desvios significativos do comportamento esperado para uma distribuição de Poisson, isto indica a existência de uma distribuição espacial diferente da completa aleatoriedade, que merece ser objeto de maior análise (Câmara e Carvalho, 2004).

Em relação às distâncias mínimas e máximas (envelope) nas Figuras 20 e 21, verifica-se que os valores observados para os teores de fósforo em ambas as áreas estão dentro do intervalo do envelope, portanto, pode-se afirmar que os mesmos apresentam padrão espacial aleatório. Silva et al. (2009) afirmam que quando os valores observados

estão dentro da margem dos envelopes, o padrão espacial é aleatório. Para os valores fora dos envelopes, se forem positivos, o padrão é agregado ou agrupado, se os valores são negativos o padrão é regular.

Foi encontrada correlação espacial em 11 dos 12 atributos químicos do solo (Tabela 4). O modelo “wave” foi o que se ajustou melhor para os semivariogramas experimentais na área com quatro ciclos de cultivo para os atributos químicos pH, P, Na, Ca, Al, MO, soma de bases, CTC e saturação por bases, enquanto que o K e Mg se ajustaram ao modelo potencial (Tabela 4).

Tabela 4. Estimativas dos parâmetros dos modelos dos semivariogramas ajustados para os atributos químicos do solo em área com quatro ciclos de cultivo de abacaxizeiro cv. ‘Pérola’ nas profundidades 0-20 cm

Atributos químicos	C ₀	C ₀ + C ₁	A (m)	Modelo	GD (%)
pH	0,056	0,075	32,3	Wave	75
P (mg dm ⁻³)	0,057	0,089	22	Wave	64
K (mg dm ⁻³)	0,079	0,0790048	2	Pot	99
Na (cmolc dm ⁻³)	11325	13407	45,1	Wave	46
Ca (cmolc dm ⁻³)	0,066	0,126	19,2	Wave	52
Mg (cmolc dm ⁻³)	0	0,00084	1,8	Pot	0
Al (cmolc dm ⁻³)	0,0083	0,0105	16,7	Wave	79
H+Al cmolc dm ⁻³)			Efeito pepita puro		
MO (g dm ⁻³)	2,18	2,54	17,8	Wave	86
CTC (cmolc dm ⁻³)	0	0,18	39,3	Wave	0
SB (cmolc dm ⁻³)	0	1,14	49,0	Wave	0
V (%)	0	398,89	37	Wave	0

C₀=Efeito pepita, C₀+C₁=Patamar, a=Alcance, GD= Grau de Dependência Espacial, Exp= Exponencial, Pot= Potencial.

Na área A8 o modelo “wave” se ajustou aos atributos pH, P, Ca, Mg, soma de bases, CTC e saturação por bases, os demais atributos foram ajustados aos modelos esférico, exponencial e gaussiano (Tabela 5). Carvalho et al. (2002) em pesquisa sobre a variabilidade espacial de características químicas do solo constataram ajustes esféricos, exponencial e gaussiano para os atributos químicos sob diferentes preparos e profundidades. Lima et al. (2014) ajustaram os dados ao modelo “wave” apenas para o atributo Ca os demais atributos químicos se adequaram aos modelos esféricos e exponencial.

Tabela 5. Estimativas dos parâmetros dos modelos dos semivariogramas ajustados para os atributos químicos do solo em área com oito ciclos de cultivo de abacaxizeiro cv. ‘Pérola’ nas profundidades 0-20 cm.

Atributos químicos	C₀	C₀ + C₁	A (m)	Modelo	GD (%)
pH	0	0,017	26,1	Wave	0
P (mg dm ⁻³)	0,052	0,075	24,8	Wave	69
K (mg dm ⁻³)	312,42	387,24	33,3	Wave	81
Na (cmolc dm ⁻³)	19427	34551	28,8	Exp	56
Ca (cmolc dm ⁻³)	0,31	0,363	26,5	Wave	85
Mg (cmolc dm ⁻³)	90,61	153,09	25,4	Wave	59
Al (cmolc dm ⁻³)	0,046	0,0509	18,7	Esf	90
H+Al (cmolc dm ⁻³)			Efeito pepita puro		
MO (g dm ⁻³)	1,89	7,07	69,9	Gau	21
SB (cmolc dm ⁻³)	95,11	161,01	25,4	Wave	59
CTC (cmolc dm ⁻³)	0	64,21	26,0	Wave	0
V (%)	51,21	58,15	27,1	Wave	47

C₀=Efeito pepita, C₀+C₁=Patamar, a=Alcance, GD= Grau de dependência espacial.

Nascimento (2014) obteve ajuste do modelo “wave” para as variáveis pH e Al em pesquisa sobre atributos químicos em solo sob cultivo remanescente de área industrial. Frade et al. (2015) em pesquisa sobre atributos físico-químicos de uma estação experimental por meio de métodos multivariados e espaciais escolheram o modelo “wave” em vista do seu melhor ajuste as semivariâncias experimentais quando comparados aos modelos gaussiano, esférico e exponencial.

O modelo “wave” ou “hole effect” geralmente, se ajustam a fenômenos que se caracterizam por serem periódicos, essa periodicidade representa a repetição da variabilidade em pequenas distâncias, o que resulta, geralmente, em valores de alcance (a) inferiores aos demais modelos de ajuste e esse efeito pode aparecer em modelos com ou sem patamar (Gregor et al., 2011; Carvalho et al., 2009). Nesta pesquisa, esta periodicidade, pode estar relacionada com as práticas de manejo do solo com grade e arados até a profundidade de 30 cm, elaborada antes de cada plantio e as adubações que são realizadas regularmente durante os ciclos consecutivos de cultivo com abacaxizeiro.

Dos atributos que apresentam dependência espacial, quatro foram classificados com forte dependência espacial (efeito pepita $\leq 25\%$ do patamar) para Mg, SB, CTC e V% na área com quatro ciclos de cultivo e para a área com oito ciclos de cultivo houveram

dependência para as variáveis pH, MO e CTC (Tabelas 4 e 5). Com exceção do H+Al para as duas áreas analisadas em que apresentou efeito pepita puro, não se ajustando a nenhum modelo teórico, os demais atributos químicos apresentaram grau de dependência espacial moderado (efeito pepita entre 26-75% do patamar). Apenas as variáveis K e MO apresentaram dependência espacial baixa (99 e 86%) na área quatro ciclos de cultivo (Tabela 4). Na área com oito ciclos de cultivo os atributos K, Ca e Al apresentaram dependência espacial baixa com valores superior a 75% (Tabela 5), ou seja, para estes atributos com alta variabilidade a distância máxima de 10 metros entre cada ponto coletado não foi suficiente para identificar dependência espacial.

Os atributos químicos do solo tendem a apresentar maiores variações, possivelmente, em função da interferência antrópica, como o emprego de práticas agrícolas constantes, características essas de cultivos convencionais (Lima et al., 2014). Lima et al. (2010) verificaram efeito pepita puro para os atributos Ca, Mg, SB, V e CTC, segundo os autores a ausência total de dependência espacial para distâncias maiores que a menor distância adotada entre as amostras significa que o alcance é menor que o menor espaçamento adotado para a análise dos atributos em questão. Silva Neto et al. (2011) verificaram grau de dependência espacial variando de forte a moderado para os atributos de fertilidade química sob diferentes usos e manejo.

O alcance é de fundamental importância para a interpretação dos semivariogramas, com o conhecimento do alcance da dependência espacial, define-se o raio de amostragem, ou seja, os pontos localizados numa área de raio igual ao alcance são mais parecidos entre si do que com aqueles localizados fora desta área. (Carvalho et al., 2002; Lima et al., 2010a).

As variáveis apresentaram diferentes alcances nas profundidades de 0-20 cm para os atributos químicos em ambas as áreas. Na área com quatro ciclos de cultivo, os maiores alcances foram 32,3; 45,1; 49 e 39,3 metros apresentados pelos atributos pH, Na, soma de bases e CTC, respectivamente (Tabela 4). Esses alcances foram superiores aos encontrados na área oito ciclos de cultivo para os mesmos atributos e profundidade. Os teores de fósforo, Ca, Al e MO obtiveram valores de alcance variando de 16,7 a 22 metros para área com quatro ciclos de cultivo que, de maneira geral, estão abaixo do intervalo dos valores de alcance para a área com oito ciclos de cultivo (Tabelas 4 e 5). Os menores alcances foram atribuídos ao K e Mg sendo 2 e 1,8, respectivamente (Tabela 4). Em relação a alta variabilidade do K na área com quatro ciclos, possivelmente, a grande quantidade de K que é aplicado ao solo via adubação para suprir a alta demanda desse nutriente pelo abacaxizeiro, proporciona alta variabilidade do K na área com quatro ciclos, que segundo Carvalho et al. (2002) não deve estar relacionada somente às linhas de adubação, mas também, à localização das plantas,

pois esse elemento não forma compostos orgânicos no tecido das plantas, e é facilmente transportado da parte aérea para o solo, após uma chuva, por exemplo. Segundo Lunardi Neto (2006) um efeito a ser considerado na variabilidade é o deslocamento do K da fase sólida para a solução através da ação de massas, principalmente através da adição de Ca e Mg oriundos, possivelmente, de um corretivo do solo, que somado aos altos índices de precipitação o que favoreceria a perda de K por lixiviação.

Na área com oito ciclos o menor alcance amostral foi verificado para o Al (18,7 m), o valor de alcance com maior amplitude foi constatado para a matéria orgânica com aproximadamente 70 metros de raio, valor este bem superior em relação ao alcance na área quatro ciclos (17,8 m). Os demais atributos químicos obtiveram alcances variando entre 21,6 e 33,3 metros (Tabela 5). Valores para distâncias superiores aos encontrados nesta pesquisa são considerados de distribuição aleatória e a única estatística aplicável é a estatística clássica. Entre os atributos de fertilidade vale destacar aquele que relaciona a MO com o manejo e a produtividade.

A influência da MO sobre a produtividade e a importância desta aos solos sob cultivos intensos é demonstrada a partir disponibilidade de parte dos nutrientes às plantas aliado a realização das adubações de reposição (Montezano et al., 2006). O manejo do solo, principalmente relacionado à adição de matéria orgânica, é muito importante para a manutenção dos nutrientes no solo e também das condições físicas durante o preparo do solo (Lima et al., 2014).

Segundo Frade et al. (2015) os pontos situados numa zona de raio menor ou igual ao alcance são mais semelhantes, pois dependem uns dos outros no espaço e podem ser usados para estimar valores em locais próximos, não amostrados. Os mesmos autores encontraram maiores valores de alcance para o K e a MO (77,55 m), sendo de 13,73 m para os atributos químicos Ca, Mg, CTC e P e o Na com 40,78 metros. Souza et al. (2004) constataram valores de alcance para a MO de 77 m, valor este próximo ao dessa pesquisa.

De acordo com os resultados da validação interna para os valores de R^2 , a maioria dos atributos químicos na área com quatro ciclos estiveram abaixo de 0,4. Apenas o sódio (Na) apresentou valor de R^2 acima de 0,4. Na área com oito ciclos, os atributos pH (0,55), Mg (0,60), SB (0,61), CTC (0,62) e V% (0,70) apresentaram valores acima de 0,4. Os demais atributos na área com oito ciclos apresentaram valores abaixo de 0,4 (Tabela 6). Para a validação externa os atributos químicos na área com quatro ciclos apresentaram comportamento semelhante ao da validação interna, porém com exceção ao pH que apresentou valor R^2 acima de 0,4, os demais atributos obtiveram valores abaixo de 0,4. Já na

área com oito ciclos a validação externa dos atributos Mg (0,75), Al (0,74), soma de bases (0,75), CTC (0,76) e V% (0,71) obtiveram valores de R^2 acima de 0,4.

Embora para a maioria dos atributos químicos tenham apresentado valores abaixo de 0,4 os erros de predição para a maioria foram baixos concordando com Sánchez (2010) que encontrou valores de R^2 abaixo de 0,4 para a validação interna pH, P, Na, H+Al, CTC nas profundidades de 0 a 10 e 10 a 20 cm. Alguns atributos químicos na área com quatro e oito ciclos de cultivo apresentaram valores negativos para o parâmetro erro médio na validação interna, que segundo Sánchez (2010) indicam, de modo geral, que os valores preditos podem ter sido subestimados em relação a área de estudo. Segundo Paz-Gonzales et al. (2001), esses resultados podem estar relacionados com o fato de alguns atributos não seguirem uma distribuição normal, que apesar de não ser um critério obrigatório, proporciona melhores resultados de estimação.

Tabela 6. Resultados das validações internas e externas modelos espaciais dos atributos químicos do solo na profundidade 0-20 cm.

