



## Variabilidade espacial da produtividade de sorgo e atributos físicos em um Planossolo

*Spatial variability of sorghum forage yield and physical attributes of an Planosol*

Rafael Montanari<sup>1</sup>, Elói Panachuki<sup>2</sup>, Lenon Henrique Lovera<sup>1</sup>, Israel Souza Oliveira<sup>2</sup>,  
Carolina dos Santos Batista Bonini<sup>1</sup>

**Resumo** - O cultivo do sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) para produção de silagem vem aumentando na região Centro-Oeste do Brasil. A capacidade produtiva desta cultura pode ser influenciada pelos atributos físicos do solo, como resistência do solo à penetração - RP; densidade do solo - DS; umidade gravimétrica - UG e umidade volumétrica - UV, os quais estando com valores adequados ao desenvolvimento do sistema radicular, interferem positivamente na produtividade da cultura. Objetivando-se estudar a variabilidade espacial e correlações lineares entre a produtividade do sorgo para forragem e atributos físicos do solo, realizou-se um experimento em um Planossolo na cidade de Miranda, MS. As variáveis analisadas foram biomassa verde da forragem (MVF), RP, UG, UV e DS, coletadas aleatoriamente, em área demarcada com o uso de um receptor GPS, sendo amostrados 51 pontos com espaçamentos irregulares. Os atributos estudados (solo e planta), além de terem correlação espacial, apresentaram variabilidade dos dados entre média e alta e seguiram padrões espaciais bem definidos, com alcance entre 130,0 e 352,0 m. A RP e UG foram bons indicadores da qualidade física do solo, quando destinado à produtividade da MVF de sorgo.

**Palavras-chave** - Densidade do solo. Manejo do solo. Qualidade física do solo. *Sorghum bicolor*.

**Abstract** - The cultivation of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) is increasing in the Midwest region of Brazil with the aim of expanding the production of silage to be used in animal feed, with good adaptability to climatic conditions of the arid and semi-arid Brazilian. The productive capacity of sorghum is influenced by soil physical properties (RP, UG, UV e DS), with these values appropriate to the development of the root system positively affect the productivity. In order to study the spatial and linear correlations between the yield of sorghum for forage and soil physical properties, an experiment was conducted in the Miranda city, MS, in an Planosol. The data were obtained by analysis of samples of plant (MVF) and soil (RP, UG, UV e DS) collected at random, having been demarcated using a GPS receiver 51 points in the cultivation area with irregular spacing. The attributes studied (plant and soil), and have spatial correlation, the variability between medium and high and well-defined spatial patterns, with a range between 130.0 and 352.0 m. The RP and UG were good indicators of soil physical quality, as for the productivity of green biomass forage sorghum.

**Key words** - Bulk density. Soil management. Physical quality of soil. *Sorghum bicolor*.

\* Autor para correspondência

Enviado para publicação em 19/06/2013 e aprovado em 03/12/2013.

<sup>1</sup>Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos - Faculdade de Engenharia - UNESP/Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira (SP), montanari@agr.feis.unesp.br, lenon\_lovera@hotmail.com, carolsbatistabonini@hotmail.com

<sup>2</sup>Departamento de Agronomia - UEMS/Unidade de Aquidauana, Aquidauana (MS), eloip@uems.br

## Introdução

O sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) é um dos cereais mais cultivados no mundo, apresentando valor agrônomo e nutritivo semelhante ao do milho (*Zea mays*). Sua tolerância às condições de déficit hídrico representa boa alternativa de cultivo em regiões propensas a estiagem e de baixa fertilidade do solo. No entanto, essa cultura é pouco difundida no Brasil, com produção nacional estimada em 1.704.467 Mg para o ano de 2013, 10,7% inferior à obtida em 2011, devido, principalmente, a redução de 8,0% na área plantada. Entretanto, na comparação com março de 2012, houve um aumento de 10,8%. A maior limitação do avanço da produção de sorgo está relacionada com as questões econômicas do produtor rural, já que, a produção de milho tem proporcionado maior rentabilidade (BASSO *et al.*, 2011).

O sorgo vem sendo empregado na recuperação de áreas degradadas, beneficiando na redução dos custos de produção e na agropecuária. O uso intensivo nas áreas exploradas com agropecuária torna-se viável em razão da integração lavoura-pecuária (ILP), com bons resultados socioeconômicos e ambientais (BARBOSA *et al.*, 2006; CRUSCIOL *et al.*, 2011).

Os sistemas de cultivo conservacionistas têm substituído os sistemas convencionais, aumentando a capacidade produtiva dos solos, melhorando as condições físicas, em função da redução da intensidade do preparo do solo. Onde, o preparo do solo, semeadura, práticas culturais e colheita devem ser efetuadas em condição adequada de umidade do solo, pois pode causar redução na porosidade do solo, o fluxo de líquido e gases e aumentará a densidade do solo, e conseqüentemente reduzir a produtividade das culturas e pecuária (BASSO *et al.*, 2011).

A compactação é consequência do manejo inadequado do solo, resultante da ação dos implementos agrícolas e tratos culturais. Para avaliar a compactação do solo, a resistência à penetração é um dos atributos mais recomendados. Para a avaliação eficiente deste atributo recomenda-se que sejam retiradas, simultaneamente, amostras de solo para a análise de umidade e densidade do solo (BASSO *et al.*, 2011; DALCHIAVON *et al.*, 2011).

Em razão da agricultura de precisão, o estudo geoestatístico da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo com produtividade das culturas vem se intensificando. No estudo da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo, a geoestatística requer um planejamento para coleta das amostras, localização espacial de cada ponto a ser avaliado, estabelecendo zonas específicas de manejo, facilitando, assim, as operações agrícolas e melhorando substancialmente o desenvolvimento vegetal (REICHERT *et al.*, 2008; DALCHIAVON *et al.*, 2013).

Diante do exposto, objetivou-se avaliar, neste trabalho, a variabilidade espacial e correlações lineares entre a produtividade do sorgo para forragem e alguns atributos físicos do solo.

