

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**ANÁLISE DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E CONDUTÂNCIA COMO
PROCESSO DINÂMICO EM DOIS ECOSSISTEMAS
AMAZÔNICOS NA PERSPECTIVA DA TEORIA DA
COMPLEXIDADE**

ANDREIA DA SILVA TAVARES

PROF.^a DR.^a IRAMAIA JORGE CABRAL DE PAULO

Orientadora

Cuiabá, MT, Abril de 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**ANÁLISE DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E CONDUTÂNCIA COMO
PROCESSO DINÂMICO EM DOIS ECOSSISTEMAS
AMAZÔNICOS NA PERSPECTIVA DA TEORIA DA
COMPLEXIDADE**

ANDREIA DA SILVA TAVARES

Tese apresentada ao programa de Pós-graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, como parte dos requisitos para a obtenção do título de doutorado em Física Ambiental.

PROF.^a DR.^a IRAMAIA JORGE CABRAL DE PAULO

Orientadora

Cuiabá, MT, janeiro de 2015

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

D111a da Silva Tavares, Andréia.
ANÁLISE DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E CONDUTÂNCIA COMO
PROCESSO DINÂMICO EM DOIS ECOSISTEMAS AMAZÔNICOS NA
PERSPECTIVA DA TEORIA DA COMPLEXIDADE / Andréia da Silva Tavares. --
2015
ix, 76 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientadora: Iramaia Jorge Cabral de Paulo.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física,
Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2015.
Inclui bibliografia.

1. Evapotranspiração. 2. Condutância aerodinâmica (Ca). 3. Condutância
superficial (Cs). 4. Teoria da Complexidade. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

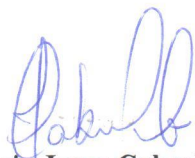
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental

FOLHA DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: ANÁLISE DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E CONDUTÂNCIA
COMO PROCESSO DINÂMICO EM DOIS ECOSISTEMAS
AMAZÔNICOS NA PERSPECTIVA DA TEORIA DA
COMPLEXIDADE**

AUTORA: ANDRÉIA DA SILVA TAVARES

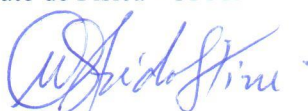
Tese de Doutorado defendida e aprovada em 17 de abril de 2015, pela comissão julgadora:



Profa. Dra. Iramaia Jorge Cabral de Paulo
Orientadora
Instituto de Física - UFMT



Prof. Dr. Leone Francisco Amorim Curado
Examinador Interno
Instituto de Física - UFMT



Profa. Dra. Carla Maria Abido Valentini
Examinadora Externa
Instituto Federal de Mato Grosso - IFMT



Prof. Dr. Lúcio Ângelo Vidal
Examinador Externo
Instituto Federal de Mato Grosso - IFMT



Profa. Dra. Andrea Carla Dalmolin
Examinadora Externa
Universidade Estadual de Santa Cruz – UESC – Ilhéus/Bahia

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha Mãe, dona Vanderli, meu exemplo, meu apoio em todas as horas difíceis e ao meu namorado (Lúcio Ângelo), que tem sido um grande companheiro nessa jornada chamada vida.

AGRADECIMENTOS

*As boas energias do Universo que chamamos de Deus pela força e perseverança, por ter me mantido em pé em todos esses anos da minha vida, pela fé num mundo melhor, pela vida, pela oportunidade de aprendizado em cada dia da minha vida.

*Ao meu amor e companheiro Lúcio Ângelo pelo apoio, dedicação e por compartilhar comigo as alegrias e tristezas dessa vida. Muito obrigada meu amor! Com você a vida ficou melhor.

*À Prof.^a Dr.^a Iramaia Jorge Cabral de Paulo e sua família, pelo acolhimento, pela fé depositada, pela paciência e pelas suas preciosas orientações e principalmente por compartilhar de seus ideais, me fazendo acreditar num mundo melhor, transformado pela educação e amorosidade.

*Ao Prof. Dr. Sérgio Roberto de Paulo, pelas suas contribuições.

