

## Resumo

Uma das dificuldades nos estudos dos processos que ocorrem no espaço poroso do solo, como a retenção e movimento da água, é definir com precisão as variações do conteúdo de água. O experimento foi desenvolvido em Guarapuava-PR visando avaliar o uso da dimensão fractal do solo para estabelecer metodologia de determinação do conteúdo de água do solo para fins de manejo da irrigação. Verificou-se que a dimensão fractal obtida através da equação de Spadotto e com utilização de amostra indeformada de solo possibilita a obtenção de resultados precisos do conteúdo de água do solo, sendo uma metodologia que pode ser considerada uma ferramenta de campo para o manejo da irrigação.

**Palavras-chave:** água no solo; evapotranspiração; manejo da irrigação.

## Metodologia para determinação do conteúdo de água do solo com base na dimensão fractal

*Sidnei Osmar Jadoski<sup>1</sup>, Liana Cristine Sander<sup>2</sup>, Adriano Suchoronczek<sup>2</sup>*

## Metodología para determinación del contenido de agua en el suelo con base en la dimensión fractal

### Resumen

En general la dificultad para el estudio de los procesos que ocurren en el espacio poroso del suelo, como la retención y el movimiento del agua es definir con precisión las variedades del contenido del agua. El experimento se desarrolló en Guarapuava-PR con el objetivo de evaluar la utilidad de la dimensión fractal del suelo para establecer la metodología de determinación del contenido del agua para fines de irrigación. Fue verificado que la dimensión fractal obtenida a través de la ecuación de Spadotto y usando una muestra deforme del suelo posibilita la obtención de resultados precisos del contenido del agua del suelo, considerando esta umcomo una herramienta de campo para el manejo de la irrigación.

**Palabras llave:** agua en el suelo; fractal; manejo de la irrigación.

### Introdução

A geometria fractal é uma nova teoria matemática que pode descrever objetos com formas geométricas complexas e que possuam alto grau de auto-semelhança, isto é, que apresentem a mesma aparência em diferentes escalas. Conforme Backes e Bruno (2006), atualmente a Geometria Fractal, e em especial a Dimensão Fractal, vem sendo utilizada em diversas áreas do conhecimento, como no estudo de sistemas e padrões e caracterização de objetos, análise e reconhecimento de padrões em imagens, análise de texturas e medição de comprimento de curvas e quantificações.

Com relação às aplicações diretas do estudo dos fractais, Azevedo et al. (2006) salientam que a dimensão fractal se presta para caracterizar fenômenos naturais, irregulares, com maior precisão em relação às avaliações convencionais, permitindo uma análise com menores distorções da realidade.

Quanto à propriedade de retenção de água no solo, é de se esperar que exista viabilidade na proposição de modelos com base na organização fractal da estrutura do solo. Isto é possível visto que a mencionada estrutura possui características da geometria fractal como hierarquização, que se manifesta, por exemplo, na organização de tamanhos de agregados (macro a micro escala) e auto-semelhança, parecendo idênticos, independentemente da escala em que se apresentam. Para Bacchi e Reichardt (1993), uma das dificuldades nos estudos dos processos que ocorrem no espaço poroso do solo, como a retenção e o movimento da água, está em se estabelecer modelos geométricos capazes de simular razoavelmente bem a estrutura do solo e que permita a caracterização de algumas relações fundamentais entre partículas e espaço poroso que governam tais processos.

1 Prof. Adjunto do Departamento de Agronomia, Universidade Estadual do Centro-Oeste, UNICENTRO, Guarapuava-PR. E-mail: sjadoski@unicentro.br

2 Acadêmicos do Curso de Agronomia, UNICENTRO – Bolsistas de Iniciação Científica da Fundação Araucária

Para o caso de variações do conteúdo de água no solo, o uso da Matemática Fractal pode representar uma forma de determinação simplificada, pois através de seus resultados é possível a interpretação não somente do aspecto hidrológico, mas também de diversas outras características associadas com as alterações das dimensões na associação das relações, entre as partículas de solo, ar e água. Fuentes et al. (2005), descrevem resultados de pesquisa onde o conceito de geometria fractal é utilizado para justificar correções empíricas nos modelos clássicos de condutividade hidráulica, sendo que os modelos desenvolvidos possibilitam interpretações quantitativas precisas associadas à porosidade do solo. Neste caso, verifica-se que a aplicação da dimensão fractal no estudo da porosidade do solo pode viabilizar novos conhecimentos em relação à quantificação do conteúdo de água do solo.

