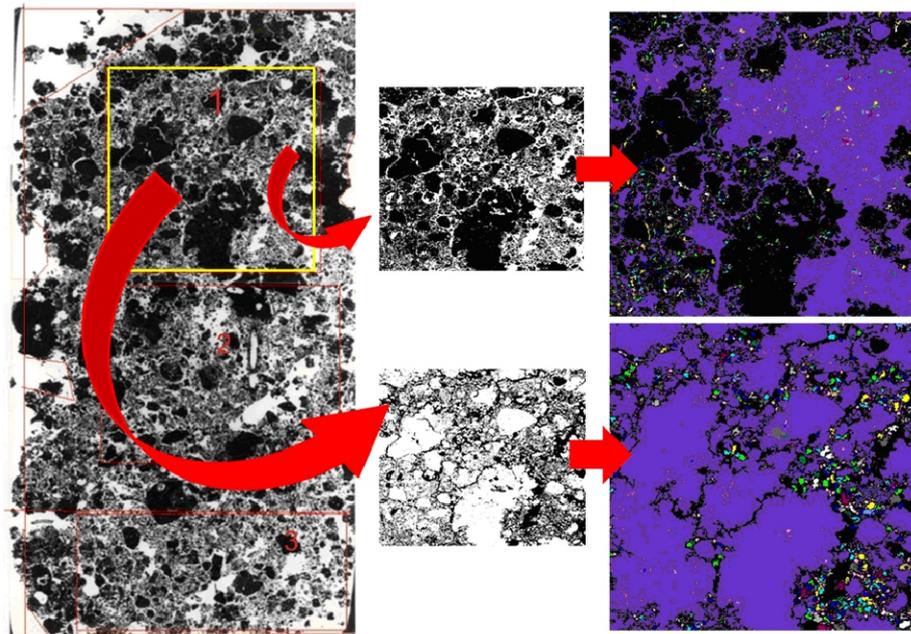


Aplicação da Técnica Multifractal para Caracterização de Manejo de Solo



ISSN 1518-7179

Novembro, 2008

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Instrumentação Agropecuária
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Documentos 41

Aplicação da Técnica Multifractal para Caracterização de Manejo de Solo

Lúcio André de Castro Jorge
Adolfo Nicolas Posadas Durand
Ricardo Nakamura
Maria de Fátima Guimarães
Valentin Obac Roda
Pierre Curmi

Embrapa Instrumentação Agropecuária
São Carlos, SP
2008

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Instrumentação Agropecuária

Rua XV de Novembro, 1452

Caixa Postal 741

CEP 13560-970 - São Carlos-SP

Fone: (16) 2107 2800

Fax: (16) 2107 2902

<http://www.cnpdia.embrapa.br>

E-mail: sac@cnpdia.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: Dr. Luiz Henrique Capparelli Mattoso

Membros: Dra. Débora Marcondes Bastos Pereira Milori,

Dr. João de Mendonça Naime,

Dr. Washington Luiz de Barros Melo

Valéria de Fátima Cardoso

Membro Suplente: Dr. Paulo Sérgio de Paula Herrmann Junior

Supervisor editorial: Dr. Victor Bertucci Neto

Normalização bibliográfica: Valéria de Fátima Cardoso

Tratamento de ilustrações: Valentim Monzane

Foto da capa: Lúcio André de Castro Jorge

Editoração eletrônica: Manoela Campos

1ª edição

1ª impressão (2008): tiragem 300

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

CIP-Brasil. Catalogação-na-publicação.

Embrapa Instrumentação Agropecuária

J82a Jorge, Lúcio André de Castro
Aplicação da Técnica Multifractal para Caracterização de Manejo de Solo. / Lúcio André de Castro Jorge, Adolfo Nicolas Posadas Durand, Ricardo Nakamura, Maria de Fátima Guimarães, Valentin Obac Roda, Pierre Curmi. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2008.
33 p. (Embrapa Instrumentação Agropecuária. Documentos, ISSN 1518-7179; 41).

1. Multifractal. 2. Reconhecimento de padrões. 3. Modelagem. 4. Solo - Manejo. I. Posadas Durand, Adolfo Nicolas. II. Nakamura, Ricardo. III. Guimarães, Maria de Fátima. IV. Roda, Valentin Obac. V. Curmi, Pierre Curmi. VI. Título. VII. Série.

CDD 21 ED 006.4
006.6
631.4

© Embrapa 2008

Autores

Lúcio André de Castro Jorge

Eng. Elétrico, MSc., Pesquisador,
Embrapa Instrumentação Agropecuária,
C.P. 741, CEP 13560-970,
São Carlos (SP)
lucio@cnpdia.embrapa.br

Adolfo Nicolas Posadas Durand

Físico, Dr.; Pesquisador,
CIP Centro Internacional de La Papa,
Peru,
a.posadas@cgiar.org

Ricardo Nakamura

Engenheiro Agrônomo, Estagiário,
Embrapa Instrumentação Agropecuária,
C.P. 741, CEP 13560-970,
São Carlos (SP)
ricardo_n@registro.unesp.br

Maria de Fátima Guimarães

Engenheiro Agrônomo, Dra., Professora,
Universidade Estadual de Londrina,
Centro de Ciências Agrárias,
Departamento de Agronomia,
Caixa Postal 6.001,
CEP 86051-990
Londrina (PA)
mfatima@uel.br

Valentin Obac Roda

Engenheiro Elétrico, PhD., Professor,
Engenharia Elétrica,
Universidade de São Paulo,
São Carlos (SP)
valentin@sel.eesc.usp.br

Pierre Curmi

Engenheiro Agrônomo, PhD., Pesquisador,
Institut National de la Recherche Agronomique (INRA),
membro do Groupe Najac/Groupe de recherches
"Systèmes pédologiques et systèmes agraires",
P.curmi@enesad.fr

Apresentação

As atividades agrícolas quando desenvolvidas sem a aplicação de tecnologias adequadas e com escassez de investimentos em produtividade, pode provocar a degradação acelerada dos recursos naturais.

Para que haja grandes produções, sem aumento expressivo da área e com sustentabilidade, é necessário que o solo seja bem manejado, respeitando certos critérios para que possa ser utilizado por muitos anos. Os sistemas de manejo do solo têm grande influência nas suas características físicas e, entre outras, estão relacionados com a compactação. Os solos agrícolas funcionam como um sistema complexo que retém e transmite água, ar, nutriente e calor às sementes e plantas, de maneira que é necessário um ambiente físico favorável à germinação e ao crescimento radicular, para maximizar a produção das culturas.

Uma das formas de se melhorar significativamente o manejo do solo, é entender como suas propriedades físicas são alteradas, através de monitoramentos com diferentes técnicas, e modelar os processos de tal forma a planejar seu uso adequado.

Visando a contribuir para a caracterização desse meio físico, este documento mostra uma técnica nova de estudo da porosidade do solo sob diferentes manejos e levanta parâmetros que podem ser usados em modelagem matemática para predição do melhor uso do solo.

Álvaro Macedo de Silva
Chefe Geral

Sumário

1. Introdução	9
2. Lâminas de solo	9
3. Teoria Fractal	11
4. Caracterização da porosidade do solo	17
5. Aplicação da técnica Multifractal	18
6. Interpretando os resultados	29
Referências	32

Aplicação da Técnica Multifractal para Caracterização de Manejo de Solo

Lúcio André de Castro Jorge
Adolfo Nicolas Posadas Durand
Ricardo Nakamura
Maria de Fátima Guimarães
Valentin Obac Roda
Pierre Curmi

1. Introdução

O Brasil é o quinto maior país do mundo em área territorial, com mais de 8,5 milhões de quilômetros quadrados. Composto por diversas regiões com rica biodiversidade, variações climáticas e solos férteis, contendo 12% do total de água doce do mundo. Também, reconhecido mundialmente pelo seu potencial agrícola, sendo que durante os anos de 1990 até meados de 2004 não apresentou grande acréscimo na área cultivada. A área plantada cresceu apenas 9,8 milhões de ha, enquanto a produção teve um aumento de 71,88 milhões de toneladas, ou seja, um aumento de 85,5% (MARQUES, 2004).

O uso da terra no Brasil é bem diversificado, sendo uma área agricultável disponível de 152,5 milhões de ha, ou seja, 17,9% (valor estimado) do território nacional, entretanto a área utilizada é de 62,5 milhões de ha (7,3% do território), onde são utilizadas para: lavouras permanentes (15 milhões de ha ou 1,8% do território), lavouras temporárias (42,5 milhões de hectares ou 5% do território), florestas plantadas (5 milhões de hectares ou 0,6% do território). A área agricultável não disponível, 90 milhões de ha, corresponde a 10,5% do território. Pastagens utilizam 177 milhões de ha ou 20,8% do território, sendo que 440 milhões (53% do território) de ha estão com florestas nativas e reservas ambientais (MARTINS, 2004).

A produção agrícola sustentável depende fundamentalmente do manejo adequado do solo. Os sistemas de manejo do solo têm grande influência nas características físicas dos solos e estão relacionados com a compactação. Os solos agrícolas funcionam como um sistema complexo que retém e transmite água, ar, nutrientes e calor às sementes e plantas, de maneira que é necessário um ambiente físico favorável ao crescimento radicular, para maximizar a produção das culturas.

Um solo mal manejado pode se tornar compactado, inadequado para o desenvolvimento das plantas. O caminho natural das raízes são os macroporos, se esses forem reduzidos em tamanho ou em número devido, ao processo de compactação ou adensamento, haverá restrições ao crescimento radicular e, portanto, diminuição da produção agrícola.

Em várias regiões do Brasil, as atividades agrícolas têm sido desenvolvidas sem a aplicação de tecnologias adequadas que, em conjunto com a escassez de investimentos em produtividade, têm provocado a degradação acelerada dos recursos naturais. Essa situação tem imposto elevados custos para a sociedade pela perda de solos agricultáveis, através da erosão que carrega consigo toneladas de terra e de insumos necessários à produção, causando assoreamento e a poluição de cursos d'água e represas, diminuição da capacidade produtiva do solo.

A compactação do solo reduz a porosidade e a permeabilidade, a resistência ao crescimento de raízes é aumentada e muitas mudanças ocorrem nas propriedades físicas do solo. A camada compactada pode limitar a quantidade de água, a absorção de nutrientes, as trocas gasosas, sendo que com esses parâmetros pode ocorrer a limitação da planta, ou seja, prejuízos à produção vegetal e um aumento de energia necessária para o preparo do solo (SECCO et al., 2004).

Aplicação da Técnica Multifractal para Caracterização de Manejo de Solo

O solo é um corpo tridimensional formado por uma parte sólida e por espaços porosos (OLIVEIRA, 2005). De acordo com Kiehl (1979), porosidade pode ser definida como sendo o volume de vazios ou ainda o espaço do solo não ocupado pela "matrix" (conjunto de componentes orgânicos e inorgânicos). Em 1860 classificou-se a porosidade do solo em 2 categorias: porosidade capilar, que atualmente é denominada microporosidade e porosidade não capilar, presentemente macroporosidade; a macroporosidade é também referida como porosidade de aeração, porque é a porosidade encontrada no solo na capacidade de campo, isto é, depois do solo ter sido saturado, e ter ocorrido a percolação da maior parte da água pela gravidade, momento em que o ar começa a ocupar os poros capilares.

A parte sólida de um solo é constituída por material inorgânico e orgânico, geralmente intimamente ligados. Em certos solos o material inorgânico sólido é constituído por partículas grosseiras, dando-lhes o aspecto arenoso, em outros, predominam-se partículas minerais coloidais, dando a característica do solo arenoso. A argila, a matéria orgânica, o calcário e os sesquióxidos de ferro e alumínio, funcionam como agentes cimentantes, agregando as demais partículas.

Uma das formas de se estudar o solo, porosidade e propriedades, é através de amostras indeformadas retiradas diretamente no campo, principalmente por lâminas de solo, conforme descrito a seguir.

2. Lâminas de Solo

O processo para a obtenção de lâminas de solo é detalhado e requer muita determinação, como já foi descrito por Castro et al. (2003).

As amostras devem ser retiradas em trincheiras, com profundidade adequada. Para a retirada das amostras, são utilizadas caixas especiais, confeccionadas em chapas metálicas, normalmente em ferro galvanizado com uma ou duas tampas, como mostra a Figura 1. A amostra é entalhada com uma faça nas dimensões do molde. As caixas utilizadas têm o nome de caixas ou latas de Kubierna, com dimensões mais comuns de 7,5 x 6,5 x 4,0 cm, sendo que para estudos de porosidade são utilizadas caixas com dimensões maiores.



Fig. 1. Entalhe da amostra a ser coletada com as caixas Kubierna.

Após a retirada das amostras do campo, segue-se o preparo das lâminas delgadas, o que requer muita paciência e cuidado por ser um processo delicado. Qualquer falha pode comprometer as lâminas e até mesmo provocar a perda da amostra inteira. As lâminas são obtidas de amostras secas ao ar livre, até que as amostras adquiram um peso constante e, posteriormente, em estufa com ou sem circulação de ar. Esse processo é necessário, pois muitas resinas têm a sua polimerização (endurecimento) comprometida pela presença de água. Depois de secas as amostras são impregnadas com resina própria, materiais hidrofóbicos que requerem total secagem para endurecerem. Para facilitar a impregnação pela resina deve-se diminuir sua viscosidade e proceder a impregnação em ambiente à vácuo.

Ao completar a total cura (polimerização) da resina, dois tipos de cortes são necessários para o processo de preparação das lâminas. O primeiro é para tirar o excesso de resina fora do volume da amostra. O bloco produzido é desbastado em uma das faces para a obtenção de uma superfície plana, que é colada, também com resina, à uma lâmina de vidro. Um segundo corte é então feito de forma a deixar o bloco colado à lâmina com poucos milímetros de espessura. Após os cortes, o bloco com poucos milímetros de espessura, colado na lâmina de vidro, deverá ser desbastado até atingir a espessura de $25\mu\text{m}$, desejável para observação das características ópticas. Finalmente realiza-se o acabamento, onde as lâminas são limpas e cobertas por uma lamínula, podendo ser permanente, colado com a própria resina, semipermanente, usando verniz incolor ou temporário com o uso de substâncias como o composto orgânico 2-fenoxietanol, que pode ser removido facilmente.

