



Modelo de distribuição espaço-temporal das chuvas no Nordeste: uma proposta de análise ambiental a partir da teoria de redes complexas

C.N. de Santana¹, J.G.V. Miranda², R.F.S. Andrade² & J.M. Chaves³

1 Aluno do Programa de Pós Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente – PPGM/UEFS.

2 Professor do Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia

3 Professora do PPGM/UEFS.

Abstract This work uses the theory of complex networks in order to develop a new tool for rainfall distribution in Northeast Brazil study. Using time sequence records and geographical location of rainfall stations in that region we generate a set of networks, where the rainfall stations are nodes and the relationships among them are edges. We describe the developed methodology together with preliminary results. Possible associations of our results with those of other branches science are indicated.

Palavras-chave: chuvas, semi-árido, redes complexas, correlação espaço-temporal, sistema de informações geográficas.

INTRODUÇÃO Uma das preocupações atuais e da sociedade do futuro é entender e modelar matematicamente a natureza, para melhor prever os eventos, bem como conservar os recursos naturais, muitos não renováveis.

Na região Nordeste, o clima semi-árido e a baixa pluviometria causam transtornos sociais e ambientais que apontam para a importância de entender o comportamento das chuvas, principalmente por meio de técnicas de modelagem.

Nos últimos anos, diversos conceitos originalmente desenvolvidos dentro da Física Estatística têm sido estendidos e redirecionados para aplicações nas mais diversas áreas de conhecimento, tais como a biologia, a economia e as geociências, conferindo-lhe um caráter fortemente multidisciplinar. Tal aplicação é bastante adequada, na medida em que permite descrever globalmente propriedades de sistemas formados por vários elementos em interação que apresentam um comportamento coletivo complexo.

Dentro desse contexto, nos anos 90, houve o surgimento da área de pesquisa denominada de Sistemas Complexos. Essa área teve seu alicerce na Teoria do Caos e na área dos Fenômenos Não-Lineares, sendo fortemente estimulada, pelo uso de métodos computacionais que se propagaram tão rapidamente nos últimos 20 anos.

No contexto dos sistemas complexos, atualmente a Teoria de Redes Complexas tem se mostrado uma ferramenta adequada para análise de diversos sistemas de grande escala onde seja possível relacionar seus elementos segundo algum critério.

Desenvolvemos uma ferramenta para modelar a variabilidade pluviométrica do nordeste brasileiro segundo critérios de correlação espacial e temporal, por meio da Teoria de Redes Complexas (Barabási & Albért 2002).

Para este trabalho, nos baseamos em um estudo sobre a evolução temporal de abalos sísmicos na Califórnia (Abe & Suzuki 2004) e em um estudo sobre a sequência temporal de atividade cerebral (Eguíluz *et al.* 2005), ambos utilizando modelagem com redes complexas.

Utilizando uma sequência temporal de dados de mais de 200 estações pluviométricas localizadas ao longo do estado da Bahia, construímos redes complexas representativas dos relacionamentos entre essas estações.

Analizamos essas redes e com isso obtivemos informações sobre a topologia da rede de conexões de estações pluviométricas no estado; sobre as relações entre o fenômeno da chuva de diferentes estações do ano; sobre a dinâmica de propagação das chuvas na região.

Este trabalho descreve a metodologia utilizada para a construção e análise das redes representativas da pluviometria do semi-árido nordestino, detalhando o formato dos dados analisados, as estratégias escolhidas para a construção das redes e as ferramentas computacionais utilizadas para a construção e análise dessas redes.

METODOLOGIA Nosso estudo é baseado em séries históricas de precipitações pluviométricas de mais de 200 estações meteorológicas distribuídas no território da Bahia (Fig. 1), obtidas com a Agência Nacional de Águas (ANA) e datadas desde o ano de 1911 até 2002.

Nem todas as estações possuem dados correspondentes ao mesmo período, o que fez necessário identificar o período com maior número de estações com dados simultâneos, chamado de *período ótimo* (Fig. 2), por meio da análise de um histograma que mostra a quantidade de estações com dados pluviométricos em cada intervalo do período total.