A expressiva relação da geometria fractal com as dimensões da solução do solo também foram estudadas por Webster et al. (1995), que verificaram que a variabilidade espacial da fragmentação do solo foi bem definida através do uso da dimensão fractal, possibilitando a definição de áreas homogêneas e a definição específica da correlação espacial do solo. O que expressa a relação direta de espaço e volume, conduzindo à possibilidade de interpretação do volume de água presente no solo.

O objetivo do trabalho foi avaliar a precisão de diferentes metodologias para determinação do conteúdo de água no solo, visando adequar um método com uso da dimensão fractal como nova alternativa prática para o manejo da irrigação e verificar os resultados da utilização destas metodologias na produção do milho irrigado.

## Materiais e métodos

O trabalho foi desenvolvido no Departamento de Agronomia, no *Campus* CEDETEG da UNICENTRO, Guarapuava, PR, 25,1°S e 51,6°W, e altitude média de 1050m. As avaliações diretas de umidade e dimensão fractal do solo foram realizadas em laboratório de hidráulica agrícola. As atividades de aplicação dos métodos a campo foram realizadas em área experimental com a cultura do milho.

Para os testes em laboratório, as amostras de solo coletadas no campo na área experimental, onde posteriormente foi conduzido o experimento a campo com a cultura do milho, foram retiradas com diferentes condições de umidade, sendo parte utilizada para a determinação da dimensão fractal e parte levada à estufa para secar a 105°C, objetivando a determinação da umidade gravimétrica.

A dimensão fractal do solo foi determinada através da fórmula (equação 1) apresentada por Seraphim (1998):

$$D = \frac{\log V}{\log \sqrt[3]{M}} \quad (\text{eq.1})$$

Sendo  $D$  = Dimensão fractal,  $V$  = volume da amostra e  $M$  = massa da amostra.

A metodologia constou de:

a) Uso do método da *cupeta*, originalmente apresentado pelo autor, onde se empregou uma *cupeta* constituída de material acrílico com capacidade de 10cm<sup>3</sup> - para a determinação, a *cupeta* era preenchida com solo em condições de umidade atual, levemente pressionado para preencher completamente o recipiente (amostra deformada), que depois de cheio era pesado em balança de precisão. Com os valores de volume e massa da amostra adicionados na fórmula, determinava-se a dimensão fractal do solo.

b) Uso de um anel volumétrico de 74,92 cm<sup>3</sup> de volume (6,0 cm de diâmetro e 2,6 cm de altura), através do qual a amostra de solo era coletada no campo (amostra indeformada), pesada, e os dados utilizados para o cálculo da dimensão fractal, sendo a amostra utilizada também para a determinação da umidade gravimétrica.

Os dados obtidos foram utilizados para se correlacionar os valores da dimensão fractal coletados através do uso da *cupeta* e do anel volumétrico com a umidade gravimétrica do solo. Desta forma, foi possível se obter, através de análise de regressão, uma curva pela qual a umidade do solo podia ser estimada a partir da dimensão fractal do solo.

Após a realização destas avaliações, conduziu-se um experimento de campo com a cultura do milho, cujos três tratamentos constaram do manejo da irrigação efetuado com base **1**) no uso na determinação da umidade do solo, efetuada através do

método gravimétrico e de estimativas realizadas com uso da 2) dimensão fractal realizada, utilizando-se a *cubeta* e 3) o anel volumétrico.

A cultivar de milho híbrido P-3071 foi semeada em sistema de plantio direto no dia 18 de outubro de 2006. Utilizou-se uma população de 60.000 plantas ha<sup>-1</sup> com adubação de base de 250 kg ha<sup>-1</sup> de adubo NPK 5-20-20. As parcelas apresentaram dimensões de 2 x 3 m. Os dados climáticos do período foram obtidos da estação meteorológica UNICENTRO/IAPAR, situada a aproximadamente 100 m da área experimental.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com seis repetições, totalizando 18 unidades experimentais. As irrigações foram aplicadas através de uso de regadores graduados, utilizados considerando-se a dificuldade de instalação de um sistema de aspersão devido à área reduzida das unidades experimentais.