No estudo de caso deste documento, foi exemplificado o estudo num latossolo vermelho distroférico, sendo distroférico por apresentar V% menor que 50 e altas concentrações de ferro, que é característico desse tipo de solo. A área cultivada teve a presença de culturas anuais em sistema convencional de manejo, sendo que há pelo menos 30 anos é cultivado com a seqüência: arado de disco, grade pesada e grade niveladora. A amostragem foi realizada logo após o preparo, para as lâminas da área cultivada.

Para as áreas não cultivadas, o solo foi retirado de uma área de mata nativa da Universidade Estadual de Londrina - UEL, onde nunca houve um sistema de manejo.

3. Teoria fractal

A palavra "fractal" vem da junção das palavras Latinas *fractus* que significa "irregular" e *frangere* que significa "quebrar" e a pronuncia correta é "frac'tal".

A geometria fractal é um ramo relativamente novo na matemática que vem sendo estudado desde a sua descoberta nos anos 60 por Benoit Mandelbrot, seu criador.

Mandelbrot (1988, p. 1), comenta: "Nuvens não são esferas, montanhas não são cones, os litorais não são círculos, a casca das árvores não é lisa e tampouco a luz viaja em linha reta".

A geometria fractal vem com o intuito de estudar melhor as formas da natureza, onde a geometria euclidiana não tem grande êxito, pois são formas retas, "perfeitas", coisas que não são encontradas com facilidade na natureza. Na Figura 2, D , d , D_s representam dimensões topológicas, euclidiana e fractal, respectivamente. A dimensão Euclidiana apresenta uma dimensão inteira, enquanto que na geometria fractal tem dimensão fracionada e propriedade de auto-similaridade (pedaço de objeto que se assemelham ao objeto todo), como sugere a Figura 2.

Dimensão Euclidiana Dimensão Fractal

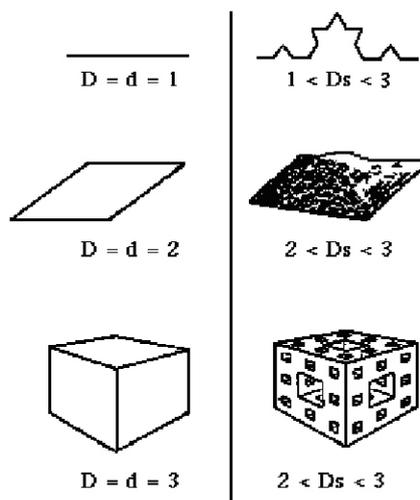


Fig. 2. Comparação entre a geometria fractal e a geometria euclidiana. (POSADAS, 2008).

Auto-similaridade

A auto-similaridade, ou auto-semelhança é uma idéia antiga, contudo, apesar de ser uma propriedade física simples, apenas no início da década de 70 o homem percebeu a sua existência na natureza. Se observarmos o mundo a nossa volta, veremos que há uma infinita gama de objetos com estruturas geométricas complexas. Um fractal possui um número imenso de pequenas cópias dele próprio, o que define a auto-semelhança. Este conceito está relacionado com a dimensão fracionária, o que diferencia da dimensão convencional (números inteiros) e serve para caracterizar o fractal.

Na natureza existem vários exemplos claros de fractal, como demonstrado na Figura 3:

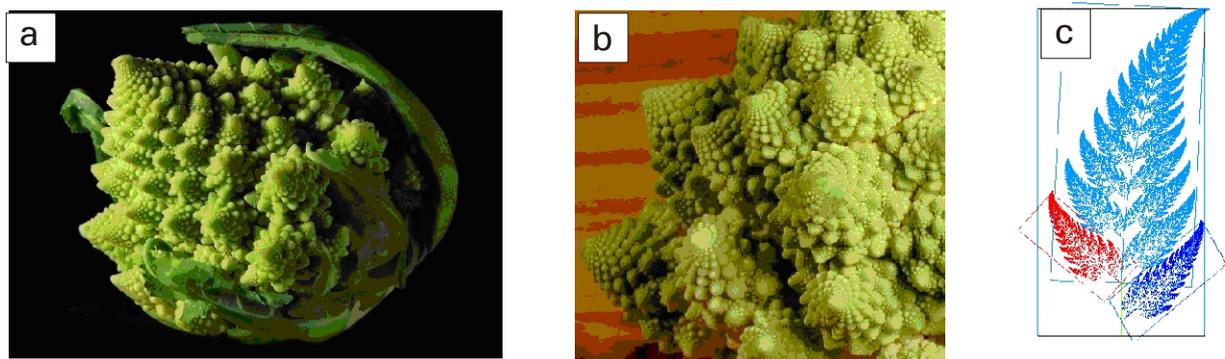


Fig. 3. Modelos de fácil entendimento, (a) um brócolis, (b) é o detalhe das estruturas do brócolis que demonstram a auto-similaridade e (c) é uma folha de samambaia, demonstrando o mesmo. (FRACTAL. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Fractal>>. Acesso em: 10 out. 2008.

Um exemplo clássico de fractal é a curva triádica de Koch (Fig. 4), onde (a) é um segmento unitário que é dividido em três partes iguais, obtendo quatro novos segmentos (b) na primeira geração $n = 1$ (célula inicial de geração). Cada um dos quatro segmentos é novamente dividido em três, obtendo (c) segunda geração ($n = 2$). O aspecto do objeto depois da quinta geração ($n = 5$) é mostrado em (d). O objeto fractal é quando o processo se repete várias vezes.

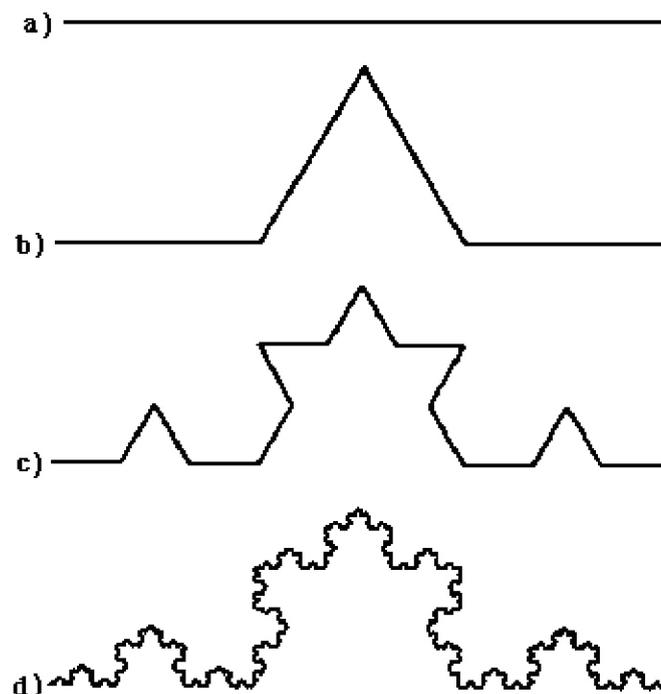


Fig. 4. Curva triádica de Koch. (POSADAS, 2008).

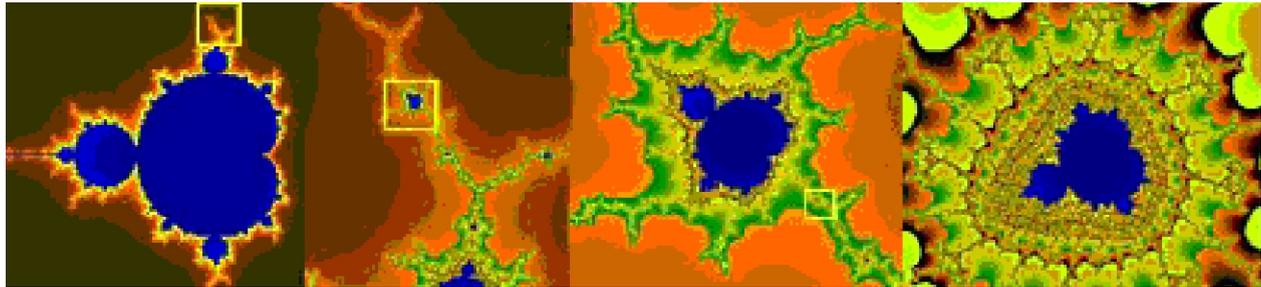


Fig. 5. Conjunto de Mandelbrot. (FRACTAL. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Fractal>>. Acesso em: 10 out. 2008.

Existem vários tipos de fractais, como os estocásticos e os determinísticos, para um fractal determinístico, representado pela Figura 6, temos que (a) tem uma estrutura fractal de crescimento, usando um procedimento iterativo, (b) representa uma estrutura análoga, só que desta vez, a estrutura foi obtida através de sucessivas divisões do quadrado original. Quando $k \rightarrow \infty$, ambas as estruturas tem dimensão fractal $D = 1,465$.

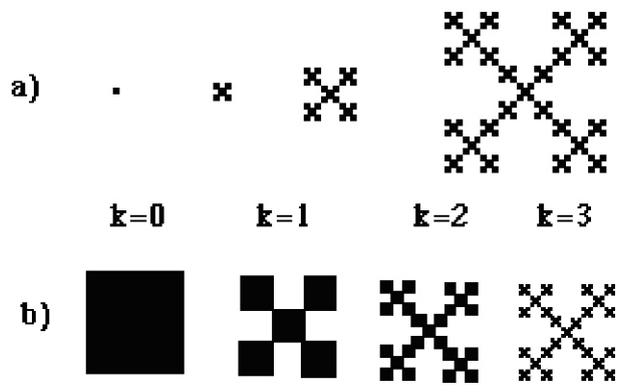


Fig. 6. Exemplo de uma construção de um fractal determinístico.

Teoria Multifractal

Segundo Posadas (2002), um simples conhecimento da dimensão fractal de um objeto é insuficiente para caracterizar sua geometria, assim como qualquer propriedade física inerente nesse objeto. A dimensão fractal D descreve objetos uniformes ou em sistemas homogêneos, porém não oferece informação alguma sobre as altas distribuições dentro do sistema. Com a finalidade de obter informações deste tipo, de uma forma generalizada do conceito, os multifractais devem ser utilizados.

Uma das desvantagens do método fractal é que a quantidade de “matéria” contida dentro de um quadrado não é considerada na análise. Por exemplo, o método não faz distinção entre os quadrados que mostram na Figura 7, apesar da notável diferença entre a proporção de poros que cada um contém.

A análise multifractal, por outro lado, utiliza a densidade da matéria contida em cada quadrado μ . No exemplo da Figura 7, μ se obtém com:

$$\frac{N_p}{N_T} \tag{1}$$

Onde N_p é o número de pixels correspondentes aos poros e N_T é o número total de pixels em um quadrado.

O expoente de Hölder, μ , se calcula a partir da relação entre a densidade e escala r :

$$\mu = \frac{\log \mu}{\log r} \tag{2}$$

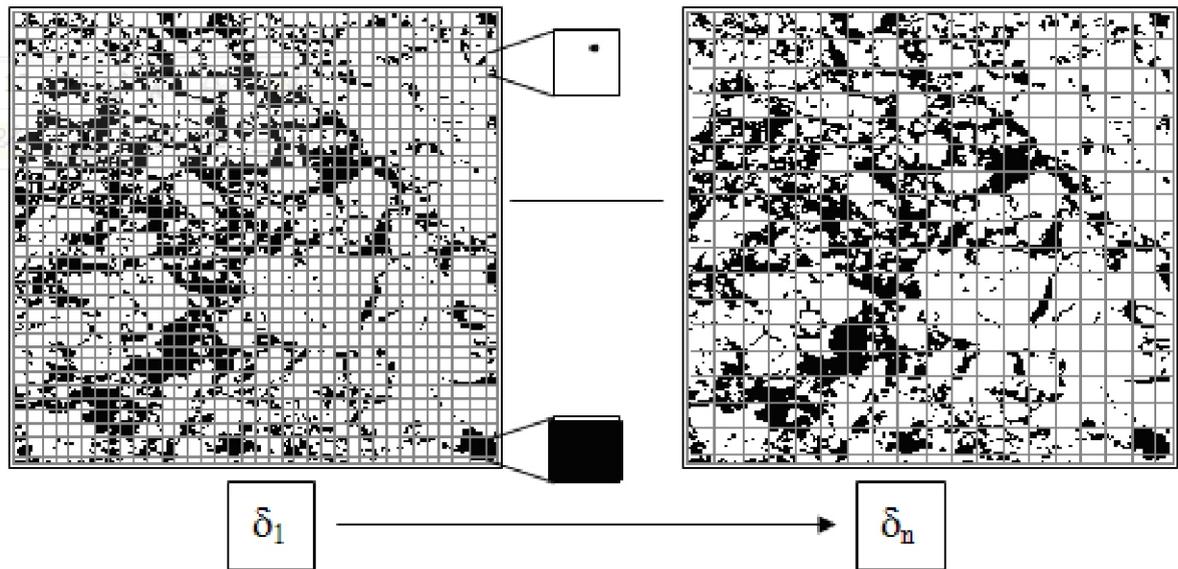


Fig. 7. Uma aplicação do método de análises fractal em uma imagem de sistema poroso em solos. Os poros representam-se com áreas negras, e δ_i é o tamanho dos quadrados. Os quadrados que estão sendo especificados na figura mostram os extremos contidos em um quadrado.

