



DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n2p186-193>

Zona de manejo para preparo do solo na cultura da cana-de-açúcar

Francisco X. de Oliveira Filho¹, Neyton de O. Miranda², José F. de Medeiros³,
Paulo C. M. da Silva⁴, Francisco O. Mesquita⁵ & Thiago K. G. Costa⁶

Palavras-chave:

Saccharum ssp.
resistência do solo à penetração
geoestatística
penetrômetro

RESUMO

A compactação do solo influencia todas as fases de desenvolvimento das culturas, porém, em muitas áreas com baixa produção de cana-de-açúcar são ignorados valores críticos e efeitos da compactação do solo, razão por que é importante conhecer a localização e a intensidade da compactação do solo, para descompactá-lo. Neste sentido o trabalho visou aplicar três critérios para delinear zonas de manejo da compactação do solo: camada onde se iniciam valores de resistência à penetração críticos para o crescimento da cana-de-açúcar; índice de cone da camada de 0-40 cm e profundidade na qual ocorre a máxima resistência à penetração. A amostragem foi realizada em malha com 113 pontos espaçados 100 m, georreferenciados por um Sistema de Posicionamento Global, determinando-se a resistência do solo à penetração em oito camadas de 5 cm de profundidade, o índice de cone e a profundidade da máxima resistência por meio de penetrômetro com sistema automático de medição. A interpolação por krigagem foi usada para estimar valores para locais não amostrados permitindo a confecção de mapas de isovalores e a definição de quatro regiões no campo para realizar a subsolagem, de forma localizada.

Key words:

Saccharum ssp.
soil penetration resistance
geostatistics
penetrometer

Management zones for subsoiling of a sugarcane field

ABSTRACT

Soil compaction influences all stages of crop growth, but in many low yield sugarcane fields critical levels and effects of soil compaction are ignored. Therefore, identifying localization and intensity of compaction are very relevant for descompactation of soil. In this context, this study aimed to apply three criteria for delineating zones for soil compaction management: soil layer where first appear values of soil penetration resistance considered critical for sugarcane growth; cone index for 0-40 cm layer, and depth of occurrence of maximum soil penetration resistance. Sampling was carried out in a grid with 113 points spaced at 100 m, georeferenced by means of a Global Positioning System receiver. Soil penetration resistance in eight layers of 5 cm depth, cone index and depth of occurrence of maximum penetration resistance were determined from data gathered by an automatic measuring penetrometer. Estimative of non-sampled values were obtained by means of kriging interpolation, which allowed drawing of contour maps and the definition of four regions in the field for site specific subsoiling.

INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) da família Poaceae (Gramínea), uma das culturas mais importantes do mundo, é típica de climas tropicais e semitropicais e a principal matéria-prima para a fabricação de açúcar e álcool (etanol), sendo importante fonte de renda, geração de empregos e desenvolvimento (Camargo et al., 2010; Kirubakaran et al., 2013).

O sistema radicular da cana se desenvolve em maior profundidade que outras culturas, principalmente anuais, por ser semiperene, com ciclo de cinco a sete anos. Este sistema é formado por rizomas e raízes fasciculadas, das quais 85% se encontram na camada de 50 cm de profundidade e 60% na camada de 20 a 30 cm. Por isso, a cana-de-açúcar é uma das culturas mais afetadas pela compactação do solo (Lima et al., 2013; Oliveira et al., 2013).

No Nordeste do Brasil a cana-de-açúcar ocupa grande área de Tabuleiros Costeiros, onde topografia, profundidade e textura do solo favorecem o cultivo. Entretanto, várias operações mecanizadas realizadas em pouco tempo submetem esses solos a elevadas pressões em condições de umidade favoráveis à degradação física aumentando a compactação (Pacheco & Cantalice, 2011).

A compactação, uma das principais causas da degradação do solo (Ralisch et al., 2008; Roque et al., 2010), oferece séria restrição ao desenvolvimento das plantas e é devida sobretudo ao uso intenso de máquinas e implementos agrícolas (Lima et al., 2013) cada vez maiores e mais pesados na agricultura atual (Reichert et al., 2009).

Camadas subsuperficiais compactadas por pressões externas de máquinas agrícolas têm maior densidade e menor porosidade do que o solo acima ou abaixo delas e apresentam grande variabilidade em profundidade e espessura, tanto de campo para campo e dentro do mesmo campo (Gorucu et al., 2006).

Um dos parâmetros mais utilizados para avaliar a intensidade da compactação do solo é a resistência do solo à penetração (RSP), relacionada a diversos atributos do solo indicadores do grau de compactação, como textura, que influencia o comportamento do solo submetido a pressões externas. A RSP, medida por meio de penetrômetros, indica a resistência exercida pelo solo à penetração de uma ponta cônica e pode simular a resistência que o solo oferece à penetração das raízes (Almeida et al., 2012; Molin et al., 2012; Campos et al., 2013; Lima et al., 2013).

A subsolagem é utilizada para romper camadas de solo agrícola que sofreram compactação e minimizar seus efeitos. Em geral, antes de novo plantio as usinas de cana utilizam escarificador/subsolador, de forma homogênea no campo, mesmo onde não é necessário. Como a operação possui alto consumo de energia e custo, somente é necessária se existir camada impeditiva ao fluxo de água e/ou desenvolvimento das raízes. O ideal é realizá-la apenas em áreas com resistência à penetração maior ou igual ao valor crítico e se forem conhecidas a localização e a espessura da camada compactada (Silva et al., 2004).

