

LEANDRO RICARDO RODRIGUES DE LUCENA

ANÁLISE DE LACUNARIDADE DE FENÔMENOS AGROAMBIENTAIS

RECIFE – PE – AGOSTO/2015



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA

ANÁLISE DE LACUNARIDADE DE FENÔMENOS AGROAMBIENTAIS

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Biometria e Estatística Aplicada como exigência parcial à obtenção do título de Doutor.

Orientadora: Prof^ª Dra. Tatijana Stosic

RECIFE – PE – AGOSTO/2015

Ficha catalográfica

L935a Lucena, Leandro Ricardo Rodrigues de
Análise de lacunaridade de fenômenos agroambientais /
Leandro Ricardo Rodrigues de Lucena. -- 2015.
103 f.: il.

Orientador: Tatijana Stosic.
Tese (Doutorado em Biometria e Estatística Aplicada) –
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento
de Informática e Estatística, Recife, 2015.
Inclui referências e apêndice(s).

1. Lacunaridade 2. Fractal 3. Fenômenos climáticos
I. Stosic, Tatijana, orientador II. Título

CDD 574.018

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

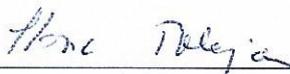
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA

ANÁLISE DE LACUNARIDADE DE FENÔMENOS AGROAMBIENTAIS

Leandro Ricardo Rodrigues de Lucena

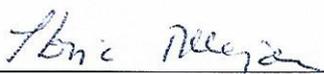
Tese julgada adequada para obtenção do título de doutor em Biometria e Estatística Aplicada, defendida e aprovada por unanimidade em 05/08/2015 pela Comissão Examinadora.

Orientador:

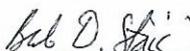


Profª Dra. Tatijana Sotsic
Universidade Federal Rural de Pernambuco

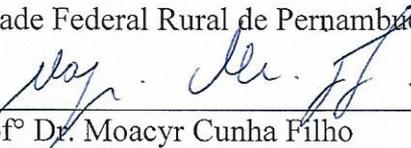
Banca Examinadora:



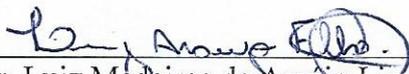
Profª Dra. Tatijana Sotsic
Universidade Federal Rural de Pernambuco



Profº Dr. Borko Stosic
Universidade Federal Rural de Pernambuco



Profº Dr. Moacyr Cunha Filho
Universidade Federal Rural de Pernambuco



Profº Dr. Luiz Medeiros de Araújo Lima Filho
Universidade Federal da Paraíba



Profº Dr. Lucian Bogdan Bejan
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dedicatória

Dedico esta tese aos meus pais, Valdenício Ricardo de Lucena e Edvane Rodrigues de Lucena, pelo amor, apoio e confiança incondicionais. A minha mulher Karina Magalhães Parente de Lucena e ao meu filho Leonardo Parente de Lucena pelo amor e companheirismo. As minhas irmãs Lidiane e Leandra por estarem sempre presentes em minha vida. Aos demais familiares que de uma forma ou de outra contribuíram para a conclusão desta tese, em especial a minha tia Maria Sueli de Lucena. Aos meus avós maternos Edson de Melo Romão e Sirlene Rodrigues Romão e paternos Valdenício Quintino de Lucena e Socorro de Lucena *in memoriam*.

Agradecimentos

Agradecer a todos que ajudaram a construir esta tese que não é tarefa fácil. O maior perigo que se coloca para o agradecimento seletivo não é decidir quem incluir, mas decidir quem não mencionar.

Meu maior agradecimento é dirigido a meus pais, por terem sido o contínuo apoio em todos estes anos, ensinando-me, principalmente, a importância da construção e coerência de meus próprios valores.

A minha mulher, pois nesta trajetória, soube compreender, como ninguém, a fase pela qual eu estava passando.

Agradeço as minhas irmãs pela confiança que sempre depositaram em mim. Aos meus amigos que, de uma forma ou de outra, contribuíram com sua amizade e com sugestões efetivas para a realização deste trabalho, gostaria de expressar minha profunda gratidão.

Agradeço à professora Tatijana Stosic a consideração de ter aceitado a orientação de minha tese cujo conhecimento e disponibilidade foram fundamentais para que este trabalho fosse efetuado com sucesso. Espero retribuir, com a seriedade de meu trabalho, a confiança em mim depositada.

Agradeço a todos os meus outros familiares por sempre estarem ao meu lado e em especial a minha tia Maria Sueli de Lucena por sempre acreditar em mim.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pela bolsa concedida durante os dois primeiros anos do curso.

Agradeço *in memoriam* aos meus avós por ter a certeza que eles intercedem por mim e são partes responsáveis por mais essa conquista.

“Nem tudo que se enfrenta pode ser
modificado, mas nada pode ser
modificado até que seja enfrentado.”

Albert Einstein

Resumo

Os fenômenos estudados em ciências agrárias e ambientais além da própria evolução são fortemente influenciados pela atividade humana e caracterizam-se pelo grande número de componentes interagindo de forma não linear em uma escala e produzindo as propriedades emergentes em outras escalas. Com essas características os fenômenos agroambientais considerados sistemas complexos e estudados utilizando vários conceitos desenvolvidos durante as últimas décadas entre os quais: fractais, multifractais, criticalidade auto-organizada e entropias. Neste trabalho analisou-se a dinâmica temporal das variáveis climáticas: precipitação, temperatura e vazão do rio e a distribuição espacial de focos de queimadas. Foi utilizado o método de lacunaridade, que serve para avaliar a distribuição de lacunas em um conjunto de dados. Utilizando os valores de lacunaridade para diferentes escalas temporais foi possível descrever o regime da chuva (fragmentação dos períodos chuvosos) e classificar dois padrões de precipitação no estado de Sergipe, um padrão formado pelas estações que se aproximam da costa sergipana e outro das estações que se localizam nas regiões do semiárido e agreste. A análise de lacunaridade mostrou-se útil para avaliação do impacto da atividade humana no regime natural da vazão do rio, no caso dos rios Atibaia e Jaguari a construção dos reservatórios do sistema Cantareira. Depois da construção dos reservatórios os valores da lacunaridade diminuíram em relação ao período antes da construção dos reservatórios indicando a diminuição de heterogeneidade da dinâmica da vazão devido à regulação do fluxo hídrico. Os resultados da análise de lacunaridade de séries temporais de temperatura e de precipitação do estado de Pernambuco demonstraram que este método pode ser usado para identificar as regiões geográficas com comportamento temporal característico das variáveis climáticas. A análise de lacunaridade para dados bidimensionais foi aplicada na distribuição espacial de focos de queimadas detectadas na Amazônia legal durante o período 2000-2013. Nos anos com maior número de queimadas os valores de lacunaridade indicaram uma distribuição espacial mais homogênea comparando com períodos com menor número das queimadas. O método de lacunaridade (avaliando a heterogeneidade da distribuição espacial de queimadas) também mostrou se eficaz em identificação das estações seca e chuvosa. Estes resultados podem ser úteis em planejamento do uso de recursos hídricos, em planejamento das atividades agrícolas, desenvolvimento de estratégias para diminuir

as consequências de fenômenos climáticos extremos (seca, cheia) e desastres naturais como incêndios florestais.

Palavras – chave: Fractal, Lacunaridade, Precipitação, Queimadas, Temperatura.

Abstract

The phenomena studied in agricultural and environmental sciences are characterized by their natural evolution and are also affected by human activity. They are comprised of a large number of components with non linear interactions on some scales, which produce emergent properties on other scales. These are characteristics of complex systems and can be studied using various concepts developed over the last decades such as fractals, multifractals, self-organized criticality and entropy. In this paper we analyzed the temporal dynamics of climate variables rainfall, temperature and stream flow, and spatial distribution of vegetation fires represented by hot pixels detected by satellites. We used the method of lacunarity that serves to describe the distribution of gaps in a data set. Using lacunarity values for different time scales it was possible to describe the rainfall regime (fragmentation of rainy periods) and classify two precipitation patterns in the state of Sergipe, one formed by stations approaching the Sergipe coast, and other formed by stations that are located in semiarid region. The lacunarity analysis was successful for evaluation of impact of human activity on natural regime of river flow, in the case of rivers Atibaia and Jaguari, caused by the construction of Cantareira system reservoirs. After the construction of the reservoirs lacunarity values of stream flow decreased, indicating a reduction of heterogeneity of flow dynamics due to regulation of water flow. The results of lacunarity analysis of time series of temperature and precipitation in the state of Pernambuco showed that this method can be used to identify the geographic regions with characteristic temporal behavior of climatic variables. The lacunarity analysis for two-dimensional data was applied to spatial distribution of hot pixels detected in Amazonia during the period 2000-2013. In the years with high number of hot pixels the lacunarity values were lower, indicating a more homogeneous spatial distribution compared with periods with low number of hot pixels. The lacunarity method has also shown to be effective in identifying the dry and rainy seasons, by capturing the heterogeneity of spatial distribution of hot pixels. These results may be useful in planning the use of water resources, planning of agricultural activities, developing strategies to reduce the impact of extreme weather events (drought, flood) and natural disasters such as forest fires.

Keywords: Lacunarity, Fractal, Rainfall, Hot pixel, Temperature.

Lista de Figuras

Figura 1. Distribuição espacial das estações meteorológicas do estado de Sergipe.....	20
Figura 2. Distribuição geográfica das principais cidades da bacia do rio Piracicaba.	22
Figura 3. Distribuição espacial das estações meteorológicas do estado de Pernambuco.	24
Figura 4. Área de avaliação dos focos de calor.	25
Figura 5. Série anual da detecção de queimadas por satélite.	26
Figura 6. Conjunto de Cantor.	27
Figura 7. Triângulo de Sierpinski.	27
Figura 8. Esponja de Menger.....	28
Figura 9. Feto e respectivas réplicas observadas numa determinada árvore.....	28
Figura 10. Couve-flor e réplicas observadas numa porção da mesma.....	29
Figura 11. Aplicação do método <i>box-counting</i> na linha costeira da Inglaterra.....	30
Figura 12. Exemplo de lacunaridade para três objetos fractais, com mesma dimensão fractal $D = (\log(32))/(\log(8)) = 1,667$ (adaptado de [43])......	31
Figura 13. Registro de precipitação de uma determinada estação meteorológica hipotética nos 50 dias consecutivos.	34
Figura 14. Mapa aleatório 12 x 12, com 1's representando a ocupação da célula.	36
Figura 15. Lacunaridade empírica para tamanhos de janelas de 2, 64 e 256 dias com limiar de precipitação 0 mm.	47
Figura 16. Lacunaridade empírica para tamanhos de janelas de 2, 64 e 256 dias com limiar de precipitação 5 mm.	47
Figura 17. Lacunaridade empírica para tamanhos de janelas de 2, 64 e 256 dias com limiar de precipitação 10 mm.	47
Figura 18. Valores do expoente β de lacunaridade das estações meteorológicas para os limiares de 0 mm, 5 mm e 10 mm de precipitação.	48
Figura 19. Agrupamento das estações meteorológicas em relação aos valores de lacunaridade para limiares de precipitação de (a - 0 mm; b - 5 e 10 mm).	48
Figura 20. Lacunaridade empírica para tamanho de janela 2, 64 e 256 dias, respectivamente com limiar de 1 mm de precipitação.....	54

Figura 21. Lacunaridade empírica para tamanho de janela 2, 64 e 256 dias, respectivamente com limiar de 5 mm de precipitação.....	55
Figura 22. Lacunaridade empírica para tamanho de janela 2, 64 e 256 dias, respectivamente com limiar de 10 mm de precipitação.....	55
Figura 23. Expoente β de lacunaridade para os limiares de 1mm, 5mm e 10mm de precipitação, respectivamente.....	56
Figura 24. Dendograma (utilizando os valores da lacunaridade para janelas 2, 64 e expoente β de lacunaridade) em relação às estações meteorológicas (1- Recife, 2- Arcoverde, 3- Caruaru, 4- Garanhuns, 5- Surubim, 6- Floresta, 7- Ibimirim, 8- Serra Talhada, 9- Cabrobó).	57
Figura 25. Lacunaridade empírica para tamanho de janela 2 e 64 dias, respectivamente com limiar de 27° C.	58
Figura 26. Lacunaridade empírica para tamanho de janela 2 e 64 dias, respectivamente com limiar de 32° C.	58
Figura 27. Expoente β de lacunaridade para os limiares de 27° C e 32° C, respectivamente.	58
Figura 28. Dendograma (utilizando os valores da lacunaridade para janelas 2, 64 e expoente β de lacunaridade) em relação às estações meteorológicas (1- Recife, 2- Arcoverde, 3- Caruaru, 4- Garanhuns, 5- Surubim, 6- Floresta, 7- Ibimirim, 8- Serra Talhada, 9- Cabrobó).	59
Figura 29. Lacunaridade empírica de focos de calor nas estações de chuva e seca no ano de 2000.	62
Figura 30. Lacunaridade empírica de focos de calor nas estações de chuva e seca no ano de 2001.	62
Figura 31. Lacunaridade empírica de focos de calor nas estações de chuva e seca no ano de 2002.	63
Figura 32. Lacunaridade empírica de focos de calor nas estações de chuva e seca no ano de 2003.	63
Figura 33. Lacunaridade empírica de focos de calor nas estações de chuva e seca no ano de 2004.	63
Figura 34. Lacunaridade empírica de focos de calor nas estações de chuva e seca no ano de 2005.	63

Figura 35. Lacunaridade empírica de focos de calor nas estações de chuva e seca no ano de 2006.	63
Figura 36. Lacunaridade empírica de focos de calor nas estações de chuva e seca no ano de 2007.	63
Figura 37. Lacunaridade empírica de focos de calor nas estações de chuva e seca no ano de 2008.	64
Figura 38. Lacunaridade empírica de focos de calor nas estações de chuva e seca no ano de 2009.	64
Figura 39. Lacunaridade empírica de focos de calor nas estações de chuva e seca no ano de 2010.	64
Figura 40. Lacunaridade empírica de focos de calor nas estações de chuva e seca no ano de 2011.	64
Figura 41. Lacunaridade empírica de focos de calor nas estações de chuva e seca no ano de 2012.	64
Figura 42. Lacunaridade empírica de focos de calor nas estações de chuva e seca no ano de 2013.	64
Figura 43. Agrupamento dos valores de lacunaridade para estações secas e chuvosas dos anos estudados.	65

Lista de Tabelas

Tabela 1. Descrição das estações meteorológicas do estado de Sergipe.	21
Tabela 2. Características das estações 3D-006 e 3D-009 referentes a latitude, longitude e área de drenagem.	23
Tabela 3. Descrição das estações utilizadas do estado de Pernambuco.....	24
Tabela 4. Cálculo da lacunaridade para caixa de tamanho 2 dos 50 registros consecutivos de precipitação de uma estação meteorológica hipotética.....	34
Tabela 5. Cálculo da lacunaridade para caixa de tamanho 2 do mapa aleatório apresentada na Figura 14.....	36
Tabela 6. Medidas descritivas de precipitação diária das estações no estado de Sergipe.	46
Tabela 7. Medidas descritivas das estações hidrológicas dos rios Atibaia e Jaguari em relação aos anos estudados.....	49
Tabela 8. Limiares de vazão das estações 3D-006 e 3D-009 dos rios Atibaia e Jaguari em relação aos períodos estudados.	50
Tabela 9. Valores de lacunaridade para diferentes tamanhos de janela e expoente β de lacunaridade para estação 3D-006 entre o período de 1930 – 1997.	51
Tabela 10. Valores de lacunaridade para diferentes tamanhos de janela e expoente β para estação 3D-006 do rio Atibaia entre o período de 1962 – 1997.	51
Tabela 11. Valores de lacunaridade para diferentes tamanhos de janela e expoente β para estação 3D-009 do rio Jaguari entre o período de 1931 – 1998.....	52
Tabela 12. Valores de lacunaridade para diferentes tamanhos de janela e expoente β para estação 3D-009 do rio Jaguari entre o período de 1966 – 1998.....	52
Tabela 13. Estatística descritiva da precipitação diária das estações do estado de Pernambuco utilizadas.	53
Tabela 14. Estatística descritiva da temperatura das estações do estado de Pernambuco utilizadas.....	53
Tabela 15. Medidas descritivas dos focos diários de queimadas na Amazônia Legal em relação aos anos avaliados.....	60
Tabela 16. Valores de lacunaridade para diferentes tamanhos de caixas nos anos de 2000 a 2013.	60

Tabela 17. Valores de lacunaridade para diferentes tamanhos de caixas na estação chuvosa (janeiro-junho) nos anos de 2000 a 2013.....	61
Tabela 18. Valores de lacunaridade para diferentes tamanhos de caixas na estação seca (julho-dezembro) nos anos de 2000 a 2013.....	62

Sumário

1. INTRODUÇÃO	15
2. MATERIAL E MÉTODOS	19
2.1 DADOS	19
2.1.1 PRECIPITAÇÃO DO ESTADO DE SERGIPE	19
2.1.2 VAZÃO DOS RIOS ATIBAIA E JAGUARI	21
2.1.3 PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA NO ESTADO DE PERNAMBUCO	23
2.1.4 FOCOS DE QUEIMADAS NA AMAZÔNIA LEGAL	24
2.2 FRACTAIS	26
2.2.1 DIMENSÃO FRACTAL	29
2.3 LACUNARIDADE	31
2.4 ANÁLISES DE COVARIÂNCIA (ANCOVA)	37
2.5 ANÁLISES DE AGRUPAMENTO	39
2.5.1 AGRUPAMENTO HIERÁRQUICO	39
2.5.2 AGRUPAMENTO NÃO HIERÁRQUICO	41
2.6 SOFTWARES UTILIZADOS	45
3. RESULTADOS	45
3.1 PRECIPITAÇÃO DO ESTADO DE SERGIPE	45
3.2 VAZÃO DOS RIOS ATIBAIA E JAGUARI	49
3.3 PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA NO ESTADO DE PERNAMBUCO	53
3.4 FOCOS DE QUEIMADAS NA AMAZÔNIA LEGAL	59
4. CONCLUSÃO	66
REFERÊNCIAS	68
ANEXO	77

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas a complexidade dos fenômenos estudados em ciências agrárias e ambientais está aumentando por fato que além da própria evolução, os sistemas naturais são fortemente influenciados pela atividade humana. Isto pode causar alterações em várias componentes do meio ambiente como clima, cobertura e uso de solo, distribuição das espécies de fauna e flora, emissão de gases de estufa, vazão e qualidade da água dos rios, salinidade de oceanos e cobertura de gelo nas regiões polares.

Estas alterações são cada vez mais rápidas e como consequências mais sérias e menos previsíveis, devido ao grande número de componentes interagindo de forma não linear em uma escala e produzindo as propriedades emergentes em outras escalas. Estas propriedades não existem nos componentes individuais do sistema e são difíceis de prever a partir deles.

Os sistemas complexos apresentam auto-organização e possuem diferentes níveis hierárquicos. Vários conceitos e métodos foram desenvolvidos nas últimas décadas para estudar os sistemas complexos: fractais, multifractais, redes complexas, criticalidade auto-organizada, dinâmica não linear, autômatos celulares, modelos baseados em agentes, teoria de informação [1-4]. Estes conceitos aplicam-se em fenômenos naturais e sociais, cuja interação é característica dos sistemas agroambientais. Os métodos de análise e modelagem dos sistemas complexos podem providenciar novos conhecimentos e melhor entendimento da relação homem-natureza, formando uma base científica para garantir o desenvolvimento sustentável.

De acordo com o Comitê de Pesquisas Ambientais da Fundação Nacional de Ciências dos Estados Unidos (*NSF Advisory Committee for Environmental Research and Education*) [5], entre os desafios das ciências ambientais nas primeiras décadas do século 21 estão: alterações em recursos hídricos, fragmentação de paisagem, propagação de patógenos, biodiversidade, mudanças climáticas, ciclos biogeoquímicos, criação de novas tecnologias e práticas para proteção e melhoramento do meio ambiente e

diminuição de consequências de desastres naturais como seca, cheia e incêndios florestais.

Com o intuito de contribuir a enfrentar esses desafios, neste trabalho avaliamos os métodos de análise de sistemas complexos, particularmente o método de lacunaridade que pode fornecer as informações úteis sobre comportamento temporal e espacial de alguns fenômenos que são de interesse de pesquisas agroambientais no Brasil: recursos hídricos, variabilidade climática e incêndios em vegetação.

A conservação dos recursos hídricos é considerada um dos problemas mais importantes para desenvolvimento sustentável de uma região. As políticas públicas eficientes para proteção destes recursos podem ser estabelecidas baseando-se nos conhecimentos da dinâmica natural e alterações causadas pelos fatores antrópicos. Este conhecimento sobre os processos estocásticos que geram dados hidrológicos (precipitação e vazão do rio) são necessários para desenvolvimento e avaliação de métodos matemáticos e computacionais que possam servir para análise dos problemas atuais e nos cenários futuros.

O estudo do tempo e do clima ocupa uma posição central e é um dos mais importantes nas ciências ambientais. Os processos atmosféricos influenciam todas as partes do ambiente, afetando diversas áreas como: agricultura [6], atividade marítima [7] e prevenção de incêndios florestais [8]. O planejamento de atividades como a agricultura, produção de energia renovável e manejo de recursos hídricos levam à necessidade de se ter previsões confiáveis das condições de tempo e clima. No Brasil, nas regiões Sul e no Nordeste onde existe um forte acoplamento entre variabilidade climática e a temperatura da superfície do mar dos oceanos tropicais, a previsibilidade climática é mais eficiente do que em outras regiões, como o sudeste do Brasil [9].

A precipitação pluviométrica tem grande importância na caracterização do clima de uma região, interferindo nas alternâncias de rendimento das culturas [10]. O comportamento das precipitações é de extremo interesse para o dimensionamento de canais, galerias pluviais, bueiros e barragens de abastecimento de água, e para o planejamento agrícola e dimensionamento de sistema de irrigação complementar [11].

As mudanças climáticas podem ser causadas por fatores externos tais como: mudanças dos parâmetros orbitais da Terra, intensidade de radiação solar, taxa de rotação da Terra, composição da atmosfera, partículas de erupções vulcânicas, ou ações antrópicas principalmente devido à emissão de gases do efeito estufa [12]. Os índices das mudanças climáticas estabelecidos por organizações são temas internacionais como: *World Meteorological Organization Commission for Climatology (CCI)*, *World Climate Research Programme (WCRP) project on Climate Variability and Predictability (CLIVAR)* e *Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices (ETCCDMI)*, são baseados nos registros diários da temperatura e da precipitação [13].

Incêndios em vegetação ocorrem como eventos naturais ou como resultado da atividade antrópica, e cada ano aumentam em número e em área queimada, causando a degradação do meio ambiente como: erosão de solo, destruição de cobertura vegetal, perda da biodiversidade e alterações em ciclos hidrológicos [14-17]. Durante um incêndio também ocorre a emissão do carbono e gases estufa, que contribuem ao aquecimento global deixando um grande impacto nas mudanças climáticas [18,19].

Vários fatores, naturais e antrópicos, incluindo cobertura vegetal, condições climáticas, topografia e métodos de proteção de fogo, afetam a iniciação, propagação e supressão de incêndios, tornando a modelagem deste fenômeno uma tarefa extremamente difícil e complexa. Por outro lado, existe um esforço crescente para desenvolver modelos teóricos e computacionais que descrevam o comportamento do fogo, que é crucial para entender e modelar os fenômenos relacionados em ecossistemas diferentes, e estabelecer novos métodos mais eficientes de manejo de recursos ambientais, do solo e agricultura [20].

Os registros históricos de incêndios em vegetação (tempo de começo e área queimada) existem para alguns países como U.S.A, Canadá, Itália e Espanha, porém para a maioria dos países em desenvolvimento incluindo Brasil, estes dados não são disponíveis, e a informação completa global histórica dos incêndios ainda não existe [21].

Recentemente vários bancos de dados sobre incêndios foram construídos utilizando as imagens produzidas por sensores de satélites [21-24]. Análise destas

imagens mostram focos de calor (*hot pixels*) que possuem a intensidade infravermelha correspondente à vegetação queimada. Apesar do fato de que todos os incêndios não podem ser detectados pelos satélites, focos de calor são considerados bons representantes dos incêndios ativos e podem ser usados como *proxy* para estudar a variabilidade temporal e espacial dos incêndios e a relação com os fatores climáticos e antrópicos [25,26].

No Brasil, a maioria dos incêndios em vegetação (queimadas) são causados pelo homem como: limpeza de pastos, preparo de plantios, desmatamentos e colheita manual de cana de açúcar. Com mais de 300.000 queimadas com emissão de gases e milhões de km² de área queimada detectada por ano, o Brasil ocupa um lugar de destaque em quantidade de poluição e deterioração de recursos naturais. Por isso o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE, vem desenvolvendo desde a década de 1980, um sistema operacional de detecção de queimadas, pioneiro e um dos mais completos do mundo. Os dados são obtidos nas imagens térmicas de vários satélites, e em seguida integrados a um sistema geográfico de informações e disponibilizado pela Internet [27].

O objetivo deste trabalho é avaliar se o método de lacunaridade pode providenciar os novos conhecimentos, sobre problemas atuais e cenários futuros e assim contribuir um melhor entendimento dos fenômenos estudados em ciências agrárias e ambientais.

Os objetivos específicos são:

Avaliar se o método de lacunaridade pode detectar alterações hidrológicas causadas pela atividade humana. O caso estudado é o regime hidrológico na bacia do rio Piracicaba antes e depois da construção do sistema Cantareira.

Avaliar se o método de lacunaridade pode detectar fragmentação dos períodos chuvosos e identificar as regiões geográficas com diferente comportamento climático. Os casos estudados são o regime pluviométrico do estado de Sergipe e precipitação e temperatura do estado de Pernambuco.

Avaliar se o método de lacunaridade pode detectar fragmentação espacial das áreas afetadas pelos incêndios florestais. Caso estudado são queimadas registradas na Amazônia Legal.

Esta tese está organizada nos seguintes capítulos: No Capítulo 2 apresentamos os dados com informações sobre as áreas de estudo, conceitos de fractais, dimensão fractal e lacunaridade (métodos de cálculo de lacunaridade para dados unidimensionais e bidimensionais). No Capítulo 3 apresentamos resultados com discussão, no Capítulo 4 as conclusões e no Apêndice os artigos produzidos como resultados da tese.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 DADOS

Utilizamos neste trabalho quatro bases de dados referentes aos fenômenos climáticos, hidrológicos e ecológicos tais como: precipitação, temperatura, vazão e incêndios florestais.

2.1.1 PRECIPITAÇÃO DO ESTADO DE SERGIPE

O estado de Sergipe, (com área de 22.000 km² e população de 2.068.017 habitantes) esta localizada na região Nordeste do Brasil, nas coordenadas geográficas 9° 31' 54" a 11° 34' 12" 9° 31' S e 36° 24' 27" a 38° 11' 20" 36° 25' W e encontra-se entre os estados da Bahia e Alagoas e no Oceano Atlântico [28].

O clima de Sergipe é caracterizado pela ampla variabilidade espacial e temporal com precipitação média variando de 700 mm/ano no semiárido, de 1.000 mm/ano no agreste e de 1.355 mm/ano no litoral. A precipitação é concentrada nos períodos de abril a agosto definindo as estações chuvosa e seca, com secas severas em alguns anos e enchentes em outros anos. A temperatura média anual do ar varia de 22,7 a 26,5 °C e a umidade relativa média anual variam de 65% a 80% [29].

Foram utilizados os dados de precipitação pluviométrica diária de 19 estações meteorológicas no período de 01 de janeiro de 2006 a 31 de julho de 2012 disponibilizadas pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos (<http://www.semarh.se.gov.br/meteorologia/modules/tinyd0/index.php?id=50>) do estado de Sergipe ver Figura 1 e Tabela 1.

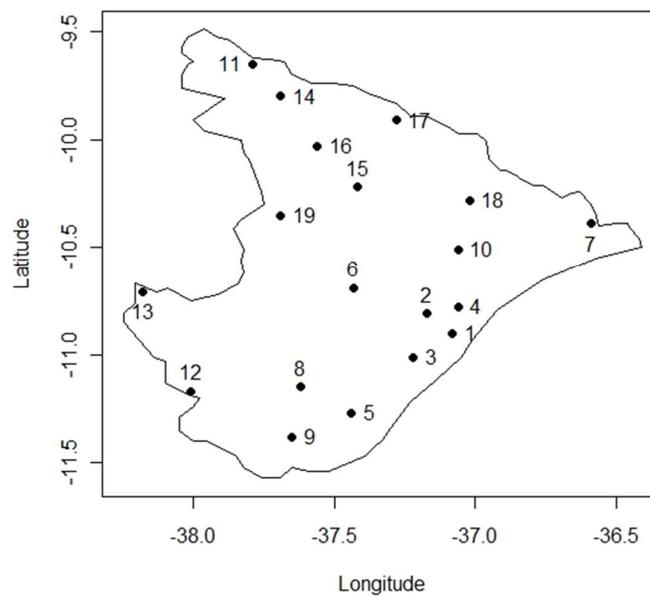


Figura 1. Distribuição espacial das estações meteorológicas do estado de Sergipe.