*Ao Prof. Dr. José de Souza Nogueira, pela motivação, pelos preciosos e sábios conselhos e principalmente por nós apontar sempre a direção correta a seguir.

*Ao Prof. Dr. Leone Francisco Amorim Curado, pelas suas contribuições. Por ter me ajudado prontamente sempre que o procurei para compartilhar alguma dúvida.

*Aos meus amigos da Pós Graduação em Física Ambiental, pelo auxílio nesta caminhada. Todos os amigos e colegas do programa.

*À amiga Hozana da Silva por compartilhar comigo seus conhecimentos acerca dos gráficos e ter me ajudado sempre com muito carinho na elaboração dos atratores. Muito obrigada amiga. Sem você teria sido mais difícil.

*À amiga Anna Carolinna pelo carinho, apoio e incentivo.

*À amiga Renata Aguiar pela amizade, por compartilhar sempre seus conhecimentos, pela ajuda na obtenção dos dados e por estar sempre presente com boas energias e conselhos sábios. Renata é sempre muito bom te ouvir e ter você por perto. Muito obrigada por tudo.

*À amiga Laura que tem sido uma irmã, agradeço a amizade, o apoio, o carinho, por me socorrer sempre que estou em apuros! Laura, ainda bem que existem pessoas como você! Muito obrigada por tudo amiga!

*À professora Ândrea pelas sábias contribuições, pela ajuda disponibilizada, também agradeço por te me indicado no meu primeiro emprego como professora, muito obrigada! Tem sido muito especial para minha vida profissional essa oportunidade de lecionar.

*Aos funcionários da Pós-Graduação em Física Ambiental, pela gentileza e carinho.

*À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro;

* A minha querida mãe Vanderli, pelo incentivo incondicional, pelo apoio e todo amor doado a mim. Dona Vanderli “você” é Dez! Eu te amo!

Descansamos; um sonho nos envenena o sono.
Levantamos; um pensamento nos macula o dia.
Sentimos, concebemos, ponderamos; rimos ou choramos:
Aninhamos belos horrores, despimo-nos de cuidados;
Tudo é sempre igual; pois, em tristeza ou alegria.
O caminho de partir permanece sempre aberto
O ontem do homem nunca é como seu amanhã;
O que perdura não é outro senão o que muda!
(Mary Shelley, verso retirado de sua obra intitulada Frankenstein).

Sumário

RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUÇÃO	1
1.1 Problemática.....	1
1.2. Justificativa	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1. A Teoria da Complexidade	6
2.1.2 Sistemas Complexos	11
2.1.3- A dimensão fractal	13
2.1.4- Geometria fractal pode imitar a natureza	15
2.1.5- Autossimilaridade e Dimensão fractal	17
2.1.6-Evapotranspiração.....	19
3. Material e Métodos	22
3.1. Descrição das áreas de estudo	22
3.2. Instrumentação e medidas	25
3.2.1. Medidas Micrometeorológicas	25
3.2.3 Condutância aerodinâmica	28
3.2.4 Condutância de superfície	28
3.2.5 Informação Mútua	29
3.2.6 Construção dos atratores	30
3.2.7 - Determinação da defasagem pela informação mútua.....	32
3.2.8- Dimensão de correlação	32
4. Resultados e discussões.....	34
4.1- Análises dos resultados para região amazônica (Reserva Jarú)	34
4.1.1 - Evapotranspiração.....	34
4.1.2 – Condutância Superficial	38
4.1.3 Condutância Aerodinâmica	40
4.2- Análises dos resultados para região de Sinop	43
4.2.1 - Evapotranspiração.....	43
4.2.2 – Condutância superficial.....	45
4.2.4-Condutância aerodinâmica.....	47