Segundo Posadas et al. (2001), define-se a equação básica da teoria fractal expressa na relação entre o número e o tamanho dos objetos fractais, por:

$$N(L) \sim L^{-D} \quad (3)$$

onde $N(L)$ é o número de objetos, o L é a escala e D é a dimensão fractal. A técnica de "contagem de caixas" ou "*Box-counting*" é usada para estimar as propriedades de escalamento do conjunto fractal cobrindo a medida com caixas de tamanho L e contando o número de caixas que contêm pelo menos um pixel que represente o objeto em estudo, definido por:

$$D = \lim_{L \rightarrow 0} \frac{\log N(L)}{\log\left(\frac{1}{L}\right)} \quad (4)$$

Onde D é conhecido como a dimensão fractal ou a dimensão "*Box-counting*". A desvantagem da técnica de "*Box-counting*" é que o processo não considera a quantidade de massa dentro de uma caixa e por isso não é capaz de resolver a distribuição de áreas com concentrações altas ou baixas de massa, também conhecida como singularidades. Um modo de quantificar singularidades em uma distribuição é estimando a probabilidade de massa na i -ésima caixa, como:

$$P_i = \frac{N_i}{N_T} \quad (5)$$

sendo N_i o número de pixels que contêm massa e N_T é a massa total do sistema. Para sistemas heterogêneos ou não uniformes a probabilidade P_i dentro da i -ésima região varia como:

$$P_i(L) \sim L^{-i} \quad (6)$$

Sendo i o expoente "Lipschitz-Holder" ou pontos singulares, que caracteriza a escala na i -ésima região ou posição espacial. Semelhante ao valor de i pode ser encontrado em posições diferentes de um espaço Euclidiano. O número de caixas $N(\delta)$ onde a probabilidade P_i tem pontos singulares entre δ e $\delta + d$ é estimado como:

$$N(\delta) \sim L^{-\tau} \quad (7)$$

Onde τ pode ser definido como a dimensão fractal do conjunto de caixas com singularidade i . O expoente τ pode variar no intervalo $[-i, +i]$, e τ é normalmente

uma simples função côncava com um máximo em $d(q)/d(q) = 0$, onde q é a ordem de momento de uma distribuição. Assim, quando $q = 0$, $d_{\text{máx}}$ é igual a "Box-counting" ou dimensão de capacidade, D_0 .

O conjunto Multifractal também pode ser caracterizado sob base das dimensões generalizadas, D_q , de ordem de momento q -ésimo de uma distribuição, definido como:

$$D_q = \frac{1}{q-1} \lim_{L \rightarrow 0} \frac{\log \mu(q,L)}{\log L} \quad (8)$$

onde $\mu(q,L)$ é a função de partição definida como:

$$\mu(q,L) = \sum_{i=1}^{N(L)} P_i^q(L) \quad (9)$$

A dimensão generalizada D_q é uma função monótona decrescente para todos os valores reais de q dentro do intervalo $[-\infty, \infty]$. Quando $q < 0$, μ acentua regiões na distribuição com menos concentração de uma medida, entretanto o contrário é verdadeiro, para $q > 0$.

A função de participação é definida como:

$$\mu(q,L) \sim L^{-\tau(q)} \quad (10)$$

Onde $\tau(q)$ é o expoente de massa de q -ésima ordem que é definida como:

$$\tau(q) = (q-1)D_q \quad (11)$$

sendo D_q a dimensão fractal generalizada.

A conexão entre expoentes de potência $\tau(q)$ (eq.(7)) e $\tau(q)$ (eq.(11)) é feito via a transformada de Legendre:

$$\tau(q) = q \tau(q) - \tau(q) \quad (12)$$

$$\tau(q) = \frac{d \tau(q)}{dq}$$

O espectro multifractal $\tau(q)$ e a dimensão generalizada D_q contêm informações semelhantes, ambas caracterizam os arranjos estatísticos dos fractais de dimensão D_i . Em cada i -ésima fractal, é observado escalas P_i com expoente Lipschitz-Hölder, τ_i . Ao contrário do D_q que é associado à geometria do sistema, o espectro multifractal $\tau(q)$ associa-se a parâmetros termodinâmicos do sistema, sendo e a entropia e a energia interna do sistema respectivamente. Assim, o espectro multifractal $\tau(q)$ tem a capacidade de descrever fisicamente qualquer sistema estudado.

As dimensões generalizadas para $q = 0$, $q = 1$ e $q = 2$, são conhecidas como D_0 , D_1 e D_2 . Sendo D_0 a dimensão de capacidade independente de q e fornece uma informação global (ou média) do sistema. O D_1 é relacionado à informação de entropia de Shannon e quantifica o grau de desordem presente em uma distribuição, medindo a forma que a entropia de Shannon seja, por exemplo, $-\mu(L)\log[\mu(L)]$ quando L tende a 0. Para uma medida $\mu \in [0,1]$, o valor de D_1 está no intervalo $0 < D_1 < 1$. Um valor de D_1 próximo a 1,0 caracteriza um sistema uniforme distribuído através de todas as escalas, enquanto que um valor de D_1 perto de 0 reflete um subconjunto de escalas na qual as irregularidades estão concentradas. O D_2 associa-se matematicamente à função de correlação e computa a correlação de medidas contidas em intervalos de tamanho L . A relação entre D_0 , D_1 e D_2 é:

$$D_2 \geq D_1 \geq D_0 \quad (13)$$

onde a igualdade $D_0 = D_1 = D_2$ ocorre só se o fractal for estatisticamente auto-similar e homogêneo.

Método "Box-counting"

Neste trabalho, o método sugerido para análise multifractal é o *Box-counting*.

Segundo Posadas et al. (2001), são apresentadas diferentes grades ou malhas construídas a partir do centro de gravidade da estrutura, onde se quer conhecer a dimensão fractal. As malhas são construídas a partir de um quadrado original, onde o centro geométrico coincide com o centro de gravidade da estrutura. Em cada estado da malha (L) (o número de partes iguais em que o lado do quadrado é dividido) são contados os quadrados que contêm a estrutura $N(L)$. Repetidamente, a partir dos dados encontrados, se constrói o gráfico de $\log L \times \log N(L)$. Se o gráfico obtido for uma reta, então o comportamento da estrutura tem auto-similaridade ou auto-afinidade estatística ao fractal, cuja dimensão D é obtida pelo cálculo do coeficiente angular da reta. Para estruturas mais compactadas, é recomendado fazer uma análise estatística, isto é, repetir o cálculo dos $N(L)$ para diferentes quadrados construídos a partir do centro de gravidade da estrutura (quadrado com lados diferentes). Desta maneira obtém-se um conjunto de valores $N(L)$ para outro conjunto de valores de L . Estes dados são tratados estatisticamente para se obter os valores da dimensão fractal "D". Representados na Figura 8.

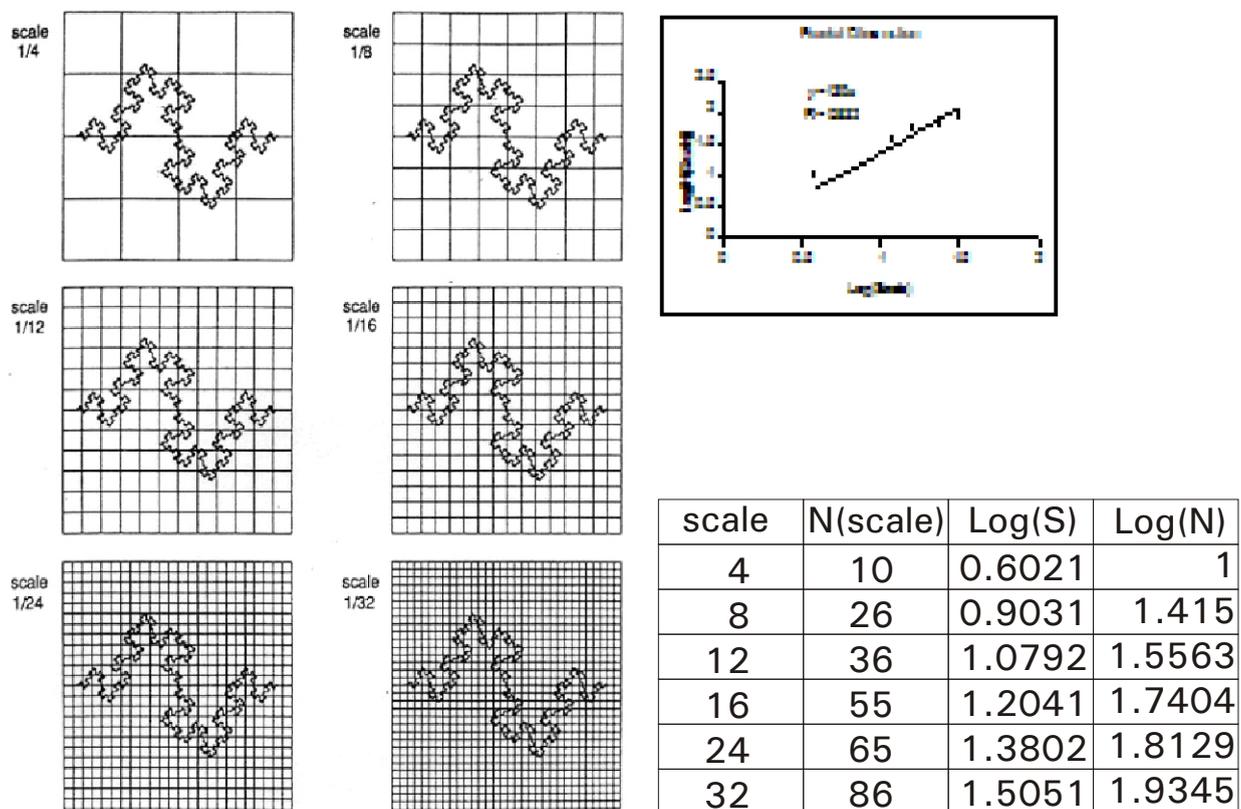


Fig. 8. Demonstra o método "Box-counting" para o cálculo da dimensão fractal.

Espectro Multifractal

Uma vez feita a análise nas diferentes escalas, é obtido um espectro multifractal, através do qual são feitas as análises e tiradas as devidas conclusões.

A Figura 9 representa um espectro multifractal, onde os momentos q estão relacionados à singularidade do espectro: para valores $q > 1$, as únicas medidas são fortemente reforçadas e para $q < 1$, as menores áreas singulares são enfatizadas. O ponto em que $f(q)$ é igual a 0 corresponde ao ponto $q = 1$, que é a média do sistema, o ponto $q = 0$ corresponde ao valor máximo e o ponto $q = 2$ corresponde à correlação da dimensão. Para monofractais, o espectro é constante, enquanto que para multifractais são representados por uma função monótona decrescente.

De acordo com Posadas et al. (2005), um espectro multifractal, $f(\alpha)$ por α , onde $f(\alpha)$ está associada à entropia generalizada e α é a energia interna do sistema. O espectro caracteriza quantitativamente a variabilidade da medida. A largura do espectro é a indicação da variabilidade total. Para gráficos com a distância de q maior, sinaliza que o sistema é mais heterogêneo, conseqüentemente mais entrópico, e se a distância é menor, indica que o sistema é menos entrópico, ou seja, mais homogêneo.

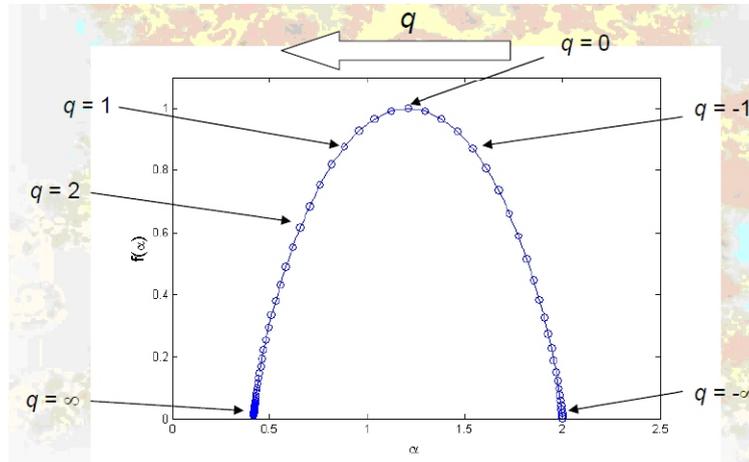


Fig. 9. Espectro multifractal.

4. Caracterização da Porosidade do Solo

A análise das lâminas de solo é feita com base nas imagens obtidas, a partir de fotografias com luz ultravioleta, o que evidencia apenas a estrutura do solo ou os poros. Os exemplos de imagens de solos sob diferentes manejos utilizados neste trabalho estão representados nas Figuras 10 e 11, sendo (a) o solo cultivado e (b) o solo nativo (mata).

A Figura 10 representa as lâminas de 0 a 20 centímetros de profundidade, sendo (a) a área cultivada e (b) a área não cultivada (mata nativa). A Figura 11 demonstra as lâminas de 20 a 40 centímetros, seguindo a mesma ordem. São nítidas as diferenças contidas nas lâminas.

Nas imagens das lâminas de 0 a 20 cm (Fig. 10), foram identificadas três áreas distintas, numeradas de 1 a 3, divididas em camadas. Os números da lâmina de solo cultivado representam: (1) a última gradagem leve realizada, (2) a primeira gradagem leve e (3) a grade pesada. Observa-se que há pontos com torrões angulosos, característico desse tipo de manejo. A lâmina do solo nativo é quase toda homogênea, e foram obtidos somente pontos de amostragem dentro do perfil para comparação.

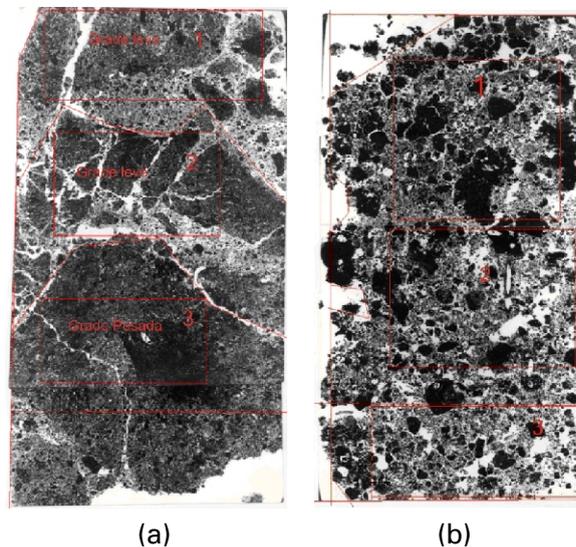


Fig. 10. Lâminas delgadas analisadas. De 0 a 20 cm de profundidade. (a) área cultivada e (b) mata

Aplicação da Técnica Multifractal para Caracterização de Manejo de Solo

Nas lâminas de 20 a 40 cm (Fig. 11), percebe-se que as estruturas começam a ter a mesma aparência nos centímetros finais do perfil. Isto se deve ao fato do maquinário não ter tanto impacto nessas camadas. Os números são definidos de 4 a 7 para a área de cultivo, onde representam: (4) área compactada, logo a baixo do pé de grade, (5) área com pouco impacto, (6) área de transição, (7) área de possível homogeneidade. Para a área não cultivada são representados pelos números 4 a 6, onde não há grande diferença entre si, sendo amostras somente para comparação.