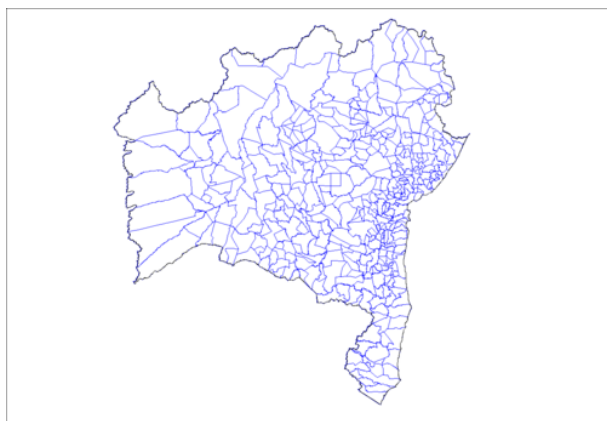


Figura 1. Região das estações pluviométricas analisadas

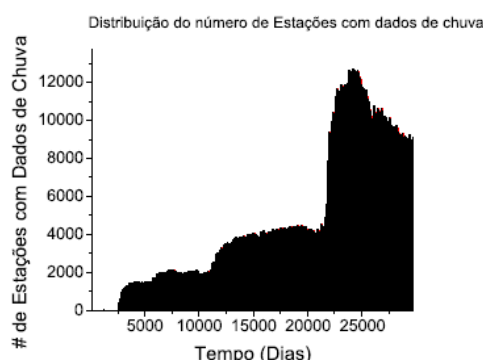


Figura 2. Histograma do número de estações com chuva em cada dia

Com o intuito de simplificar a análise dos dados de chuva, armazenamos os dados de todas as estações em um único arquivo contendo o número total de dias com dados de chuva para todas as estações (N); o código e a cidade de cada estação; a localização geográfica de cada estação; e a sequência de precipitação diária de cada estação para os N dias.

Para construir as redes representativas dos dados de pluviometria do semi-árido, utilizamos a estratégia denominada como *Limitação espacial*.

Considerando que a chuva não é um evento isolado no tempo, não se analisam os dados de precipitação de um dia X isoladamente, mas os dados de um período chamado aqui de *janela temporal*.

É definido um raio temporal T, que representa a quantidade de dias antes e depois de X que formarão essa *janela temporal*. Assim, para construir a rede representativa da precipitação de um dia X, é analisado o intervalo entre o dia (X - T) e o dia (X + T). Variamos o valor do raio temporal T entre 1 e 10, a fim de estudarmos as variações nas diferentes redes construídas.

Consideramos que toda estação onde houve chuva durante a *janela temporal* analisada é um vértice de

nossa rede. Relacionamos duas estações onde houve chuva num mesmo período segundo a distância entre elas, que deve ser no máximo de uma distância $D=150$ km (Miranda 1997). Na rede, representamos essa relação entre duas estações criando arestas conectando os vértices que as representam (Fig. 3). O procedimento é repetido para períodos subsequentes, isto é, variando X, mantendo-se T constante.

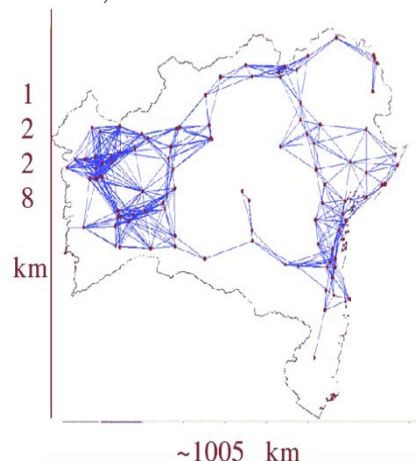


Figura 3. Exemplo de rede de estações pluviométricas

A forma escolhida para a representação matemática das redes é a matriz de adjacências. A representação computacional dessa matriz é o padrão seguido pelo software livre PAJEK, utilizado como software de visualização das redes geradas.

RESULTADOS As redes geradas são analisadas segundo sua topologia e segundo os índices caracterizadores de redes complexas.

Análise topológica Para a análise topológica das redes utiliza-se o software PAJEK, que permite, entre outras coisas, desenhar os vértices das redes segundo a localização geográfica (latitude e longitude) das estações pluviométricas que representam.