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
6.1. BIBLIOGRAFIA CITADA.....	54
6.2. BIBLIOGRFIA CONSULTADA	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Padrões em sistemas complexos	10
Figura 2- Com que se parece? Imagem feita por um computador - Fractal	14
Figura 3- Curva do floco de neve – exemplo de autossimilaridade	18
Figura 4- Localização da área de estudo (Sinop)	22
Figura 5- Localização da torre micrometeorológica na Reserva Biológica do Jaru – Rondônia.....	24
Figura 6- Disposição dos sensores instalados na torre da REBIO Jaru.....	27
Figura 7- Gráfico de joelhos para a variável evapotranspiração na estação úmida da Reserva Jaru.....	30
Figura 8- Dimensão de Correlação em função da Dimensão de Imersão para a Variável Evapotranspiração na Reserva Jaru na Estação Úmida.	34
Figura 9- Atrator Reconstruído para a Variável Evapotranspiração na Reserva Jaru na Estação Úmida.	35
Figura 10- Dimensão de Correlação em função da Dimensão de Imersão para a Variável Evapotranspiração na Reserva Jaru na Estação Intermediária.	36
Figura 11- Atrator Reconstruído para a Variável Evapotranspiração na Reserva Jaru na Estação Intermediária.	36
Figura 12- Dimensão de Correlação em função da Dimensão de Imersão para a Variável Evapotranspiração na Reserva Jaru na Estação Seca.	37
Figura 13- Atrator Reconstruído para a Variável Evapotranspiração na Reserva Jaru na Estação Seca.	37
Figura 14- Dimensão de Correlação em função da Dimensão de Imersão para a Variável Condutância Superficial na Reserva Jaru na Estação Úmida.	38
Figura 15- Atrator Reconstruído para a Variável Condutância Superficial na Reserva Jaru na Estação Úmida.	39
Figura 16- Dimensão de Correlação em função da Dimensão de Imersão para a Variável Condutância Superficial na Reserva Jaru na Estação Seca.	39
Figura 17- Atrator Reconstruído para a Variável Condutância Superficial na Reserva Jaru na Estação Seca.....	40
Figura 18- Dimensão de Correlação em função da Dimensão de Imersão para a Variável Condutância Aerodinâmica na Reserva Jaru na Estação Úmida.	41
Figura 19- Atrator Reconstruído para a Variável Condutância Aerodinâmica na Reserva Jaru na Estação Úmida.	41
Figura 20- Dimensão de Correlação em função da Dimensão de Imersão para a Variável Condutância Aerodinâmica na Reserva Jaru na Estação Seca.	42
Figura 21- Atrator Reconstruído para a Variável Condutância Aerodinâmica na Reserva Jaru na Estação Seca.....	42
Figura 22- Dimensão de Correlação em função da Dimensão de Imersão em Sinop para a Variável Evapotranspiração na Estação Úmida.....	43
Figura 23- Atrator Reconstruído para a Variável Evapotranspiração em Sinop na Estação Úmida.	44

Figura 24-Dimensão de Correlação em função da Dimensão de Imersão em Sinop para a Variável Evapotranspiração na Estação Seca.	44
Figura 25-Atrator Reconstruído para a Variável Evapotranspiração em Sinop na Estação Seca.....	45
Figura 26-Dimensão de Correlação em Função da Dimensão de Imersão para a Variável Condutância Superficial em Sinop na Estação Úmida.	46
Figura 27-Dimensão de Correlação em Função da Dimensão de Imersão para a Variável Condutância Superficial em Sinop na Estação Seca.	46
Figura 28-Dimensão de Correlação em Função da Dimensão de Imersão para a Variável Condutância Superficial em Sinop na Estação Seca.	47
Figura 29--Dimensão de Correlação em Função da Dimensão de Imersão para a Variável Condutância Aerodinâmica em Sinop na Estação Úmida.	48
Figura 30-Atrator Reconstruído para a Variável Condutância Aerodinâmica em Sinop na Estação Úmida.	48
Figura 31-Dimensão de Correlação em Função da Dimensão de Imersão para a Variável Condutância Aerodinâmica em Sinop na Estação Seca.	49
Figura 32-Atrator Reconstruído para a Variável Condutância Aerodinâmica em Sinop na Estação Seca	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Descrição dos instrumentos e alturas de instalação, utilizados nas medidas de saldo de radiação líquida (R_n), radiação solar (R_g), radiação fotossinteticamente ativa (PAR), umidade do ar, temperatura e velocidade de fricção do ar (u^*).	26
Tabela 2-Relação das variáveis, dos instrumentos e das alturas dos instrumentos instalados na torre da REBIO Jauru.	26
Tabela 3-Resumo dos resultados da dimensão de correlação e dimensão de imersão para região do Amazônia (Reserva Jauru).....	50
Tabela 4-Resumo dos resultados da dimensão de correlação e dimensão de imersão para região de Sinop.	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CR10X	Modelo de datalogger
CRN1	Modelo de saldo radiômetro
EC	Eddy Covariance
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IRGA	Analisador de gás por infravermelho
LBA	Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia
LI-COR	É uma empresa que fabrica e comercializa instrumentos inovadores e softwares para diversas áreas, sendo uma delas a ambiental.
RAM	Memória do computador
REBIO	Reserva Biológica