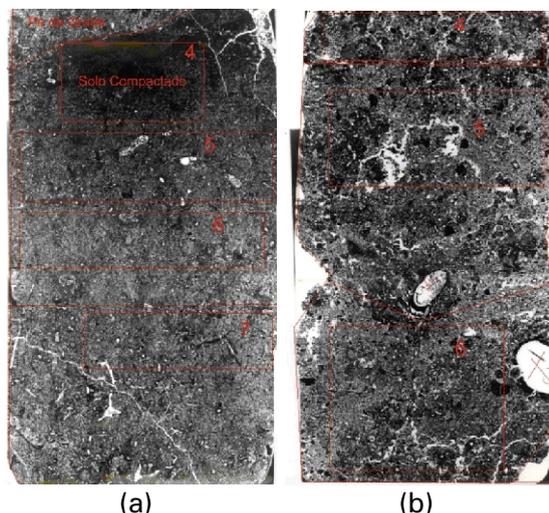


Fig. 11. Lâminas delgadas analisadas. De 20 a 40 centímetros de profundidade. (a) área cultivada e (b) mata

5. Aplicação da técnica Multifractal

Para a utilização da técnica são necessários utilização de diferentes programas para a análise das lâminas. Estes programas e os respectivos passos são descritos a seguir.

ImageJ

É um programa de processamento de imagens, de domínio público, desenvolvido em JAVA, inspirado no NHT *image* para Macintosh. Pode-se baixar gratuitamente da internet, só precisando do JAVA 1.4 ou mais recente na máquina. As versões estão disponíveis para as plataformas Windows, Mac OS e Mac OS X e Linux. ImageJ foi projetado com uma arquitetura aberta que fornece extensibilidade através *Java plugins*.

O programa suporta vários formatos de imagem, como: TIFF, GIF, JPEG, BMP, DICOM, STIF, entre outros. É possível realizar várias funções ao mesmo tempo, sendo um programa "leve" para o computador, tendo uma interface limpa e objetiva, como mostra a Figura 12.



Fig. 12. Interface do programa ImageJ.

Utilização do ImageJ

Para o trabalho realizado com solos é necessário converter a imagem em uma matriz numérica para que os dados pudessem ser analisados. A conversão do arquivo para uma matriz de dados passa por várias etapas.

A primeira é seleccionar em File e escolher a opção Open ou pelo atalho Ctrl + O (Fig. 13). Abrirá uma janela (Fig. 14) onde se deve escolher o diretório em que a imagem se encontra e achá-la, após isso seleccionar em abrir, assim será possível ver a imagem com a qual se está trabalhando (Fig. 15). Caso necessário recortar alguma parte da imagem basta seleccionar o pedaço desejado e através das teclas Ctrl + shift + x (todas ao mesmo tempo).

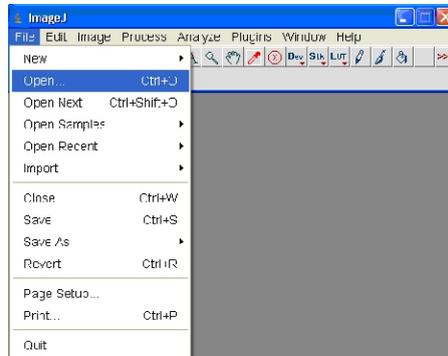


Fig. 13. Menu para abrir a figura desejada.

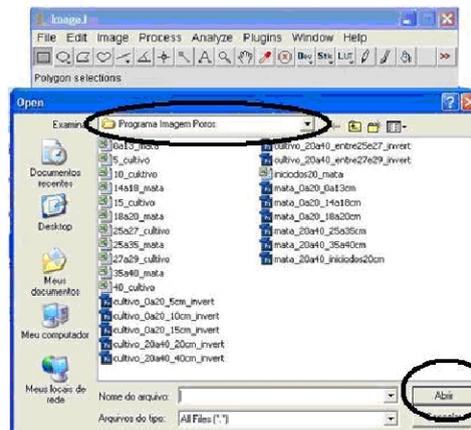


Fig. 14. Seleccionar a imagem desejada

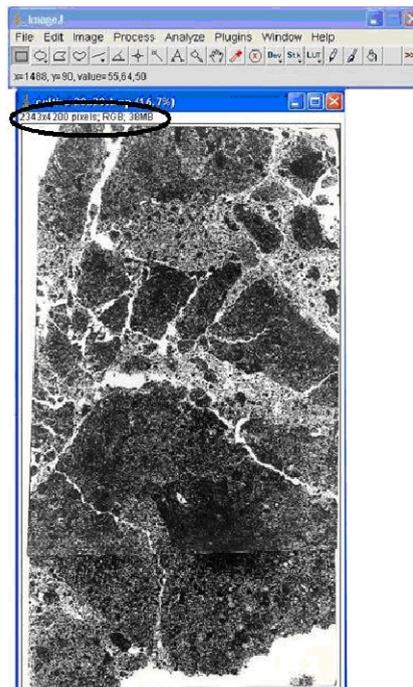


Fig. 15. Imagem aberta, indicação do tamanho da imagem em pixels, está colorida (RGB) e o tamanho em MB.

Aplicação da Técnica Multifractal para Caracterização de Manejo de Solo

Após aberta a imagem deve-se transformar a imagem para 8 bits (Fig. 16), para que se possa realizar o *Threshold* ou Limiarização (Fig. 17), é possível controlar o Threshold através do histograma, no caso desse projeto utilizou-se o *default*, apenas selecionado em *apply* para confirmar a escolha (Fig. 18), deixando a imagem binarizada (somente em preto e branco, Fig. 19). Após a binarização pode-se realizar a inversão dos tons, se preciso (Fig. 20) com o atalho Ctrl + shift + i (todos os botões ao mesmo tempo), o resultado será como a Figura 21.

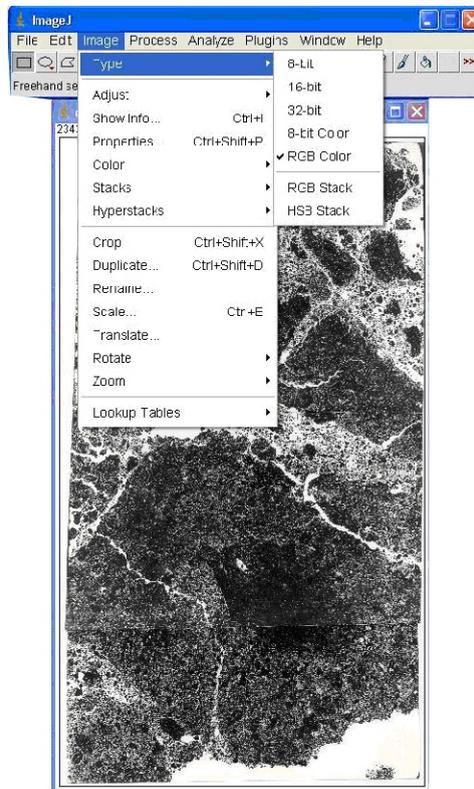


Fig. 16. Transformação para 8 bits.

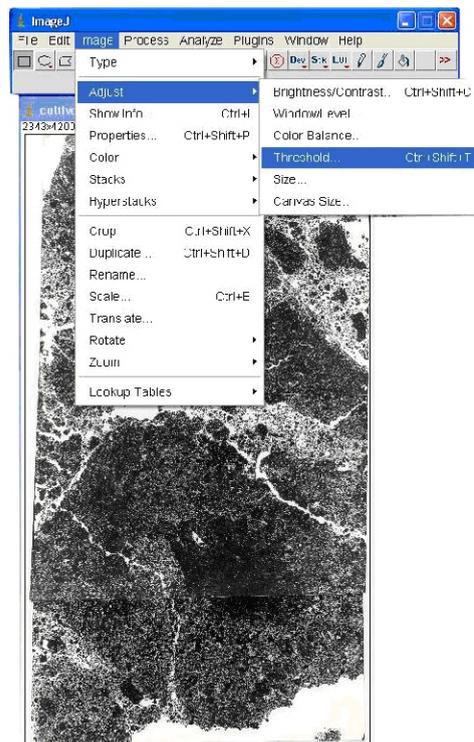


Fig. 17. Início do processo de Threshold.

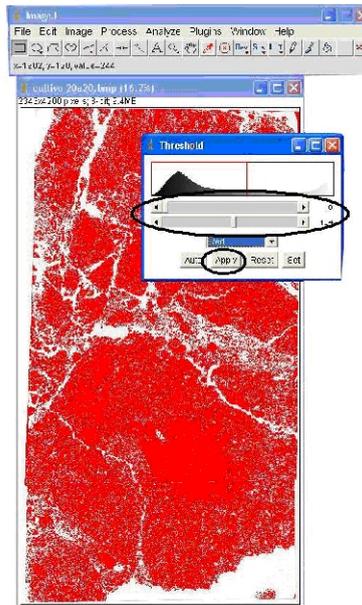


Fig. 18. Histograma que possibilita o manuseio do Threshold.

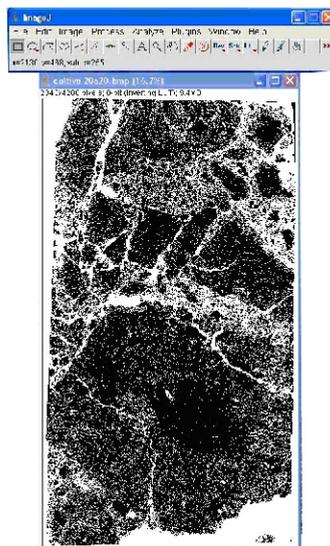


Fig. 19. Imagem binarizada.

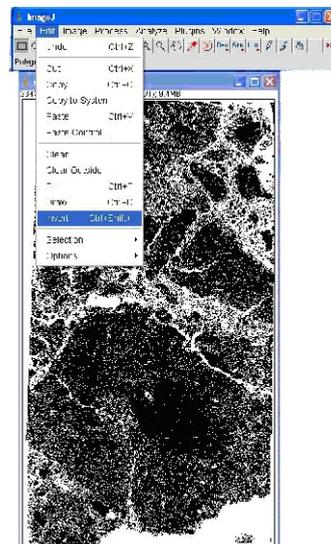


Fig. 20. Inversão das cores.

Aplicação da Técnica Multifractal para Caracterização de Manejo de Solo

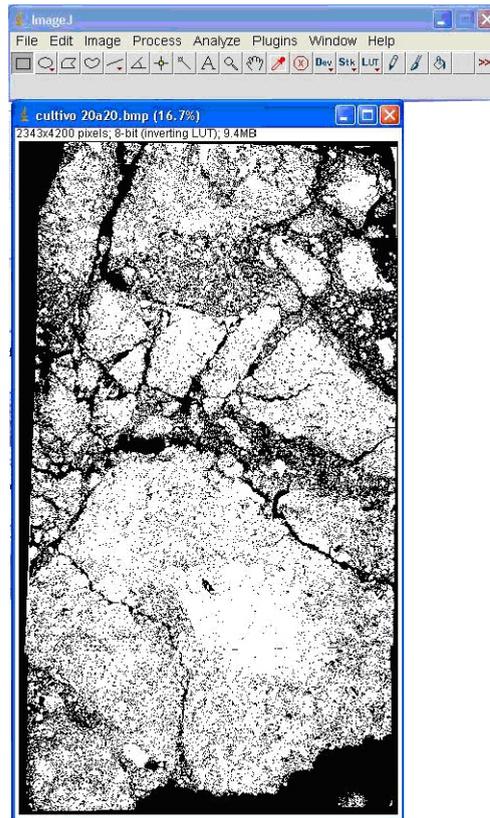


Fig. 21. Cores invertidas.

Para salvar os arquivos já modificados é preciso salvar em dois tipos de arquivos diferentes, *.bmp e *.txt, os arquivos em bmp (Fig. 22) servem para guardar a imagem, caso necessário, e os arquivos em txt (Fig. 23) são para a análise em si.

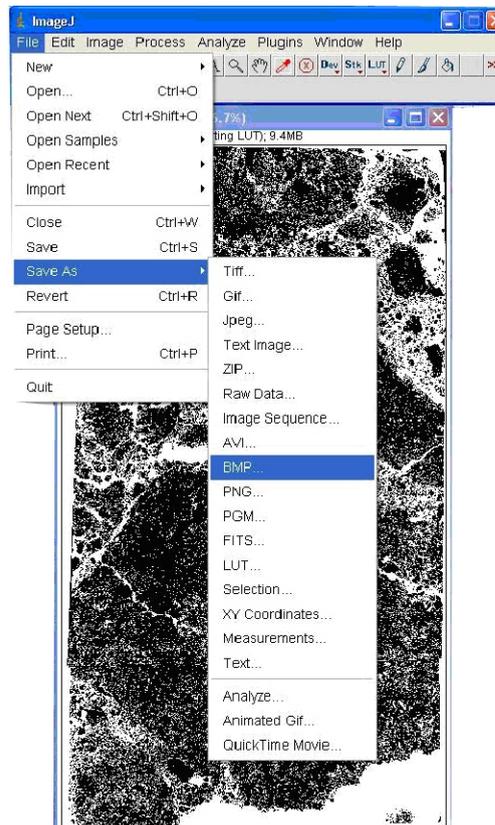


Fig. 22. Salvar em *.bmp.

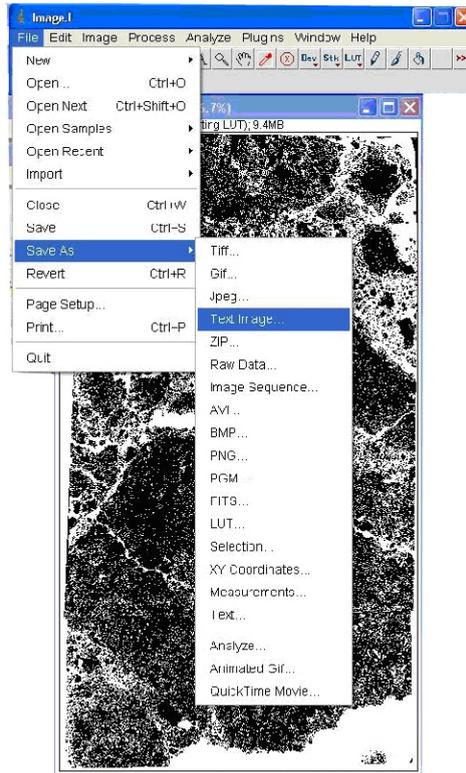


Fig. 23. Salvando em *.txt.