As arestas das redes conectam vértices não muito distantes, representando localmente a dinâmica da chuva.

Analisando as diferenças sazonais das redes, verificamos que redes de chuva com grande número de vértices demonstram serem mais comuns no verão e outono do que na primavera. Número de vértices significa o número de estações onde houve chuva no período, logo a disposição dos gráficos mostra que a região sul do nordeste chove em mais localidades no outono e no verão do que no inverno e na primavera (Chaves 1999) (Figs. 4, 5, 6 e 7).

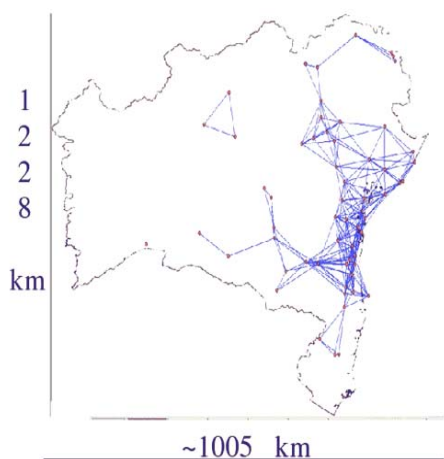


Figura 4. Rede de estações pluviométricas de dados de chuva de inverno

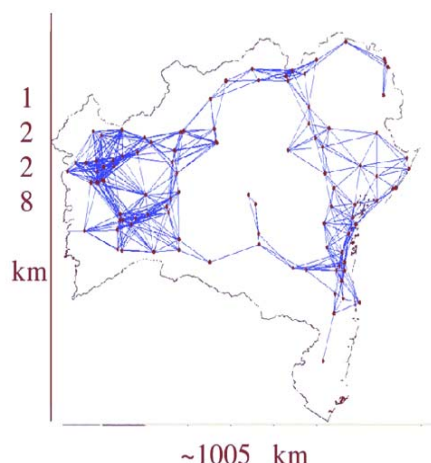


Figura 6. Rede de estações pluviométricas de dados de chuva de verão

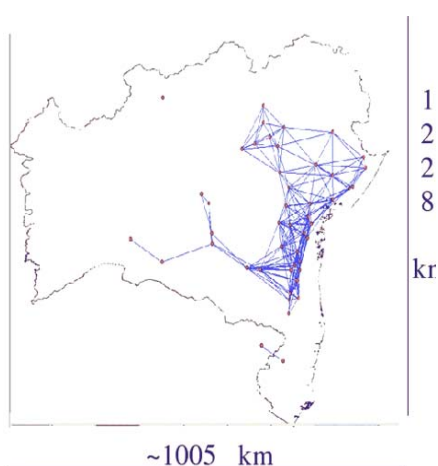


Figura 5. Rede de estações pluviométricas de dados de chuva de primavera

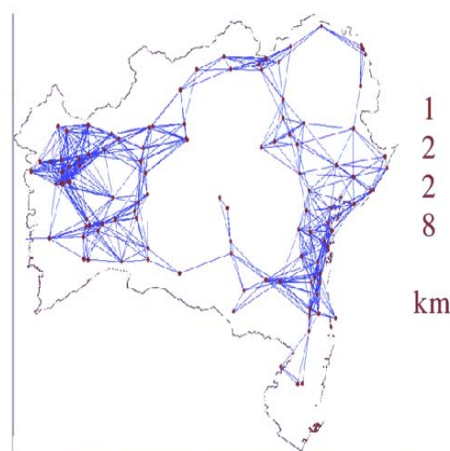


Figura 7. Rede de estações pluviométricas de dados de chuva de outono

As redes relativas aos dados de verão e de outono são mais distribuídas ao longo do mapa da Bahia do que as redes relativas aos dados de inverno e primavera. O que significa que a chuva durante o verão e o outono é mais distribuída territorialmente na Bahia, enquanto no inverno e na primavera a chuva é mais concentrada em algumas localidades, principalmente no litoral (Chaves 1999) (Figs. 4, 5, 6 e 7).

Além disso, os diferentes comportamentos das redes de estações pluviométricas para diferentes períodos do ano refletem os comportamentos climáticos das diferentes áreas da região sul do Nordeste, descritas por Chaves (1999) (Figs. 4, 5, 6 e 7).