Tabela 1. Descrição das estações meteorológicas do estado de Sergipe.

Estações	Latitude	Longitude	Altitude
1-Aracaju	10°54'36''S	37°04'12''O	4m
2-Laranjeiras	10°48'22''S	37°10'18''O	9m
3-São Cristóvão	11°00'54''S	37°12'21''O	47m
4-Santo Amaro	10°47'20''S	37°03'16''O	55m
5-Estância	11°16'04''S	37°26'16''O	53m
6-Itabaiana	10°41'06''S	37°25'30''O	188m
7-Neópolis	10°19'12''S	36°34'46''O	30m
8-Boquim	11°09'02''S	37°37'15''O	164m
9-Umbaúba	11°22'58''S	37°39'28''O	130m
10-Capela	10°30'10''S	37°03'10''O	162m
11-Canindé de S. Francisco	09°38'31''S	37°47'16''O	68m
12-Tobias Barreto	11°11'02''S	37°59'54''O	158m
13-Poço verde	10°42'28''S	38°10'58''O	268m
14-Poço redondo	09°48'18''S	37°41'04''O	188m
15-Glória	10°13'06''S	37°25'13''O	291m
16-Monte alegre	10°01'37''S	37°33'43''O	265m
17-Porto da Folha	09°55'01''S	37°16'40''O	38m
18-Aquidabã	10°16'52''S	37°29'40''O	180m
19-Carira	10°21'29''S	37°42'03''O	351m

2.1.2 VAZÃO DOS RIOS ATIBAIA E JAGUARI

A bacia do rio Piracicaba esta localizada entres os paralelos 22°00'S e 23°30'S e os meridianos 46°00'O e 48°30'O. A área total é de 12.568,72 km², sendo que, 11.442,82 km² encontram-se no estado de São Paulo, e 1.125,90 km² no estado de Minas Gerais [30]. Os rios Atibaia e Jaguari estão localizados na bacia do rio Piracicaba. Esta bacia é utilizada como fonte de abastecimento de 40 municípios de São Paulo, sendo que apenas 13 municípios possuem algum tipo de tratamento. As águas da bacia do Piracicaba também são usadas para o abastecimento industrial, irrigação de plantações e produção de energia elétrica [31].

Um fato bastante importante da bacia do rio Piracicaba foi à implantação do Sistema Cantareira (SABESP), responsável pela reversão interbacias de $31\text{m}^3\text{s}^{-1}$ para o abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo. O sistema Cantareira foi construído em duas etapas, a primeira iniciou-se em 1965 nos rios Juqueri, Atibaia e Cachoeira estendendo-se até 1975, a segunda etapa da construção do Sistema começou em 1976 e se estendeu até 1981 compreendendo os rios Jaguari e Jacaré [32].

As áreas utilizadas para a construção do sistema Cantareira sofreram um forte impacto ambiental, gerado pelos processos de erosão mecânica, tal impacto gerou um intenso transporte de material sólido provocando a criação de voçorocas e assoreamento [31]. A localização geográfica dos principais tributários e reservatórios do sistema Cantareira na bacia do rio Piracicaba está apresentada na Figura 2.



Figura 2. Distribuição geográfica das principais rios da bacia do rio Piracicaba.

Foram analisadas séries temporais diárias de vazão do rio Atibaia (estação 3D-006) nos períodos de 1930 - 1974 e 1975 - 1997, antes e depois da construção do reservatório. Para o rio Jaguari (estação 3D-009) foram analisadas séries temporais de vazão nos períodos de 1931 - 1980 e 1984 - 1998, antes e depois da construção do reservatório. Os dados foram obtidos do site do DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica: <http://www.dae.sp.gov.br/>. As informações sobre as estações utilizadas quanto à latitude, longitude e área de drenagem estão dispostas na Tabela 2.

Tabela 2. Características das estações 3D-006 e 3D-009 referentes à latitude, longitude e área de drenagem.

Características	Estações	
	3D-006	3D-009
Latitude	22°58'59''S	22°51'02''S
Longitude	46°49'46''O	46°46'47''O
Área de drenagem	1920 km ²	1950 km ²

2.1.3 PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA NO ESTADO DE PERNAMBUCO

O estado de Pernambuco, (com área de 98.311 km² e população de 8.796.032 habitantes) situado entre os paralelos 7°18'17" e 9°28'43" de latitude sul e os meridianos de 34°48'15" e 41°21'22" de longitude a oeste, no Nordeste brasileiro com condições climáticas diversificadas devido sua posição, vegetação e topografia. Dois tipos climáticos segundo Köppen caracterizam o Estado, os climas As' e BSh, ou seja, precipitações no outono e inverno em parte do litoral do Estado e semi-árido quente no sertão (Temperatura média anual > 18 °C), respectivamente [33].

O conjunto de dados foi coletado do Instituto Nacional Brasileiro de Meteorologia (INMET) e fornecido pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). Os dados referentes à precipitação e temperatura foram registrados nas estações meteorológicas: Recife, Caruaru, Garanhuns, Arcoverde, Surubim, Ibimirim, Floresta, Serra Talhada e Cabrobó, no período de 01 de janeiro de 2008 a 01 de janeiro de 2011, a cada hora. A localização geográfica das estações no estado de Pernambuco esta apresentada na Figura 3. As informações sobre as estações utilizadas estão listadas na Tabela 3.

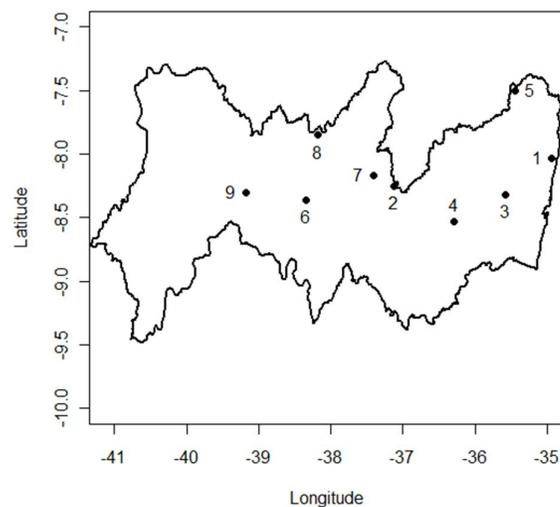


Figura 3. Distribuição espacial das estações meteorológicas do estado de Pernambuco.

Tabela 3. Descrição das estações utilizadas do estado de Pernambuco.

Estações	Latitude	Longitude	Altitude
1-Recife	08°03'14''S	34°52'51''O	4m
2-Arcoverde	08°25'15''S	37°03'41''O	663m
3-Caruaru	08°16'58''S	35°58'33''O	554m
4-Garanhuns	08°53'25''S	36°29'34''O	842m
5-Surubim	07°49'55''S	35°45'21''O	394m
6-Floresta	08°36'03''S	38°34'04''O	316m
7-Ibimirim	08°32'26''S	37°41'25''O	401m
8-Serra Talhada	07°59'09''S	38°17'45''O	444m
9-Cabrobó	08°30'51''S	39°18'36''O	325m

2.1.4 FOCOS DE QUEIMADAS NA AMAZÔNIA LEGAL

A região do arco do desflorestamento situada na Amazônia legal é composta por 524 municípios que se distribuem desde o sudeste do Maranhão, incluindo o norte do Tocantins, o sul do Pará, norte do Mato Grosso, Rondônia, sul do Amazonas, até o sudeste do Acre [34], Figura 4. A região da Amazônia Legal apresenta uma intensa

exploração madeireira que nos últimos 30 anos totalizaram um desmatamento de cerca de 10% de sua área [34].

Na região da Amazônia Legal detecta-se um grande número de focos de calor, chegando a concentrar mais de 85% de todas as queimadas do Brasil. No período de estação seca, nos meses de junho a outubro o número de focos de calor aumenta consideravelmente, os estados que apresentam os maiores registros de queimadas são Mato Grosso e Pará [34]. A área de estudo esta apresentada na Figura 4.



Figura 4. Área de avaliação dos focos de calor.

No Brasil, o monitoramento de queimadas via sensoriamento remoto, iniciou em Julho de 1987, com a implementação do projeto SEQE - Sensoriamento Remoto de Queimadas por Satélite, após vários acordos entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IBDF), ver [35].

Os dados estudados neste artigo foram obtidos justamente através do site do INPE (www.inpe.br), considerando sempre o satélite referência indicado no referido site (no período de 2000 a 09/agosto/2007 o satélite NOAA-12 e a partir de então até 2013 o AQUA_M-T) e consiste de detecções de focos de queimadas diárias (utilizando os

dados brutos de data, hora, longitude e latitude de focos de calor detectados por satélite) no período citado conforme a Figura 5.

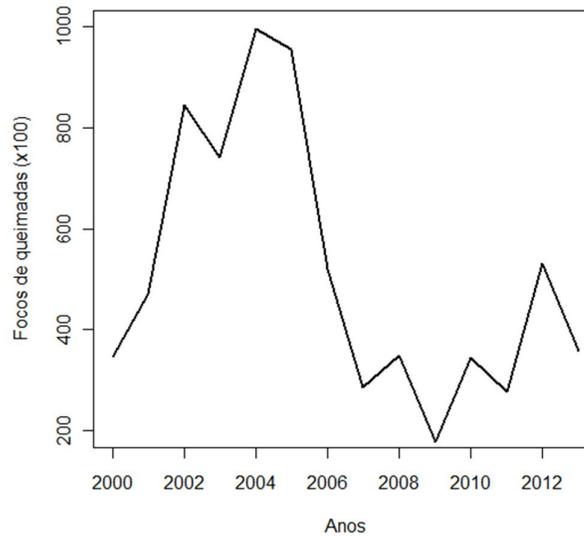


Figura 5. Série anual da detecção de queimadas por satélite.

2.2 FRACTAIS

Muitos fenômenos e formas encontradas na natureza não podem ser explicados nos moldes dos modelos matemáticos convencionais, sendo para isso necessário uma teoria especial que os explique e caracterize a chamada geometria fractal.

Um fractal é um objeto que apresenta invariância na sua forma à medida que a escala, sob a qual o mesmo é analisado, é alterada, mantendo-se a sua estrutura idêntica à original. Os fractais são formas geométricas que assumem algumas propriedades características, como auto-semelhança, a complexidade infinita e a sua dimensão [2,36].

A auto-semelhança é a característica que identifica uma pequena parte, de uma figura ou contorno como uma réplica do todo. Ao falarmos de figuras auto-semelhantes, temos de considerar dois tipos de auto-semelhança: a exacta e a aproximada (ou estatística).

As figuras auto-semelhante exacta só existe por processos matemáticos os chamados processos iterativos, por exemplo, o conjunto de Cantor, o triângulo de Sierpinski e a esponja de Merger, apresentadas nas Figuras 6, 7 e 8. Estas três figuras encontram-se no espaço euclidiano unidimensional, bidimensional e tridimensional, respectivamente.



Figura 6. Conjunto de Cantor.

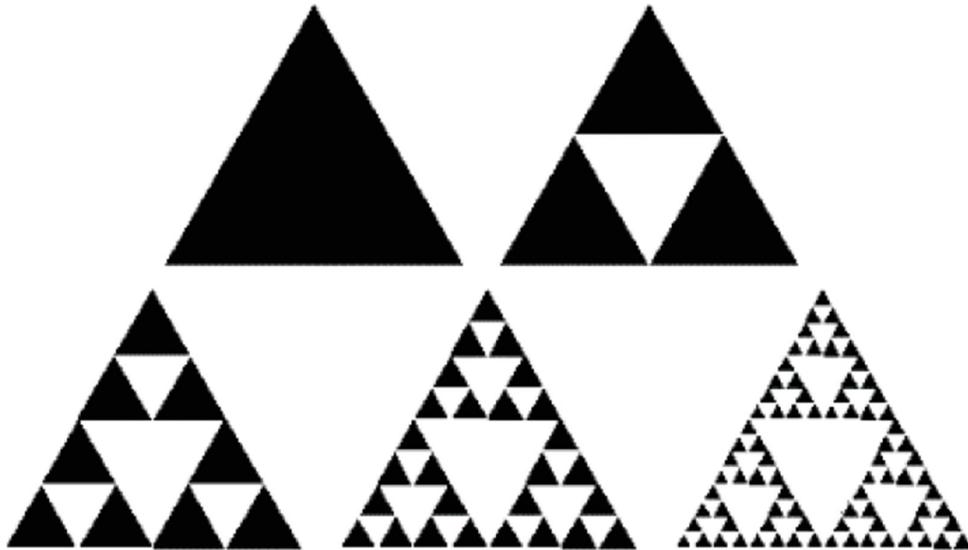


Figura 7. Triângulo de Sierpinski.

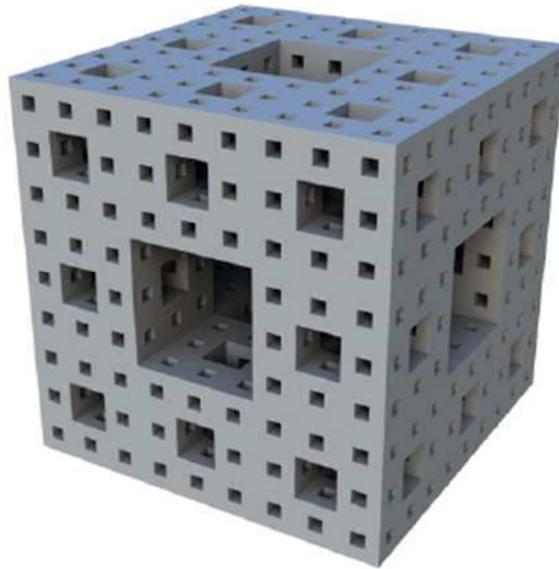


Figura 8. Esponja de Menger.

Existem muitas formas da natureza, que apresentam estruturas auto-similares e que apesar de não conseguirmos visualizar muitas escalas de ampliação, devem ser discutidas sob o ponto de vista da geometria fractal. Para estas formas da natureza, a noção de auto-semelhança deve ser vista cuidadosamente e deve ser encarada como auto-semelhança aproximada (ou estatística), uma vez que, partes destas figuras têm a mesma estrutura ou uma distribuição idêntica, mas não são réplicas exatas destas, exemplos Figuras 9 e 10.



Figura 9. Feto e respectivas réplicas observadas numa determinada árvore.



Figura 10. Couve-flor e réplicas observadas numa porção da mesma.

2.2.1 DIMENSÃO FRACTAL

A dimensão fractal descreve quantos novos pedaços geometricamente similares ao objeto são observados quando a resolução é aumentada, se reduzirmos a escala por um fator F encontramos que existem N pedaços similares ao original, logo a dimensão fractal é definida por: $N = F^d$, onde d é a dimensão fractal, em geral fracionaria e menor do que a dimensão do espaço euclidiano em que o fractal se encontra.

Seguindo esta definição para dimensão fractal do Conjunto de Cantor encontra-se o valor $d = (\log 2)/(\log 3) = 0,6309$ (Figura 6), para Triângulo de Sierpinski $d = (\log 3)/(\log 2) = 1,5849$ (Figura 7) e para Esponja de Menger $d = (\log 20)/(\log 3) = 2,7268$ (Figura 8).

Em caso de fractais estocásticos existem vários métodos para se calcular a dimensão fractal, entre eles os mais utilizados são: método da contagem de caixas (*box-counting*), dimensão de informação e dimensão de correlação [37].

O algoritmo de contagem de caixa (*box-counting*), consiste em se cobrir o fractal por $N(r)$ caixas de tamanho r que contenham pelo menos um ponto do objeto, o processo é repetido com caixas de diferentes tamanhos e traça-se um gráfico do log-log de $N(r)$ em função de r . A dimensão fractal por contagem de caixas, é definida por:

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log(N(r))}{\log(1/r)}$$

e pode ser estimada como inclinação da reta $\log N(r)$ versus $\log(1/r)$.

Um exemplo de aplicação do método *box-counting* para cálculo da dimensão fractal da linha costeira de Inglaterra esta apresentado na Figura 11.

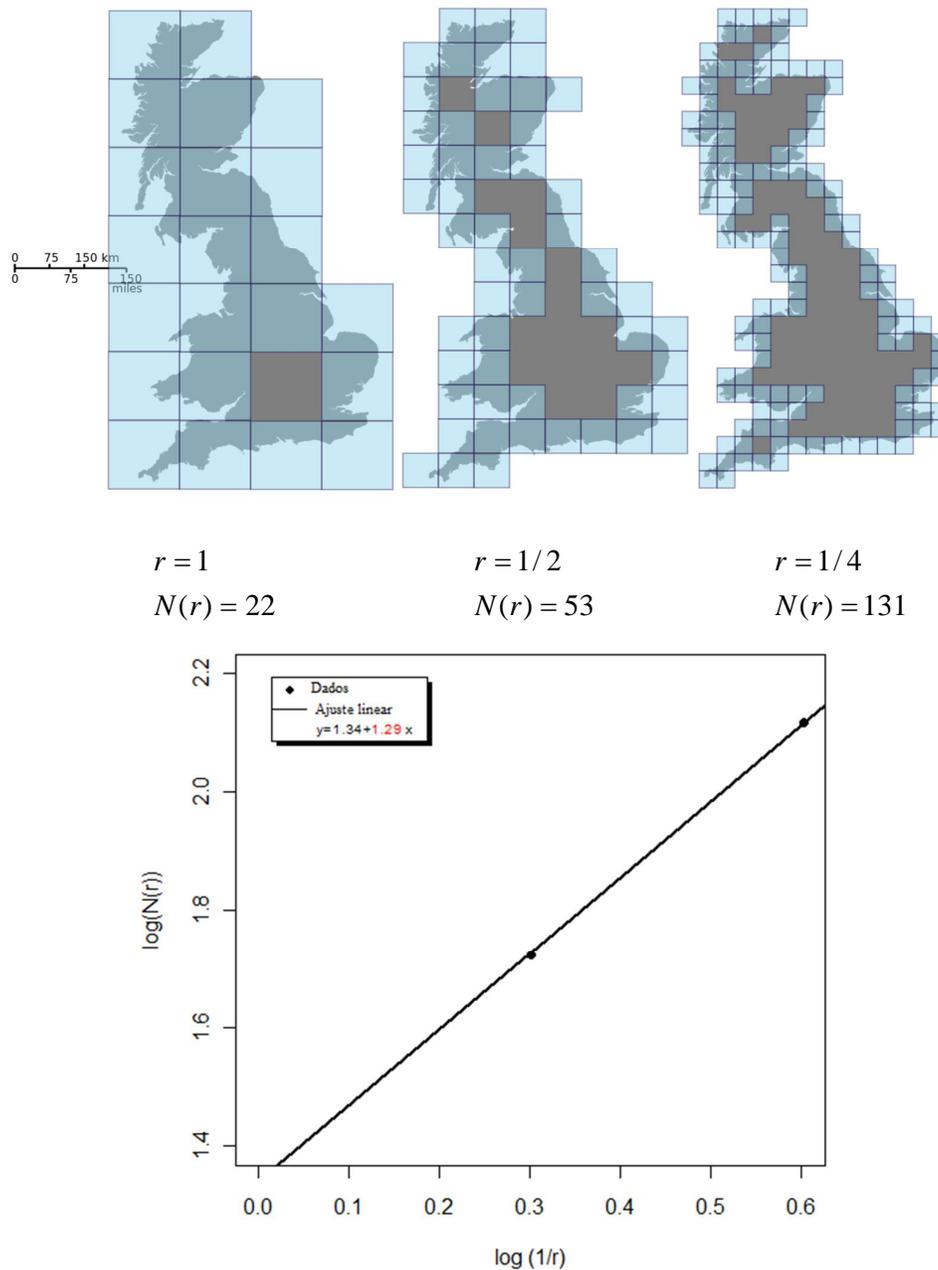


Figura 11. Aplicação do método *box-counting* na linha costeira da Inglaterra.

2.3 LACUNARIDADE

Mandelbrot [2,38] observou que a dimensão fractal não é suficiente para uma caracterização completa da textura de objeto com propriedades fractais. Existem objetos fractais com mesma dimensão fractal e com diferente aparência em sua textura [39,40]. Como complemento da dimensão fractal Mandelbrot [2] introduziu o conceito de lacunaridade (palavra derivada do latim “lacuna”, que significa “vazio”) para descrever e quantificar o desvio de objetos fractais de sua invariância translacional, avaliando a distribuição de tamanhos de lacunas em textura de objeto.

Objetos fractais com grandes valores de lacunaridade (com lacunas de diferentes tamanhos) são objetos heterogêneos e não apresentam translação invariante, enquanto que objetos com menores valores de lacunaridade (com lacunas do mesmo tamanho) são homogêneos e possuem translação invariante [41].

A lacunaridade é uma medida que depende da escala, pois estruturas que são homogêneas em pequenas escalas podem ser heterogêneas em escalas maiores e vice-versa [42]. Diferentes fractais podem apresentar a mesma dimensão fractal, enquanto que apresentam diferentes medidas de lacunaridade, como mostrado na Figura 12. Observa-se que a estrutura (c) possui as lacunas do mesmo tamanho e consequentemente o menor valor de lacunaridade.

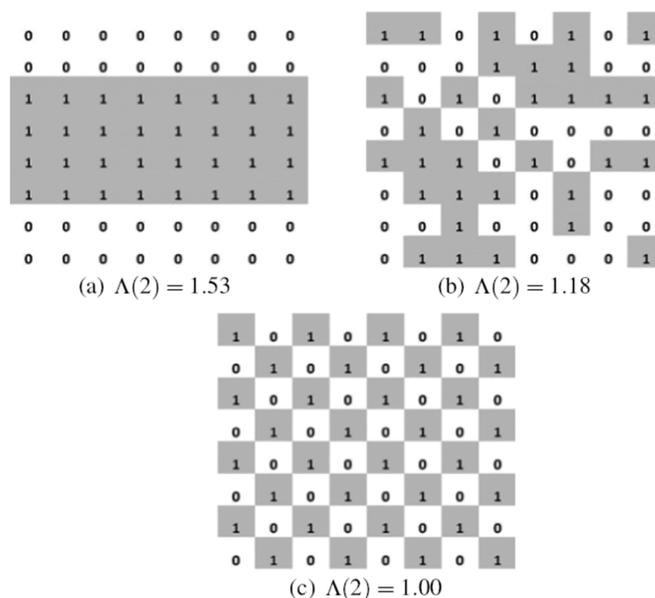


Figura 12. Exemplo de lacunaridade para três objetos fractais, com mesma dimensão fractal $D = (\log(32))/(\log(8)) = 1,667$ (adaptado de [43]).

O conceito de lacunaridade foi originalmente desenvolvido para detecção de padrões de texturas de objetos fractais, mas pode ser generalizado para qualquer padrão espacial, incluindo aqueles com propriedades fractais e multifractais e pode ser usado tanto com os dados quantitativos quanto para dados binários e também em dimensões 1D, 2D e 3D [44].

Vários métodos para o cálculo da lacunaridade foram desenvolvidos com o avanço computacional [39-41,43,45], entre eles destaca-se o algoritmo de deslizamento de caixa “*gliding box*” de Allain e Cloitre [43].

Este método é amplamente utilizado nos estudos de medicina, em análise de padrões de retina humana [46,47], radiografias dentárias [48] e imagens de tomografias computadorizadas de ossos trabeculares [49].

Na ecologia destacam-se os trabalhos de Plotnick [42] que usou a lacunaridade para desenvolver índice de textura de florestas, enquanto Malhi e Román-Cuesta [50] avaliaram imagens de IKONOS nas florestas tropicais da Amazônia. Na geologia pode-se destacar o estudo de Roy [51].

Du [52] criou uma nova técnica de estimação de lacunaridade aplicando na segmentação de imagens SAR. Na área de tecnologia de alimentos Velazquez-Camilo [53] detectou padrões na cristalização da cana de açúcar utilizando imagens fractais com auxílio da análise de lacunaridade 2D. Na área de planejamento urbano Myint e Lam [54] conseguiram distinguir padrões urbanos em imagens de textura na cidade de Oklahoma utilizando análise de lacunaridade 2D.

Análise de lacunaridade também é bastante explorada na climatologia como: o estudo que caracterizou o regime pluviométrico diário da península Ibérica no período de 1950 a 1990 [55], a caracterização do comportamento complexo do regime pluviométrico da Europa no período de 1950 a 2000 [56], avaliação da dinâmica do índice de oscilação do atlântico norte mensal via análise de lacunaridade [57]. Em estudos recentes a análise de lacunaridade foi aplicada para estudar o comportamento da precipitação [58-59], vazão [60] da bacia do rio Piracicaba e Temperatura do nordeste brasileiro [61].

Procedimentos para o cálculo da lacunaridade 1D:

- i) Uma caixa de tamanho r é colocada na origem do banco de dados e o número s de sítios ocupados (com valores acima de um limiar escolhido) é contado.
- ii) A caixa é movida ao longo de todo o conjunto de observações, e sua massa (número dos sítios ocupados) é calculada.
- iii) A distribuição de probabilidade de massa da caixa é dada por.

$$P(s,r) = n(s,r)/N(r)$$

onde, $n(s,r)$ é o número de caixas de tamanho r com massa s e $N(r) = N - r + 1$ é o número total de caixas de tamanho r (N é o total de observações).

- iv) A lacunaridade para o tamanho de caixa r é definida por:

$$L(r) = M2 / [M1]^2$$

onde, $M1 = \sum_{s=1}^r s * p(s,r)$ e $M2 = \sum_{s=1}^r s^2 * p(s,r)$ são o primeiro e o segundo momento da distribuição $P(s,r)$, respectivamente.

- v) A lacunaridade diminui com tamanho de caixa como uma lei de potência

$$L(r) = \alpha r^\beta$$

onde, o expoente $\beta < 0$ pode ser estimado como coeficiente angular de reta $\log L(r)$ versus $\log(r)$ [55].

Ilustraremos a seguir um exemplo onde a lacunaridade foi calculada para caixas de tamanhos 2 de registros de precipitação dos 50 dias consecutivos de uma estação meteorológica hipotética. Os dados referentes aos 50 registros estão expressos na Figura 13, onde os pontos são os dias em que houve registro de chuva (sítios ocupados com limiar de chuva superior a 0 mm) e os espaços em branco são os dias onde não houve registro de chuva.

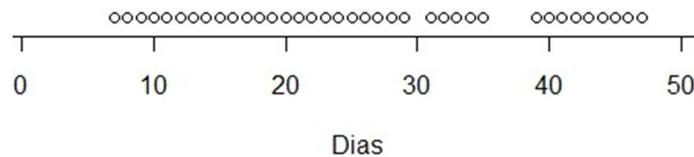


Figura 13. Registro de precipitação de uma determinada estação meteorológica hipotética nos 50 dias consecutivos.

Na Tabela 4, observa-se a quantidade de caixas de tamanho dois com nenhum sítio ocupado, apenas um e os dois sítios ocupados, posteriormente o número de caixas e suas respectivas probabilidades de ocorrência de 0, 1 e 2 sítios ocupados, e por fim o cálculo do primeiro e segundo momento, encontrado assim um valor de lacunaridade de 1,2706.

Tabela 4. Cálculo da lacunaridade para caixa de tamanho 2 dos 50 registros consecutivos de precipitação de uma estação meteorológica hipotética.

s	n(s,r)	P(s,r)	s*P(s,r)	s²*P(s,r)	L(2)
0	9	0,1837	0	0	
1	6	0,1224	0,1224	0,1224	
2	34	0,6939	1,3878	2,7756	
			M1=1,5102	M2=2,898	
					1,2706

Procedimentos para o cálculo da lacunaridade 2D:

- i) Uma caixa de tamanho $r \times r$ é colocada na origem de uma matriz de informação $L \times C$ e sua massa representando o número “s” de sítios ocupados é contado.
- ii) A caixa é movida ao longo de todo o conjunto de observações e sua massa é calculada.
- iii) Este processo é repetido para todo o conjunto de observações, obtendo a distribuição de frequência da massa da caixa $n(s,r)$, e correspondentemente a distribuição de probabilidade $P(s,r) = n(s,r)/N(r)$, onde $N(r) = (L - r + 1) * (C - r + 1)$ é o número total de caixas de tamanho $r \times r$ deslizadas na matriz de informação.
- iv) A lacunaridade para o tamanho de caixa $r \times r$ é definida por:

$$L(r) = M2 / [M1]^2$$

onde, $M1 = \sum_{s=0}^{r^2} s * P(s,r)$ e $M2 = \sum_{s=0}^{r^2} s^2 * P(s,r)$ são o primeiro e o segundo momento da distribuição de $P(s,r)$, respectivamente.

- v) A lacunaridade segue uma lei de potência e pode ser estimada por:

$$L(r) = \alpha r^\beta$$

onde, o expoente $\beta < 0$ pode ser estimado como coeficiente angular de reta $\log L(r)$ versus $\log(r)$.

Para melhor entendimento do procedimento observe na Figura 14 um mapa aleatório de dimensão 12 x 12 representando um determinado fenômeno onde o valor 0 representa sítio não ocupado (sem presença do fenômeno) e o valor 1 representa sítio ocupado (presença do fenômeno). Faremos o procedimento do cálculo da lacunaridade para caixas de tamanho 2 x 2.