Desse modo os arquivos estão prontos para serem analisados no programa de análise multifractal.

MASS (Multifractal Analysis & Scaling System)

O programa foi desenvolvido pelo Centro Internacional de La Papa (CIP) (Fig. 24) Peru, não é um programa de domínio público, ou seja, é necessário ter uma licença para utilizá-lo. Porém a Embrapa está disponibilizando uma versão desenvolvida na Embrapa Instrumentação em parceria com o Centro Internacional de La Papa, com o objetivo melhorar o desempenho e acrescentar novas ferramentas para a utilização que não estão disponíveis no programa MASS. A versão do programa numa arquitetura totalmente gratuita, e um exemplo da interface pode ser observada na Figura 24.

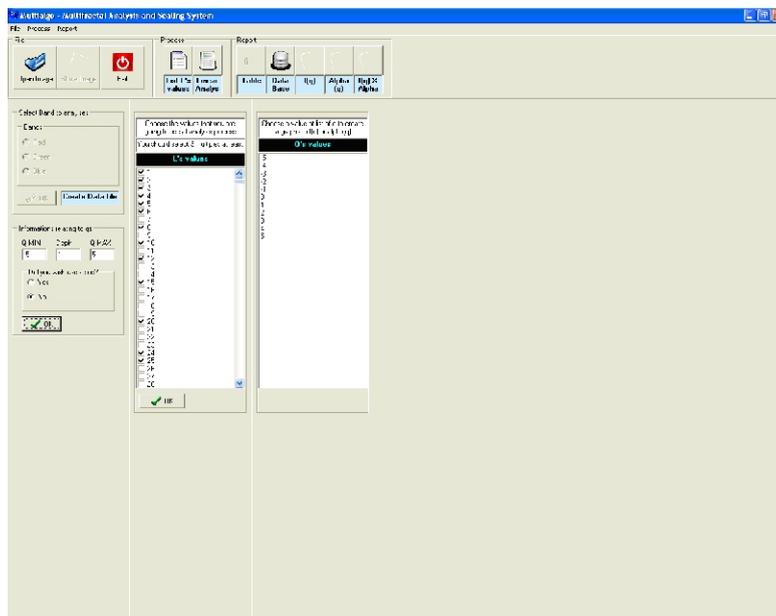


Fig. 24. Interface do programa MultiFractal.

Aplicação da Técnica Multifractal para Caracterização de Manejo de Solo

A entrada do programa MASS é uma matriz numérica contendo somente "0" (Preto) e "255" (branco), lembrando que a parte analisada pelo programa é somente as que estão em branco. Na Figura 25 é possível ver a interface do programa. O método utilizado pelo programa é o "Box-counting", já mencionado no tópico método *Box-counting*.

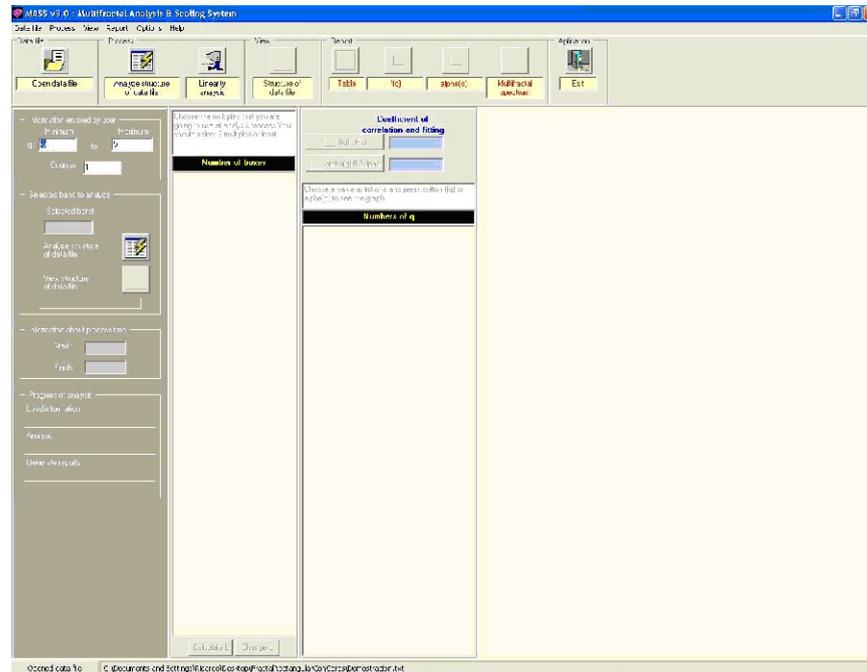


Fig. 25. Interface do programa MASS.

Utilização do programa Mass

Para iniciar o programa é necessário ter acesso ao arquivo *.txt em mãos, com todas as transformações já feitas. Após isso é preciso abrir o arquivo dentro do programa clicando em open data file e escolhendo o diretório onde se encontra o arquivo e selecionar a opção abrir (Fig. 26). Nota-se que, após abrir o arquivo, o nome do mesmo encontra-se na barra abaixo, circulado na Figura 27, tal como os q's (momentos estatísticos) e o intervalo que vão variar. Em seguida, seleciona-se em Analyze structure of data file, que selecionará os L's (escala) que será trabalhado (Fig. 28). Por fim, seleciona-se em OK para a janela que aparece.

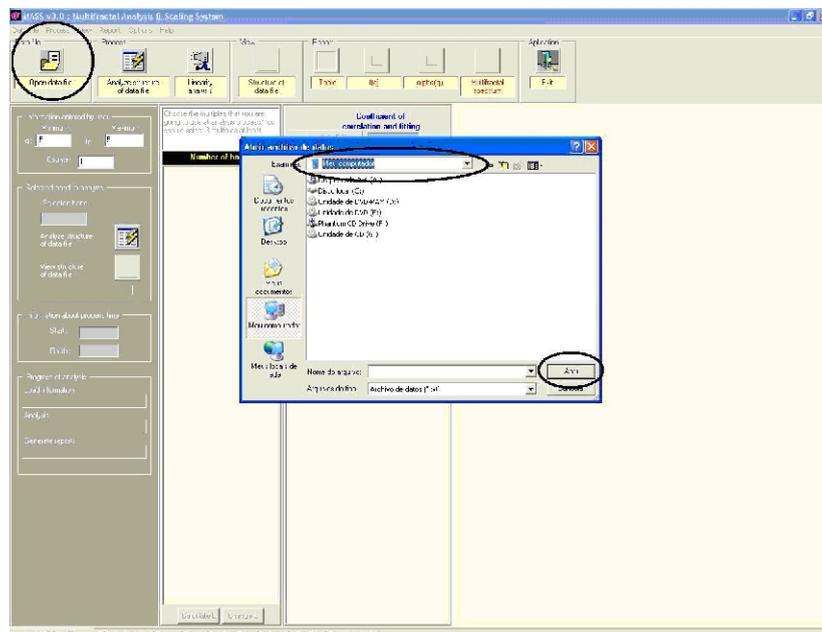


Fig. 26. Como abrir um arquivo.

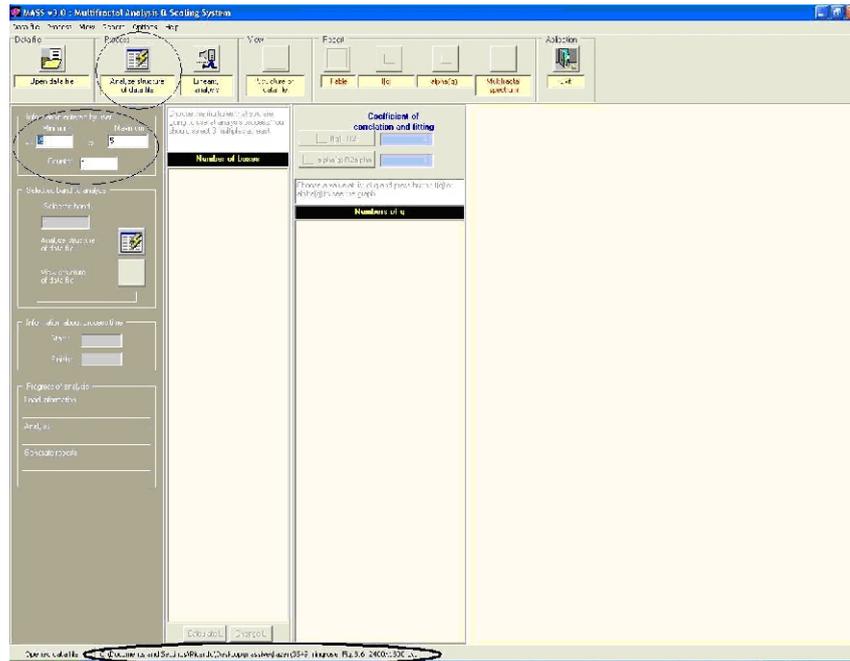


Fig. 27. Documento que está sendo trabalhado, os q's e o botão de análise inicial.

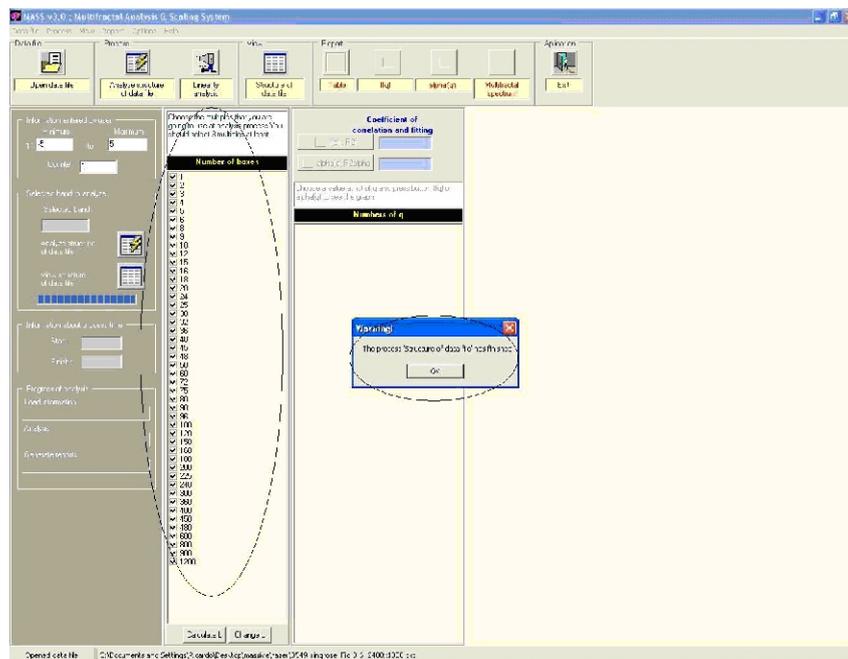


Fig. 28. Componentes do programa.

A Figura 29 é ponto importante para a análise, por identificar qual o tamanho da imagem utilizada em *Number of columns* e *Number of rows*, que são os números de pixels da imagem. Esta informação é importante para escolher em que escala trabalhar, pois se deve trabalhar com múltiplos do número máximo tanto das colunas como das linhas. É importante trabalhar com a metade do maior número. Como o exemplo mostrado na Figura 29, o número de colunas é de 2400 e o de linhas 1800, nesse caso se deve trabalhar com os números menores de 1200 para que se obtenha um bom resultado, tais números como 2, 4, 10, 20 e assim por diante, até completar a seqüência (Fig. 30), em seguida, aperta-se o botão *Linearity analysis*, que fará todos os cálculos baseados nos dados selecionados. Ao término do processo, clica-se em OK para a janela que aparecer.

Percebe-se, na Figura 31, os q's selecionados em seu devido intervalo. Para cada q selecionado pode-se obter um gráfico de regressão linear (Fig. 32 e 33), através dos botões *(q)* e *alpha(q)*, os lugares marcados com as flechas devem conter números maiores ou

Aplicação da Técnica Multifractal para Caracterização de Manejo de Solo

iguais a 0,90, para que não haja grandes interferências nas análises. Esse detalhe é observado para todos os q 's disponíveis. O espectro multifractal pode ser visto no botão *Multifractal spectrum*, devendo ter o cuidado com relação ao ajuste da curva, pois é preciso deixar o espectro mais ou menos com a forma da Figura 34, caso não esteja desta forma, é preciso ajustar, primeiramente, os q 's dando maior importância para os L's, caso não seja o suficiente elimina-se alguns L's de acordo com a necessidade.

Com os dados acertados, seleciona-se *Table*, e será possível observar a tabela dos dados (Fig. 35). É necessário analisar os D 's, pois os mesmos devem estar em ordem decrescente $D_2 > D_1 > D_0$, necessariamente nessa ordem. Confirmando os dados é só salvar o arquivo no botão *Export table to a text file*, na janela que aparecer escolhe-se o diretório para gravar, coloca-se o nome desejado e clica-se em *salvar*. Esse procedimento deve ser feito para todas as imagens desejadas.

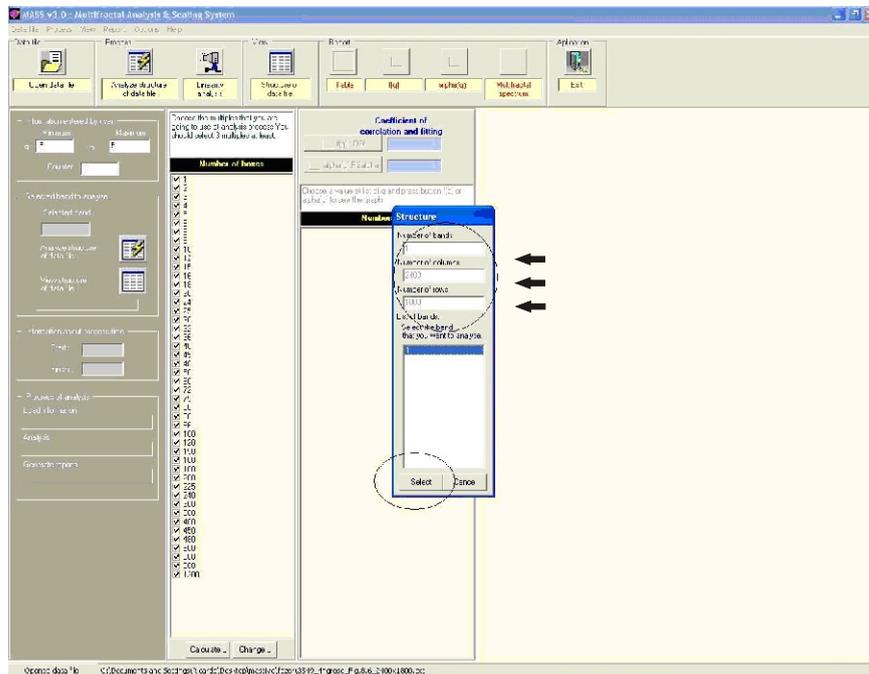


Fig. 29. Itens necessários.

