

GUTENBERG FERREIRA DA SILVA

Análise de Complexidade de séries temporais de velocidade do vento utilizando *Sample Entropy* e *Cross-Sample Entropy*

RECIFE-PE – JULHO/2016.



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA

Análise de Complexidade de séries temporais de velocidade do vento utilizando *Sample Entropy* e *Cross-Sample Entropy*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada como exigência parcial à obtenção do título de Mestre.

Área de Concentração: Biometria e Estatística Aplicada

Orientador(a): Prof.(a) Dr.(a) Tatijana Stosic

Coorientador: Prof. Dr. Antônio Samuel Alves da Silva

RECIFE-PE – JULHO/2016.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

S586a Silva, Gutenberg Ferreira da
Análise de complexidade de séries temporais de velocidade do
vento utilizando sample entropy e cross-sample entropy /
Gutenberg Ferreira da Silva. – 2016.
64 f. : il.

Orientadora: Tatijana Stosic.

Coorientador: Antônio Samuel Alves da Silva.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de
Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Biometria e
Estatística Aplicada, Recife, BR-PE, 2016.

Inclui referências.

1. Velocidade do vento 2. Sample entropy 3. Cross-sample
entropy 4. Rede Sonda I. Stosic, Tatijana, orient. II. Silva, Antônio
Samuel Alves da, coorient. III. 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 Complexidade de séries temporais de velocidade do vento utilizando *Sample Entropy* e *Cross-Sample Entropy*

GUTENBERG FERREIRA DA SILVA

Manuscrito da Dissertação julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Biometria e Estatística Aplicada, defendida e aprovada por unanimidade em 26/07/2016 pela Banca Examinadora.

Orientadora:

Prof(a). Dr(a). Tatijana Stosic
UFRPE-DEINFO

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Moacyr Cunha Filho
UFRPE-DEINFO

Prof. Dr. Pedro Hugo de Figueirêdo
UFRPE-DF

Dedicatória

Dedico a minha família.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus por estar sempre no controle de tudo.

Aos meus pais pelo exemplo de vida, pelo amor e carinho da minha mãe, Vizuazilândia, pelos conselhos do meu pai, Francisco de Assis, pelo apoio aos meus estudos, bem como na minha formação intelectual e profissional dando as melhores condições possíveis para o meu crescimento como um todo.

Aos meus irmãos Francisco Filho, Virgínia Ferreira, Helen Lima por torcerem sempre por mim e acreditarem que sou capaz de realizar os meus sonhos.

À minha amada Viviane, pelo companheirismo, pela paciência, pelo apoio aos meus estudos e à minha carreira, por compartilhar todas as alegrias e tristezas da minha vida, fazendo cada vitória ser, não somente minha, mas sim, nossa.

A todos da minha família e aos amigos que me apoiaram e torceram sempre por mim.

À minha orientadora Profa. Dra. Tatijana Stosic, pela confiança, pelo apoio científico, pelo incentivo, pela dedicação, pela presteza, pelos conselhos pessoais e pela amizade.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Antônio Samuel pelo apoio científico e por ter ensinado a utilizar a metodologia *Sample Entropy* e *Cross-Sample Entropy*.

Aos professores do ensino médio e fundamental que contribuíram de uma forma ou de outra para o meu desenvolvimento cognitivo e emocional, em especial temos: João Andrade, Eraldo Cavalcanti, Alexandrina Veras.

Aos professores da UNICAP do Curso de Licenciatura em Matemática, em especial a Vicente Francisco e a Cícero José. Bem como, a equipe de Avaliação Institucional da UNICAP, em especial a Fernando Nascimento.

Às minhas diretoras Ana Cristina, Ana Carla Moraes e ao diretor Amaro Antônio pelo incentivo e pela ajuda para que fosse possível cursar as disciplinas da grade curricular do mestrado bem como a conclusão da dissertação.

Aos amigos e amigas que conquistei durante a graduação e o mestrado. Em especial Herica Silva e Cleo Clayton pela ajuda assim que cheguei à Biometria no dia da primeira matrícula do curso. As palavras de incentivo de Manoel Rivelino em diversos momentos durante o curso. A ajuda computacional de Ikaro Barreto. Bem como, a Cristiane Albuquerque e Glauce Guerra por terem contribuído para a melhoria das minhas apresentações nos Seminários de Biometria com suas observações pertinentes ao trabalho.

A contribuição de uma forma ou de outra da turma do DEINFO para a conclusão deste trabalho nas pessoas de Gláucia Tadu, Leandro Calixto, Jéssika Silveria, José Wesley, Maigan Stefanne, Fernando Henrique, Leonardo Fernandes, Juliana Lira, Karla Priscila, Luisa Matos, Maria das Vitórias, Rafael Marques, André Luiz, Edneide Ramalho, Ewerton Pereira, Carlos Augusto, Carlos Renato, Isaac Pedro, Paula Shinozaki, Ronaldo José, Leila Rameh, Lêda Valéria, Evelyn Souza, Erika Fialho, José Edson, Cícero Carlos Felix, Djalma Beltrão, Luiz Henrique Dore, Pedro Ferreira, Neilson Ferreira, David Venâncio, Diego Vicente, Silvio Fernando, Thaíze Fernandes, Jáder Jale, Dennis Marinho, Cícero Carlos Ramos, Milton Perceus, Albaro Paiva, Rodrigo Cruz, Kerolly Kedma, Jonas Vasconcelos, Edyniesky Ferrer, Dalton Araújo, Fabio Sandro, Nathielly Lima e Filipe Quirino.

Ao secretário do Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada, Marco Santos, pela presteza durante minha permanência no mestrado. Agradeço também a Fátima, a Zuleide e Eduardo Chaves pelo atendimento realizado no Departamento.

Aos membros da banca examinadora: Prof. Dr. Moacyr Cunha e Prof. Dr. Pedro Hugo, pela disponibilidade em participar e pelas contribuições pessoais acerca da Dissertação.

Aos governos dos Senhores, ex-presidente Luis Inácio Lula da Silva e Dilma Rousseff que propiciaram uma expansão na educação do Brasil, bem como, fomentaram um grande avanço nas políticas que convergiram tanto quantitativamente como qualitativamente às vagas nas áreas de Mestrados e Doutorados na Educação Pública Federal.

Ao Programa de Pós-graduação em Biometria e Estatística Aplicada pelo acolhimento e a todos os professores e coordenadores que me apoiaram.

E, por fim, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo apoio financeiro.

“Devemos nos lembrar de coisas na ordem em que a entropia aumenta.”

Stephen Hawking William.

“O que faz andar o barco não é a vela enfunada, mas o vento que não se vê.”

Platão.

Resumo

Neste trabalho foi analisada a complexidade das séries temporais de velocidade do vento em Petrolina, para comparar a variabilidade temporal intra anual da velocidade do vento nas alturas 25m e 50m. Utilizou-se o método *Sample Entropy (SampEn)* e *Cross-Sample Entropy (Cross-SampEn)* que são desenvolvidos para quantificar a complexidade (irregularidade) das séries temporais e a sincronização entre duas séries temporais simultâneas, respectivamente. Os resultados da análise para o ano de 2010 (que foi selecionado por ter os seus dados completos na rede SONDA), mostram que nos meses de junho, julho e agosto os valores da *SampEn* são maiores na altura de 50m do que 25m indicando maior regularidade na dinâmica do vento na altura de 25m. Apesar de, nestes meses, a velocidade média e potencial eólica aumentarem com a altura (em favor da geração da energia eólica) a complexidade da série também aumenta com a altura, representando uma característica desfavorável para mesma. Para os meses de fevereiro, setembro, outubro e novembro, nos quais a velocidade média nas duas alturas excede $3,5 \text{ m.s}^{-1}$ (considerada o valor mínimo para geração da energia eólica), a velocidade média aumenta e a entropia diminui com a altura indicando maior eficiência em captação da energia eólica na altura de 50m.

Palavras-chave: Velocidade do vento, *Sample Entropy*, *Cross-Sample Entropy*, rede SONDA.

Abstract

In this work we analyzed the complexity of wind speed time series recorded in Petrolina, PE, to compare intra annual variability of wind speed dynamics at height of 25m and 50m. We used the *Sample Entropy (SampEn)* and *Cross-Sample Entropy (Cross-SampEn)* methods that are developed to quantify the complexity (irregularity) of the time series and synchronization between two simultaneous time series, respectively. The results for the year 2010 (which was selected because it has the most complete data from SONDA network), show that in the months June, July and August the values of *SampEn* are higher at 50m indicating more regular wind dynamics at 25m. Although in these months the average wind speed and consequently wind potential increases with height, wind speed series have greater complexity (indicated by higher values of *SampEn*) at height of 50m presenting an unfavorable characteristic for wind power generation. For months February, September, October and November for which the average wind speed exceeds $3,5 \text{ m.s}^{-1}$ (considered the minimum wind speed for energy generation), the average wind speed increases and the entropy decreases with height indicating greater wind potential and more regular wind dynamics and hence greater efficiency in wind energy production at 50m.

Keywords: Wind speed, *Sample Entropy*, *Cross-Sample Entropy*, SONDA network.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Gradiente de pressão.....	24
Figura 2. Perfil da velocidade do vento.....	25
Figura 3. Principais direções dos ventos.....	26
Figura 4. O efeito Coriolis.....	27
Figura 5. Vento geostrófico.....	28
Figura 6. Mapa de Pernambuco em destaque o Município de Petrolina.....	33
Figura 7. Estações de medições rede SONDA.....	35
Figura 8. Base de dados da rede SONDA.....	35
Figura 9. Torre anemométrica na Estação de Petrolina.....	36
Figura 10. Velocidade média do vento nas duas alturas de Janeiro a Dezembro de 2010 em Petrolina.....	41
Figura 11. <i>Sample Entropy</i> da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=1$ a $m=6$ e $r= 0,20$ nas alturas 25m e 50m de Janeiro.....	43
Figura 12. <i>Sample Entropy</i> da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=1$ a $m=6$ e $r= 0,20$ nas alturas 25m e 50m de Fevereiro....	43
Figura 13. <i>Sample Entropy</i> da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=1$ a $m=6$ e $r= 0,20$ nas alturas 25m e 50m de Março.....	44
Figura 14. <i>Sample Entropy</i> da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=1$ a $m=6$ e $r= 0,20$ nas alturas 25m e 50m de Abril.....	44
Figura 15. <i>Sample Entropy</i> da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=1$ a $m=6$ e $r= 0,20$ nas alturas 25m e 50m de Maio.....	45
Figura 16. <i>Sample Entropy</i> da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=1$ a $m=6$ e $r= 0,20$ nas alturas 25m e 50m de Junho.....	45
Figura 17. <i>Sample Entropy</i> da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=1$ a $m=6$ e $r= 0,20$ nas alturas 25m e 50m de Julho.....	46
Figura 18. <i>Sample Entropy</i> da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=1$ a $m=6$ e $r= 0,20$ nas alturas 25m e 50m de Agosto.....	46
Figura 19. <i>Sample Entropy</i> da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=1$ a $m=6$ e $r= 0,20$ nas alturas 25m e 50m de Setembro...	47
Figura 20. <i>Sample Entropy</i> da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=1$ a $m=6$ e $r= 0,20$ nas alturas 25m e 50m de Outubro.....	47

Figura 21. <i>Sample Entropy</i> da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=1$ a $m=6$ e $r= 0,20$ nas alturas 25m e 50m de Novembro.....	48
Figura 22. <i>Sample Entropy</i> da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m =1$ a $m=6$ e $r= 0,20$ nas alturas 25m e 50m de Dezembro.....	48
Figura 23. <i>Sample Entropy</i> da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=2$ e $r= 0,10$ nas alturas 25m e 50m.....	50
Figura 24. <i>Sample Entropy</i> da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=2$ e $r= 0,15$ nas alturas 25m e 50m.....	51
Figura 25. <i>Sample Entropy</i> da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=2$ e $r= 0,20$ nas alturas 25m e 50m.....	51
Figura 26. <i>Sample Entropy</i> da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=2$ e $r= 0,25$ nas alturas 25m e 50m.....	52
Figura 27. <i>Sample Entropy</i> da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=2$ e $r= 0,30$ nas alturas 25m e 50m.....	52
Figura 28. <i>Cross-Sample Entropy</i> da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=2$ e $r= 0,10$ a $r=30$ nas alturas 25m e 50m.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação da velocidade dos ventos de acordo com Beaufort.....	25
Tabela 2. Informações geográficas da estação solarimétrica e anemométrica analisada em Petrolina.....	36
Tabela 3. Descrição das variáveis medidas da rede SONDA.....	38
Tabela 4. Estatísticas Descritivas das séries mensais de velocidade do vento em Petrolina em $m.s^{-1}$	40
Tabela 5. <i>Sample Entropy</i> da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m = 1$ a $m = 6$ e $r = 0,20$ nas alturas 25m e 50m, de Janeiro a Abril.....	42
Tabela 6. <i>Sample Entropy</i> da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m = 1$ a $m = 6$ e $r = 0,20$ nas alturas 25m e 50m, de Maio a Agosto.....	42
Tabela 7. <i>Sample Entropy</i> da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m = 1$ a $m = 6$ e $r = 0,20$ nas alturas 25m e 50m, de Setembro a Dezembro.....	42
Tabela 8. <i>Sample Entropy</i> da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 para altura de 25m e utilizando $m = 2$ e $r = 0,10$ a $0,30$ de Janeiro a Dezembro.....	49
Tabela 9. <i>Sample Entropy</i> da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 para altura de 50m e utilizando $m = 2$ e $r = 0,10$ a $0,30$ de Janeiro a Dezembro.....	50
Tabela 10. <i>Cross-SampEn</i> da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 para alturas de 25m e 50m e utilizando $m = 2$ e $r = 0,10$ a $0,30$ de Janeiro a Dezembro.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ApEn - *ApproximateEntropy*

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

Cross-SampEn – *Cross-Sample Entropy*

DEINFO - Departamento de Estatística e Informática

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

SampEn – *Sample Entropy*

SONDA – Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais

UFRPE - Universidade Federal Rural de Pernambuco

Sumário

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS.....	17
2.1. Objetivo Geral.....	17
2.2. Objetivos Específicos	17
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	18
3.1. CONHECIMENTO CLIMÁTICO	18
3.1.1. Clima e Tempo	19
3.1.2. Classificação do Clima	20
3.1.3. Principais Elementos Climáticos.....	21
3.2. VENTO	23
3.2.1. O efeito Coriolis	27
3.4. MEDIDAS DE ENTROPIA	28
3.4.1. Entropia de Shannon	29
3.4.2. Entropia amostral (<i>Sample Entropy</i>)	29
3.4.3. Entropia amostral cruzada (<i>Cross-Sample Entropy</i>)	31
4. MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1. ÁREA DE ESTUDO.....	33
4.2. DESCRIÇÃO DOS DADOS	34
4.2.1. Projeto SONDA	34
4.3. METODOLOGIA.....	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
6. CONCLUSÃO	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

1. INTRODUÇÃO

O estudo climático vem sendo bastante desenvolvido devido a sua importância para a vida na terra em diversas áreas, tais como: atividade marítima (RODRIGUES et al., 2004), estudos sobre incêndios florestais (FIEDLER, 2004), geração de energia eólica (ROVEDDER e ELTZ, 2008), entre outras. O Tempo é o estado médio da atmosfera numa dada porção de tempo em um determinado lugar, bem como ser caracterizado pela temperatura do ar, pressão, umidade, nuvens, precipitação, visibilidade e vento. Como também, o clima é a síntese do tempo num dado lugar durante um período de 30 a 35 anos aproximadamente (AYOADE, 2015).

As mudanças do clima têm sido observadas e divulgadas em todo o mundo e frequentemente causam transtornos tão graves em uma região que mudam a vida das pessoas que habitam ou que dependem da mesma. Esses transtornos provenientes de mudanças do clima também têm um impacto grande na economia da região danificada. Com tudo vê-se a necessidade de estudos que ajudem a entender o funcionamento climático para que assim se possa organizar melhor o modo como o homem ocupa e muda aspectos na Terra, e assim prevenir as alterações do clima que tanto desequilibram o ecossistema do planeta.

O clima é influenciado por diversos fatores, tais como: altitude, latitude, massas de ar, continentalidade, maritimidade, relevo e vegetação. Os elementos do clima se conjugam para formar o tempo atmosférico e o clima propriamente dito. Estes elementos influenciam de maneira individual e conjuntamente o clima de uma região. Dentre os elementos do clima um dos mais importantes é o vento, que pode ser definido como o movimento do ar sobre a superfície terrestre, na qual se desloca de áreas de maior pressão para áreas de menor pressão e quanto maior a diferença entre essas pressões, maior será a velocidade do vento, que é definida como a distância percorrida por este, em um determinado intervalo de tempo, geralmente expressa em $m.s^{-1}$ ou $km.h^{-1}$ (VIANELLO; ALVES, 2006).