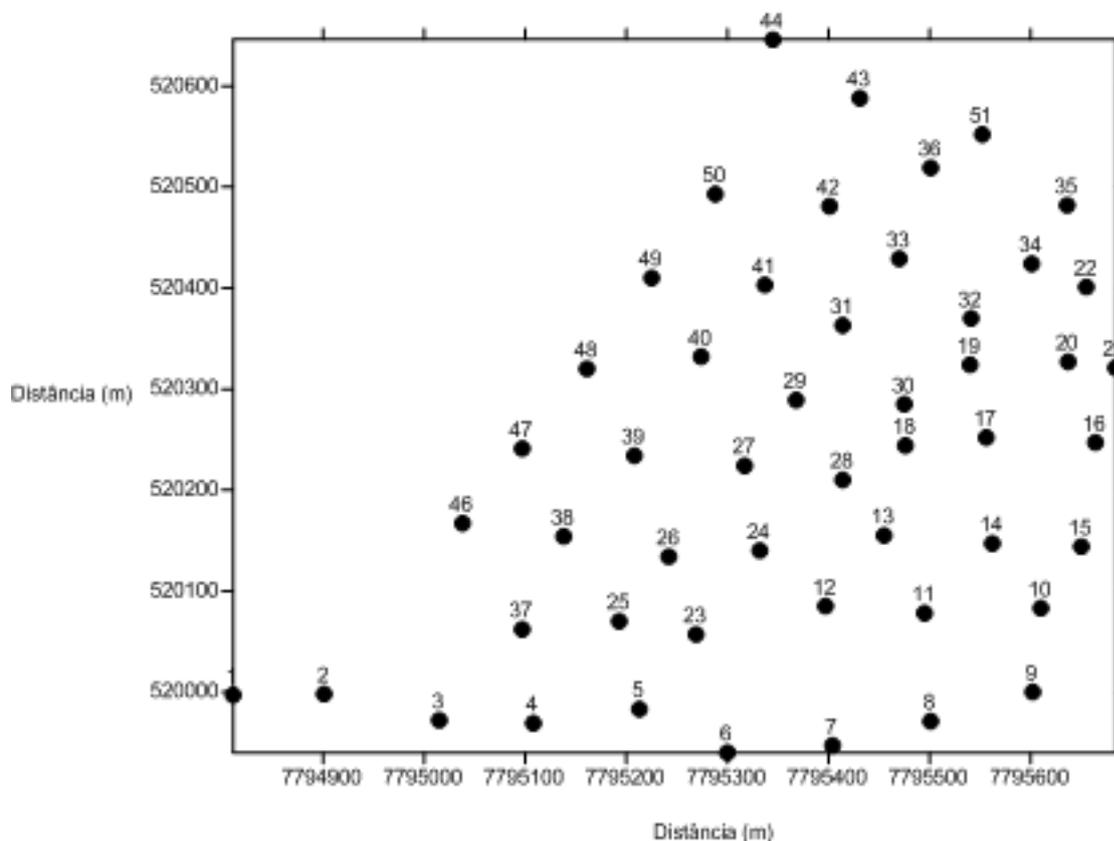
## Material e métodos

O trabalho foi desenvolvido no ano agrícola de 2011/12, no município de Miranda (MS), coordenadas UTM 520070 N e 7795193 E. O clima da região é classificado como Aw, segundo a classificação de Koeppen, sendo caracterizado como tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno. A precipitação anual variando entre 1200 a 1700 mm e temperatura média anual entre 20 a 24°C.

A semeadura do sorgo ocorreu no ano de 2010 num espaçamento de 0,72 m, em área sobre preparo convencional há mais de dez anos, semeado no mês de setembro, em solo classificado como PLANOSSOLO eutrófico, Ta solódico ou não plíntico, carbonático, A moderado, textura média (EMBRAPA, 2006) e de relevo levemente ondulado. Para a profundidade de 0,00-0,20 m, a análise textural mostrou os seguintes valores: 383 g kg<sup>-1</sup> de areia, 299 g kg<sup>-1</sup> de silte e 317 g kg<sup>-1</sup> de argila.

Visando a caracterização inicial química do solo, antes da composição da malha amostral, coletaram-se dez amostras indeformadas simples, utilizando-se o trado de caneco para compor uma amostra composta, representando toda a malha geoestatística de estudo na profundidade de 0,00-0,20 m. As coletas das amostras simples foram realizadas, aleatoriamente, nas entrelinhas da cultura anterior que foi o milho. A amostra composta foi destinada à análise química, sendo processada conforme Raij *et al.* (2001), efetuando-se as seguintes determinações: teor de matéria orgânica (MO), pH, P, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, H<sup>+</sup>+Al<sup>3+</sup>, soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%). As análises químicas foram realizadas na EMBRAPA Agropecuária Oeste, em Dourados, MS.

As amostragens dos atributos da cultura do sorgo e do solo foram realizadas de maneira aleatória contendo 51 pontos amostrais, com espaçamento irregular, numa área de 610.000 m<sup>2</sup>. As coordenadas em UTM foram obtidas por meio do uso de um receptor GPS etrex (Figura 1). O atributo do sorgo estudado foi a produtividade da biomassa verde da forragem (MVF), coletado entre os dias 18 e 20/04/2011. Para isso foi coletada uma área útil de 1 m<sup>2</sup> em cada ponto amostral, correspondendo a duas linhas com espaçamento de 0,72 m e comprimento de 2,22 m, extrapolando-se os dados para kg ha<sup>-1</sup>. O estágio de desenvolvimento da cultura do sorgo foi o EC3, numa altura de corte de aproximadamente 2 m. Essa determinação foi realizada no



**Figura 1** - Malha de amostragem com 51 pontos amostrais da área experimental.

laboratório da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Unidade Universitária de Aquidauana.

Os atributos físicos do solo estudados foram: resistência do solo à penetração (RP) em MPa, densidade do solo (DS) em  $\text{kg dm}^{-3}$ , umidade gravimétrica (UG) em  $\text{kg kg}^{-1}$  e umidade volumétrica (UV) em  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , coletados no entorno das plantas de sorgo amostradas, nas profundidades de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m, onde concentrava-se aproximadamente 70% das raízes de sorgo (EMBRAPA, 2013). A resistência do solo a penetração foi medida utilizando-se um penetrômetro de impacto, seguindo as recomendações de Stolf (1991). O teor de água e a densidade do solo foram determinados de acordo com metodologia descrita em EMBRAPA (1979). Com os dados obtidos com o penetrômetro de impacto foi calculada a RP conforme a expressão descrita em Dalchiavon *et al.* (2011). A UV foi determinada conforme Kiehl (1979).