1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1
0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0
1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0
0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0
0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1
0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0
0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1

Figura 14. Mapa aleatório 12 x 12, com 1's representando a ocupação da célula.

Na Tabela 5, observa-se o número de caixas de tamanho 2 x 2 com nenhum sítio ocupado, um, dois, três e os quatros sítios ocupados, posteriormente suas respectivas probabilidades de ocorrência de 0, 1, 2, 3 e 4 sítios ocupados, e por fim o cálculo do primeiro e segundo momento, encontrado assim um valor de lacunaridade de 1,216.

Tabela 5. Cálculo da lacunaridade para caixa de tamanho 2 do mapa aleatório apresentada na Figura 14.

s	n(s,r)	P(s,r)	s*P(s,r)	s ² *P(s,r)	L(2)
0	3	0,025	0	0	
1	35	0,289	0,289	0,289	
2	46	0,380	0,760	1,520	
3	29	0,240	0,720	2,160	
4	8	0,066	0,264	1,056	
			M1=2,033	M2=5,025	
					1,216

2.4 ANÁLISES DE COVARIÂNCIA (ANCOVA)

Em geral o modelo de análise de covariância pode ser escrito como

$$y = \mathbf{Z}\boldsymbol{\alpha} + \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \varepsilon \quad (2.3.1)$$

onde, \mathbf{Z} é uma matriz que contém 0's e 1's, $\boldsymbol{\alpha}$ é um vetor que contém μ , e os parâmetros α_i , β_j e γ_{ij} representando fatores e interações (ou outros efeitos), \mathbf{X} contém os valores das covariáveis e $\boldsymbol{\beta}$ contém os coeficientes das variáveis [62].

O modelo com um fator e uma covariável pode ser expresso por:

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta x_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (2.3.2)$$

$i=1,2,\dots,k$, $j=1,2,\dots,n$.

onde, α_i é o efeito do tratamento, x_{ij} é uma covariável observada nas mesmas unidades amostrais e β é o coeficiente angular (*slope*) relacionado a y_{ij} com x_{ij} .

O modelo em 2.3.1 pode ser escrito na forma matricial da seguinte forma:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}, \boldsymbol{\alpha} = \begin{bmatrix} \mu \\ \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_k \end{bmatrix}, \mathbf{X} = \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_{11} \\ \vdots \\ x_{1n} \\ x_{2n} \\ \vdots \\ x_{kn} \end{bmatrix} \quad (2.3.3)$$

e $\boldsymbol{\beta} = \beta$.

Os parâmetros do modelo por ser estimado por:

$$\hat{\boldsymbol{\alpha}} = \hat{\boldsymbol{\alpha}}_0 - (\mathbf{Z}'\mathbf{Z})^{-1}\mathbf{Z}'\mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\beta}} =$$

$$= \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{y}_1 \\ \bar{y}_2 \\ \vdots \\ \bar{y}_k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{\beta}\bar{x}_1 \\ \hat{\beta}\bar{x}_2 \\ \vdots \\ \hat{\beta}\bar{x}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{y}_1 - \hat{\beta}\bar{x}_1 \\ \bar{y}_2 - \hat{\beta}\bar{x}_2 \\ \vdots \\ \bar{y}_k - \hat{\beta}\bar{x}_k \end{bmatrix} \quad (2.3.4)$$

$$\hat{\beta} = \frac{e_{xy}}{e_{xx}} = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)(y_{ij} - \bar{y}_i)}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2} \quad (2.3.5)$$

onde, \bar{x}_i é a média do i -ésimo tratamento e \bar{y}_i é a média da i -ésima observação.

Para testar se o parâmetro $H_0: \beta = 0$, utilizamos a soma de quadrados da hipótese definida por:

$$SQ_{Hip} = \frac{e^2_{xy}}{e_{xx}} \quad (2.3.6)$$

Sob H_0 temos a estatística F definida por:

$$F = \frac{e^2_{xy}/e_{xx}}{SQ_{Res_{y,x}}/[k(n-1)-1]} \quad (2.3.7)$$

onde, F é distribuída como $F(1, k(n-1)-1)$ e $SQ_{res_{y,x}}$ é dado por:

$$SQ_{Res_{y,x}} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 - \frac{[\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)(y_{ij} - \bar{y}_i)]^2}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}$$

Para testar a suposição de igualdade dos β_i , ou seja, $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k$, então podemos reescrever as kn observações da seguinte forma matricial $y = \mathbf{Z}\mathbf{a} + \mathbf{X}\mathbf{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon}$, onde \mathbf{Z} e \mathbf{a} são definidos em (2.3.3) e

$$\mathbf{X}\boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} x_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & x_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & x_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}$$

com $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]'$.

logo,

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = \begin{bmatrix} e_{xy,1}/e_{xx,1} \\ e_{xy,2}/e_{xx,2} \\ \vdots \\ e_{xy,k}/e_{xx,k} \end{bmatrix} \quad (2.3.8)$$

onde, $e_{xy,i} = \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)(y_{ij} - \bar{y}_i)$, sob H_0 a estatística do teste é definida por:

$$F = \frac{\left[\sum_{i=1}^k e_{xy,i}^2 / e_{xx,i} - e_{xy}^2 / e_{xx} \right] / (k-1)}{\left[e_{xy}^2 / e_{xx} \right] / k(n-2)} \quad (2.3.9)$$

em que F é distribuído como $F_{(k-1, k(n-2))}$.

2.5 ANÁLISES DE AGRUPAMENTO

Análise de agrupamento é um método utilizado quando se deseja agrupar observações, indivíduos ou objetos em grupos. É um processo de partição de uma população heterogênea em vários subgrupos mais homogêneos. Os algoritmos de agrupamento podem ser do tipo hierárquico e não hierárquico.

2.5.1 AGRUPAMENTO HIERÁRQUICO

O método de agrupamento hierárquico consiste em uma série de sucessivos agrupamentos de elementos, onde os elementos são agregados ou desagregados.

Os elementos são agrupados seguindo alguma medida de similaridade. Os grupos são geralmente representados por um gráfico bidimensional chamado de dendograma que pode ser aglomerativo ou divisório.

Nos métodos aglomerativos cada observação começa como seu próprio grupo e depois os dois elementos mais próximos são agrupados, sendo a seguir agregados com o grupo mais próximo e assim por diante, até a obtenção de um grupo único. Nos métodos divisórios, parte-se de um grupo único e separam-se as observações mais dissimilares, até que as observações sejam cada uma um grupo único.

Existe uma variedade de métodos hierárquicos, que são caracterizados de acordo com o critério utilizado para definir as distâncias entre os grupos. Entretanto, a maioria dos métodos parecem ser formulações alternativas de três grandes conceitos de agrupamento aglomerativo [63]:

- 1) Método de ligação
- 2) Método da centroide
- 3) Método de Ward

De modo geral, os métodos de agrupamento hierárquico utilizam os passos de um algoritmo padrão, conforme listado abaixo. A diferença entre os métodos ocorre no passo 5, onde a função distância é definida de acordo com cada método [64].

Algoritmo padrão:

Entrada: Uma base de dados com N elementos.

Saída: Um conjunto de grupos.

Passo 1. Iniciar com N grupos, contendo um elemento em cada grupo e uma matriz de similaridade $D_{N \times N}$;

Passo 2. Repetir;

Passo 3. Localizar a menor distância D_{UV} (maior similaridade);

Passo 4. Atualizar a matriz D, retirando os elementos U e V;

Passo 5. Atualizar a matriz D, adicionando as novas distâncias do grupo (U,V);

Passo 6. Até N-1, quando todos os elementos estarão em um único grupo.

A maioria dos métodos de análise de agrupamento requer uma medida de dissimilaridade entre os elementos a serem agrupados, normalmente expressos como uma função distância ou métrica.

Qualquer medida de distância entre dois pontos P e Q, é válida, se os seguintes axiomas são satisfeitos [65].

Seja M um conjunto, uma métrica em M é uma função $d: M \times M \rightarrow R$, tal que para quaisquer x, y e $z \in M$, tenhamos:

- 1- $d(x,y) > 0$, para todo $x \neq y$.
- 2- $d(x,y) = 0$, se, e somente, se $x = y$.
- 3- $d(x,y) = d(y,x)$ (simetria).
- 4- $d(x,y) \leq d(x,z) + d(z,y)$ (desigualdade triangular).

As medidas de dissimilaridade entre as observações podem ser várias, a mais comum delas é a distância euclidiana. A distância euclidiana entre dois elementos $X=[X_1, X_2, \dots, X_p]$ e $Y=[Y_1, Y_2, \dots, Y_p]$ é definida por:

$$d_{xy} = [\sum_{i=1}^p (X_i - Y_i)^2]^{1/2}$$

2.5.2 AGRUPAMENTO NÃO HIERÁRQUICO

Os métodos não hierárquicos foram desenvolvidos para agrupar elementos em k grupos, onde k é a quantidade de grupos definida previamente. Os valores de k nem sempre apresentam grupos satisfatórios, então se aplica o método várias vezes a fim de encontrar o valor de k que represente melhor os grupos [66].

Os métodos não hierárquicos são mais rápidos que os hierárquicos, pois não é necessário calcular e armazenar a matriz de similaridade durante o processamento. Os métodos não hierárquicos mais conhecidos são: *k-means* (k-médias) e *k-medoid* (k-medóide).

K-Means

Seja (M, ρ) um espaço métrico, X um elemento aleatório em M e $S = \{X_1, \dots, X_n\}$ uma amostra de X . Uma k -partição de S é uma classe de subconjuntos de S , $P(k) = \{C_1, \dots, C_k\}$, tal que $\bigcup_{i=1}^k C_i = S$ e $C_i \cap C_j = \emptyset$.

Seja P^k o conjunto de todas as partições de S . O método *k-means* consiste em encontrar $P_0^k = C_{01}, \dots, C_{0k} \in P^k$ tal que

$$V_k(S) = SQ[P_0^k] = \inf_{P \in P^k} SQ[P(k)]$$

na qual $SQ[P(k)] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k I_{(x_i \in C_j)} \rho^2(x_i, \hat{\mu}_j)$, onde

$$I_{(x \in C)} = \begin{cases} 1; & \text{se } x \in C \\ 0; & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde, $\hat{\mu}_j$ é a média amostral de frécht de C_j . P_0^k é dito ser uma k -partição globalmente ótima se S e $V_k(S)$ é chamada de k -variância amostral de S .

Para que se tenha certeza de que uma k -partição seja globalmente ótima, é necessário que o valor de SQ avaliado nesta k -partição seja menor ou igual ao valor de SQ avaliado em todas as outras k -partições em P^k , mas o número muito grande de k -partições em P^k torna-se esta comparação impraticável. Ao invés de se buscar uma k -partição globalmente ótima, algoritmos iterativos são utilizados para encontrar uma k -partição localmente ótima.

Define-se uma vizinhança de k -partições para cada k -partição. Começando de uma k -partição inicial, a k -partição localmente ótima é encontrada movendo-se de uma k -partição para outra em sua vizinhança, de acordo com alguma regra de movimentação, até que a movimentação seja encerrada, segundo algum critério de parada. O ponto no qual a movimentação é encerrada é considerado uma k partição localmente ótima. As regras de movimentação e de parada são determinadas pelos algoritmos iterativos.

Hartigan e Wong [67] propõem um algoritmo, para o caso no qual $M = R^p$ e $\rho(x,y) = \|x-y\|$, que tem o objetivo de encontrar uma k -partição cuja soma de quadrados não pode ser reduzida transferindo-se um elemento de um grupo para outro. Este algoritmo considera que a vizinhança de $P(k)$ é o conjunto das k -partições que podem ser obtidas movendo-se um elemento de um grupo de $P(k)$ para outro grupo. Deve-se mover de uma k -partição $P_1(k)$ para uma k -partição $P_2(k)$ se $SQ(P_1(k)) < SQ(P_2(k))$ e o movimento é encerrado quando se atinge uma k -partição a qual, dentre as suas vizinhas, apresenta a menor soma de quadrados.

Algoritmo de Hartigan e Wong

Considere um conjunto de dados contendo M observações e o número de grupos é K . Seja $NC(L)$ o número de elementos no grupo L e $D(I,L)$ a distância entre a observação I e a média do grupo L . Forneça um conjunto de K vetores n -dimensionais como valores iniciais para as K -médias.

Passo 1. Para cada $I(I=1,\dots,M)$, encontre a sua média mais próxima e sua segunda média mais próxima, $IC1(I)$ e $IC2(I)$, respectivamente. Atribua o ponto I ao grupo $IC1(I)$.

Passo 2. Atualize as médias dos grupos para serem as médias dos pontos contidos dentre eles.

Passo 3. Inicialmente, todos os grupos pertencem ao conjunto ativo.

Passo 4. (*optimal transfer stage*): Considere cada ponto $I(I=1,\dots,M)$. Se o grupo $L(L=1,\dots,M)$ foi atualizado no passo 6, então ele pertence ao conjunto ativo. Caso contrário, em cada passo, ele não está no conjunto ativo se ele não foi atualizado nos

últimos M passos do passo 4. Seja L_1 o grupo do ponto I . Se L_1 está no conjunto ativo, vá para o passo 4a. Caso contrário, vá para o passo 4b.

Passo 4a. Calcule o mínimo da quantidade $R_2 = NC(L)D(I,L)^2 / NC(L) + 1$, sobre todos os grupos $L(L \neq L_1, L=1, \dots, K)$. Seja L_2 o grupo com menor R_2 , se este valor é maior ou igual que a $NC(L_1)D(I,L)^2 / NC(L_1) - 1$, realocação não é necessária e L_2 é o novo $IC_2(I)$ (note que $NC(L_1)D(I,L)^2 / NC(L_1) - 1$ é lembrado e permanecerá o mesmo para o ponto I até que L_1 seja atualizado).

Caso contrário, o ponto I é alocado no grupo L_2 e L_1 é o novo $IC_2(I)$. As médias dos grupos são atualizadas para serem as médias dos pontos atribuídos a eles se realocação tem ocorrido. Os dois pontos envolvidos na transferência do ponto I neste passo estão agora no conjunto ativo.

Passo 4b. Este passo é idêntico ao 4a, exceto que o mínimo de R_2 é calculado somente sobre os grupos no conjunto ativo.

Passo 5. Pare se o conjunto ativo estiver vazio. Caso contrário, vá para o passo 6.

Passo 6. (*Quick transfer stage*): Considere cada ponto $I(I=1, \dots, M)$. Faça $L_1 = IC_1(I)$ e $L_2 = IC_2(I)$. Não é necessário checar o ponto I se ambos os grupos L_1 e L_2 não mudaram nos últimos M passos. Calcule os valores de $R_1 = NC(L_1)D(I,L)^2 / NC(L_1) - 1$ e $R_2 = NC(L)D(I,L)^2 / NC(L) + 1$ (como notado anteriormente, R_1 é lembrado e permanecerá o mesmo até que L_1 seja atualizado).

Se R_1 é menor que R_2 , o ponto I permanece no grupo L_1 . Caso contrário, troque $IC_1(I)$ com $IC_2(I)$ e atualize as médias dos grupos L_1 e L_2 . Os dois grupos são também notados por seu envolvimento numa transferência neste passo.

Passo 7. Se nos últimos M passos nenhuma transferência foi realizada, vá para o passo 4, caso contrário, vá para o passo 6.

2.6 SOFTWARES UTILIZADOS

Neste trabalho utilizamos o software R-project versão 2.13.2 para confecção das figuras e inicialmente para o cálculo da lacunaridade 1D, mas diante do esforço computacional que o software R-project demonstrou tivemos que implementar o algoritmo para o cálculo da lacunaridade 1D e 2D em linguagem de programação C utilizando o software Dev C++ onde o mesmo apresentou desempenho computacional superior ao R-project.

3. RESULTADOS

Neste capítulo os resultados serão mostrados em quatro partes, a primeira parte referente à precipitação diária do estado de Sergipe, na segunda parte encontra-se os resultados da análise da vazão diária dos rios Atibaia e Jaguari, na terceira parte os resultados da análise de series temporais horárias de precipitação e temperatura do estado de Pernambuco e na quarta parte são mostrados os resultados da análise da distribuição espacial de focos de queimadas na Amazônia legal.

3.1 PRECIPITAÇÃO DO ESTADO DE SERGIPE

A estatística descritiva obtida referente aos dados de precipitação diária do estado de Sergipe esta apresentada na Tabela 6. Verifica-se que a estação com maior média de precipitação diária foi Santo Amaro com 5,04 mm, enquanto que Poço redondo apresentou menor média de precipitação no período estudado com 1,23 mm. Na Tabela 6, nota-se que 75% dos dias das estações de Canindé de São Francisco, Tobias Barreto, Poço Verde, Poço redondo, Glória, Monte Alegre, Porto da Folha e Carira apresentaram valores de precipitação abaixo de 1 mm.

Tabela 6. Medidas descritivas de precipitação diária das estações no estado de Sergipe.

Estações	Min	1ºquartil	Média	Mediana	3ºquartil	Max.	D.Padrão
Aracaju	0,0	0,0	4,43	0,0	3,30	254,50	12,44
Laranjeiras	0,0	0,0	4,82	0,0	4,00	198,10	12,32
S. Cristóvão	0,0	0,0	4,64	0,0	3,80	176,30	11,69
Santo Amaro	0,0	0,0	5,04	0,0	4,00	192,75	13,88
Estância	0,0	0,0	4,36	0,0	3,00	113,00	11,18
Itabaiana	0,0	0,0	2,62	0,0	1,50	98,20	6,99
Neópolis	0,0	0,0	4,10	0,0	3,33	136,00	10,96
Boquim	0,0	0,0	3,65	0,0	3,00	191,50	10,19
Umbaúba	0,0	0,0	3,99	0,0	3,80	94,25	9,36
Capela	0,0	0,0	3,75	0,0	2,00	143,00	10,48
Canindé de S. Francisco	0,0	0,0	1,44	0,0	0,30	85,25	4,93
T. Barreto	0,0	0,0	2,11	0,0	0,75	106,75	6,56
Poço verde	0,0	0,0	1,80	0,0	0,40	87,00	5,76
P. redondo	0,0	0,0	1,23	0,0	0,0	101,20	5,31
Glória	0,0	0,0	2,19	0,0	0,50	90,80	6,91
Monte alegre	0,0	0,0	2,39	0,0	0,0	153,0	8,97
P. da Folha	0,0	0,0	2,03	0,0	0,25	105,00	6,91
Aquidabã	0,0	0,0	3,43	0,0	2,25	110,00	9,17
Carira	0,0	0,0	1,85	0,0	0,0	57,5	5,75

Nas Figuras 15, 16 e 17 observa-se a distribuição espacial dos valores da lacunaridade das séries temporais diárias de precipitação para limiares 0 mm, 5 mm e 10 mm respectivamente para tamanhos de janelas de 2, 64 e 256 dias.

Verifica-se que para todas as estações meteorológicas os valores de lacunaridade diminuem com o tamanho das janelas para todos os limiares de precipitação, indicando uma distribuição mais uniforme de lacunas (períodos com precipitação abaixo destes limiares). Observa-se ainda o menor valor de lacunaridade (para todos os limiares escolhidos) na região litoral do estado, indicando uma distribuição de períodos chuvosos mais homogênea. Os valores de lacunaridade aumentam nas regiões do semiárido e agreste indicando uma maior heterogeneidade na duração dos períodos de seca. Observa-se ainda que o valor de lacunaridade aumenta com o limiar de precipitação.

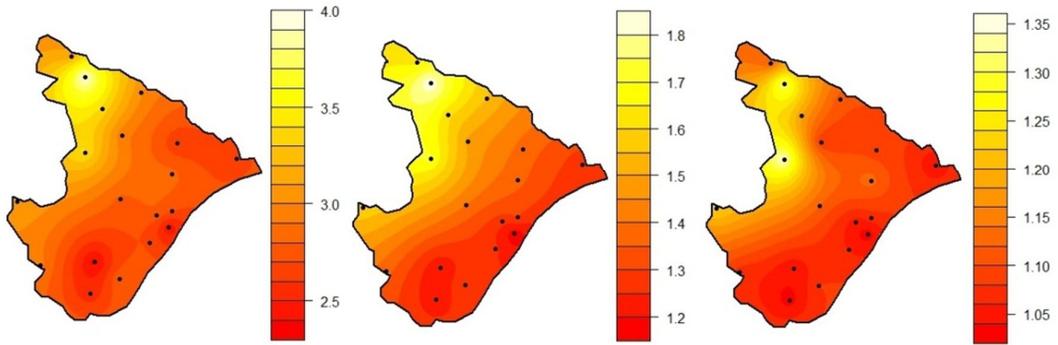


Figura 15. Lacunaridade empírica para tamanhos de janelas de 2, 64 e 256 dias com limiar de precipitação 0 mm.

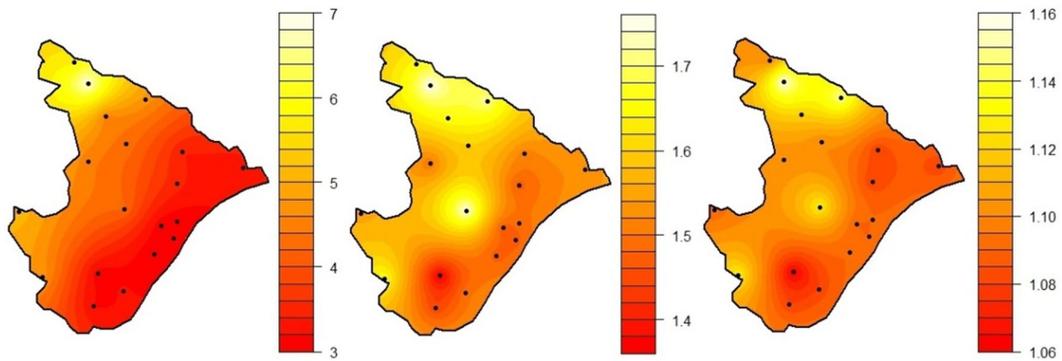


Figura 16. Lacunaridade empírica para tamanhos de janelas de 2, 64 e 256 dias com limiar de precipitação 5 mm.

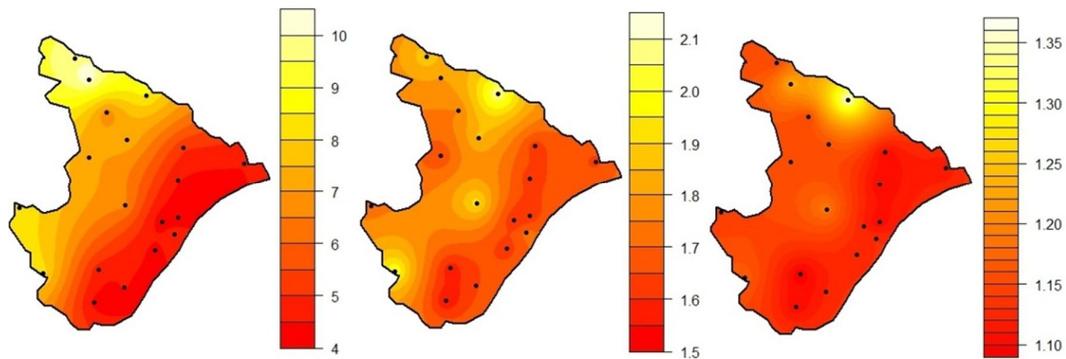


Figura 17. Lacunaridade empírica para tamanhos de janelas de 2, 64 e 256 dias com limiar de precipitação 10 mm.

Na Figura 18 observam-se os valores do expoente β de lacunaridade para diferentes limiares de precipitação. Observa-se que os valores do expoente β aumentam com o aumento do limiar escolhido, indicando maior heterogeneidade na duração de períodos com precipitação abaixo de limiar.

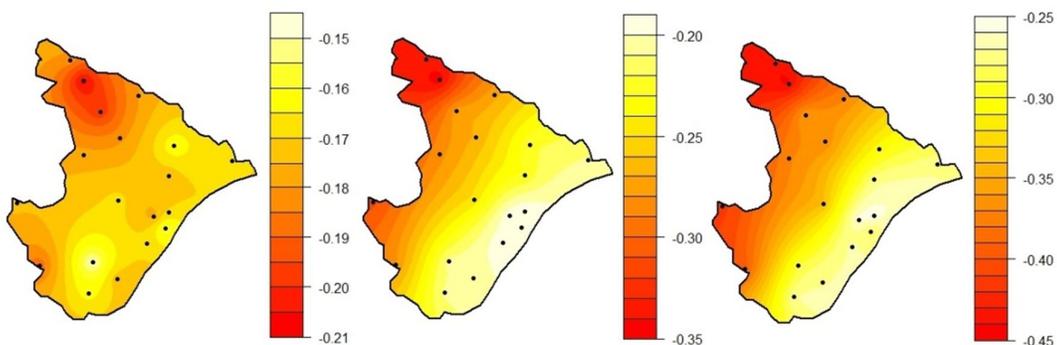


Figura 18. Valores do expoente β de lacunaridade das estações meteorológicas para os limiares de 0 mm, 5 mm e 10 mm de precipitação.

Através da análise de k-médias (utilizando os valores da lacunaridade e do expoente β) observa-se na Figura 19a que foram classificadas as estações de 1 a 10, 12 e 18 num mesmo grupo e as demais estações em outro grupo com limiar de precipitação de 0 mm. Quando avaliado os limiares de 5 e 10 mm de precipitação a análise de k-médias forneceu os seguintes grupos de estações: um grupo contendo as estações 1 a 5, 7 a 10 e 18, e um outro grupo com as demais estações meteorológicas, Figura 19b.

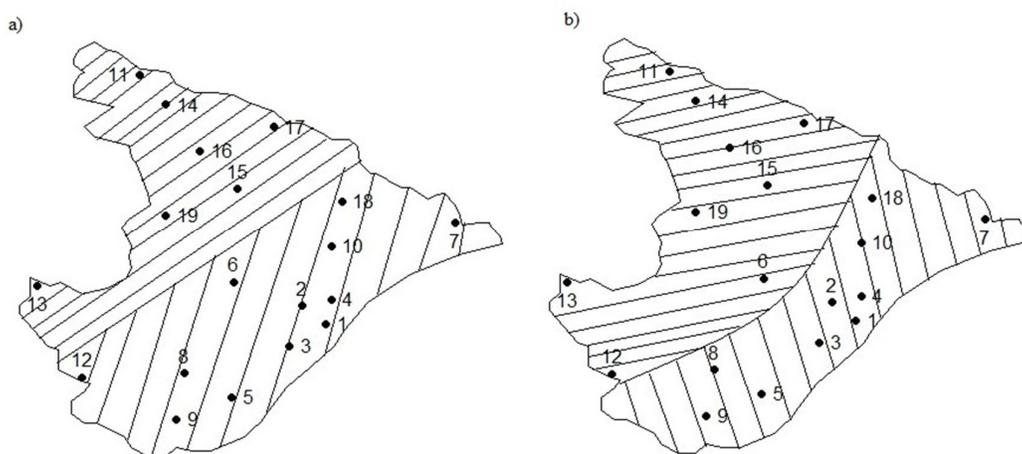


Figura 19. Agrupamento das estações meteorológicas em relação aos valores de lacunaridade para limiares de precipitação de (a - 0 mm; b - 5 e 10 mm).

Esta formação de dois grupos de estações meteorológicas se deve ao fato de que um dos grupos apresenta posição desfavorável à costa do litoral sergipano, pois estas estações sofrem com a escassez de chuva, fato também constatado por estarem localizadas na região semiárida do estado. Um resultado similar foi obtido aplicando equação de chuvas intensas (IDF) nos dados de chuva diária de 48 postos, desagregados com base em fatores de proporcionalidade, além das distribuições de Weibull e Gumbel. Comparando os valores especializados dos parâmetros da IDF com o mapa das regiões climáticas do estado de Sergipe, evidenciou-se que a região do agreste sergipano e o semiárido são aquelas nas quais ocorre uma quantidade menor de precipitação, diferente do que ocorre no litoral úmido [28].

3.2 VAZÃO DOS RIOS ATIBAIA E JAGUARI

Na análise das séries temporais diárias de vazão a lacunaridade é uma medida da distribuição dos segmentos, definidos como a sequência de dias consecutivos (lacunas) com valores de vazão abaixo do limiar selecionado. A estatística descritiva de vazão dos rios Atibaia e Jaguarí em relação aos períodos estudados estão dispostas na Tabela 7.

Tabela 7. Medidas descritivas das vazões (m³/s) das estações hidrológicas dos rios Atibaia e Jaguarí em relação aos anos estudados.

Estações	Mín	1ºquartil	Média	Mediana	3ºquartil	Max.	D.Padrão
3D-006							
1930-1997	3,48	16,23	28,36	22,39	34,47	241,80	19,44
1930-1974	4,14	17,6	30,0	24,01	36,39	241,79	19,52
1962-1974	4,14	16,05	27,31	21,48	32,22	241,79	18,99
1962-1997	3,48	14,33	25,88	20,08	30,82	241,80	18,93
1975-1997	3,48	13,45	25,06	19,34	29,94	184,37	18,86
3D-009							
1931-1998	1,98	15,44	30,54	22,97	37,41	538,90	24,90
1931-1980	4,96	17,83	33,91	25,92	41,31	538,88	25,90
1984-1998	1,98	8,98	18,99	8,98	21,50	127,12	16,55
1966-1998	1,98	12,37	25,86	19,33	32,00	473,90	22,17
1966-1980	4,97	17,75	32,54	26,13	39,36	473,93	24,75

Verifica-se na Tabela 7 que na estação 3D-006 a maior média da vazão se deu no período de 1930 – 1974 com 30 m³/s, enquanto que a menor média foi em relação ao período de 1975 – 1997 (25,06 m³/s) período pós-construção do sistema Cantareira.