As operações de subsolagem têm aumentado sem haver estudos para evitar sua realização à profundidade inadequada

ou em solos nos quais seja desnecessária. Para isso, é necessário uma metodologia para estabelecer a carência de subsolagem e localizar a profundidade da camada compactada. Usar o valor máximo de RSP para determinar a profundidade de preparo pode não ser suficiente para a remoção completa da camada compactada. Por outro lado, estipular valor crítico da resistência à penetração limitante para a cultura e analisar o gráfico de RSP, à procura de valores iguais ou superiores a ele, permitem localizar e determinar a espessura da camada compactada e propor a profundidade ótima de preparo do solo (Silva et al., 2004).

Existem métodos que determinam o volume de solo a ser mobilizado em função da resistência crítica à penetração: o probabilístico utiliza técnicas estatísticas, o determinístico calcula a porcentagem do volume de solo a ser mobilizado e sua distribuição espacial e o geoestatístico possibilita a subsolagem localizada, mediante a confecção de mapas de isovalores de resistência à penetração nos quais são delineadas zonas para manejo localizado, possibilitando subsolar apenas as áreas que necessitam (Gorucu et al., 2006; Salvador et al., 2008).

Objetivou-se com este trabalho aplicar três formas de delineamento de zonas de manejo em relação à compactação do solo, quais sejam, camadas do solo apresentando RSP considerada crítica para o desenvolvimento da cana-de-açúcar, índice de cone na camada de 0 a 40 cm e profundidade da máxima resistência do solo à penetração (RSP).

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no ano de 2013, na Usina Vale Verde, em Baía Formosa, RN, localizada a 6° 22' 23" de latitude sul e 35° 0' 34" longitude oeste. O clima é do tipo As, pela classificação de Köppen-Geiger, ou seja, tropical chuvoso com estação seca e um período de chuvas compreendido nos meses de janeiro a agosto, temperatura média anual de 27,5 °C e pluviosidade média de 1.625,2 mm ano⁻¹.

A área de estudo foi a Fazenda Casqueira (Figura 1A), cultivada com cana-de-açúcar, com área de 113,59 ha subdividida em 12 talhões (Figura 1B); nela foi gerada malha amostral com 50 m a partir da borda do perímetro e 100 m entre pontos, totalizando 113 pontos distribuídos regularmente, um por hectare. A malha com pontos amostrais foi georreferenciada em coordenadas UTM, Datum Horizontal WGS 84, Zona 25 Sul, por meio de aparelho GPS com precisão média de 5 m.

A área possui 12 talhões de 10 ha, com exceção de três deles, cuja área varia de 7,2 a 8,3 ha. Além disto, havia variação em datas de plantio com seis talhões em janeiro e fevereiro de 2010, três em maio de 2006 e três em julho de 2002. As variedades cultivadas eram RB867515, em cinco talhões, SP832847, em três, RB92579, em dois, além de RB931011 e RB962962, em um talhão. Essas variações são inerentes à programação agrícola da Empresa devendo-se ressaltar que por ocasião das coletas de dados a cultura estava em início de crescimento para a safra 2012-2013.

Os solos da área experimental foram classificados como Latossolo Amarelo, Argissolo Amarelo e Neossolo Quartzarênico cujos valores de algumas características da área estudada constam na Tabela 1.

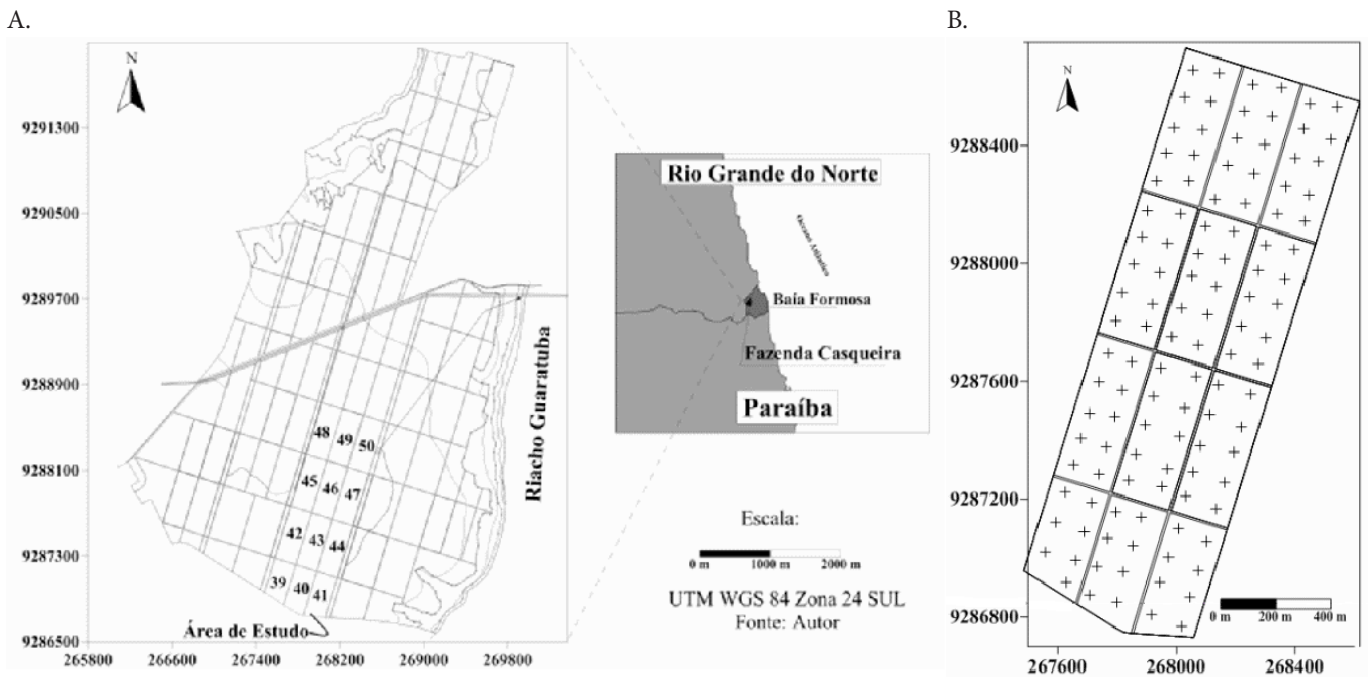


Figura 1. Área da Usina Vale Verde com a delimitação dos talhões estudados (A) e o Grid dos pontos amostrais georreferenciados (B)