O vento é um dos acontecimentos do clima mais importantes, uma vez que os ventos fortes podem destruir construções, derrubar árvores ou criar condições de ondas perigosas no mar. São responsáveis por carregar a poluição atmosférica e precipitação para determinadas áreas em que ela normalmente não ocorre, é fundamental na dispersão de pólen e sementes, como também na formação de dunas e na erosão do solo, além de ser utilizado como fonte de energia eólica (FERREIRA, 2006).

Pelo fato de o vento ser um acontecimento climático de suma importância na atmosfera é fundamental um estudo mais detalhado para conhecer melhor a sua dinâmica.

Esta dissertação está dividida em seis partes. No Capítulo 2 apresentamos os objetivos geral e específicos. No Capítulo 3, tem-se as características do fenômeno estudado e fundamentos teóricos do método utilizado para o desenvolvimento do trabalho. No Capítulo 4, descreve-se a área de estudo, os dados e a metodologia utilizada neste trabalho. No Capítulo 5, apresentam-se os resultados e as discussões. As considerações finais e a proposta dos futuros trabalhos são apresentadas no Capítulo 6.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral dessa dissertação é estudar a variabilidade temporal intra anual da velocidade do vento por meio da metodologia *Sample Entropy* (*SampEn*) e *Cross-Sample Entropy* (*Cross-SampEn*), desenvolvido para quantificar a complexidade em séries temporais não lineares.

2.2. Objetivos Específicos

- a) Estudar o método *Sample Entropy* e *Cross-Sample Entropy* bem como as ferramentas computacionais para implementação nas séries temporais.
- b) Aplicar estes métodos nas séries temporais de velocidade do vento nas alturas 25m e 50m em Petrolina durante o ano de 2010 para cada mês e comparar os resultados obtidos.
- c) Concluir se a complexidade da dinâmica do vento em Petrolina mostra uma variabilidade intra anual e se está relacionada com variabilidade de potencial eólico na localização estudada.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. CONHECIMENTO CLIMÁTICO

As diversas atividades do homem são influenciadas de várias maneiras pelo clima. O estudo do tempo (estado da atmosfera num dado tempo e lugar) é, portanto, tão antiga quanto a curiosidade do homem sobre o seu meio ambiente. A forma como o homem vive, o ar que respira, a comida que come e a água que bebe estão todos relacionados com o clima. Na Idade Antiga acreditava-se que os fenômenos do clima eram controlados pelos deuses até cerca de 400 a.C., quando Hipócrates e Aristóteles publicaram as suas obras, “Ar, águas e lugares”, e “Meteorológicos”. Os trabalhos representaram a soma do conhecimento sobre tempo e clima naquele momento histórico (MUSA, 2008).

Durante o domínio do mundo grego pelo Império Romano, houve uma queda considerável de produção intelectual no período, pois os romanos estavam mais preocupados com o expansionismo do Império. Após a instituição do cristianismo como religião ocidental e sua difusão pelo mundo, observam-se uma quase completa negação da busca pela compreensão da natureza, pois a posição metafísica reinante no clero somente permitia a leitura da realidade a partir de uma filosofia teológica (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Foi a partir de movimentos como o Renascimento que as preocupações com a atmosfera foram retomadas, no sentido de desvendar seu funcionamento. Na mesma época foi inventado o termômetro e o barômetro, por Galileu Galilei, em 1593, e por Torricelli, em 1643, respectivamente. As mensurações científicas somente se tornaram possíveis com a invenção destes instrumentos. Durante as duas guerras mundiais, no século XX, o aprimoramento desses conhecimentos foram mais marcantes, pois era fundamental o monitoramento da dinâmica atmosférica. Desde então, os saltos foram cada vez mais rápidos e intensos (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007; BARRY; CHORLEY, 2013).

Na atualidade, com o aumento da velocidade do sistema de comunicação, tem-se um período de intensa circulação de informações, o que facilitou a difusão de dados meteorológicos e climatológicos, possibilitando assim o conhecimento da dinâmica atmosférica e contribuindo para a elaboração de pesquisas (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

3.1.1. Clima e Tempo

Existe uma distinção entre clima e tempo diferente do pensamento do senso comum. Sendo o tempo definido como o estado médio da atmosfera, numa dada porção de tempo, num determinado lugar, e também dinâmico possuindo os elementos: temperatura do ar, pressão, umidade, nuvens, precipitação e vento. Temos o clima definido como a síntese do tempo, num dado lugar, durante um período de 30 a 35 anos aproximadamente. Ao observar elementos meteorológicos ao longo de um período de tempo específico, obteríamos o clima de um lugar particular (AYOADE, 2015).

O tempo meteorológico é a adição das condições atmosféricas de um dado local, num determinado tempo cronológico. Temos que o clima é uma generalização das condições do tempo para certo período, em uma determinada área (VIANELLO; ALVES, 2006).

Em trabalhos de vários estudiosos são apresentadas algumas definições para o clima, então temos para Thornthwaite a definição do clima como “a interação de fatores meteorológicos que concorrem para dar a uma região seu caráter e sua individualidade”. Köppen define que o “clima é o somatório das condições atmosféricas que fazem um lugar da superfície terrestre ser mais ou menos habitável para os humanos, animais e plantas”. Para o climatologista alemão Hann, o “clima é o conjunto dos fenômenos meteorológicos que caracterizam o estado médio da atmosfera em um ponto da superfície terrestre” (VIANELLO; ALVES, 2006).

3.1.2. Classificação do Clima

Temos como um dos sistemas de classificação do clima mais usados e abrangente, o de Köppen-Geiger, mais conhecido por “classificação do clima de Köppen”, introduzido pelos climatologistas Wladimir Köppen e Rudolf Geiger, em 1928. Este sistema de classificação parte do pressuposto básico de que a vegetação natural é a melhor expressão do clima de uma região nela prevalecente. Para determinar os tipos climáticos são considerados a sazonalidade e os valores médios anuais e mensais da temperatura do ar e da precipitação (ROLIM et al., 2007; AYOADE, 2015).

A classificação do clima de Köppen divide o mesmo em 5 grupos. Os símbolos usados para representar os grupos, tipos e variedades climáticas são letras maiúsculas (“A”, “B”, “C”, “D”, “E”) que denota a classificação geral climática em uma região (Tropical, Árido, Temperado, Continental e Glacial), e minúsculas, podendo ainda aparecer livres ou caracterizadas por um, dois ou três primos, que estabelece o tipo de clima dentro do grupo (AYOADE, 2015).

A – Climas tropicais úmidos: A temperatura média mensal é maior que 18° C, consequentemente quase todos os meses são quentes. E, o inverno sem características predominantes da estação.

B – Climas secos: Precipitação escassa na maior parte do ano, altos índices de evaporação e transpiração.

C – Climas úmidos de latitudes médias com invernos amenos: Caracterizado por verões intensos e invernos amenos. A temperatura média do mês mais frio varia entre de 18° C e -3° C.

D – Climas úmidos de latitudes médias com invernos severos: No mês mais quente a temperatura média excede 10° C e no mês mais frio fica abaixo de -3° C.

E – Climas polares: Invernos e verões extremamente frios. A temperatura não ultrapassa 10° C.

- Clima Equatorial: Caracterizado por temperaturas médias anuais e pluviosidade elevada. A temperatura média do ar fica entre 24° C e 27° C e a precipitação anual é superior a 2000 mm. As amplitudes médias anuais são

muito reduzidas, ou seja, a diferença entre a temperatura média e máxima anual e média e mínima anual é muito reduzida.

- **Clima Tropical:** Abrange os climas das regiões intertropicais. Apresenta temperatura elevada o ano inteiro. Tem duas estações bem definidas: verão, que ocorrem as chuvas, e inverno ameno e seco. É considerado como transição entre o clima equatorial e o desértico. Este tipo de clima ocorre na maior parte do território brasileiro.
- **Clima Subtropical:** Apresentam grande variação de temperatura entre o verão e inverno. Não possuem uma estação seca e as chuvas são bem distribuídas durante o ano. É característico das áreas geográficas ao sul do Trópico de Capricórnio e ao norte do Trópico de Câncer, com temperaturas médias anuais nunca superiores a 20° C. A temperatura mínima do mês mais frio nunca é menor que 0° C.
- **Clima Mediterrâneo:** Está presente em regiões quentes de clima seco no verão e brando e úmido no inverno. As chuvas são relativamente escassas. Possuem quatro estações bem marcadas (primavera, verão, outono e inverno).
- **Clima Árido:** caracterizado por temperaturas médias muito altas e grandes variações na temperatura ao longo do dia, apresentando-se muito quente durante o dia e muito frio durante a noite. Este clima é muito seco e as precipitações são escassas.
- **Clima Semiárido:** Possui temperatura elevada sendo a média anual de 25°C a 28°C e baixa umidade. Apresenta poucas chuvas, as quais são mal distribuídas durante o ano. O índice pluviométrico anual fica em torno de 700 milímetros. As poucas chuvas se concentram entre os meses de janeiro a maio. Temos também uma ação irregular de massas de ar tropical e equatorial.

3.1.3. Principais Elementos Climáticos

Os elementos climáticos são os seus componentes principais, ou seja, são aqueles que se conjugam para formar o tempo atmosférico e o clima propriamente dito. Podem definir os atributos físicos que representam as propriedades da atmosfera geográfica de um dado lugar. Os mais utilizados

para caracterizar a atmosfera geográfica são a temperatura, a umidade e a pressão, que, influenciados pela diversidade geográfica, manifestam-se por meio de precipitação, vento, nebulosidade, ondas de calor e frio, entre outros (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007; TORRES; MACHADO, 2016).

- **Pressão Atmosférica:** Em um determinado ponto é a força exercida em todas as direções, por efeito do peso total do ar considerado acima desse ponto. Sendo o resultado dos movimentos complexos e constantes do ar, das variações de sua temperatura e do seu teor de vapor d'água, o peso do ar sobre um dado ponto fixo varia constantemente. A pressão, assim como a temperatura, nunca se estabilizam (BLAIR; FITE, 1964).
- **Radiação Solar:** A mesma se refere à emissão de energia emitida pelo sol por meio de ondas eletromagnéticas. É a radiação solar que aquece diretamente algumas regiões, e a deficiência faz com que outras regiões se tornem frias. Praticamente toda a vida animal ou vegetal, necessita de exposição à luz solar para sobreviver (BLAIR; FITE, 1964).
- **Temperatura:** É a medida do grau de agitação das moléculas de gás. A temperatura é usualmente definida em termos relativos tomando-se por base o grau de calor que um corpo possui (AYOADE, 2015).
- **Umidade do Ar:** É a quantidade de vapor de água que encontramos na atmosfera, podendo ser expressa em valores absolutos ou relativos. Apesar de o vapor d'água representar somente 2% da massa total da atmosfera e 4% de seu volume, ele é o componente atmosférico mais importante na determinação do tempo e do clima, pois o vapor d'água é a origem de todas as formas de condensação e precipitação (AYOADE, 2015).
- **Precipitação:** Refere-se às diversas formas líquidas e congeladas de água, como a chuva, neve, granizo, orvalho, geada e nevoeiro. Porém, apenas a chuva e a neve contribuem significativamente para os totais de precipitação (AYOADE, 2015).
- **Nebulosidade:** É o conjunto de nuvens que se formam no céu em uma determinada localidade. A nebulosidade serve como uma barreira para que a

radiação solar não penetre bem como serve para não perder radiação terrestre (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

- Vento: É definido como qualquer movimento horizontal do ar atmosférico. Esse fenômeno é consequência do movimento do ar de um ponto onde a pressão atmosférica é mais alta para um ponto onde ela é mais baixa. A análise dos ventos nos estudos climáticos foi introduzida em 1820 por Von Buch (VIANELLO; ALVES, 2006).

3.2. VENTO

O vento é o movimento do ar em relação à superfície terrestre, movimento esse que se processa tanto no sentido horizontal como no sentido vertical (AYOADE, 2015). O aquecimento diferencial de locais próximos ou distantes da superfície terrestre gera diferenças de pressão atmosférica (TUBELIS; NASCIMENTO, 1984).

Dessa forma, o vento é gerado a partir (ou produzido) de gradientes de pressão atmosférica, ou seja, é gerado em virtude da existência de pressões diferentes, mas sofre influências modificadoras do movimento de rotação da Terra, da força centrífuga ao seu movimento e do atrito com a superfície terrestre. Assim, para estabelecer o equilíbrio das diferentes pressões, o vento desloca-se das áreas de alta pressão para as áreas de baixa pressão, mantendo, geralmente, características próprias da atmosfera de que procede (frio, quente, úmido, seco etc.) (TORRES; MACHADO, 2016).

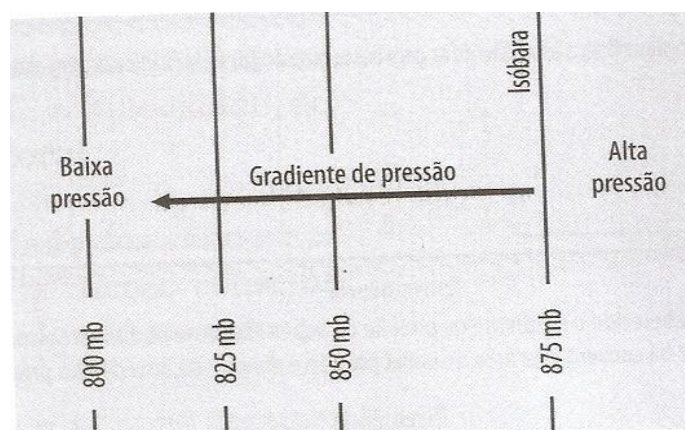
Com maior temperatura, ou seja, com maior grau de calor, o ar é aquecido, se expande, fica mais leve e sobe (ascende), dando lugar a outro ar (vento), em geral, de características mais frias, que vem para ocupar o espaço então criado. Nota-se que o ar quente viaja pelas camadas superiores da troposfera, ao passo que o ar mais frio (mais denso e mais pesado) se desloca pelas partes mais baixas (TORRES; MACHADO, 2016).

Por ser gasoso, o ar obedece às leis da dinâmica dos fluidos, de tal forma que, em duas áreas contíguas com distintas pressões, o ar mais denso irá fluir em direção à área de menor pressão, até que se estabeleça um equilíbrio barométrico entre elas. Ao processo de deslocamento do ar de uma área de alta pressão para outra de baixa pressão, dá-se o nome de advecção,

que tem como resultado a geração de vento (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

A velocidade do vento será controlada pelo gradiente de pressão estabelecido entre as duas áreas, dado pela diferença de pressão do ar entre duas superfícies contíguas, de forma que, quanto maior for o gradiente, mais veloz será o vento (Figura 1) (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Figura 1 - Gradiente de pressão: formam-se quando há duas áreas contíguas com características barométricas distintas, vindo a constituir uma área de alta pressão e outra de baixa pressão. Se a Terra não girasse em torno de seu eixo, a direção de deslocamento dos ventos coincidiria com a seta do gradiente de pressão.

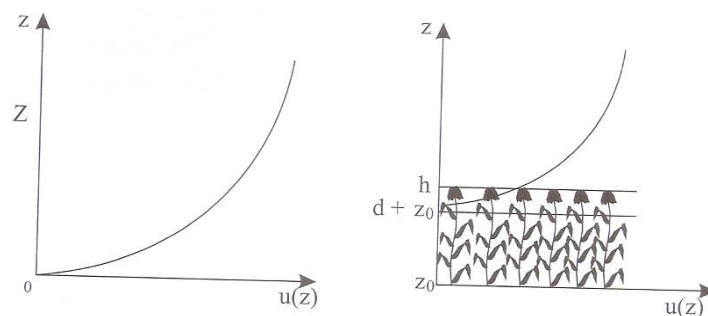


Fonte: Mendonça; Danni-Oliveira (2007).

Em geral, o vento é mais forte e veloz nas partes mais altas, pois a velocidade próxima do solo é diminuída pela fricção ou pelo atrito do próprio vento com os obstáculos da superfície (LEINZ; AMARAL, 1989). De acordo com Soares e Batista (2004), se a superfície estiver coberta de vegetação, o perfil do vento só se estabelece de determinada altura acima do solo, ou seja, a velocidade do vento se anula na altura da vegetação, como podemos observar na (Figura 2).

