

Estimativa da dimensão fractal de nuvens em imagem de satélites meteorológicos

PAULO RICARDO LAUX¹
ARGENTINO JOSÉ AGUIRRE²

¹Universidade Federal de Santa Maria CCR- DER
Curso de Especialização em Interp. de Imagens Orbitais e Suborbitais
97105 – 900 Santa Maria – RS – Brasil
plaux@conex.com.br

²Universidade Federal de Santa Maria CCR – DER
97105-900 Santa Maria – RS - Brasil
ajaguirr@ccr.ufsm.br

ABSTRACT

This paper refers to estimation of fractal dimension (D) in clouds areas observed at weather satellite images. The values found for different formations were compared to the sample data. The results confirm the adequability of the association of fractal dimension with the atmospheric phenomenon present, giving an auxiliary way in the interpretation of this type of image. Values of “ D ” lower than 1,25 were associated to cumulonimbus, probably with hail; values between 1,25 e 1,45 were associated to intense shower from towering cumulus / cumulonimbus, and values above 1,45 were associated to continuous light rain from stratiform clouds.

Keywords: fractal geometry, meteorological images

1 INTRODUÇÃO

Na geometria clássica, o conceito de dimensão usado é o euclidiano. Existem, contudo, figuras geométricas irregulares que não podem ser caracterizadas por dimensões inteiras. Nesse caso, surge a geometria fractal como uma maneira de analisar quantitativamente essas figuras complexas.

Este trabalho tem como objetivo principal estudar a possibilidade do uso da geometria fractal na discriminação de nuvens em imagens de satélites meteorológicos. Buscou-se implementar um método quantitativo a ser usado paralelamente aos métodos tradicionais de identificação de nuvens.

A pesquisa foi realizada para obtenção de resposta para duas questões básicas: existe diferença de dimensão fractal de nuvens conforme seu tipo e estágio e, caso positivo, existem meios de calcular essa dimensão de maneira suficientemente precisa para discriminar diferentes tipos de nuvens?

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Conceitos de fractal

O termo fractal e o desenvolvimento de uma nova teoria geométrica denominada geometria fractal atribuem-se a Mandelbrot (1991). O autor dá vários exemplos de fractais dizendo que seu significado é intuitivo e aplica-se tanto a figuras geométricas como a objetos naturais.

Para GUZMÁN et al. (1993), fractais são objetos matemáticos originados mediante a iteração infinita de um processo geométrico perfeitamente especificado. Esses processo geométrico elementar, geralmente de natureza muito simples, determina perfeitamente a estrutura final. Devido à repetição infinita ou quase infinita efetuada, tem uma complicação aparente final extraordinária.

Os autores opinam também que os fractais estão inseridos no campo da teoria geométrica de medições, cuja delimitação exata e definitiva está ainda por determinar-se.

2.2 Dimensão euclidiana e dimensão fractal

A dimensão euclidiana é um conceito clássico, porém considera-se conveniente repeti-lo novamente. Explica-se a dimensão euclidiana como sendo uma dimensão na qual os objetos são relacionados ao espaço no qual estão inseridos. Assim, retas e curvas têm dimensão 1; plano, dimensão 2; espaço, dimensão 3 e, por indução, pode ampliar-se sucessivamente até n dimensões. Salienta-se que as dimensões euclidianas são números inteiros.

Conforme GUZMÁN et al.(1993), há vários conceitos matemáticos diferentes que respondem ao nome de dimensão de um conjunto geométrico. Um deles, o de dimensão topológica, faz alusão à configuração espacial dos pontos do conjunto, embora, de alguma forma, tal configuração possa estar relacionada com o tamanho do conjunto, o que essencialmente fornece essa dimensão é a forma de ocupar o espaço que tem o conjunto.