Atributos químicos	Validação interna**			Validação interna**			Validação externa*			Validação externa*		
	Quatro ciclos de cultivo			Oito ciclos de cultivo			Quatro ciclos de cultivo			Oito ciclos de cultivo		
	R ²	EM	RQEQ	R ²	EM	RQEQ	R ²	EM	RQEQ	R ²	EM	RQEQ
pH	0,24	-1,67e-05	0,012	0,55	0,0013	0,24	0,50	0,03	0,24			
P mg dm ⁻³	0,34	-0,0011	0,27	0,39	-0,0015	1,27	0,33	0,14	4,17	0,01	0,37	1,08
K mg dm ⁻³	0,14	0,00054	0,33	0,27	-0,066	23,94	0,33	12,66	59,36	0,23	-3,11	23,90
Na cmolc dm ⁻³	0,62	1,25	130,58	0,38	0,99	168,78	0,39	2,62	111,65	0,38	-138,18	497,89
Ca cmolc dm ⁻³	0,26	0,0012	0,21	0,23	-0,0008	0,57	0,36	0,02	0,21	0,38	-0,36	1,00
Mg cmolc dm ⁻³	0,36	0,041	1,75	0,60	0,003	10,43	0,12	26,7	64,0	0,75	-0,97	8,29
Al cmolc dm ⁻³	0,20	-0,0003	0,12	0,04	-1,22e-05	0,23	0,03	0,003	0,14	0,74	0,06	0,22
MO g dm ⁻³	0,13	-0,00014	0,15	0,39	-0,022	2,25	0,11	0,004	1,89	0,13	0,92	1,90
CTC cmolc dm ⁻³	0,36	0,047	1,24	0,62	0,043	10,65	0,09	21,90	47,38	0,76	-1,92	8,70
SB cmolc dm ⁻³	0,18	0,59	19,26	0,61	0,0013	10,66	0,05	11,10	21,65	0,75	-1,38	8,62
V%	0,39	1248,47	238991,41	0,70	-0,021	8,26	0,05	32,45	61,22	0,71	-1,48	8,19

R²: coeficiente de determinação; EM: erro médio; RQEQ: raiz quadrada do erro quadrático. **80% dos dados; * 20% dos dados.

Constatou-se, para a maioria dos atributos avaliados, dependência espacial, sendo possível, desta maneira, realizar a interpolação de valores em qualquer direção no campo, através de mapas temáticos pelo método de krigagem. Os mapas de distribuição obtidos por meio da interpolação dos dados, pelo método da krigagem ordinária, são fundamentais na avaliação da produtividade dos solos de áreas agrícolas, esses mapas gerados possibilitam o manejo adequado e a localização de problemas, possibilitando sugerir práticas ao agricultor segundo as necessidades apresentadas, bem como a aplicação de insumos a taxas variáveis, na tentativa de solucioná-los promovendo assim, uma otimização na distribuição desses nutrientes no solo (Carvalho et al., 2002; Lima et al., 2010).

Observou-se a partir dos mapas gerados que é possível verificar uma grande amplitude dos valores dos atributos químicos analisados para duas áreas com diferentes ciclos de cultivo com abacaxi, essa variação demonstra os problemas que podem ocorrer quando se adota a média dos resultados de análises químicas para o manejo agrícola da fertilidade do solo.

3.1. pH

Na Figura 17, estão a distribuição espacial do pH nas áreas quatro e oito ciclos de cultivo, no qual observa-se que há uma distribuição mais homogênea na área quatro ciclos com valores variando entre 4,2 a 4,8 com moderada dependência espacial (Figura 17A). Na área oito ciclos houve uma maior variabilidade do pH com metade da área, a oeste, com ocorrência de valores entre 5,0 a 5,8 e outra metade, a leste, com valores entre 4,2 a 5,0 (Figura 17B). Montezano et al. (2006) encontraram valores de pH com média de 4,83 avaliando a variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada e manejada homogeneamente em Latossolo. Carvalho et al. (2002) verificaram que o pH apresenta baixa variabilidade nos três sistemas de preparo arado, grade e plantio direto e em duas profundidades de 0 a 5 cm e 5 a 20 cm Latossolo Vermelho-Escuro distrófico. Lima et al. (2010) avaliando a variabilidade espacial de atributos químicos de um Argissolo Vermelho-Amarelo obtiveram valores médios para o pH de 4,7. Os valores de pH abaixo de 5,5 podem apresentar algumas características indesejáveis nas áreas agrícolas pois diminuem a atividade de decomposição do material orgânico, favorece a ocorrência do alumínio trocável e assim também como a solubilização de compostos a base de ferro e alumínio.

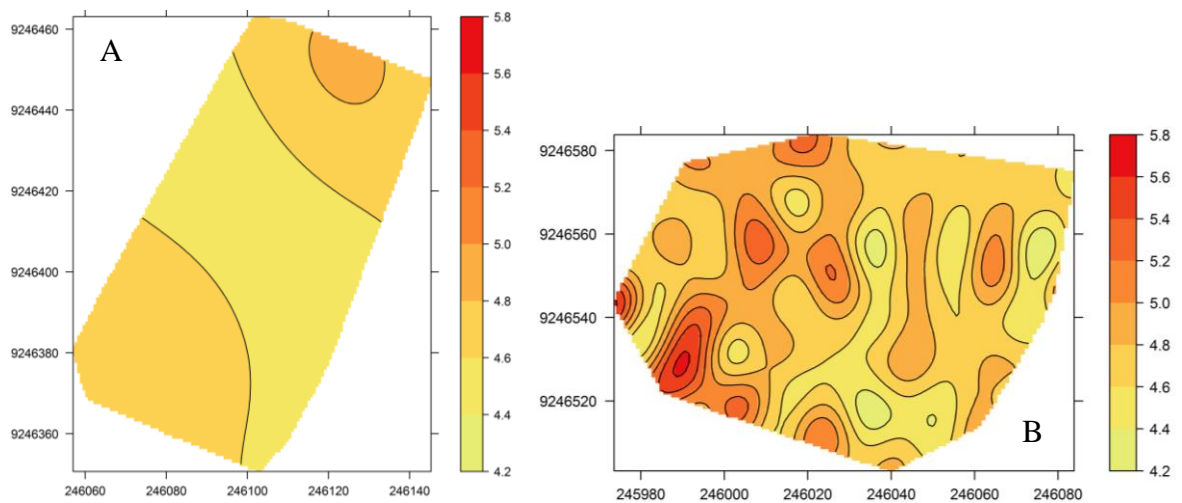


Figura 17. Mapa de distribuição do pH em áreas de Abacaxizeiro com quatro (A) e oito (B) ciclos de cultivo na profundidade de 0-20 cm.

3.2. Fósforo (P)

Na Figura 18, está a distribuição espacial dos teores de fósforo para as áreas com quatro e oito ciclos de cultivo. Na área com oito ciclos verifica-se uma variação na distribuição do fósforo entre 4 a 8 mg dm⁻³ apresentando uma concentração nesse teor menor que na área com quatro ciclos, que por sua vez apresentou uma distribuição dos teores de fósforo variando de 12 a 18 mg dm⁻³ (Figura 18 A e B). Existe grande variação quanto à dependência espacial das propriedades químicas no solo conforme o método de preparo e profundidade, no caso do fósforo, essa variabilidade entre as áreas de cultivo pode ser explicada por sua baixa mobilidade no solo (Carvalho et al., 2002). Manzione et al. (2011) constataram baixa variância para o fósforo e atribuiu esse resultado devido a ocorrência do baixo teor desse elemento no solo em função do consumo pelos cultivos. Lima et al. (2014) não encontraram dependência espacial para os teores de fósforo, no entanto, discorrem que o fósforo é um elemento químico essencial ao crescimento das plantas e possui uma característica peculiar quanto à sua necessidade no plantio, tal elemento é pouco disponível em solos do Brasil e é extremamente reativo, desta maneira, tende a reagir quando aplicado ao solo formando compostos de baixa solubilidade, ao contrário dos demais nutrientes, a adubação com fósforo assume, portanto, a particularidade de se ter que aplicar uma quantidade maior do que aquela exigida pelas plantas haja vista que, primeiro, se torna necessário satisfazer a exigência do solo para após atender a demanda das plantas.

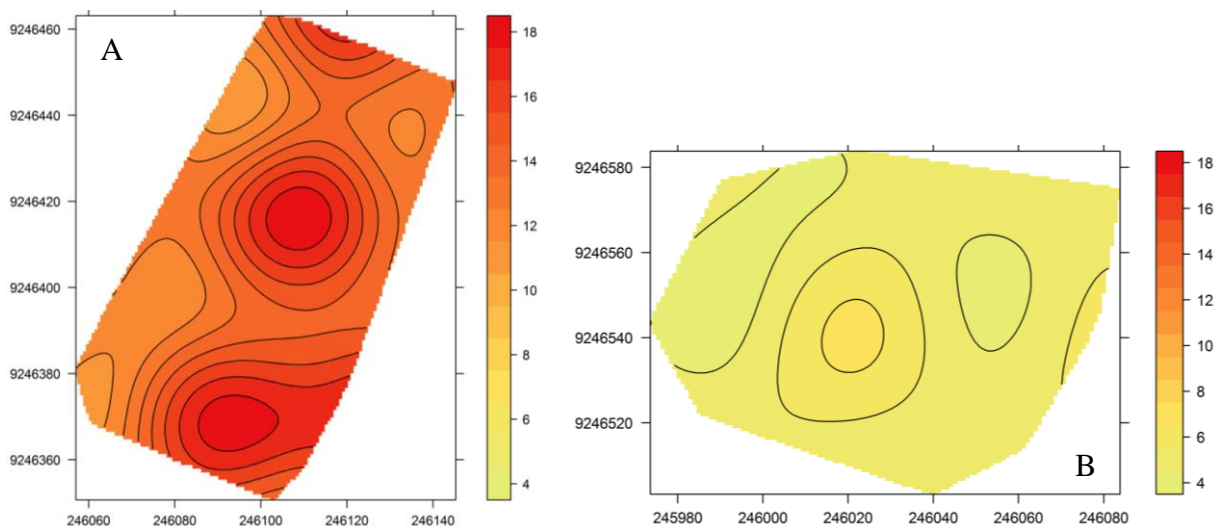


Figura 18. Mapa de distribuição do teor de P (mg dm^{-3}) em áreas de abacaxizeiro com quatro (A) e oito (B) ciclos de cultivo na profundidade de 0-20 cm.

3.3. Magnésio (Mg) e Cálcio (Ca)

Nas Figuras 19 e 20 tem-se a distribuição espacial dos teores de Mg e Ca, respectivamente. De modo geral, os teores para esses elementos são menores na área com quatro ciclos quando comparado com a área com oito ciclos. Na área quatro ciclos verificam-se semelhanças na distribuição dos teores de Mg e Ca, demonstrando uma maior variabilidade e uma concentração dos menores teores para esses elementos na parte central da área (Figuras 19A e 20A). Lima et al. (2014) também constataram maior variabilidade para o Ca em área sob pastagens em Argissolo Vermelho Amarelo, e atribuíram esses resultados em função da aplicação de calcário de modo pontual sobre a área, de modo que, o teor de cálcio ora elevada nesses pontos e ora muito baixa nas demais localidades, como ocorre com os demais atributos químicos do solo.

Na área com oito ciclos, a distribuição dos teores de Mg e Ca mostram-se mais semelhantes, concentrando-se na parte superior do mapa, que corresponde a parte mais baixa do terreno na área (Figuras 19B e 20B). Possivelmente, nesse caso, um dos fatores que poderiam estar influenciando seria a declividade do terreno, nesse sentido e de acordo com as pesquisas de Souza et al. (2008) que verificaram que os maiores valores para o Ca e Mg foram observados na parte inferior da área de cultivo sob um Argissolo Vermelho Amarelo, atribuindo essa tendência a fatores como a declividade do terreno uma vez que ela favorece o arraste superficial de partículas do solo no escoamento da água de chuva. Spiazzi (2011) afirma que normalmente ocorre deficiência de cátions básicos como o Ca e Mg em

decorrência das perdas desses atributos por lixiviação. Lima et al. (2014) também encontraram distribuição mais homogênea para Ca e Mg apresentando forte dependência espacial.