Bem como, a rugosidade do solo é um fator redutor da velocidade dos ventos em superfície, uma vez que desempenha um efeito de fricção sobre os ventos. Assim, os oceanos favorecem a formação de ventos velozes, enquanto os continentes, devido à heterogeneidade da cobertura de suas superfícies (vegetação, presença de cidades) e às suas características geomorfológicas, tendem a reduzi-la (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Figura 2 - Perfil da velocidade do vento (u_z) sobre uma superfície não vegetada (esquerda) e sobre uma superfície coberta com vegetação com altura h (direita).



Fonte: Torres; Machado (2016).

Para Soares e Batista (2004), a velocidade do vento é uma grandeza vetorial com base na qual se medem, normalmente, parâmetros da sua componente horizontal. Os parâmetros medidos são velocidade, direção e força do vento.

A velocidade do vento pode ser classificada, empiricamente, por meio da escala de Beaufort, que associa a velocidade com observações visuais do efeito do vento (Tabela 1) (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Tabela 1 - Classificação da velocidade dos ventos de acordo com Beaufort.

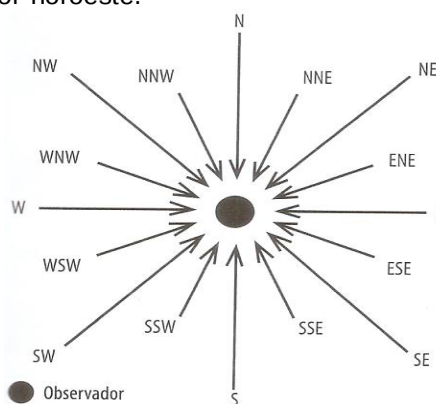
Grau	Velocidade $m. s^{-1}$	Classificação do Vento	Característica da Paisagem
0	0,0 - 0,2	Calmo	A fumaça sobe verticalmente e as bandeiras pendem tranquilas.
1	0,3 - 1,5	Leve	A fumaça desvia-se um pouco e indica a direção do vento.
2	1,6 - 3,3	Brisa leve	Sente-se o vento nas faces, as folhas das árvores alvoroçam-se.
3	3,4 - 5,4	Brisa suave	As folhas das árvores movem-se constantemente, bandeiras desfraldam-se.
4	5,5 - 7,9	Vento moderado	Galhos finos de árvores curvam-se e começa a levantar poeira e papel do solo.
5	8,0 - 10,7	Vento fresco	Pequenas árvores em crescimento começam a se curvar e bandeiras flamulam estendidas.
6	10,8 - 13,8	Vento forte	Galhos grandes curvam-se, arames silvam e formam-se crostas de espuma sobre as ondas.

7	13,9 - 17,1	Vento rápido	As árvores movem-se por inteiro, é difícil caminhar contra o vento.
8	17,2 - 20,7	Ventania	Quebram-se ramos de árvores e é muito difícil caminhar contra o vento.
9	20,8 - 24,4	Ventania forte	Estragos leves em casas, telhas são arrancadas e quebram-se galhos de árvores.
10	24,5 - 28,4	Ventania desenfreada	Árvores são arrancadas e janelas são quebradas.
11	28,5 - 32,6	Tempestade	Estragos generalizados em construções.
12	Acima de 32,7	Furacão ou ciclone	Destruição geral.

Fonte: Mendonça; Danni-Oliveira (2007).

É importante salientar que em consequência de os ventos trazerem com eles as características térmicas e higrométricas (umidade) do ambiente onde se originam, recebem o nome da direção do local de onde procedem. Assim, alguém que se encontre em Curitiba (PR), por exemplo, saberá que, se houver a ocorrência de vento sul, a temperatura do ar tenderá a diminuir e, ao contrário, caso haja vento norte, a temperatura irá se elevar. A rosa dos ventos da (Figura 3) foi adaptada para representar as principais possibilidades de direções de vento, a partir de um dado observador (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Figura 3 - Principais direções dos ventos, os quais são denominados de acordo com a direção de onde procedem, indicando, assim, suas características térmicas e de umidade. As letras maiúsculas indicam as direções: N=norte, NNE=nor-nordeste, NE=nordeste, ENE=es-nordeste. E=Leste, ESE=es-sudeste, SE=sudeste, S=sul, SSW=su-sudoeste, SW=sudoeste, WSW=oes-sudeste, W=oeste, WNW=oes-noroeste, NW=noroeste, NNW=nor-noroeste.



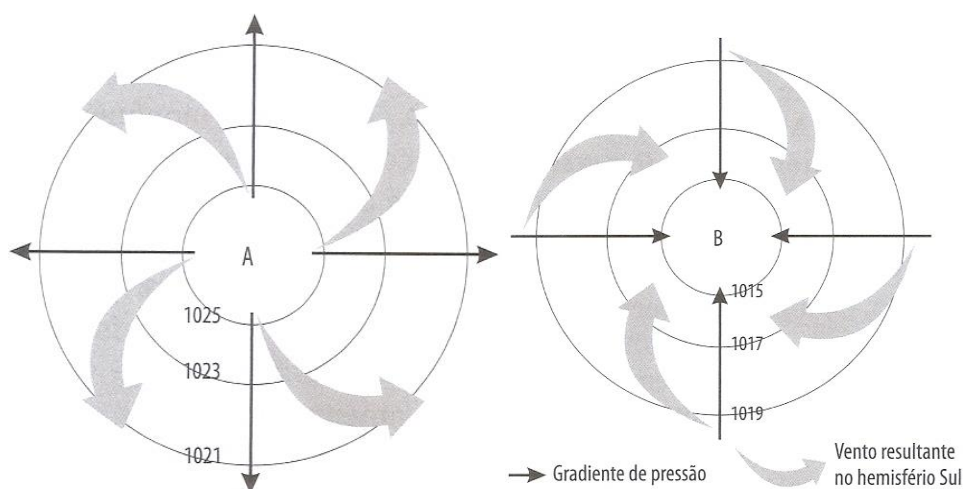
Fonte: Mendonça; Danni-Oliveira (2007).

3.2.1. O efeito Coriolis

Além do efeito causado pela força de fricção da superfície sobre o vento, este também é modificado pela força de Coriolis, chamada de efeito Coriolis, que resulta do movimento de rotação da Terra e se manifesta em grande escala espacial. Se a Terra fosse estática, sem apresentar a rotação ao redor de seu eixo, o vento ocorreria obedecendo exclusivamente ao gradiente de pressão, isto é, a direção do vento seria a mesma do gradiente de pressão (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Entretanto, o efeito Coriolis age sobre o vetor de deslocamento do vento, desviando-o de sua trajetória original. No hemisfério Sul, o vento é defletido para a esquerda e, no hemisfério Norte, para a direita (Figura 4). Sua ação é máxima em ambos os polos e diminui em direção à linha do Equador, onde é nulo (VIANELLO; ALVES, 2006; MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

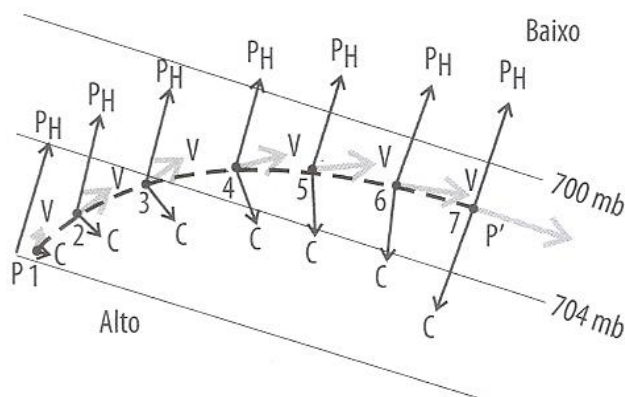
Figura 4 - O efeito Coriolis: O gradiente de pressão de superfície formado pelas áreas de alta (A) e baixa (B) pressão gera ventos que são desviados para a esquerda no hemisfério Sul e para a direita no hemisfério Norte.



Fonte: Mendonça; Danni-Oliveira (2007).

Quando a força de Coriolis é aplicada de forma a ser de mesma intensidade, porém, em direção oposta à força do gradiente de pressão (Figura 5), o vento resultante é paralelo às isóbaras, gerando o vento geostrófico. Este curso é conhecido como balanço geostrófico (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Figura 5 - Vento geostrófico: Seguindo o gradiente de pressão, a parcela de ar desloca-se do ponto P e é defletida pela força de Coriolis, resultando em um deslocamento paralelo às isóbaras no ponto P', caracterizando o vento geostrófico.



Fonte: Mendonça; Danni-Oliveira (2007).

A velocidade desse vento será proporcional à distância entre as isóbaras; quanto mais próximas forem, mais intenso será o vento. Como as isóbaras raramente apresentam-se paralelas entre si, mas formam sinuosidades, a aceleração do vento irá responder à força do gradiente de pressão que tem seus valores alterados para mais ou para menos, de acordo com o traçado das isóbaras. Assim, a velocidade de deslocamento do vento seguirá essas modificações (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

3.4. MEDIDAS DE ENTROPIA

Em física, entropia é uma medida da quantidade de desordem que há em um sistema. Já em estatística, é uma medida da quantidade de incerteza associada com uma variável aleatória. Em teoria da informação o conceito de entropia foi introduzido por Shannon (1948) para estudar a transmissão de sinais (COVER e THOMAS, 1991).

Em séries temporais, a entropia nos apresenta o grau de complexidade de uma série. Desta maneira, uma baixa entropia significa uma baixa complexidade ou variabilidade da série, indicando que esta é uma série da qual tende a ser mais fácil realizar previsões. Já quando houver uma alta entropia, entenderemos que esta é uma série difícil de ser modelada e conseqüentemente de se realizar previsões. Uma entropia nula equivale a uma série constante, totalmente regular, enquanto que uma entropia máxima (dentro

da escala da qual está se realizando a medida) representa uma série totalmente irregular (SILVA, 2014).

3.4.1. Entropia de Shannon

A entropia de Shannon (1948) $H(x)$ de uma variável aleatória X com função de probabilidade $P(X) = p(x)$ é definida:

$$H(x) = - \sum p(x) \log p(x) \quad (1),$$

onde o *logaritmo* é considerado na base 2 e, a entropia é expressa em *bits*. Notemos que a entropia é uma função da distribuição de X . Ela não depende dos valores reais tomadas pela variável aleatória X , mas sim dos valores de suas probabilidades.

Vale salientar que outras medidas também foram baseadas no conceito de entropia, buscando quantificar a complexidade estrutural em um processo temporal. Podemos citar como medidas de entropia, além do *Shannon Entropy*, entropia de *Kolmogorov* (1983), entropia de Rényi (1961), entropia de Tsallis (1988), *Approximate Entropy* (1992), *Sample Entropy* (2000) e *Permutation Entropy* (2002).

3.4.2. Entropia amostral (*Sample Entropy*)

O método *Sample Entropy* ($SampEn(m, r, N)$), introduzido por Richman e Moorman (2000), é definido como sendo o logaritmo natural da probabilidade condicional de que duas sequências similares (dentro de um nível de tolerância r), para m pontos, permanecem similares para $m+1$ pontos.

Seja $x(1), \dots, x(N)$ uma série temporal de tamanho N . O cálculo da $SampEn(m, r, N)$ é feito seguindo as etapas descritas abaixo:

1. Construir $N - m$ vetores de tamanho m onde:

$$x(i) = [x(i), x(i+1), \dots, x(i+m-1)], i = 1, \dots, N - m + 1 \quad (2)$$

2. Definir a distância d_m entre os vetores $x(i)$ e $x(j)$, onde:

$$d_m[x(i), x(j)] = \max_{k=0, m-1} [|x(i+k) - x(j+k)|] \quad (3)$$

3. Para cada $i = 1, \dots, N - m$; calcula-se:

$$B_i^m(r) = \frac{B_i}{(N - m - 1)} \text{ e } A_i^m(r) = \frac{A_i}{(N - m)} \quad (4)$$

onde B_i é o número dos vetores $x(j)$ de tamanho m que são similares aos vetores $x(i)$ dentro da distância $r: d_m[x(i), x(j)] \leq r$ e A_i é o número dos vetores $x(j)$ de tamanho $(m+1)$ que são similares aos vetores $x(i)$ dentro da distância r .

4. Calcula-se:

$$B^m(r) = \frac{1}{N-m} \left(\sum_{i=1}^{N-m} B_i^m(r) \right) \quad (5)$$

e

$$A^m(r) = \frac{1}{N-m} \left(\sum_{i=1}^{N-m} A_i^m(r) \right) \quad (6)$$

onde $B^m(r)$ é a probabilidade de dois vetores serem similares para m pontos, $A^m(r)$ é a probabilidade de dois vetores serem similares para $(m+1)$ pontos.

5. Por fim, calcula-se o índice *Sample Entropy*:

$$SampEn(m, r, N) = -\ln \left(\frac{A^m(r)}{B^m(r)} \right) \quad (7)$$

Que representa a probabilidade condicional que de duas sequências que são similares para m pontos permanecem similares para $m+1$ pontos (quando um dado consecutivo é adicionado).

Sample Entropy é uma modificação do método *Approximate Entropy* (*ApEn*) (PINCUS; VISCARELLO, 1992). Ambos os métodos servem para quantificar a complexidade em séries temporais não lineares, e foram amplamente usados em análise de processos fisiológicos (LAKE, 2002; COSTA, 2014), sinais geofísicos (BALASIS et al., 2009; MIN et al., 2010), séries climáticas (SHUANGCHENG, 2006; SANTOS et al., 2015), processos hidrológicos (HUANG et al., 2011; CHOU, 2014; ARAUJO et al., 2015) e dados financeiros (REDDY e SEBASTIAN, 2007; STOSIC et al., 2016). Uma maior complexidade (menor regularidade) da série temporal gera o valor do *SampEn* mais alto.

A estimativa da complexidade é de grande interesse na previsão climática. Pode-se citar uma aplicação que utilizou o método *SampEn* para medir a complexidade de séries diárias de temperatura do ar na China

(SHUANGCHENG et al., 2006). Os resultados indicam que *SampEn* é uma abordagem não-linear alternativa para analisar e prever complexidade de séries temporais climáticas.

3.4.3. Entropia amostral cruzada (*Cross-Sample Entropy*)

O método *Cross-Sample Entropy* (*Cross-SampEn(m,r,N)*), introduzido por Richman e Moorman (2000), é indicado para medir o grau de sincronização entre duas séries temporais. É definido como sendo o logaritmo natural da probabilidade condicional de que duas sequências similares (dentro de um nível de tolerância r), para m pontos, permanecerem similares para $m+1$ pontos.

Seja $u = (u(1), u(2), \dots, u(N))$ e $v = (v(1), v(2), \dots, v(N))$ duas séries temporais de comprimento N . Fixando os parâmetros de entrada m e r , onde m é o tamanho do vetor que será comparado e o r é o nível de tolerância, o método consiste em:

1. Formar $N - m$ sequências de vetores:

$$\begin{aligned} x(i) &= [u(i), u(i+1), \dots, u(i+m-1)], & i &= 1, \dots, N-m, \\ v(i) &= [v(i), v(i+1), \dots, v(i+m-1)], & i &= 1, \dots, N-m, \end{aligned} \quad (8)$$

baseadas em u e v , respectivamente.

2. Para cada $i \leq N - m$, temos:

$$B_i^m(v||u) = \frac{\text{número de } 1 \leq i \leq N - m \text{ tal que cujo a } d_m[x_m(i), y_m(j)] \leq r}{N - m} \quad (9)$$

$$\text{Onde } d_m[x_m(i), y_m(j)] = \max[|u(i+k) - v(i+k)|] : 0 \leq k \leq m-1 \quad (10)$$

e

$$\begin{aligned} A_i^m(v||u) &= \frac{\text{número de } 1 \leq i \leq N - m \text{ tal que cujo a } d_{m+1}[x_{m+1}(i), y_{m+1}(j)] \leq r}{N - m} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{Onde } d_{m+1}[x_{m+1}(i), y_{m+1}(j)] = \max[|u(i+k) - v(i+k)|] : 0 \leq k \leq m-1 \quad (12)$$

que é a diferença máxima dos respectivos componentes escalares, e $B_i^m(v||u)$ é a probabilidade de que qualquer $y_m(j)$ está dentro do nível de tolerância r de

$x_m(j)$ e $A_i^m(v||u)$ é a probabilidade de que qualquer r de $y_{m+1}(j)$ está dentro do nível de tolerância r de $x_{m+1}(j)$.