Segundo esse conceito, tanto uma curva diferenciável como uma curva não diferenciável, como a de Koch ou a de Peano (ambas fractais), têm a mesma dimensão topológica 1; um ponto, os pontos racionais da reta real e o conjunto de Cantor (fractal) têm dimensão zero; portanto, a dimensão topológica em algumas circunstâncias não é apropriada para caracterizar figuras ou objetos geométricos fractais, havendo necessidade de introduzir dimensões fracionárias para discriminá-las.

Conforme MANDELBROT (1991), um número útil para caracterizar fractais é a dimensão fractal D . Esse número quantifica o grau de irregularidade ou de fragmentação de um conjunto geométrico, de uma figura ou de um objeto natural e assume, no caso dos objetos da geometria clássica de Euclides, as suas dimensões usuais inteiras.

2.3 A dimensão fractal em meteorologia

A análise da dimensão fractal de fenômenos complexos passou a ser uma ferramenta importante para quantificar o grau de irregularidade de fenômenos artificiais ou naturais.

Na área de meteorologia, LOVEJOY (1982) foi o precursor, aplicando a teoria desenvolvida por Mandelbrot, na determinação da dimensão fractal de perímetro de nuvens, usando imagens obtidas com satélites e radares meteorológicos. As nuvens analisadas tinham áreas variáveis entre 1 e $1,2 \times 10^6 \text{ km}^2$, calculando o valor de dimensão fractal do perímetro de nuvem $D = 1,35 \pm 0,05$.

HENTSCHEL & PROCACCIA (1984) calcularam D do perímetro de nuvens como sendo compreendido entre 1,37 e 1,41. A questão central do estudo era saber como nuvens mudam sua

forma geral com o tempo e se, apesar dessa mudança, ainda conservam uma estrutura fractal universal.

RYS & WALDVOGEL (1986) estudaram a forma fractal de nuvens com granizo. Essas nuvens convectivas intensas foram observadas usando radar. O resultado do ajuste da relação área - perímetro foi:

$$D = 1,36 \pm 0,1 \text{ para } P > P_0$$

$$D = 1,0 \pm 0,1 \text{ para } P < P_0$$

Onde P = perímetro; P_0 corresponde ao valor do perímetro onde a reta resultante do ajuste muda significativamente seu coeficiente angular.

Observa-se que, acima do valor de corte P_0 , o resultado é o mesmo determinado por LOVEJOY, abaixo desse valor de P_0 ; os autores acharam que trovoadas convectivas severas têm perímetros que não são fractais, devido ao valor $D=1$.

CAHALAM & JOSEPH (1989) realizaram um estudo sobre as propriedades fractais de nuvens, sugeriram que a "aproximação de que nuvens são fractais com dimensão $4/3$ precisa ser revisada".

2.4 Métodos de determinação de dimensão fractal D de figuras

MANDELBROT (1983) notou que muitos objetos bastante irregulares na natureza tendem a mostrar a mesma irregularidade em diferentes escalas e, então, poderiam ser caracterizados em uma nova dimensão, a dimensão fractal. Dessa forma deu-se início à teoria dos fractais.

Baseadas nestas constatações, foram desenvolvidas diversas fórmulas matemáticas para calcular a dimensão fractal de figuras ou objetos naturais ou artificiais.

Para medição do comprimento de uma faixa costeira bastante irregular, Mandelbrot (1983), com base nos estudos de Richardson, achou a lei matemática seguinte:

$$L(r) = C \cdot r^{1-D}$$

Onde $L(r)$ = aproximação do comprimento usando-se segmentos de tamanho r ; C = constante e D = dimensão fractal.

Fazendo-se sucessivas medições com r cada vez menores, pode determinar-se D traçando o gráfico $\log L(r)$ x $\log r$. A inclinação do ajuste linear dá o valor de $1-D$. Esse método é chamado de "algoritmo da régua".

MANDELBROT (1983) afirma que curvas no plano são mais fáceis de investigar do que as próprias superfícies, relacionando área e perímetro. Seguindo essa afirmação, LOVEJOY (1982) calculou D de nuvens, aplicando a seguinte fórmula:

$$P = c \sqrt{A^D}$$

Sendo P = perímetro; c = fator geométrico que depende da figura ($c = 4$ para um quadrado, $2(\pi)^{1/2}$ para a circunferência); A = área e D = dimensão fractal.