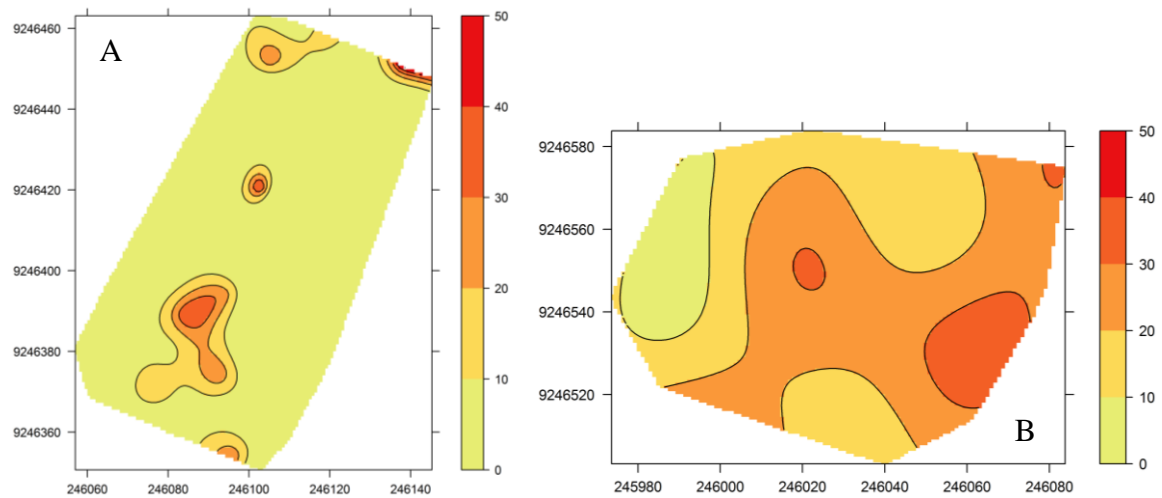


Figura 19. Mapa de distribuição do teor de Mg ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) em áreas de abacaxizeiro com quatro (A) e oito ciclos (B) de cultivo na profundidade de 0-20 cm.

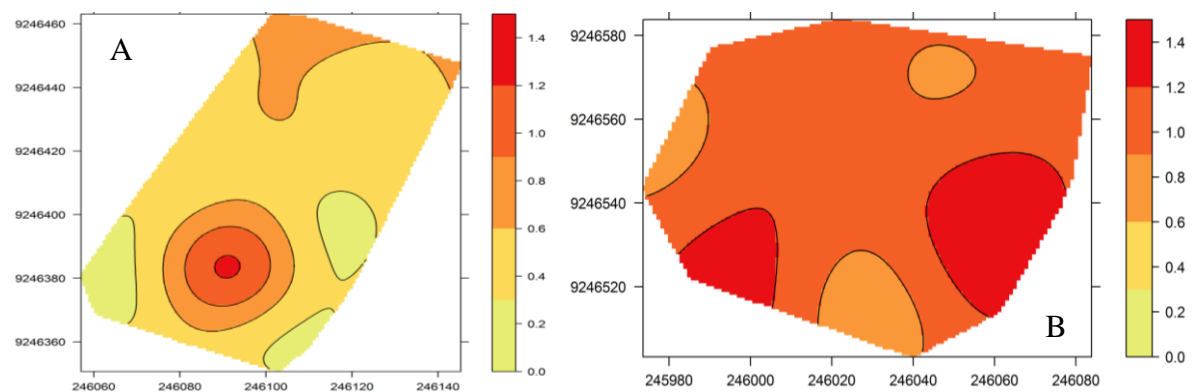


Figura 20. Mapa de distribuição do teor de Ca ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) em áreas de abacaxizeiro com quatro (A) e oito ciclos (B) de cultivo na profundidade de 0-20 cm.

3.4. Sódio (Na)

O sódio (Na) está distribuído espacialmente para as áreas com quatro e oito ciclos de cultivo, respectivamente (Figuras 21A e 21B). Verificou-se que na área com quatro ciclos os teores de sódio apresentaram maiores amplitudes de valores variando desde 0 até 650 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ quando comparado com a área com oito ciclos. Na área com oito ciclos de cultivo houve maior teor de sódio em relação a área com quatro ciclos, os maiores valores concentraram-se na parte inferior da área (Figura 21B), apresentando tendência semelhante

aos atributos Mg e Ca. Esses resultados estão superiores aos encontrados por Vieira et al. (2012) que atribuiu o caráter solódico a dois tipos de Argissolos Amarelo e outro Acinzentado. Os mesmos autores atribuíram essa característica de acúmulo de sódio até a profundidade 20 cm devido ao caráter coesos dos solos ocorrentes na região dos Tabuleiros Costeiros.

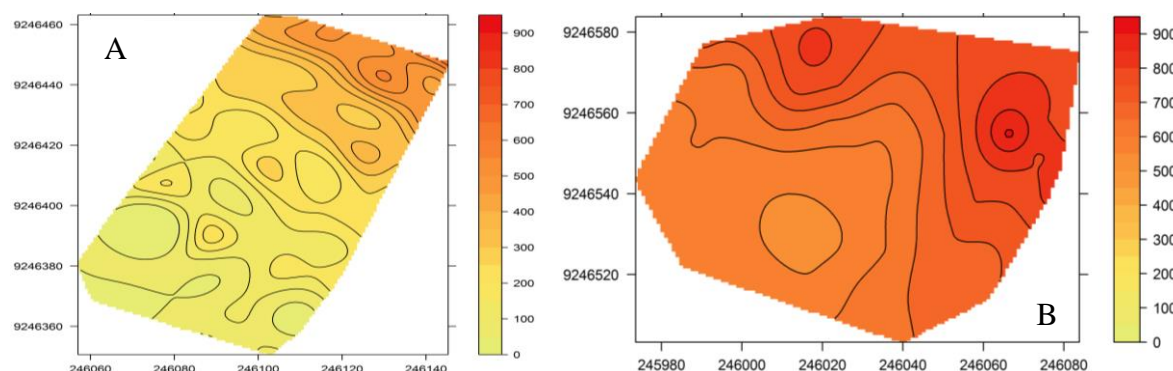


Figura 21. Mapa de distribuição do atributo químico Na ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) em áreas de abacaxizeiro com quatro (A) e oito ciclos (B) de cultivo na profundidade de 0-20 cm.

3.5. Alumínio (Al)

Os teores de Al foram menores e mais homogeneamente distribuídos no espaço na área com oito ciclos de cultivo com valores variando entre 0,4 a 0,6 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ (Figura 22B). Essa homogeneidade se deve provavelmente, a uma maior distribuição nessa área e aos maiores teores da matéria orgânica e de cátions básicos como Ca, Mg e K. Na área com quatro ciclos verificou-se alguns pontos na área com teores de alumínio oscilando entre 0,2 a 0,4 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ e uma distribuição espacial com maior amplitude 0,4 a 0,8 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ e teores mais elevados 0,6 a 0,8 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ em sua área (Figura 22A).

Esses valores são suficientes para caracterizar uma leve toxicidade por esse elemento nas áreas. Inda et al. (2010) evidenciam que os teores de Al^{+3} podem ser liberados pela dissolução ácida dos silicatos, aliados à baixa mobilidade desse elemento, favorecendo assim a sua concentração relativa em razão de uma possível lixiviação preferencial dos cátions básicos. Silveira Júnior et al (2014) constataram teores de Al com valores pontuais de 0 a 6,95 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ atribuindo uma leve toxicidade na área, estando os maiores valores nas profundidades de 10 a 20 cm. Vieira et al (2012) constataram valores oscilando de 0,2 a 0,4 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ em Argissolos dos Tabuleiros Costeiros Cearenses.

Silva et al. (2003) verificaram teores de Al variando entre 0 a 1,4 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ em pesquisa sobre variabilidade espacial das características químicas do solo em Argissolo

Vermelho Amarelo distrófico arênico. Lima et al. (2010) encontraram valores para o Al variando de 0,1 a 1,4 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ e média de 0,51 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ e verificaram que os atributos pH, H+Al e produção apresentaram forte dependência espacial indicando que a produção poderia estar associada com a disponibilidade Al e H (toxidez de alumínio) na área de pesquisa com Latossolos. Souza et al. (2008) constataram que os maiores valores de Al foram encontrados nas regiões de menor valor do pH em um Argissolo Vermelho-Amarelo sob pastagem, e Silveira Júnior et al. (2014) relatam que a solubilidade do alumínio aumenta com a redução do pH.

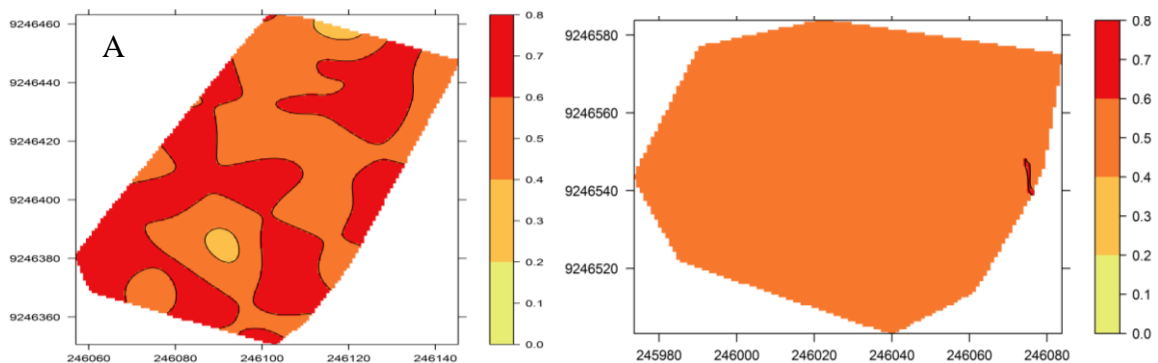


Figura 22. Mapa de distribuição do teor de Al ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) em áreas de abacaxizeiro com quatro (A) e oito ciclos (B) de cultivo na profundidade de 0-20 cm.

3.6. Potássio (K)

Foram verificadas uma maior variabilidade espacial e uma menor continuidade espacial para o atributo K na área com quatro ciclos de cultivo (Figura 23A) e uma maior continuidade na área com oito ciclos, embora os teores tenham sido maiores na área quatro ciclos (Figura 23B). Souza et al. (2008) atribuem essa menor continuidade a vários fatores como a cobertura do solo, a não aplicação de fertilizantes, o transporte de partículas de solo pelo escoamento superficial e sua mobilidade no solo. Lima et al. (2010) constataram que a pobreza do K no solo será maior em solos arenosos devido a sua grande mobilidade, e que a sua alta mobilidade está relacionada com a textura do solo e pela localização das plantas uma vez que a adubação por K é realizada na projeção da cultura.

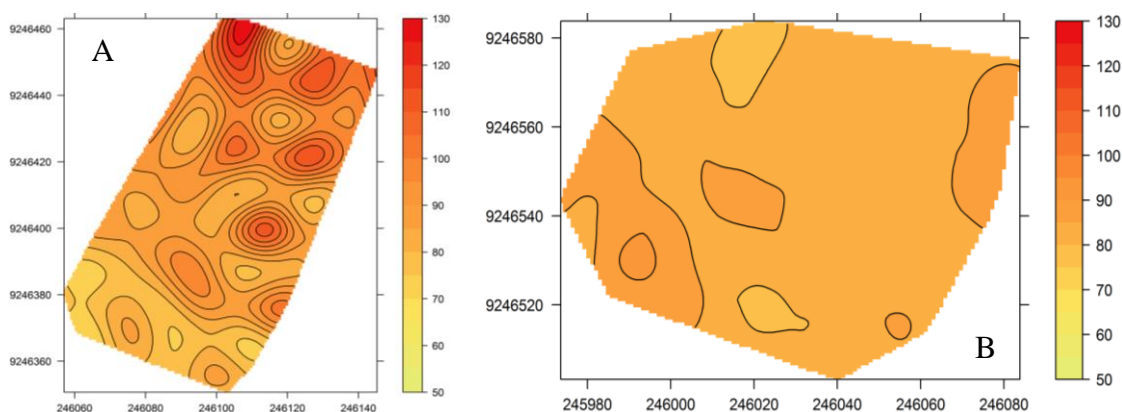


Figura 23. Mapa de distribuição do teor de K ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) em áreas de abacaxizeiro com quatro (A) e oito ciclos (B) de cultivo na profundidade de 0-20 cm.

3.7. Matéria orgânica (MO)

O teor de matéria orgânica foi menor na área com quatro ciclos, os teores oscilaram na maior parte entre 10 e 12 g dm^{-3} (Figura 24A). Manzione et al. (2011) ressaltam que os baixos teores de MO podem ser decorrentes das características naturais dos solos, do clima da região e preparo do solo que favorece o ataque microbiológico. Silveira Junior et al. (2014) atribuíram a alta variabilidade da MO nas profundidades de 0 a 20 cm, a grande influência do manejo de uso da área, no qual haveria perdas, adições ou conservação de solo devido ao tipo de manejo empregado. Machado et al. (2007) encontraram teores de 30,80 g dm^{-3} em áreas sob sistema plantio convencional. Cavalcante et al. (2007) constataram redução substancial nos teores de MO em relação aos demais atributos químicos, provavelmente pelo uso de manejo inadequado nos sistemas de preparo convencional.

Na área com oito ciclos os teores de MO foram maiores que na área com quatro ciclos de cultivo, porém, com maior amplitude de valores, sendo que os teores oscilaram desde 10 até 18 g dm^{-3} (Figura 24B). Os maiores teores de MO na área com maior ciclo de cultivo se deve, possivelmente, a maior incremento por partes vegetais da cultura oriunda de um tempo maior de cultivo na mesma área na profundidade de 0 a 20 cm.