3. Em seguida, calcula-se:

$$B^m(r)(v||u) = \frac{1}{N-m} \left(\sum_{i=1}^{N-m} B_i^m(r)(v||u) \right) \quad (13)$$

$$A^m(r)(v||u) = \frac{1}{N-m} \left(\sum_{i=1}^{N-m} A_i^m(r)(v||u) \right) \quad (14)$$

4. Por fim, calcula-se o índice *Cross-Sample Entropy*:

$$Cross - SampEn(m, r, N) = -\ln \left(\frac{A^m(r)(v||u)}{B^m(r)(v||u)} \right) \quad (15),$$

Onde *Cross-SampEn* é uma estimativa de grau de sincronização entre duas séries temporais simultâneas. Uma menor sincronização entre duas séries temporais gera o valor do *Cross-SampEn* mais alto. Este método foi utilizado em análise de processos fisiológicos (CHANG et al., 2013; ZHANG et al., 2013), sinais geofísicos (HERNANDEZ-PEREZ et al., 2010), processos hidrológicos (ARAUJO et al., 2015) e dados financeiros (LIU et al., 2010; SHI & CHANG, 2013).

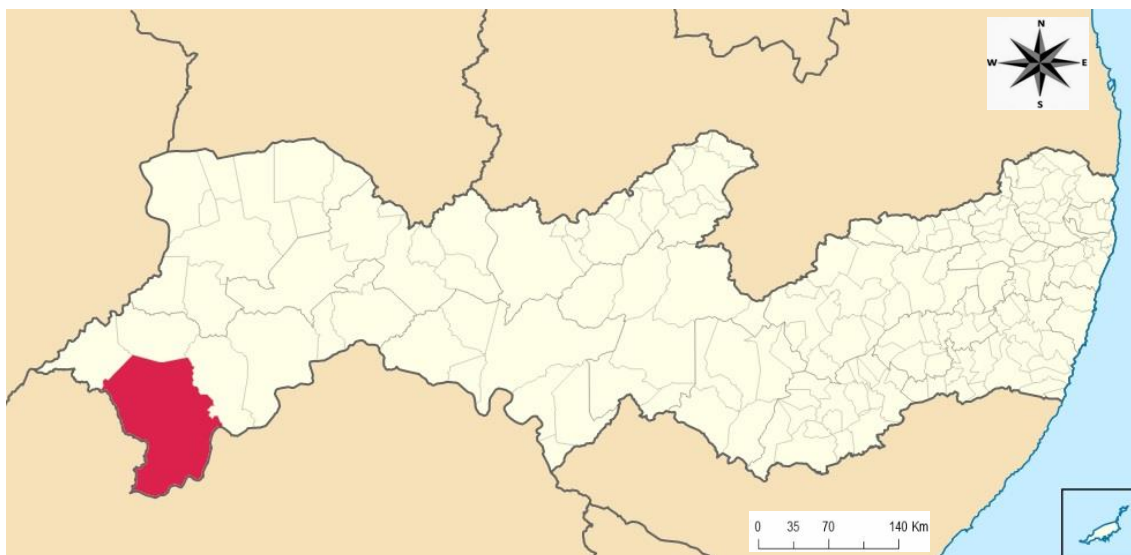
4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. ÁREA DE ESTUDO

Petrolina é um município brasileiro do interior de Pernambuco, localizada na região do São Francisco Pernambucano, distante 712 km a oeste de Recife, capital estadual (Figura 6). Possui uma extensão territorial de 4.561,872 km², composta por 08 municípios e, como as demais microrregiões sertanejas, tem clima quente e seco, chuvas escassas e mal distribuídas, como pela forte evaporação, por conta das altas temperaturas. Em conjunto com o vizinho município de Juazeiro, na Bahia, forma o maior aglomerado urbano do semi-árido e tem a segunda maior população e o maior PIB do interior de Pernambuco.

De acordo com o IBGE, a cidade vem obtendo um crescimento econômico e de contingente populacional, atingindo 293.962 habitantes em 2010 e registrando um crescimento real de 34,56% no período de 2000 a 2010, sendo, tanto pela economia quanto pela população, a principal cidade da RIDE São Francisco (Região Administrativa Integrada de Desenvolvimento do Pólo Petrolina e Juazeiro).

Figura 6 - Mapa de Pernambuco em destaque o Município de Petrolina.



Fonte: IBGE (2016)

4.2. DESCRIÇÃO DOS DADOS

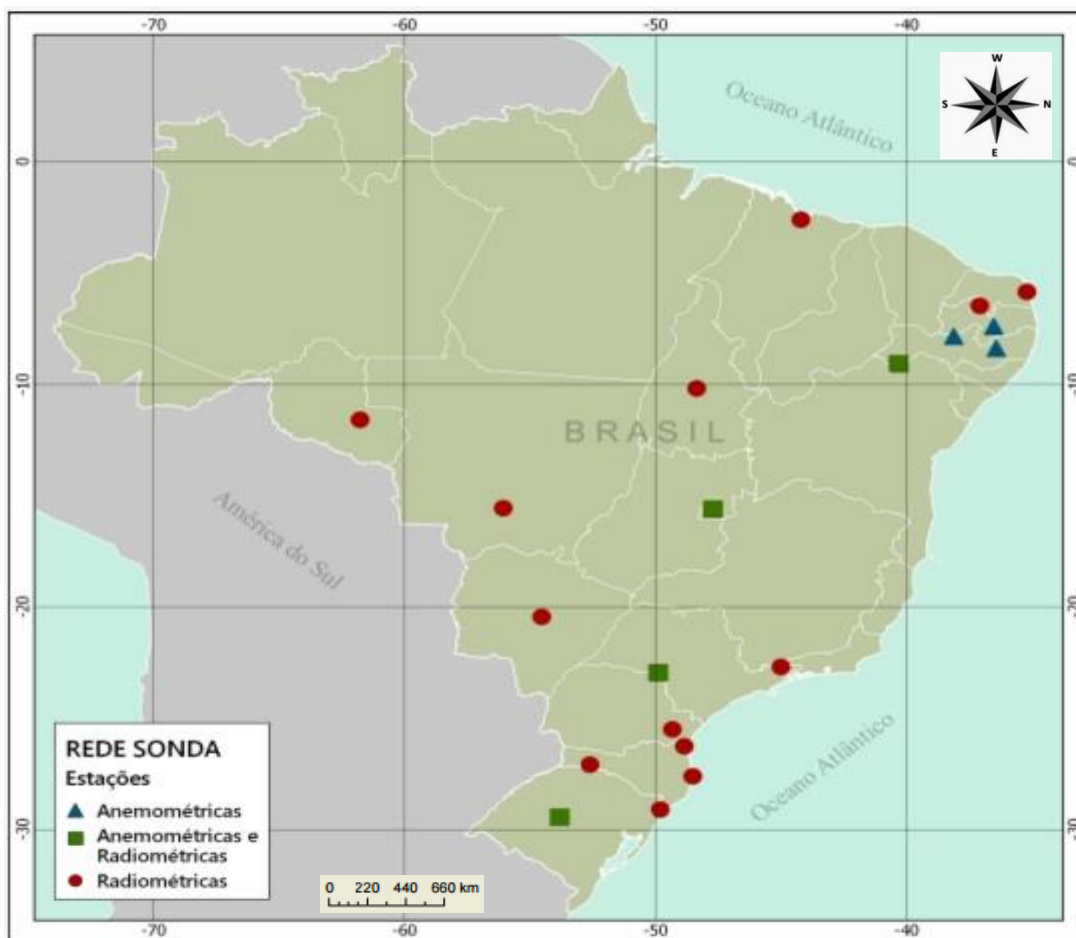
Os dados utilizados são séries de velocidade do vento (em metros por segundo) ($m.s^{-1}$), obtidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) no município de Petrolina localizada no Sertão de Pernambuco. Estes dados estão disponíveis pelo INPE no endereço eletrônico <<http://sonda.ccst.inpe.br/basedados/petrolina.html>>. As séries são compostas por observações de 10 em 10 minutos realizadas no ano de 2010.

4.2.1. Projeto SONDA

O Projeto SONDA tem como principal objetivo implementar uma infraestrutura física e de recursos humanos destinada à montagem e melhoramento da base de dados de superfície necessária ao levantamento dos recursos de energia solar e eólica no Brasil e consequente planejamento de seu uso, tendo como metas: Formação de uma base de dados de superfície necessária ao levantamento, avaliação e acompanhamento dos recursos de energia solar e eólica no Brasil; Apoio ao projeto SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment) no Brasil, através das atividades de coleta de dados e intervalidação de modelos de levantamento solar e eólico no Nordeste; Estudar a variabilidade dos recursos de energia solar e eólica no Brasil em função da climatologia e de mudanças no meio-ambiente; Desenvolver e implementar diversos produtos e serviços a serem disponibilizados ao público pela Internet, tais como: dados de campo, estatísticas sobre a variabilidade climática e outras informações climáticas destinadas ao setor de planejamento energético público e privado; Formação de recursos humanos na área de interface clima-energia renovável através dos cursos existentes de pós-graduação nas entidades participantes (SONDA, 2016).

A rede de coleta de dados SONDA conta com estações de medição distribuídas por todo o território brasileiro, como podemos ver na (Figura 7) a seguir:

Figura 7 - Estações de medições rede SONDA.



Fonte: Sonda (2015)

A rede SONDA tem sua base de dados dividida em 2 grupos, como podemos ver na Figura 8:

Figura 8 - Base de dados da rede SONDA.

Dados Ambientais	Dados Anemométricos
Periodicidade: médias de 1 em 1 minuto Radiométricos Radição Global Horizontal Radição Direta Normal Radição Difusa Radição de Onda Longa Descendente Radição Fotossinteticamente Ativa (PAR) Iluminância (Lux) Meteorológicos Temperatura do Ar (superfície) Umidade Relativa do Ar Pressão do Ar Precipitação de Chuva Velocidade do Vento a 10m Direção do Vento a 10m	Periodicidade: médias de 10 em 10 minutos Velocidade do Vento 25 m de altura 50 m de altura Direção do Vento 25 m de altura 50 m de altura Temperatura 25 m de altura 50 m de altura

Fonte: Sonda (2015)

Neste estudo utilizaremos os dados anemométricos da velocidade de vento nas duas alturas disponíveis, ou seja, 25m e 50m do ano de 2010, na Estação de Petrolina, Tabela 2 e Figura 9.

Tabela 2 - Informações geográficas da estação solarimétrica e anemométrica analisada em Petrolina.

Estação (SIGLA)	Tipo	UF	ID	Latitude	Longitude	Altura
Petrolina(PTR)	SA	PE	11	09° 04' 08" S	40° 19' 11" O	387 m

Fonte: Sonda (2015)

Figura 9 - Torre anemométrica na Estação de Petrolina.



Fonte: Sonda (2015)

Diversos fatores afetam a confiabilidade de dados medidos em campo por equipamentos automáticos, como por exemplo: relâmpagos, mau funcionamento ou mesmo acidentes com animais que podem alterar as medições tornando-as incorretas.

A rede SONDA de dados, antes de disponibilizar os dados de suas estações, submete-os a um processo de validação que objetiva identificar os dados suspeitos.

Para facilitar a visualização da validação dos dados de cada estação, estão disponíveis os gráficos com o resultado mês a mês, onde podem ser vistos os percentuais de aprovação em cada uma das etapas (SONDA, 2015).

Cada estação da rede SONDA possui uma configuração específica de sensores, medindo variáveis diferentes conforme sua classificação:

- Estação Anemométrica (A)
- Estação Solarimétrica (S)
- Estação Anemométrica e Solarimétrica (SA)

Na Tabela 3 estão agrupadas e descritas as variáveis medidas pela rede SONDA na Estação anemométrica bem como a sequência das colunas encontradas nos arquivos disponíveis para download.

Tabela 3 - Descrição das variáveis medidas da rede SONDA.

VARIÁVEIS INFORMATIVAS	
Identificador	Código identificador da estação
Ano	Ano corrente da coleta dos dados
Dia	Dia no calendário Juliano
Data e Hora	Data no calendário Gregoriano e hora: minuto:segundo no Horário UTC (Universal Time Coordinated - Hora Universal Coordenada)
Minuto	■ Variáveis Anemométricas: o minuto especificado (de 0 a 1430) indica a média dos 10 minutos posteriores Obs: horário UTC (Universal Time Coordinated - Hora Universal Coordenada)
VARIÁVEIS ANEMOMÉTRICAS Periodicidade: 10 minutos	
Velocidade do Vento a 25m	Velocidade média do vento a 25m em $m.s^{-1}$
Direção do Vento a 25m	Direção média do vento a 25m de 0° (Norte) a 360° (sentido horário)
Temperatura a 25m	Temperatura do ar a 25m em °C
Velocidade do Vento a 50m	Velocidade média do vento a 50m em $m.s^{-1}$
Direção do Vento a 50m	Direção média do vento a 50m de 0° (Norte) a 360° (sentido horário)
Temperatura a 50m	Temperatura do ar a 50m em °C

Fonte: Sonda (2015)

4.3. METODOLOGIA

Analizamos as séries temporais de velocidade do vento em Petrolina nas alturas de 25m e 50m para cada mês do ano 2010.

Aplicamos o método *Sample Entropy (SampEn)* descrito no Capítulo 3 nas séries temporais de velocidade do vento nas duas alturas e comparamos os resultados para cada mês, para analisar a variabilidade intra-anual da complexidade da dinâmica do vento.

Aplicamos o método *Cross-Sample Entropy (Cross-SampEn)* descrito no Capítulo 3, nas séries temporais simultâneas da velocidade do vento nas alturas de 25m e 50m. Comparamos os resultados obtidos para cada mês do ano 2010, para analisar a variabilidade intra-anual da sincronização da dinâmica do vento nas duas alturas.

Para as técnicas *Sample Entropy* e *Cross-Sample Entropy* estão disponíveis códigos abertos, em linguagem C, para sua aplicação, no site<<http://www.physionet.org/physiotools/sampen/c/>> (LAKE et al., 2012).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados das Estatísticas Descritivas dos dados e em seguida os resultados da *Sample Entropy* e *Cross-Sample Entropy* para a velocidade do vento em Petrolina nas alturas de 25m e 50m no ano de 2010.

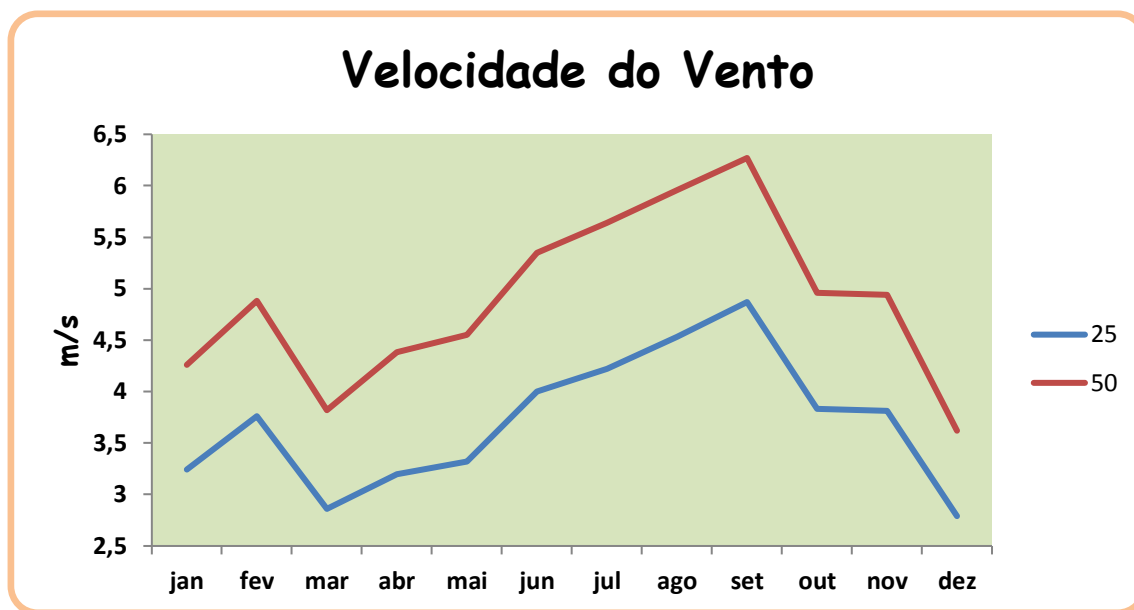
Na Tabela 4, nota-se que a maior velocidade mínima nas duas alturas encontra-se no mês de setembro sendo de $0,99 \text{ m.s}^{-1}$ em 25m e de $0,78 \text{ m.s}^{-1}$ em 50m de altura. Como também, tem-se que a maior velocidade máxima no mês de dezembro consistir em $12,11 \text{ m.s}^{-1}$ na altura de 25m e de $14,30 \text{ m.s}^{-1}$ na altura de 50m. Vale salientar que as maiores médias da velocidade do vento ocorreram no mês de setembro nas duas alturas sendo respectivamente de $4,87 \text{ m.s}^{-1}$ e $6,27 \text{ m.s}^{-1}$.