Tabela 1. Características físicas do solo da área estudada (médias ± erro padrão) na Fazenda Casqueira, separadas por camada amostrada

Prof. (cm)	Areia	Silte (g kg ⁻¹)	Argila	Dp (kg dm ⁻³)
0-10	0,89 ± 0,01	0,03 ± 0,01	0,07 ± 0,007	2,51 ± 0,03
10-20	0,88 ± 0,02	0,04 ± 0,01	0,07 ± 0,008	2,46 ± 0,07
20-30	0,87 ± 0,02	0,04 ± 0,02	0,09 ± 0,010	2,43 ± 0,03
30-40	0,86 ± 0,02	0,02 ± 0,03	0,12 ± 0,010	2,43 ± 0,03
Ds (kg dm ⁻³)	P _{tot}	MIC (%)	MAC	
0-10	1,62 ± 0,021	35,46 ± 0,67	23,27 ± 0,70	12,19 ± 0,59
10-20	1,67 ± 0,022	35,65 ± 0,58	23,34 ± 1,04	12,31 ± 0,73
20-30	1,72 ± 0,019	33,85 ± 0,77	21,10 ± 1,22	12,76 ± 0,85
30-40	1,74 ± 0,038	36,43 ± 0,61	19,34 ± 1,46	17,09 ± 1,49

Dp = Densidade de partícula; Ds = Densidade do solo; P_{tot} = Porosidade total; MIC = Microporosidade; MAC = Macroporosidade

A RSP foi determinada por meio de penetrômetro marca Falker, modelo SoloStar PLG 5500, montado em quadriciclo a gasolina, marca Shineray, modelo XY 250-STVI. O penetrômetro dotado de sistema automático de medição de resistência à penetração tem as seguintes características: velocidade nominal de inserção de 3,0 m s⁻¹; resolução da medida de profundidade configurado para 5 cm; profundidade máxima de penetração de 40 cm; protocolo de comunicação com GPS NMEA 0183; cone número 3, com diâmetro de 7,94 mm, índice de cone máximo de 15,1 MP, resolução de 0,020 MPa. O cone e a haste do penetrômetro se adequam à norma da ASAE (2004).

As variáveis determinadas foram a RSP, em oito camadas de cinco centímetros de profundidade (RSP₀₋₅; RSP₅₋₁₀; RSP₁₀₋₁₅; RSP₁₅₋₂₀; RSP₂₀₋₂₅; RSP₂₅₋₃₀; RSP₃₀₋₃₅; RSP₃₅₋₄₀), as camadas em que se iniciam a RSP crítica e o Índice de Cone (IC) de 0 a 40 cm. A cada quatro leituras de RSP, simultaneamente à leitura do penetrômetro, retiraram-se amostras de solo nas camadas de 0-10, 10-20 e de 20-30 cm de profundidade, para determinar o teor de água do solo após secagem em estufa, por 24 h a 105 °C.

As variáveis foram analisadas por meio da estatística descritiva, sendo calculados máximo e mínimo e coeficiente de variação (CV), este último classificado por Warrick (1998) como baixo, se menor que 15%; médio, entre 15 e 50% e alto acima de 50%. O ajuste à distribuição normal foi verificado pelo Teste Shapiro-Wilk a 5% de probabilidade. O teste t para dados pareados foi utilizado para comparar a RSP entre camadas amostradas. O teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade foi utilizado para comparar teores de umidade entre talhões e entre profundidades.

A existência de correlação entre RSP e teor de água no solo foi verificada por meio do coeficiente de correlação de Pearson quando as variáveis se ajustaram à distribuição normal e pelo coeficiente de correlação de Spearman, para dados não ajustados à normalidade (Stenger et al., 2002).

A geoestatística foi utilizada para analisar a existência de dependência espacial das variáveis; para tal, foram elaborados semivariogramas nos quais a semivariância (γ(h)) foi estimada pela Eq. 1.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N_i(h)} \sum_{j=1}^{N_i(h)} [z(s_i) - z(s_i + h)]^2 \quad (1)$$

em que: N(h) é o número de pares de pontos z(s_i) e z(s_i + h) separados por distância h.

O ajuste do modelo matemático para os semivariogramas de cada variável forneceu os parâmetros: Efeito Pepita (C₀), Patamar (C₀ + C) e Alcance (A). O efeito pepita, tomado como porcentagem do patamar, foi utilizado para determinar o grau de dependência espacial das variáveis (Cambardella et al., 1994) que é classificado como forte (< 25%); moderado (26 a 75%) ou fraca (> 75%).

A estimativa de valores de RSP para os locais não amostrados foi realizada por interpolação dos valores de 106 pontos amostrados, pelo método de krigagem, também

empregado por Santos et al. (2012) e Campos et al. (2013), que utilizam as informações de variabilidade espacial e os parâmetros do semivariograma, possibilitado a confecção de mapas de isovalores.