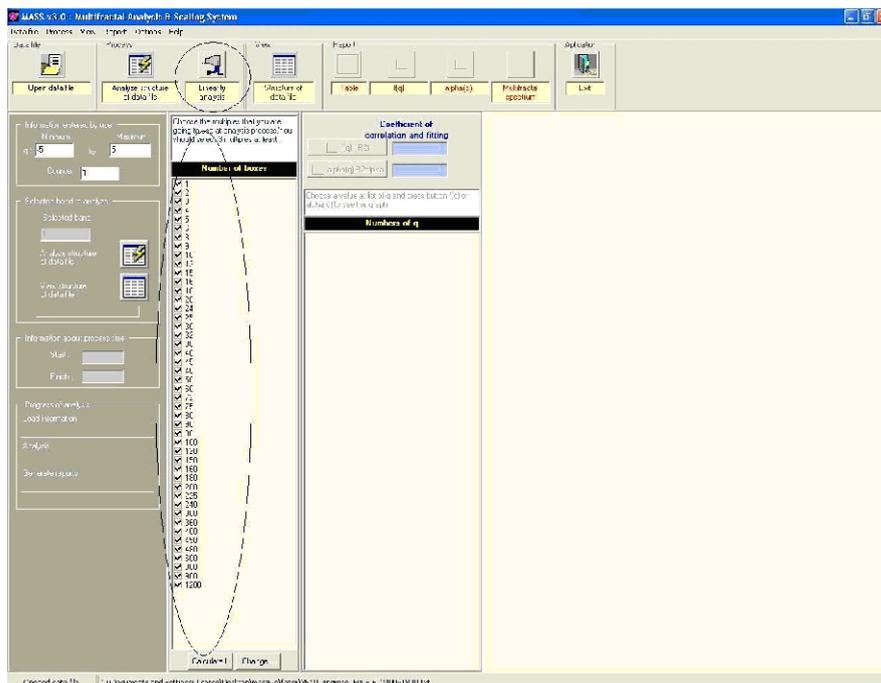


Fig. 30. Como começar a rodar.

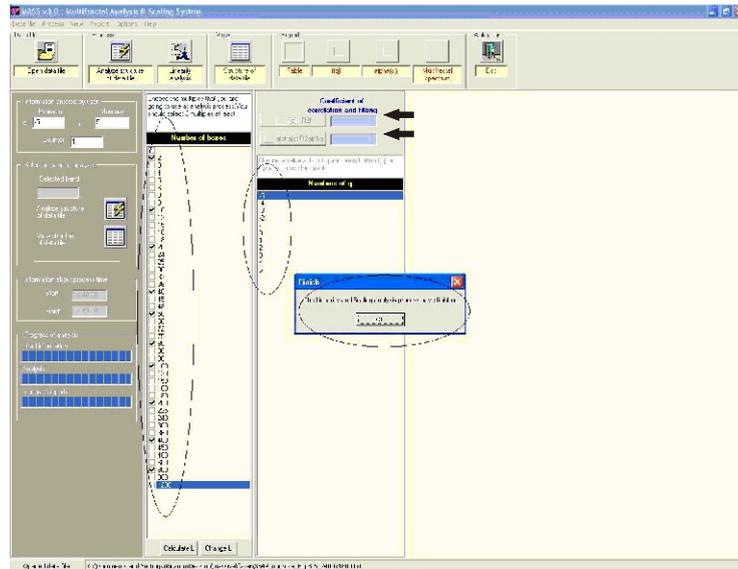


Fig. 31. Demonstração dos L 's escolhidos e os q 's.

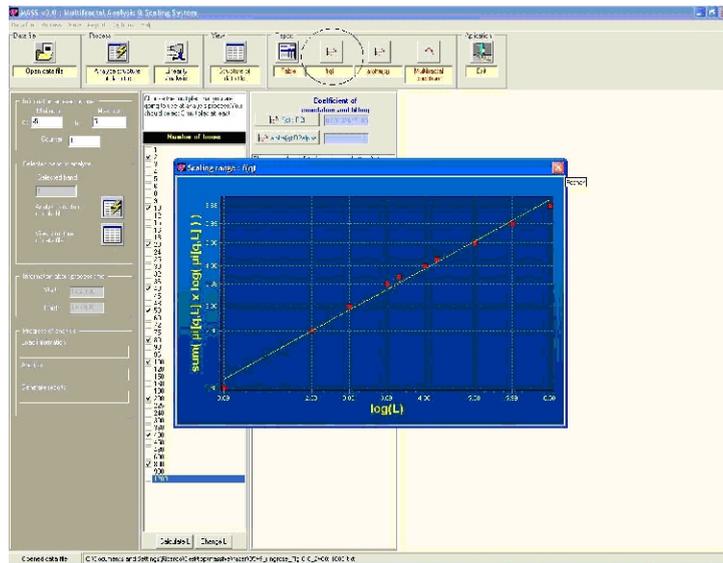


Fig. 32. Gráfico de linearidade de (q) .

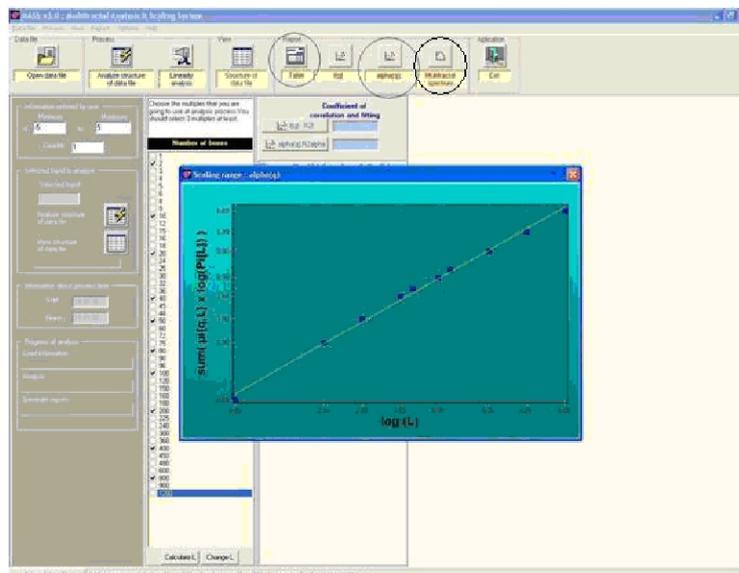


Fig. 33. Gráfico de linearidade α (q) .

Aplicação da Técnica Multifractal para Caracterização de Manejo de Solo

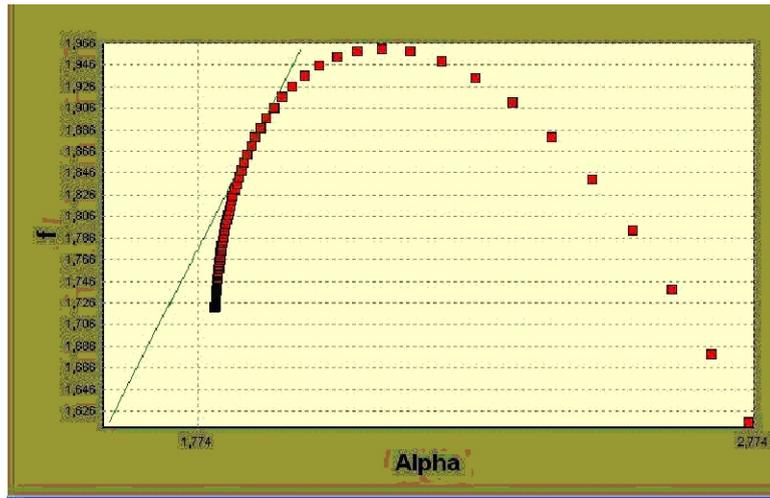


Fig. 34. Espectro multifractal.

Fig. 35. Tabela de saída do programa.

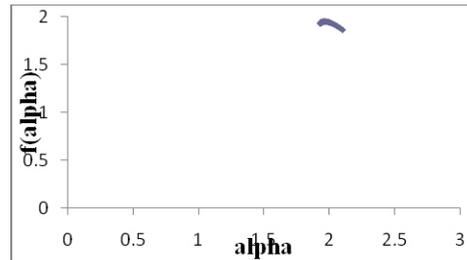
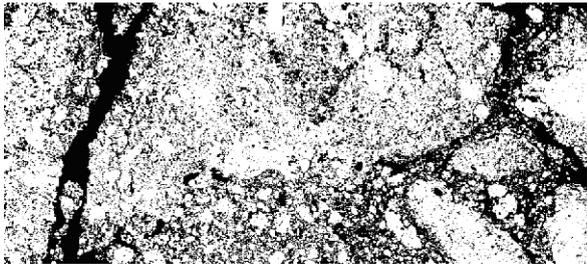
Fig. 36. Salvando a tabela.

6. Interpretando os resultados

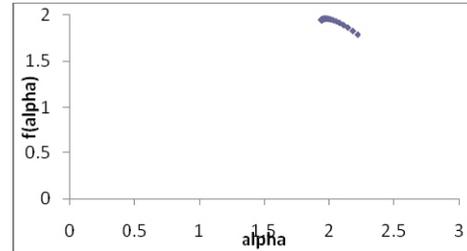
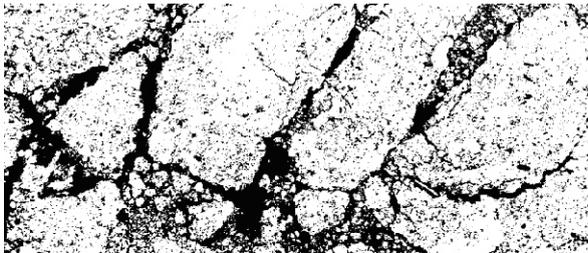
A obtenção das imagens de forma correta é de extrema importância para que não se faça uma interpretação errada dos dados.

O programa MASS fornece os parâmetros importantes quanto à caracterização dos solos analisados.

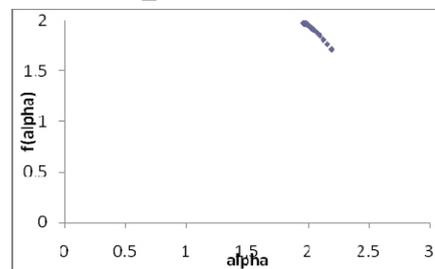
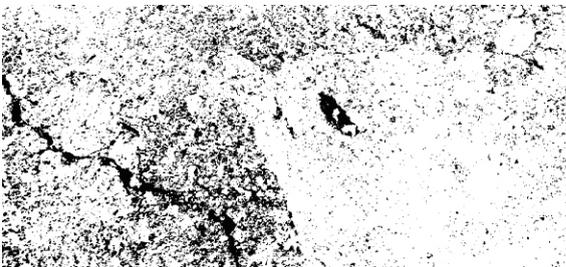
Os quadros da Figura 37 apresentam do lado esquerdo as imagens recortadas em cada porção da lâmina de solos e os respectivos espectros multifractais obtidos.



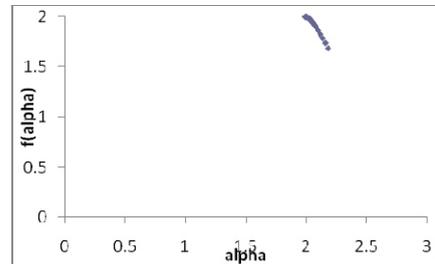
a) Cultivo_5cm_matriz_1800x800 pixels



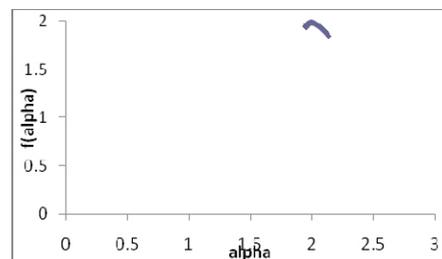
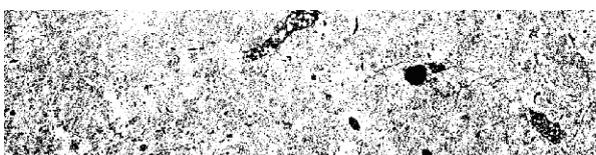
b) Cultivo_Matriz_10cm_1400x600_pixels



c) Cultivo_Matriz_15cm_1300x600_pixels

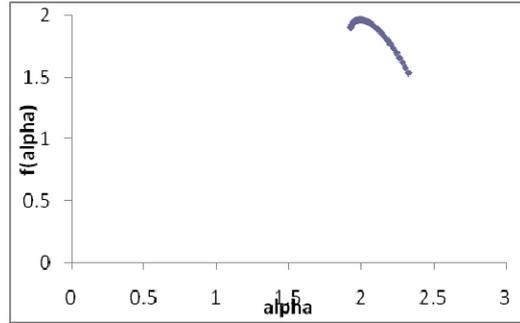
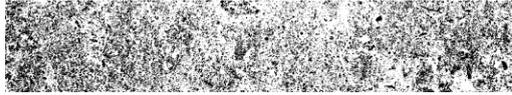


d) Cultivo_Matriz_20cm_1200x400_pixels

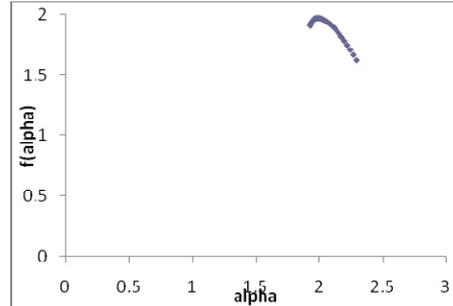


e) Cultivo_Matriz_25a27cm_2000x500_pixels

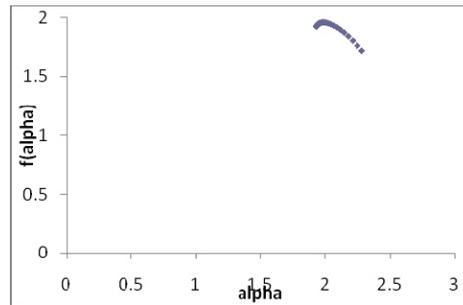
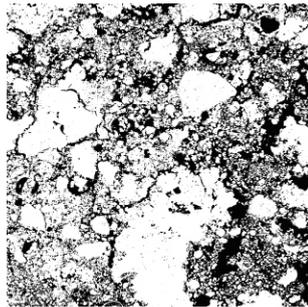
Aplicação da Técnica Multifractal para Caracterização de Manejo de Solo