Tabela 4 - Estatísticas Descritivas das séries mensais de velocidade do vento em Petrolina em m.s^{-1} .

Meses	Velocidade		Velocidade		Média		Desvio		Variância	
	Mínima		Máxima				Padrão		Amostral	
	25m	50m	25m	50m	25m	50m	25m	50m	25m	50m
Janeiro	0,00	0,00	9,85	11,40	3,24	4,26	1,31	1,56	1,71	2,45
Fevereiro	0,12	0,00	10,71	13,13	3,76	4,88	1,41	1,65	1,99	2,72
Março	0,00	0,00	8,83	10,77	2,86	3,82	1,33	1,67	1,77	2,79
Abril	0,00	0,09	8,87	11,73	3,20	4,38	1,14	1,37	1,29	1,89
Maio	0,00	0,01	8,45	10,76	3,32	4,55	1,09	1,36	1,19	1,85
Junho	0,07	0,00	8,54	10,82	4,00	5,35	1,53	1,73	2,34	3,00
Julho	0,00	0,67	8,74	10,65	4,22	5,64	1,42	1,50	2,01	2,26
Agosto	0,13	0,01	9,03	11,38	4,53	5,96	1,38	1,51	1,92	2,27
Setembro	0,99	0,78	9,27	12,04	4,87	6,27	1,33	1,52	1,77	2,32
Outubro	0,44	0,00	10,40	11,91	3,83	4,96	1,42	1,74	2,03	3,03
Novembro	0,00	0,00	8,49	11,15	3,81	4,94	1,23	1,44	1,51	2,07
Dezembro	0,00	0,00	12,11	14,30	2,79	3,62	1,34	1,64	1,80	2,69

Fonte: Silva (2016)

Figura 10 - Velocidade média do vento nas duas alturas de Janeiro a Dezembro de 2010 em Petrolina.



Fonte: Silva (2016)

A turbina eólica capta a energia cinética da massa do ar (vento) através do movimento das pás do aerogerador. A potência eólica (energia por unidade do tempo) é dada por:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (16)$$

sendo P - potência, ρ - densidade do ar ($kg.m^{-3}$), A - área varrida pelas pás do rotor (m^2), V - velocidade do vento ($m.s^{-1}$). A maioria das turbinas eólicas exige uma velocidade de vento de pelo menos $3,5 m.s^{-1}$ antes mesmo de começar a gerar energia. Os valores da velocidade média apresentados na Tabela 4 e Figura 10 indicam o período entre junho e novembro como mais adequado para captação da energia eólica na localização estudada.

As Tabelas 5 a 7 e as Figuras 11 a 22 apresentam os valores da *SampEn* para $m=1$ a $m=6$ (representando as sequências com 1 a 6 dados consecutivos – valores consecutivos da série de 10 minutos até 1 hora) da velocidade do vento nas alturas 25m e 50m para cada mês do ano 2010. Observa-se que para meses junho, julho e agosto, os valores da entropia são maiores na altura de 50m, enquanto para outros meses os valores da entropia são maiores na altura de 25m ou são semelhantes. Nos meses de julho, agosto e setembro a velocidade média do vento é maior do que nos outros meses indicando maior potencial eólico; os resultados da análise *SampEn* fornecem

uma informação adicional: maior regularidade na dinâmica do vento na altura de 25m. A diminuição dos valores da *SampEn* com aumento de tamanho da sequência comparada m , indica que a dinâmica do vento é mais previsível na escala de 1 hora do que na escala de 10 minutos, ou as flutuações em velocidade do vento são menores quando se observam médias horárias.

Tabela 5 – *Sample Entropy* da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=1$ a $m=6$ e $r= 0,20$ nas alturas 25m e 50m, de Janeiro a Abril.

	Janeiro		Fevereiro		Março		Abril	
m	25	50	25	50	25	50	25	50
1	1,28	1,23	1,28	1,26	1,32	1,23	1,30	1,25
2	1,21	1,16	1,21	1,20	1,26	1,17	1,23	1,18
3	1,15	1,12	1,18	1,17	1,21	1,13	1,18	1,12
4	1,11	1,08	1,14	1,12	1,17	1,08	1,14	1,08
5	1,10	1,06	1,11	1,08	1,14	1,02	1,11	1,03
6	1,09	1,05	1,11	1,09	1,08	1,01	1,03	1,00

Fonte: Silva (2016)

Tabela 6 – *Sample Entropy* da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=1$ a $m=6$ e $r= 0,20$ nas alturas 25m e 50m, de Maio a Agosto.

	Maio		Junho		Julho		Agosto	
m	25	50	25	50	25	50	25	50
1	1,33	1,29	1,18	1,20	1,23	1,31	1,35	1,37
2	1,24	1,22	1,08	1,11	1,12	1,20	1,25	1,28
3	1,16	1,18	1,00	1,03	1,04	1,13	1,17	1,21
4	1,11	1,14	0,95	0,98	0,97	1,05	1,12	1,15
5	1,04	1,10	0,89	0,91	0,91	1,00	1,07	1,11
6	1,02	1,04	0,86	0,87	0,87	0,97	1,03	1,08

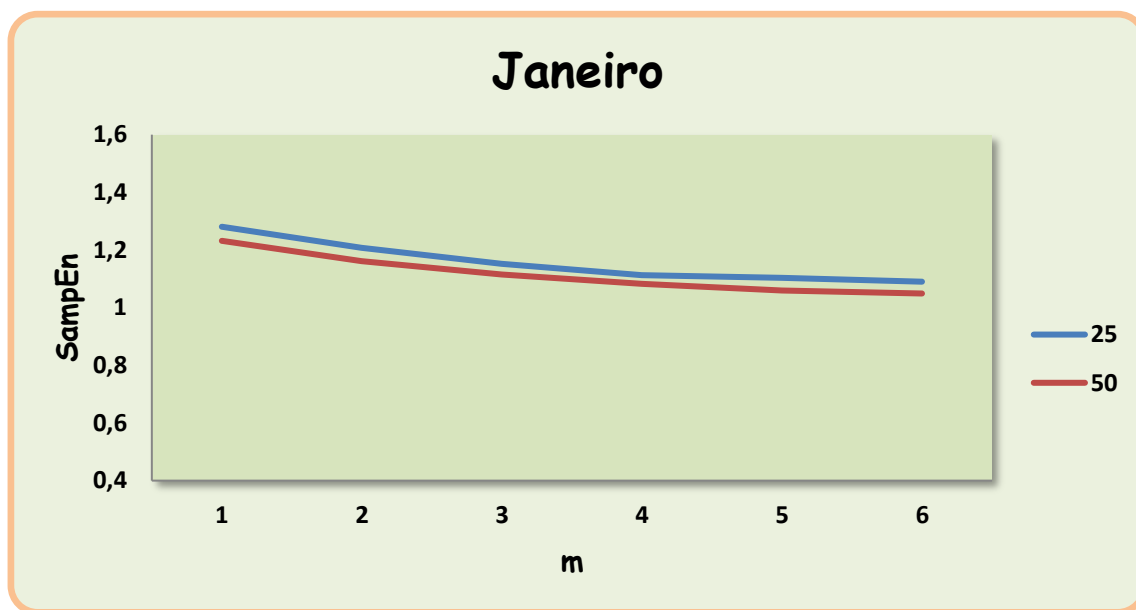
Fonte: Silva (2016)

Tabela 7 – *Sample Entropy* da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=1$ a $m=6$ e $r= 0,20$ nas alturas 25m e 50m, de Setembro a Dezembro.

	Setembro		Outubro		Novembro		Dezembro	
m	25	50	25	50	25	50	25	50
1	1,45	1,43	1,29	1,22	1,41	1,36	1,27	1,20
2	1,35	1,34	1,21	1,15	1,32	1,29	1,21	1,13
3	1,26	1,27	1,15	1,11	1,27	1,23	1,17	1,09
4	1,18	1,20	1,09	1,08	1,23	1,20	1,12	1,05
5	1,11	1,15	1,05	1,07	1,19	1,19	1,09	1,01
6	1,05	1,11	1,02	1,02	1,18	1,15	1,07	1,00

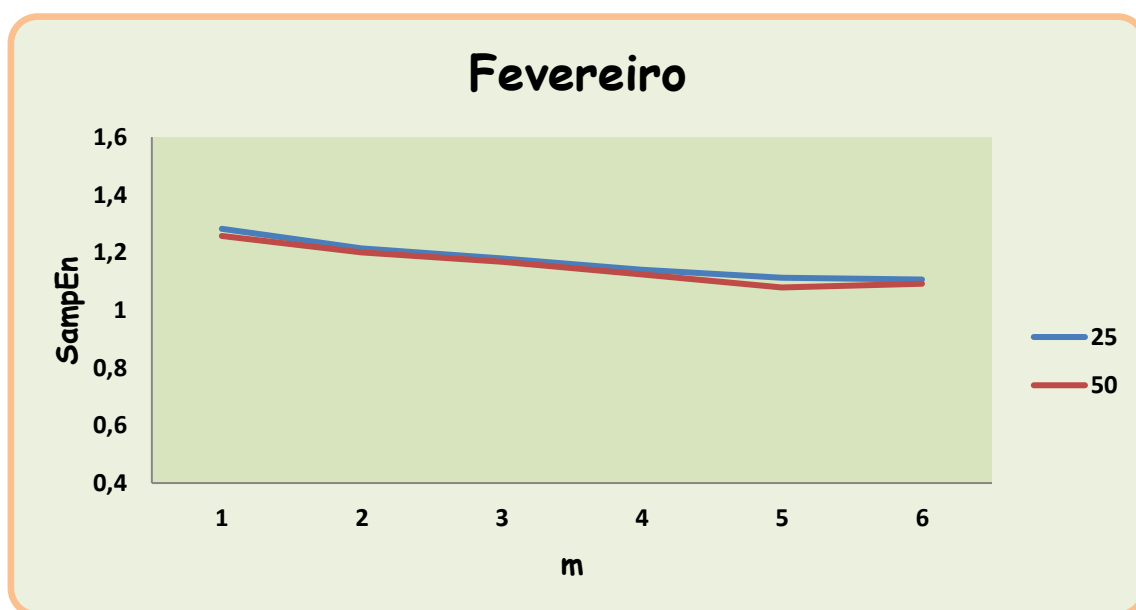
Fonte: Silva (2016)

Figura 11 – *Sample Entropy* da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=1$ a $m=6$ e $r= 0,20$ nas alturas 25m e 50m de Janeiro.



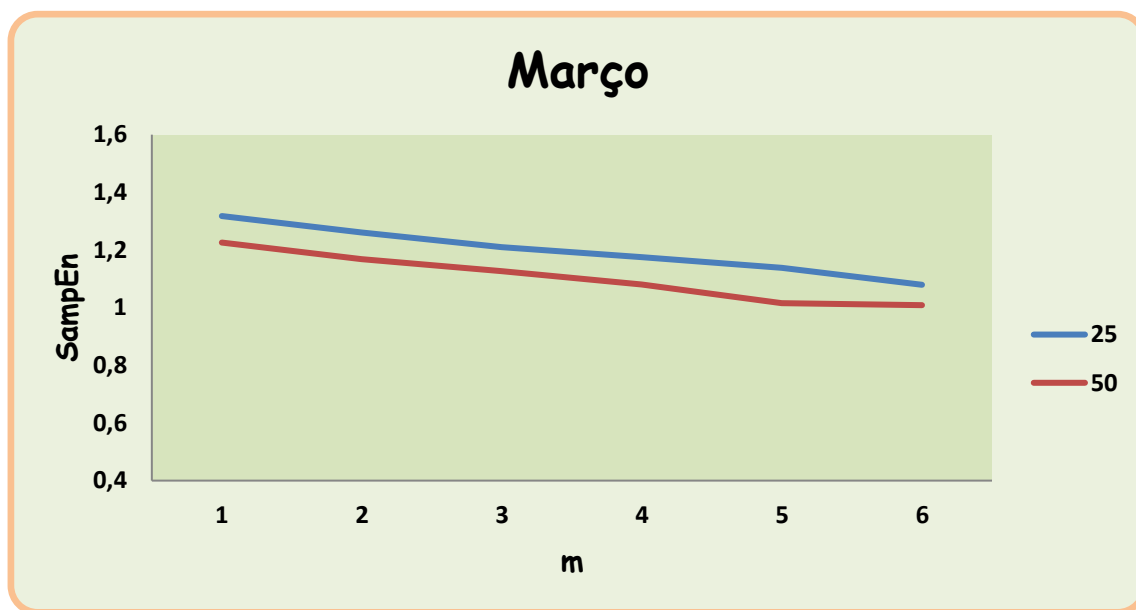
Fonte: Silva (2016)

Figura 12 – *Sample Entropy* da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=1$ a $m=6$ e $r= 0,20$ nas alturas 25m e 50m de Fevereiro.



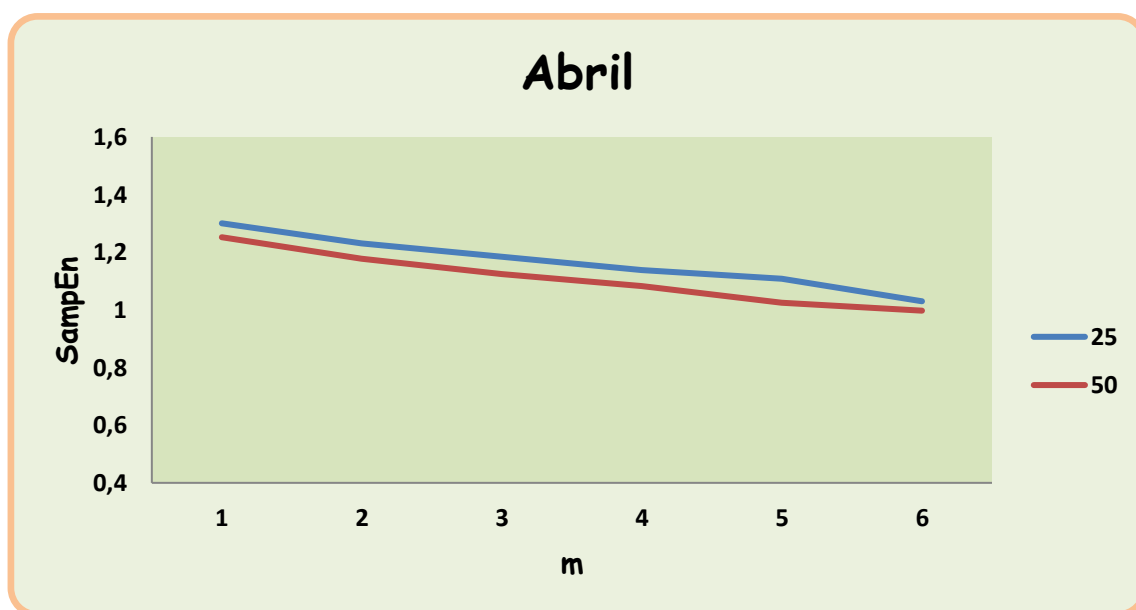
Fonte: Silva (2016)

Figura 13 – *Sample Entropy* da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=1$ a $m=6$ e $r= 0,20$ nas alturas 25m e 50m de Março.



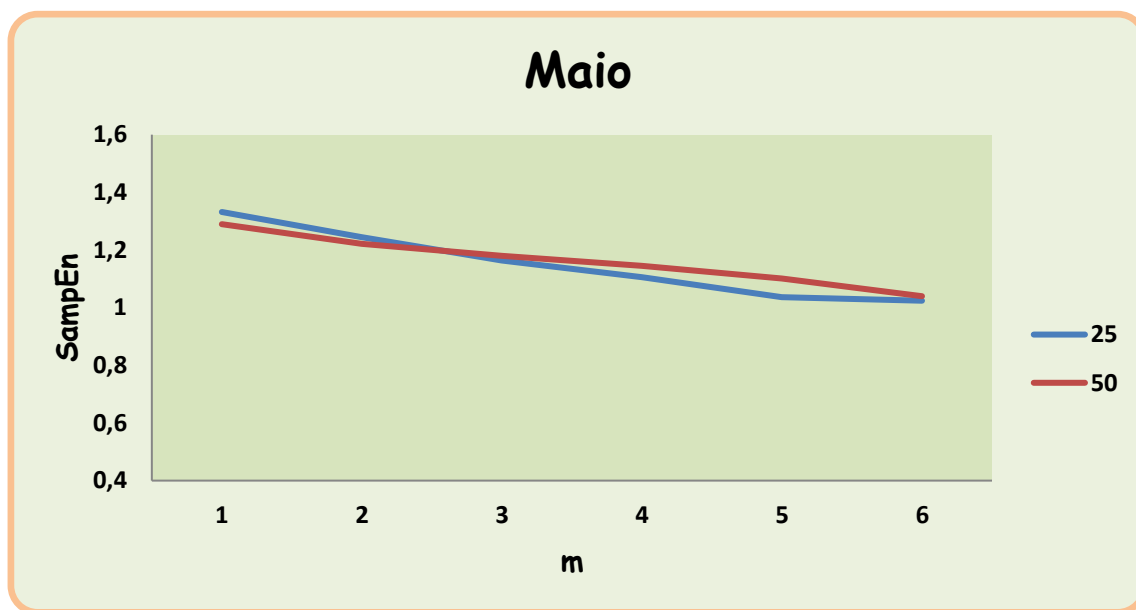
Fonte: Silva (2016)

Figura 14 – *Sample Entropy* da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=1$ a $m=6$ e $r= 0,20$ nas alturas 25m e 50m de Abril.