Esta técnica, segundo Camargo (1998) considera uma superfície sobre a qual se observa alguma propriedade do solo, Z , em n pontos distintos, com coordenadas representadas pelo vetor x . Assim, tem-se um conjunto de valores $\{z(x_i), i = 1, \dots, n\}$, onde x_i , identifica uma posição em duas dimensões representada pelos pares de coordenadas (x_i, y_i) . Supondo-se que se objetive estimar o valor de Z no ponto X_0 , o valor desconhecido de $Z(x_0)$ pode ser estimado a partir de combinação linear dos n valores observados, adicionado a um parâmetro, λ_0 , conforme Eq. 2.

$$Z_{x_0}^* = \lambda_0 + \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i) \quad (2)$$

As formas de delineamento de zonas de manejo da compactação do solo foram: início da camada de solo apresentando RSP crítica para o desenvolvimento da cana-de-açúcar; índice de cone na camada de 0 a 40 cm e profundidade da máxima resistência do solo à penetração (RSP). A RSP crítica de 4,0 MPa foi utilizada visto que, conforme Ribeiro (2010), valores acima deste causam impedimento ao desenvolvimento das raízes da cana-de-açúcar. O critério de validação dos mapas modelados foi a soma dos quadrados dos desvios com relação ao valor amostrado frente ao valor modelado em cada um dos pontos de coleta.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As médias da resistência do solo à penetração, apresentadas na Tabela 2, diferem entre talhões e entre camadas. Analisando o Índice de Cone (IC_{0-40}) por talhão verifica-se que a menor média (3,34 MPa), considerada moderada por Ribeiro (2010) e o menor valor máximo (5,81 MPa) ocorreram no talhão 45, pouco inferiores ao talhão 48 enquanto que a maior média (6,16 MPa), considerada alta e o valor máximo (9,97 MPa) ocorreram no talhão 47; o talhão 42 apresentou IC inferior apenas ao talhão 47 mas sua RSP

Tabela 2. Valores médios da resistência do solo à penetração (RSP) por talhão

Talhão	Resistência do solo à penetração-RSP (MPa)					Valor máximo
	Profundidades (cm)					
	0-10	10-20	20-30	30-40	0-40**	
39	2,27	6,47	7,08	7,71	5,48	7,75
40	2,43	7,75	8,03	5,31	5,50	9,45
41	2,65	7,16	7,73	7,56	5,87	7,83
42	2,73	7,84	7,54	7,34	5,92	8,20
43	1,54	5,92	7,56	8,44	5,40	9,72
44	1,53	4,99	6,03	8,79	4,91	9,00
45	1,28	2,95	4,49	5,67	3,34	5,81
46	2,30	4,77	6,26	6,57	4,68	7,16
47	2,23	6,70	8,40	9,31	6,16	9,79
48	0,98	3,42	5,74	6,40	3,74	6,78
49	3,16	6,30	5,95	6,03	5,11	6,80
50	3,00	7,27	6,91	5,15	5,30	7,57
Média *	2,09	5,96	6,81	7,02	5,02	7,99

*Média fornecida pelo Sistema SoloStar (acompanha o penetrômetro PLG 5500); ** IC = Índice de cone

máxima foi a quinta maior indicando que a distribuição da compactação entre as camadas também difere entre talhões. Levando em conta apenas essas diferenças já se poderia considerar cada talhão como zona de manejo na qual se pode adotar manejo diferenciado daquele utilizado de forma homogênea na área.

A divisão do campo em classes homogêneas é passo importante na evolução do manejo uniforme para o localizado. Nesta divisão se utilizam, como critérios, atributos químicos e físicos do solo e produtividade. A RSP e a textura são critérios agrônomicos considerados estáveis. Neste sentido cada classe de manejo recebe o mesmo tratamento ou dose e possui diversas zonas de manejo ao longo do campo. Os custos de dividir o campo em classes de manejo compensam se houver diferença em resposta agrônômica entre elas e praticabilidade do manejo variável (Taylor et al., 2007; Bazzi et al., 2013).

Analisando a RSP por camada em cada talhão (Tabela 2) observa-se a existência de camadas com maiores valores de RSP, cada uma medindo, em geral, de 10 a 20 cm; na maioria dos talhões essas camadas se localizam entre 25 e 40 cm de profundidade, com exceção dos talhões 40 (15 a 25 cm), 42 (10 a 25 cm), 49 (5 a 15 cm) e 50 (10 a 30 cm). Essas exceções também podem caracterizar zonas de manejo de vez que o preparo do solo poderia ser realizado a menores profundidades do que no restante da área. Gorucu et al. (2006) confirmaram ser possível determinar espessura e profundidade da camada compactada a partir de dados de penetrômetro e observaram grande variação não relacionada ao teor de água no solo, na profundidade e espessura da camada compactada (4 a 25 cm) tal como na profundidade ótima de preparo (25 a 45 cm).