Essa fórmula fornece, para suaves contornos como círculos, o valor de $D=1$, dimensão de uma linha na geometria euclidiana. Quando o perímetro começa a se contorcer e tende a dobrar-se sobre si, preenchendo o plano, o valor de D aproxima-se do valor 2.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

Para a realização do trabalho foi utilizado o sistema DARTCOM de recepção de imagens meteorológicas, além dos seguintes programas: Adobe Photoshop, e Microsoft Excel 97.

3.2 Métodos

Para atingir o objetivo do presente trabalho, primeiramente determinou-se a dimensão fractal de 5 gabaritos cuja dimensão fractal era conhecida, usando a relação área/perímetro. Os gabaritos foram extraídos do livro "The Fractal Geometric of Nature", de Mandelbrot (1983).

A relação área/perímetro aplicada foi a de Lovejoy (1982), porém utilizada de modo diverso, pois ele calculou a dimensão fractal do perímetro de nuvens com diferentes tamanhos numa dada resolução. No presente trabalho, determinou-se D dos gabaritos e de formações de nuvens, em diferentes resoluções no monitor.

Os gabaritos foram digitalizados inicialmente com uma resolução de 300 dpi, sendo o número de píxeis representativo da área. Aplicou-se depois um filtro de realce de bordas, ficando exclusivamente os píxeis considerados como perímetros do gabarito.

Posteriormente, a resolução da imagem digitalizada dos gabaritos foi diminuída em 20%, determinando-se área e perímetro como no caso anterior. Essa operação foi repetida mais três vezes. Em cada etapa, a diminuição da resolução foi de 20%, obtendo-se cinco valores de áreas e perímetros. Aplicando-se logaritmos, linearizou-se a fórmula de Lovejoy, ajustada pelo método dos mínimos quadrados que permitiu determinar D .

3.3 Escolha de imagens

A escolha das imagens para determinar a dimensão fractal de nuvens foi realizada a partir da análise de boletins meteorológicos de aeródromo (METAR); portanto, conhecendo-se antecipadamente os fenômenos meteorológicos. Houve a possibilidade de verificação "in loco" desses fenômenos por meio de observações feitas a bordo de aeronave.

Usaram-se imagens infravermelho dos satélites de órbita polar NOAA 12 e 14, captadas em formato digital pelo sistema DARTCOM, diretamente dos satélites meteorológicos. Realizou-se preliminarmente uma análise visual das imagens, conforme padrões usualmente aceitos de classificação de nuvens em imagens infravermelho, comparando-as com o METAR para, então, separar uma ou duas janelas, contendo diferentes padrões de nebulosidade, dando prioridade àquelas com nebulosidade cumuliforme.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Determinação de dimensão fractal de gabaritos

Conforme a metodologia adotada, calculou-se a dimensão fractal de cinco gabaritos.

Os valores de D (dimensão fractal) e C (ordenada a origem da reta) dos gabaritos estão na **tabela 1**.

Tabela 1. Resultados de D , C e respectivos desvios-padrão dos gabaritos

Gabarito	D		Desvio padrão	C	Desvio Padrão
	Teórico	Calculado			
1 circunferência	1,00	1,004483	0,00129	0,945557	0,000198
2 curva de Koch	1,26	1,198379	0,003066	0,912996	0,000468
3	1,50	1,421725	0,009708	0,861138	0,001493
4	1,61	1,616192	0,004974	0,705859	0,000770
5	1,66	1,664124	0,0224922	0,660892	0,003831

Apesar das diferenças encontradas, os valores permitiram a diferenciação dos gabaritos com base no valor de D ; portanto, considerou-se que a metodologia empregada é válida para aplicar-se em imagens de nuvens obtidas pelos satélites meteorológicos.