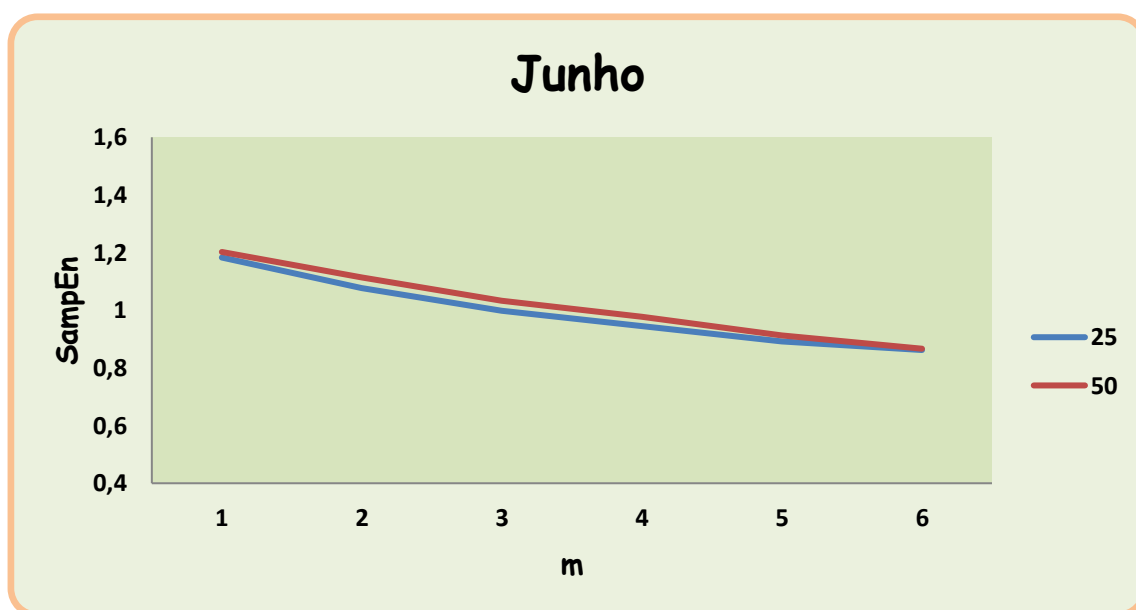
Fonte: Silva (2016)

Figura 15 – *Sample Entropy* da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=1$ a $m=6$ e $r= 0,20$ nas alturas 25m e 50m de Maio.



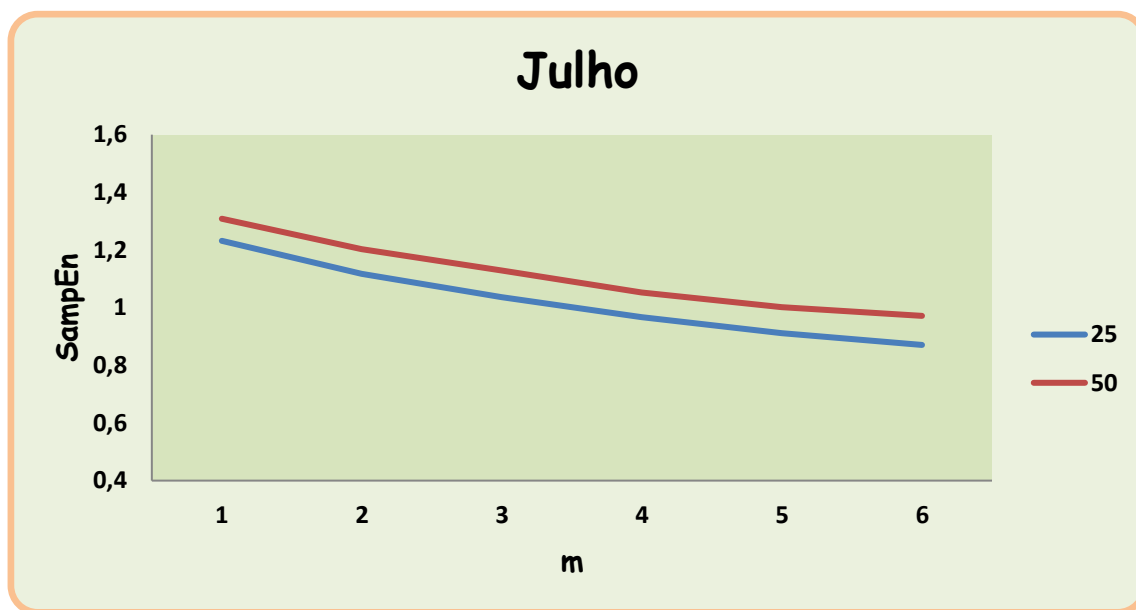
Fonte: Silva (2016)

Figura 16 – *Sample Entropy* da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=1$ a $m=6$ e $r= 0,20$ nas alturas 25m e 50m de Junho.



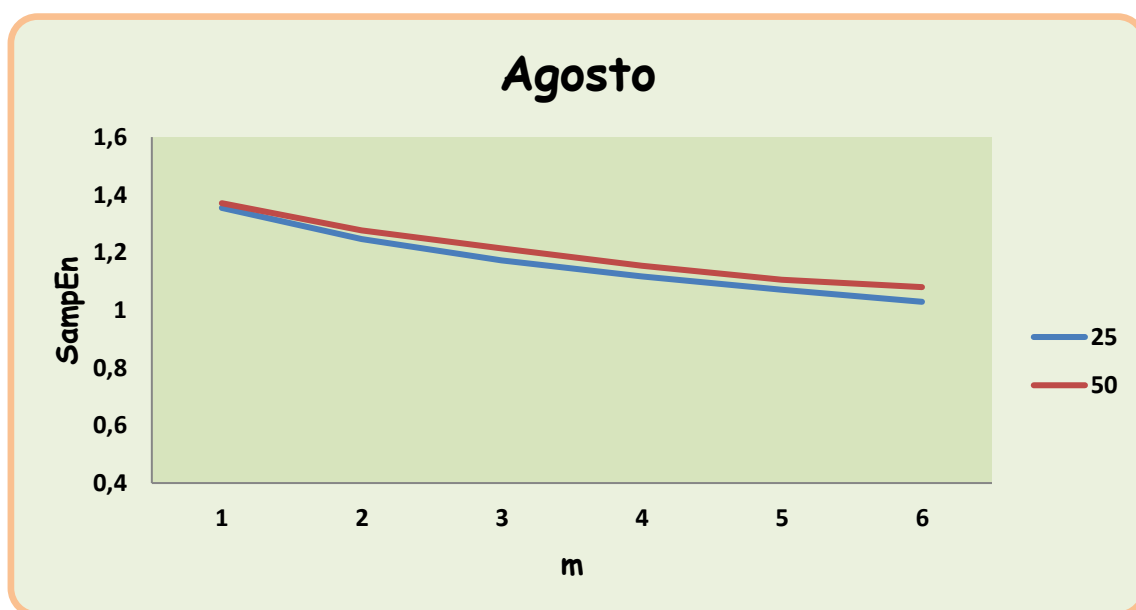
Fonte: Silva (2016)

Figura 17 – *Sample Entropy* da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=1$ a $m=6$ e $r= 0,20$ nas alturas 25m e 50m de Julho.



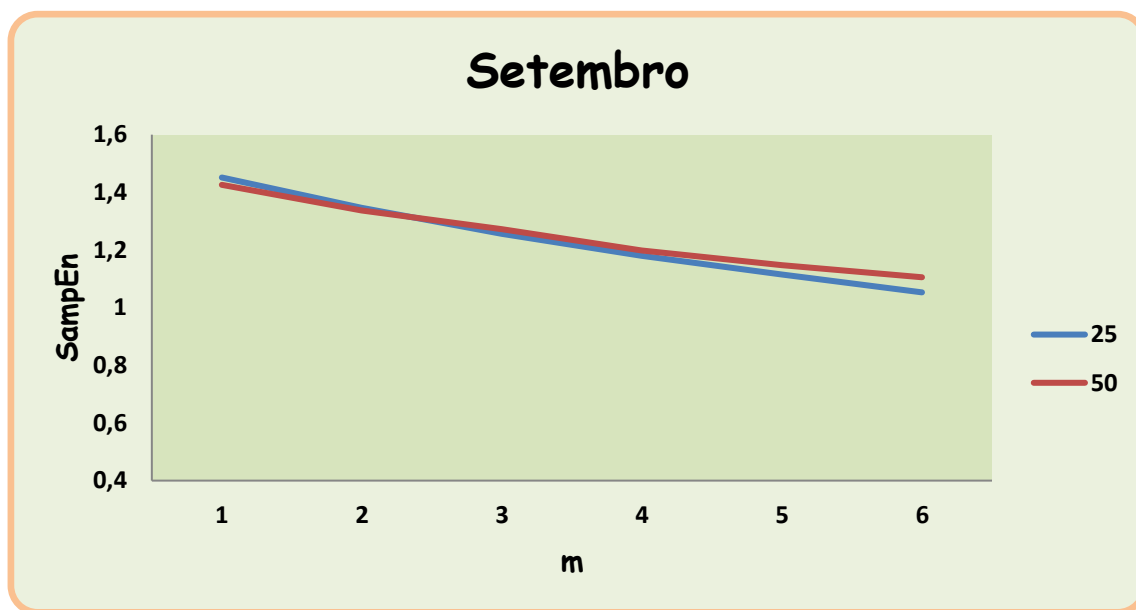
Fonte: Silva (2016)

Figura 18 – *Sample Entropy* da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=1$ a $m=6$ e $r= 0,20$ nas alturas 25m e 50m de Agosto.



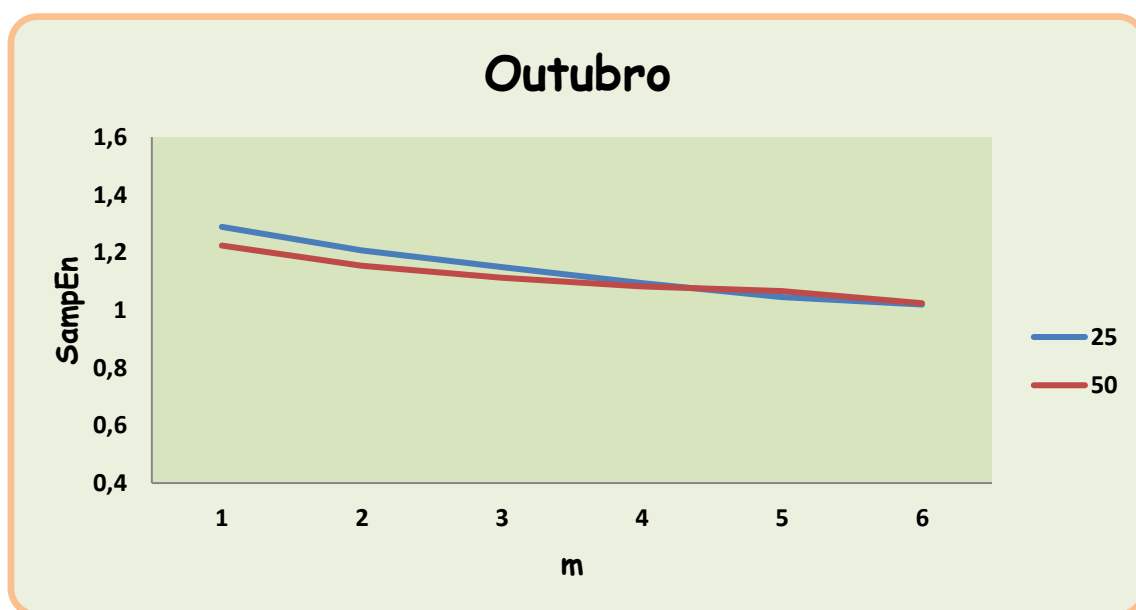
Fonte: Silva (2016)

Figura 19 – *Sample Entropy* da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=1$ a $m=6$ e $r= 0,20$ nas alturas 25m e 50m de Setembro.



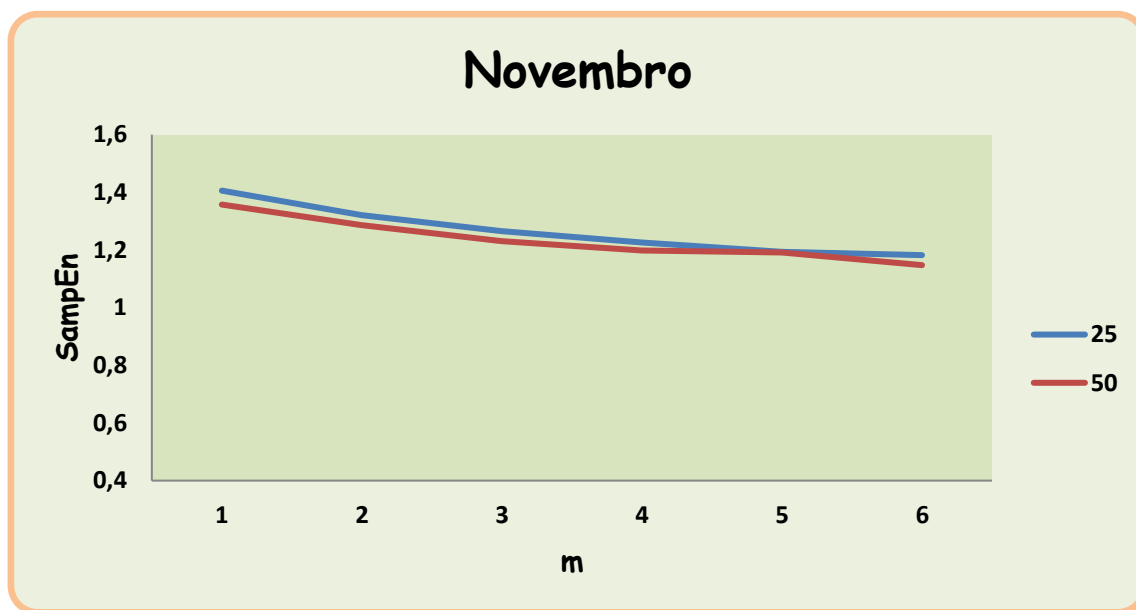
Fonte: Silva (2016)

Figura 20 – *Sample Entropy* da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=1$ a $m=6$ e $r= 0,20$ nas alturas 25m e 50m de Outubro.



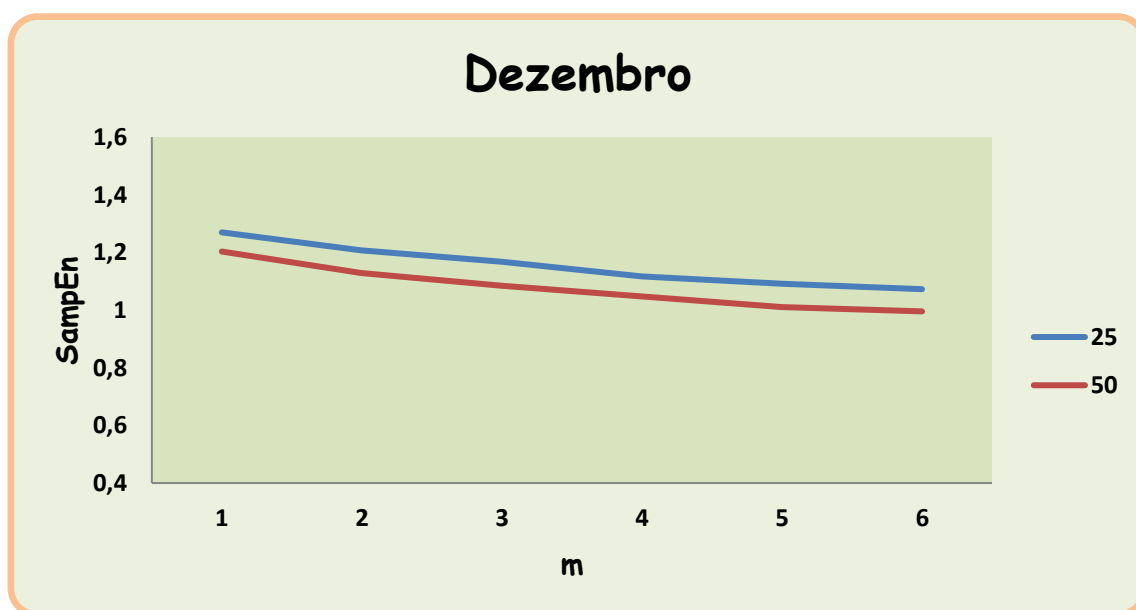
Fonte: Silva (2016)

Figura 21 – *Sample Entropy* da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=1$ a $m=6$ e $r= 0,20$ nas alturas 25m e 50m de Novembro.