Analisando o conjunto dos dados de RSP do campo, além das amplitudes consideráveis, os coeficientes de variação das variáveis analisadas são considerados médios, com exceção da RSP das camadas situadas entre 0 e 20 cm e da umidade do solo na camada de 0 a 10 cm (Tabela 3). O ajuste dos dados à normalidade não foi observado para o índice de cone nem para a profundidade de RSP máxima. Segundo Camargo et al. (2010), quando os valores dos atributos apresentam alta variabilidade seus valores médios podem não representar o comportamento em toda a área e a análise espacial se torna

Tabela 3. Estatística descritiva da resistência do solo à penetração e do teor de água no solo das diferentes camadas amostradas na área de estudo

Variável	Média	Mínimo	Máximo	² CV (%)	³ SW
¹ RP ₀₋₅ (MPa)	0,94 g	0,04	3,31	75,00	0,1600
RP ₅₋₁₀ (MPa)	3,38 f	0,04	8,61	64,00	0,1200
RP ₁₀₋₁₅ (MPa)	5,21 e	0,59	13,76	54,00	0,1300
RP ₁₅₋₂₀ (MPa)	5,63 d	1,22	14,86	55,00	0,1200
RP ₂₀₋₂₅ (MPa)	6,20 c	1,05	14,20	44,00	0,0900
RP ₂₅₋₃₀ (MPa)	6,73 b	2,31	12,57	38,00	0,0600
RP ₃₀₋₃₅ (MPa)	7,21 a	1,62	14,01	36,00	0,0700
RP ₃₅₋₄₀ (MPa)	7,45 a	1,61	14,42	39,00	0,0600
IC ₀₋₄₀ (MPa)	5,21	1,68	9,88	32,85	0,0040
⁴ PRSP _{máx} Cm	28,88	5,00	40,00	34,83	0,0001
Umidade ₀₋₁₀ (%)	4,76	0,25	12,58	57,23	0,1900
Umidade ₁₀₋₂₀ (%)	5,93	0,10	11,73	45,61	0,1100
Umidade ₂₀₋₃₀ (%)	6,96	1,80	12,64	38,61	0,3900

¹Resistência à penetração; ²Coefficiente de variação; ³Nível de significância do teste Shapiro-Wilk = Ajustam-se à distribuição normal as variáveis com Pr > 0,05; ⁴ Profundidade da máxima RP; Médias de camadas seguidas de letras diferentes diferem pelo teste t para dados pareados a 0,05 de significância

importante para planejar, de forma localizada, as ações de manejo.

A resistência do solo à penetração aumentou com a profundidade, com diferenças significativas entre camadas pelo teste t ($p < 0,01$), com exceção das camadas de 30 a 35 e 35 a 40 cm, que não diferiram (Tabela 3). O aumento da resistência à penetração com a profundidade também foi constatado em estudo da compactação do solo em diferentes sistemas de cultivo (Pereira et al., 2002) e considerado característica de solos com altos teores de areia. Valores menores que os obtidos neste trabalho foram relatados por Lima et al. (2013) que, usando dois tipos de penetrômetro, obtiveram 1,94 MPa como o maior valor de RSP, em área experimental sob cultivo durante 15 anos, e Campos et al. (2013), que obtiveram 2,86 MPa na profundidade de 0,15-0,30 m em estudo da variabilidade espacial de RSP em área cultivada com cana-de-açúcar.

Com relação ao teor de água no solo, não se encontrou diferença pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$) entre talhões nem entre camadas; além disto, a análise de correlação indica que, em geral, não houve correlação entre os valores de RSP

das diferentes camadas com os teores de umidade do solo, ou seja, os valores de RSP não foram influenciados pelos teores de água no momento da determinação. Isto demonstra que a RSP indica efetivamente as camadas compactadas do solo e que seus dados podem ser utilizados sem a necessidade de corrigi-los em função da umidade (Ribeiro, 2010).

Os semivariogramas obtidos para as variáveis mapeadas (Tabela 4) foram do modelo esférico e demonstram que todas elas apresentaram forte dependência espacial; isto indica, segundo Cambardella et al. (1994) que as propriedades são controladas por variações intrínsecas em características do solo, como textura e mineralogia. Os alcances obtidos não diferiram muito entre si e variaram entre 117 e 139 m.

O primeiro critério empregado para delinear zonas de manejo se refere à distribuição espacial do Índice de Cone na camada de 0 a 40 cm de profundidade. As regiões de maior IC dão a indicação mais direta da necessidade de subsolagem por serem os locais em que a compactação é mais intensa em toda a camada. Por este critério foi elaborada a Figura 2A na qual se distingue uma zona englobando os talhões 45 e 48

Tabela 4. Parâmetros dos semivariogramas utilizados na interpolação por krigagem de variáveis relacionadas à resistência do solo à penetração (RSP)

Variável	Modelo	Efeito pepita (C_0)	Patamar ($C_0 + C$)	Alcance (m)	¹ EPP (%)
Índice de cone (MPa)	Esférico	0,01	3,27	139	0,30
Prof RSP crítica	Esférico	0,10	78,36	117	0,13
Prof RSP máxima	Esférico	0,10	103,00	126	0,10