Para cada atributo estudado (planta e solo), efetuou-se a análise descritiva clássica, com auxílio do software estatístico SAS (SCHLOTZHAVER; LITTELL, 1997), em que foram calculados a média, mediana, valores mínimos e máximos, desvio-padrão, coeficiente de variação, curtose, assimetria e distribuição de frequência. Para

testar a hipótese de normalidade, ou de lognormalidade foi utilizada a estatística de Shapiro e Wilk a 5%.

Também foi montada a matriz de correlação, objetivando efetuar as correlações lineares simples para as combinações, duas a duas, entre todos os atributos estudados, assim como apresentar as análises de regressões para os pares de maior interesse.

Para cada atributo foi analisada sua dependência espacial, pelo cálculo do semivariograma simples, determinando-se o efeito pepita ( $C_0$ ), o alcance ( $A_0$ ) e o patamar ( $C_0 + C$ ). Contudo, para aqueles que apresentaram interdependência espacial, calcularam-se também seus semivariogramas cruzados, com base nos pressupostos de estacionaridade da hipótese intrínseca, pelo uso do pacote *Gamma Design Software* (GS<sup>+</sup>, 2004). A interpretação utilizada para o avaliador da dependência espacial (ADE) foi a seguinte:  $ADE \leq 25\%$  indicou variável espacial fracamente dependente;  $25\% < ADE \leq 75\%$  indicou variável espacial moderadamente dependente; e  $ADE > 75\%$  indicou variável espacial fortemente dependente. Por outro lado, sabe-se que a validação cruzada é uma ferramenta destinada a avaliar modelos alternativos de semivariogramas simples e cruzados, que

respectivamente efetuarão a krigagem e a co-krigagem. Assim, os componentes geoestatísticos determinados foram o semivariogramas simples, semivariograma cruzado, validação cruzada, krigagem e a co-krigagem (MONTANARI *et al.*, 2012b).

## Resultados e discussão

Na Tabela 1 estão apresentadas as análises para a caracterização dos atributos químicos do solo para fins de caracterização da fertilidade do solo, para a profundidade de 0,00-0,20 m, para a área, ao qual a malha geoestatística foi situada. Para os atributos químicos estudados pode-se observar que os teores e/ou índices foram: a) P - elevado; b) MO - médio; b) pH - neutro, c) K - médio a alto; d) Ca - médio, e) Mg - baixo, f) H+Al - médio, g) Al - baixo, h) SB - médio, i) CTC - baixa, j) V% - médio, alto, baixo e k) m% - baixo), segundo Raij *et al.* (1991). Assim, pode-se inferir que o solo é eutrófico encontrando-se quimicamente adequado para o desenvolvimento da cultura do sorgo.

Na Tabela 2, a produtividade da biomassa verde da forragem de sorgo (MVF) apresentou alta variabilidade, coeficiente de variação de 21%. Esse dado ficou análogo aos de Pariz *et al.* (2011) e Montanari *et al.* (2012a), quando analisaram um Latossolo Vermelho, encontrando também alta variabilidade (29%) para a produtividade de forragem. Esta variabilidade é decorrente da variabilidade espacial dos atributos do solo. Já quando se estudou os atributos físicos do solo, observa-se para ambas as profundidades de solo analisadas, os CV's foram classificados como baixo, médio, alto e muito alto, variando entre 10,7 e 32,9%, segundo Freddi *et al.*, (2006), corroborando com os resultados obtidos por Dalchiavon (2012).

O valor médio da biomassa verde da forragem do sorgo foi de 106.832 kg ha<sup>-1</sup> (107 Mg ha<sup>-1</sup>) (Tabela 2) ficando próximo de Tabosa *et al.* (2010) que registraram produtividade de 120 kg ha<sup>-1</sup> de biomassa verde de sorgo. Os valores médios da DS (DS1 de 1,31 kg dm<sup>-3</sup> e DS2 de 1,33 kg dm<sup>-3</sup>), RP (RP1 de 2,63 MPa e RP2 de 3,45 MPa), foram distintos em ambas as profundidades (Tabela 2), ocorrendo um aumento das DSs e RPs conforme o aumento

Tabela 1 - Atributos químicos de um Planossolo eutrófico na camada de 0,0-0,20 m.

Prof. (m)	MO <sup>1</sup> (g kg <sup>-1</sup> )	pH CaCl <sub>2</sub>	P (mg dm <sup>-3</sup> )	K				Ca			CTC	V%
				Mg	H+Al	Al	SB	(cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )				
0,00 - 0,10	30,41	6,0	31,7	0,32	16,2	2,8	2,4	-	19,32	21,7	89,0	
0,10 - 0,20	26,88	6,2	32,2	0,26	15,9	2,3	2,4	-	18,46	20,8	89,0	

<sup>1</sup> MO = teor de matéria orgânica, pH = potencial hidrogeniônico, P = fósforo, K = potássio, Ca = magnésio, H+Al = acidez potencial, Al = alumínio, SB = soma de bases, CTC = capacidade de troca de cátions, V% = saturação por bases, m% = saturação por alumínio.

Tabela 2 - Análise descritiva inicial da produtividade da massa verde da forragem de sorgo e atributos físicos de um Vertissolo em Miranda, MS

Atributo (a)	Medidas estatísticas descritivas									
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Coeficiente			Probabilidade do teste(b)	
			Máximo	Mínimo		Variação (%)	Curtose	Assimetria	Pr<w	DF
MVF (kg ha <sup>-1</sup> )	106832	109375	148438	54688	21890	20,5	-0,538	-0,189	0,395	NO
RP1 (MPa)	2,627	2,396	5,034	1,592	0,863	32,9	-	-	-	ND
RP2 (MPa)	3,452	3,464	5,578	1,513	0,989	28,6	-0,475	0,297	0,494	NO
UG1 (kg kg <sup>-1</sup> )	0,226	0,222	0,315	0,150	0,041	18,5	-0,674	0,202	0,516	NO
UG2 (kg kg <sup>-1</sup> )	0,267	0,268	0,400	0,169	0,053	20,0	-0,134	0,513	0,263	NO
UV1 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,298	0,287	0,439	0,173	0,069	23,2	-0,961	0,308	0,074	NO
UV2 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,300	0,289	0,465	0,178	0,067	22,3	-0,172	0,540	0,156	NO
DS1 (kg dm <sup>-3</sup> )	1,309	1,314	1,633	1,008	0,140	10,7	-0,166	0,057	0,980	NO
DS2 (kg dm <sup>-3</sup> )	1,325	1,304	1,658	0,911	0,146	11,0	0,866	-0,129	0,229	NO