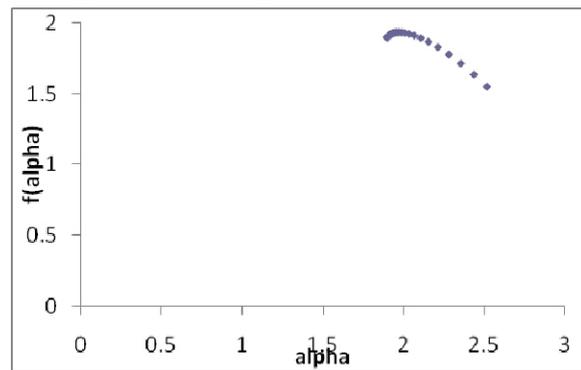
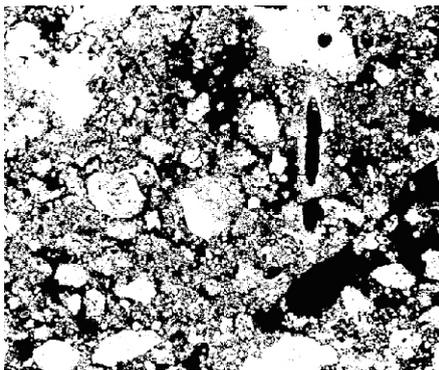
f) Cultivo_Matriz_27 a 29cm_2200x400_pixels



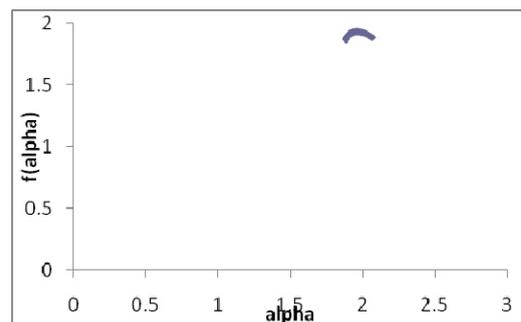
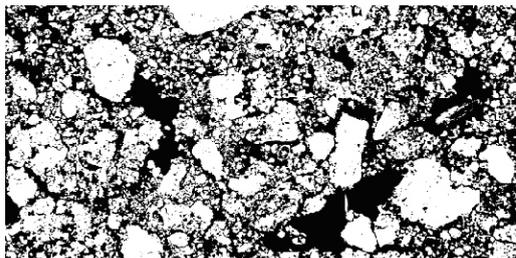
g) Cultivo_Matriz_40cm_1000x500_pixels



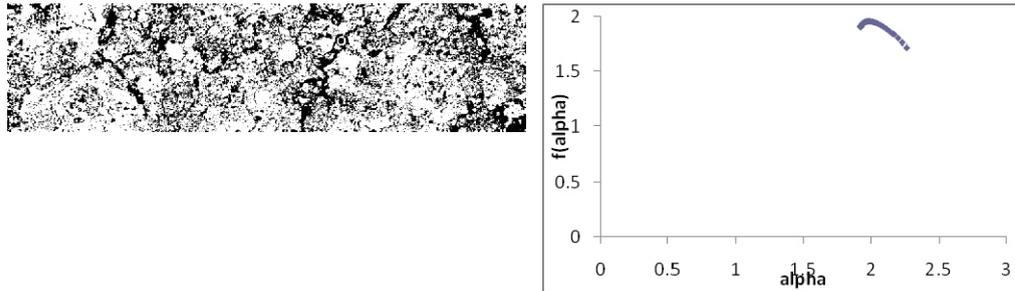
h) Mata_Matriz_0a13cm_1300x1300_pixels



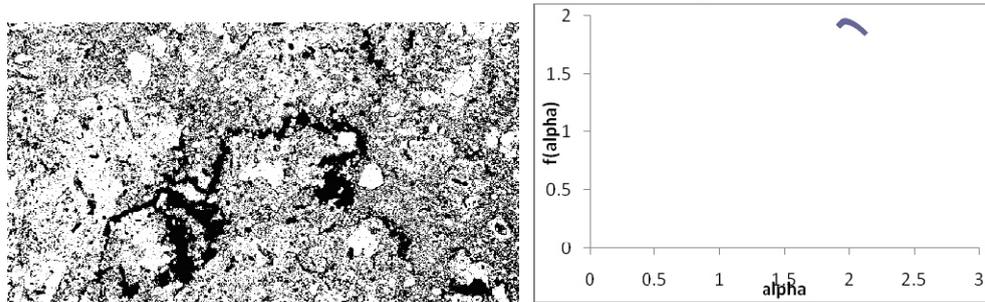
i) Mata_Matriz_14 a 18cm_1200x1000_pixels



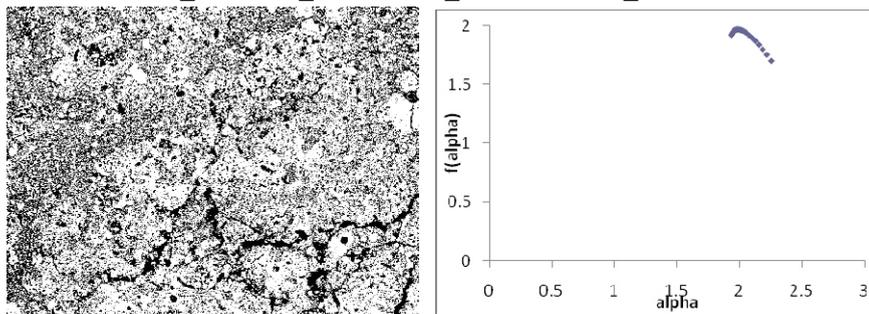
j) Mata_Matriz_18 a 20cm_



k) Mata_Matriz_inicio20cm_1600x400_pixels



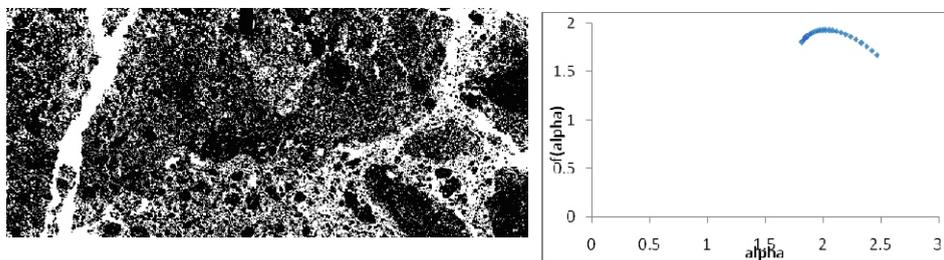
l) Mata_Matriz_25a35cm_1800x1000_pixels



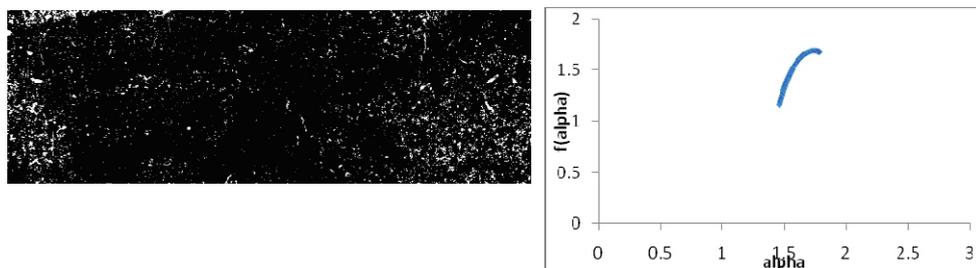
m) Mata_Matriz_35a40cm_1600x1200_pixels

Fig. 37. Imagens da matriz de solo para porções das lâminas de solo e os respectivos espectros multifractais. (a) a (g) área de solo cultivado e de (h) a (m) área nativa, ou mata.

Da mesma forma que a análise para a matriz de solo, foi feita a análise da porosidade, através das imagens negativas. Na Figura 38 podem ser observadas as imagens de porosidade para cada porção da lâmina de solo e os respectivos espectros multifractais.

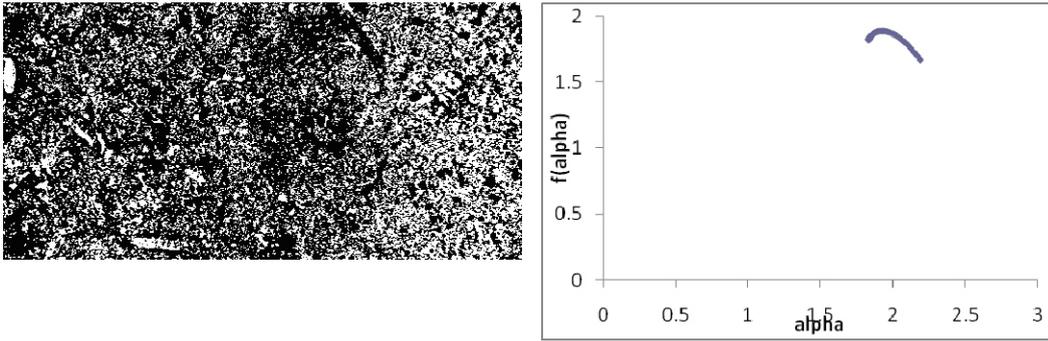


(a) Cultivo_5cm_1800x800_pixels

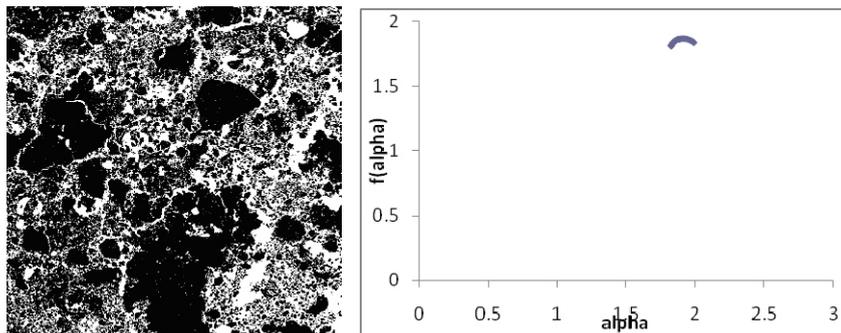


(b) Cultivo_20cm_1200x400_pixels

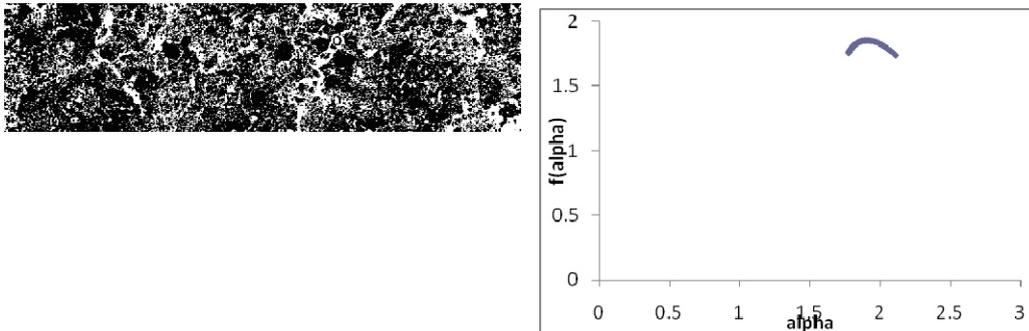
Aplicação da Técnica Multifractal para Caracterização de Manejo de Solo



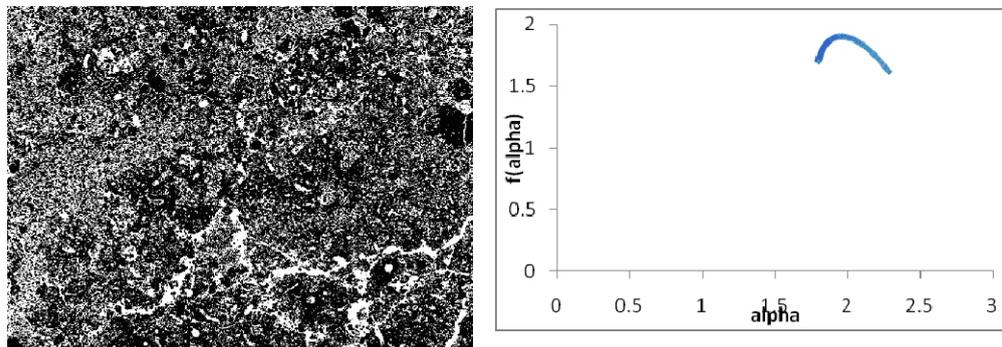
(c) Cultivo_ 40cm_1000x500_pixels



(d) Mata_ 0 a 13cm_1300x1300_pixels



(e) Mata_ inicio20cm_1600x400_pixels



(f) Mata_ 35 a 40cm_1600x1200_pixels

Fig. 38. Imagens da matriz de solo para porções das lâminas de solo e os respectivos espectros multifractais. (a) a (c) área de solo cultivado e de (d) a (f) área nativa, ou mata.

A Figura 39 demonstra que mesmo na parte sólida quanto na porosidade o solo de mata apresenta uma homogeneidade maior que os solos cultivados. Isso se deve ao comportamento dos gráficos de $\max, f(\alpha)_{\max}$, sendo que quanto mais pontual for o gráfico, mais homogêneo é o sistema analisado e quanto mais afastados os pontos negativos estiverem afastados dos positivos, isso determina que o sistema é heterogêneo, ou seja, mais entrópico.