Foram analisadas as séries completas (Atibaia: 1930 – 1997, Jaguari: 1931 – 1998) e os períodos antes (Atibaia: 1930 – 1974, Jaguari: 1931 – 1980) e depois (Atibaia: 1985 – 1997, Jaguari: 1984 – 1998) de construção dos reservatórios. Os limiares de vazão para cada estação são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Limiares de vazão das estações 3D-006 e 3D-009 dos rios Atibaia e Jaguari em relação aos períodos estudados.

3D-006	Limiar	3D-009	Limiar
1930 – 1997	16,23	1931 – 1998	15,44
1930 – 1974	17,6	1931 – 1980	17,83
1985 – 1997	13,45	1984 – 1998	8,98
1962 – 1997	14,33	1966 – 1998	12,37
1962 – 1974	16,05	1966 – 1980	17,75

O método da vazão média mínima de 7 dias com período de recorrência de 10 anos (${}_7Q_{10}$) é bastante utilizado em estudos de qualidade de água [68], entretanto Stalnaker [69] considera este método excessivamente baixo. Benetti e Lanna [70] afirma a existência de cerca de 70 métodos para determinação de vazão residuais, como não existe um consenso de um método para determinação de vazão residual optamos pela escolha do 1º quartil da série temporal da vazão como limiar para o cálculo da lacunaridade.

Observa-se na Tabela 9 os valores de lacunaridade das séries temporais de vazão do rio Atibaia, estação 3D-006, para os períodos antes (1930 – 1974) e depois (1975 – 1997) da construção do reservatório. Verifica-se que os valores de lacunaridade compreendido no período de 1930 – 1974 para todos os limiares 16,23 m³s⁻¹, 17,6 m³s⁻¹ e 13,45 m³s⁻¹ respectivamente, foram maiores do que em relação ao período 1975 – 1997 independente do tamanho de caixa, indicando uma distribuição mais uniforme de lacunas (períodos com vazão abaixo destes limiares) depois da construção do sistema Cantareira.

O valor do expoente β foi menor no período após a construção dos reservatórios independente do limiar utilizado, indicando a diminuição de heterogeneidade na dinâmica de vazão devido à regulação do fluxo hídrico nas micro bacias do Sistema Cantareira, ver Tabela 9.

Tabela 9. Valores de lacunaridade para diferentes tamanhos de janela e expoente β de lacunaridade para estação 3D-006 entre o período de 1930 – 1997.

Estação (limiar)	Tamanho de Janela							β
	2	4	8	16	32	64	128	
3D-006 (16.23)								
1930-1974	14.87	9.54	6.32	4.48	3.32	2.44	1.74	-0.51
1975-1997	8.37	5.43	3.79	2.83	2.24	1.82	1.49	-0.41
3D-006 (17.6)								
1930-1974	13.62	8.73	5.75	4.03	2.98	2.22	1.62	-0.50
1975-1997	8.36	5.34	3.68	2.73	2.15	1.76	1.46	-0.41
3D-006 (13.45)								
1930-1974	22.61	14.74	9.93	6.98	5.07	3.65	2.49	-0.52
1975-1997	10.38	6.76	4.67	3.41	2.57	2.00	1.57	-0.45

Este comportamento foi confirmado analisando a série com igual período de avaliação antes (1962-1974) e após (1975-1997) construção do sistema Cantareira: os valores de lacunaridade e do expoente β , diminuem após da construção de reservatórios, ver Tabela 10.

Tabela 10. Valores de lacunaridade para diferentes tamanhos de janela e expoente β para estação 3D-006 do rio Atibaia entre o período de 1962 – 1997.

Estação (limiar)	Tamanho de Janela							β
	2	4	8	16	32	64	128	
3D-006 (14,33)								
1962-1974	13.16	8.67	5.88	4.12	3.11	2.41	1.75	-0.48
1975-1997	9.15	5.96	4.13	3.04	2.35	1.88	1.51	-0.43
3D-006 (16,05)								
1962-1974	10.64	6.99	4.71	3.36	2.55	1.97	1.46	-0.47
1975-1997	8.56	5.55	3.86	2.87	2.26	1.83	1.49	-0.41
3D-006 (13,45)								
1962-1974	17.24	11.19	7.47	5.05	3.61	2.70	1.90	-0.52
1975-1997	10.38	6.76	4.67	3.41	2.57	2.00	1.57	-0.45

Na Tabela 11 observam-se os valores da lacunaridade e do expoente β para vazão do rio Jaguari (estação 3D-009) compreendido no período de 1931 – 1998. Os

resultados são similares aos obtidos para rio Atibaia. Para todos os limiares $15,44 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, $17,83 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e $8,98 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, respectivamente, os valores de lacunaridade diminuem no período 1984 – 1998 após construção dos reservatórios independente do tamanho de caixa, indicando uma distribuição mais uniforme dos períodos com vazão abaixo destes limiares.

Tabela 11. Valores de lacunaridade para diferentes tamanhos de janela e expoente β para estação 3D-009 do rio Jaguari entre o período de 1931 – 1998.

Estação (limiar)	Tamanho de Janela							β
	2	4	8	16	32	64	128	
3D-009 (15.44)								
1931-1980	21.52	13.18	8.30	5.73	4.15	2.95	2.03	-0.55
1984-1998	7.76	5.15	3.69	2.84	2.21	1.75	1.46	-0.40
3D-009 (17.83)								
1931-1980	18.18	11.07	7.21	4.99	3.61	2.58	1.75	-0.55
1984-1998	8.37	5.36	3.82	2.92	2.32	1.87	1.56	-0.39
3D-009 (8.98)								
1931-1980	133.29	84.54	55.24	36.61	22.96	14.16	8.64	-0.65
1984-1998	10.45	6.88	4.88	3.58	2.69	2.02	1.52	-0.45

O valor do expoente β também diminui após a construção dos reservatórios independente do limiar utilizado, indicando menor heterogeneidade na dinâmica da vazão. Este comportamento foi confirmado analisando a série com igual período de avaliação antes (1966 – 1980) e após (1984 – 1998) construção do sistema Cantareira, nos limiares $12,37 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, $17,75 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e $8,98 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, respectivamente, ver Tabela 12.

Tabela 12. Valores de lacunaridade para diferentes tamanhos de janela e expoente β para estação 3D-009 do rio Jaguari entre o período de 1966 – 1998.

Estação (limiar)	Tamanho de Janela							β
	2	4	8	16	32	64	128	
3D-009 (12.37)								
1966-1980	37.90	23.61	14.88	9.55	6.57	4.46	2.82	-0.62
1984-1998	8.52	5.53	3.91	2.98	2.35	1.82	1.44	-0.42
3D-009 (17.75)								
1966-1980	16.63	10.28	6.68	4.58	3.33	2.42	1.68	-0.62
1984-1998	8.40	5.37	3.81	2.92	2.31	1.87	1.56	-0.42
3D-009 (8.98)								
1966-1980	115.25	74.92	50.73	32.73	19.57	12.03	7.50	-0.66
1984-1998	10.45	6.88	4.88	3.58	2.69	2.02	1.52	-0.45

3.3 PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA NO ESTADO DE PERNAMBUCO

A estatística descritiva de precipitação e de temperatura horária do estado de Pernambuco no período de 01 de janeiro de 2008 a 01 de janeiro de 2011 estão apresentada nas Tabelas 13 e 14.

Tabela 13. Estatística descritiva da precipitação horária das estações do estado de Pernambuco utilizadas.

Estações	Min	1ºquartil	Média	Mediana	3ºquartil	Max.	D.Padrão
Recife	0,0	0,0	0,24	0,0	0,0	53,0	1,47
Arcoverde	0,0	0,0	0,11	0,0	0,0	55,2	1,00
Caruaru	0,0	0,0	0,08	0,0	0,0	33,6	0,73
Garanhuns	0,0	0,0	0,10	0,0	0,0	49,4	0,82
Surubim	0,0	0,0	0,08	0,0	0,0	38,8	0,70
Floresta	0,0	0,0	0,08	0,0	0,0	71,2	1,15
Ibimirim	0,0	0,0	0,08	0,0	0,0	48,0	0,96
S. Talhada	0,0	0,0	0,08	0,0	0,0	46,8	1,00
Cabrobó	0,0	0,0	0,08	0,0	0,0	45,4	1,02

Tabela 14. Estatística descritiva da temperatura horária das estações do estado de Pernambuco utilizadas.

Estações	Min	1ºquartil	Média	Mediana	3ºquartil	Max.	D.Padrão
Recife	17,5	23,7	25,9	26,0	27,9	33,9	2,7
Arcoverde	13,1	20,4	23,6	22,6	26,5	36,0	4,2
Caruaru	12,7	20,7	23,3	22,5	25,7	34,7	3,5
Garanhuns	14,4	18,9	21,4	20,5	23,3	32,7	3,3
Surubim	15,8	21,5	24,1	23,3	26,6	35,6	3,6
Floresta	16,9	24,0	27,2	26,7	30,3	38,4	4,0
Ibimirim	13,1	22,3	25,7	25,0	28,9	37,5	4,4
S. Talhada	15,3	22,7	25,9	25,4	29,0	37,2	4,1
Cabrobó	16,0	23,6	26,7	26,2	29,6	38,8	3,9

Observa-se na Tabela 13 que em média a estação de Recife apresentou maiores valores de precipitação horária com 0,24 mm. Todas as estações apresentaram 75% dos valores abaixo de 0,0 mm de precipitação horária. A maior precipitação horária se deu em relação à estação de Floresta com 71,2 mm. Observa-se na Tabela 14 que a estação de Cabrobó apresentou a maior temperatura com 38,8° C , enquanto que Garanhuns apresentou a menor média 32,7° C.

Nas Figuras 20, 21 e 22 observa-se a distribuição espacial dos valores da lacunaridade das séries temporais horárias de precipitação para limiares 1 mm, 5 mm e 10 mm, respectivamente. Observa-se que para tamanhos de janelas 2, 64 e 256 horas os valores de lacunaridade diminuem com o tamanho da janela independente do limiar e da estação avaliada. Avaliando o limiar de 1 mm, os valores de lacunaridade foram maiores nas estações que se localizam no sertão Pernambucano (Ibimirim, Floresta, Serra Talhada e Cabrobó) independente do tamanho de janela, que pode ser explicado pelo fato que nesta região a escassez de chuva é intensa durante o ano, Figura 20. Este mesmo comportamento pode ser observado para os limiares de 5 e 10 mm, Figuras 21 e 22.

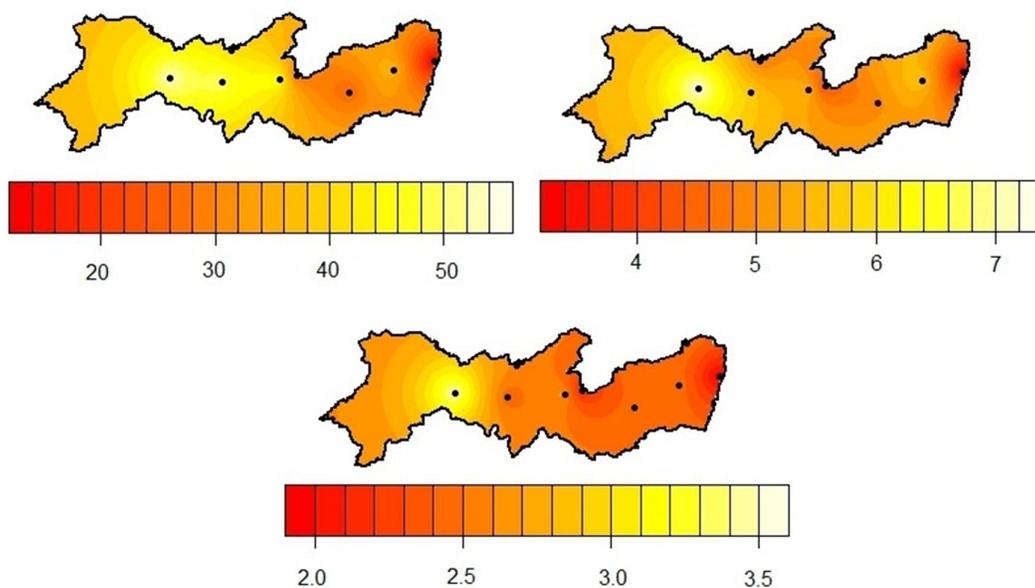


Figura 20. Lacunaridade empírica para tamanho de janela 2, 64 e 256 horas, respectivamente com limiar de 1 mm de precipitação.

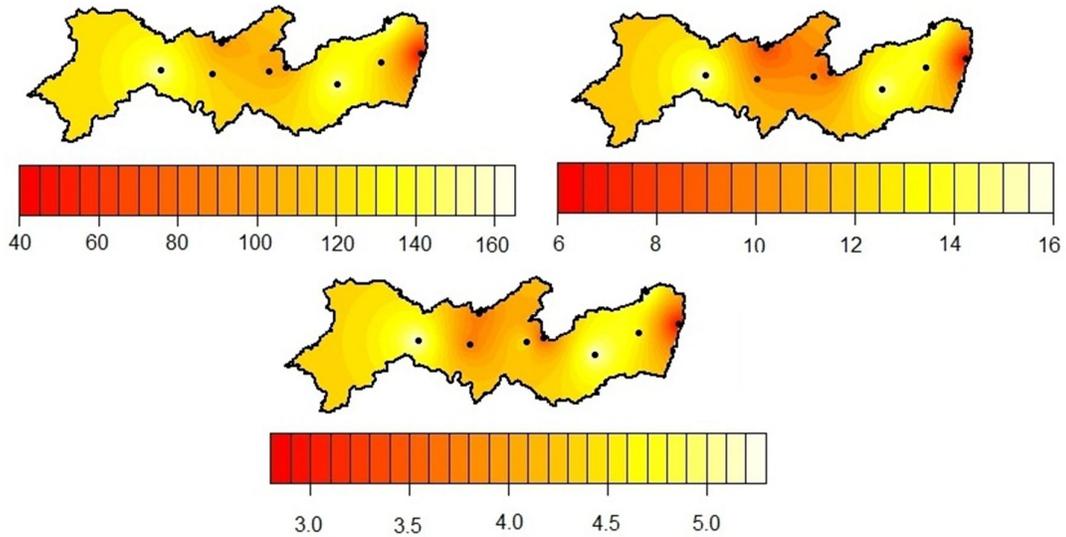


Figura 21. Lacunaridade empírica para tamanho de janela 2, 64 e 256 horas, respectivamente com limiar de 5 mm de precipitação.

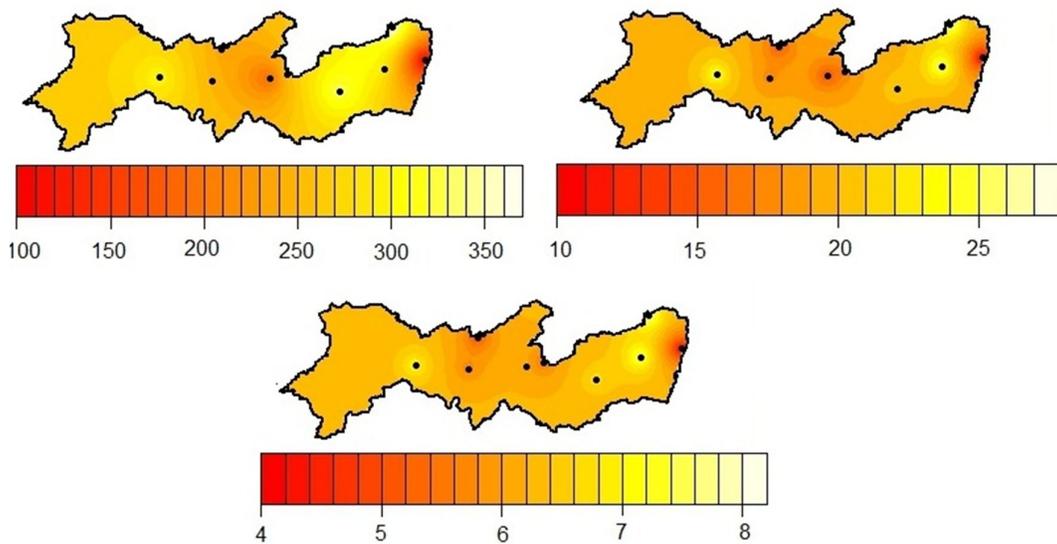


Figura 22. Lacunaridade empírica para tamanho de janela 2, 64 e 256 horas, respectivamente com limiar de 10 mm de precipitação.

Nas estações do sertão pernambucano os valores do expoente β de lacunaridade foram maiores do que em relação às estações localizadas no agreste e litoral do estado independente do limiar estudado, indicando maior heterogeneidade na dinâmica de precipitação nesta região, Figura 23.

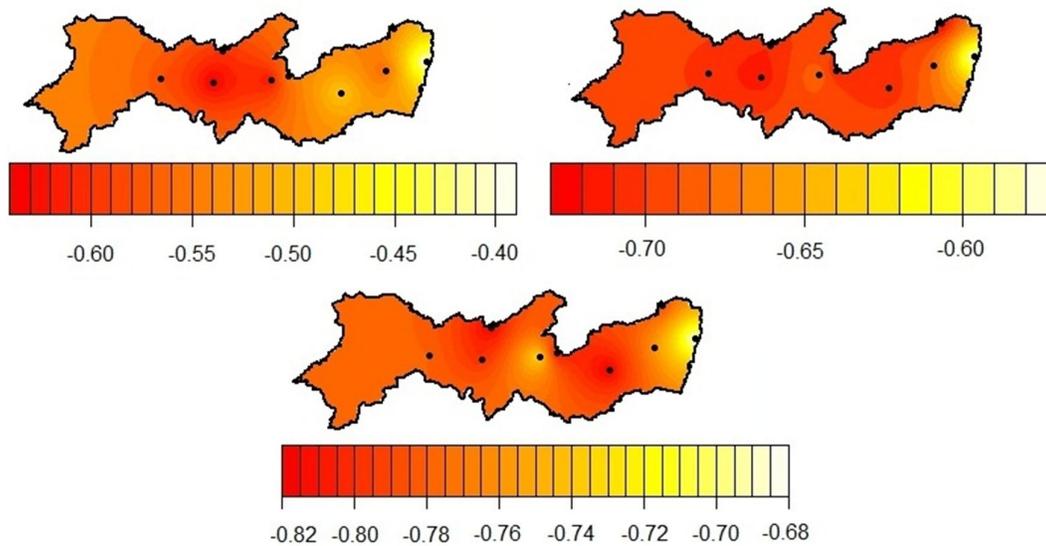


Figura 23. Expoente β de lacunaridade para os limiares de 1 mm, 5 mm e 10 mm de precipitação, respectivamente.

A formação do agrupamento apresentado na Figura 24 se deve ao fato que a estação de Recife apresenta um comportamento de precipitação diferenciado das demais estações, por ser uma estação localizada no litoral do estado de Pernambuco, o grupo formado pelas estações de Floresta, Ibimirim e Cabrobó é um grupo onde a precipitação anual é bastante escassa.

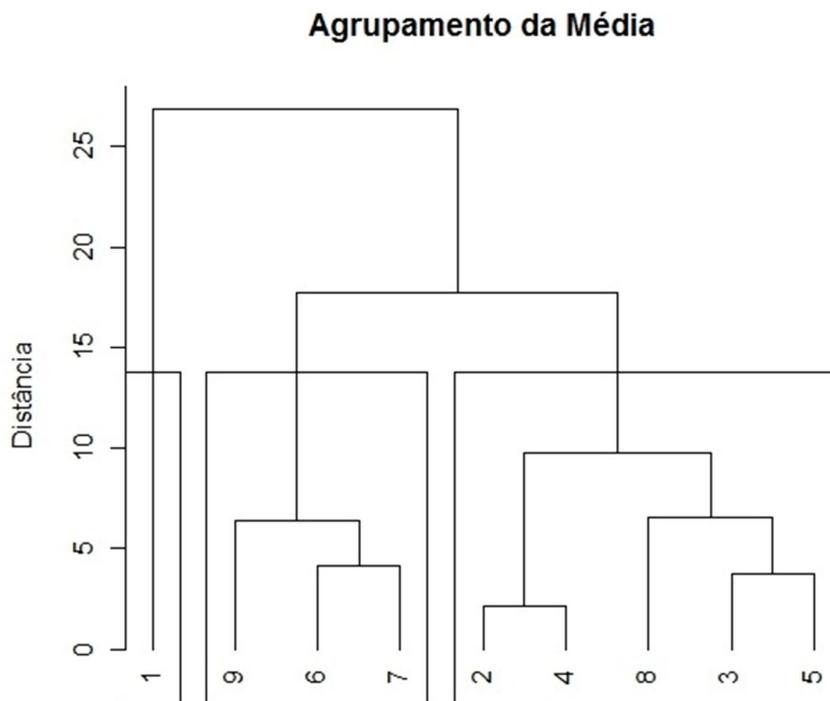


Figura 24. Dendrograma (utilizando os valores da lacunaridade para janelas 2, 64 e expoente β de lacunaridade) em relação às estações meteorológicas (1- Recife, 2- Arcoverde, 3- Caruaru, 4- Garanhuns, 5- Surubim, 6- Floresta, 7- Ibimirim, 8- Serra Talhada, 9- Cabrobó).

As Figuras 25 e 26 apresentam distribuição espacial dos valores da lacunaridade das series temporais horarias da temperatura para limiares 27°C e 32° respectivamente. Verifica-se que nas estações onde apresentam temperaturas bastante elevadas durante a maior parte do ano (Floresta, Ibimirim, Serra Talhada e Cabrobó) os valores de lacunaridade são menores do que as outras estações, independente do tamanho de janela e limiar avaliado. Este fato acontece, pois no sertão pernambucano o comportamento da temperatura é bastante homogêneo, diferentemente das outras estações onde o regime de temperatura apresenta uma maior variabilidade durante o ano.

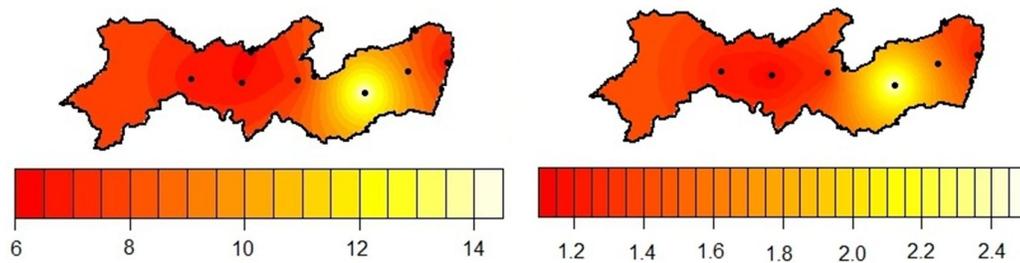


Figura 25. Lacunaridade empírica para tamanho de janela 2 e 64 dias, respectivamente com limiar de 27° C.

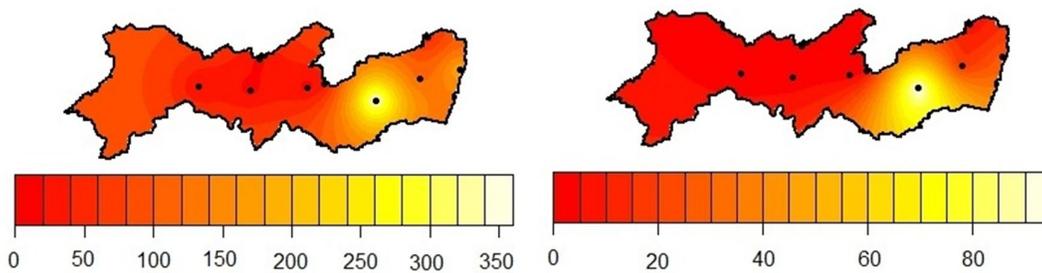


Figura 26. Lacunaridade empírica para tamanho de janela 2 e 64 dias, respectivamente com limiar de 32° C.

Os valores de expoente β são apresentados na Figura 27. Observa-se que nas estações onde apresentam temperaturas mais elevadas durante grande parte do ano (Floresta, Ibimirim, Serra Talhada e Cabrobó) os valores do expoente β de lacunaridade são maiores do que em relação às demais estações, independente do limiar avaliado.

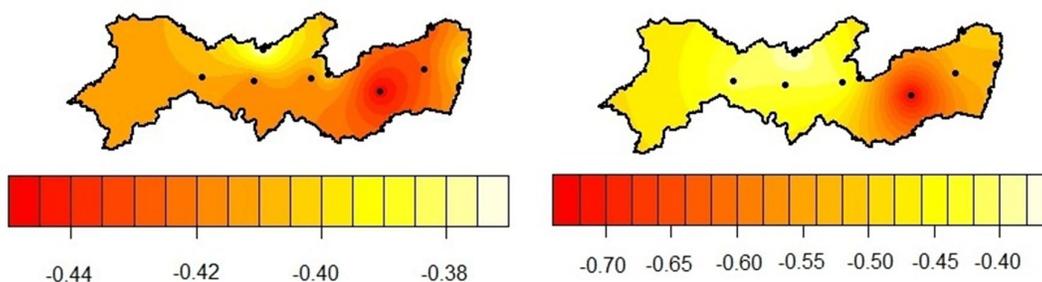


Figura 27. Expoente β de lacunaridade para os limiares de 27° C e 32° C, respectivamente.

Através da análise de agrupamento observamos a formação de três grupos de estações meteorológicas: um grupo formado pela estação de Recife, outro grupo formado pelas estações de Ibimirim, Floresta, Serra Talhada e Cabrobó e um terceiro grupo formado pelas demais estações, Figura 28.

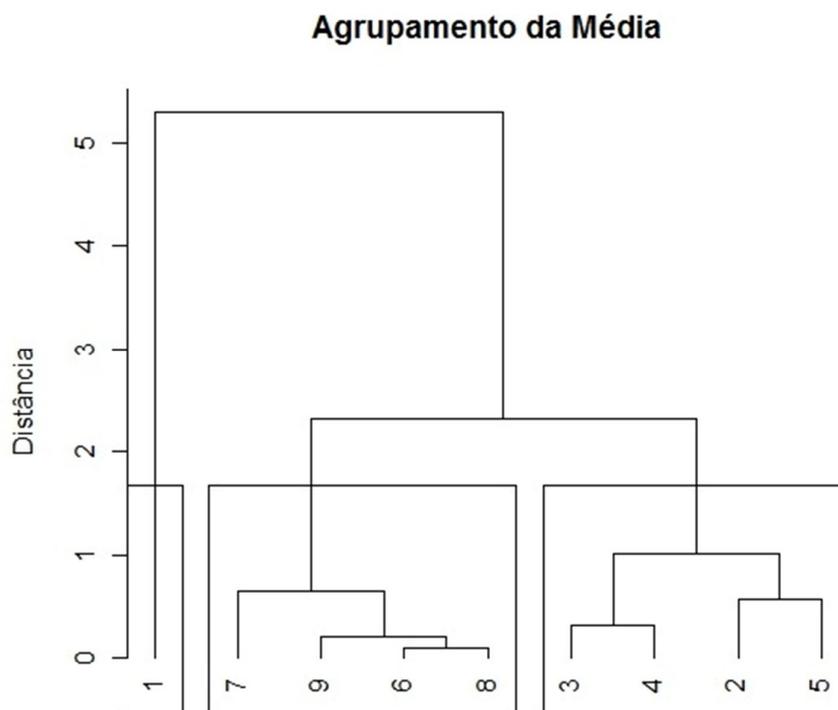


Figura 28. Dendrograma (utilizando os valores da lacunaridade para janelas 2, 64 e expoente β de lacunaridade) em relação às estações meteorológicas (1- Recife, 2- Arcoverde, 3- Caruaru, 4- Garanhuns, 5- Surubim, 6- Floresta, 7- Ibimirim, 8- Serra Talhada, 9- Cabrobó).

3.4 FOCOS DE QUEIMADAS NA AMAZÔNIA LEGAL

A estatística descritiva obtida referente aos dados de registros de queimadas detectadas para cada ano do período observado esta apresentada na Tabela 15. Verifica-se que no período 2002-2006 a média diária do número de queimadas foi maior em comparação ao período 2007-2011 como consequência da seca em Roirama em 2003 e a seca em 2005 que afetou os estados de Rondônia, Acre e Amazonas [71-72].

Tabela 15. Medidas descritivas dos focos diários de queimadas na Amazônia Legal em relação aos anos avaliados.