4.2 Determinação de D de nuvens em imagens meteorológicas

Foram determinadas a dimensão fractal de nuvens em 31 imagens meteorológicas de treze dias diferentes, conforme a metodologia apresentada no item 3.2. Em alguns casos, houve necessidade de separar duas formações em uma mesma imagem.

No presente artigo, por razões de espaço, apresentar-se-ão, somente, as análises da imagem do dia 20 de agosto de 1998 (**figura 1**), dando-se ênfase à discriminação dos tipos de nuvens por interpretação visual. O conhecimento antecipado dos fenômenos meteorológicos ocorridos foram fundamentais para a escolha das imagens.

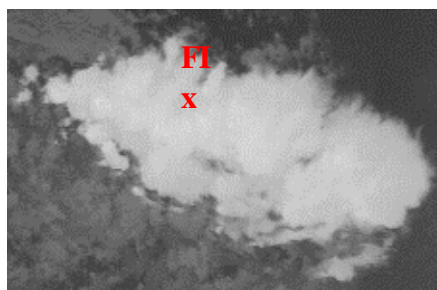


Figura 1: Imagem do dia 20 de agosto - 06:00 GMT (Foz do Iguaçu).

Observando-se na tela do computador a imagem do dia 20 de agosto captada às 06:00 horas (todas as horas são referentes a GMT), viu-se uma formação composta por nuvens cumuliforme. Essa formação mostrou-se significativamente branca, destacando-se dos tons de cinza escuro correspondente à nebulosidade baixa do seu contorno. A verdade terrestre correspondente a essa imagem foi dada pelos METAR de Foz do Iguaçu. A seqüência do fenômeno presente em cada horário do dia 20 de agosto naquela localidade pode ser vista na **tabela 2**.

Tabela 2. Verdades terrestres do dia 20 de agosto

Hora GMT	Fenômeno
08:00	TRV
09:00	TRV
10:00	TRV
11:00	TRV
12:00	TRV
13:00	TRV
14:00	TRV
15:00	CHU
16:00	s/precipitação

Para diferenciar fenômenos meteorológicos usaram-se as seguintes convenções: CHU indica a presença de precipitação somente; TRV indica trovoadas; GRZ indica a ocorrência de granizo; TCU, “Cumulus Congestus”; CB, “Cumulonimbus”; e, Ns, “Nimbostratus”.

Em 20 de agosto, portanto, em Foz de Iguaçu, havia trovoadas das 8:00 até as 14:00 horas, chuvas às 15:00 e nenhuma precipitação a partir das 16:00.

Outra maneira de avaliação do tempo para essa data foi por observação direta no local, a bordo de aeronave em torno das 14:00 horas. Comprovou-se a presença de chuva leve no setor sul da formação, associada a nuvens Ns. Observou-se, também, que, do solo ao topo da camada, havia presença de nebulosidade estratiforme com TCU e Ns embutidos de modo esparsos.

Durante a análise da imagem desse dia, surgiu o problema de checar-se se havia a necessidade do uso de toda a gama de nível de cinza representado no histograma ou apenas de parte dela. Para dirimir essa dúvida, determinou-se o valor de D em toda a gama de nível de cinza disponível.

Observou-se que o valor de D estabilizou-se próximo ao valor de nível de cinza de 200, correspondendo à transição entre tipos de nuvens. Isto significa que existe um intervalo onde D permanece constante quando se faz sua determinação variando os níveis de cinza.

Baseado no exposto anteriormente, tomaram-se quatro valores de níveis de cinza abrangendo o “vale”, observado no histograma da imagem, correspondente a transição entre diferentes camadas. Assim sendo, binarizou-se a imagem a partir dos valores: 200, 195, 190 e 185.

Os valores obtidos para “ D ” e “ C ” juntamente com os respectivos desvios-padrão DP da imagem das 06:00 horas podem ser observados na **tabela 3**.