Segundo Chaves (1999), as regiões Oeste, central, sudoeste da Bahia apresentam alta similaridade climática e alta variabilidade pluviométrica anual, apresentando ciclo anual bem definido e máximo pluviométrico em dezembro e em março (Chaves 1999) (Fig. 8).

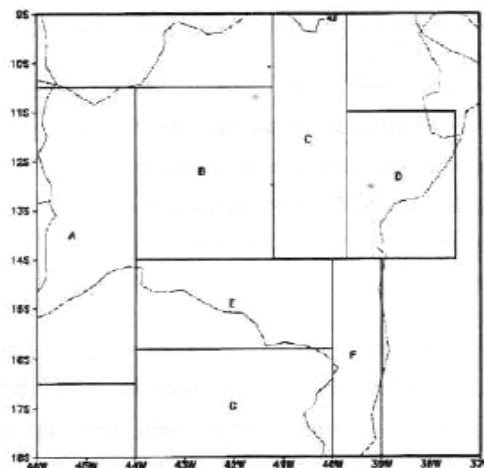


Figura 8. Divisão de áreas do estado por índice pluviométrico (Chaves 1999)

Análise estatística Já a dinâmica de crescimento da rede é analisada mediante a determinação de índices de caracterização: números de vértices, caminho mínimo médio, diâmetro, grau médio, coeficiente de aglomeração (Barabási & Albert 2002).

Analisando estatisticamente as redes, obtiveram-se resultados consoantes com os obtidos com a análise topológica.

Por exemplo, redes com grande número de vértices demonstram serem mais comuns durante o Outono e o Verão do que no Inverno e na Primavera (Fig. 9).

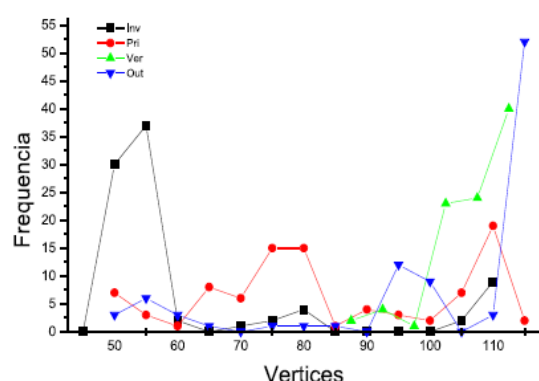


Figura 9. Variação sazonal do número de vértices da rede de estações pluviométricas

O grau médio das redes relativas aos dados de Inverno demonstra ser menor que das redes relativas aos dados de outras estações do ano. O grau médio de uma rede de estações pluviométricas significa o número médio de relações (arestas) de cada estação pluviométrica que compõem essa rede (Fig. 10).

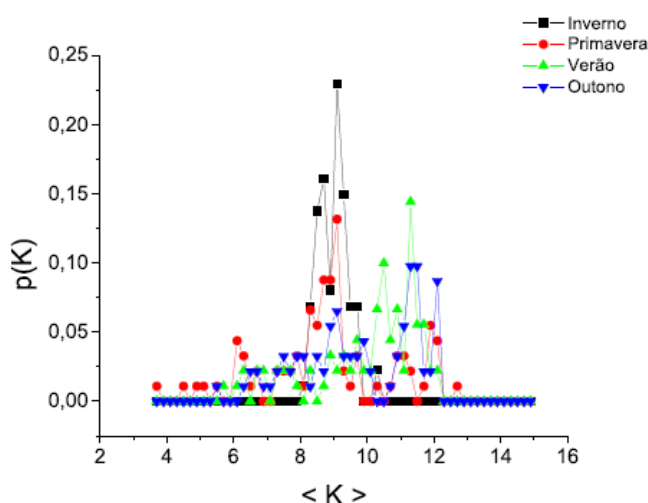


Figura 10. Variação sazonal do grau médio de rede de estações pluviométricas

O caminho mínimo de um vértice de uma rede de estações pluviométricas significa qual a distância (número de arestas) mínima a ser percorrida para chegar desse vértice a qualquer outro vértice da rede. Fazendo a média dos caminhos de todos os vértices da rede é obtido o caminho mínimo médio da rede. Redes com valores altos de caminho mínimo médio demonstram ser mais comuns durante o Outono do que nas outras estações do ano.