O balanço hídrico da cultura foi realizado considerando-se as precipitações pluviais, bem como as irrigações foram aplicadas quando a lâmina de depleção de água no solo acumulava 25 mm para a camada de 30 cm de profundidade. A coleta de solo para determinação de umidade foi realizada nas profundidades de 10 e 25 cm, sendo a primeira representando a camada de 0 a 20 cm e a segunda, a camada de 20 a 30 cm. A depleção de água no solo era determinada diariamente, considerando-se a soma dos valores de umidade obtidos para ambas as camadas.

As análises dos resultados referentes à umidade do solo constaram da análise de variância e comparação das médias diárias dos resultados através do teste de Tukey, considerando-se como padrão os resultados obtidos através do método gravimétrico e de análise de regressão. A avaliação da produção da cultura foi realizada por comparação de médias.

## Resultados e discussão

As características físicas e químicas do solo do local, classificado como Latossolo Bruno Distroférrico típico, conforme estabelecido por EMBRAPA (1999), são apresentadas na tabela 1.

Através das avaliações realizadas em laboratório, verificou-se que a utilização da *cubeta* como delimitador de volume para a determinação da dimensão fractal do solo ocasionou resultados de menor precisão quando comparado aos do uso do anel volumétrico para a mesma finalidade. Esta constatação é demonstrada através da figura 1, onde se apresenta a distribuição dos pares ordenados e o coeficiente de determinação das curvas de regressão determinadas a partir da correlação entre a umidade gravimétrica e a dimensão fractal do solo.

O maior coeficiente de determinação e a menor dispersão dos pontos ocasionados pelo uso do anel volumétrico possibilitam verificar que o uso deste recipiente resulta em estimativa de maior precisão da dimensão fractal do solo. No que se refere ao manejo prático da irrigação, este resultado é importante, pois, ao se empregar a metodologia da dimensão fractal para estimar a umidade gravimétrica, está sendo desenvolvida uma metodologia diferenciada para a quantificação do conteúdo de água do solo, com possibilidade de calibração para uso direto no campo.

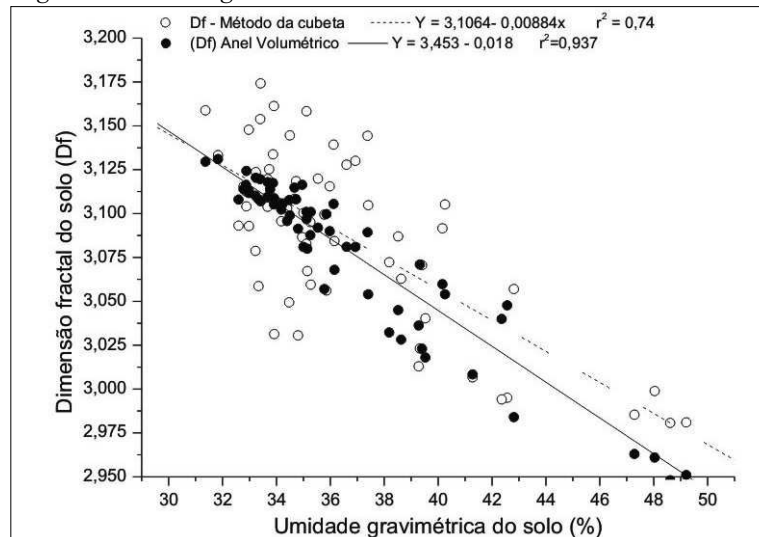
Para avaliação deste resultado, deve ser considerado o processo de acomodação do solo no momento do preenchimento da *cubeta*, pois, devido a utilização de amostra deformada de solo, é necessário nivelar e pressionar o solo para dentro do recipiente, buscando-se o seu preenchimento adequado. Entretanto, a realização deste processo representa um problema técnico, pois verificou-se grande dificuldade em repeti-lo com homogeneidade, o que não ocorre quando se utiliza o anel volumétrico, uma vez que as amostras são retiradas indeformadas do solo.

**Tabela 1.** Características físicas e químicas do solo da área experimental.

P	C	pH	-----dm <sup>-3</sup> -----							-----%-----			Dens.
mg dm <sup>-3</sup>	Mg dm <sup>-3</sup>	CaCl <sub>2</sub> 0,01M	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Sb	CTC	V	M	g cm <sup>-3</sup>	
0,65	22,5	6,4	0,1	4,28	7,0	5,7	0,18	12,8	18,1	74,98	0,80	1,287	

P e K: extrator Mehlich<sup>-1</sup>

**Figura 1.** Distribuição da correlação e análise de regressão entre a dimensão fractal determinada através de diferentes metodologias e a umidade gravimétrica do solo.