Cavalcante et al. (2007) relatam que a diminuição do teor de MO nos cultivos contínuos podem ser atribuída à decomposição da MO em virtude do baixo retorno dos resíduos vegetais ao solo, o que não ocorre com as área de cultivo de abacaxi que apresenta grande aporte de biomassa vegetal ao solo. Costa et al. (2008) relatam que se não houver a implantação de uma cultura que gere um grande aporte de resíduos vegetais, a tendência seria que o teor de carbono diminuísse com o tempo de cultivo. O manejo do solo, principalmente relacionado à adição de matéria orgânica, é muito importante para a

disponibilidade dos macros e micros nutrientes ao solo (Lima et al., 2014). Esses autores encontraram teores médios para a MO de $3,59 \text{ g dm}^{-3}$. Carvalho et al. (2003) verificaram teores de MO entre 14 a 64 g dm^{-3} com médias de $24,9 \text{ g dm}^{-3}$. A presença da MO demonstra a influência na disponibilidade de nutrientes às plantas e a importância desta como condicionadora da qualidade do solo, pois favorece tanto os processos químicos quanto físicos (Montezano et al., 2006).

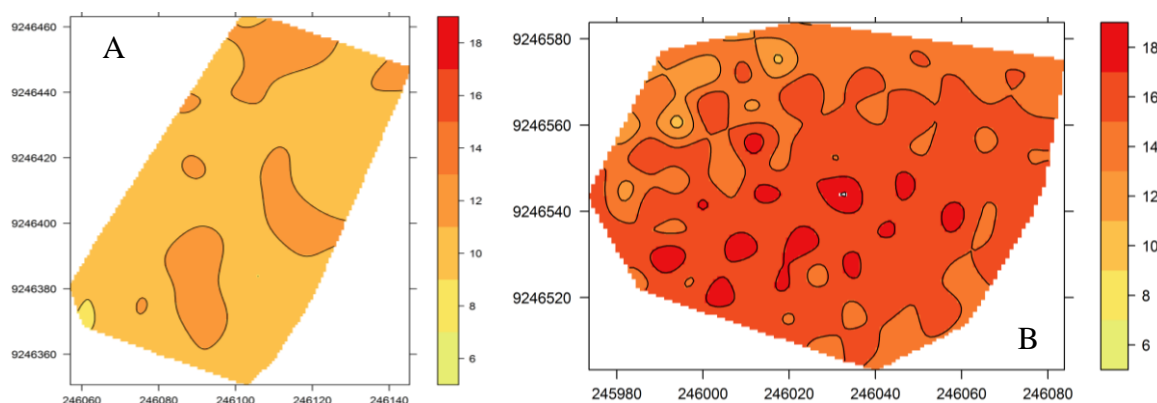


Figura 24. Mapa de distribuição teor de MO (g dm^{-3}) em áreas de abacaxizeiro com quatro (A) e oito ciclos (B) de cultivo na profundidade de 0-20 cm.

3.8. Soma de base (SB)

Na Figura 26 temos o mapeamento do atributo químico da soma de base (SB). Na área com quatro ciclos de cultivo (Figura 25A) os valores para a soma de bases demonstraram uma grande amplitude oscilando desde $3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ a $13 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, mas com predominância de valores no centro da área entre 6 e $10 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Carvalho et al. (2003) obtiveram valores médios para a soma de bases de $11,09 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, estes valores estão próximos aos constatados na área com quatro ciclos. Ainda assim, esses valores são menores que os encontrados na área oito ciclos, que apresentou valores maiores para a soma de bases, variando entre 10 a $30 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Figura 25B). Esses valores são maiores que os encontrados por Machado et al. (2007) que obtiveram valores médios para soma de bases $2,33 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ em áreas de lavoura sob sistema plantio convencional. Lima et al. (2010) verificaram valores oscilando entre 4 e $7,9 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ em pesquisa sobre os atributos do solo em plantio de área comercial.

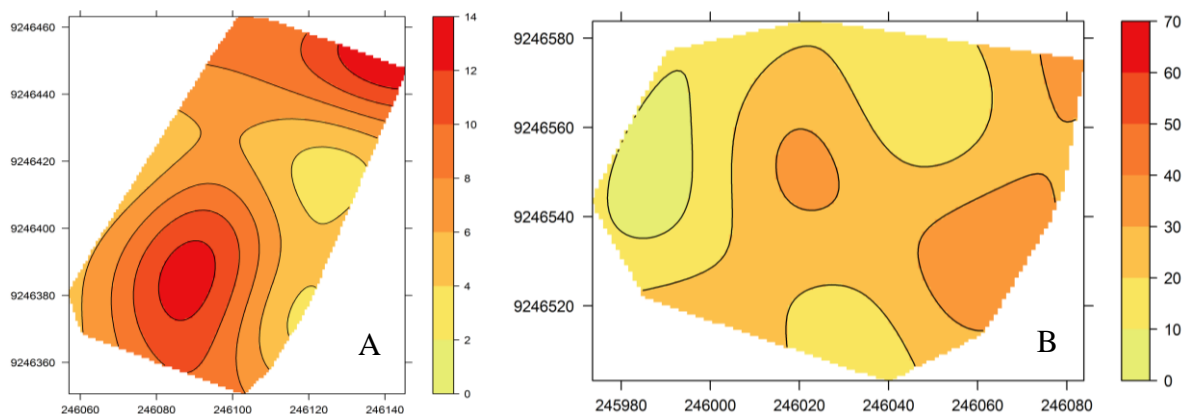


Figura 25. Mapa de distribuição dos atributos químicos SB ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) em áreas de abacaxizeiro com quatro (A) e oito ciclos (B) de cultivo na profundidade de 0-20 cm.

3.9. Capacidade de troca de cátions (CTC)

No mapeamento da CTC total do solo podemos verificar na área com quatro ciclos valores muito baixo na maior parte de sua área, esses valores oscilaram entre 0 a $20 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ (Figura 26A). A área com oito ciclos apresentou a menor continuidade espacial, porém, com valores superior a área com quatro ciclos, estes valores oscilaram entre 20 e $40 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ de maneira homogênea na área com maior ciclo de cultivo (Figura 26B).

Estes valores estão bem acima do encontrado por Souza et al. (2008) que obtiveram valor médio de $2,17 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ em pesquisa sobre a variabilidade espacial de atributos químicos em um Argissolo. Cavalcante et al. (2007) encontraram teores médios para a CTC de $6,26 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ em solos preparado convencionalmente.

Correia et al. (2017) ressaltam que os materiais orgânicos dos cultivos anteriores e/ou cobertura morta nas áreas de cultivo, quando decomposto, formam os colóides, os quais possuem cargas elétricas negativas, que podem atrair e reter outros colóides de cargas positivas, contribuindo para o aumento da CTC, possivelmente, o que diferencia a área com oito ciclos de cultivo da área com quatro ciclos de cultivo.

Lima et al. (2010) verificaram correlação positiva do valor de pH com a CTC total e a SB pois com o aumento do valor do pH há liberação de sítios de troca negativo dos colóides do solo e disponibilidade de cátions básicos fornecidos com o ânion básico acompanhante. Os mesmos autores ainda ressaltam que analogamente, verificou-se correlação alta e negativa do valor de pH com a acidez potencial ($\text{H}+\text{Al}$) e com a quantidade de Al livre, pois com a redução da acidez ativa mais Al é precipitado e mais hidrogênio se torna indisponível, ficando nos sítios de troca, antes ocupados por H e Al, os cátions básicos.

A elaboração dos mapas, permitiu verificar a distribuição espacial dos atributos químicos nas áreas com diferentes ciclos de cultivo, fato que não ocorre quando se utiliza

somente análise da estatística descritiva. As variações de amplitude dos valores nas duas áreas com tempos de cultivo diferentes demonstram a necessidade de se realizar a aplicação diferenciada e localizada de insumos férteis nos abacaxizeiros em áreas convencionais.

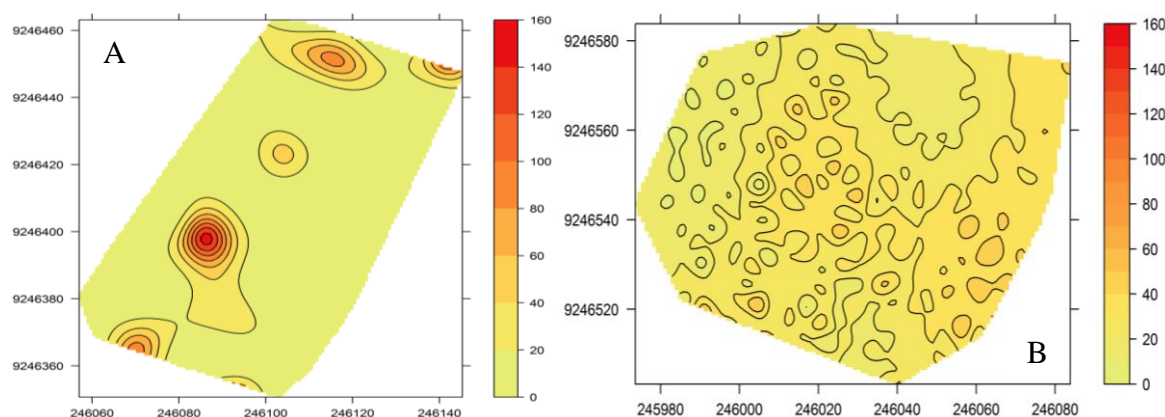


Figura 26. Mapa de distribuição dos atributos químicos CTC ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) em áreas de abacaxizeiro com quatro (A) e oito ciclos (B) de cultivo na profundidade de 0-20 cm.

5. Conclusão

A dependência espacial variou de forte a baixa variabilidade para as áreas com diferentes ciclos de cultivo com abacaxi e possibilitou o mapeamento através de ferramentas geoestatísticas, com exceção do H+Al e da saturação por bases.

Os maiores alcances foram 32, 45, 49 e 39 metros apresentados pelo pH, sódio, soma de bases e capacidade de troca de cátions, respectivamente, na área com quatro ciclos de cultivo. O maior alcance na área com oito ciclos foi para o teor de matéria orgânica, correspondente a 70 metros.

O alumínio foi o atributo com menor alcance, 18,7 m, na área com oito ciclos. Na área com quatro ciclos, os menores alcances foram para os teores de potássio e magnésio.

As formas de uso e manejo empregadas induziram a variabilidade espacial para a maioria dos atributos químicos do solo, sendo maior na área com quatro ciclos de cultivo com abacaxizeiro ‘Pérola’, evidenciando maior amplitude nos teores dos atributos. Portanto, o número de ciclos de cultivo do abacaxizeiro é importante para se definir as distâncias entre os pontos amostrais.

6. Referência bibliográfica

ARTUR, A. G., OLIVEIRA, D. P.; COSTA, M. C.; ROMERO, R. E.; SILVA M. V. C.; FERREIRA, T. O. Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, associada ao micro relevo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 18(2), p. 141-149. 2014.

BARBOSA, F. de A. dos R. Medidas de proteção e controle de inundações urbanas na bacia do rio Mamanguape – PB. 116 f. 2006. **Dissertação** (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa.

BIVAND, R. S.; PEBESMA, E. J.; E GÓMEZ-RUBIO, V. **Applied Spatial Data Analysis with R**. Springer, 2º ed. 2013, xviii+405 pp.

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.

CHAVES, L. H. G.; FARIAS, C. H. A. Variabilidade espacial do estoque de carbono nos Tabuleiros Costeiros da Paraíba: Solo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 3, n. 01, p. 20-25, 2008.

CÂMARA, G., CARVALHO, M. S. (2004), Análise Espacial de Evento. In: DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.V.M., Eds, **Análise Espacial de Dados Geográficos**. EMBRAPA. Brasília. ISBN: 85-7383-260-6.

CAMARGO, E. C. G; FUKS, S. D. (2001). Geoestatística: fundamentos e aplicações. In: CÂMARA, G. **Geoprocessamento: teoria e aplicações**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro>> Acesso em: jun. de 2016.

CARNEIRO, E. O.; SANTOS, R. L. S.; QUINTANILHA, J. A. Análise espacial aplicada na determinação de áreas de risco para algumas doenças endêmicas: o uso de técnicas de geoprocessamento na saúde pública. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 22, 2005, Macaé. **Anais...** Rio de Janeiro: SBC, 2005.

CARVALHO, J. R. P.; VIEIRA, S. R.; GREGO, C. R. Comparação de métodos para ajuste de modelos de semivariograma da precipitação pluvial anual. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n.4, p. 443-448, 2009.

CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M. e VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 1151-1159, 2002.