Estações	Min	1º quartil	Média	Mediana	3º quartil	Max.	Desvio Padrão
2000	0,0	2,3	94,7	24,0	92,0	1151,0	180,6
2001	0,0	4,0	129,0	32,0	149,0	1381,0	208,8
2002	0,0	11,0	231,8	67,0	291,0	2416,0	384,9
2003	0,0	21,0	203,2	88,0	255,0	2017,0	284,2
2004	0,0	13,0	272,1	71,5	350,0	2914,0	445,7
2005	0,0	7,0	261,8	44,0	247,0	3279,0	488,8
2006	0,0	5,0	142,7	25,0	116,0	2309,0	297,2
2007	0,0	0,0	78,2	4,0	34,0	1415,0	222,3
2008	0,0	2,3	95,2	17,0	95,0	1209,0	177,7
2009	0,0	0,0	49,1	8,0	45,0	478,0	92,5
2010	0,0	0,0	94,5	5,0	38,0	2619,0	263,4
2011	0,0	0,0	76,3	13,0	84,0	1001,0	140,8
2012	0,0	11,0	144,9	33,5	161,8	1738,0	245,8
2013	0,0	9,0	97,9	33,0	100,0	1120,0	162,9

Na Tabela 16 observam-se os valores de lacunaridade da distribuição espacial de queimadas para cada ano durante o período estudado. Observa-se que para todos os anos o valor de lacunaridade aumenta com o aumento do tamanho de caixa indicando maior heterogeneidade na distribuição espacial de queimadas nas escalas maiores.

Tabela 16. Valores de lacunaridade para diferentes tamanhos de caixas nos anos de 2000 a 2013.

Anos	Tamanho de caixa (r)								β
	2	4	8	16	32	64	128	256	
2000	113,13	56,42	31,50	20,01	15,31	11,51	8,21	5,71	-0,58
2001	86,54	44,64	26,67	18,96	14,54	10,99	7,72	5,16	-0,54
2002	58,08	34,80	23,56	17,43	13,39	10,26	7,25	4,88	-0,48
2003	66,96	39,41	26,06	18,99	14,52	11,03	7,03	5,27	-0,50
2004	53,38	33,20	23,24	17,63	13,94	10,99	8,14	5,71	-0,43
2005	52,48	31,72	21,55	16,09	12,43	9,42	6,53	4,22	-0,49
2006	85,69	46,31	28,00	19,12	13,87	9,97	6,62	4,26	-0,59
2007	157,76	87,65	53,34	35,26	24,01	15,95	9,09	5,46	-0,67
2008	112,31	56,19	32,51	21,24	14,86	10,63	7,11	4,47	-0,63
2009	197,02	87,75	45,39	28,13	19,53	13,52	8,31	5,19	-0,71
2010	131,11	74,25	47,75	34,43	25,90	19,24	12,88	6,71	-0,56
2011	124,21	55,47	28,20	16,30	10,31	6,82	4,59	3,18	-0,74
2012	79,61	41,40	24,30	15,64	10,54	7,08	4,68	3,16	-0,65
2013	97,83	43,12	22,20	13,59	9,23	6,44	4,38	3,00	-0,69

Verifica-se ainda que no período 2002-2006 o valor da lacunaridade foi menor (com menor expoente β) indicando uma distribuição espacial mais homogênea, enquanto que os maiores valores de lacunaridade (com maior expoente β) no período 2007-2011 indicam que as queimadas foram mais concentradas espacialmente com ampla distribuição de tamanhos de lacunas.

Nas Tabelas 17 e 18 observam-se os valores de lacunaridade da distribuição espacial de queimadas na estação chuvosa e estação de seca, para cada ano durante o período estudado. Na estação chuvosa (janeiro-junho) observa-se que os valores de lacunaridade foram maiores do que em relação ao período de seca (julho-dezembro), este fato pode ter sido ocasionado pela falta de queimadas no período de chuva.

Tabela 17. Valores de lacunaridade para diferentes tamanhos de caixas na estação chuvosa (janeiro-junho) nos anos de 2000 a 2013.

Anos	Tamanho de caixa(r)								β
	2	4	8	16	32	64	128	256	
2000	887,72	469,28	256,06	158,90	108,49	76,14	46,81	22,94	-0,71
2001	539,85	200,36	164,99	116,39	89,65	66,59	41,88	20,60	-0,58
2002	486,79	271,94	165,35	110,69	78,09	56,40	36,97	19,42	-0,62
2003	371,22	215,65	140,05	99,03	68,17	50,46	31,23	16,42	-0,60
2004	382,43	227,74	147,32	99,59	73,33	56,50	38,38	21,11	-0,56
2005	742,70	333,08	154,37	78,13	46,39	31,99	21,66	13,04	-0,81
2006	1399,13	635,11	286,19	130,84	67,25	39,57	24,13	13,96	-0,95
2007	806,84	391,63	210,13	131,51	94,52	64,98	37,20	18,71	-0,72
2008	1671,38	614,63	237,28	100,64	50,14	28,95	17,40	10,32	-1,04
2009	2328,04	965,56	406,73	169,97	79,54	42,86	25,36	15,05	-1,05
2010	1636,97	651,83	265,91	112,78	51,94	30,37	17,95	10,78	-1,04
2011	3511,63	1440,47	573,94	228,47	92,52	46,65	26,99	15,97	-1,13
2012	952,85	356,80	136,65	60,52	35,07	24,72	17,75	12,15	-0,88
2013	886,76	308,97	112,44	50,32	30,23	21,95	16,04	10,55	-0,88

Tabela 18. Valores de lacunaridade para diferentes tamanhos de caixas na estação seca (julho-dezembro) nos anos de 2000 a 2013.

Anos	Tamanho de caixa (r)								β
	2	4	8	16	32	64	128	256	
2000	126,53	60,37	32,02	20,21	14,44	10,62	7,44	5,07	-0,63
2001	99,84	49,42	27,91	18,79	13,86	10,13	6,94	4,62	-0,60
2002	63,24	36,96	24,41	17,73	13,41	10,11	6,95	4,56	-0,51
2003	76,85	43,24	27,13	18,94	14,15	10,66	7,56	5,12	-0,53
2004	57,89	34,54	23,18	17,05	13,15	10,12	7,36	5,13	-0,47
2005	55,31	33,38	22,65	16,88	13,01	9,80	6,73	4,26	-0,49
2006	90,05	48,53	29,29	20,02	14,51	10,38	6,84	4,34	-0,59
2007	191,45	106,94	65,07	42,65	28,43	18,54	11,50	6,10	-0,68
2008	119,02	59,65	34,50	22,53	15,74	11,26	7,50	4,65	-0,63
2009	212,67	93,48	47,81	29,75	20,80	14,40	8,71	5,32	-0,71
2010	140,48	79,87	51,50	37,24	28,02	20,75	13,80	6,97	-0,56
2011	128,06	56,90	28,84	16,66	10,49	6,89	4,58	3,13	-0,74
2012	84,99	44,38	26,10	16,73	11,17	7,38	4,79	3,16	-0,66
2013	107,08	47,27	24,35	14,81	9,93	6,81	4,52	3,02	-0,70

Através da análise de covariância (ANCOVA) verifica-se que os expoentes β de lacunaridades são maiores nos períodos chuvosos do que a estação seca independente do ano avaliado, Figuras 29 a 42.

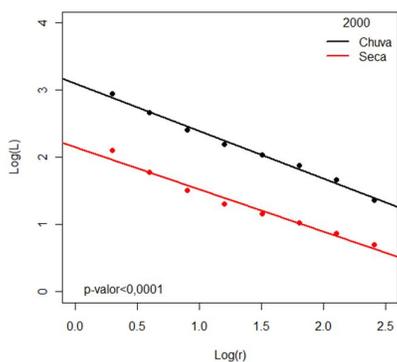


Figura 29. Lacunaridade empírica de focos de calor nas estações de chuva e seca no ano de 2000.

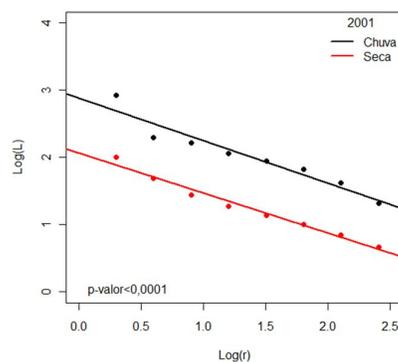


Figura 30. Lacunaridade empírica de focos de calor nas estações de chuva e seca no ano de 2001.

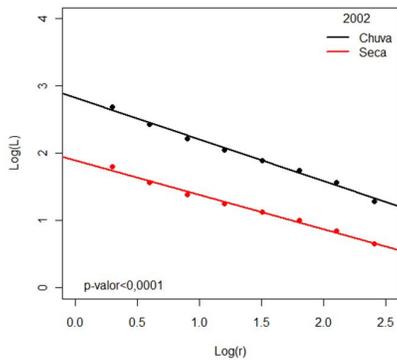


Figura 31. Lacunaridade empírica de focos de calor nas estações de chuva e seca no ano de 2002.

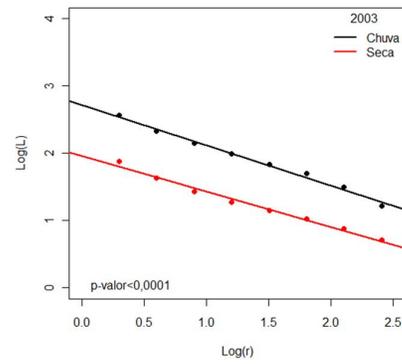


Figura 32. Lacunaridade empírica de focos de calor nas estações de chuva e seca no ano de 2003.

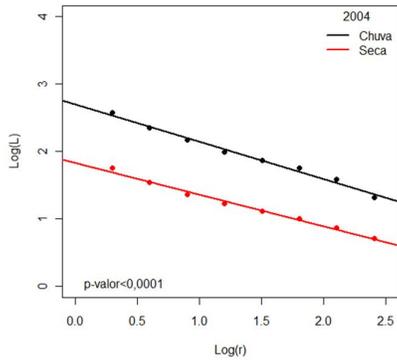


Figura 33. Lacunaridade empírica de focos de calor nas estações de chuva e seca no ano de 2004.

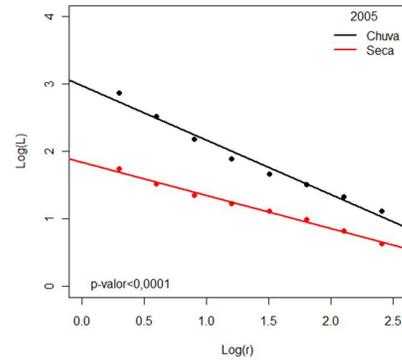


Figura 34. Lacunaridade empírica de focos de calor nas estações de chuva e seca no ano de 2005.

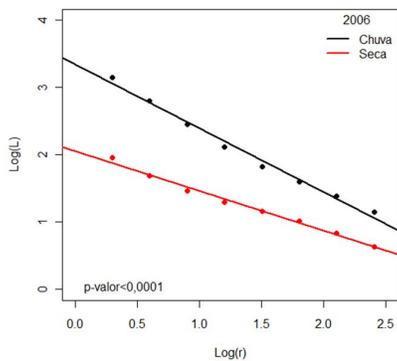


Figura 35. Lacunaridade empírica de focos de calor nas estações de chuva e seca no ano de 2006.

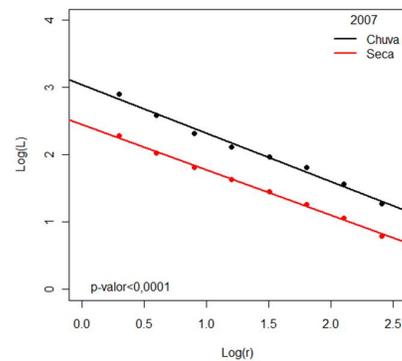


Figura 36. Lacunaridade empírica de focos de calor nas estações de chuva e seca no ano de 2007.

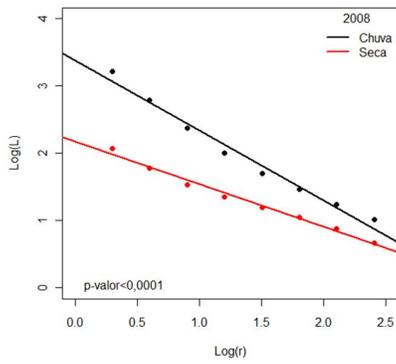


Figura 37. Lacunaridade empírica de focos de calor nas estações de chuva e seca no ano de 2008.

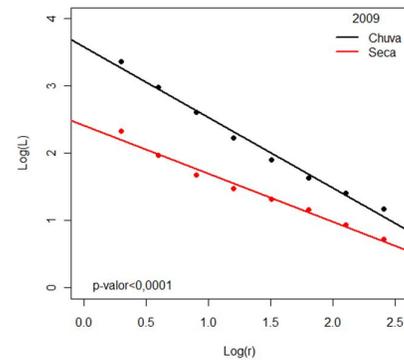


Figura 38. Lacunaridade empírica de focos de calor nas estações de chuva e seca no ano de 2009.

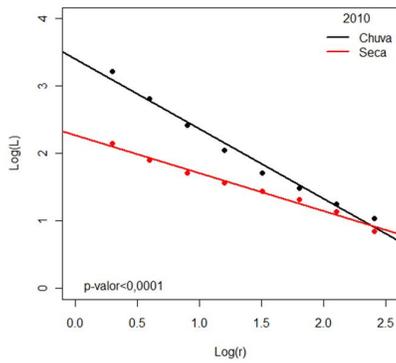


Figura 39. Lacunaridade empírica de focos de calor nas estações de chuva e seca no ano de 2010.

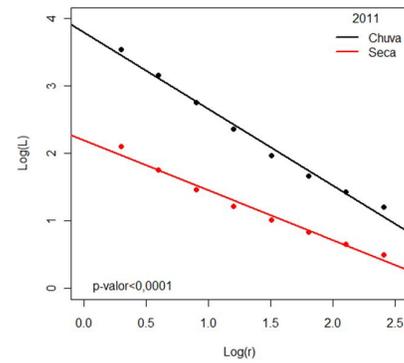


Figura 40. Lacunaridade empírica de focos de calor nas estações de chuva e seca no ano de 2011.

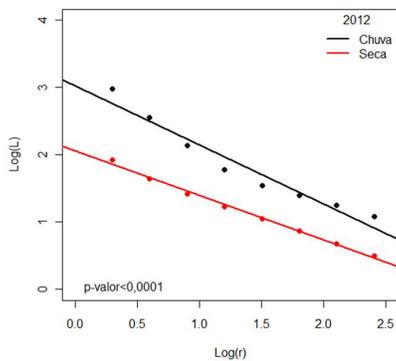


Figura 41. Lacunaridade empírica de focos de calor nas estações de chuva e seca no ano de 2012.

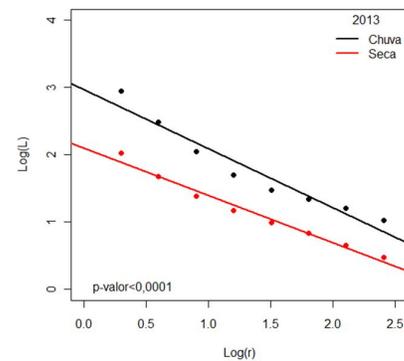


Figura 42. Lacunaridade empírica de focos de calor nas estações de chuva e seca no ano de 2013.

Através da análise de agrupamento do método de Ward (utilizando os valores da lacunaridade e expoente β) verifica-se de fato a existência de três grupos, um grupo formado de todos os períodos secos e outros dois grupos de todos os períodos chuvosos, um formado pelos anos de 2006 e 2008 a 2011 períodos onde apresentaram menores registros de queimadas em relação aos demais anos, e o segundo grupo de estações chuvosas formado pelos anos de 2000 a 2005, 2007, 2012 e 2013, Figura 43.

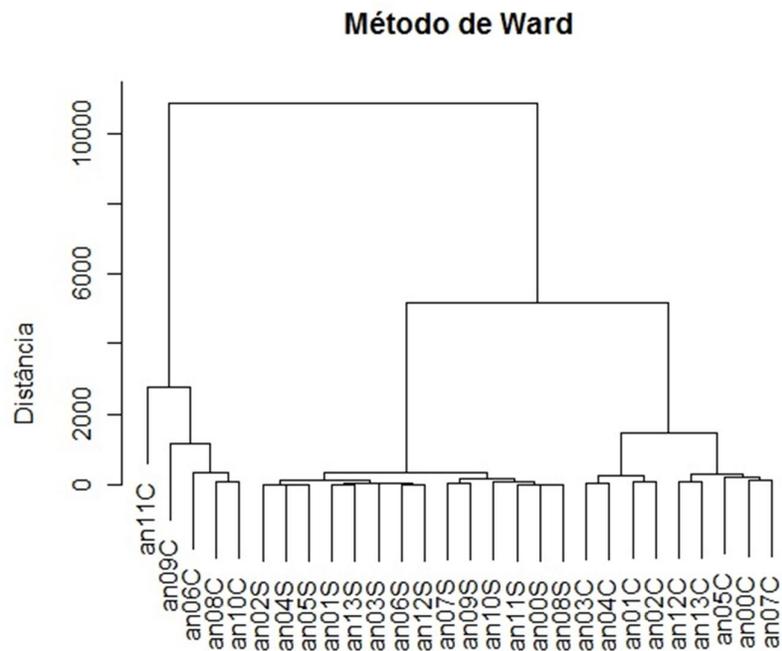


Figura 43. Agrupamento dos valores de lacunaridade para estações secas e chuvosas dos anos avaliados.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho aplicamos análise de lacunaridade nos fenômenos agroambientais: dinâmica temporal das variáveis climáticas: precipitação, temperatura, vazão do rio e distribuição espacial de focos de queimadas. Foram analisadas as séries temporais diárias da precipitação no estado de Sergipe, séries temporais horárias da precipitação e da temperatura no estado de Pernambuco, vazão diária dos rios Atibaia e Jaguari e distribuição espacial anual e sazonal das queimadas na Amazônia Legal.

Utilizando os valores de lacunaridade e o expoente β de lacunaridade foi possível classificar dois padrões de precipitação no estado de Sergipe, um padrão formado pelas estações que se aproximam da costa sergipana e outro das estações que se localizam nas regiões do semiárido e agreste. Os valores grandes de lacunaridade observados nas regiões do semiárido e agreste indicaram maior heterogeneidade na distribuição da duração das secas, enquanto que valores pequenos observados no litoral indicam maior concentração de precipitação com uma distribuição mais uniforme.

A análise de lacunaridade mostrou ser promissora para avaliação do impacto de atividade humana no regime natural da vazão do rio, no caso dos rios Atibaia e Jaguari a construção dos reservatórios do sistema Cantareira. Depois da construção dos reservatórios os valores da lacunaridade diminuíram em relação ao período antes da construção dos reservatórios indicando uma distribuição mais uniforme das lacunas (períodos com vazão abaixo de limiares escolhidos). O valor do expoente β também foi menor no período após a construção dos reservatórios independente do limiar utilizado, indicando a diminuição de heterogeneidade da dinâmica da vazão devido à regulação do fluxo hídrico nas duas micro bacias do sistema Cantareira.

Os resultados do agrupamento (usando os valores da lacunaridade e do expoente β) mostraram que o método de lacunaridade pode ser usado para identificar as regiões geográficas com comportamento temporal característico da precipitação e de temperatura.

No estado de Pernambuco os valores de lacunaridade de temperatura foram menores para as estações localizadas no sertão pernambucano (indicando um comportamento mais homogêneo), enquanto que para a precipitação os valores de lacunaridade foram maiores nas estações localizadas no sertão Pernambucano (indicando um comportamento mais heterogêneo).

A análise de lacunaridade para dados bidimensionais foi aplicada na distribuição espacial de focos de queimadas detectadas em Amazônia legal durante o período 2000-2013. Nos anos com maior número de queimadas os valores de lacunaridade foram menores (indicando um comportamento espacial mais homogêneo), enquanto nos anos com menor número das queimadas os valores de lacunaridade foram maiores (indicando um comportamento espacial mais heterogêneo). Os resultados do agrupamento mostram que o método de lacunaridade (avaliando a heterogeneidade da distribuição espacial de queimadas) pode ser útil em identificação das estações seca e chuvosa.

Baseado nos resultados deste trabalho pode se concluir que a análise de lacunaridade é um método promissor em estudos de ciências agrárias e ambientais, e pode fornecer as novas informações sobre o comportamento temporal e espacial, como fragmentação dos períodos chuvosos e identificação das regiões geográficas caracterizadas pelo regime específico de chuva, fragmentação espacial das áreas afetadas pelos incêndios florestais e alterações no regime da vazão de rios causadas pela atividade humana.

Os resultados obtidos com este método podem ser úteis em planejamento de uso de água nas bacias hidrográficas dentro dos limites definidos pelo funcionamento do ecossistema, em planejamento das atividades agrícolas e desenvolvimento de estratégias para diminuir as consequências de fenômenos climáticos extremos (seca, cheia) e assim contribuir ao melhoramento da qualidade de vida da população e desenvolvimento sustentável.

Como trabalhos futuros podemos propor o uso de análise de lacunaridade em outros estudos agroambientais como distribuição espacial das espécies das árvores, porosidade de solo, distribuição espacial de tipos de solo, cobertura vegetal e cobertura de solo.

REFERÊNCIAS

- [1] BAK, P. **How Nature Works. The Science of Self-Organized Criticality**, Springer-Verlag, New York USA, 1996.
- [2] MANDELBROT, B. B. **The Fractal Geometry of Nature**. W. H. Freeman, New York, 1982.
- [3] HOEKSTRA, A.G.; KROC, J.; SLOOT, P. M. A. **Simulating complex systems by cellular automata**, Springer, 2010.
- [4] BARRAT, A.; BARTHELEMY, M.; VESPIGNANI, A. **Dynamical processes on complex networks**. Cambridge University Press, New York USA, 2008.
- [5] http://www.nsf.gov/geo/ere/ereweb/ac-ere/acere_synthesis_rpt_summary.pdf
- [6] DIAS, F.L.F.; MAZZA, J.A.; MATSUOKA, S.; PERECIN, D.; MAULE, R.F. Produtividade da cana-de-açúcar em relação a clima e solos da região nordeste do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 627-634, 1999.
- [7] RODRIGUES, M.L.G.; FRANCO, D.; SUGAHARA, S. Climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 22, n.2, p.135-151, 2004.
- [8] BENICIO, R.B.; STOSIC, T.; FIGUEIREDO, P.H.; STOSIC, B.D. Multifractal behavior of wild-land and forest fire time series in Brazil. **Physica A**, v. 392, p. 6367–6374, 2013.
- [9] BEZERRA, A.N.; PEZZI, L.P.; KAYANO, M.T. Esquema estatístico de combinação e correção de previsões climáticas - ECCOCLIM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.23, n.3, p.347-359, 2008.

- [10] SILVA, J.W.; GUIMARÃES, E.C.; TAVARES, M. Variabilidade temporal da precipitação mensal e anual na estação climatológica de Uberaba-MG. **Ciências e Agrotecnologia**, v.27, p.665-674, 2003.
- [11] ARAÚJO, W.F.; JÚNIOR, A.S.A.; MEDEIROS, R.D.; SAMPAIO, R.A. Precipitação pluviométrica mensal provável em Boa Vista, estado de Roraima, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, p. 563-567, 2001.
- [12] ARAÚJO, W.S.; BRITO, J.I.B. Índices de tendências de mudanças climáticas para os estados da Bahia e Sergipe por meio de índices pluviométricos diários e sua relação com TSM do pacífico e atlântico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.26, n.4, 541 - 554, 2011
- [13] ALEXANDER, L.V.; ZHANG, X.; PETERSON, T.C.; CAESAR, J.; GLEASON, B.; KLEIN TANK, A.M.G.; HAYLOCK, M.; COLLINS, D.; TREWIN, B.; RAHIMZADEH, F.; TAGIPOUR, A.; RUPA KUMAR, K.; REVADEKAR, J.; GRIFFITHS, G.; VINCENT, L.; STEPHENSON, D.B.; BURN, J.; AGUILAR, E.; BRUNET, M.; TAYLOR, M.; NEW, M.; ZHAI, P.; RUSTICUCCI, M.; VAZQUEZ-AGUIRRE, J.L. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. **Journal of Geophysical Research**, v.111, D05109, p.1-22, 2006.
- [14] MAYOR, A.G.; BAUTISTA, S.; LLOVET, J.; BELLOT, J. Post-fire hydrological and erosional responses of a Mediterranean landscape: Seven years of catchment-scale dynamics. **CATENA**, v.71, p.68-75, 2007.
- [15] MATRICARDI, E.A.T.; SKOLE, D.L.; PEDLOWSKI, M.A.; CHOMENTOWSKI, W.; FERNANDES, L.C. Assessment of tropical forest degradation by selective logging and fire using Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, v.114, p.1117-1129, 2010.
- [16] REICH, P.B.; BAKKEN, P.; CARLSON, D.; FRELICH, L.E.; FRIEDMAN, S.K.; GRIGAL, D.F. Influence of logging, fire, and forest type on biodiversity and productivity in southern boreal forests. **Ecology**, v.82, p.2731-2748, 2001.

[17] HONG, S.H.; MLADENOFF, D.J.; GUSTAFSON, E.J. Study of landscape change under forest harvesting and climate warming-induced fire disturbance. **Forest Ecology and Management**, v.155, p.257-270, 2002.

[18] RANDERSON, J.T.; LIU, H.; FLANNER, M.G.; CHAMBERS, S.D.; JIN, Y.; HESS, P.G.; PFISTER, G.; MACK, M.S.; WELP, L.R.; CHAPIN, F.S.; HARDEN, J.W.; GOULDEN, M.L.; LYONS, E.; NEFF, J.C.; SCHUUR, E.A.; ZENDER, C.S. The impact of boreal forest fire on climate warming. **Science**, v.17, p.1130-1132, 2006.

[19] RAMANATHAN, V.; CARMICHAEL, G. Global and regional climate changes due to black carbon. **Nature Geoscience**, v.1, p.221-227, 2008.

[20] BOWMAN, D.M.J.S.; BALCH, J.K.; ARTAXO, P.; BOND, W.J.; CARLSON, J.M.; COCHRANE, M.A.; D'ANTONIO, C.M.; DEFRIES, R.S.; DOYLE, J.C.; HARRISON, S.P.; JOHNSTON, F.H.; KEELEY, J.E.; KRAWCHUK, M.A.; KULL, C.A.; MARSTON, J.B.; MORITZ, M.A.; PRENTICE, I.C.; ROOS, C.I.; SCOTT, A.C.; SWETNAM, T.W.; VAN DER WERF, G.R.; PYNE, S.J. Fire in the Earth system. **Science**, v.324, p.481-484, 2009.

[21] PU, R.; LI, Z.; GONG, P.; CSISZAR, I.; FRASER, R.; HAO, W.M.; KONDRAGUNTA, S.; WENG, F. Development and analysis of a 12-year daily 1-km forest fire dataset across North America from NOAA/AVHRR data. **Remote Sensing of Environment**, v.108, p.198-208, 2007.

[22] CARMONA-MORENO, C.; BELWARD, A.; MALINGREAU, J.P.; HARTLEY, A.; GARCIA-ALEGRE, M.; ANTONOVSKIY, M.; BUCHSHTABER, V.; PIVOVAROV, V. Characterizing interannual variations in global fire calendar using data from Earth observing satellites. **Global Change Biology**, v.11, p.1537-1555, 2005.

[23] TANSEY, K.; GREGOIRE, J.M.; DEFOURNY, P.; LEIGH, R.; VAN BOGAERT, J.P.; BARTHOLOME, E. A new global multiannual (2000-2007) burnt area product at 1km resolution. **Geophysical Research Letter**, v.35, L01401, 2008.

- [24] ZHANG, W.H.; WOOSTER, M.J.; TUTUBALINA, O.; PERRY, G.L.W. Monthly burned area and forest fire carbon emission estimates for the Russian Federation from SPOT VGT. **Remote Sensing of Environment**, v.87, p.1-15, 2003.
- [25] LE PAGE, Y.; PEREIRA, J.M.C.; TRIGO, R.; CAMARA, C.; OOM, D.; MOTA, B. Global fire activity patterns (1996-2006) and climatic influence: na analysis using the World Fire Atlas. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v.8, p.1911-1924, 2008.
- [26] ARAGÃO, L.E.O.C.; MALHI, Y.; BARBIER, N.; LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y.; AANDERSON, L.; SAATCHI, S. Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazon. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v.363, p.1779-1785, 2008.
- [27] INPE (2015). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Queimadas project. Available online at: www.cptec.inpe.br/queimadas (ultimo acesso 08 de fevereiro de 2015).
- [28] ARAGÃO, R.; SANTANA, G.R.; COSTA, C.E.F.F.; CRUZ, M.A.S.; FIGUEIREDO, E.E.; SRINIVASAN, V.S. Chuvas intensas para o estado de Sergipe com base em dados desagregados de chuva diária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 243-252, 2013.
- [29] ARAGÃO, R.; ALMEIDA, J.A.P.; FIGUEIREDO, E.E.; SRINIVASAN, V.S. Mapeamento do potencial de erosão laminar na Bacia do Rio Japaratuba, SE, via SIG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 731-740, 2011.
- [30] MORAES, J.M.; PELLEGRINO, G.Q.; BALLESTER, M.V.; MARTINELLI, L.A.; VICTORIA, R.L.; KRUSCHE, A.V. Trends in Hydrological Parameters of a Southern Brazilian Watershed and its Relation to Human Induced Changes. **Water Resources Management**, v.12, p.295-311, 1998.
- [31] MORTATTI, J.; JUNIOR, M.J.B.; MILDE, L.C.E.; PROBST, J.L. Hidrologia dos rios Tietê e Piracicaba: séries temporais de vazão e hidrogramas de cheia. **Revista Ciência & Tecnologia**, v.12, p.55-67, 2004.