¹Efeito pepita como percentagem do patamar

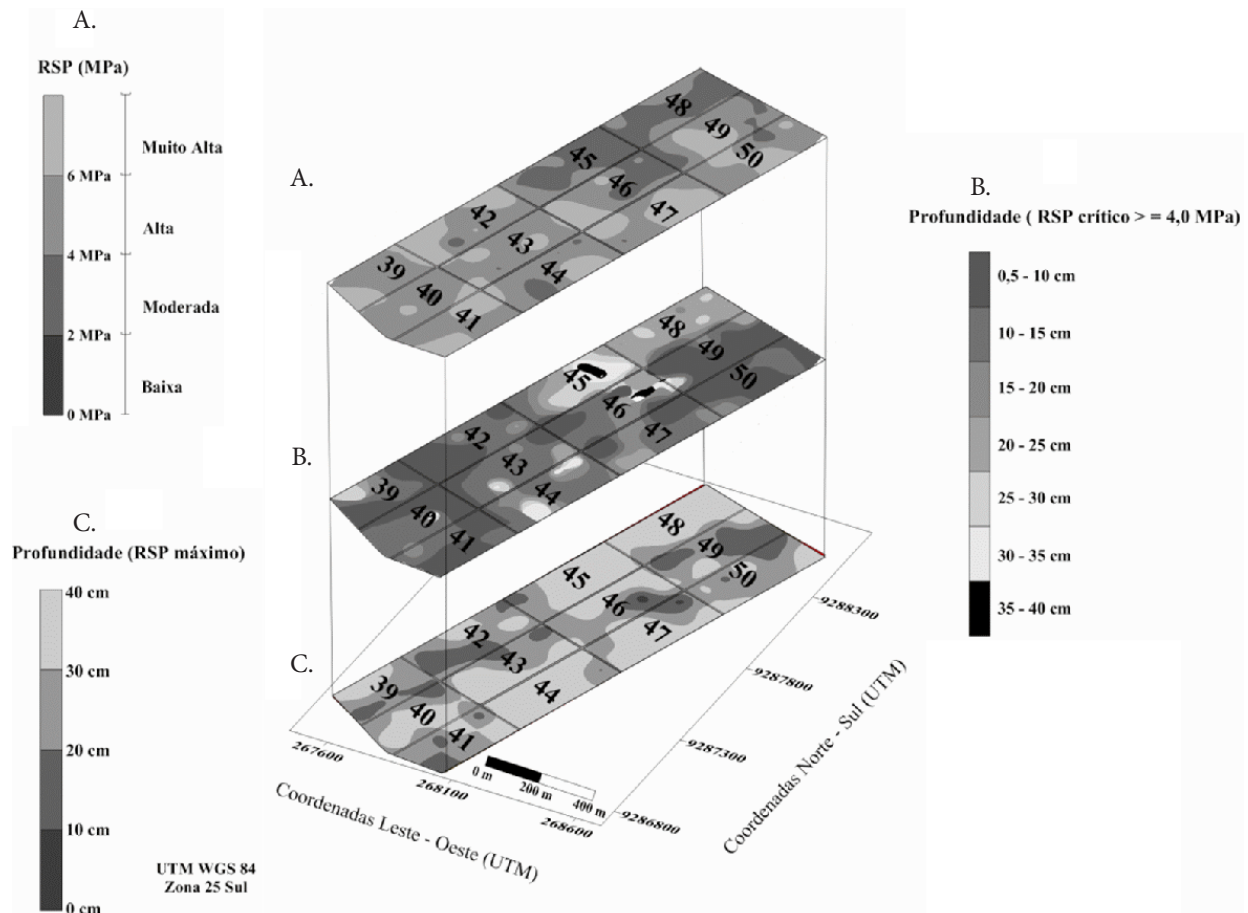


Figura 2. Mapa de espacialização do Índice de cone na área estudada (A); Mapa de espacialização das camadas nas quais têm início os valores críticos da RSP (B); Mapa de espacialização da profundidade de ocorrência da máxima resistência do solo à penetração - RSP (C)

podendo incluir o 46. Esta região, considerada de compactação moderada (2 a 4 MPa), representa 19% da área do campo (Tabela 5) enquanto regiões com compactação muito alta (acima de 6 MPa) abrangem 26% da área e se distribuem em manchas pelos outros talhões. A maior parte do campo (55%) apresenta alta intensidade de compactação (4 a 6 MPa).

O segundo critério utilizado foi a identificação da camada com a qual se inicia a RSP crítica para o desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar, de 4,0 MPa (Figura 2B). Não há incidência de valores críticos da RSP na camada de 0 a 5 cm; abaixo dela, o percentual da área onde começa a incidência dos valores críticos da RSP vai diminuindo com a profundidade, apenas em regiões esparsas do campo a camada com RSP crítica se inicia em profundidades maiores do que 25 cm. Esta RSP já começava entre 5 a 10 cm de profundidade em 35% da área (Tabela 5) enquanto que em 23% da área ela começava entre 10 a 15 cm e entre 15 e 20 cm em 17% da área. Desta maneira observou-se que em 58% da área a RSP crítica começava até 15 cm de profundidade e em 75% começava em profundidade até 20 cm.

Desta forma, pode-se identificar quatro zonas bem definidas, em que uma delas se localiza nos talhões 45 e 48, região em que a camada compactada ocorre a maiores profundidades enquanto que nos talhões 49, 50 e parte do 47, a camada compactada já se inicia na camada de 5 a 10 cm; outra região bem definida é a que inclui parte dos talhões 40, 41 e 42. Segundo o mesmo critério existe uma região definida pela predominância da RSP crítica entre 10 e 15 cm englobando os talhões 43, 44, 46 e 47. A importância desses mapas está na possibilidade de serem empregados para planejamento de ações de manejo localizado, conforme a intensidade de compactação que cada região do campo apresenta, como a variação na profundidade do preparo do solo, ao longo da área, que foi estudada por Gorucu et al. (2006).

O critério da profundidade de ocorrência da máxima RSP (Figura 2C) pode indicar a que profundidade a subsolagem deve ser realizada ou a inviabilidade de sua realização, no caso de grandes profundidades. Considerando as quatro zonas de manejo discutidas anteriormente, pode-se identificá-las também conforme este critério. Estão bem definidos os talhões 44, 45, 47 e 48 cuja máxima compactação ocorre entre 30 e 40 cm, da mesma maneira que a região que engloba parte dos talhões 40, 43, 46 e 47. A região que engloba os talhões 47, 49 e 50 apresenta a máxima compactação nas camadas entre 20 e 30

cm, com áreas menores apresentando a profundidade de 10 a 20 cm, enquanto nos talhões 40, 41 e 42 a máxima compactação ocorre predominantemente nas camadas entre 20 e 30 cm, com áreas menores de profundidade entre 10 e 20 cm.