CAVALCANTE, E. G. S.; ALVES, M. C.; PEREIRA, G. T. & SOUZA, Z. M. Variabilidade espacial de MO, P, K e CTC do solo sob diferentes usos e manejos. **Ciência Rural**, v. 37, p. 394- 400, 2007.

CODY, R. **An introduction to SAS University Edition**. Cary, NC: SAS Institute Inc., pp. 92–106, 2015.

- CORÁ, J. E.; PEREIRA, G. T.; BERVALDO, 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**, v. 28, n.6, p. 1013-1021, 2004.
- EBERT, A.; COSTA, R. B. da; BRONDANI, G. E. Spatial distribution pattern of *Mezilaurus itauba* (Meins.) Taub. Ex mez. in a seasonal forest area of the southern Amazon, Brazil. **iForest**, vol. 9, p. 497-502, 2016.
- EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997. 212p.
- FRADE, D. D. R.; NAKAMURA, L. R.; RIGHETTO, A. J.; L'opez BAUTISTA, E. A. e OLINDA, R. A. de. Atributos físico-químicos de uma estação experimental por meio de métodos multivariados e espaciais. **Revista Brasileiro Bioma**, v. 33, n.2, p. 184-196, 2015.
- GREGO, C. R.; COELHO, R. M.; VIEIRA, S. R. Critérios morfológicos e taxonômicos de Latossolo e Nitossolo validados por propriedades físicas mensuráveis analisadas em parte pela geoestatística. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 337-350, 2011.
- INDA A. V.; QUINÕES O. R. G.; GIASSON E.; BISSANI, C. A.; DICK, D. P.; NASCIMENTO, P. C.; Atributos químicos relacionados ao processo de sulfurização em solos construídos após mineração de carvão. **Ciência Rural**. v.40, n. 5., p. 1060-7, 2010.
- LEONARDO, F. A. P.; PEREIRA, W. E.; SILVA, S. M.; COSTA, J. P. Teor de clorofila e índice spad no abacaxizeiro cv. Vitória em função da adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 35, n. 2, p. 377-383, 2013.
- LIMA, G. C.; SILVA, M. L. N.; OLIVEIRA, M. S. de. CURI, N.; SILVA, M. A. da; OLIVEIRA, A. H. Variabilidade de atributos do solo sob pastagens e mata atlântica na escala de microbacia hidrográfica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18(5), p. 517-526, 2014.
- LIMA, J. S. S.; OLIVEIRA, R. B.; ROCHA, W.; OLIVEIRA, P. C.; QUARTEZANI, W. Z. Análise espacial de atributos químicos do solo e da produção da cultura de pimenta-do-reino. **Idesia**, v. 28, p. 31-39, 2010a.
- LUNARDI NETO, A. **Métodos para reabilitação de solos reconstruídos após a mineração de carvão**. 2006. 83 f. Dissertação (Mestrado em ciência do solo). Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC, Centro de Ciências Agroveterinárias, CAV, Lages, 2006.
- MACHADO, P. L. O. de A.; BERNARDI, A. C. de C. e SILVA, C. A. Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio. In: Valencia, L.I.O.; MEIRELLES, M.S.P e BETTINI, C. **Geoestatística aplicada a agricultura de precisão**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, p. 202. 2004.
- MANZIONE, R. L., & ZIMBACK, C. R. L. Análise espacial multivariada aplicada na avaliação de fertilidade do solo. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 19, n. 3, p. 227-235, 2011.

MELOUN, M.; SÁNKÁ, M. e NEMEC, P.: The analysis of soil cores polluted with certain metals using the Box–Cox transformation, **Environmental Pollution**, v. 137, p. 273-280, 2005.

MONTANARI, R.; PEREIRA, G.T.; MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z.M.; PAZETO, R.J.; CAMARGO, L.A. Variabilidade espacial de atributos químicos em Latossolo e Argissolos. **Ciência Rural**, v.38, p.1266-1272, 2008.

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

MONTEZANO, Z. F.; CORAZZA, E. J.; MURAOKA, T. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada e manejada homogeneamente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n.5, p. 839-47, 2006.

NASCIMENTO, J. C. da S. Atributos físicos e químicos de solos de área industrial em Araucária – PR. 38f. 2014. **Dissertação** (Mestrado). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR.

OLIVEIRA, P. C. G.; FARIAS, P. R. S.; LIMA, H. V.; FERNANDES, A. R.; OLIVEIRA, F. A.; PITA, J. D. Variabilidade espacial de propriedades químicas do solo e da produtividade de citros na Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 708-715, 2009.

PAZ-GONZALEZ, A.; TABOADA CASTRO, M. T. & VIEIRA, S. R. Geostatistical analysis of heavy metals in a one-hectare plot under natural vegetation in a serpentine area. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 81, p. 469-479, 2001.

R Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

REIS, C. P. dos. Simulação dos fatores que afetam as predições obtidas por Krigagem Ordinária. 2013. 45 f. **Dissertação** - (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG.

ROSA, A. S. **spsann: Optimization of Sample Configurations using Spatial Simulated Annealing**. R package version: 2.0-0. <https://CRAN.R-project.org/package=spsann>, 2016.

SÁNCHEZ, G. A. R. Variabilidade espacial do carbono e outros atributos do solo em uma área destinada ao reflorestamento no Rio Grande do Norte. 2010. 119 f. **Tese** (Doutorado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz.

SANTI, A. L.; AMADO, T. J. C.; CHERUBIN, M. R.; MARTIN, T. N.; PIRES, J. L.; FLORA, L. P. D.; BASSO, C. J. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 1346-1357, 2012.

SILVA NETO, S. P. et al. Análise espacial de parâmetros da fertilidade do solo em região de ecótono sob diferentes usos e manejos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, n. 2, p. 541-552, 2011.

SILVA, J. F. da; FERREIRA, P. dos S.; GOMES, V. P.; SILVA, E. R. A. C.; GALVÍNIO, J. D. Mapeamento do potencial geoclimático da fruticultura do abacaxi na microrregião de Araripina – PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n.01, p. 196-210, 2015.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; STORCK, L. e FEIJO, S. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n.6, p. 1013-1020, 2003.

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

SILVA, K. E.; MARTINS, S. V.; SANTOS, N. T.; RIBEIRO, C. A. A. S. Padrão espacial de espécies arbóreas tropicais. In: MARTINS, S. V (Ed). **Ecologia de Florestas Tropicais**. Viçosa: Ed. UFV, 2009. p. 216 - 241.

SILVEIRA JUNIOR, O.; SANTOS, A. C.; SANTOS, P. M.; ROCHA, J. M. L.; ALEXANDRINO, E. Distribuição espacial de atributos químicos do solo em áreas sob diferentes usos agrícolas. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 22, n. 5, p. 442- 455, 2014.

SMITH, T. E. (2014). Notebook on spatial data analysis [online]. <http://www.seas.upenn.edu/ese502>.

SOUZA, G. S.; LIMA, J. S. S.; SILVA, S. A.; OLIVEIRA, R. B. Variabilidade espacial de atributos químicos em um Argissolosob pastagem. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.30, p.589-596, 2008.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J. e PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e matéria orgânica em solos de relevos diferentes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 491-499, 2004a.

SPIAZZI, F. R. Análise geoestatística de atributos químicos e físicos do solo em áreas construídas após mineração de carvão no município de Lauro Muller, SC. 97f. 2011. **Dissertação** (Mestrado). Centro de Ciências Agroveterinárias/UEDESC.

VELAZQUEZ, E.; MARTINEZ, I.; GETZIN, S.; MOLONEY, K. A.; WIEGANDL, T. An evaluation of the state of spatial point pattern analysis in ecology. **Ecography**, v. 39, p. 1042-1055, 2016.

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

VIEIRA, J. M.; ROMERO, R. E.; FERREIRA, T. O.; ASSIS JÚNIOR, R. N. Contribuição de material amorfo na gênese de horizontes coesos em Argissolos dos Tabuleiros Costeiros do Ceará. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 43; p. 623-632, 2012.

ZANÃO JÚNIOR, L. A.; LANA, R. M. Q.; GUIMARÃES, E. C.; PEREIRA, J. M. A. Variabilidade espacial dos teores de macronutrientes em Latossolos sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 389-400, 2010.

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 Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

CAPÍTULO III

ESQUEMA DE OTIMIZAÇÃO AMOSTRAL DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM ÁREA DE ABACAXIZEIRO

Resumo

Uma amostragem bem definida é um dos pontos mais importantes para a obtenção de informações geoespaciais sobre as propriedades químicas do solo em áreas agrícolas, pois esses esquemas amostrais determinam toda a estrutura de dependência espacial das variáveis georreferenciadas nessas áreas. Diante disso, objetivou-se obter um esquema amostral ótimo para um conjunto de dados de atributos químicos do solo em área de abacaxizeiro ‘Pérola’ com oito ciclos de cultivo. Foram retiradas amostras de um Argissolo Vermelho Amarelo na profundidade de 0-0,20 m em uma área de 0,5 ha, na forma de uma malha regular, totalizando 60 pontos, distanciados 10 m entre si. Nesta pesquisa, foi utilizada uma malha regular pré-definida para a obtenção do variograma escalonado médio, como informações prévias para obtenção de um único esquema amostral ótimo para todos os atributos químicos do solo. Para essa otimização foi utilizado o algoritmo denominado anelamento simulado espacial (SSA), visando obtenção da mínima variância da krigagem. A partir de um esquema amostral inicial e com a determinação de um variograma escalonado médio foi possível determinar o número de 16 pontos a serem amostrados para minimizar a variância de krigagem na área da pesquisa. Os pontos amostrais selecionados situam-se na porção central da área avaliada.

Palavras-chave: Anelamento simulado espacial; Cultivo de Abacaxi; Sensoriamento remoto; Geoestatística; Otimização espacial.

Abstract

A well-defined sampling is one of the most important points for obtaining spatial information on the chemical properties of soil in agricultural areas, because these sampling schemes determine the entire spatial dependency structure of the variables geotagged in these areas. Faced with this, It was aimed at obtaining a optimal sampling scheme for a set of data of chemical attributes of the soil in the area of pineapple 'Pérola' with eight cultivation cycles. Samples were taken from of an Ultisol at the depth of 0-0.20 m in an area of 0.5 ha, in the form of a regular mesh, totaling 60 points, distanced 10 m between each other. In this survey, a pre-defined regular mesh was used to obtain the average variogram, as prior information for obtaining a single optimal sampling scheme for all the chemical attributes of the soil. For this optimization it was used the algorithm called spatial simulated annealing (SSA), aiming at obtaining the minimal variance of kriging. From an initial sampling scheme and the determination of scale variograma was possible to determine the number of 16 points to be sampled to minimize the variance of kriging in the research area. The selected sampling points are located in the central portion of the evaluated area.

Key-words: Simulated annealing spatial, Pineapple cultivation, Remote sensing, Geostatistics, Spatial Optimization.

1. Introdução

Nos últimos anos, com o emprego das técnicas e conceitos utilizados na agricultura de precisão, a amostragem espacial do manejo da fertilidade do solo em áreas agrícolas, tem sido realizado levando-se em consideração, entre outros requisitos, a distância entre as amostras no estudo da variabilidade espacial e temporal, principalmente, dos atributos químicos do solo, sendo que sua eficiência ocorreria mediante a capacidade em reproduzir, o mais fielmente possível, as características destes, com um número mínimo de amostras para estimar o valor médio com determinada exatidão (Lima et al., 2010).

A pesquisa sobre a estrutura de dependência espacial das variáveis georreferenciadas na agricultura é um instrumento de análise, que fornece informação para suportar uma decisão em favor de uma melhor gestão das áreas de produção, isso pode ser realizado por meio de técnicas geoestatísticas que recuperam de um conjunto de elementos de amostra, informações sobre a variação espacial do fenômeno em toda a área através da construção de mapas temáticos da variabilidade (Guedes et al., 2016).

Os esquemas de amostragens influenciam a eficiência dessas pesquisas e o custo da variabilidade espacial das propriedades do solo, pois a coleta, preparação e análise de um grande número de amostras são onerosas, entretanto, quanto maior o número de amostras, mais clara se torna a visão da variabilidade espacial das variáveis regionalizadas, embora esquemas de amostragem esparsos sejam mais baratos, eles podem falhar em capturar alguns aspectos de dependência espacial, assim, a definição da forma e tamanho da estratégia de amostragem a ser usada para estudar a estrutura de dependência espacial são cruciais, num esforço para minimizar os custos operacionais e maximizar os resultados da previsão espacial, tendo a geoestatística um papel importante nos estudos de otimização das amostras das variáveis regionalizadas (Pereira et al., 2013; Guedes et al., 2016).