- [32] GROPPPO, J.D.; MILDE, L.C.E.; GUAMERO, M.E.; MORAES, J.M.; MARTINELLI, L.A. Análise de séries temporais de vazão e de precipitação na bacia do rio Piracicaba. **Revista de Ciência & Tecnologia**, v.8, p.109-117, 2001.
- [33] SILVA, A.O.; MOURA, G.B.A.; SILVA, E.F.F.; LOPES, F.M.O.; SILVA, A.P.N. Análise espaço-temporal da evapotranspiração de referência sob diferentes regimes de precipitação em Pernambuco. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.24, n.2, p.135-142, 2011.
- [34] IGNOTTI, E.; HACON, S.S.; SILVA, A.M.C.; JUNGER, W.L.; CASTRO, H. Efeitos das queimadas na Amazônia: método de seleção dos municípios segundo indicadores de saúde. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v.10, p.453-464, 2007.
- [35] GONÇALVES, K.S.; CASTRO, H.A.; HACON, S.S. As queimadas na região amazônica e o adoecimento respiratório. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 17, n. 6, p. 1523-1532, 2012.
- [36] VICSEK, T. **Fractal growth phenomena**. 2^a ed. Singapore: World scientific, p.488, 1993.
- [37] THEILLER, J. Estimating fractal dimension. **Journal Optical Society of America**, v.7, n.6, p.1055- 1073, 1990.
- [38] MANDELBROT, B. Measures of fractal lacunarity: Minkowski content and alternatives, **Progress in Probability**, v.37, p.15–42, 1995.
- [39] VOSS, R. **Random Fractals: characterization and measurement, Scaling Phenomena in Disordered Systems**, Plenum, New York, 1986.
- [40] DONG, P. Lacunarity for spatial heterogeneity measurement in GIS. **Geographic Information Sciences**, v.6, n.1, p.20–26, 2000.

- [41] GEFEN, Y.; MEIR, Y.; MALDELBROT, B.B.; AHARONY, A. Geometric implementation of hypercubic lattices with noninteger dimensionality by use of low lacunarity fractal lattices. **Physical Review Letters**, v.50, p.145-188, 1983.
- [42] PLOTNICK, R.E.; GARDNER, R.H.; O'NEILL, R.V. Lacunarity indices as measures of landscape texture. **Landscape Ecology**, v.8, p.201-211, 1993.
- [43] ALLAIN, C.; CLOITRE, M. Characterizing the lacunarity of random and deterministic fractal sets. **Physical Review A**, v.44, p.3552-3558, 1991.
- [44] PLOTNICK, R.E.; GARDNER, R.H.; HARGROVE, W.W.; PRESTERGAARD, K.; PERMUTTER, M. Lacunarity analysis: A general technique for the analysis of spatial patterns. **Physical Review E**, v.53, p.5461-5468, 1996.
- [45] LIN, B.; YANG, Z.R. A suggested lacunarity expression for Sierpinski carpets, **Journal Physics A: Mathematical and General**, v.19, n.2, p.L49-L52, 1986.
- [46] CHENG, S.C.; HUANG, Y.M. A novel approach to diagnose diabetes based on the fractal characteristics of retinal images. **Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on**, v.7, n.3, p.163-170, 2003.
- [47] LUCENA, L.R.R.; STOSIC, T. Utilização de lacunaridade para detecção de padrões de imagens de retinas humanas. **Revista de Estatística da Universidade Federal de Ouro Preto**, v. 3, p. 789-793, 2014.
- [48] YASAR, F.; AKQUNLU, F. Fractal dimension and lacunarity of dental radiographs. **Dentomaxillofacial Radiology**, v.34, p.261-267, 2005.
- [49] DOUGHERTY, G.; HENEBRY, G. M. Fractal signature and lacunarity in the measurement of the texture of trabecular bone in clinical CT images. **Medical Engineering & Physics**, v.23, p.369-380, 2001.

- [50] MALHI, Y.; ROMÁN-CUESTA, R.M. Analysis of lacunarity and scales of spatial in homogeneity of IKONOS images of Amazonian tropical forest canopies. **Remote Sensing of Environment**, v.112, p.2074–2087, 2008.
- [51] ROY, A.; PERFECT, E.; DUNNE, W.M.; ODLING, N.; KIM, J.W. lacunarity analysis of fracture network: Evidence of scale depended clustering. **Journal of Structural Geology**, v.32, p.1444-1449, 2010.
- [52] DU, G. A novel lacunarity estimation method applied to SAR image segmentation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.40, p.2687-2691, 2002.
- [53] VELAZQUEZ-CAMILO, O.; BOLAÑOS-REYNOSO, E.; RODRIGUEZ, E.; ALVAREZ-RAMIREZ, J. Characterization of cane sugar crystallization using image fractal analysis. **Journal of Food Engineering**, v.100, p.77-84, 2010.
- [54] MYINT, S.W.; LAM, N. A study of lacunarity-based texture analysis approaches to improve urban image classification. **Computers, Environment and Urban Systems**, v.29, p.501-523, 2005.
- [55] MARTINEZ, M.D.; LANA, X.; BURGUEÑO, A.; SERRA, C. Lacunarity, predictability and predictive instability of the daily pluviometric regime in the Iberian Peninsula. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v.14, p.109-121, 2007.
- [56] LANA, X.; MARTINEZ, M.D.; SERRA, C.; BURGUEÑO, A. Complex behaviour and predictability of the European dry spell regimes. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v.17, p.499-512, 2010.
- [57] MARTINEZ, M.D.; LANA, X.; BURGUEÑO, A.; SERRA, C. Predictability of the monthly North Atlantic Oscillation index based on fractal analysis and dynamics system theory. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v.17, p.93-101, 2010.
- [58] LUCENA, L.R.R.; CAMPOS, A.C.P. Análise de lacunaridade da precipitação de bacias hidrográficas do estado de São Paulo. **Biomatemática**, v. 24, p. 1-8, 2014.

- [59] LUCENA, L.R.R.; STOSIC, T.; CUNHA FILHO, M. Avaliação da precipitação diária do estado de Sergipe utilizando análise de lacunaridade. **Revista Brasileira de Biometria**, v.33, n.2, p.268-276, 2015.
- [60] LUCENA, L.R.R.; STOSIC, T.; CUNHA FILHO, M. Análise de lacunaridade de série temporal da vazão dos rios Atibaia e Jaguari. **Revista Brasileira de Biometria**, v.32, n.4, p.609-617, 2014.
- [61] LUCENA, L.R.R.; STOSIC, T. Temperatura do nordeste brasileiro via análise de lacunaridade. **Sigmae**, v.2, n.3, p.76-80, 2013.
- [62] HOWELL, D.C. **Statistical methods for psychology**. 7^a ed., Belmont: Cengage Wadsworth, 2009.
- [63] ADENBERG, M.R. **Cluster analysis for applications**. New York: Academic Press, 1973.
- [64] JOHNSON, R.A.; WICHERN, D.W. **Applied multivariate statistical analysis**. 4th ed. New Jersey: Prentice Hall, 1992.
- [65] MARDIA, K.V.; KENT, J.T.; BIBBY, J.M. **Multivariate analysis**, London, Academic Press, 1979.
- [66] BUSSAB, W.O.; MIAZAKI, E.S.; ANDRADE, D.F. **Introdução à análise de agrupamento**. São Paulo: Associação Brasileira de Estatística, 1990.
- [67] HARTIGAN, J.A.; WONG, M.A. Algorithm, as136: A k-means Clustering algorithm. **Applied statistics**, England, v.28, p. 100-108, 1979.
- [68] THOMANN, R.V.; MUELLER, J.A. **Principles of surface water quality modeling and control**. Harper Collins, New York, 1987.

[69] STALNAKER, C.; LAMB, B.L.; HEIRIKSEN, J.; BOVEE, K.; BARTHLOW, J. **The instream flow incremental methodology**. A primer for IFIM, Washington, D.C. 1995.

[70] BENETTI, A.D.; LANNA, A.E. Metodologias para determinação de vazões ecológicas em rios. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, p. 149-160, 2003.

[71] MARENGO, J.A.; NOBRE, C.A.; TOMASELLA, J.; OYAMA, M.D.; OLIVEIRA, G.S.; OLIVEIRA, R.; CAMARGO, H.; ALVES, L.M.; BROWN, I.F. The drought of Amazonia in 2005. **Journal of Climate**, v.21, p.495-516, 2008.

[72] MORTON, D.C.; DEFRIES, R.S.; RANDERSON, J.T.; GIGLIO, L.; SCHROEDER, W.; VAN DER WERF, G.R. Agricultural intensification increases deforestation fire activity in Amazonia. **Global Change Biology**, v.14, n.10, p.2262-2275, 2008.

ANEXO

**ARTIGO PUBLICADO NA REVISTA BRASILEIRA DE BIOMETRIA V.32,
N.4, P. 609-617 EM 03/12/2014**

ANÁLISE DE LACUNARIDADE DE SÉRIE TEMPORAL DA VAZÃO DOS RIOS ATIBAIA E JAGUARI

Leandro Ricardo Rodrigues de Lucena¹
Tatijana Stosic¹
Moacyr Cunha Filho¹

- **RESUMO:** Neste artigo aplicamos o método de lacunaridade nas séries temporais diárias de vazão das estações dos rios Atibaia e Jaguari para os períodos antes e depois construção dos reservatórios do sistema Cantareira (SABESP), responsável pela reversão interbacias (de bacia de rio Piracicaba) de $31\text{m}^3\text{s}^{-1}$ para abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Os resultados da análise de lacunaridade mostraram que esta metodologia é bastante eficaz na avaliação do impacto de atividade humana no regime natural da vazão do rio. Depois da construção dos reservatórios os valores de lacunaridade e do expoente β mostraram-se menores do que em relação ao período pré-construção do sistema Cantareira, indicando uma distribuição mais uniforme dos períodos com vazão abaixo dos limiares escolhidos e a diminuição de heterogeneidade na variação temporal da vazão.
- **PALAVRAS-CHAVE:** Lacunaridade, Vazão, Sistema Cantareira.

1 Introdução

O acelerado desenvolvimento urbano e agroindustrial de algumas regiões do Brasil tem provocado à degradação dos seus recursos hídricos em seus aspectos quantitativos e qualitativos. A região da bacia do rio Piracicaba (12.400 km^2), com aproximadamente 3.000.000 de habitantes, é um exemplo típico dessa situação preocupante (Mortatti et al., 2004). As principais causas de degradação da quantidade e da qualidade desses recursos são o aumento do consumo de água e das cargas de esgotos urbano e agroindustrial, as mudanças no uso da terra e a transferência de água interbacias (Moraes et al., 1998)

A bacia do rio Piracicaba é utilizada como fonte de abastecimento de 40 municípios de São Paulo, sendo que apenas 13 municípios possuem algum tipo de tratamento. As águas da bacia do Piracicaba também são usadas para o abastecimento industrial, irrigação de plantações, produção de energia elétrica (Mortatti et al., 2004).

Um fato bastante importante da bacia do rio Piracicaba foi a implantação do Sistema Cantareira (SABESP), responsável pela reversão interbacias de $31\text{m}^3\text{s}^{-1}$ para o abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo. O sistema Cantareira foi construído em duas etapas, a primeira iniciou-se em 1965 nos rios Juqueri, Atibaia e Cachoeira estendendo-se até 1975, a segunda etapa da construção do Sistema começou em 1976 e se estendeu até 1981 compreendendo os rios Jaguari e Jacaré (Groppo et al., 2001).

As áreas utilizadas para a construção do sistema Cantareira sofreram um forte impacto ambiental, gerado pelos processos de erosão mecânica, tal impacto gerou um intenso transporte de material sólido provocando a criação de voçorocas e assoreamento (Mortatti et al., 2004).

¹ Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, Departamento de Biometria e Estatística Aplicada, CEP: cep, Recife, PE, Brasil. E-mail: leandroricardo_est@yahoo.com.br / tstosic@gmail.com / moacyr2006@ibest.com.br /

As alterações da vazão causadas pelos fatores naturais e antrópicos podem influenciar vários processos como transporte de sedimentos (Gao et al., 2013), qualidade da água (Eheart, 1988) e o ecossistema da bacia hidrológica (Carlisle et al., 2011; Stromberg et al., 2007).

Durante as últimas décadas a bacia do rio Piracicaba foi fortemente afetada pela atividade humana (alterações em uso de solo, construção do Sistema Cantareira) cujos efeitos na hidrologia e ecologia da bacia foram intensivamente estudados (Moraes et al., 1998; Araújo et al., 2014; Azevedo et al. 2000; Krusche et al. 1997; Silva et al., 2008).

Neste trabalho avaliamos a influência do Sistema Cantareira na dinâmica da vazão dos rios Atibaia e Jaguari, utilizando a análise de lacunaridade. Esta metodologia foi recentemente utilizada em estudos de dinâmica de processos hidrológicos (Martinez et al., 2007; Lana et al., 2010). Comparamos a medida da lacunaridade para séries temporais diárias nos períodos antes e depois da construção dos reservatórios.

Os estudos anteriores relevaram a tendência crescente da precipitação anual para toda bacia, e a tendência decrescente da vazão para localizações próximas dos reservatórios (Moraes et al., 1998). Um estudo recente utilizando análise multifractal mostrou que as flutuações temporais da vazão também foram alteradas depois da construção dos reservatórios (Araújo et al., 2014).

2 Material e métodos

2.1 Dados

Foram utilizadas as séries originais diárias de vazão das estações: 3D-006 (Atibaia, latitude 22°58'59" e longitude 46°49'46") e 3D-009 (Jaguari, latitude 22°51'02" e longitude 46°46'47"). O sistema Cantareira construído para a transferência da água da bacia do rio de Piracicaba para Região Metropolitana de São Paulo (RMPS) inclui reservatórios no rio Atibaia (construção 1968 a 1974) e rio Jaguari (construção 1968 a 1974) (Moraes et. al., 1998). Foram analisadas séries temporais da vazão do rio Atibaia nos períodos de 1930 - 1974 e 1975 - 1997, antes e depois da construção do reservatório.

Para o rio Jaguari foram analisadas séries temporais da vazão nos períodos de 1931 - 1980 e 1984 - 1998, antes e depois de construção do reservatório. Os dados foram obtidos do site do DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica: <http://www.dae.sp.gov.br/>. Todas as análises foram realizadas utilizando o software R-project versão 2.13.1.

2.2 Lacunaridade

Mandelbrot (1982) introduziu uma medida chamada lacunaridade para analisar a distribuição do tamanho de lacunas dentro de um conjunto de dados. Valores grandes de lacunaridade implicam em grandes tamanhos de lacunas, enquanto que pequenos valores implicam em menores tamanhos de lacunas, o que sugere uma distribuição mais uniforme (Mandelbrot, 1982).

O conceito de lacunaridade foi originalmente desenvolvido para detecção de padrões de texturas de objetos fractais, mas pode ser generalizado para qualquer padrão espacial, incluindo aqueles com propriedades fractais e multifractais e pode ser usado tanto com os dados quantitativos quanto para dados binários e também em dimensões 1D, 2D e 3D (Plotnick, 1996). Este método foi amplamente utilizado em estudos em fisiologia (Dougherty et al., 2001), ecologia (Malhi e Román-Cuesta, 2008), porosidade do solo (Luo e Lin, 2009) hidrologia (Martinez et al., 2007; Lana et al., 2010) e processamento de imagem (Florindo e Bruno, 2012).

Vários métodos para o cálculo da lacunaridade foram desenvolvidos com o avanço computacional, entre eles destaca-se o algoritmo de deslizamento de caixa "gliding box" de Allain e Cloitre (Allain & Cloitre, 1991), descrito a seguir (para dados unidimensionais):

- i) Uma caixa de tamanho r é colocada na origem do banco de dados e o número s de sítios ocupados abaixo a um limiar é contado.

- ii) A caixa é movida ao longo de todo o conjunto de observações, e sua massa (numero dos sítios ocupados) é calculada.
- iii) A distribuição de probabilidade de massa de caixa e dada por

$$P(s,r) = n(s,r)/N(r) \quad (1)$$

onde, $n(s,r)$ e o numero das caixas do tamanho r com massa s e $N(r) = N - r + 1$ é o número total de caixas de tamanho r (N é o total de observações).

- iv) A lacunaridade para o tamanho de caixa r é definida por:

$$L(r) = M2 / [M1]^2 \quad (2)$$

onde, $M1 = \sum_{s=1}^r s * p(s,r)$ e $M2 = \sum_{s=1}^r s^2 * p(s,r)$ são o primeiro e o segundo momento da distribuição $P(s,r)$, respectivamente.

- v) A lacunaridade diminui com tamanho de caixa como uma lei de potência pode ser estimada por (Martinez et al., 2007).

$$L(r) = \alpha\beta \quad (3)$$

onde, o expoente $\beta < 0$ reflete a dinâmica do processo analisado.

Ilustraremos a seguir um exemplo onde a lacunaridade foi calculada para caixas de tamanhos 2 de registros de precipitação dos 50 primeiros dias consecutivos do ano de uma estação meteorológica hipotética. Os dados referentes aos 50 registros estão expressos na Figura 1, onde os pontos são os dias em que houve registro de chuva e os espaços em branco são os dias onde não houve registro de chuva.

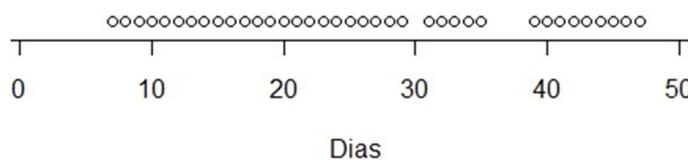


Figura 1- Registro de precipitação de uma determinada estação meteorológica hipotética nos primeiros 50 dias consecutivos do ano.

Na Tabela 1, observa-se a quantidade de caixas de tamanho dois com nenhum sítio ocupado, apenas um e os dois sítios ocupados, posteriormente o número de caixas e suas respectivas probabilidades de ocorrência de 0, 1 e 2 sítios ocupados, e por fim o cálculo do primeiro e segundo momento, encontrado assim um valor de lacunaridade de 1,2706. Este valor indica um comportamento bastante homogêneo dos registros de precipitação nos primeiros 50 dias analisado.

Tabela 1- Cálculo da lacunaridade para caixa de tamanho 2 dos 50 registros consecutivos de precipitação de uma estação meteorológica hipotética.

s	n(s,r)	P(s,r)	s*P(s,r)	s ² *P(s,r)	L(2)
0	9	0,1837	0	0	
1	6	0,1224	0,1224	0,1224	
2	34	0,6939	1,3878	2,7756	
			M1=1,5102	M2=2,898	
					1,2706

Na análise da vazão das estações 3D-006 e 3D-009 dos rios Atibaia e Jaguari, a lacunaridade é uma medida da distribuição dos segmentos, definidos como a sequência de dias consecutivos com valores de vazão igual ou superior a um limiar, e as lacunas, definidos como sequências de dias consecutivos com valores de vazão abaixo do limiar selecionado. Foram utilizados os seguintes limiares de vazão para cada estação, ver Tabela 2. O método da vazão média mínima de 7 dias com período de recorrência de 10 anos (7Q10) é bastante utilizado em estudos de qualidade de água (Thomann e Muller, 1987), entretanto Stalnaker et al. (1995) considera este método excessivamente baixo, Benetti e Lanna (2003) afirma a existência de cerca de 70 métodos para determinação de vazão residuais, como não existe um consenso de um método para determinação de vazão residual os autores optaram pela escolha do 1º quartil da série temporal da vazão como limiar para o cálculo da lacunaridade.

Tabela 2 – Limiares de vazão das estações 3D-006 e 3D-009 dos rios Atibaia e Jaguari em relação aos períodos estudados.

3D-006	Limiar	3D-009	Limiar
1930 – 1997	16,23	1931 – 1998	15,44
1930 – 1974	17,6	1931 – 1980	17,83
1975 – 1997	13,45	1984 – 1998	8,98
1962 – 1997	14,33	1966 – 1998	12,37
1962 – 1974	16,05	1966 – 1980	17,75

3 Resultados e discussão

Verifica-se na Tabela 3 que os valores de lacunaridade compreendido no período de 1930 – 1974 para todos os limiares $16,23 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, $17,6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e $13,45 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ respectivamente, foram maiores do que em relação ao período 1975 – 1997 independente do tamanho de caixa, indicando uma distribuição mais uniforme de lacunas (períodos com vazão abaixo destes limiares) depois da construção do sistema Cantareira.

O valor do expoente β foi menor no período após a construção dos reservatórios independente do limiar utilizado, indicando a diminuição de heterogeneidade na dinâmica de vazão devido à regulação do fluxo hídrico nas microbacias do Sistema Cantareira, ver Tabela 3.

Tabela 3 – Valores de lacunaridade para diferentes tamanhos de janela e expoente β para estação 3D-006 do rio Atibaia entre o período de 1930 – 1997.

Estação (limiar)	Tamanho de Janela							β
	2	4	8	16	32	64	128	
3D-006 (16.23)								
1930-1974	14,87	9,54	6,32	4,48	3,32	2,44	1,74	-0,51
1975-1997	8,37	5,43	3,79	2,83	2,24	1,82	1,49	-0,41
3D-006 (17.6)								
1930-1974	13,62	8,73	5,75	4,03	2,98	2,22	1,62	-0,50
1975-1997	8,36	5,34	3,68	2,73	2,15	1,76	1,46	-0,41
3D-006 (13.45)								
1930-1974	22,61	14,74	9,93	6,98	5,07	3,65	2,49	-0,52
1975-1997	10,38	6,76	4,67	3,41	2,57	2,00	1,57	-0,45

Este comportamento foi confirmado analisando a série com igual período de avaliação antes (1962-1974) e após (1975-1997) construção do sistema Cantareira: os valores de lacunaridade e do expoente β calculados utilizando os limiares $14,33 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, $16,05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e $13,45 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ respectivamente, diminuem após da construção de reservatórios, ver Tabela 4.

Tabela 4 – Valores de lacunaridade para diferentes tamanhos de janela e expoente β para estação 3D-006 do rio Atibaia entre o período de 1962 – 1997.

Estação (limiar)	Tamanho de Janela							β
	2	4	8	16	32	64	128	
3D-006 (14,33)								
1962-1974	13,16	8,67	5,88	4,12	3,11	2,41	1,75	-0,48
1975-1997	9,15	5,96	4,13	3,04	2,35	1,88	1,51	-0,43
3D-006 (16,05)								
1962-1974	10,64	6,99	4,71	3,36	2,55	1,97	1,46	-0,47
1975-1997	8,56	5,55	3,86	2,87	2,26	1,83	1,49	-0,41
3D-006 (13,45)								
1962-1974	17,24	11,19	7,47	5,05	3,61	2,70	1,90	-0,52
1975-1997	10,38	6,76	4,67	3,41	2,57	2,00	1,57	-0,45

A Tabela 5 mostra os valores da lacunaridade e do expoente β para vazão do rio Jaguari (estação 3D-009) compreendido no período de 1931 – 1998. Os resultados são similares aos obtidos para rio Atibaia. Para todos os limiares $15,44 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, $17,83 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e $8,98 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, respectivamente, os valores de lacunaridade diminuem no período 1984 – 1998 após construção dos reservatórios independente do tamanho de caixa, indicando uma distribuição mais uniforme dos períodos com vazão abaixo destes limiares. O valor do expoente β também diminui após a construção dos reservatórios independente do limiar utilizado, indicando menor heterogeneidade na dinâmica da vazão. Este comportamento foi confirmado analisando a série com igual período de avaliação antes (1966 – 1980) e após (1984 – 1998) construção do sistema Cantareira, e limiares $12,37 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, $17,75 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e $8,98 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, respectivamente, ver Tabela 6.

Tabela 5 – Valores de lacunaridade para diferentes tamanhos de janela e expoente β para estação 3D-009 do rio Jaguari entre o período de 1931 – 1998.

Estação (limiar)	Tamanho de Janela							β
	2	4	8	16	32	64	128	
3D-009 (15,44)								
1931-1980	21,52	13,18	8,30	5,73	4,15	2,95	2,03	-0,55
1984-1998	7,76	5,15	3,69	2,84	2,21	1,75	1,46	-0,40
3D-009 (17,83)								
1931-1980	18,18	11,07	7,21	4,99	3,61	2,58	1,75	-0,55
1984-1998	8,37	5,36	3,82	2,92	2,32	1,87	1,56	-0,39
3D-009 (8,98)								
1931-1980	133,29	84,54	55,24	36,61	22,96	14,16	8,64	-0,65
1984-1998	10,45	6,88	4,88	3,58	2,69	2,02	1,52	-0,45

Tabela 6 – Valores de lacunaridade para diferentes tamanhos de janela e expoente β para estação 3D-009 do rio Jaguari entre o período de 1966 – 1998.

Estação (limiar)	Tamanho de Janela							β
	2	4	8	16	32	64	128	
3D-009 (12,37)								
1966-1980	37,90	23,61	14,88	9,55	6,57	4,46	2,82	-0,62
1984-1998	8,52	5,53	3,91	2,98	2,35	1,82	1,44	-0,42
3D-009 (17,75)								
1966-1980	16,63	10,28	6,68	4,58	3,33	2,42	1,68	-0,62
1984-1998	8,40	5,37	3,81	2,92	2,31	1,87	1,56	-0,42
3D-009 (8,98)								
1966-1980	115,25	74,92	50,73	32,73	19,57	12,03	7,50	-0,66
1984-1998	10,45	6,88	4,88	3,58	2,69	2,02	1,52	-0,45

Conclusões

Neste artigo utilizamos a análise de lacunaridade para comparar a dinâmica da vazão do rio Atibaia, e rio Jaguari nos períodos antes e depois da construção do sistema Cantareira. Depois da construção dos reservatórios os valores da lacunaridade diminuírem em relação ao período antes da construção dos reservatórios indicando uma distribuição mais uniforme das lacunas (períodos com vazão abaixo de limiares escolhidos). O valor do expoente β também foi menor no período após a construção dos reservatórios independente do limiar utilizado, indicando a diminuição de heterogeneidade da dinâmica da vazão devido à regulação do fluxo hídrico nas duas micro bacias do Sistema Cantareira.

A metodologia utilizada neste trabalho mostrou ser promissora para avaliação do impacto de atividade humana no regime natural da vazão do rio, fornecendo as informações complementares sobre a distribuição dos períodos com vazão abaixo de níveis definidos em respeito do uso de água pelos humanos e pelo ecossistema ripário. Os resultados obtidos podem ser úteis em planejamento de uso de água nas bacias estudadas dentro dos limites definidos pelo funcionamento do ecossistema, e assim garantir desenvolvimento sustentável da região.

- *ABSTRACT: In this work we apply lacunarity analysis to compare the dynamics of daily stream flow temporal series in the Atibaia and Jaguari river basins, for the periods before and after the construction of Cantareira system which was built to export approximately $31\text{m}^3\text{s}^{-1}$ from Piracicaba river basin to the metropolitan region of São Paulo city. The results demonstrate the efficiency of lacunarity analysis in evaluation of human impact on natural river flow regime. After the construction of water reservoirs the values of lacunarity and exponent β decrease, indicating more uniform distribution of periods with stream flow below chosen thresholds, and less heterogeneity in temporal variability of stream flow.*
- *KEYWORDS: Lacunarity, Stream flow, Cantareira system.*

Referências

- ALLAIN, C.; CLOITRE, M. Characterizing the lacunarity of random and deterministic fractal sets. *Physical Review A*, v. 44, p. 3552-3558, 1991.
- ARAÚJO, L.S.; CUNHA FILHO, M.; STOSIC, B.; STOSIC, T. Avaliação do impacto humano na dinâmica das variáveis hidrológicas da bacia do rio Piracicaba através da análise multifractal. *Revista Brasileira de Biometria*, v.32, p.170-179, 2014.
- AZEVEDO, L.; GATES, T.; FONTANE, D.; LABADIE, J.; PORTO, R. Integration of water quantity and quality in strategic river basin planning. *Journal Water Resource Planning Management*, v.126 (2), p.85-97, 2000.
- BENETTI, A. D.; LANNA, A. E. Metodologias para determinação de vazões ecológicas em rios. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 8, p. 149-160, 2003.
- CARLISLE, D. M.; WOLOCK, D.M.; MEADOR, M. R. Alteration of stream flow magnitudes and potential ecological consequences: a multiregional assessment. *Frontiers in Ecology and the Environment*, v. 9, p. 264–270, 2011.
- DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.dae.sp.gov.br/>. Acesso em 13 de janeiro de 2013.
- DOUGHERTY, G.; HENEBRY, G. M. Fractal signature and lacunarity in the measurement of the texture of trabecular bone in clinical CT images. *Medical Engineering & Physics*, v. 23, p. 369-380, 2001.
- EHEART, J. W. Effects of stream flow variation on critical water quality for multiple discharges of decaying pollutants. *Water Resources Research*, v. 24, p. 1–8, 1988.
- FLORINDO, J. B.; BRUNO, O. M. Texture classification based on lacunarity descriptors. *Image and Signal Processing Lecture Notes in Computer Science*, v. 7340, p. 513-520, 2012.