RESUMO

TAVARES, A. S. **Análise da evapotranspiração e condutância como processo dinâmico em dois ecossistemas amazônicos na perspectiva da teoria da complexidade.** Cuiabá – MT. . (Doutorado em Física Ambiental), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

O objetivo deste trabalho é fazer a comparação entre dois ecossistemas distintos, um deles localizado na floresta de transição Amazônia-Cerrado e outro na Amazônia, no que diz respeito ao cálculo da dimensão de correlação e dimensão de imersão dos atratores para as variáveis evapotranspiração, condutância superficial e condutância aerodinâmica em períodos de tempo secos e úmidos. Realiza-se ainda uma reconstrução dos atratores pelo método da defasagem temporal para observar a coesão entre os valores da dimensão de correlação obtida e os aspectos dos atratores. É possível detectar pelos resultados obtidos que há estabilização da dimensão de correlação nas variáveis independente de o ecossistema localizar-se em Sinop ou na Reserva Jaru, a exceção fica por conta da variável evapotranspiração na estação úmida de Sinop. Percebe-se ainda que a dimensão de correlação tem valor mais alto em Sinop em comparação com a Reserva Jaru para uma mesma variável em uma mesma estação com exceção da condutância de superfície na estação seca.

Palavras-chave: condutâncias de superfície (cs), condutância aerodinâmica (ca) e evapotranspiração.

ABSTRACT

TAVARES, A. S. Analysis of evapotranspiration and conductance as a dynamic process in two Amazonian ecosystems in the perspective of complexity theory. Cuiabá - MT. (Doctorate in Environmental Physics), Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso.

This study is a comparison between two distinct ecosystems, one located in the Amazon forest-cerrado and another transition in the Amazon, with regard to the calculation of the correlation dimension and dimension of attractors for immersion evaporation variable conductance surface conductance and aerodynamics in dry and wet periods. Takes place even a reconstruction of attractors for using the time lag to observe the cohesion between the values of the obtained correlation dimension and aspects of the attractors. You can detect the results obtained that there is stabilization of the correlation dimension of independent variables of the ecosystem be located in Sinop or Jaru Reserve, the exception is evapotranspiration variable in Sinop wet season. It is noticed that the correlation dimension has the highest value compared with the Sinop Jaru reserve for a given variable in a single season except for the surface conductivity in the dry season.

Keywords: surface conductance (cs), aerodynamic conductance (ca) and evapotranspiration.

INTRODUÇÃO

1.1 Problemática

O meio ambiente tem sido alvo de constantes debates, tanto no meio acadêmico, como na mídia de forma geral. Não é difícil encontrar materiais, seja em forma de livros, revistas científicas (ou não) que abordem a temática ambiental. A maioria dos debates diz respeito às alterações que o homem vem provocando nos ecossistemas, e relacionando essas mudanças a alterações climáticas no planeta Terra. Mas é preciso que se conheçam bem esses ecossistemas para que possamos nos posicionar de forma coerente diante de tantas informações e até especulações sobre o tema. Esse conhecimento só pode ser gerado através de muitas pesquisas acerca desses ecossistemas.