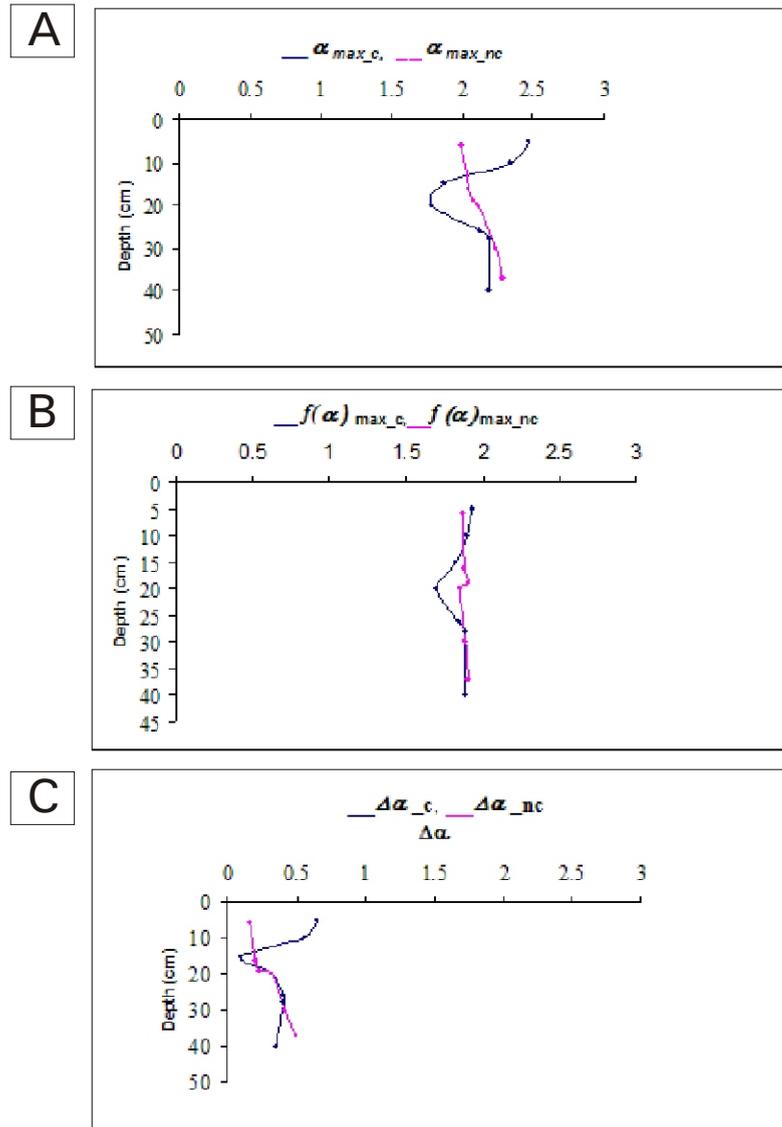


Fig. 39. (a), (b) e (c) demonstra os parâmetros multifractais α_{\max} , $f(\alpha)_{\max}$ e $\Delta\alpha$ são as funções de profundidade. Mostram claramente entre a área cultivada e a não cultivada. Também apresenta uma zona de transição de máxima perturbação entre 10 centímetros e 30 centímetros de profundidade. Depois que os solos atingem o comportamento de normalidade os gráficos dos solos cultivados e não cultivados se sobrepõe.

Todos os dados e parâmetros levantados estão nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Dados obtidos para a matriz do solo “cultivado” e “não cultivado” (mata). Os parâmetros de f , f_{\max} e f_{\min} , mostram a simetria da curva, α é o coeficiente de Holder, o D_0 é a dimensão fractal propriamente dita, D_1 e D_2 são, respectivamente, a dimensão de entropia e a dimensão de correlação.

Tipo	Profundidade	Δf	Δf_{\max}	Δf_{\min}	α_{\max}	α_{\min}	$\Delta\alpha$	$f(0) - f(-1)$	$f(0) - f(1)$	$\alpha(0) - \alpha(-1)$	$\alpha(0) - \alpha(1)$	D_0	D_1	D_2
Cultivado	5 cm	0.06746	0.01812	0.08558	2.10309	1.9313	0.17179	0.085579991	0.00981009	-0.139240026	0.102599978	1.94683	1.93702	1.93377
	10 cm	0.15724	0.01515	0.17239	2.22142	1.94503	0.27639	0.13203001	0.010029912	-0.205440044	0.028599977	1.95897	1.94894	1.94624
	15 cm	0.2595	0.00042	0.25533	2.18964	1.96633	0.22331	0.042320013	-0.000159979	-0.061300039	0.001899958	1.96686	1.96702	1.96852
	20 cm	0.30537	0.00569	0.31106	2.18228	1.99264	0.18964	0.011729956	0.002389908	-0.019109964	0.0057199	1.99734	1.99495	1.99363
	entre 25 a 27 cm	0.09562	0.04476	0.14038	2.14126	1.9549	0.18636	0.039119959	0.010499954	-0.06753993	0.024919987	1.9828	1.9723	1.96647
	entre 27 a 29 cm	0.37015	0.06899	0.43914	2.33012	1.92691	0.40321	0.058840036	0.016950011	-0.102220058	0.03994	1.9709	1.95395	1.94449
	40 cm	0.28524	0.06299	0.34823	2.29221	1.9277	0.36451	0.063189983	0.016080022	-0.108540058	0.038550019	1.96807	1.95199	1.94345
Não Cultivado	entre 0 a 13 cm	0.20666	0.03437	0.24103	2.28215	1.9329	0.34925	0.118350029	0.015319943	-0.190309882	0.039999962	1.96049	1.94517	1.93899
	entre 14 a 18 cm	0.34406	0.03666	0.38072	2.51828	1.89883	0.61945	0.295490026	0.021370053	-0.464829922	0.062440038	1.93119	1.90982	1.90313
	entre 18 a 20 cm	-0.01518	0.05869	0.04351	1.92914	1.87045	0.05869	-	0.022140026	-	0.055960059	1.92914	1.907	1.89719
	inicio dos 20 cm	0.18779	0.05246	0.24025	2.26231	1.92294	0.33937	0.092910051	0.017359972	-0.154320121	0.043219924	1.96015	1.94279	1.93463
	entre 25 a 35 cm	0.06516	0.03048	0.09564	2.11754	1.92971	0.18783	0.074790001	0.012130022	-0.125480056	0.031200051	1.95314	1.94101	1.93581
	entre 35 a 40 cm	0.21869	0.04771	0.2664	2.25637	1.93382	0.32255	0.071910024	0.013859987	-0.116569996	0.033309937	1.96718	1.95332	1.94573

Aplicação da Técnica Multifractal para Caracterização de Manejo de Solo

Analisando a Tabela 1, nota-se que os valores de f são maiores nos solos não cultivados. Portanto, pode-se definir que em relação à matriz do solo, os solos cultivados apresentam um grau de multifractalidade maior, ou seja, o sistema é mais caótico que em sistemas não cultivados. Sendo assim, pode-se dizer que o solo cultivado está em uma constante mudança ao longo de todo o perfil, sendo que o ponto que mais se aproxima os dois é em relação a parte final do perfil, aos 40 cm de profundidade.

Segundo Silva et al. (2004), a densidade do solo é consideravelmente maior em áreas cultivadas do que em áreas de mata nativa. Essa maior densidade em solos cultivados se dá pelo constante tráfego de máquinas e implementos, diminuindo os teores de matéria orgânica e com menor estabilidade da estrutura do solo.

Tabela 2. Dados da porosidade para o solo “cultivado” e “não cultivado” (mata). Os parâmetros de f , f_{\max} e f_{\min} , mostram a simetria da curva, α é o coeficiente de Holder, o D_0 é a dimensão fractal propriamente dita, D_1 e D_2 são a dimensão de entropia e a dimensão de correlação, respectivamente.

Tipo	Profundidade	Δf	Δf_{\max}	Δf_{\min}	α_{\max}	α_{\min}	$\Delta \alpha$	$f(0) - f(-1)$	$f(0) - f(1)$	$\alpha(0) - \alpha(-1)$	$\alpha(0) - \alpha(1)$	D_0	D_1	D_2
Cultivado														
	5 cm	0.133	0.1293	0.2623	2.46889	1.82165	0.64724	0.216950059	0.063210011	-0.399580002	0.158009887	1.9313	1.86809	1.84121
	10 cm	0.06626	0.11491	0.18117	2.34527	1.78708	0.55819	0.134119987	0.074690104	-0.29685998	0.191020012	1.89259	1.8179	1.79648
	15 cm	-0.04737	0.05833	0.01096	1.86993	1.78282	0.08711	0.010959983	0.017779946	-0.026049972	0.035510063	1.82615	1.80837	1.79592
	20 cm	-0.52184	0.53382	0.01198	1.7805	1.45795	0.32255	0.011559963	0.045179963	-0.039790034	0.090970039	1.69492	1.64974	1.61097
	entre 25 a 27 cm	-0.0222	0.18252	0.16032	2.12195	1.72304	0.39891	0.083079934	0.044770002	-0.159730077	0.100570083	1.84178	1.79701	1.76993
	entre 27 a 29 cm	0.05704	0.15062	0.20766	2.18513	1.78706	0.39807	0.083860004	0.037050009	-0.157779932	0.085350037	1.88273	1.84568	1.82469
	40 cm	0.15351	0.06508	0.21859	2.18942	1.83607	0.35335	0.085919976	0.028029919	-0.15534997	0.067459941	1.88858	1.86055	1.8477
Não Cultivado														
	entre 0 a 13 cm	-0.0257	0.05713	0.03143	1.98985	1.82563	0.16422	0.031430006	0.02481997	-0.081140041	0.062409997	1.87112	1.8463	1.83603
	entre 14 a 18 cm	-0.00915	0.04784	0.03869	2.03745	1.83904	0.19841	-	0.024839997	-	0.066300035	1.87953	1.85469	1.84591
	entre 18 a 20 cm	-0.01261	0.06549	0.05288	2.08293	1.84791	0.23502	-	0.028319955	-	0.072809935	1.90001	1.87169	1.85991
	início dos 20 cm	0.02028	0.09312	0.1134	2.10614	1.78056	0.32558	0.095080018	0.03737998	-0.182389975	0.090280056	1.85339	1.81601	1.79867
	entre 25 a 35 cm	0.16184	0.08801	-3.52197	2.23228	1.81828	0.414	0.101890087	0.033689976	-0.189650059	0.081919909	1.88591	1.85222	1.83622
	entre 35 a 40 cm	0.08851	0.20372	0.29223	2.28449	1.79594	0.48855	0.10086	0.036509991	-0.182139993	0.08476007	1.90657	1.87006	1.84883

Da mesma forma, analisando o α , podemos dizer que em relação aos poros a mata tem uma estabilidade maior, pois o grau de multifractalidade do sistema não cultivado é menor que o cultivado, isso quer dizer que o sistema se apresenta mais homogêneo, dando a entender que não há uma grande alteração em poros. Isto se deve ao fato da mata não sofrer ações de manejo pelo homem.

Em experimento realizado por Silva et al. (2004), os valores de macroporos e da porosidade total do solo, foram significativamente menor em solos cultivados em comparação com o solo de mata nativa. A drástica redução da macroporosidade em solos cultivados é decorrente do aumento da compactação do solo, que é evidenciado pelo aumento da densidade do solo, que é causada pelo aumento do uso de implementos e máquinas. Já a microporosidade do solo não foi afetada significativamente, pois a microporosidade é fortemente influenciada pela textura, teor de carbono e muito pouco pelo aumento da densidade do solo.

Observando-se as imagens das lâminas, pode-se notar a ação de maquinário, por apresentar blocos angulosos e uma heterogeneidade maior. Assim também é nítida a compactação do solo, pois a figura que representa os poros quase não apresenta áreas brancas, um início claro de compactação do solo. Como o espectro multifractal tende somente para um lado, quer dizer que a área só tem matriz e poucos poros, comprovando os dados da foto. A homogeneidade maior na parte final do perfil ocorre pois nessa área não há grande ação de maquinários.

Para as áreas não cultivadas o perfil é homogêneo em desde a superfície até a profundidade, não havendo grandes mudanças, isso é representado nos espectros que não sofrem grandes modificações.

Referências

CASTRO, S. S.; COOPER, M.; SANTOS, M. C. dos; TORRADO, P. V. Micromorfologia do solo: Bases e aplicações. In: CURI, N.; MARQUES, J. J.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M. de; LOPES, A. S.; ALVAREZ, V. H. (Org.). **Tópicos em ciência do solo**. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v. 3, p. 107-164.

FRACTAL. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Fractal>> . Acesso em: 10 out. 2008.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relação solo-planta**. São Paulo: Agronômica CERES, 1979.

MANDELBROT, B. B. **The fractal geometry of nature**. New York: W. H. Freeman and Company, 1988. p. 1.

MARQUES, E. S. **O estado da arte da agricultura brasileira**. Rio de Janeiro: MAPA, 2004.

MARTINS, C. **High quality products**. [S. l.]: BNDES, 2004.

OLIVEIRA, J. B. de. **Pedologia aplicada**. 2. ed. Piracicaba: FEALQ, 2005.

POSADAS, A. N. D. et al. **Multifractal characterization of soil particle-size distributions**. [S. l.]: Soil Science Society of America Journal, 2001.

POSADAS, A. N. D. **Introducción a la teoría fractal**. La Papa: International Potato Center, 2002.

POSADAS, A. N. D. **Breve descrição das técnicas multifractal e o método da transformada wavelet módulo máximo (WTMM) geometria fractal**. La Papa: International Potato Center, 2008.

POSADAS, A. N. D. et al. Multifractal characterization of the spatial distribution of ulexite in Bolivian salt flat. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 26, n. 3, p. 615-627, 2005.

SECCO, D. et al. Produtividade de soja e propriedades físicas de um latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, n. 27, p. 797-804, 2004.

SILVA, R. B. et al. Resistência ao cisalhamento de um latossolo sob diferentes uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, n. 28, p. 165-173, 2004.



Embrapa Instrumentação Agropecuária

**Ministério da
Agricultura, Pecuária
e Abastecimento**