Deve ser associado ainda o maior volume da amostra avaliada quando se usa o anel volumétrico. É necessário se ressaltar que, neste caso, os resultados não devem ser interpretados considerando a *cubeta* como equipamento inadequado para o estudo fractal do solo, e sim, para o caso específico do estudo da umidade presente na amostra, que se mostrou mais adequado com uso de amostra indeformada de solo, pois este é um sistema heterogêneo quanto ao material presente. Sendo assim, o processo de retirada da amostra deve considerar a presença de materiais como pequenos torrões, material orgânico e mesmo fragmentos de rochas, que, devido ao formato irregular, dificultam a padronização da utilização do método com uso da *cubeta*. Outra consideração deve ser feita acerca do efeito das diferentes condições da umidade do solo no seu comportamento diferenciado para o preenchimento da *cubeta*, resultando em dificuldade prática para a aplicação do método. Aria et al. (1999) afirma que variações no tamanho das partículas são características que influenciam significativamente a precisão de mensurações do conteúdo de água no solo. Silva et al. (2000) demonstram que a quantidade de preparo da amostra é essencial para determinações e métodos de comparações em solos com características diferentes.

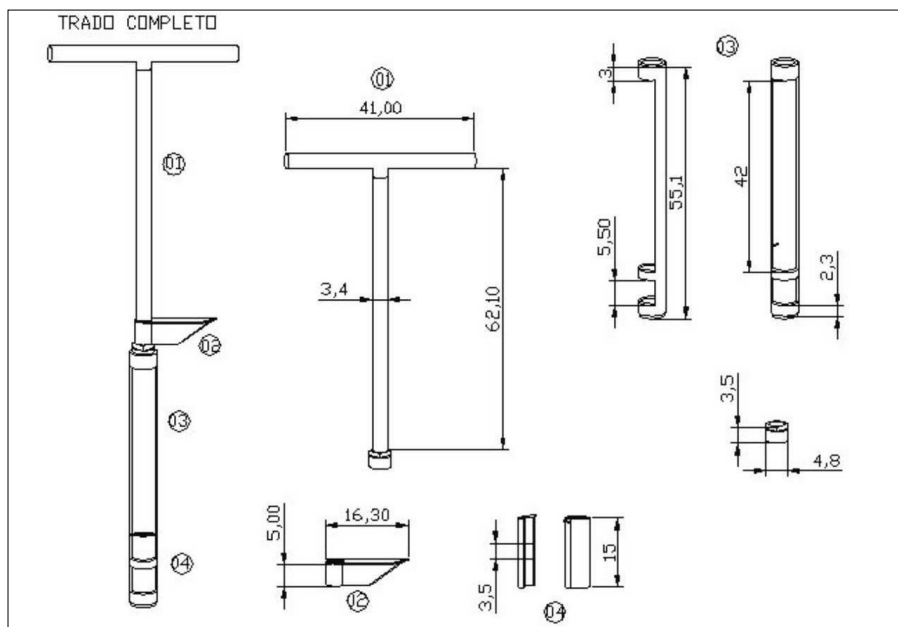
Após a realização destas avaliações diretas em laboratório, partiu-se para a condução do experimento

de campo, visando avaliar as metodologias através de sua aplicação para o manejo da irrigação da cultura do milho. Entretanto, devido à verificação de dificuldades para a retirada das amostras de solo indeformadas com uso do anel volumétrico, especialmente na profundidade de 25 cm, decidiu-se avaliar a possibilidade de desenvolvimento de um equipamento que pudesse facilitar a realização da retirada desta amostra durante a condução da pesquisa de campo.

Desta forma, após a realização de inúmeros testes, foi desenvolvido um modelo de trado conforme desenho esquemático sem escala apresentado na figura 2. Este, construído em aço inoxidável, apresenta um dispositivo denominado de cartucho de penetração no solo, onde é encaixado um cilindro que suporta um anel volumétrico e é composto de duas partes, o que possibilita sua abertura para a inserção e retirada do anel volumétrico. Ao ser pressionado através de uma haste, o cartucho que apresenta a extremidade inferior afiada penetra no solo carregando o cilindro e o anel volumétrico. A abertura destes elementos em ambas as extremidades permite a passagem do solo através deles até que seja atingida a profundidade desejada para a coleta da amostra.