Em Mato Grosso, temos três grandes ecossistemas: Amazônia, Cerrado e Pantanal. Mesmo com as pesquisas existentes nessas regiões, ainda se tem muito a conhecer devido à diversidade e até mesmo à dificuldade de se estudar ambientes caracterizados pela presença da vida. Os ecossistemas citados são sistemas abertos, ou seja, sistemas que se caracterizam por trocas permanentes de fluxo de energia, matéria e momento e que podem ser mais bem compreendidos se fundamentados pela Teoria da Complexidade, que atualmente constitui um novo paradigma científico nos estudos destes sistemas.

A Teoria da Complexidade pode permitir um avanço no entendimento desses ecossistemas como, por exemplo, compreender o número de variáveis necessárias para desenvolver modelos explicativos, o que implicaria numa ampliação do conhecimento científico acerca desses sistemas.

1.2. Justificativa

Diante da temática do meio ambiente, das discussões geradas acerca das mudanças climáticas, da interação do homem com esse meio e das mudanças causadas por essa interação se faz necessário pesquisar e elaborar estudos desses ecossistemas para que se possa entender de forma expressiva a importância desses sistemas para o

entendimento da natureza. Nós somos parte dessa natureza e muitas vezes modificamos o ambiente em que vivemos antes de conhecê-lo, dessa forma estamos deixando de obter informações que podem ser determinantes para nossa sobrevivência e quem sabe até para a permanência da nossa espécie no planeta. O que se quer dizer, é que com o conhecimento acumulado pela humanidade e as técnicas de coleta e análise de dados referentes aos ecossistemas é improvável que não se conheça o ambiente de maneira a otimizar a ação antrópica.

A Ciência da Complexidade estuda fenômenos, tais como: dinâmica de sistemas abertos, fluxos, interações entre biosfera e atmosfera, sensibilidade às condições iniciais, imprevisibilidade, dimensionalidade fractal, não linearidade, auto-organização, regimes e bifurcações. Esses conceitos são fundamentais para melhor entendimento acerca dos ecossistemas.

O objetivo geral do trabalho é fazer uma análise da evapotranspiração real de uma área de floresta de transição Amazônia-Cerrado e de uma área de floresta Amazônica por meio da Ciência da Complexidade.

Para atingir esse objetivo, foi traçado um plano de ação cujos objetivos específicos são:

- ✓ Analisar a sazonalidade da evapotranspiração real dos ecossistemas;
- ✓ Analisar as condutâncias de superfície (c_s) e aerodinâmica (c_a);
- ✓ Utilizar a dimensão de imersão e a dimensão de correlação para elaborar um modelo explicativo da evapotranspiração para cada estação que os dados permitirem para esses ecossistemas.

1.3. Hipótese

- ❖ Existem diferenças no valor de dimensionalidade do atrator para uma mesma variável em uma mesma estação do ano em Sinop e em Ji-Paraná.
- ❖ Espera-se que a dimensionalidade seja maior ou menor dependendo da sazonalidade.
- ❖ Provavelmente há diferença de valor na dimensionalidade de uma mesma variável em um mesmo local de acordo com a sazonalidade.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, será apresentada a fundamentação teórica relacionada ao estudo, discorrendo sobre as bases científicas que permitiram desenvolver a pesquisa realizada, buscando esclarecer os conceitos envolvidos.

2.1. Amazônia e o clima

Segundo o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE) a Bacia Amazônica possui uma área estimada de 6,3 milhões de quilômetros quadrados, sendo que aproximadamente cinco milhões em território brasileiro e o restante dividido entre os países da Bolívia, Colômbia, Equador e Peru. Esta região é limitada a oeste pela Cordilheira dos Andes (com elevações de até 6000 m), a norte pelo Planalto das Guianas (com picos montanhosos de até 3000 m), ao sul pelo Planalto Central (altitudes típicas de 1200 m) e a leste pelo Oceano Atlântico, por onde toda a água captada na bacia escoar para o mar. Segundo o IBGE, a área da Amazônia Legal no Brasil é de 5032925 km², compreendidos pelos estados do Pará, Amazonas, Rondônia, Roraima, Acre e Amapá e parte dos estados do Tocantins, Mato Grosso e Maranhão.