GAO, P.; GEISSEN, V.; RITSEMA, C. J.; MU, X.-M.; WANG, F. Impact of climate change and anthropogenic activities on stream flow and sediment discharge in the Wei River basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 17, p. 961-972, 2013.

GROPPO, J.D.; MILDE, L.C.E.; GUAMERO, M.E.; MORAES, J.M.; MARTINELLI, L.A. Análise de séries temporais de vazão e de precipitação na bacia do rio Piracicaba. *Revista de Ciência & Tecnologia*, v.8, p. 109-117, 2001.

HOEFFEL, J.L.; FADINI, A.A.B.; MACHADO, M.K.; REIS, J.C. Trajetórias do Jaguarí – unidades de conservação, percepção ambiental e turismo: um estudo na APA do sistema Cantareira, São Paulo. *Ambiente & Sociedade*, v.11, p.131-148, 2008.

KRUSCHE, A. V.; GARVAIHO, F. P.; MORAES, J. M.; CAMARGO, P. B.; BALLESTER, M. V. R.; HOMINK, S.; MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L. Spatial and temporal water quality variability in the Piracicaba river basin. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 33, p. 1117-1123, 1997.

LANA, X.; MARTINEZ, M.D.; SERRA, C.; BURGUEÑO, A. Complex behaviour and predictability of the European dry spell regimes. *Nonlinear Processes in Geophysics*, v.17, p. 499-512, 2010.

LUO, L.; LIN, H. Lacunarity and fractal analyses of soil macropores and preferential transport using micro-x-ray Computed Tomography. *Vadose Zone Journal*, v. 8, p. 233-241, 2009.

MALHI, Y.; ROMÁN-CUESTA, R. M. Analysis of lacunarity and scales of spatial homogeneity in IKONOS images of Amazonian tropical forest canopies. *Remote Sensing of Environment*, v. 112, p. 2074-2087, 2008.

MANDELBROT, D. *The fractal geometry of nature*. Freeman, San Francisco, USA, 1982.

MARTINEZ, M.D.; LANA, X.; BURGUEÑO, A.; SERRA, C. Lacunarity, predictability and predictive instability of the daily pluviometric regime in the Iberian Peninsula. *Nonlinear Processes in Geophysics*, v.14, p.109-121, 2007.

MARTINEZ, M.D.; LANA, X.; BURGUEÑO, A.; SERRA, C. Predictability of the monthly North Atlantic Oscillation index based on fractal analysis and dynamics system theory. *Nonlinear Processes in Geophysics*, v.17, p.93-101, 2010.

MORAES, J.M.; PELLEGRINO, G.Q.; BALLESTER, M.V.; MARTINELLI, L.A.; VICTORIA, R.L.; KRUSCHE, A.V. Trends in Hydrological Parameters of a Southern Brazilian Watershed and its Relation to Human Induced Changes. *Water Resources Management*, v. 12, p. 295–311, 1998.

MORTATTI, J.; JUNIOR, M.J.B.; MILDE, L.C.E.; PROBST, J.L. Hidrologia dos rios Tietê e Piracicaba: séries temporais de vazão e hidrogramas de cheia. *Revista Ciência & Tecnologia*, v.12, p. 55-67, 2004.

PLOTNICK, R. E.; GARDNER, R. H.; HARGROVE, W.W.; PRESTERGAARD, K.; PERMUTTER, M. Lacunarity analysis: A general technique for the analysis of spatial patterns. *Physical Review E*, v.53, p.5461-5468, 1996.

SILVA, D. M. L.; CAMARGO, P. B.; MARTINELLI, L. A.; LANÇAS, F. M.; PINTO, J. S. S.; AVELAR, W. E. P. Organochlorine pesticides in Piracicaba river basin (São Paulo/Brazil): a survey of sediment, bivalve and fish. *Química Nova*, v. 31, p. 37-48, 2008.

STALNAKER, C.; LAMB, B. L.; HEIRIKSEN, J.; BOVEE, K.; BARTHLOW, J. *The instream flow incremental methodology. A primer for IFIM*, Washington, D.C. 1995.

STROMBERG, J. C.; MARLER, S. J. L. R.; PARADZICK, C.; SHAFROTH, P. B.; SHORROCK, D.; WHITE, J. M.; WHITE, M. S. Altered stream flow regimes and invasive plant species: the Tamarix case. *Global Ecology and Biogeography*, v. 16, p. 381-393, 2007.

THOMANN, R.V.; MUELLER, J. A. Principles of surface water quality modeling and control. Harper Collins, New York, 1987.

Recebido em 05.05.2014

Aprovado após revisão em 03.12.2014

ARTIGO PUBLICADO NA REVISTA BRASILEIRA DE BIOMETRIA V.33,
N.2, P. 268-276 EM 23/06/2015

AValiação DA PRECIPITAÇÃO DIÁRIA DO ESTADO DE SERGIPE UTILIZANDO ANÁLISE DE LACUNARIDADE

Leandro Ricardo Rodrigues de LUCENA²

Tatijana STOSIC¹

Moacyr CUNHA FILHO¹

- **RESUMO:** Neste artigo avaliamos a variabilidade temporal da precipitação diária de estações meteorológicas do estado de Sergipe utilizando o método de lacunaridade. Os resultados mostraram que nas estações localizadas no litoral os valores de lacunaridade das series de precipitação foram menores (indicando um comportamento mais homogêneo), enquanto que no semiárido e no agreste os valores de lacunaridade de precipitação foram maiores (indicando um comportamento mais heterogêneo). Os resultados do agrupamento (utilizando os valores de lacunaridade) mostraram que o método de lacunaridade pode ser usado para identificar as regiões geográficas com comportamento temporal característico da precipitação.
- **PALAVRAS-CHAVE:** fractal, variabilidade climática, fenômenos hidrológicos

1 Introdução

O clima de uma região é determinado por vários fatores entre quais os mais importantes são circulação geral da atmosfera, topografia local, cobertura vegetal, maritimidade e continentalidade. Estes fatores atuam tanto na escala global como na regional (Molion, 1987). A variabilidade climática pode afetar de forma importante a vida econômica e social da população em geral, na geração de energia, nas atividades agrícolas, na indústria turística e, de forma indireta, em todo setor produtivo.

A precipitação pluviométrica é uma das variáveis climáticas mais importantes na caracterização das mudanças climáticas de uma região (Almazroui et al., 2012) interferindo nas alternâncias de rendimento das culturas (Silva et al., 2003; Bannayan, 2011) e produção primária (Ye et al., 2013). O conhecimento da variabilidade espacial e temporal de precipitação é crucial para planejamento de ações relacionadas aos usos da água em bacias hidrográficas, que vão desde a utilização de sistemas para irrigação a cisternas para abastecimento em regiões de escassez hídrica.

O clima predominante da região Nordeste Brasileira (2°–14°S, 35°–46°W) é o semiárido com uma elevada irregularidade sazonal e interanual de chuva. Os eventos extremos chuvosos e secos são associados aos fenômenos climáticos regionais como El Niño Oscilação Sul (ENOS) e gradiente meridional de Temperatura da Superfície do Mar (TCM). Durante as fases negativas de ENOS e as positivas da TCM as chuvas são elevadas, enquanto as fases positivas de ENOS e as negativas da TCM são caracterizadas pelo menor volume da chuva e ocorrências de secas (Lucena et al., 2011).

²Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, Departamento de Estatística e Informática,

A elevada irregularidade na distribuição temporal da chuva afeta fortemente a produção agrícola e o abastecimento de água a população. Vários métodos quantitativos foram aplicados em análise de variação temporal e espacial da chuva (Buytaert et al., 2006; Sun et al., 2012; Zhang et al., 2008) com foco em tendências de valores médios, máximos e mínimos e da distribuição dos períodos de seca e da chuva intensa. Recentemente o método de lacunaridade mostrou-se promissor em estudos hidrológicos, contribuindo ao melhor entendimento de variabilidade temporal e fragmentação dos períodos chuvosos e períodos de seca (Martinez et al., 2007; Lana et al., 2010; Lucena et al., 2014; Lucena e Campos, 2014).

O método de lacunaridade foi introduzido para descrever a distribuição de tamanhos de lacunas em um conjunto de dados (Mandelbrot, 1982). No caso da precipitação as lacunas correspondem aos períodos de seca (dias consecutivos sem chuva ou com precipitação abaixo de um limiar). A hipótese do artigo é que o método de lacunaridade forneça as informações sobre a fragmentação dos períodos chuvosos e períodos de seca nas diferentes escalas temporais, podendo ser utilizado para regionalização do regime pluviométrico.

Neste artigo aplicamos o método de lacunaridade nas séries temporais diárias de precipitação registradas no estado de Sergipe para avaliar a distribuição de períodos de seca em múltiplas escalas temporais e identificar as regiões geográficas caracterizadas pelo regime específico de chuva.

2 Materiais e métodos

2.1. Dados

O estado de Sergipe, (com área de 22.000 km² e população de 2.068.017 habitantes) está localizada na região Nordeste do Brasil, nas coordenadas geográficas 9° 31' 54" a 11° 34' 12" 9° 31' S e 36° 24' 27" a 38° 11' 20" 36° 25' W e encontra-se entre os estados da Bahia e Alagoas e no Oceano Atlântico (Aragão et al., 2013). O clima de Sergipe é caracterizado pela ampla variabilidade espacial e temporal com precipitação média variando de 700 mm/ano no semiárido, de 1.000 mm/ano no agreste e de 1.355 mm/ano no litoral. A precipitação é concentrada nos períodos de abril a agosto definindo as estações chuvosa e seca, com secas severas em alguns anos e enchentes em outros anos. A temperatura média anual do ar varia de 22,7 a 26,5 °C e a umidade relativa média anual varia de 65% a 80% (Aragão et al., 2011).

Foram utilizados os dados de precipitação pluviométrica diária de 19 estações meteorológicas no período de 01 de janeiro de 2006 a 31 de julho de 2012 disponibilizadas pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos – SEMARH (<http://www.semarh.se.gov.br/meteorologia/modules/tinyd0/index.php?id=50>) do estado de Sergipe (Figura 1).

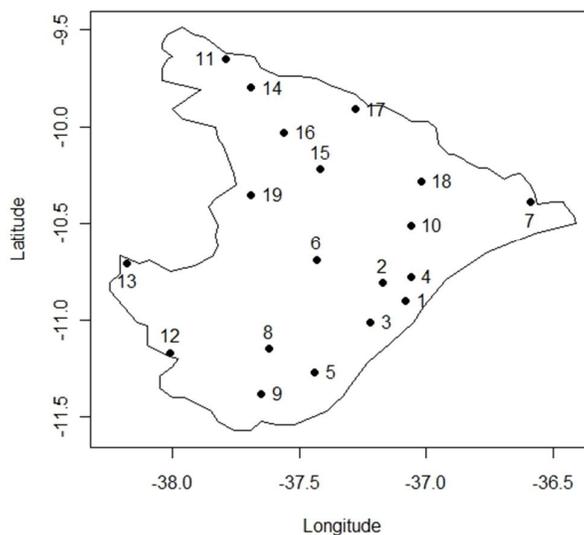


Figura 1- Distribuição espacial das estações meteorológicas do estado de Sergipe.

2.2. Análise de lacunaridade

O conceito de lacunaridade foi introduzido por Mandelbrot (1982) para analisar a distribuição do tamanho de lacunas dentro de um sistema físico e foi aplicado em estudos de objetos fractais (Feder, 1988). Análise de lacunaridade também se mostrou eficaz em estudos de séries temporais, e dados espaciais (Lucena et al., 2014; Martinez et al., 2010; Plotnick et al., 1996; Malhi e Román-Cuesta, 2008).

Existem vários métodos para o cálculo de lacunaridade, entre os quais o mais utilizado é o método de deslizamento de caixas desenvolvido por Allain e Cloitre (1991). Para dados quantitativos unidimensionais este método é descrito pelos seguintes passos:

- vi) Uma caixa de tamanho r é colocada na origem do banco de dados e o número s de sítios ocupados (com valores abaixo do limiar escolhido) é contado.
- vii) A caixa é movida ao longo de todo o conjunto de observações, e sua massa (número de sítios ocupados) é calculada.
- viii) A distribuição de probabilidade de massa da caixa é dada por:

$$P(s,r) = n(s,r)/N(r) \quad (1)$$

onde, $n(s,r)$ é o número de caixas de tamanho r com massa s e $N(r) = N - r + 1$ é o número total de caixas de tamanho r (N é o número total de observações).

ix) A lacunaridade para o tamanho de caixa r é definida por:

$$L(r) = M2 / [M1]^2 \quad (2)$$

onde, $M1 = \sum_{s=1}^r s * p(s, r)$ e $M2 = \sum_{s=1}^r s^2 * p(s, r)$ são o primeiro e o segundo momento da distribuição $P(s, r)$, respectivamente.

x) A lacunaridade diminui com tamanho de caixa como uma lei de potência

$$L(r) = \alpha r^\beta \quad (3)$$

onde, o expoente $\beta < 0$ pode ser calculado como coeficiente angular da reta $\log L(r)$ vs $\log r$ (Martinez et al., 2007).

Valores grandes de lacunaridade implicam em grandes tamanhos de lacunas e uma maior heterogeneidade, enquanto que pequenos valores implicam em menores tamanhos de lacunas, o que sugere uma distribuição mais uniforme (Mandelbrot, 1982).

Na análise pluviométrica, a lacunaridade é uma medida da distribuição das lacunas definidas como uma sequência de dias consecutivos com valores de precipitação abaixo do limiar escolhido (Martinez et al., 2007). Para avaliação da lacunaridade foram escolhidos os limiares de 0, 5 e 10 mm/dia de precipitação pluvial.

2.3. k-médias

O método de k-médias foi desenvolvido para agrupar elementos em k grupos, onde k é quantidade de grupos pré-definidos. O k-médias é um método de partição que fornece indicações mais precisas sobre o número de grupos a ser formado. Esse método é bastante utilizado para agrupar objetos bastante similares a menos de pequenas variações (Bussab et al., 1990).

Utiliza-se a soma de quadrados dos resíduos provindo da análise de variância como um critério para se obter maior homogeneidade no grupo e maior heterogeneidade entre os grupos, obtendo assim uma partição ótima (Bussab et al., 1990).

O algoritmo eficaz para utilização do k-médias foi desenvolvido por Hartigan e Wong (1979), este algoritmo consiste em encontrar a melhor partição iniciando com um conjunto de observações e indicando o número de grupos, no passo seguinte encontram-se os centroides de cada grupo, posteriormente aloca cada elemento ao grupo do centroide mais próximo, feito isto recalcula os centroides dos grupos a partir dos elementos alocados, por fim isto é feito até que se encontre um grupo ótimo segundo algum critério de convergência (Hartigan e Wong, 1979).

3 Resultados

Verifica-se que para todas estações meteorológicas os valores de lacunaridade diminuem com o tamanho das janelas para todos os limiares de precipitação, indicando uma distribuição mais uniforme de lacunas (períodos com precipitação abaixo destes limiares) Figuras 2, 3 e 4. Observa-se ainda o menor valor de lacunaridade (para todos os limiares escolhidos) na região litoral do estado, indicando uma distribuição de períodos chuvosos mais homogênea. Os valores de lacunaridade aumentam nas regiões do semiárido e agreste indicando uma maior heterogeneidade na duração dos períodos de seca. Observa-se ainda que o valor de lacunaridade aumenta com o limiar de precipitação, Figuras 2, 3 e 4.

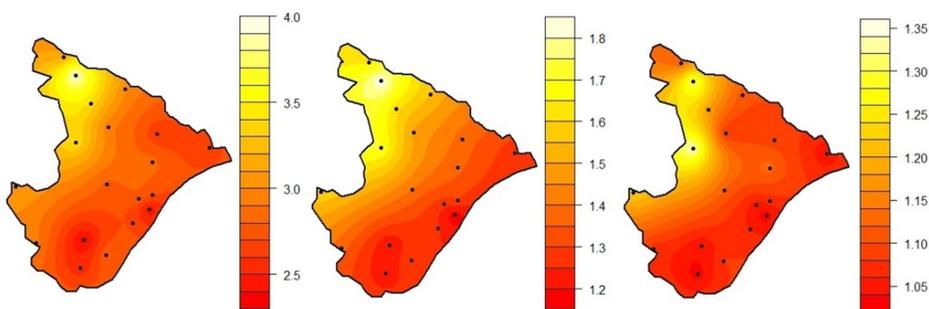


Figura 2- Lacunaridade empírica para tamanhos de janelas de 2, 64 e 256 dias com limiar de precipitação 0 mm.

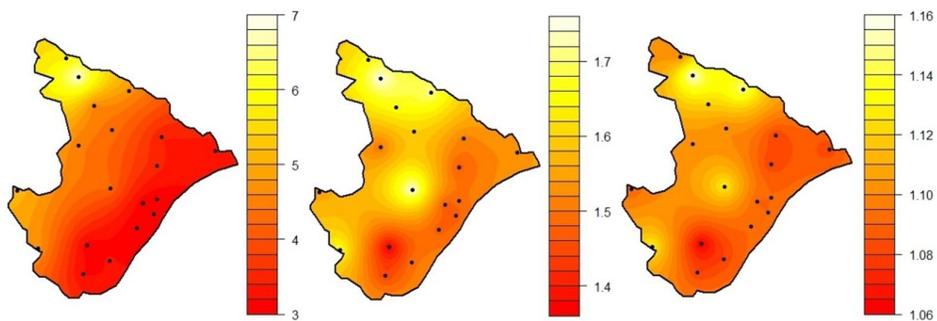


Figura 3- Lacunaridade empírica para tamanhos de janelas de 2, 64 e 256 dias com limiar de precipitação 5 mm.

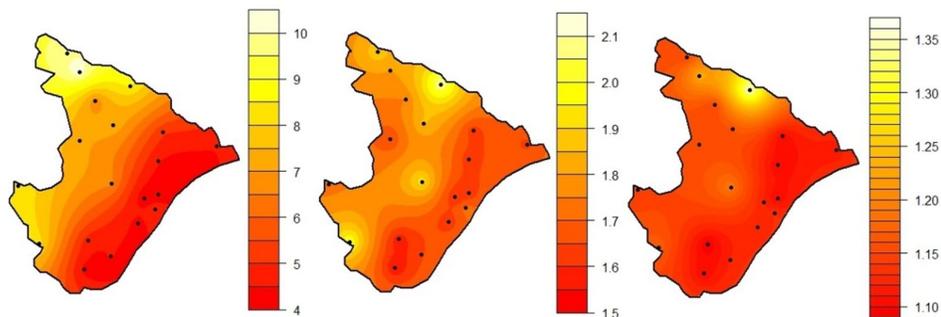


Figura 4- Lacunaridade empírica para tamanhos de janelas de 2, 64 e 256 dias com limiar de precipitação 10 mm.

A Figura 5 mostra os valores do expoente β de lacunaridade para diferentes limiares de precipitação. Observa-se que os valores do expoente β aumentam com o aumento do limiar escolhido, indicando maior heterogeneidade na dinâmica da precipitação.

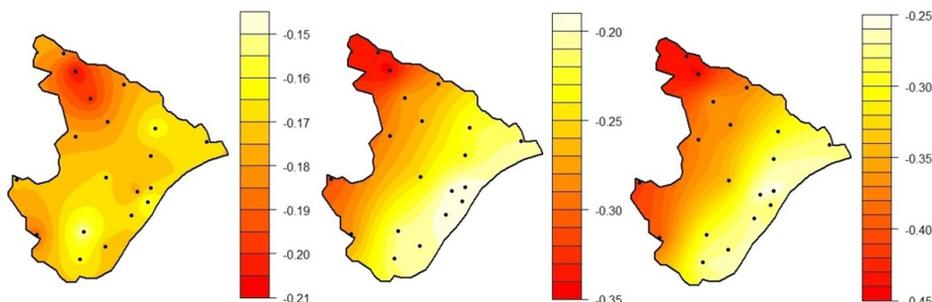


Figura 5- Valores do expoente β de lacunaridade das estações meteorológicas para os limiares de 0, 5 e 10 mm de precipitação.

Através da análise de k-médias (utilizando os valores da lacunaridade e do expoente β) observa-se na Figura 6a que foram classificadas as estações de 1 a 10, 12 e 18 num mesmo grupo e as demais estações em outro grupo com limiar de precipitação de 0 mm. Quando avaliado os limiares de 5 e 10 mm de precipitação a análise de k-médias forneceu os seguintes grupos de estações: um grupo contendo as estações 1 a 5 e 7 a 10, e um outro grupo com as demais estações meteorológicas, Figura 6b.

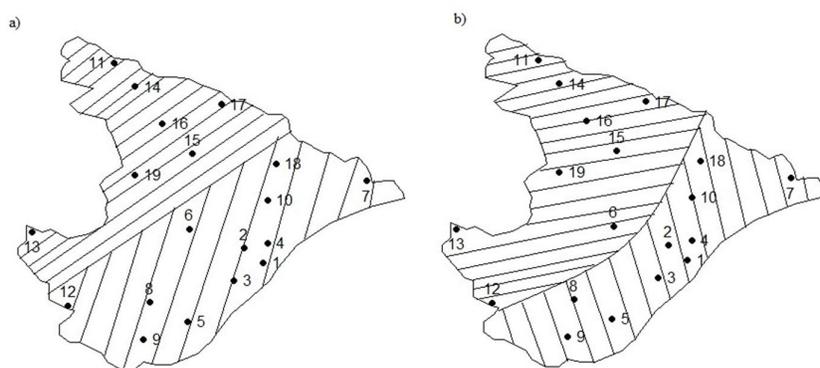


Figura 6. Agrupamento das estações meteorológicas em relação aos níveis de precipitação de (a - 0 mm; b - 5 e 10 mm).

Esta formação de dois grupos de estações meteorológicas se deve ao fato de que um dos grupos apresenta posição desfavorável à costa do litoral sergipano, pois estas estações sofrem com a escassez de chuva, fato também constatado por estarem localizadas na região semiárida do estado. Um resultado similar foi obtido aplicando equação de chuvas intensas (IDF) nos dados de chuva diária de 48 postos, desagregados com base em fatores de proporcionalidade, além das distribuições de Weibull e Gumbel (Aragão et al., 2013). Comparando os valores especializados dos parâmetros da IDF com o mapa das regiões climáticas do estado de Sergipe, evidenciou-se que a região do agreste sergipano e o semiárido são aquelas nas quais ocorre uma quantidade menor de precipitação, diferente do que ocorre no litoral úmido (Aragão et al., 2013).

Conclusões

Neste artigo estudamos a dinâmica temporal da precipitação no estado de Sergipe utilizando o método de lacunaridade. Este método se mostrou bastante eficaz para avaliar as propriedades das séries temporais de precipitação pluviométrica. Os valores grandes de lacunaridade observados nas regiões do semiárido e agreste indicaram maior heterogeneidade na distribuição da duração de secas e consequente pouca quantidade de chuva, enquanto que valores pequenos observados no litoral indicam maior concentração de precipitação com uma distribuição mais uniforme.

Utilizando os valores de lacunaridade e o expoente β de lacunaridade foi possível classificar dois padrões de precipitação no estado de Sergipe, um padrão formado pelas estações que se aproximam da costa sergipana e outro das estações que se localizam nas regiões do semiárido e agreste. Estes resultados fornecem novas informações sobre a fragmentação dos períodos chuvosos no estado de Sergipe, que podem ser usados em planejamento das atividades agrícolas e desenvolvimento de estratégias para diminuir as consequências de fenômenos climáticos extremos (seca, cheia) e assim contribuir ao melhoramento da qualidade de vida da população e desenvolvimento sustentável da região.

LUCENA, L. R. R.; STOSIC, T.; CUNHA FILHO, M. *Evaluation of daily precipitation in the state of Sergipe using the method of lacunarity*. *Rev. Bras. Biom.*, São Paulo, v.33, n.2, p.xxx-xxx, 2015.

- **ABSTRACT:** *In this work we evaluate temporal variability of daily precipitation registered at meteorological stations in the state of Sergipe using the method of lacunarity. The results show that in the coastal region precipitation series demonstrate lower lacunarity (indicating more homogeneous behavior) while in the semiarid and in the dry regions precipitation demonstrates higher lacunarity (indicating more heterogeneous behavior). It is shown that clustering of calculated lacunarity values can be used to identify geographical regions with characteristic temporal variability of precipitation.*
- **KEYWORDS:** *lacunarity, rainfall, Sergipe.*

Referências

- ALLAIN, C.; CLOITRE, M. Characterizing the lacunarity of random and deterministic fractal sets, **Physical Review A**, v. 44, p. 3552-3558, 1991.
- ALMAZROUI, M.; ISLAM, M.N.; JONES, P.D.; ATHAR, H.; RAHMAN, M.A. Recent climate change in the Arabian Peninsula: Seasonal rainfall and temperature climatology of Saudi Arabia for 1979–2009. **Atmospheric Research**, v. 111, p. 29-45, 2012.
- ARAGÃO, R.; SANTANA, G.R.; COSTA, C.E.F.F.; CRUZ, M.A.S.; FIGUEIREDO, E.E.; SRINIVASAN, V.S. Chuvas intensas para o estado de Sergipe com base em dados desagregados de chuva diária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 243-252, 2013.
- ARAGÃO, R.; ALMEIDA, J.A.P.; FIGUEIREDO, E.E.; SRINIVASAN, V.S. Mapeamento do potencial de erosão laminar na Bacia do Rio Japarutuba, SE, via SIG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 731-740, 2011.
- BANNAYAN, M. Effects of precipitation and temperature on crop production variability in northeast Iran, **International Journal of Biometeorology**, V. 55, P. 387-401, 2011.
- BUSSAB, W.O.; MIAZAKI, E.S.; ANDRADE, D.F. **Introdução à análise de agrupamento**. São Paulo: Associação Brasileira de Estatística, 1990.
- BUYTAERT, W.; CELLERI, R.; WILLEMS, P.; DE BIÈVRE, B.; WYSEURE, G. Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. **Journal of Hydrology**, v. 329, p. 413-421, 2006.

- FEDER, J. **Fractals**. Plenum Press, New York, 1988.
- HARTIGAN, J.A.; WONG, M.A. Algorithm, as136: A k-means Clustering algorithm. **Applied statistics**, v.28, p. 100-108, 1979.
- LANA, X.; MARTINEZ, M.D.; SERRA, C.; BURGUEÑO, A. Complex behaviour and predictability of the European dry spell regimes, **Nonlinear Processes in Geophysics**, v.17, p. 499-512, 2010.
- LUCENA, R.R.L.; STOSIC, T.; CUNHA FILHO, M. Análise de lacunaridade de série temporal da vazão dos rios Atibaia e Jaguari. **Revista Brasileira de Biometria**, v.32, n.4, p.609-617, 2014.
- LUCENA, L.R.R., CAMPOS, A.C.P. Análise de lacunaridade da precipitação de bacias hidrográficas do estado de São Paulo. **Biomatemática**, v.24, p. 1-8, 2014.
- LUCENA, D.B.; SERVAIN, J.; GOMES FILHO, M.F. Rainfall Response in Northeast Brazil from Ocean Climate Variability during the Second Half of the Twentieth Century. **Journal of Climate**, v. 24, p. 6174–6184, 2011.
- MALHI, Y.; ROMÁN-CUESTA, M.R. Analysis of lacunarity and scales of spatial homogeneity in IKONOS images of Amazonian tropical forest canopies. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 2074–2087, 2008.
- MANDELBROT, D. **The fractal geometry of nature**. Freeman, San Francisco, USA, 1982.
- MARTINEZ, M.D.; LANA, X.; BURGUEÑO, A.; SERRA, C. Lacunarity, predictability and predictive instability of the daily pluviometric regime in the Iberian Peninsula. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v.14, p.109-121, 2007.
- MARTINEZ, M.D.; LANA, X.; BURGUEÑO, A.; SERRA, C. Predictability of the monthly North Atlantic Oscillation index based on fractal analysis and dynamics system theory. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v.17, p.93-101, 2010.
- MOLION, L.C.B. Climatologia dinâmica da região amazônica: mecanismos de precipitação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.2, p.107-117, 1987.
- PLOTNICK, R.E.; GARDNER, R.H.; HARGROVE, W.W.; PRESTEGAARD, K.; PERLMUTTER, M. Lacunarity analysis: A general technique for the analysis of spatial patterns. **Physical Review E**, v. 53, p. 5461-5468, 1996.
- SILVA, J.W.; GUIMARÃES, E.C.; TAVARES, M. Variabilidade temporal da precipitação mensal e anual na estação climatológica de Uberaba-MG. **Ciências e Agrotecnologia**, v. 27, p. 665-674, 2003.
- SUN, F.; RODERICK, M.; FARQUHAR, G.D. Changes in the variability of global land precipitation. **Geophysical Research Letters**, v.39, L19402, 2012.
- Ye, J.S.; Reynolds, J.F.; Sun, G.J.; Li, F.M. Impacts of increased variability in precipitation and air temperature on net primary productivity of the Tibetan Plateau: a modeling analysis. **Climatic Change**, v. 119, p. 321-332, 2013.
- ZHANG, Q.; XU, C.Y.; ZHANG, Z.; CHEN, Y.D.; LIU, C.L.; LIN, H. Spatial and temporal variability of precipitation maxima during 1960–2005 in the Yangtze River basin and possible association with large-scale circulation. **Journal of Hydrology**, v. 353, p. 215-227, 2008.