Após a retirada do equipamento do solo o cilindro é desencaixado do cartucho de penetração e

**Figura 2.** Desenho esquemático do trado modelo Jadoski, versão 1.0 desenvolvido para a retirada de amostras indeformadas de solo com uso de anel volumétrico.



Em que: 01 – cabo; 02 – haste de aplicação de força; 03 – cartucho de penetração no solo com suporte do cilindro; 04 – cilindro de suporte do anel volumétrico; 05 – anel volumétrico

o anel volumétrico pode ser acessado. As dimensões exatamente iguais no diâmetro e maiores do cilindro permitem que o anel seja preenchido de forma homogênea e que os excessos de solo sejam eliminados, resultado do preenchimento adequado do anel volumétrico com amostra indeformada do solo. Este equipamento foi denominado de *trado modelo Jadoski, versão 1.0* tendo sido requerida patente junto ao órgão competente no Estado do Paraná.

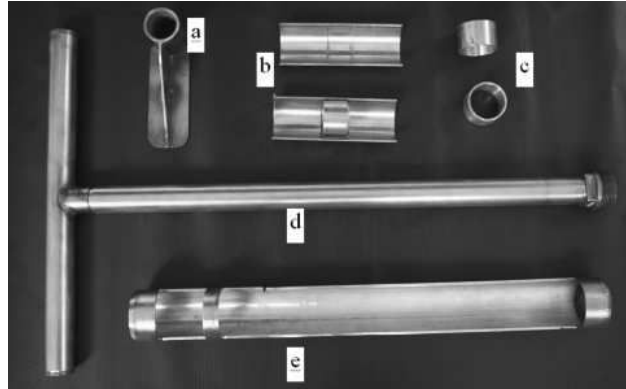
A eficiência técnica deste equipamento pode ser observada de forma evidente, pois possibilitou a retirada de amostras de forma adequada tornando o trabalho mais rápido e eficiente. Entretanto, os estudos de adequações devem continuar, resultando em versões mais aprimoradas, já que foram encontradas algumas dificuldades associadas ao esforço necessário para sua introdução no solo, haja vista que é utilizada a força física do próprio operador, o que, no caso de solos mais compactados, pode representar uma limitação para sua utilização. Na figura 3 consta a fotografia sem escala dos componentes do trado Jadoski.

A maior precisão dos resultados do uso do anel volumétrico como forma de estimar a umidade

gravimétrica do solo pode também ser verificada durante a condução do experimento de campo com cultura do milho. Neste experimento, as metodologias foram aplicadas diariamente durante um período de 128 dias. Os resultados da variação da lâmina de depleção de água acumulada no solo (mm) e a dimensão fractal do solo para o período são apresentados na figura 4 (a). A avaliação estatística dos resultados não demonstrou diferença significativa entre os resultados do uso do anel volumétrico e do método gravimétrico para avaliar a umidade do solo. Devido aos valores dos dados serem muito próximos, unificou-se a curva de variação para estes métodos que geraram dificuldade de visualização na representação gráfica.