A Floresta Amazônica de Terra Firme está implantada sobre solos bastante diversos, de fertilidade muito variável. No geral as árvores deste ecossistema são bastante elevadas, com copas sobrepostas, que determinam em sombreamento permanente do solo; a ciclagem da matéria orgânica e dos nutrientes é bem rápida e os processos de sucessão e regeneração da mata são fortemente influenciados pela capacidade das plantas se desenvolverem na sombra; o número de espécies por área é muito elevado e a dominância de determinadas espécies por área não é, via de regra elevada, destacando-se um grande número de espécies raras (SOUZA-FILHO, 2005).

Nos últimos anos, tem havido intensa mudança na paisagem dos ecossistemas amazônicos, em razão do aumento das mudanças antropogênicas em grande escala que tiveram início na década de 60 com a abertura de eixos de penetração, como as rodovias BR 001, 364, 230 e 163 (ANDRADE, 2014).

Para Correia (2006) Tais eixos são vetores de colonização e de avanço das fronteiras, onde os ecossistemas naturais são transformados, sendo a conversão de

florestas de dosséis fechados atribuídas a uma gama de fatores como a expansão de área de pastagem, cultivo de soja, expansão de infraestrutura e proliferação de pavimentos e estradas.

Segundo Costa et al. (2007), ao comparar as mudanças climáticas na Amazônia causadas pela expansão do cultivo de soja com as causadas pela expansão das áreas de pastagens, mostrou que o expressivo aumento do albedo em uma área com soja acarreta uma diminuição da precipitação significativamente acentuada, quando comparada às mudanças que ocorrem em uma área com pastagem (AGUIAR, 2012).

2.2. Cerrado, Floresta Amazônica e ecossistemas de transição.

O segundo ecossistema de interesse de estudo para esse trabalho configura-se como área de transição entre dois biomas, a Amazônia e o Cerrado, com características climáticas e fitofisionômicas de transição entre ambos, considerando que, a dispersão e o intercâmbio de espécies entre biomas são dependentes da localização geográfica, fatores relacionados ao tempo, clima, relevo e solo, os quais são importantes mecanismos reguladores biodiversidade (SILVA, 2010).

Segundo Méio (2003), o bioma Cerrado constitui um corredor, conectando o chaco à caatinga, ocupando a região intermediária entre as duas maiores florestas chuvosas neotropicais: a floresta Amazônica e a floresta Atlântica. A maior parte do Cerrado apresenta gradiente fitofisionômico com vegetação xeromorfa que varia de campo limpo até cerradão, embora também ocorram matas de galeria e florestas estacionais. (SILVA, 2010).

As formações estacionais ocupam 15% do bioma Cerrado, normalmente, as matas que ocorrem sob afloramento de rocha são decíduas, perdendo totalmente as folhas na estação seca, enquanto parte das que ocorrem em solos planos e encostas são semidecíduas, mantendo cobertura de 50% aproximadamente ou mais durante a seca (MOTTA et al., 2002).

Silva (2010) Já o bioma Amazônico é composto por uma série contínua de formações florestais que são fisionomicamente similares, mas, florísticamente distintas,

consistindo de muitas sub-regiões climáticas distintas em que estudos enfatizam a alta variabilidade espacial na fitofisionomia e de espécies (FELFILI, 2002).

2.3. A Teoria da Complexidade

Thomas Kuhn em sua obra intitulada “*A Estrutura das Revoluções Científicas*” diz que a ciência passa por períodos de revolução, definindo esta como um conjunto de episódios de desenvolvimento não cumulativo, nos quais um paradigma mais antigo é total ou parcialmente substituído por um novo incompatível com o anterior. Paradigma foi o termo introduzido por esse epistemólogo da ciência como sendo aquilo que os membros de uma comunidade partilham e, inversamente, uma comunidade científica consiste em homens que partilham um paradigma. Assim, novas teorias surgem quando as vigentes não conseguem explicar novos problemas que vão surgindo para a ciência. Podemos citar alguns exemplos de principais paradigmas dentro da Física: a Física Newtoniana que dominou de 1700 a 1900, a Teoria da Relatividade e a Física Quântica que surgiram nas primeiras décadas do século XX e a Teoria da Complexidade que nasce a partir da década de setenta do século XX.