Segundo o critério da profundidade de máxima RSP, a Tabela 5 fornece informações de que em metade da área a subsolagem não necessitaria ser realizada a mais de 30 cm de profundidade e a Figura 2C permite localizar, no campo, zonas onde a subsolagem pode ser aplicada a profundidades diferentes incorrendo em economia de combustível, tempo e desgaste de máquinas.

Quanto à outra metade da área, em que a profundidade de máxima RSP ocorre entre 30 e 40 cm de profundidade, seria necessário subsolar a 40 cm de profundidade, ou mais, o que seria muito caro e demorado, podendo não ter resposta em produtividade da cultura. Em geral, na ausência de informações os agricultores preparam o solo na mesma profundidade em toda a área, havendo alguns que preparam a mais de 40 cm de profundidade sem saber se a subsolagem anual é benéfica pois, segundo Gorucu et al. (2006), a ponta do subsolador deve movimentar-se abaixo da camada compactada porém acima do horizonte mais argiloso dos tabuleiros costeiros americanos.

Usando os três critérios e os talhões como referência pode-se identificar quatro regiões do campo diferentes entre si. Uma das mais evidentes é composta pelos talhões 45 e 48, nos quais predomina o IC com nível moderado e pequenas áreas de IC alto (Figura 2). Neste aspecto o talhão 46 se assemelha aos 45 e 48. Nesses talhões a RSP crítica se inicia, em geral, na camada de 20 a 25 cm de profundidade (Figura 2B), com pequena parte do talhão 45 tendo a RSP crítica se iniciando na camada de 25 a 35 cm indicando o volume de solo mais explorado pelas raízes. Em relação à profundidade de máxima RSP (Figura 2C), existe predominância da camada entre 30 e 40 cm, com o talhão 46 também fazendo parte da região; outra região que se diferencia das demais inclui os talhões 49 e 50, com a participação menos evidente do talhão 47. O IC nesses talhões é predominantemente alto, com menor porção de IC muito alto, o qual avança para o talhão 47. Nesta região a RSP crítica se inicia predominantemente na camada de 5 a 10 cm, a qual também abrange pequena parte do talhão 47 indicando que as raízes possuem um volume facilmente explorado menor no que na região já descrita. Nesses três talhões a profundidade de máxima RSP ocorre predominantemente na camada de 20 a 30 cm.

Tabela 5. Distribuição em hectares e em percentagem da área de cada nível de resistência do índice de cone, dos locais em que se inicia a resistência do solo à penetração (RSP) crítica em cada camada e da profundidade de ocorrência da RSP máxima na área estudada da Fazenda Casqueira

Níveis de resistência do índice de cone (MPa)													
0 a 2		2 a 4				4 a 6				> 6			
(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
0,0	0,0	21,3	18,8	63,1	55,6	29,1	25,6						
Camada de solo do início da RSP crítica (cm)													
5-10		10-15		15-20		20-25		25-30		30-35		35-40	
(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
39,8	35,2	25,8	22,9	19,3	17,3	12,9	11,4	7,5	6,6	5,3	4,7	2,1	1,9
Profundidade de ocorrência da RSP máxima (cm)													
0 a 10		10 a 20				20 a 30				30 a 40			
(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
2,0	1,7	25,1	22,1	29,2	25,7	57,3	50,4						

Os talhões 40, 41 e 42 formam uma quarta região na qual predomina IC alto a muito alto, a camada de início da RSP crítica predominante é a de 5 a 10 cm, com algumas áreas nas quais ela começa de 10 a 15 cm o que sinaliza pequeno volume explorado facilmente pelas raízes.

Os resultados deste estudo possibilitam o manejo localizado da descompactação do solo realizando-o na profundidade mais adequada e em locais onde seja realmente necessário, com economia de energia e custos devidos a tratores mais potentes, combustível, tempo e desgaste de máquinas (Silva et al., 2004; Salvador et al., 2008). Segundo Bianchini et al. (1999), a exigência de força do escarificador aumenta de forma quadrática em função da profundidade de trabalho. Em vista disto, trabalhar em profundidade variável conforme a camada do solo a ser descompactada resulta em economia de combustível, como a obtida por Raper et al. (2007) que foi de 43 e 27% para as profundidades de 25 e 35 cm, respectivamente, comparado a 45 cm e por Keskin et al. (2011) que economizaram 56,4% de energia e 33,8% em combustível em virtude de prepararem, em 67 a 75% dos campos estudados, a profundidade menor que a normalmente usada.

CONCLUSÕES

1. Os mapas elaborados permitem definir quatro regiões do campo onde se pode aplicar a subsolagem de forma diferenciada.

2. A indicação de subsolagem na região dos talhões 40, 41 e 42 cujo índice de cone é alto a muito alto e resistência do solo à penetração crítica iniciando entre 5 e 10 cm, é de até 15 cm; entretanto, a profundidade de operação seria pouco maior que 20 cm na maior parte da área.

3. A região dos talhões 43 e 44 é a que proporciona menor segurança para ser utilizada como zona de manejo, devendo receber o mesmo manejo dos talhões vizinhos.

AGRADECIMENTOS

À Usina Vale Verde (Grupo Farias) pelo apoio e concessão da área de estudo.

LITERATURA CITADA

Almeida, C. X.; Centurion, J. F.; Jorge, R. F.; Barbosa, J. C.; Andrioli, I. Funções de pedotransferência para a curva de resistência do solo à penetração. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, p.1745-1755, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000600008>

ASAE - American Society of Agricultural Engineers. ASAE S313.3. Soil Cone Penetrometer. St. Joseph: ASAE Standards. 2004. p.858-860.