Recebido em 03.02.2015

Aprovado após revisão em 08.05.2015

**ARTIGO SUBMETIDO PARA A REVISTA CIÊNCIA FLORESTAL EM
25/04/2015**

**ANÁLISE DE LACUNARIDADE DE DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE FOCOS DE
QUEIMADAS NA AMAZÔNIA LEGAL**

**LACUNARITY ANALYSIS OF SPATIAL DISTRIBUTION OF HOT-PIXELS IN
LEGAL AMAZON**

RESUMO

Neste artigo avaliamos a variabilidade espacial das queimadas detectadas na região Amazônia Legal durante o período 2000-2013. Os resultados mostraram que nos anos com maior número de queimadas os valores de lacunaridade foram menores (indicando um comportamento espacial mais homogênea), enquanto nos anos com menor número das queimadas os valores de lacunaridade foram maiores (indicando um comportamento espacial mais heterogênea). Os resultados do agrupamento mostram que o método de lacunaridade pode ser útil em identificação das estações seca e chuvosa.

Palavras chave: lacunaridade; queimadas; Amazônia Legal.

ABSTRACT

In this work we evaluate spatial variability of hot pixels detected in the Legal Amazon region during the period 2000-2013. The results show that for years with higher number of hot pixels the values of lacunarity were lower (indicating more homogeneous behavior) while for years with lower number of hot pixels the values of lacunarity were higher (indicating more heterogeneous behavior). It is shown that clustering of calculated lacunarity values can be used to identify rainy and dry season.

Keywords: lacunarity; hot-pixels; legal Amazon.

INTRODUÇÃO

Os incêndios florestais e o uso do fogo em sistemas agrícolas afetam o equilíbrio dos ecossistemas, a saúde humana, e conseqüentemente, o planeta (Gonçalves et al., 2012). Por este motivo, trata-se de importante, inesgotável e relevante fonte investigativa para pesquisadores de diversas áreas do conhecimento.

Nas últimas décadas no Brasil as áreas afetadas pelas queimadas têm aumentado, tal fato é decorrente aumento da ocupação territorial que influencia diretamente na perda de biodiversidade, no aumento do efeito estufa, na fertilidade do solo, além da poluição do ar, aumentando a ocorrência de doenças respiratórias. (Granemann e Carneiro, 2009).

A importância da detecção e monitoramento de queimadas está além do problema do desmatamento, implicando em modificações climáticas, ecológicas e ambientais diversas. (Granemann e Carneiro, 2009).

Fenômenos como estes são difíceis de serem estudados utilizando metodologias clássicas da estatística, recentemente mostrou-se promissor a utilização de metodologias de física estatística como a geometria fractal (Telesca, 2007), multifractal (Benicio, 2013) e criticalidade auto-organizada (Turcotte, 2004; Tebbens, 2005).

Um fractal é um objeto que apresenta invariância na sua forma à medida que a escala, sob a qual o mesmo é analisado, é alterada, mantendo-se a sua estrutura idêntica à original. Os fractais são formas geométricas que assumem algumas propriedades características, como auto-similaridade, e a dimensão não inteira (Mandelbrot, 1982).

A dimensão fractal pode ser calculada utilizando vários métodos e em geral é suficiente para caracterização de um objeto com geometria fractal (Theiller, 1990). Em alguns casos os objetos fractais com mesma dimensão fractal podem mostrar diferença em sua distribuição espacial, e precisam de outros métodos de quantificação, entre os quais o mais promissor é a medida de lacunaridade.

A lacunaridade é uma medida que avalia a distribuição de tamanhos de lacunas de um objeto fractal (Mandelbrot, 1982). Objetos fractais que apresentam grandes valores de lacunaridade são objetos heterogêneos e não possuem translação invariante, enquanto que objetos fractais com lacunaridades menores são homogêneos e possuem translação invariante (maior uniformidade de sua distribuição) (Gefen et al. 1983).

Este trabalho objetiva avaliar distribuição espacial de focos de queimadas detectadas na região da Amazônia Legal durante o período 2000-2013, utilizando como ferramenta de avaliação a análise de lacunaridade bidimensional.

MATERIAS E MÉTODOS

Área de estudo

A região do arco do desflorestamento situada na Amazônia Legal é composta por 524 municípios que se distribuem desde o sudeste do Maranhão, incluindo o norte do Tocantins, o sul do Pará, norte do Mato Grosso, Rondônia, sul do Amazonas, até o sudeste do Acre (Ignotti et al., 2007), Figura 1. A região da Amazônia Legal apresenta uma intensa exploração madeireira que nos últimos 30 anos totalizaram um desmatamento de cerca de 10% de sua área (Ignotti et al., 2007).

Na região da Amazônia Legal detecta-se um grande número de focos de calor, chegando a concentrar mais de 85% de todas as queimadas do Brasil. No período de estação seca, nos meses de junho a outubro o número de focos de calor aumenta consideravelmente, os estados que apresentam os maiores registros de queimadas são Mato Grosso e Pará (Ignotti et al., 2007).

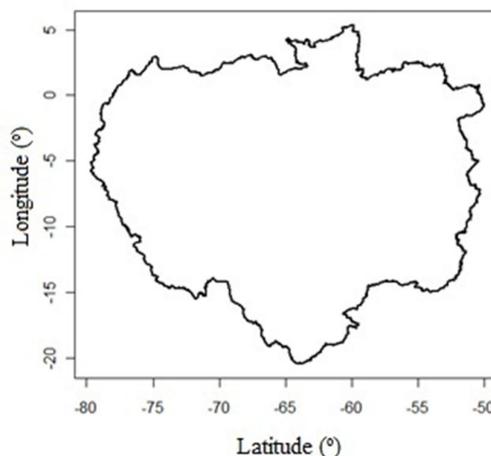


Figura 1. Área de avaliação dos focos de calor.

Figure 1. Evaluation area of hot-pixels.

Dados

No Brasil, o monitoramento de queimadas via sensoriamento remoto, iniciou em Julho de 1987, com a implementação do projeto SEQE - Sensoriamento Remoto de Queimadas por Satélite, após vários acordos entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IBDF), ver (Gonçalves et al., 2012).

Os dados estudados neste artigo foram obtidos justamente através do site do INPE (www.inpe.br), considerando sempre o satélite referência indicado no referido site (no período de 2000 a 09/agosto/2007 o satélite NOAA-12 e a partir de então até 2013 o AQUA_M-T) e consiste de detecções de focos de queimadas diárias no período citado conforme a Figura 2.

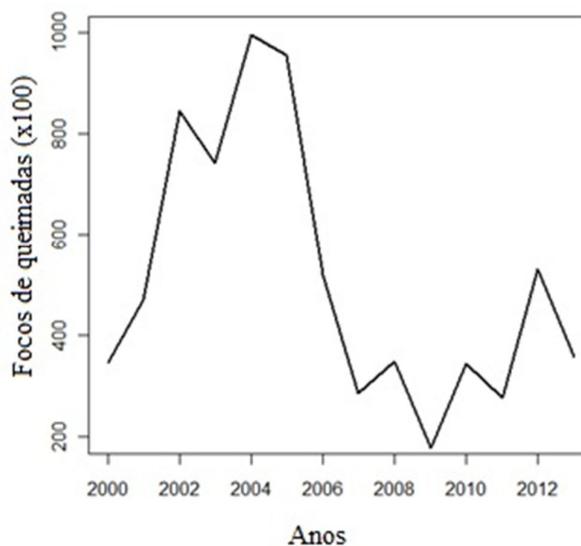


Figura 2. Série anual da detecção de queimadas por satélite.

Figure 2. Annual series of hot-pixels satellite detection.

Observa-se que nos anos 2003-2005 o número das queimadas foi maior como consequência da seca em Roraima em 2003 e a seca em 2005 que afetou os estados de Rondônia, Acre e Amazonas (Marengo et al., 2008; Morton et al., 2008).

Análise de lacunaridade

O método de lacunaridade foi originalmente desenvolvido para detecção de padrões de texturas de objetos fractais, mas pode ser generalizado para qualquer padrão espacial, incluindo aqueles com propriedades fractais e multifractais e pode ser usado tanto com dados quantitativos quanto para dados binários e também em dimensões 1D, 2D e 3D (Plotinick, 1996).

Análise de lacunaridade foi amplamente utilizada em estudos de fenômenos ecológicos (Plotinick et al., 1993; Malhi e Román-Cuesta, 2008), na geologia (Roy et al., 2010), planejamento urbano (Myint e Lam, 2005) na medicina (Gilmor et al., 2009; Gould et al., 2011; Lucena e Stosic, 2014) e na climatologia (Martinez et al., 2007; Lana et al., 2010; Martinez et al., 2010; Lucena et al., 2014; Lucena e Stosic, 2013; Lucena e Campos, 2014).

Para calcular a lacunaridade aplicamos o método de “gliding box” proposto por Allain e Cloitre em 1991 (Allain e Cloitre, 1991). Para dados bidimensionais este método é descrito nos seguintes passos:

- i) Uma caixa de tamanho $r \times r$ é colocada na origem de uma matriz de informação $L \times C$ e sua massa representando o número “s” de sítios ocupados (coordenada onde houve presença de queimadas) é contado.
- ii) A caixa é movida ao longo de todo o conjunto de observações e sua massa é calculada.
- iii) Este processo é repetido para todo o conjunto de observações, obtendo a distribuição de frequência da massa da caixa $n(s,r)$, e correspondentemente a distribuição de probabilidade

$$P(s,r) = n(s,r)/N(r)$$

onde, $N(r) = (L - r + 1) * (C - r + 1)$ é o número total de caixas de tamanho $r \times r$ deslizadas na matriz de informação.

- iv) A lacunaridade para o tamanho de caixa $r \times r$ é definida por:

$$L(r) = M_2 / [M_1]^2$$

onde, $M_1 = \sum_{s=0}^{r^2} s * P(s,r)$ e $M_2 = \sum_{s=0}^{r^2} s^2 * P(s,r)$ são o primeiro e o segundo momento da distribuição de $P(s,r)$, respectivamente.

- v) A lacunaridade segue uma lei de potência e pode ser estimada por:

$$L(r) = \alpha r^\beta$$

Para melhor entendimento do procedimento observe na Figura 3 um mapa aleatório de dimensão 12×12 representando um determinado fenômeno onde o valor 0 representa a não ocupação do fenômeno e o valor 1 a presença do fenômeno. Faremos o procedimento do cálculo da lacunaridade para caixas de tamanho 2×2 .

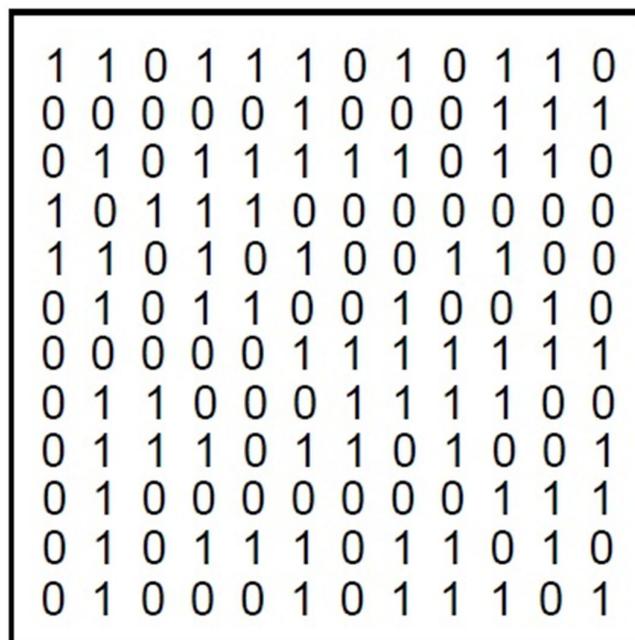


Figura 3. Mapa aleatório 12 x 12, com 1's representando a ocupação da célula.

Figure 3. Random map 12 x 12, with 1's representing cell of occupancy.

Na Tabela 1, observa-se o número de caixas de tamanho 2 x 2 com nenhum sítio ocupado, um, dois, três e os quatros sítios ocupados, posteriormente suas respectivas probabilidades de ocorrência de 0, 1, 2,3 e 4 sítios ocupados, e por fim o cálculo do primeiro e segundo momento, encontrado assim um valor de lacunaridade de 1,216.

Tabela 1. Cálculo da lacunaridade para caixa de tamanho 2 do mapa aleatório apresentada na Figura 3.

Table 1. Lacunarity measure for size box 2 random map shown in Figure 3.

S	n(s,r)	P(s,r)	s*P(s,r)	s ² *P(s,r)	L(2)
0	3	0,025	0	0	
1	35	0,289	0,289	0,289	
2	46	0,380	0,760	1,520	
3	29	0,240	0,720	2,160	
4	8	0,066	0,264	1,056	
			M1=2,033	M2=5,025	1,216

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estatística descritiva obtida referente aos dados de queimadas detectadas para cada ano do período observado esta apresentada na Tabela 2. Verifica-se que no período 2002-2006 a média diária do número de queimadas foi maior em comparação ao período 2007-2011, Tabela 2.

Tabela 2. Medidas descritivas dos focos diários de queimadas na Amazônia legal em relação aos anos avaliados.

Table 2. Descriptive measures of daily hot-pixels in legal Amazon for years evaluated.

Estações	Min	1º quartil	Média	Mediana	3º quartil	Max.	Desvio Padrão
2000	0,0	2,3	94,7	24,0	92,0	1151,0	180,6
2001	0,0	4,0	129,0	32,0	149,0	1381,0	208,8
2002	0,0	11,0	231,8	67,0	291,0	2416,0	384,9
2003	0,0	21,0	203,2	88,0	255,0	2017,0	284,2
2004	0,0	13,0	272,1	71,5	350,0	2914,0	445,7
2005	0,0	7,0	261,8	44,0	247,0	3279,0	488,8
2006	0,0	5,0	142,7	25,0	116,0	2309,0	297,2
2007	0,0	0,0	78,2	4,0	34,0	1415,0	222,3
2008	0,0	2,3	95,2	17,0	95,0	1209,0	177,7
2009	0,0	0,0	49,1	8,0	45,0	478,0	92,5
2010	0,0	0,0	94,5	5,0	38,0	2619,0	263,4
2011	0,0	0,0	76,3	13,0	84,0	1001,0	140,8
2012	0,0	11,0	144,9	33,5	161,8	1738,0	245,8
2013	0,0	9,0	97,9	33,0	100,0	1120,0	162,9

A Tabela 3 apresenta os valores de lacunaridade da distribuição espacial de queimadas para cada ano durante o período estudado. Observa-se que para todos os anos o valor de lacunaridade aumenta com o aumento do tamanho de caixa indicando maior heterogeneidade na distribuição espacial de queimadas nas escalas maiores.

Tabela 3. Valores de lacunaridade para diferentes tamanhos de caixas nos anos de 2000 a 2013.

Table 3. Lacunarity values for different sizes of boxes in years 2000 – 2013.

Anos	Tamanho de caixa (r)								
	2	4	8	16	32	64	128	256	β
2000	113,13	56,42	31,50	20,01	15,31	11,51	8,21	5,71	-0,58
2001	86,54	44,64	26,67	18,96	14,54	10,99	7,72	5,16	-0,54
2002	58,08	34,80	23,56	17,43	13,39	10,26	7,25	4,88	-0,48
2003	66,96	39,41	26,06	18,99	14,52	11,03	7,03	5,27	-0,50
2004	53,38	33,20	23,24	17,63	13,94	10,99	8,14	5,71	-0,43
2005	52,48	31,72	21,55	16,09	12,43	9,42	6,53	4,22	-0,49
2006	85,69	46,31	28,00	19,12	13,87	9,97	6,62	4,26	-0,59
2007	157,76	87,65	53,34	35,26	24,01	15,95	9,09	5,46	-0,67
2008	112,31	56,19	32,51	21,24	14,86	10,63	7,11	4,47	-0,63
2009	197,02	87,75	45,39	28,13	19,53	13,52	8,31	5,19	-0,71
2010	131,11	74,25	47,75	34,43	25,90	19,24	12,88	6,71	-0,56
2011	124,21	55,47	28,20	16,30	10,31	6,82	4,59	3,18	-0,74
2012	79,61	41,40	24,30	15,64	10,54	7,08	4,68	3,16	-0,65
2013	97,83	43,12	22,20	13,59	9,23	6,44	4,38	3,00	-0,69

Verifica-se ainda que no período 2002-2006 o valor da lacunaridade foi menor (com menor expoente β) indicando uma distribuição espacial mais homogênea, enquanto que os maiores valores de lacunaridade (com maior expoente β) no período 2007-2011 indicam que as queimadas foram mais concentradas espacialmente com ampla distribuição de tamanhos de lacunas, Tabela 3.

Na estação chuvosa observa-se que os valores de lacunaridade foram maiores do que em relação ao período de seca, este fato pode ter sido ocasionado pela falta de queimadas no período de chuva, Tabelas 4 e 5.

Tabela 4. Valores de lacunaridade para diferentes tamanhos de caixas na estação chuvosa nos anos de 2000 a 2013.

Table 4. Lacunarity values for different sizes of boxes in rainfall station between years 2000 – 2013.

Anos	Tamanho de caixa(r)								β
	2	4	8	16	32	64	128	256	
2000	887,72	469,28	256,06	158,90	108,49	76,14	46,81	22,94	-0,71
2001	539,85	200,36	164,99	116,39	89,65	66,59	41,88	20,60	-0,58
2002	486,79	271,94	165,35	110,69	78,09	56,40	36,97	19,42	-0,62
2003	371,22	215,65	140,05	99,03	68,17	50,46	31,23	16,42	-0,60
2004	382,43	227,74	147,32	99,59	73,33	56,50	38,38	21,11	-0,56
2005	742,70	333,08	154,37	78,13	46,39	31,99	21,66	13,04	-0,81
2006	1399,13	635,11	286,19	130,84	67,25	39,57	24,13	13,96	-0,95
2007	806,84	391,63	210,13	131,51	94,52	64,98	37,20	18,71	-0,72
2008	1671,38	614,63	237,28	100,64	50,14	28,95	17,40	10,32	-1,04
2009	2328,04	965,56	406,73	169,97	79,54	42,86	25,36	15,05	-1,05
2010	1636,97	651,83	265,91	112,78	51,94	30,37	17,95	10,78	-1,04
2011	3511,63	1440,47	573,94	228,47	92,52	46,65	26,99	15,97	-1,13
2012	952,85	356,80	136,65	60,52	35,07	24,72	17,75	12,15	-0,88
2013	886,76	308,97	112,44	50,32	30,23	21,95	16,04	10,55	-0,88

Tabela 5. Valores de lacunaridade para diferentes tamanhos de caixas na estação seca nos anos de 2000 a 2013.

Table 5. Lacunarity values for different sizes of boxes in dry station between years 2000 – 2013.

Anos	Tamanho de caixa (r)								β
	2	4	8	16	32	64	128	256	
2000	126,53	60,37	32,02	20,21	14,44	10,62	7,44	5,07	-0,63
2001	99,84	49,42	27,91	18,79	13,86	10,13	6,94	4,62	-0,60
2002	63,24	36,96	24,41	17,73	13,41	10,11	6,95	4,56	-0,51
2003	76,85	43,24	27,13	18,94	14,15	10,66	7,56	5,12	-0,53
2004	57,89	34,54	23,18	17,05	13,15	10,12	7,36	5,13	-0,47
2005	55,31	33,38	22,65	16,88	13,01	9,80	6,73	4,26	-0,49
2006	90,05	48,53	29,29	20,02	14,51	10,38	6,84	4,34	-0,59
2007	191,45	106,94	65,07	42,65	28,43	18,54	11,50	6,10	-0,68
2008	119,02	59,65	34,50	22,53	15,74	11,26	7,50	4,65	-0,63
2009	212,67	93,48	47,81	29,75	20,80	14,40	8,71	5,32	-0,71
2010	140,48	79,87	51,50	37,24	28,02	20,75	13,80	6,97	-0,56
2011	128,06	56,90	28,84	16,66	10,49	6,89	4,58	3,13	-0,74
2012	84,99	44,38	26,10	16,73	11,17	7,38	4,79	3,16	-0,66
2013	107,08	47,27	24,35	14,81	9,93	6,81	4,52	3,02	-0,70

Através da análise de agrupamento do método de Ward (utilizando os valores da lacunaridade e expoente β) verifica-se de fato a existência de dois grupos, um grupo formado de todos os períodos secos e outro grupo de todos os períodos chuvosos, Figura 4.

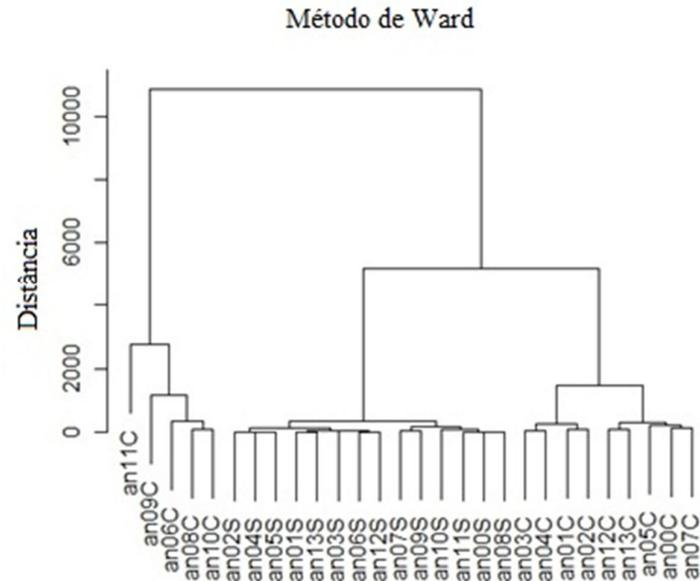


Figura 4. Agrupamento dos valores de lacunaridade para estações secas e chuvosas dos anos avaliados.

Figure 4. Cluster of lacunarity values for dry and rainfall station of years evaluated.

CONCLUSÃO

Neste artigo utilizamos a análise de lacunaridade para avaliar a distribuição espacial de focos de queimadas detectadas em Amazônia Legal durante o período 2000-2013. Nos anos com maior número de queimadas os valores de lacunaridade foram menores (indicando um comportamento espacial mais homogêneo), enquanto nos anos com menor número das queimadas os valores de lacunaridade foram maiores (indicando um comportamento espacial mais heterogêneo). Os resultados do agrupamento mostram que o método de lacunaridade (avaliando a heterogeneidade da distribuição espacial de queimadas) pode ser útil em identificação das estações seca e chuvosa e pode contribuir ao planejamento das atividades agrícolas, desenvolvimento das estratégias para diminuir as consequências de fenômenos climáticos extremos (seca), e assim garantir desenvolvimento sustentável da região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLAIN, C.; CLOITRE, M. Characterizing the lacunarity of random and deterministic fractal sets. **Physical Review A**, v.44, p.3552-3558, 1991.

BENICIO, R.B.; STOSIC, T.; FIGUEIREDO, P.H.; STOSIC, B. D. Multifractal behavior of wild-land and forest fire time series in Brazil. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 392, n. 24, p. 6367-6374, 2013.

GEFEN, Y.; MEIR, Y.; AHARONY, A. Geometric implementation of hypercubic lattice with non-integer dimensionality by use of low lacunarity fractal lattices. **Physical Review Letters**, v.50, p.145-188, 1983.

GILMORE, S.; HOFMANN-WWLLWNHOF, R.; MUIR, J.; SOYER, H.P. Lacunarity Analysis: A Promising Method for the Automated Assessment of Melanocytic Nevi and Melanoma. **PLoS One**, v.4, n.10, e7449. doi:10.1371/journal.pone.0007449, 2009.

GONÇALVES, K.S.; CASTRO, H.A.; HACON, S.S. As queimadas na região amazônica e o adoecimento respiratório. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 17, n. 6, p. 1523-1532, 2012.

GOULD, D.J.; VADAKKAN, T.J.; POCHÉ, R.A.; DICKINSON, M.E. Multifractal and Lacunarity Analysis of Microvascular Morphology and Remodeling. **Microcirculation**, v.18, n.2, p. 136-151, 2011.

GRANEMMAN, D.C.; CARNEIRO, G.L. Monitoramento de focos de incêndios e áreas queimadas com utilização de imagens de sensoriamento remoto. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v.1, p.55-62, 2009.

IGNOTTI, E.; HACON, S.S.; SILVA, A.M.C.; JUNGER, W.L.; CASTRO, H. Efeitos das queimadas na Amazônia: método de seleção dos municípios segundo indicadores de saúde. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v.10, p.453-464, 2007.

LANA, X.; MARTINEZ, M.D.; SERRA, C.; BURGUEÑO, A. Complex behaviour and predictability of the European dry spell regimes. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v.17, p.499-512, 2010.

LUCENA, R.R.L.; STOSIC, T. Utilização de lacunaridade para detecção de padrões de imagens de retinas humanas. **Revista da Estatística da Universidade Federal de Ouro Preto**, v.3, p.789-793, 2014.

LUCENA, R.R.L.; STOSIC, T.; CUNHA FILHO, M. Análise de lacunaridade de série temporal da vazão dos rios Atibaia e Jaguari. **Revista Brasileira de Biometria**, v.32, p.609-617, 2014.

LUCENA, L.R.R., CAMPOS, A.C.P. Análise de lacunaridade da precipitação de bacias hidrográficas do estado de São Paulo. **Biomatemática**, v.24, p. 1-8, 2014.

LUCENA, R.R.L.; STOSIC, T. Temperatura do nordeste brasileiro via análise de lacunaridade. **Sigmae**, v.2, p.76-80, 2013.

MALHI, Y.; ROMÁN-CUESTA, R.M. Analysis of lacunarity and scales of spatial in homogeneity of IKONOS images of Amazonian tropical forest canopies. **Remote Sensing of Environment**, v.112, p.2074–2087, 2008.

MANDELBROT, B.B. **The Fractal Geometry of Nature**. W. H. Freeman, New York, 1982.

MARENGO, J.A.; NOBRE, C.A.; TOMASELLA, J.; OYAMA, M.D.; OLIVEIRA, G.S.; OLIVEIRA, R.; CAMARGO, H.; ALVES, L.M.; BROWN, I.F. The drought of Amazonia in 2005. **Journal of Climate**, v.21, p.495-516, 2008.

MARTINEZ, M.D.; LANA, X.; BURGUEÑO, A.; SERRA, C. Predictability of the monthly North Atlantic Oscillation index based on fractal analysis and dynamics system theory. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v.17, p.93-101, 2010.

MARTINEZ, M.D.; LANA, X.; BURGUEÑO, A.; SERRA, C. Lacunarity, predictability and predictive instability of the daily pluviometric regime in the Iberian Peninsula. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v.14, p.109-121, 2007.

MORTON, D.C.; DEFRIES, R.S.; RANDERSON, J.T.; GIGLIO, L.; SCHROEDER, W.; VAN DER WERF, G.R. Agricultural intensification increases deforestation fire activity in Amazonia. **Global Change Biology**, v. 14, n.10, p. 2262-2275, 2008.

MYINT, S.W.; LAM, N. A study of lacunarity-based texture analysis approaches to improve urban image classification. **Computers, Environment and Urban Systems**, v.29, p.501-523, 2005.

PLOTNICK, R.E.; GARDNER, R.H.; HARGROVE, W.W.; PRESTERGAARD, K.; PERMUTTER, M. Lacunarity analysis: A general technique for the analysis of spatial patterns. **Physical Review E**, v.53, p.5461-5468, 1996.

PLOTNICK, R.E.; GARDNER, R.H.; O'NEILL, R.V. Lacunarity indices as measures of landscape texture. **Landscape Ecology**, v.8, p.201-211, 1993.

ROY, A.; PERFECT, E.; DUNNE, W.M.; ODLING, N.; KIM, J.W. lacunarity analysis of fracture network: Evidence of scale depended clustering. **Journal of Structural Geology**, v.32, p.1444-1449, 2010.

TEBBENS, S.F.; BURROUGHS, S.M. Forest fire burn areas in Western Canada modeled as self-similar criticality. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, v. 211, n. 3-4, p. 221-234, 2005.

TELESCA, L.; AMATUCCI, G.; LASAPONARA, R.; LOVALLO, M.; RODRIGUES, M.J. Space-time fractal properties of the forest-fire series in central Italy. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, v.12, n.7, p.1326-1333, 2007.

THEILLER, J. Estimating fractal dimension. **Journal Optical Society America**, v. 7, n. 6, p. 1055-1073, 1990.

TURCOTTE, D.L.; MALAMUD, B.D. Landslides, forest fires, and earthquakes: examples of self-organized critical behavior. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 340, n. 4, p. 580-589, 2004.