<sup>(a)</sup> MVF = produtividade da massa verde da forragem; RP, UG, UV e DS, de 1 a 2, são respectivamente a resistência à penetração, umidade gravimétrica, umidade volumétrica e densidade do solo, coletados nas camadas do solo de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m; <sup>(b)</sup> DF = distribuição de frequência, sendo NO e ND respectivamente do tipo normal e não determinada.

da profundidade, concordando com os dados obtidos por Montanari *et al.* (2011) e Montanari *et al.* (2012a), que estudando um Latossolo Vermelho distroférrico sob sistema plantio direto, verificaram valores da DS1 de 1,49 kg dm<sup>-3</sup> e DS2 de 1,52 kg dm<sup>-3</sup>, RP1 de 3,25 MPa e RP2 de 3,70 MPa e DS1 de 1,29 kg m<sup>-3</sup> e DS2 de 1,30 kg m<sup>-3</sup>, RP1 de 2,95 MPa e RP2 de 3,19 MPa, respectivamente, tendo estes atributos apresentados magnitude que indicou compactação do solo nas camadas estudadas, tornando-se um fator limitante para máxima expressão da produtividade, prejudicada tanto pelo deficiente crescimento radicular, assim como pelas conseqüentes deficiências proporcionadas à absorção nutricional, devido provavelmente a pouca concentração de raízes. A compactação constatada no presente estudo pode ser originada pelo trânsito das máquinas e implementos agrícolas, assim como ao tempo de adoção deste sistema.

Portanto, uma vez que a capacidade de campo do solo em questão foi de 0,351 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. A umidade volumétrica média do solo (Tabela 2), apresentou valor de 0,30 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> (UV1 e UV2). A umidade gravimétrica (Tabela 2) apresentou valores médios de 0,23 kg kg<sup>-1</sup> (UG1) e de 0,27 kg kg<sup>-1</sup> (UG2), discordando com os estudos de Rosa Filho *et al.* (2011) e Montanari *et al.* (2011), que apresentaram valores entre 0,133 a 0,189 kg kg<sup>-1</sup>. Ficando diretamente relacionada com o aumento da UV.

Na Tabela 3 está apresentada a matriz de correlação linear de Pearson entre MVF e os atributos físicos do solo estudado (DS, RP, UG e UV), nas camadas de 0,00 – 0,10 e 0,10 – 0,20 m. A correlação entre a MVF e os atributos do solo apresentou significância para o par MVF x UG2 ( $r = -0,32^*$ ) e MVF x RP2 ( $r = 0,31^*$ ). Esta correlação inversa indica que com aumento da UG2 ocorrerá a

diminuição da biomassa verde da forragem do sorgo, provavelmente desencadeada pela menor respiração radicular que em decorrência da elevada umidade do solo, afetando negativamente a produtividade. Na análise MVF x RP2 observa-se que com o aumento da resistência do solo à penetração ocorre aumento da biomassa verde da forragem do sorgo, devido, provavelmente, ao maior contato solo-raiz causado pelo efeito de compactação do solo, que pode neste caso, ter contribuído com a absorção de nutrientes e, favorecendo, assim a produtividade da biomassa verde.

No geral, as correlações entre os pares de atributos do solo (Tabela 3) apresentaram-se, quando analisados, com o sinal positivo (correlação direta) ou negativo (correlação indireta). Os de correlação direta, com os respectivos valores do coeficiente de correlação, foram o UG1 x UV1 (0,890\*\*), UG2 x UV2 (0,579\*\*), UV1 x DS1 (0,618\*\*) e UV2 x DS2 (0,538\*\*). Já com os de correlação indireta não se obteve valores significativos estatisticamente.

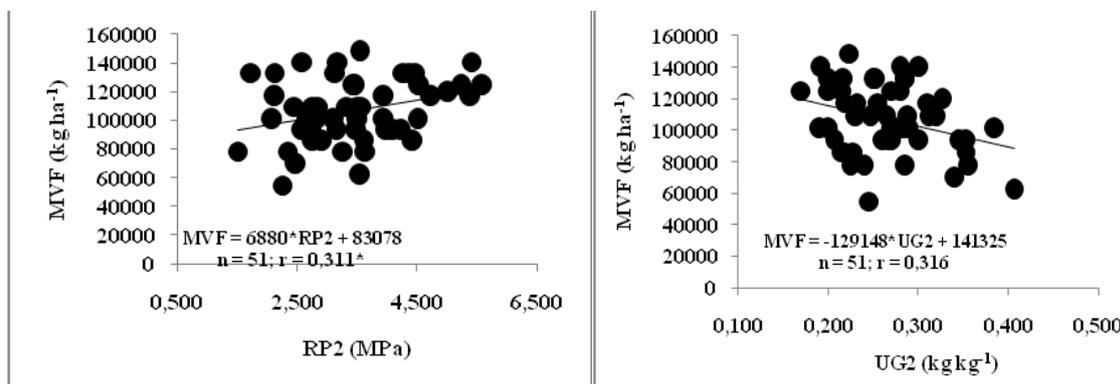
As principais equações de regressão linear simples entre os atributos pesquisados, no âmbito das correlações estabelecidas entre planta *versus* solo, estão apresentadas na Figura 2. Portanto, os modelos foram exclusivamente apresentados para os pares de atributos que proporcionaram correlações significativas, assim como também apresentaram coeficientes adjuntos significativos para as variáveis independentes.