Bazzi, C. L.; Souza, E. G.; Uribe-Opazo, M. A.; Nóbrega, L. H. P.; Rocha, D. M.. Management zones definition using soil chemical and physical attributes in a soybean area. *Engenharia Agrícola*, v.34, p.952-964, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162013000500007>

Bianchini, A.; Sabino, M. H. C.; Borges, P. H. M.; Sguarezzi, J. J. Comportamento operacional de um escarificador de Hastes parabólicas em solo de cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.3, p.395-401, 1999.

Camargo, E. C. G. Geoestatística: Fundamentos e aplicações. In: Câmara, G.; Medeiros, J. S. (ed.) *Geoprocessamento para projetos ambientais*. São José dos Campos: INPE, 1998. <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/5_geoest.pdf>. 29 Nov. 2013.

Camargo, L. A.; Marques Júnior, J.; Pereira, G. T. Spatial variability of physical attributes of an Alfisol under different hillslope curvatures. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.617-630, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000300003>

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, p.1501-1511. 1994. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>

Campos, M. C. C.; Aquino, R. E.; Oliveira, I. A.; Bergamim, A. C. Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração e umidade do solo em área cultivada com cana-de-açúcar na região de Humaitá, Amazonas, Brasil. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.8, p.305-310, 2013. <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v8i2a2091>

Gorucu, S.; Khalilian, A.; Han, Y. J.; Dodd, R. B.; Smith, B. R. An algorithm to determine the optimum tillage depth from soil penetrometer data in coastal plain soils. *Applied Engineering in Agriculture*, v.22, p.625-631, 2006. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.21993>

Keskin, S. G.; Khalilian, A.; Han, Y. J.; Dodd, R. B. Variable-depth tillage based on geo-referenced soil compaction data in coastal plain soils. *International Journal of Applied Science and Technology*, v.1, p.22-32, 2011.

Kirubakaran, R.; Venkataramana, S.; Jaibir, M. S. M. Effect of ethrel and glyphosate on the ripening of sugar cane. *International Journal of Chemical Technology Research*, v.5, p.1927-1938, 2013.

Lima, R. P.; Leon, M. J.; Silva, A. R. Comparação entre dois penetrômetros na avaliação da resistência mecânica do solo à penetração. *Revista Ceres*, v.60, p.577-581, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0034-737X2013000400018>

Molin, J. P.; Dias, C. T. S.; Carbonera, L. Estudos com penetrometria: Novos equipamentos e amostragem correta. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, p.584-590. 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000500015>

Oliveira, I. A.; Campos, M. C. C.; Soares, M. D. R.; Aquino, R. E.; Marques Júnior, J.; Nascimento, E. P. Variabilidade espacial de atributos físicos em um cambissolo háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.37, p.1103-1112, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832013000400027>

Pacheco, E. P.; Cantalice, J. R. B. Compressibilidade, resistência a penetração e intervalo hídrico ótimo de um Argissolo amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos tabuleiros costeiros de Alagoas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, p.403-415, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000200010>

Pereira, J. O.; Siqueira, J. A. C.; Uribe-Opazo, M. A.; Silva, S. L. Resistência do solo à penetração em função do sistema de cultivo e teor de água do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, p.171-174, 2002. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662002000100030>

Ralisch, R.; Miranda, T. M.; Okomura, R. S.; Barbosa, G. M. C.; Guimarães, M. F.; Scopel, E.; Balbino, L. C. Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho-Amarelo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, p.381-384, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662008000400008>

Raper, R. L.; Reeves, D. W.; Shaw, J. N.; Santen, E. van; Mask, P. L. Benefits of site-specific subsoling for cotton production in Coastal Plain soils. *Soil & Tillage Research*, v.96, p.174-181, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2007.05.004>

- Reichert, J. M.; Kaiser, D. R.; Reinert, D. J.; Riquelme, U. F. B. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.44, p.310-319, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2009000300013>
- Ribeiro, C. A. Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração em áreas mecanizadas de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*). Jaboticabal: FCAV/UEP: 2010. 85p. Dissertação Mestrado
- Roque, A. A. O.; Souza, Z. M.; Barbosa, R. S.; Souza, G. S. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.45, p.744-750, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2010000700016>
- Salvador, N.; Benez, S. H.; Mion, R. L. Consumo de combustível na operação de subsolagem realizada antes e depois de diferentes sistemas de preparo periódico do solo. *Engenharia Agrícola*, v.28, p.256-262, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162008000200006>
- Santos, K. S.; Montenegro, A. A. A.; Almeida, B. G.; Montenegro, S. M. G. L.; Andrade, T. S.; Fontes Júnior, R. V. P. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, p.828-835, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000800003>
- Silva, G. da; Cappelli, N. L.; Umezu, C. K. Métodos probabilístico e determinístico para diagnóstico da necessidade de subsolagem de solos agrícolas. *Engenharia Agrícola*, v.24, p.130-141, 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162004000100015>
- Stenger, R.; Priesack, E.; Beese, F. Spatial variation of nitrate-N and related soil properties at the plot-scale. *Geoderma*, v.105, p.259-275, 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00107-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00107-0)
- Taylor, J. A.; McBbratney, A. B.; Whelan, B. M. Establishing management classes for broadacre agricultural production. *Agronomy Journal*, v.99, p.1366-1376, 2007. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2007.0070>
- Warrick, A. W. Spatial variability. In: Hillel, D. *Environmental soil physics*. San Diego: Academic Press, 1998. p.655-675.