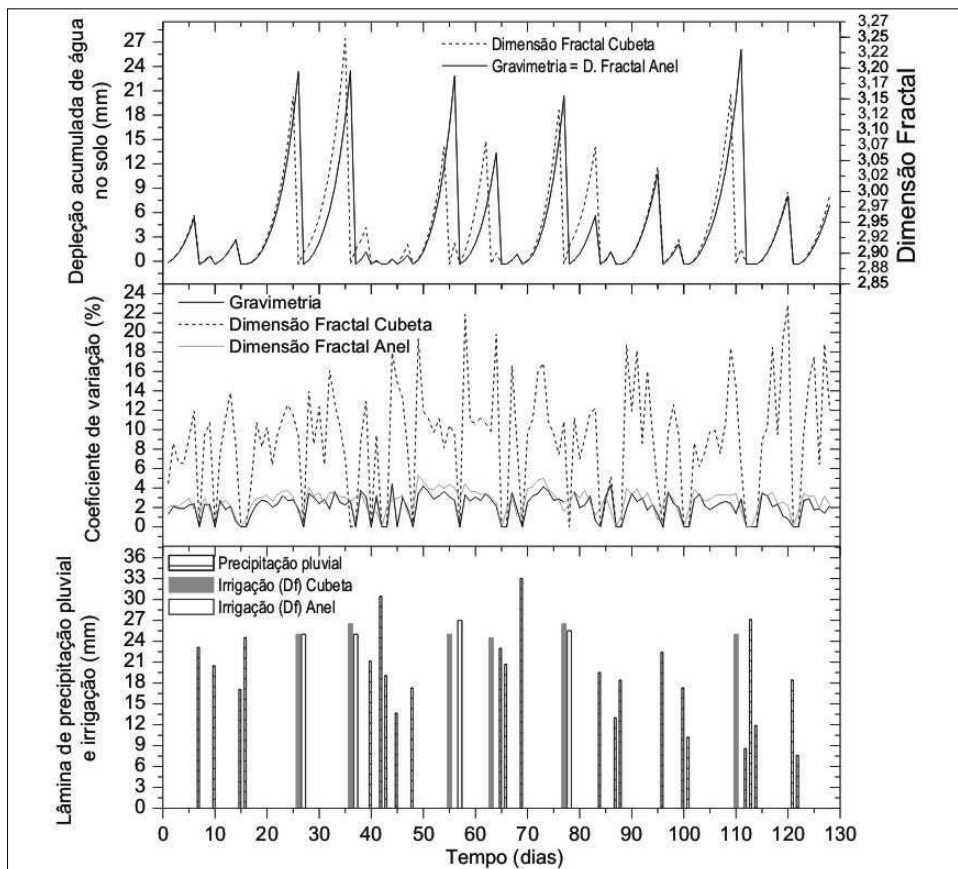
O método da cubeta demonstrou ser menos eficiente para avaliar as variações do conteúdo de água no solo em relação aos demais. Através da figura 4 (a) e (b) observa-se que a precisão dos resultados foi reduzida, ocorrendo um distanciamento em relação à curva verificada com uso do método gravimétrico, considerado mundialmente como padrão, que, neste caso, não diferiu do uso do anel volumétrico. As diferenças estatísticas foram verificadas através de teste de comparação de médias, contudo, são

**Figura 3.** Fotografia dos componentes do trado modelo Jadoski, versão 01, desenvolvido para a retirada de amostras indeformadas de solo com uso de anel volumétrico



Em que: a – haste de aplicação de força; b – cilindro de suporte do anel volumétrico; c – anel volumétrico; d – cabo; e – cartucho de penetração no solo com suporte do cilindro

**Figura 4.** Representação das variações da lâmina de depleção de água no solo e dimensão fractal (a), coeficientes de variação para diferentes métodos, lâminas de irrigação (b) e precipitação pluvial (c), ocorridas durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho



melhor visualizadas quando apresentadas na forma de coeficiente de variação (Figura 1 (b)).

Estes resultados demonstram que o uso do método da dimensão fractal, utilizando-se o anel volumétrico, gera determinações mais precisas do conteúdo de água no solo, o que não ocorre quando é empregado o método da cubeta. Esta constatação está associada ao fato de se ter encontrado dificuldades para a uniformização do enchimento da *cubeta* nas diferentes repetições devido à utilização de amostra de solo deformado, o que, por sua vez, não ocorre com o anel volumétrico onde a amostra é indeformada. Siqueira et al (2008) apresentam resultados com avaliações de diferentes características de solo através de diferentes métodos onde verificaram grande eficiência do anel volumétrico.

Foram aplicados 102 mm de lâmina de irrigação através das determinações, usando-se o método gravimétrico e do anel volumétrico, e 153 mm através do método da cubeta. Entretanto, devido à distribuição da precipitação pluvial, a produção

da cultura não apresentou diferenças estatísticas significativas. A produção média de grãos de milho foi de 10.050,3 kg ha<sup>-1</sup> e a massa da matéria seca média da parte aérea foi de 147,3 g planta<sup>-1</sup>.

## Conclusões

O uso da dimensão fractal determinada através da fórmula de Spadotto possibilita a determinação precisa do conteúdo de água no solo.

A utilização do anel volumétrico para determinação da dimensão fractal e conteúdo de água no solo apresenta precisão similar a do método gravimétrico padrão e, desta forma, pode ser utilizado como ferramenta para o manejo da irrigação.

O trado modelo Jadoski é uma ferramenta que se mostrou eficiente para a retirada de amostras indeformadas de solo, utilizando-se o anel volumétrico como acessório.

## Referências

Apresentadas no final da versão em inglês.