A Teoria da Complexidade consolida-se como ciência com os trabalhos de Ilya Prigogine que emprega o termo “Complexidade”, como científico. Prigogine estabeleceu os princípios gerais dos sistemas fora do equilíbrio (WALDROP, 1992).

Há uma literatura acerca dos sistemas fora do equilíbrio, contudo não podemos deixar de considerar que os principais fundamentos são estabelecidos Ilya Prigogine (1989). Esse autor exemplifica alguns fenômenos complexos que fogem do entendimento de uma abordagem determinística. As reações químicas no tocante às concentrações são, em geral, não lineares. Para cada valor dado, existem muitas soluções possíveis para concentração dos produtos intermediários; a Termodinâmica permite formular as condições necessárias ao aparecimento de estruturas dissipativas, quando estas se produzem em condições afastadas do equilíbrio, sempre há uma distância crítica aquém da qual a ramificação termodinâmica é estável.

As estruturas dissipativas implicam a existência de etapas catalíticas. Isto significa que existe na cadeia das reações químicas uma etapa na qual um produto intermediário Y é obtido a partir de um produto intermediário X, enquanto numa outra

etapa X é produzido a partir de Y. Para o mesmo autor, estas condições são satisfeitas por todo organismo vivo. As enzimas, que são codificadas no material genético, garantem uma riqueza e uma multiplicidade de reações catalíticas sem equivalente no mundo inorgânico. E sem elas, o material genético permaneceria letra morta.

A distância do equilíbrio é um parâmetro essencial para descrever o comportamento da matéria, como o é a temperatura para sistemas no equilíbrio. Quando se abaixa a temperatura, observa-se uma sucessão de transições de fase que põem em cena os diferentes estados físicos da matéria. Da mesma forma, no não equilíbrio, pode-se observar uma sucessão de regimes de atividade da matéria, cuja variedade é muito maior do que as dos estados físicos gasosos, líquido e sólido. Aqui foram trabalhados exemplos de química, mas as estruturas dissipativas de não equilíbrio foram estudadas em muitas outras áreas, tais como na hidrodinâmica, na óptica ou nos cristais líquidos. A matéria longe do equilíbrio adquire realmente novas propriedades. Bilhões de moléculas evoluem juntas, e essa coerência se manifesta pela mudança de cor da solução. Isto significa que correlações de longo alcance aparecem em condições de não equilíbrio, correlações que não existem no equilíbrio (PRIGOGINE, 1996).

Para Prigogine (1996), podemos usar um tom metafórico, podendo dizer que no equilíbrio a matéria é cega, ao passo que longe do equilíbrio ela começa a ver. E esta nova propriedade, esta sensibilidade da matéria a si mesma e a seu ambiente, está ligada à dissipação associada aos processos irreversíveis.

As estruturas dissipativas surgem nos sistemas abertos, ou seja, nos sistemas capazes de trocar matéria e energia com o meio ambiente (IÓSIFOVICH, 2003).

Segundo Paulo (2006), a Complexidade enquanto ciência estuda os sistemas fora de equilíbrio, propondo-se a responder questões referentes a fenômenos que seguem uma dinâmica não linear, desta forma fenômenos tais como sistemas vivos, o clima da Terra, a aprendizagem, a sociedade, a economia e todos os fenômenos que fazem parte do cotidiano das pessoas não podem ser descritos em termos de uma ciência cartesiana, ou seja, que analisa as partes de um sistema complexo sem levar em consideração o comportamento do todo. Como exemplo pode-se citar a medicina tradicional que se dividiu em várias especializações, um estudo para cada órgão do corpo praticamente, mas não obterá bons resultados se não se levar em consideração a interação das partes estudadas com o corpo humano inteiro, uma função desempenhada por um órgão está estritamente relacionada ao bom funcionamento ou não dos demais componentes do corpo. O mesmo pode-se dizer quando se estuda a natureza, quando se dirigem os

estudos a um ecossistema em particular para obter resultados e extrair informações as mais próximas possíveis da realidade, deve-se estudar a quantidade de variáveis que estão interferindo naquele sistema a fim de se compreender com veracidade o meio cuja análise está sendo feita.