Um melhor esquema de amostragem espacial, inicia-se pela busca de otimização considerando como solução inicial um esquema de amostragem aleatório ou um esquema de amostragem específico, levando em conta um conhecimento prévio do problema a ser minimizado (Guedes, 2008). Dentre alguns métodos de otimização, a krigagem ordinária é o método de interpolação mais utilizado na geoestatística, devido a sua relativa eficiência e simplicidade do algoritmo, combinado com o seu grande sucesso em aplicações em Ciência do Solo, explicam sua contínua popularidade, portanto, a variância da krigagem pode ser usada como uma ferramenta para avaliar a qualidade dos esquemas de amostragem (Pereira et al., 2013).

Outro método que pode ser utilizado em pesquisas de otimização de áreas amostrais é a simulação espacial por anelamento (SSA, sigla em inglês), que é aplicado para otimizar o plano de amostragem da área de estudo a respeito de sua forma irregular e suas propriedades de solo desigualmente distribuída (Scudiero, et al., 2011). Essa técnica pode ser usada quando se tem um esquema amostral já existente na área em estudo e deseja-se eliminar ou adicionar amostras nesse esquema amostral cujo objetivo é redefinir um esquema amostral de tamanho A num esquema menor de tamanho w ($A > w$) (Guedes, 2008).

Dessa forma, amostragens de solo para a determinação dos atributos químicos tem relevante importância em pesquisas sobre o diagnóstico da fertilidade das áreas cultivadas economicamente, sendo assim, objetivou-se obter um esquema amostral ótimo para um conjunto de dados de atributos químicos do solo em área de abacaxizeiro ‘Pérola’ com oito ciclos de cultivo.

2. Material e métodos

2.1. Localização da área experimental

Esta pesquisa foi realizada no município de Itapororoca, PB, no sítio Lagoa de Fora ($6^{\circ}48'38''$ latitude Sul e $35^{\circ}17'48''$ longitude Oeste) em pomar cultivado com abacaxi (Figuras 27). Foi selecionada uma área com 0,5 hectares. A área denominada A8 possui oito ciclos de cultivos subsequentes com abacaxizeiro ‘Pérola’.

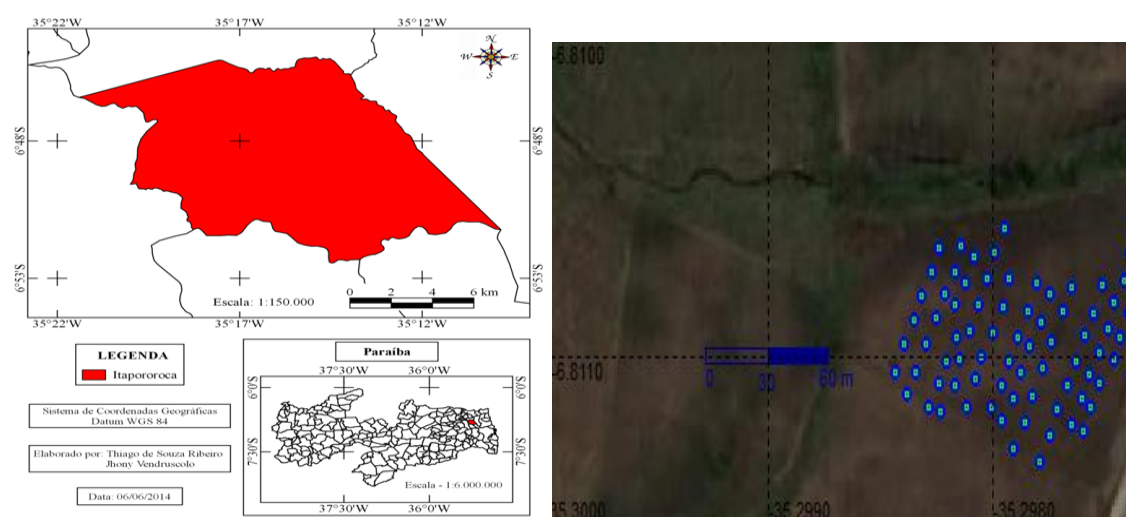


Figura 27. Localização da área experimental com oito ciclos de cultivo de abacaxi no município de Itapororoca, PB. Fonte: Google Earth, 2016.

2.2. Clima

Segundo a classificação de Köppen, predomina o clima do tipo As', clima tropical com estação seca de verão caracterizada por ser quente e úmido, com chuvas de outono a inverno, estação seca podendo atingir entre cinco e seis meses, pluviosidade média anual entre 1500 mm, concentradas nos meses de março a agosto e com período seco entre setembro e fevereiro. A umidade relativa do ar, em termos de valores médios anuais, varia de 80 a 85%. A insolação nos meses de janeiro a julho de 7 a 8 horas diárias e nos meses de agosto a dezembro de 8 a 9 horas diárias (Leonardo et al., 2013; Barbosa, 2006).

2.3. Relevo e solos

Os Tabuleiros Costeiros acompanham o litoral de todo o Nordeste, apresenta altitude média de 50 a 100 metros. Compreende platôs de origem sedimentar, que apresentam grau de entalhamento variável, ora com vales estreitos e encostas abruptas, ora abertos com encostas suaves e fundos com amplas várzeas. A vegetação é predominantemente do tipo Floresta Subperenifólia, com partes de Floresta Subcaducifólia e Cerrado/Floresta. De modo geral, os solos são profundos e de baixa fertilidade natural. Parte de sua área, a oeste, se insere na unidade geoambiental das Depressões Sertanejas. O município possui as unidades de mapeamento de solos ocorrentes como os Argissolos, Luvisolos e Neossolos, no entanto, as áreas onde as amostras foram coletadas situam-se na unidade classificada como Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico (Figura 28).

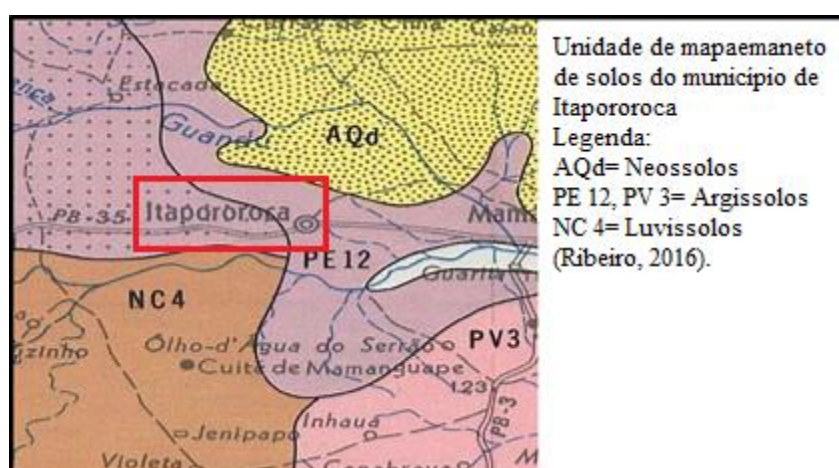


Figura 28. Unidade de mapeamento de solos do município de Itapororoca, PB.

2.4. Histórico do Manejo tradicional nos pomares de abacaxi

A pesquisa foi realizada no município de Itapororoca, mesorregião da Mata Paraibana, pertencente a região dos Tabuleiros Costeiros. Nessa localidade o manejo edáfico para o cultivo com abacaxizais inicia-se pela instalação da lavoura de abacaxi, onde a maior parte dos produtores utilizam a cultivar ‘Pérola’ por características de melhor aceitação mercadológicas. A instalação da lavoura de abacaxi para a área com quatro ciclos de cultivo ocorreu no mês de novembro de 2014 e para a área com oito ciclos de cultivo com abacaxi, a instalação da lavoura de abacaxi ocorreu no mês de outubro de 2014. Nas áreas cultivadas os terrenos variam de plano a suave ondulado, típico da região e possui características de serem arenoso e ou argilo arenosos com boa capacidade de drenagem. O processo de seleção das mudas não segue um padrão por tamanho e, geralmente, são utilizadas mudas dos próprios cultivos da área. O preparo do solo consiste em gradagens e arações até 30 cm de profundidade, limpa do terreno e amontoa dos leirões para facilitar o desenvolvimento das raízes. A maior parte dos sistemas de plantio e espaçamento adotados pelos produtores são dispostas em fileiras duplas, com espaçamento 0,9 x 0,40 x 0,40 m, totalizando numa densidade de, aproximadamente, 19.200 plantas em 0,5 ha.

Para evitar a incidência de pragas e doenças, os produtores fazem o controle fitossanitário da lavoura de abacaxi, principalmente, a utilização de inseticidas e fungicidas, de modo que o preparo das caldas para a aplicação de produtos químicos ocorrem através de pulverizações 60 dias após o plantio de inseticidas registrado para a cultura e para controle de cupim e cochonilha. Para o controle do fusarium são utilizados o fungicida Folicur, pulverizado diretamente na flor na época de frutificação em torno de 35 a 45 dias após a indução floral.

Os controles de plantas daninhas são realizados através de capinas manuais, com maior intensidade nos primeiros meses após o plantio, para evitar a maior competição com o abacaxi. A depender da intensidade de infestação por plantas infestantes, são necessárias de seis a 12 capinas manuais durante todo o ciclo da cultura.

A adubação realizada no pomar com oito ciclos consistiu no fornecimento dos macronutrientes N, P e K pela utilização de formulações comerciais que ocorreram parceladamente, com aplicações que variam de duas a três vezes ao longo do ciclo de cultivo. Normalmente, a primeira aplicação ocorre por volta de 60 dias após o plantio com NPK. Para a segunda e terceira aos 180 e 270 e dias após o plantio, respectivamente com N e K. O fósforo foi aplicado uma única vez na primeira adubação de cobertura.

Esses procedimentos de manejo do solo e tratos culturais foram os que os produtores das áreas selecionadas realizaram havendo pouca variação de uma prática para a outra entre as áreas de cultivo.

2.5. Amostragem georreferenciada

A amostragem na área com oito ciclos de cultivo com abacaxi foi analisada entre janeiro e fevereiro de 2015. Foi realizada em malha com espaçamento regular de 10 m entre os pontos nas linhas de cultivo, utilizando-se GPS Garmin GPSMAP 60Csx, sendo amostrada uma área de 0,5 ha. As amostras de solos foram coletadas na profundidade de 0-20 cm.

A amostra de solo foi coletada na respectiva área após as adubações de reposições para caracterização das mesmas e, antes da indução floral do abacaxi, para as determinações das análises do solo. Em cada ponto de amostragem foram coletadas, com a utilização de um trado, três sub-amostras de solo, na linha de plantio da cultura. Essas sub-amostras foram misturadas para compor uma amostra composta representativa de cada ponto de amostragem, o que totalizou 75 amostras compostas.

2.6. Atributos químicos

As amostras de solos foram coletadas nas respectivas áreas após as adubações de reposições para caracterização das mesmas e, antes da indução floral do abacaxi, para as determinações das análises do solo. Em cada ponto de amostragem foram coletadas, com a utilização de um trado, três sub-amostras de solo, na linha de plantio da cultura. Essas sub-amostras foram misturadas para compor uma amostra composta representativa de cada ponto de amostragem, o que totalizou 75 amostras compostas nas áreas com quatro e oito ciclos de cultivo de abacaxi, totalizando 150 amostras compostas.

Após a coleta, as amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas, peneiradas e maceradas, caracterizando a fração terra fina seca ao ar (TFSA). As análises foram realizadas no Laboratório de Química e Fertilidade do Solo do DSER, CCA, UFPB, Areia, PB. As características químicas avaliadas foram os teores de Ca, Mg, K, Na, Al, H+Al, P; assim como a soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), matéria orgânica (MO) e saturação por bases (V%). Foram determinados também o pH (1:2,5 em água) de acordo com Embrapa (1997).

2.6. Análises dos dados

Inicialmente, foram calculadas semivariâncias escalonadas (Vieira, 1991) de todos os atributos químicos do solo, representado pela fórmula:

$$\gamma^{sc}(h) = \frac{\gamma(h)}{\text{Var}(Z)}$$

Sendo $\gamma^{sc}(h)$ é o semivariograma escalado, $\gamma(h)$ o semivariograma original e $\text{Var}(z)$ a variância amostral do atributo avaliado.

Um variograma médio foi ajustado para todos os dados experimentais de propriedades químicas, que gerou um modelo representativo da dependência espacial para cada conjunto de propriedades (Montanari et al., 2012). As escalas dos variogramas foram usadas no algoritmo SSA estendido para o desenvolvimento do esquema de amostragem ideal para as propriedades químicas do solo.

As funções ajustadas para os semivariogramas, como descrito no item anterior, foram utilizadas para estimar a quantidade e os locais das amostras. Inicialmente, foram calculadas as variâncias em função da quantidade de locais amostrados, com propósito de definir a quantidade de amostras (n) que minimize a variância. Posteriormente, foram estimados os locais (posições geográficas) das n amostras. Para definir o número recomendado de pontos amostrados considerou-se o valor correspondente a 0,95 do menor valor da variância de krigagem.