Fonte: Silva (2016)

Figura 22 – *Sample Entropy* da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=1$ a $m=6$ e $r= 0,20$ nas alturas 25m e 50m de Dezembro.



Fonte: Silva (2016)

Nas Tabelas 8 a 9 e nas Figuras 23 a 27, apresentamos o valor da *SampEn* da velocidade do vento em Petrolina nas alturas de 25m e 50m no ano de 2010 utilizando $m=2$, e $r = 0,10$ a $0,30$. Observa-se que os valores de *SampEn* diminuem com aumento do nível de tolerância r , devido o fato que a probabilidade de encontrar as sequências similares é maior para maior nível da tolerância da distância entre as sequências. Para todos os valores de r os valores da *SampEn* são maiores na altura de 50m do que 25m nos meses de junho, julho e agosto indicando maior regularidade na dinâmica do vento na altura de 25m. Apesar de, nestes meses, a velocidade média e potencial eólico aumentarem com a altura (em favor da geração da energia eólica), a complexidade da série também aumenta com altura, representando uma característica desfavorável para a mesma. Para os meses fevereiro, setembro, outubro e novembro, nos quais a velocidade média nas duas alturas excede $3,5 \text{ m.s}^{-1}$ (considerada o valor mínimo para geração da energia eólica), tanto a velocidade média quanto o valor da *SampEn* indicam a maior eficiência em captação da energia eólica na altura de 50m (a velocidade média aumenta e a entropia diminui com altura).

Tabela 8 – *Sample Entropy* da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 para altura de 25m e utilizando $m = 2$ e $r=0,10$ a $0,30$ de Janeiro a Dezembro.

Meses	r				
	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
Janeiro	1,86	1,46	1,21	1,01	0,87
Fevereiro	1,85	1,48	1,21	1,03	0,88
Março	1,92	1,53	1,26	1,07	0,92
Abril	1,89	1,49	1,23	1,04	0,88
Mai	1,89	1,51	1,24	1,05	0,91
Junho	1,69	1,32	1,08	0,90	0,77
Julho	1,75	1,37	1,12	0,94	0,81
Agosto	1,88	1,51	1,25	1,06	0,91
Setembro	2,00	1,61	1,35	1,15	1,00
Outubro	1,84	1,47	1,21	1,01	0,86
Novembro	1,98	1,58	1,32	1,12	0,97
Dezembro	1,85	1,47	1,21	1,02	0,87

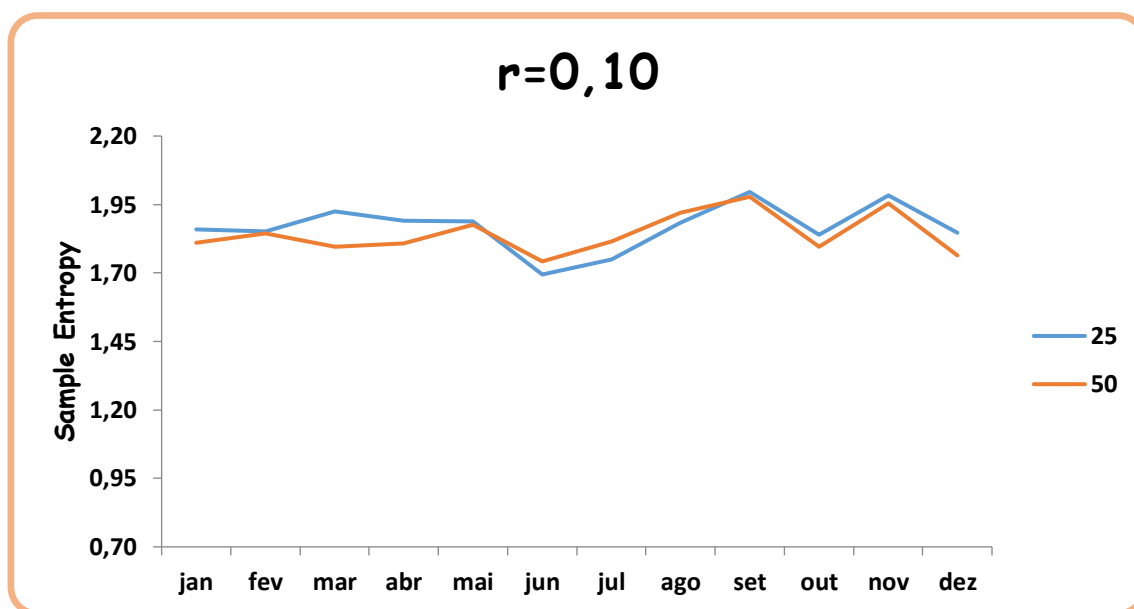
Fonte: Silva (2016)

Tabela 9 – *Sample Entropy* da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 para altura de 50m e utilizando $m = 2$ e $r=0,10$ a $0,30$ de Janeiro a Dezembro.

Meses	r				
	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
Janeiro	1,81	1,42	1,16	0,97	0,83
Fevereiro	1,84	1,46	1,20	1,01	0,86
Março	1,80	1,43	1,17	0,98	0,84
Abril	1,81	1,43	1,18	0,99	0,84
Mai	1,88	1,48	1,22	1,03	0,88
Junho	1,74	1,37	1,11	0,93	0,80
Julho	1,82	1,45	1,20	1,02	0,88
Agosto	1,92	1,54	1,28	1,08	0,93
Setembro	1,98	1,60	1,34	1,14	0,98
Outubro	1,80	1,41	1,15	0,96	0,82
Novembro	1,96	1,56	1,29	1,09	0,94
Dezembro	1,76	1,38	1,13	0,95	0,80

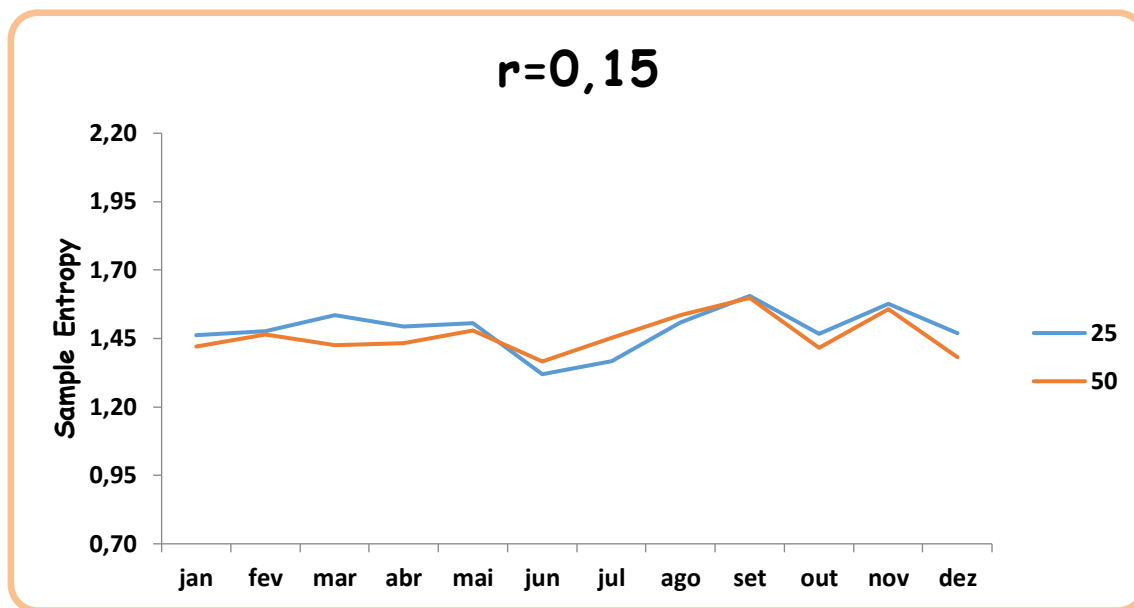
Fonte: Silva (2016)

Figura 23 – *Sample Entropy* da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=2$ e $r= 0,10$ nas alturas 25m e 50m.



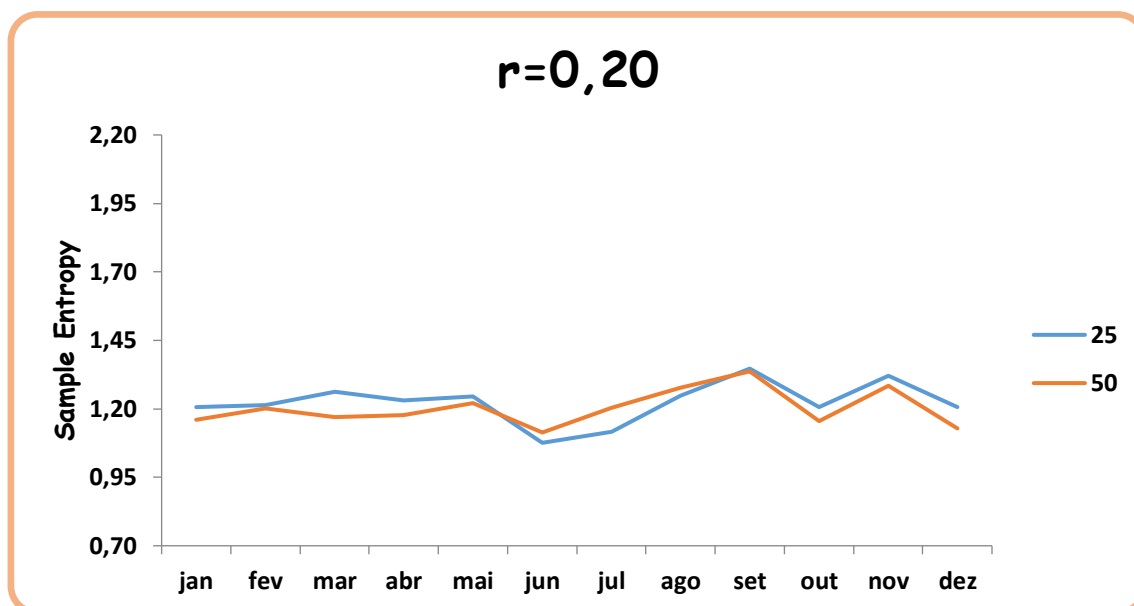
Fonte: Silva (2016)

Figura 24 – *Sample Entropy* da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=2$ e $r=0,15$ nas alturas 25m e 50m.



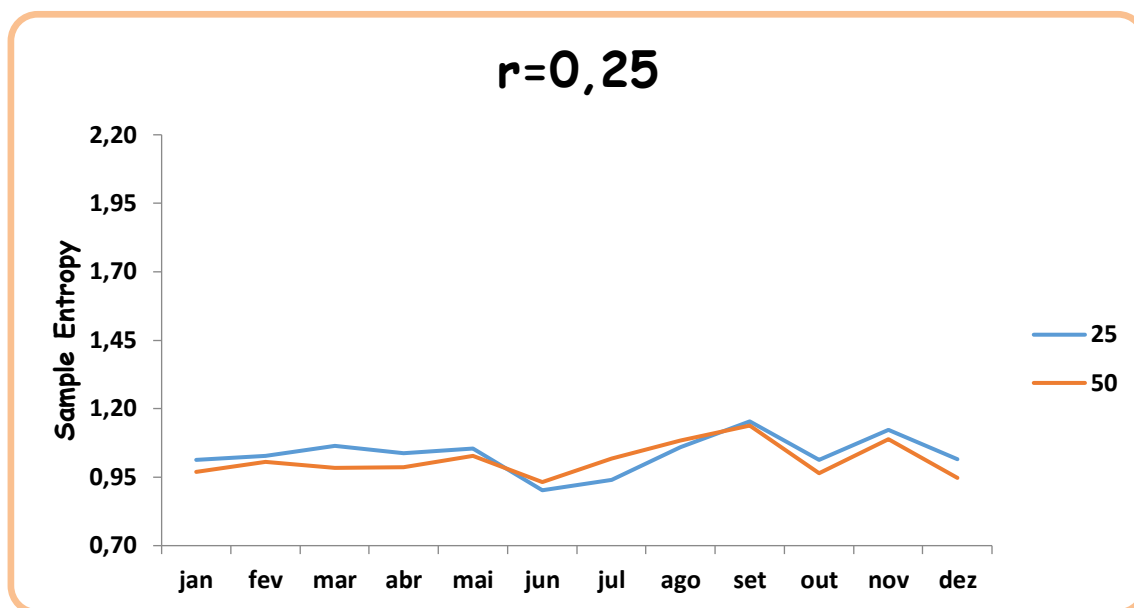
Fonte: Silva (2016)

Figura 25 – *Sample Entropy* da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=2$ e $r=0,20$ nas alturas 25m e 50m.



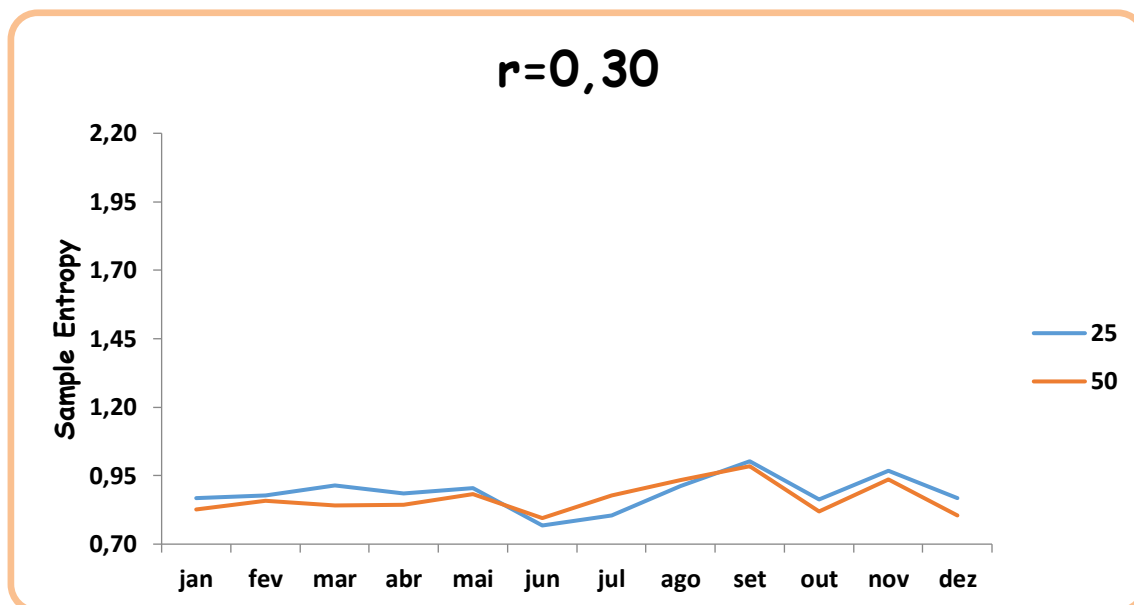
Fonte: Silva (2016)

Figura 26 – *Sample Entropy* da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=2$ e $r=0,25$ nas alturas 25m e 50m.



Fonte: Silva (2016)

Figura 27 – *Sample Entropy* da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=2$ e $r=0,30$ nas alturas 25m e 50m.