No âmbito da correlação dos atributos da planta *versus* solo foram significativas as regressões da MVF em função da RP2 e UG2 (Figuras 2a e 2b). Foi verificado que a MVF apresentou uma variação linear direta com a RP2 (Figura 2a). Portanto, quando ocorrer o mínimo valor da

**Tabela 3** - Matriz de correlação linear simples entre a produtividade da biomassa verde da forragem de sorgo e atributos físicos de um Planossolo em Miranda, MS

Atributos <sup>(a)</sup>	Coeficientes de correlação <sup>(b)</sup>							
	MVF	RP1	RP2	UG1	UG2	UV1	UV2	DS1
RP1	0,055	-	-	-	-	-	-	-
RP2	0,311*	0,620**	-	-	-	-	-	-
UG1	-0,265	0,116	-0,118	-	-	-	-	-
UG2	-0,316*	0,104	0,001	0,661**	-	-	-	-
UV1	-0,207	0,161	0,033	0,890**	0,646**	-	-	-
UV2	-0,145	0,205	-0,075	0,863**	0,579**	0,877**	-	-
DS1	0,035	0,181	0,288*	0,198	0,254	0,618**	0,402**	-
DS2	0,167	0,184	0,045	0,046	0,019	0,259	0,538**	0,478**

<sup>(a)</sup> MVF = produtividade da biomassa verde da forragem; RP, UG, UV e DS, de 1 a 2, são respectivamente a resistência à penetração, umidade gravimétrica, umidade volumétrica e densidade do solo; <sup>(b)</sup> \* Significativo ao nível de 5% de probabilidade, \*\* Significativo ao nível de 1% de probabilidade



**Figura 2** - Equação de regressão entre alguns atributos da produtividade da biomassa verde da forragem (MV2) e da resistência do solo à penetração (RP2) e umidade gravimétrica (UG2) na profundidade de 0,10-0,20 m de um Planossolo, em Miranda, MS.

RP2 (1,513 MPa) implicará num valor mínimo estimado da MVF igual a 93487 kg ha<sup>-1</sup>. Assim, para o máximo da RP2 (5,578 MPa), ocorrerá o valor máximo da MVF de 121454 kg ha<sup>-1</sup>, com isso, quando se tem uma maior resistência do solo à penetração, ocorrerá uma maior produtividade de biomassa verde da forragem, devido a característica da forragem que possibilita boa capacidade de se desenvolver em solos mais compactados, fazendo com que as raízes explorem maior volume de solo, aumentando a eficiência na absorção de nutrientes.

A MVF apresentou uma variação linear indireta com a UG2 (Figura 2b). Assim, quando ocorrer o máximo valor da UG2 (0,400 kg kg<sup>-1</sup>) implicará num valor mínimo da MVF igual a 51659 kg ha<sup>-1</sup>, já quando ocorrer o valor mínimo da UG2 (0,169 kg kg<sup>-1</sup>) implicará num valor máximo da MVF igual a 163151 kg ha<sup>-1</sup>.

Na equação 01 está contida a regressão linear múltipla ajustada para estimar a produtividade da biomassa verde da forragem (variável dependente) em função dos demais atributos físicos do Planossolo (variáveis independentes). Assim, nota-se que 19,7% da variação da MVF pôde ser explicada pelos atributos físicos do solo RP2 e UG2, cujo coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) foi de 0,197.

Em relação às variáveis independentes RP2, seu efeito sobre a MVF foi direto, ao passo que para a UG2 foi indireto ( $MVF = 117569 + 6879*RP2 - 129125*UG2$ ,  $p < 0,05$ ), ou seja, com o aumento da RP2 e uma diminuição da UG2 ocorrerá uma elevação da MVF. Indicando que na subsuperfície do solo (profundidade de 0,10-0,20m), seus efeitos foram limitantes à referida MVF, refletindo o efeito do manejo do solo, indicando a existência de um “pé-de-grade” na área pesquisada.

A explicação proposta com base na regressão linear múltipla demonstrou a implicação dos atributos estudados

na produtividade da biomassa verde da forragem, levando em consideração os valores destes atributos obtidos a campo, o que permitiu qualificar a contribuição de cada um deles no modelo ajustado (Eq. 01), onde é apresentado por ordem decrescente de contribuição.

A partir da equação 01, pode-se estimar a MVF em função da RP2 e UG2, os quais são atributos de maior facilidade de coleta em relação à MVF. Assim, quando se observa o valor de máximo para RP2 (5,578 MPa) e mínimo para UG2 (0,169 kg kg<sup>-1</sup>) (Tabela 2), a MVF terá valor de máxima produtividade (134.117 kg ha<sup>-1</sup>). Já quando se observa o valor de mínimo para RP2 (1,513 MPa) e máximo para UG2 (0,400 kg kg<sup>-1</sup>) (Tabela 2), a MVF terá valor de mínima produtividade (76.326 kg ha<sup>-1</sup>). Isto possivelmente ocorreu pelo elevado teor de umidade no solo que possivelmente diminuiu a aeração do solo, consequentemente, a taxa de respiração radicular e também o menor contato raiz-solo. Com a diminuição da taxa de respiração radicular e o menor contato solo-raiz, diminui a absorção de nutrientes pelas plantas e, por esse motivo, quando ocorre o aumento da resistência à penetração, há uma elevação da produtividade vegetal.

Dalchiavon (2012), também encontrou regressão linear múltipla para produtividade de colmos de cana-de-açúcar em relação às variáveis independentes UG2 e DS2, sendo que seus efeitos sobre a produtividade (PRO) foram inversos, indicando que na subsuperfície do solo, seus efeitos foram limitantes à referida PRO, refletindo o efeito do manejo do solo, revelando a existência de “pé-de-grade”. Reichert *et al.* (2008) estudando a produtividade de grãos de soja num Planossolo encontraram regressão múltipla, sendo que 65% da variação da produtividade foi atribuída aos atributos químicos e físicos do solo, dentre eles, a resistência do solo à penetração e a umidade.

Na Tabela 4, estão apresentados os parâmetros dos semivariogramas simples, ajustados para a produtividade

da biomassa verde da forragem e alguns atributos físicos. Os atributos MVF, RP1, RP2, UG1, UV2, DS1 e DS2 apresentaram dependência espacial entre moderada (UG1; ADE – análise de dependência espacial = 59,0%) a forte (MVF e DS2; ADE = 99,8 %), cujos modelos de semivariogramas foram do tipo esférico e gaussiano. Já aqueles restantes (UG2 e UV1) apresentaram efeito pepita puro. Basso *et al.* (2011) verificaram que a DS1 e DS2 apresentaram dependência espacial entre moderada (DS1; ADE – análise de dependência espacial = 67,4%) a alta (DS2; ADE = 75,4 %), cujos modelos de semivariogramas foram do tipo esférico.