O conceito central em SSA é a aptidão função $\phi(S)$ que tem que ser otimizado para um mínimo global. SSA procede por perturbação aleatória de um conjunto inicial desses parâmetros (x e y coordenadas) que descrevem o $\phi(S)$. Perturbações com um melhor condicionamento para $\phi(S)$ todos são aceitos. Para evitar os mínimos locais de $\phi(S)$, as perturbações que não melhoram a função também são aceitos com uma probabilidade de aceitação descrita pelo critério Metrópoles.

$$P\{E_{i+1}\} = \begin{cases} 1, & \text{if } \phi(E_{i+1}) \leq \phi(E_i) \\ e^{-\frac{\phi(E_i) - \phi(E_{i+1})}{t}}, & \text{if } \phi(E_{i+1}) > \phi(E_i) \end{cases}$$

Como evolui o processo de otimização, a perturbação máxima diminui, forçando o plano de amostragem "congelar" em sua configuração ideal. A abordagem mostra uma grande flexibilidade na definição de vários critérios de otimização com suas

correspondentes funções de aptidão porque diferentes inquéritos podem ter finalidades diferentes.

As análises foram realizadas utilizando a função *optimizeNetwork* do pacote *intamapInteractive* (Pebesma, 2013), disponível no software estatístico R.

3. Resultados e discussão

A Figura 29 demonstra a dispersão dos variogramas escalonados individual ajustados para a dependência espacial em função da distância na área com oito ciclos de cultivo com abacaxizeiro para todos atributos químicos do solo.

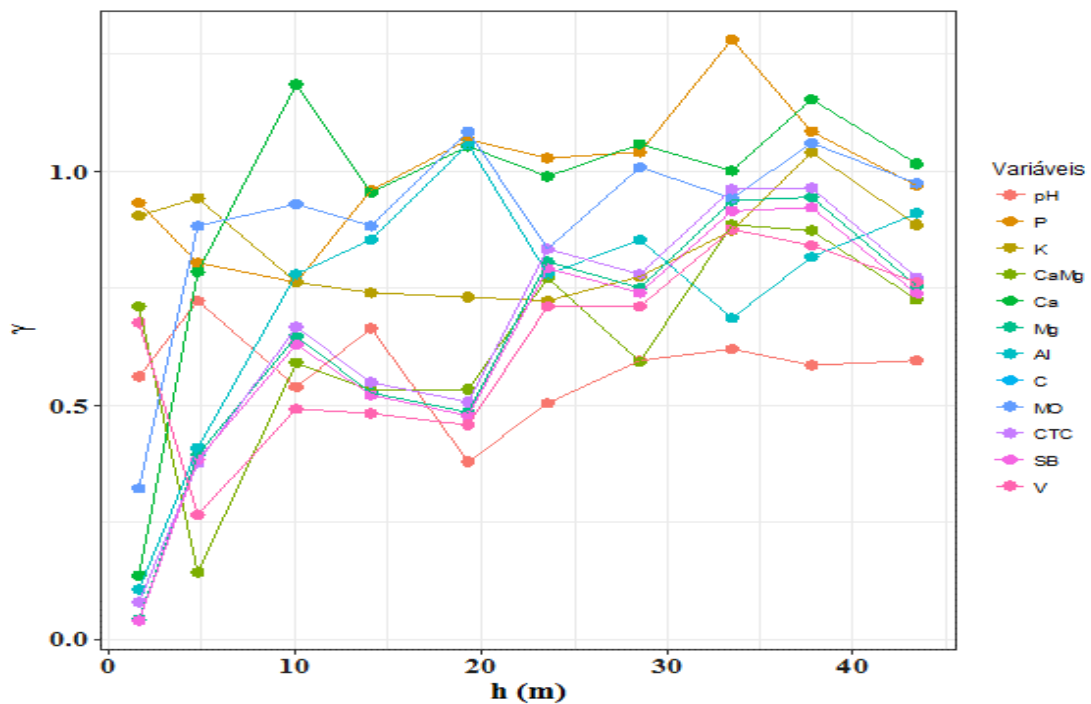


Figura 29. Variogramas escalonados para os atributos químicos do solo em área com oito ciclos de cultivo com abacaxizeiro ‘Pérola’.

Foi obtido um variograma médio para a otimização espacial dos pontos amostrais que resultou nos modelos matemáticos wave + gaussiano (Figura 30). Montanari et al. (2012) identificaram como melhor ajuste o modelo exponencial para estimar o semivariância para a maior parte dos atributos químicos, com exceção do Ca. Pereira et al. (2013) encontraram o modelo escalonado esférico para as propriedades químicas do solo em pesquisa sobre esquemas de otimização amostral em mapas de atributos do solo em área experimental cultivada com cana de açúcar há mais de 30 anos, os mesmos autores ressaltam

que, o ganho prático que utiliza esta técnica é de grande interesse para algumas áreas, como a agricultura de precisão. Montanari et al. (2005) relatam que o manejo do solo, pelas aplicações de fertilizantes e revolvimento do mesmo, caracterizou uma maior continuidade na distribuição dos atributos químicos na camada mais superficial da área estudada (0-20 cm).

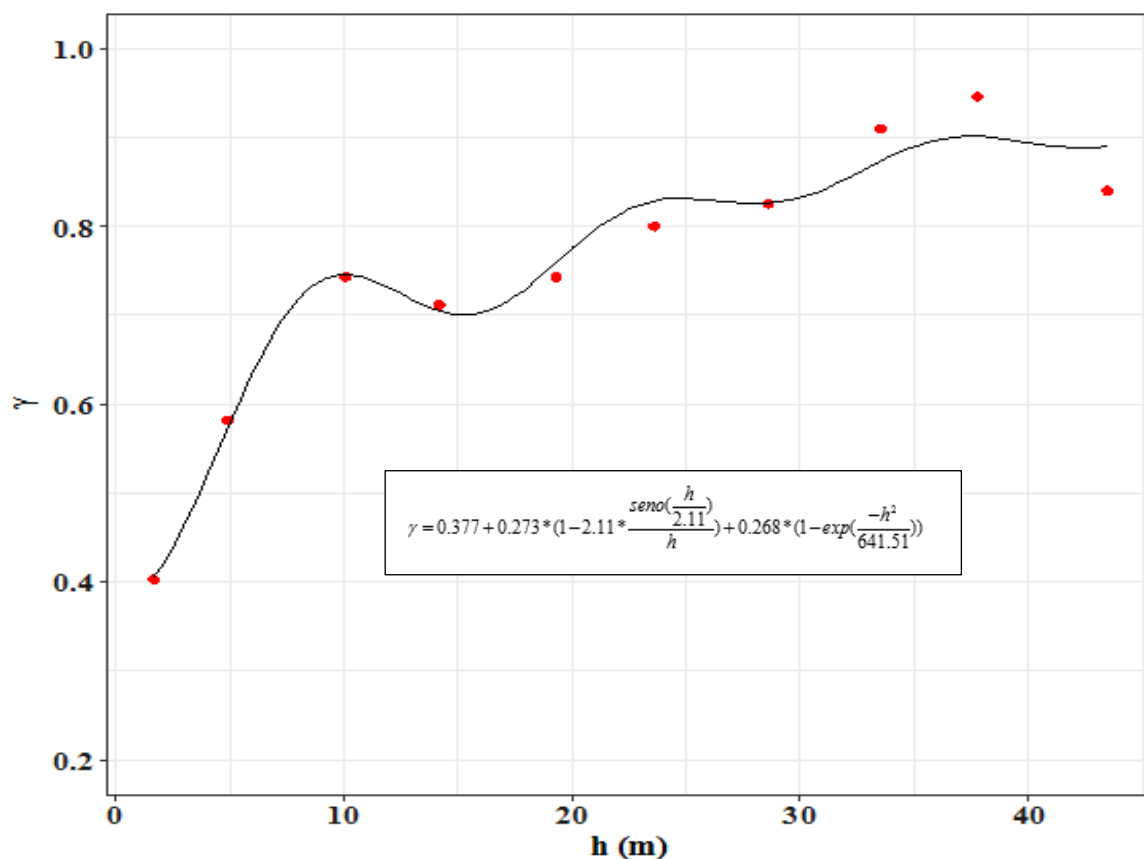


Figura 30. Variograma escalonado médio dos modelos matemáticos wave + gaussiano.

As Figuras 31, 32, 33 e 34 demonstram o número de amostras otimizadas para a atributo pH, P, CTC e K, respectivamente, sugeridas pelo algoritmo de SSA em função do número de amostras total da área pesquisada. Nesse caso, para os atributos de pH, P, CTC e K seriam necessários 16, 18, 27 e 26 locais amostrados na área de estudo para que se possa minimizar a variância da krigagem e manter uma boa estimativa na predição da variável na área cultivados com oito ciclos de abacaxizeiro. Esses resultados revelam que dentre as variáveis analisadas a CTC e K requerem um número maior de pontos para refletir a distribuição dos pontos brutos. Montanari et al. (2012) obtiveram uma redução no número de pontos amostrais na área de pesquisa de 836 para 173 pontos amostrais após aplicação do método de otimização para os atributos químicos P, Ca e Mg.

Wang et al. (2016) relatam que essas diferenças se devem principalmente às diferentes variações espaciais entre as propriedades químicas do solo, que exigem diferentes números de pontos de amostra para expressá-los. Esses mesmo autores ainda observaram

que esta explicação se dar pelo fato de a SSA estar mais direcionada para a seleção dos pontos de amostragem, pois, seleciona mais pontos de amostras em regiões de alta variação e menos pontos de amostragem em regiões de baixa variação, isso faz com que esta abordagem de seleção possa conseguir bons resultados de monitorização com menos pontos de amostragem. Guedes et al. (2014) enfocam que estes gráficos de dispersão mostram que o anelamento simulado fornece uma busca eficiente de amostragem de desenhos que podem maximizar a precisão geral e minimizar o erro de soma quadrática da previsão espacial. Pereira et al. (2015) ressaltam que os mapas de estimativas dos valores simulados parecem mais realistas do que os mapas de estimativas krigagem ordinária, uma vez que reproduzem a variabilidade espacial modelada da grade previamente amostrada.

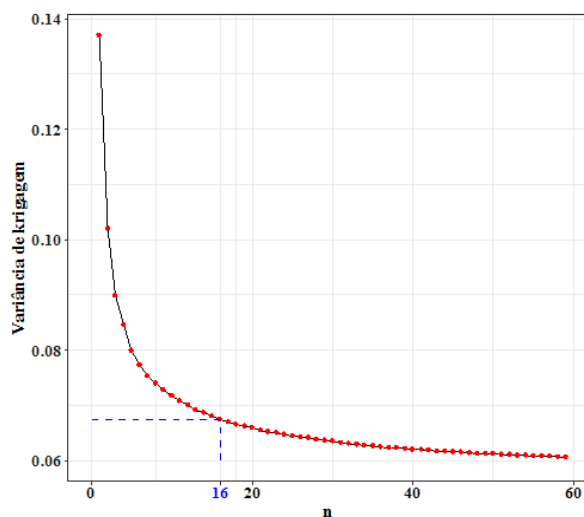


Figura 32. Variância de krigagem do pH do solo em função da quantidade de amostras (n) em área com oito ciclos de cultivo com abacaxizeiro

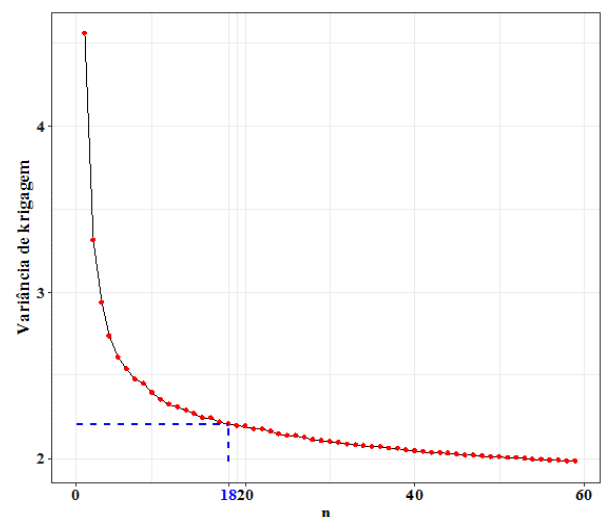


Figura 31. Variância de krigagem do teor de fósforo do solo em função da quantidade de amostras (n) em área com oito ciclos de cultivo com abacaxizeiro.