O maior caminho mínimo médio de uma rede é chamado de diâmetro. As redes relativas aos dados de Outono têm maior diâmetro que as redes relativas aos dados de outras estações. Entretanto, o diâmetro mais comum das redes das chuvas de Outono é próximo ao diâmetro mais comum das redes das chuvas das outras estações do ano. O diâmetro é a distância máxima a ser percorrida para chegar de qualquer vértice a qualquer outro vértice da rede.

Verificou-se que é possível classificar de qual estação do ano os dados de chuva tratam se for analisada especificamente a relação entre o *Caminho Mínimo Médio* e o *Diâmetro*. As redes relativas aos dados de Verão e Outono têm *Caminho Mínimo Médio* e *Diâmetro* maiores que as redes relativas aos dados de Inverno e Primavera (Fig. 11).

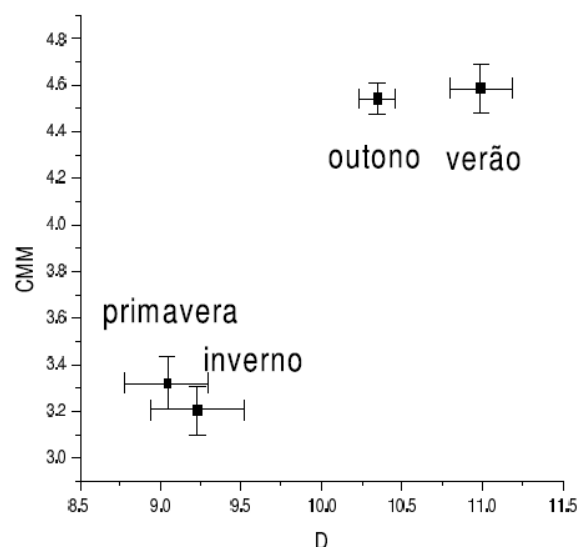


Figura 11. Razão entre caminho mínimo médio (CMM) e diâmetro (D) para sazonalidades diferentes

O *Coeficiente de Aglomeração médio* de uma rede mede a quão completa ela é. Nas redes geradas a partir de dados de chuva de Outono o *coeficiente de aglomeração médio* demonstra ser maior que nas redes das chuvas de outras estações do ano (Fig. 12). Para o tratamento dos dados de precipitação e para a construção e análise das redes representativas das estações pluviométricas, foram implementados programas computacionais na linguagem C++ (Fig. 13).

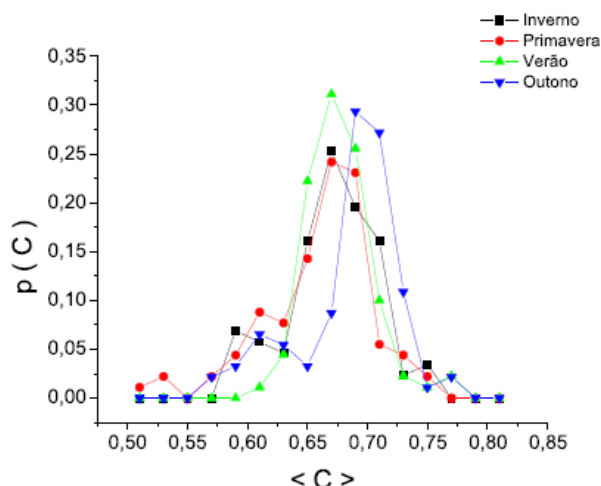


Figura 12. Variação sazonal do coeficiente de aglomeração médio de rede de estações pluviométricas