No tocante ao desempenho dos semivariogramas (Tabela 4), sua relação decrescente, analisada pela grandeza do coeficiente de determinação espacial ( $r^2$ ), foi a seguinte: UV2 (0,962), RP2 (0,897), DS2 (0,860), DS1 (0,801), RP1 (0,795), UG1 (0,637) e MVF (0,566). Assim, em relação aos três primeiros, que tiveram elevados coeficientes de determinação espacial, observou-se o seguinte: para o primeiro (UV1), o valor do  $r^2$  (0,962) indicou ser este o atributo de melhor ajuste semivariográfico, e de acordo com aqueles observados por Montanari *et al.* (2012a), os quais variaram entre 0,819 e 0,939. Em relação ao ADE, os altos valores observados para DS2 (99,8%) e DS1 (99,2%) concordam com os resultados de Montanari *et al.* (2012a) para o qual o autor encontrou valor alto, de 88,4 e 99,4%, respectivamente.

Os modelos ajustados para DS1 e DS2 foram esféricos, concordando com os resultados de Schaffrath *et al.* (2008), que, trabalhando com Latossolo Vermelho distroférico, sob plantio direto e preparo convencional, encontraram modelo esférico para os dois sistemas, na profundidade de 0,0-0,15 m, com um total de 128 pontos amostrados. Com relação a RP2, que apresentando valor de  $r^2$  igual a 0,897, mostrou ser o atributo de segundo melhor ajuste semivariográfico, com ADE forte, sendo o valor encontrado de 74,6%.

Na Tabela 4, a relação decrescente dos alcances foi a seguinte: UV2 (352,0 m); UG1 (270,7 m); RP2 (207,4 m); DS1 (159,8 m), DS2 (139,3 m); MVF (137,2 m) e RP1 (130,0 m). Portanto, nas condições desta pesquisa, assim como, visando a auxiliar pesquisas futuras, na qual os mesmos atributos estejam envolvidos, os valores dos alcances a serem utilizados nos pacotes geoestatísticos, que alimentarão os pacotes computacionais empregados na agricultura de precisão, no geral, não deverão ser menores do que 130,0 m.

Por outro lado, exclusivamente para o atributo produtividade de biomassa verde da forragem, os alcances não deverão ser menores do que 137,2 m em sistema de cultivo mínimo.

Na Figura 3 estão apresentados os mapas de krigagem da biomassa verde da forragem do sorgo e de

**Tabela 4** - Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para a produtividade da massa verde da forragem de sorgo e atributos físicos de um Vertissolo em Miranda, MS

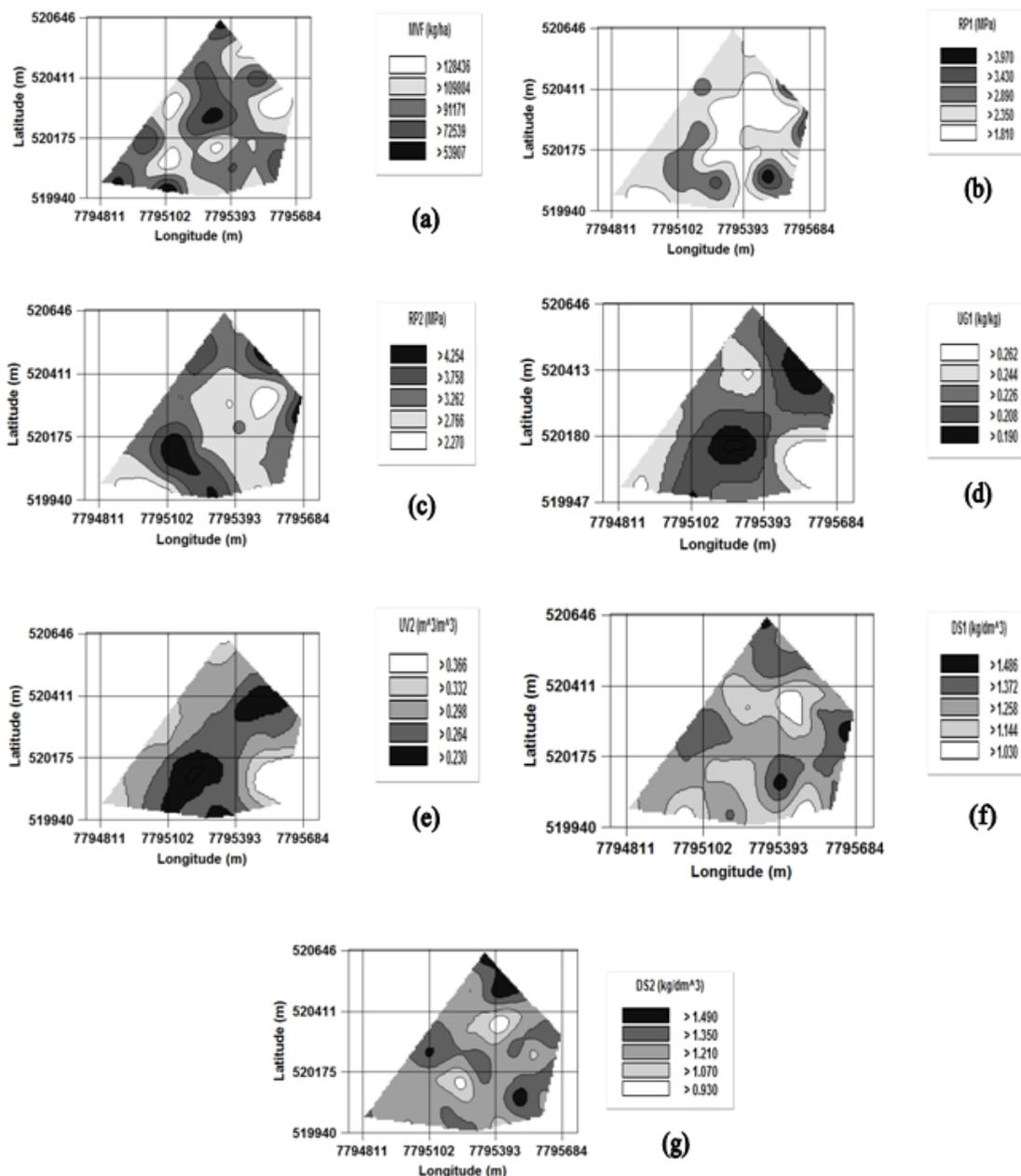
Atributo <sup>(a)</sup>	Parâmetros							Avaliador da dependência espacial	
	Modelo <sup>(b)</sup>	Efeito Pepita ( $C_0$ )	Patamar ( $C_0+C$ )	Alcance ( $A_0$ ) (m)	$r^2$	SQR <sup>(c)</sup>	Avaliador da dependência espacial		
							ADE (d)	Classe	
$\gamma(h)$ simples dos atributos da planta									
MVF (kg ha <sup>-1</sup> )	gau	1,000.10 <sup>6</sup>	4,134.10 <sup>8</sup>	137,2	0,566	1.790.10 <sup>16</sup>	99,8	MA	
$\gamma(h)$ simples dos atributos físicos do solo									
RP1 (MPa)	esf	1,300.10 <sup>-1</sup>	7,880.10 <sup>-1</sup>	130,0	0,795	2,920.10 <sup>-2</sup>	83,5	MA	
RP2 (MPa)	esf	2,480.10 <sup>-1</sup>	9,760.10 <sup>-1</sup>	207,4	0,897	1,230.10 <sup>-2</sup>	74,6	AL	
UG1 (kg kg <sup>-1</sup> )	esf	6,480.10 <sup>-4</sup>	1,668.10 <sup>-3</sup>	270,7	0,637	2,044.10 <sup>-7</sup>	59,0	ME	
UG2 (kg kg <sup>-1</sup> )	epp	2,762.10 <sup>-3</sup>	2,762.10 <sup>-3</sup>	-	-	-	-	-	
UV1 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	epp	4,380.10 <sup>-3</sup>	4,380.10 <sup>-3</sup>	-	-	-	-	-	
UV2 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	esf	1,700.10 <sup>-3</sup>	5,060.10 <sup>-3</sup>	352,0	0,962	3,582.10 <sup>-7</sup>	66,4	ME	
DS1 (kg dm <sup>-3</sup> )	esf	1,500.10 <sup>-4</sup>	1,900.10 <sup>-2</sup>	159,8	0,801	2,800.10 <sup>-5</sup>	99,2	MA	
DS2 (kg dm <sup>-3</sup> )	esf	1,000.10 <sup>-5</sup>	2,162.10 <sup>-2</sup>	139,3	0,860	2,15.10 <sup>-5</sup>	99,8	MA	