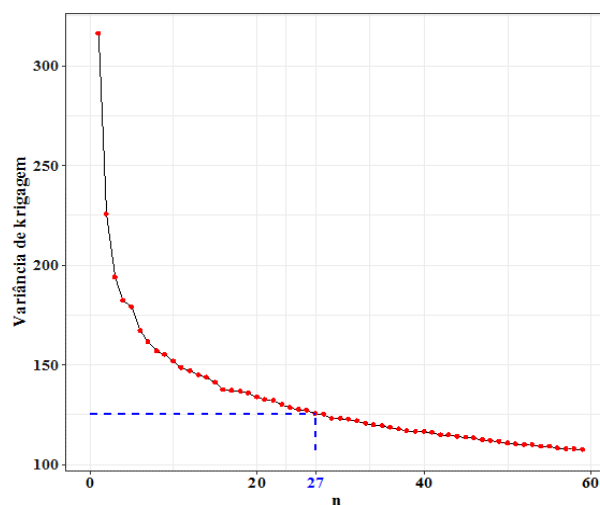


Figura 34. Variância de krigagem da capacidade de troca catiônica do solo em função da quantidade de amostras (n) em área com oito ciclos de cultivo com abacaxizeiro.

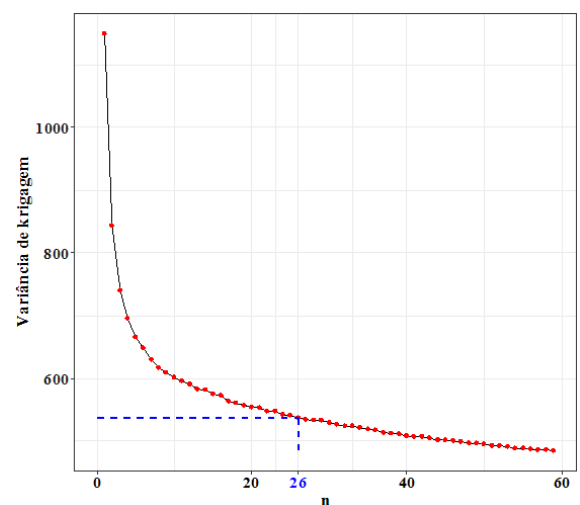


Figura 33. Variância de krigagem do teor de potássio do solo em função da quantidade de amostras (n) em área com oito ciclos de cultivo com abacaxizeiro.

Na Figura 35 observa-se a redução no número de pontos para uma amostragem otimizada em função da variância de krigagem média, verificando-se que 16 pontos amostrais é suficiente para minimizar a estimativa de krigagem para as análises dos atributos químicos. Montanari et al. (2012) relatam que as reduções no número de pontos na grade promovem a eliminação de pontos sobrepostos ou mesmo daqueles que estão muito próximos. Enquanto que Souza et al. (2014) constataram que o número de pontos e o aumento da distância de amostragem em campo interferiram na análise geoestatística e no detalhamento das informações nos mapas interpolados por krigagem e que os variogramas construídos com 105 pontos não diferem dos variogramas com 208 pontos.

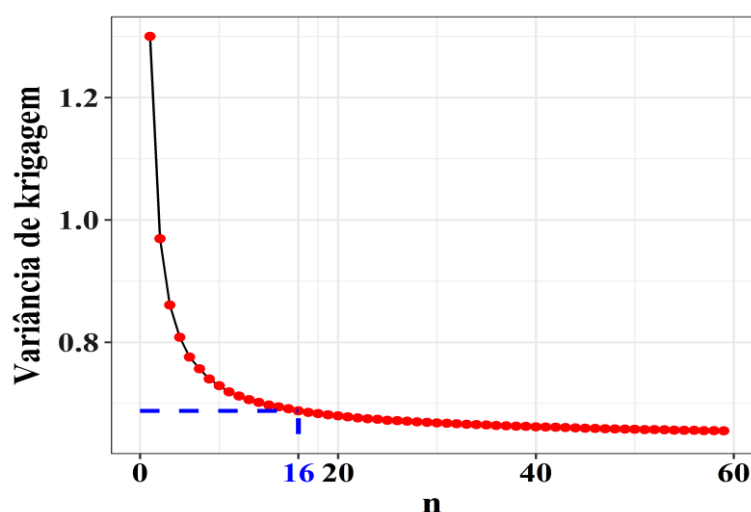


Figura 35. Variância de krigagem do variograma escalonado médio em função da quantidade de amostras (n) em área com oito ciclos de cultivo com abacaxizeiro.

Nas Figuras 36 e 37 verifica-se a distribuição dos pontos totais e a configuração dos pontos amostrais otimizados pela SSA na área de pesquisa, respectivamente. Comparando a disposição dos pontos, nota-se que há uma redução acentuada no número de pontos após a otimização e que a distribuição dos pontos se concentram no sentido sudeste a noroeste da área com oito ciclos de cultivo com abacaxizeiro, resultando assim, na obtenção de menores custos em função do menor número de amostras para a monitorização dos atributos em campo. Guedes et al. (2014) verificaram que à medida que aumenta o tamanho da grade inicial, há uma diminuição correspondente nas medidas de precisão de otimização nas simulações, pois uma grade inicial maior provoca um aumento no erro quadrático da soma da predição espacial e no número de pontos necessários para gerar o melhor design de amostragem otimizada.

No processo de otimização há uma tentativa para distribuir os pontos de modo a obter uma melhor cobertura da área de estudo e se houver aumento da grade pré-definida, há uma similaridade entre ajustes de amostragem otimizados e grades regulares quanto à disposição dos pontos (Guedes et al., 2016). Pereira et al. (2013) constataram aumento de precisão das estimativas entre os atributos químicos do solo de até 2% com distribuição no sentido Noroeste – sudeste da área de pesquisa, atribuindo os maiores ganhos de precisão devido à maior proximidade de locais de amostragem otimizados, promovendo uma contribuição de mais pontos em uma região menor.

Dessa forma, a maior contribuição no uso do método de algoritmo SSA é a identificação e redução de pontos com capacidade regular de manter a predição de valores nas estimativas dos atributos químicos do solo numa mesma área de pesquisa.

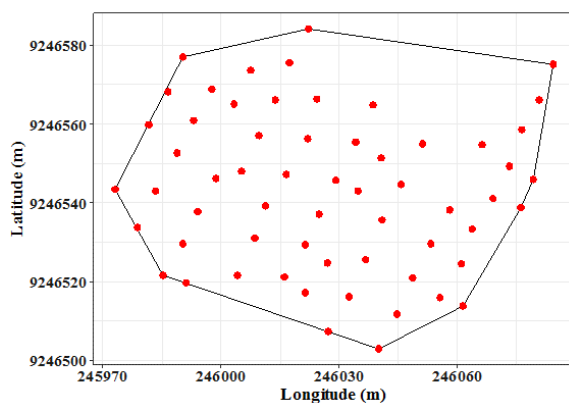


Figura 36. Distribuição espacial da totalidade de locais amostrados em área com oito ciclos de cultivo com abacaxizeiro.

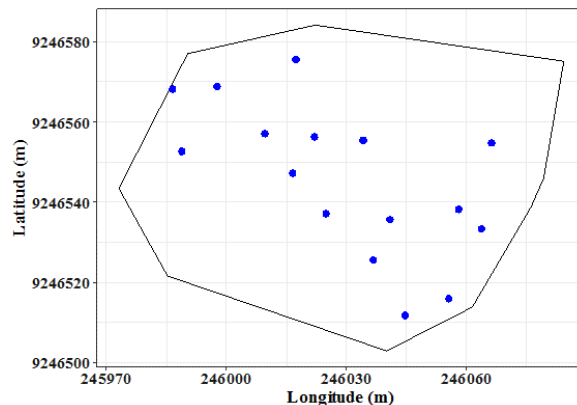


Figura 37. Distribuição espacial dos 16 locais indicados pelo método por anelamento simulado espacial para minimizar a variância de krigagem em área com oito ciclos de cultivo com abacaxizeiro.

5. Conclusão

A partir de um esquema amostral inicial e com a determinação de um variograma escalonado médio foi possível determinar o número de 16 pontos a serem amostrados para minimizar a variância de krigagem na área de pesquisa.

Os pontos amostrais selecionados situam-se na porção central da área avaliada.

6. Referência bibliográfica

BARBOSA, F. de A. dos R. Medidas de proteção e controle de inundações urbanas na bacia do rio Mamanguape – PB. 116 f. 2006. **Dissertação** (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. 212p.

GUEDES, L. P. C.; RIBEIRO JUNIOR, P. J.; URIBE-OPAZO, M. A. e BASTIANI, F. de. Soybean yield maps using regular and optimized sample with different configurations by simulated annealing. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n.1, p. 114-125, 2016.

GUEDES, L. P. C.; URIBE-OPAZO, M. A.; RIBEIRO JUNIOR, P. J. Optimization of sample design sizes and shapes for regionalized variables using simulated annealing. **Ciencia Investigación Agraria**, v. 41, p. 33-48, 2014.

GUEDES, L. P. C. Otimização de amostragem espacial. 2008. 143f. **Tese** (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

LEONARDO, F.A.P.; PEREIRA, W.E.; SILVA, S.M.; COSTA, J.P. Teor de clorofila e índice spad no abacaxizeiro cv. Vitória em função da adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 35, n. 2, p. 377-383, 2013.

LIMA, J. S. de S; SOUZA, G. S. de; SILVA, S. A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos químicos do solo em área de vegetação natural em regeneração. **Revista Árvore**, v. 34, n.1, p. 127-136, 2010.

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

MONTANARI, R.; SOUZA, G. S. A.; PEREIRA, G. T.; MARQUES Jr., J., SIQUEIRA, D.S. & SIQUEIRA, G.M. The use of scaled semivariograms to plan soil sampling in sugarcane fields. **Precision Agriculture**. v. 13, p. 1-11, 2012.

PEREIRA, G. T.; TEIXEIRA, D. B.; SOUZA, Z. M. de; OLIVEIRA, I. R. de; MARQUES JÚNIOR, J. Stochastic simulations of calcium contents in sugarcane area. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**. Ambiental, v. 19, n.8, p. 767-772, 2015.

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

PEBESMA, E.; SKOIEN, J.; BAUME, O.; CHORTI, A.; HRISTOPULOS, D. T.; MELLES, S.J. and SPILIOPOULOS, G. (2013). Intamapinteractive: procedures for automated interpolation - methods only to be used interactively, not included in intamap package. R package version 1.1-10.

<https://CRAN.R-project.org/package=intamapInteractive>.

SCUDIERO, E.; DEIANA, R.; TEATINI, P.; CASSIANI, G.; MORARI, F. Constrained optimization of spatial sampling in salt contaminated coastal farmland using EMI and continuous simulated annealing. **Procedia Environmental Sciences**. v. 7, p. 234-239, 2011.

SOUZA, Z.M. de; SOUZA, G.S. de; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Número de amostras na análise geoestatística e na krigagem de mapas de atributos do solo. **Ciência Rural**, v. 44, p. 261-268, 2014.

WANG, J.; WANG, X.; ZHOU, S.; WU, S.; ZHU, Y.; LU, C. Optimization of Sample Points for Monitoring Arable Land Quality by Simulated Annealing while Considering Spatial Variations. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 13, p. 980, 2016.

7. Considerações Finais

A região dos Tabuleiros Costeiros possui condições edafoclimáticas quase que perfeitas para o cultivo intensivo da abacaxicultura, propiciando qualidades organolépticas de frutos desta cultura considerados acima da média quando comparado aos frutos de abacaxi produzidos em outras regiões.

A áreas produtoras no município de Itapororoca caracterizam-se por serem de pequenas áreas oscilando entre cinco a dez hectares, basicamente de estrutura de agricultura familiar e com baixo emprego de informações técnicas e de tecnologias que visem auxiliar em informações que possam manter ou aumentar a eficiência na produção e na produtividade da cadeia da abacaxicultura, dentre as quais estar o manejo da fertilidade química desses solos.

A partir dos resultados da pesquisa, pode-se concluir que é necessária uma melhor transferência nas informações tecnológicas que possibilitem uma melhor gestão nos insumos férteis que são destinados aos solos, de modo a melhorar a eficiência de aplicação e a possibilitar ao pequeno agricultor uma melhor economia nos custos de produção e, por conseguinte, maximizar os lucros.

Desse modo, a partir de análises de solos, o uso de tecnologias geoestatísticas possibilitaram verificar a existência de variabilidade entre os atributos químicos em áreas com distintos ciclos de cultivos, relacionados com a fertilidade em função do manejo da adubação tradicional da região, e que essas áreas necessitam de práticas de correção da acidez e de melhor aplicação quantitativa de fertilizantes químicos, uma vez que a alta variabilidade demonstra que para algumas localidades dentro de uma mesma área produtiva, existe locais em que a dose estar subdimensionada, em outras partes adequado e em outras doses excessivas e isso gera um desequilíbrio ambiental e econômico.

Através desta pesquisa e mediante essas informações foi atribuído técnicas de otimização espacial para o total de pontos amostral inicial. Onde foi possível reduzir e identificar o número de pontos amostrais suficientes para uma análise fértil com bom nível de confiabilidade, promovendo redução de custos para o produtor poder verificar análise da fertilidade das áreas com o cultivo de abacaxi.