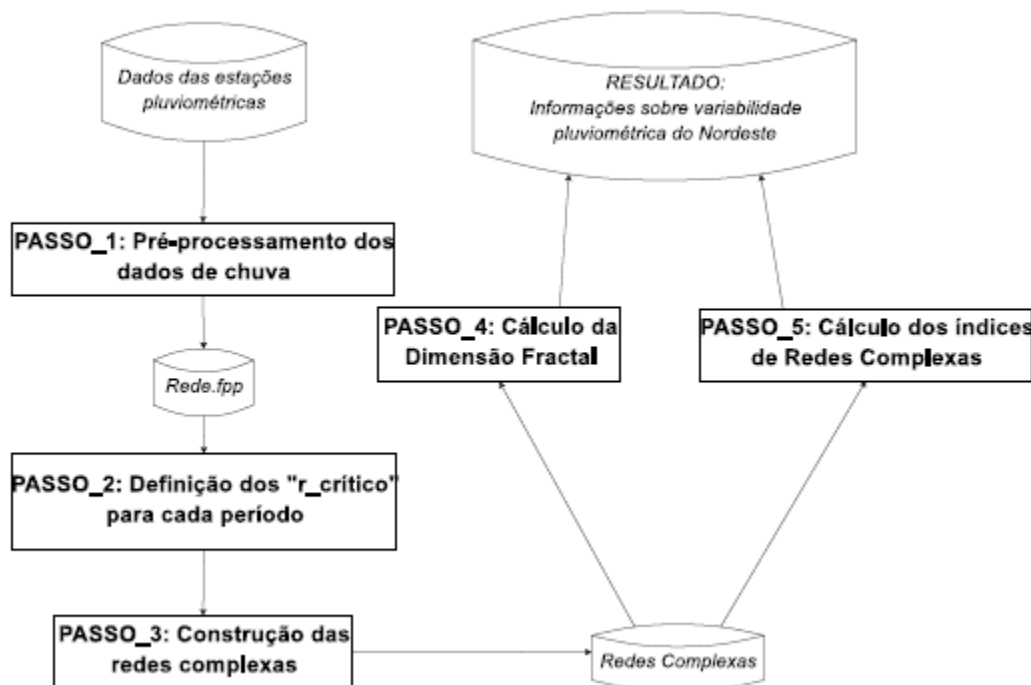


Figura 13. Fluxograma dos programas de construção e análise das redes de estações pluviométricas

CONCLUSÃO Os resultados das análises estatística e topológica das redes de estações pluviométricas estavam de acordo com resultados de trabalhos anteriores de climatologia. O que trabalhos, como o de Chaves (1999), demonstram por meio das geociências e da estatística, nosso trabalho demonstrou por intermédio da Teoria dos Grafos, e de algoritmos computacionais.

Por meio da análise topológica, comprovamos a existência de diferentes padrões de variabilidade pluviométrica de acordo com a variação espacial (o comportamento das 7 regiões climáticas da região sul do Nordeste) e com a variação temporal (os diferentes comportamentos para diferentes estações do ano).

Por intermédio da análise estatística, conseguimos identificar diferentes estações do ano por meio dos padrões de caminho mínimo e de diâmetro. Ficou caracterizado que o verão e o outono têm caminho mínimo e diâmetro maiores que o inverno e a primavera, o que está diretamente relacionado com a distribuição das chuvas nessas estações do ano.

Essas respostas apontam para a coerência da modelagem de dados pluviométricos por intermédio da Teoria de Redes Complexas. Uma nova ferramenta para estudos ambientais do ponto de vista das geotecnologias.



Referências

- ABE S. & SUZUKI N. 2004. Scale-free network of earthquakes. *Europhysics Letters*, 65(4):581-586.
- BARABÁSI A.-L. & ALBÉRT R. 2002. Statistical mechanics of complex network. *Reviews of Modern Physics*, **74**:47-85,
- CHAVES R.R.. 1999. *Variabilidade da precipitação na região sul do Nordeste e sua associação com padrões atmosféricos*. Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- EGUÍLUZ V. *et al.* 2005. Scale-free brain functional networks. *Physical Review Letters*, **94**.
- MIRANDA J.G.V. 1997. Análise Fractal de Reescalamento temporal para chuvas. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- MIRANDA J.G.V & ANDRADE R.F.S. 2001. R/s analysis of pluviometric records: comparison with numerical experiments. *Physica A*, **295**:38-41.
- MIRANDA J.G.V. *et al.* 2004. Temporal and spatial persistence in rainfall records from northeast Brazil and Galicia (Spain). *Theory and Application Climatology*, **77**(1):113-121.