<sup>(a)</sup> MVF = produtividade da massa verde da forragem, RP = resistência à penetração, UG = umidade gravimétrica, UV = umidade volumétrica, DS = densidade do solo; <sup>(b)</sup> esf = esférico, epp = efeito pepita puro e gau = gaussiano; <sup>(c)</sup> SQR = soma dos quadrados dos resíduos; <sup>(d)</sup> ADE = avaliador da dependência espacial.

alguns atributos físicos do solo. Assim, na Figura 3a, é observado o mapa de krigagem da biomassa verde da forragem (MVF) que apresentou os maiores valores entre 109.804 e 128.436 kg ha<sup>-1</sup> localizados em sua maioria no terceiro e sexto quadrantes do mapa, possuindo 35% de abrangência do total da área. Por outro lado, nas demais regiões, tal produtividade variou entre 53907 a 91171 kg ha<sup>-1</sup>, possuindo 65% de abrangência da área.

Em relação aos atributos do solo tal como a resistência do solo à penetração, a RP1 foi maior, entre

2,890 e 3,970 MPa com 33% de abrangência do total da área, onde a MVF resultou maiores valores (91171-128436 kg ha<sup>-1</sup>). Já naqueles onde a RP1 foi menor, entre 1,810 e 2,350 MPa, com 77% de abrangência, a MVF resultou seus menores valores (53907-91171 kg ha<sup>-1</sup>) situados na região central do mapa. Já em relação aos atributos do solo, a RP2 foi maior, entre 3,262 e 4,254 MPa com 42% de abrangência, onde a MVF resultou maiores valores (91171-128436 kg ha<sup>-1</sup>). Já naqueles onde a RP2 foi menor, entre 2,270 e 2,766 MPa, com 58% de abrangência, a MVF resultou seus menores valores (53907-91171 kg ha<sup>-1</sup>).



**Figura 3** - Mapas de krigagem dos atributos (MVF, RPI, RP2, UG1, UV2, DSI e DS2) da produtividade da biomassa verde da forragem de sorgo em Planossolo em Miranda, MS.

Já em relação à umidade gravimétrica, a UG1 foi maior, entre 0,226 e 0,262 kg kg<sup>-1</sup> com 25% de abrangência da área, no qual a MVF resultou menores valores (53907-91171 kg ha<sup>-1</sup>). Já naqueles onde a UG1 foi menor, entre 0,190 e 0,208 kg kg<sup>-1</sup>, com 77% de abrangência, a MVF resultou seus maiores valores (91171-128436 kg ha<sup>-1</sup>) situados na região central do mapa.

Quanto à densidade do solo, a DS1 foi maior, entre 1,258 e 1,486 kg dm<sup>-3</sup> com 29% de abrangência do total da área, onde a MVF resultou maiores valores (91171-128436 kg ha<sup>-1</sup>). Já naqueles onde a DS1 foi menor, entre 1,030 e 1,258 kg dm<sup>-3</sup>, com 71% de abrangência, a MVF resultou seus menores valores (53907-91171 kg ha<sup>-1</sup>) situados na região central do mapa.

Nas Figuras 3b, c, d, e, f e g são apresentados os mapas de krigagem dos atributos de RP, UG, UV e DS do solo nas duas profundidades avaliadas. Dessa forma, observa-se semelhança espacial entre os atributos referidos em profundidade.

Conforme Montanari *et al.* (2012b) uma das vantagens dos mapas de krigagem é a exata localização de áreas com baixas produtividades. Desta forma, pode-se realizar práticas de manejo do solo nas áreas de média e baixa produtividade visando o seu aumento, fato que não é possível com o uso de valores médios. Não foi encontrado semivariograma cruzado, tendo-se testado a modelagem entre atributos de planta *versus* solo, para posterior produção de mapa de co-krigagem.