Fonte: Silva (2016)

Na Tabela 10 e na Figura 28 apresentam-se os valores de *Cross-SampEn* entre as séries temporais simultâneas da velocidade do vento em Petrolina, nas alturas de 25m e 50m no ano de 2010, utilizando $m=2$ e diferentes valores do parâmetro r os quais variaram de 0,10 a 0,30. As mesmas trazem a comparação da sincronização em dinâmica do vento nas duas alturas ao longo do ano. Pode-se notar que o valor da *Cross-SampEn* diminui à

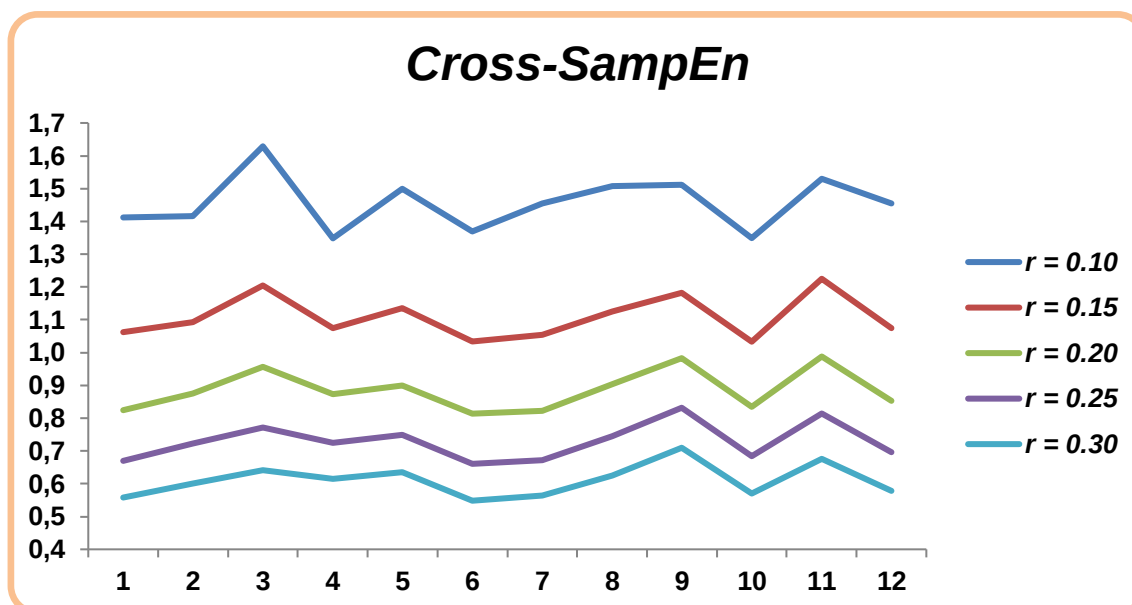
medida que aumentamos o valor de r , bem como, não existe mudança no comportamento dos dados de velocidade do vento nos meses ao longo do ano. A sincronização entre a dinâmica do vento nas duas alturas é menor para meses de setembro e novembro (indicado pelos maiores valores da *Cross-SampEn*), enquanto existe a maior sincronização em meses junho, outubro, dezembro e janeiro (indicado pelos menores valores da *Cross-SampEn*).

Tabela 10 - *Cross-SampEn* da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 para alturas de 25m e 50m e utilizando $m = 2$ e $r = 0,10$ a $0,30$ de Janeiro a Dezembro.

Meses	<i>Cross-SampEn</i>				
	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
Janeiro	1,41	1,06	0,82	0,67	0,56
Fevereiro	1,42	1,09	0,87	0,72	0,60
Março	1,63	1,20	0,96	0,77	0,64
Abril	1,35	1,07	0,87	0,73	0,61
Maio	1,50	1,13	0,90	0,75	0,64
Junho	1,37	1,03	0,81	0,66	0,55
Julho	1,45	1,05	0,82	0,67	0,56
Agosto	1,51	1,12	0,90	0,75	0,63
Setembro	1,51	1,18	0,98	0,83	0,71
Outubro	1,35	1,03	0,83	0,68	0,57
Novembro	1,53	1,22	0,99	0,81	0,68
Dezembro	1,45	1,08	0,85	0,70	0,58

Fonte: Silva (2016)

Figura 28 – *Cross-Sample Entropy* da velocidade do vento em Petrolina no ano de 2010 utilizando $m=2$ e $r = 0,10$ a $r = 0,30$ nas alturas 25m e 50m.



Fonte: Silva (2016)

6. CONCLUSÃO

Nesta dissertação investigamos se a complexidade das séries temporais de velocidade do vento em Petrolina apresenta variabilidade intra-anual e se está relacionada com variabilidade de potencial eólico na localização estudada. Utilizamos o método *Sample Entropy* para analisar a complexidade da dinâmica do vento nas alturas de 25m e 50m, ao longo de ano 2010. O método *Cross-Sample Entropy* foi utilizado para investigar a variabilidade intra-anual da sincronização da dinâmica do vento nas duas alturas. Baseados nos resultados obtidos pode-se concluir:

A dinâmica do vento é mais regular na escala de 1 hora do que na escala de 10 minutos ou as flutuações em velocidade do vento são menores quando se observam médias horárias.

Nos meses junho, julho e agosto (com maior médias da velocidade do vento e consequentemente maior potencial eólico), apesar de a velocidade média ser maior na altura de 50m (em favor da geração da energia eólica), a complexidade da série (indicada com maiores valores do *SampEn*) também aumenta com altura representando uma característica desfavorável para mesma. Mas indicando maior regularidade na dinâmica do vento na altura de 25m. Para meses fevereiro, setembro, outubro e novembro, nas quais a velocidade média excede $3,5 \text{ m.s}^{-1}$ (considerada o valor mínimo para geração da energia eólica) tanto a velocidade média quanto o valor da *SampEn* indicam a maior eficiência em captação da energia eólica na altura de 50m (a velocidade média aumenta e a entropia diminui com altura).

A sincronização entre a dinâmica do vento nas duas alturas é menor para meses de setembro e novembro (indicado pelos maiores valores da *Cross-SampEn*), enquanto existe a maior sincronização em meses junho, outubro, dezembro e janeiro (indicado pelo menor valor da *Cross-SampEn*).

Estes resultados contribuem para uma melhor compreensão da natureza da variabilidade temporal intra-anual da velocidade do vento no Município de Petrolina, considerado como localização adequada para geração de energia eólica. Podendo ser utilizados para o desenvolvimento e validação de modelos teóricos e computacionais de previsão da velocidade do vento e potencial eólico.

Um trabalho futuro, incluindo todas as estações anemométricas da rede SONDA, poderia fornecer mais informações sobre a influência dos fatores geofísicos e ambientais na variabilidade temporal e espacial da velocidade do vento em algumas regiões do Brasil e assim contribuir para uma melhor avaliação do potencial eólico e planejamento de uso da energia renovável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERT, R.; BARABÁSI, A. L. Statistical mechanics of complex networks. **Reviews of modern physics**, Minneapolis, v. 74, n. 1, p. 47, 2002.

ARAÚJO, L. S. et al. Avaliação da influência do sistema Cantareira na bacia do Rio Piracicaba através da análise de complexidade, **Revista Brasileira de Biometria**, São Paulo, v. 33, n. 3, p. 403-413, jul./set. 2015.

AYOADE, J. O. **Introdução a climatologia para os trópicos**. 18^a. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2015.

BALASIS, G. et al. Investigating dynamical complexity in the magnetosphere using various entropy measures, **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 114, A00D06, 2009.

BANDT, C.; POMPE, B. Permutation entropy: A natural complexity measure for time series. **Physical review letters**, New York, v. 88, p. 174102:1–174102:4, 2002.

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. **Atmosfera, tempo e clima**. 9 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

BLAIR, T. A.; FITE, R. C. **Weather Elements**. Tradução de Farid Cezar Chede. 4th. ed. Rio de Janeiro: Copyright, 1964.

CHANG, J. S. et al. Enhanced cardiorespiratory coupling in patients with obstructive sleep apnea following continuous positive airway pressure treatment. **Sleep Medicine**, Winchester, v. 14, p. 1132-1138, 2013.

CHOU, C.-M. Complexity analysis of rainfall and runoff time series based on sample entropy in different temporal scales, **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, Berlin, v.28, p. 1401-1408, 2014.

COSTA, M.; GOLDBERGER, A. L.; PENG, C.-K. Multiscale entropy analysis of complex physiologic time series. **Physical review letters**, New York, APS, v. 89, n. 6, p. 068102, 2002.

COSTA, M.; GOLDBERGER, A. L.; PENG, C. K. Multiscale entropy analysis of biological signals. **Physical Review letters**, New York, v. 71, p. 021906, 2005.

COSTA, M. et al. GOLDBERGER, A. L. Dynamical glucometry: Use of multiscale entropy analysis in diabetes. **Chaos**, New York, v. 24, p. 033139, 2014.

COVER, T. M.; THOMAS, J. A. **Elements of Information Theory**. New York: John Wiley, 1991.

FAN, J. et al. Detecting Abrupt Change of Streamflow at Lintong Station of Wei River. **Mathematical Problems in Engineering**, Cairo, v. 2013, p. 976591, 2013.

FELDMAN, D.P.; CRUTCHFIELD, J.P. Measures of statistical complexity: Why? **Physics Letters A**, Amsterdam, v. 238, p. 244–252, 1998.

FERREIRA, A. G. **Meteorologia Prática**. São Paulo: Oficina de textos, 2006.

FIEDLER, N. C. et al. Efeito de incêndios florestais na estrutura e composição florística de uma área de cerrado sensu stricto na fazenda Água Limpa-DF. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 129-138, 2004.

GRASSBERGER, P.; PROCACCIA, I. Estimation of the Kolmogorov entropy from a chaotic signals. **Physical Review A**, New York, v. 28, p. 2591-2593, 1983.

HAN, Y.; FENG, X.C.; BACIU, G. Local joint entropybased non-rigid multi modality image registration. **Pattern Recognition Letters**, Amsterdam, v. 34, n. 12, p. 1405–1415, 2013.

HAUGE, E. R. et al. Nonlinear Analysis of Motor Activity Shows Differences between Schizophrenia and Depression: A Study Using Fourier Analysis and Sample Entropy. **Plos One**, San Francisco, v. 6, n. 1, p. 16291, 2011.

HERNÁNDEZ-PÉREZ, R.; GUZMÁN-VARGAS, L.; RAMÍREZ-ROJAS, A.; ANGULO-BROWN, F. Pattern synchrony in electrical signals related to earthquake activity, **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Amsterdam, v. 389, p. 1239-1252, 2010.

HUANG, F. et al. Flow-Complexity Analysis of the Upper Reaches of the Yangtze River, China. **Journal of Hydrologic Engineering**, Reston, v. 16, p. 914-919, 2011.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. 2016. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home> > Acesso em: 01 Mar. 2016.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, **Infoclima**. Disponível em: <<http://infoclima.cptec.inpe.br/>> Acesso em: 03 Fev. 2015.

KOSSOBOKOV, V.; MOUËL, J. -L. L.; ALLÈGRE, C. Spatial and Temporal Variations of Climate in Europe. **Atmospheric and Climate Sciences**, v. 4, n. 2, p. 568-581, 2012.

LAKE, D. K.; MOORMAN, J. R.; HANQING, C. Sample Entropy estimation using sampen. **Physionet**, 2012. Disponível em: <<http://physionet.org/physiotools/sampen/>>. Acesso em: 10 Out. 2014.

LAKE, D. E. et al. *Sample Entropy Analysis of Neonatal Heart Rate Variability*. **American Journal of Physiology Regulatory, Integrative and Comparative Physiology**, Bethesda, v. 283, p. 789–797, 2002.

LEINZ, V.; AMARAL, S. E. **Geologia geral**. São Paulo: Nacional, 1989.

LI, H. et al. Multi-scale Entropy Analysis of Single-point Wind Speed in Outdoor near-surface Environments. **Beijing: Electrical and Control Engineering**, p. 4579-4582, 2011.

LIU, L.-Z.; QIAN, X.-Y.; LU, H.-Y. Cross-sample entropy of foreign exchange time series, **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Amsterdam, v. 389, p. 4785-4792, 2010.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de textos, 2007.

MIHAILOVIC, D. T. et al. Complexity analysis of the turbulent environmental fluid flow time series. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Amsterdam, v. 395, p. 96-104, 2014.

MIN, L.; GUANG, M.; SARKAR, N. Complexity analysis of 2010 Baja California earthquake based on entropy measurements. **Vulnerability, Uncertainty, and Risk**, Liverpool, p. 1815-1822, 2014.

MONTIROSSO, R. et al. Infant's emotional variability associated to interactive stressful situation: A novel analysis approach with Sample Entropy and Lempel-Ziv Complexity. **Infant Behavior and Development**, Norwood, v. 33, n. 3, p. 346-356, 2010.

MUSA, S. D. **Introduction to Agro-Climatology**. Nigeria: National Open University of Nigeria, 2008. Disponível em: <http://www.nou.edu.ng/uploads/NOUN_OCL/pdf/sos%20203.pdf> Acesso em: 03 Set. 2015.

PINCUS, S. M.; VISCARELLO, R. R. Approximate entropy: a regularity measure for fetal heart rate analysis. **Obstetrics and gynecology**, Washington, v. 79, n. 2, p. 249–255, 1992.

REDDY, Y. V.; SEBASTIAN, A. Parameters for estimation of entropy to study price manipulation in stock markets. **Decision**, Vashi, v. 34, p. 149-182, 2007.

RENYI, A. **On measures of entropy and information**. In: Fourth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Berkley, v. 131, p. 547–561, 1961.

RICHMAN J. S., MOORMAN J. R. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. **American journal of physiology Heart and circulatory physiology**, Bethesda, v. 278, n. 6, p. 2039–2049, 2000.

RIEDL, M.; MÜLLER, A.; WESSEL, N. Practical considerations of permutation entropy. **The European Physical Journal Special Topics**, Les Ulis, v. 222, p. 249-262, 2013.

RODRIGUES, M. L. G.; FRANCO, D.; SUGAHARA, S. Climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 22, n. 2, p. 135-151, 2004.

ROLIM, G. S. et al. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 4, p. 711-720, 2007.

ROVEDDER, A. P. M.; ELTZ, F. L. F. Revegetação com plantas de cobertura em solos arenizados sob erosão eólica no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 315-321, 2008.

SANTOS, A. L. S. et al. Evolução temporal da entropia de variáveis climáticas em Estância – SE. **Gaia Scientia**, João Pessoa, v. 9, n. 1, p. 146-150, 2015.

SHANNON, C. E. A mathematical theory of communication. **The Bell System Technical Journal**, New York, n. 27, p. 379-423, 623-656, 1948.

SHI, W.; SHANG, P. Cross-sample entropy statistic as a measure of synchronism and cross-correlation of stock markets. **Nonlinear Dynamics**, Dordrecht, v. 71, n. 3, p. 539-554, 2013.

SHUANGCHENG, L. et al. Measurement of climate complexity using sample entropy. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 26, n. 15, p. 2131-2139, 2006.

SILVA, D. A. et al. **Caracterização climática de diferentes Biomas brasileiros através do DFA e SampEn**. Anais da 55ª Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria, São Carlos - SP, 2009.

SILVA, J. R. S. **Avaliação de autocorrelações e complexidade de Séries temporais climáticas no Brasil**, 2014. f. 114. Tese (Doutorado em Biometria e Estatística Aplicada) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. **Meteorologia e climatologia florestal**. Curitiba: UFPR, 2004.

SONDA. **Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais**. Disponível em: <<http://sonda.ccst.inpe.br/>>. Acesso em: 10 Jun. 2015.

STOSIC, D. et al. Correlations of multiscale entropy in the FX market, **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Amsterdam, v. 457, p. 52-61, 2016.

TORRES, F.; MACHADO, P. **Introdução à climatologia**. São Paulo: Cengage Learning, 2016.

TSALLIS, C. Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics. **Journal of statistical physics**, New York, v. 52, n. 1/2, p. 479-487, 1988.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L. **Meteorologia descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras**. São Paulo: Nobel, 1984.

VEDRAL V. The role of relative entropy in quantum information theory. **Reviews of Modern Physics**, Minneapolis, v. 74, n. 1, p.197, 2002.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa, MG: UFV, 2006.

YOO, C. S. et al. Automatic detection of seizure termination during electro convulsive therapy using sample entropy of the electroencephalogram. **Psychiatry Research**, Amsterdam, v. 195, p. 76-82, 2012.

ZHANG, T.; YANG, Z.; COOTE, J. H. *Cross-Sample Entropy* statistics as a measure of complexity and regularity of renal sympathetic nerve activity in the rat. **Experimental Physiology**, New York, v. 92, p. 659-669, 2007.

ZHAO, Z. Q. et al. Identifying spatial patterns and dynamics of climate change using recurrence quantification analysis: a case study of qinghai-tibet plateau, **International Journal of Bifurcation and Chaos**, v. 21, n. 4, p. 1127-1139, 2011.