Tabela 3. Valores de “ D ”, “ C ” e DP da imagem das 06:00 horas do dia 20 de agosto

Nível de cinza	D	DP	C	DP
200	1,274419	0,002212	0,839717	0,000677
195	1,290594	0,009549	0,78266	0,00292
190	1,288731	0,007407	0,7832	0,002266
185	1,270743	0,007746	0,818499	0,002377
Valor médio	1,28112175		0,806019	

A **tabela 3** mostra que, apesar de tomar os níveis de cinza onde o valor de “*D*” permanecia constante no teste realizado, existe uma pequena diferença entre estes valores. Por, essa razão, tomou-se a média como valor de *D*.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conforme a metodologia adotada e com base nos resultados obtidos, conclui-se que: a aplicação dos princípios da geometria fractal fornece subsídios para tornar mais precisa a discriminação de nuvens em imagens de satélites meteorológicos. Portanto, serve como um complemento quantitativo a ser usado paralelamente aos métodos tradicionais de identificação de nuvens por interpretação qualitativa.

Conclui-se, igualmente, que existe diferença de dimensão fractal de nuvens conforme o estágio das mesmas e que o cálculo dessa dimensão, utilizando-se a relação $\log P \times \log A$, permite diferenciar nebulosidade em imagens de satélites meteorológicos de órbita polar.

As adaptações introduzidas na metodologia foram feitas única e exclusivamente para que os cálculos pudessem ser executados com o uso do programa para tratamento de imagens Adobe Photoshop. O teste realizado com figuras de dimensão fractal *D* conhecido demonstrou que a metodologia adotada podia ser aplicada para prosseguimento do trabalho.

O período acompanhado proporcionou fenômenos variados, desde nebulosidade estratiforme com chuva leve e contínua (dias 3 e 7 de setembro no Rio Grande do Sul) até CBs com ocorrência de granizo (dias 11 e 12 de setembro no RS e nos dias 13 de setembro e 4 de outubro, em Santa Catarina) e alternância de TRV e chuvas nos demais dias.

Como contribuição considerada mais importante observou-se que áreas de imagens de satélite meteorológico com valores de dimensão fractal (*D*):

- inferiores a **1,25** estão associados a fenômenos de TRV com possibilidade de ocorrência de granizo;
- entre **1,25** e **1,45** estão associados a chuvas intensas com pancadas provenientes de TCU/CB; e,
- superiores a **1,45** estão associados a chuvas leves e contínuas provocadas por nebulosidade estratiformes.

Salienta-se que os valores encontrados não são absolutos e sim correspondentes ao período observado e determinados com a metodologia especificada.

Recomenda-se analisar um período mais longo para verificação dos resultados obtidos neste trabalho e procurar uma metodologia menos subjetiva para delimitar as nuvens, haja vista sua grande importância na obtenção dos resultados.

6 BIBLIOGRAFIA

BARYSHNIKOVA, Y. S. et al. **Fractal Analysis of the Pre-hurricane Atmosphere from Satellite Data**, in Remote Sensing of Atmosphere and Ocean, Advances in Space Research, Oxford: Pergamon Press, p. 393-404, 1989.

CAHALAN, R.F., JOSEPH, J.H. **Fractal Statics of Clouds Fields**. Montly Weather Review, 117(2), p. 261-272, 1989.

GUZMÁN, M. **Estructuras Fractales y sus Aplicaciones**. Ed. Labor S. A, Barcelona. Espanha. p. 270. 1993.

HENTSCHEL, H.G.E., PROCACCIA, I. **Relative Diffusion in Turbulent media – The Fractal Dimension of Clouds**, Physical Review A, 29, p. 1461-1470, 1984.

LOVEJOY, S. **Area-Perimeter Relation for Rain and Clouds Areas**. Science 216 (9), p. 185-187, 1982.

MANDELBROT, B. **Objectos Fractais**. Lisboa: Gradiva, 1991.

MANDELBROT, B. **The Fractal Geometry of Nature**, New York, 1983.

RYS, F.S., WALDVOGEL, A. **Analysis of the Fractal Schape of severe convective clouds**, Fractals in Physics. Holanda e New York.