## Conclusões

A UG e a RP foram os atributos que mais se relacionaram com a estimativa da qualidade física do solo; sendo que nas áreas com maior RP e menor UG, ocorreram maiores produtividades de biomassa verde da forragem de sorgo;

Por meio da análise multivariada é possível estimar a MVF em função da UG e da RP; no geral os atributos pesquisados não variaram aleatoriamente, seguindo padrões espaciais bem definidos, com alcances da dependência espacial entre 130,0 e 352,0 m.

## Agradecimentos

À fazenda Bodoquena por ter concedido a área para a realização das amostragens de solo e de plantas. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento e Pesquisa (CNPq-Pibic) pela bolsa concedida ao terceiro autor.

## Literatura científica citada

- BARBOSA, G. M.; TAVARES FILHO, J. Uso Agrícola do lodo de esgoto: influência nas propriedades químicas e físicas do solo, produtividade e recuperação de áreas degradadas. **Semina**, v. 27, n.4, p. 565-580, 2006.
- BASSO, F. C.; ANDREOTTI, M.; CARVALHO, M. P.; LODO, B. N. Relações entre produtividade de sorgo forrageiro e atributos físicos e teor de matéria orgânica de um Latossolo do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n.1, p. 135-144, 2011.
- BENGOUGH, A. G.; CAMPBELL, D. J.; O' SULLIVAN, M. F. Penetrometer Techniques in relation to Soil Compaction and Root Growth. In: **Soil and environmental analysis: physical methods**. 2. ed., New York, Marcel Decker. p. 377-403, 2001.
- CRUSCIOL, C. A. C.; MATEUS, G. P.; PARIZ, C. M.; BORGUI, E.; COSTA, C.; SILVEIRA, J. P. F. Nutrição e produtividade de híbridos de sorgo granífero de ciclos contrastantes consorciados com capim-marandu. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n.10, p. 1234-1240, 2011.
- DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; NOGUEIRA, D. B.; ROMANO, D.; ABRANTES, F. L.; ASSIS, J. T.; OLIVEIRA, M. S. Produtividade da soja e resistência mecânica à penetração do solo sob sistema plantio direto no cerrado brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n.1, p. 8-19, 2011.
- DALCHIAVON, F. C. Correlações de Pearson e geoestatísticas entre a produtividade da cana-de-açúcar, estabelecida em dois métodos de colheita, e atributos físico-químicos do solo. Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, 2012. 110p. (Tese de Doutorado).
- DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; MONTANARI, R.; ANDREOTTI, M. Strategy of specification of management areas: rice grain yield as related to soil fertility. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n.1, p. 45-54, 2013.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Manual de métodos de análise de solos. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura. 1979. 356p.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2006. 306 p.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Irrigação: Culturas do milho, sorgo e milheto irrigados.1.ed. Sete Lagos, MG: Embrapa, 2013. disponível em: < <http://www.cnpms.embrapa.br/irriga/ajudairriga.html>>. Acesso em: 16 de julho de 2013.
- 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. **Revista de Engenharia Agrícola**, v.26, n.1, p. 113-121, 2006.
- GS<sup>+</sup>: Geostatistics for environmental sciences. 7. ed. Michigan, Plainwell: Gamma Desing Software, 2004. 159p.
- KIEHL, E. J. Manual de edafologia: relações solo-planta. São Paulo, Agronômica Ceres. 264p. 1979.

- MONTANARI, R.; LIMA, R. C.; BONINI, A. S.; MARQUES, L. S.; MINGUINI, R.; CARVALHO, M. P.; FERREIRO J.; COSTA N.R. Variabilidade dos atributos de um latossolo vermelho sob plantio direto no cerrado brasileiro e produtividade da soja. **Cadernos Laboratório Xeolóxico de Laxe**, v. 36, n.1, p. 61-78, 2011.
- MONTANARI, R.; ZAMBIANCO, E. C.; CORRÊA, A. R.; PELLIN, D. M. P.; CARVALHO, M. P.; DALCHIAVON, F. C. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho correlacionados linear e espacialmente com a consorciação de guandu com milho. **Ceres**, v. 59, n.1, p. 125-135, 2012a.
- 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. 35, n.5, p. 1-11, 2012b.
- PARIZ, C. M.; CARVALHO, M. P.; CHIODEROLI, C. A.; NAKAYAMA, F. T.; ANDREOTTI M.; MONTANARI, R. Spatial variability of forage yield and soil physical attributes of a *Brachiaria decumbens* pasture in the Brazilian Cerrado. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, n.1, p. 2111-2120, 2011.
- RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres, 1991. 343 p.
- RAIJ, B. van.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285p.
- REICHERT, J. M.; DARIVA, T. A.; REINERT, D. J.; SILVA, V. R. Variabilidade espacial de Planossolo e produtividade de soja em várzea sistematizada: análise geoestatística e análise de regressão. **Ciência Rural**, v. 38, n.4, p. 981-988, 2008.
- ROSA FILHO, G.; CARVALHO, M. P.; MONTANARI, R.; SILVA, J. M.; SIQUEIRA, G. M.; ZAMBIANCO, E. C. Variabilidade espacial de propriedades dendrométricas do eucalipto e de atributos físicos de um Latossolo Vermelho. **Bragantia**, v. 70, n.2, p. 439-446, 2011.
- SCHAFFRATH, V. R.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; GONÇALVES, A. C. A. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n.4, p. 1369-1377, 2008.
- SCHLOTZHAVER, S. D.; LITTELL, R. C. SAS system for elementary statistical analysis. 2.ed. Cary: SAS, 1997. 441p.
- STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, n.1, p. 229-235, 1991.
- TABOSA, J. N.; REIS, O. V.; NASCIMENTO, M. M. A.; LIMA, J. M. P.; SILVA, F. G.; FILHO, J. G. S.; BRITO, A. R. M. B.; RODRIGUES, J. A. S. O sorgo sacarino no semi-árido brasileiro: Elevada produção de biomassa e rendimento de caldo. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 28., Goiânia, Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2010. p.2179-2186.
- VITÓRIA, E. D.; FERNADES, H. C.; TEIXEIRA, M. M. Correlação linear e espacial entre produtividade de capim-mombaça e atributos físicos solo em função do sistema de manejo. **Revista Agrotecnologia**, v. 2, n.2, p. 30-43, 2011.