A dinâmica não linear oferece um cenário natural para uma descrição sistemática das propriedades fundamentais dos sistemas complexos e para distinguir os cenários de evolução genérica. Na maioria das situações de interesse, a não linearidade coexiste com limitações, um conjunto de ações que refletem a influência do ambiente sobre o sistema de interesse e se manifesta ao nível das leis de evolução através da presença de um conjunto de parâmetros de controle. (NICOLIS et al, 2009).

O caminho está agora aberto para a pesquisa sobre sistemas complexos como um ramo da ciência básica. De um lado assiste-se ao encontro e intercâmbio de conceitos e técnicas de dinâmica não-linear, a teoria do caos, física estatística, teoria de probabilidade e de informação, análise de dados e simulação numérica em estreita sinergia com o experimento. E, por outro lado, tem-se o confronto com sistemas de grande escala, como os encontrados na natureza, na tecnologia, na sociedade, muitos deles fora do âmbito estrito da matemática tradicional. Conceitos que não foram ainda até recentemente parte do vocabulário científico estabelecido, agora estão ocupando o lugar central forçando uma reavaliação de princípios e práticas (NICOLIS et al, 2009).

Segundo Nicolis (2009), o conjunto de descrições probabilísticas e determinísticas, assim como os pontos de vista macroscópico e microscópico abrem o caminho para uma abordagem multinível no centro da investigação atual da complexidade que podem ser resumidos em *Balanças, correlações, auto-similaridade; A complexidade, entropia e dimensões generalizadas; Complexidade e informação; Simulação de sistemas complexos.*

1. *Correlações e auto similaridade:* A caracterização mais familiar de sistemas complexos é, em termos de correlações, um conjunto de quantidades extensamente utilizadas na física estatística e na análise de dados para descrever, de uma forma média, como o sistema mantém o tempo e o espaço da memória de uma perturbação causado inicialmente em uma de suas partes. Como regra geral, o aparecimento de comportamentos complexos é marcado pela geração de correlações ou dimensão do espaço. As distribuições de probabilidade mostram,

por sua vez, extensões de lei de potência. Estas características são referidas como semelhante ou fractal.

2. *A complexidade, entropia e dimensões generalizadas*: são analisadas por um processo probabilístico para que a evolução de um sistema complexo possa ser mapeada em determinadas condições. Pode ser caracterizada por uma hierarquia de entropia de quantidades semelhantes, descrevendo a quantidade de dados necessários para identificar um determinado estado do sistema.
3. *Complexidade e informação*: A descrição probabilística de sistemas complexos oferece uma representação em termos de sequências de estados que podem ser considerados como símbolos ou letras de um alfabeto. Nesta perspectiva, os sistemas complexos são considerados fontes e processadores de informação.
4. *Simulação de sistemas complexos*: Direto da simulação de um processo de interesse, em vez de a integração de um conjunto de equações de evolução subjacente, é um elemento indispensável no estudo de sistemas complexos. A partir de uma quantidade mínima de informações iniciais considerados essenciais, diferentes cenários compatíveis com estas informações sejam exploradas. Aspectos genéricos de comportamentos complexo observado através de uma ampla gama de campos (em muitos dos quais a estrutura detalhada das unidades que constituem e suas interações não podem ser conhecidas com um grau de segurança comparável à de uma lei física) são capturados neste caminho através de modelos regidos por regras simples locais.

Segundo Capra (1996), houve uma mudança na maneira de se pensar, substituindo um pensamento mecanicista por um pensamento sistêmico, sendo invertida a relação entre as partes e o todo. A ciência cartesiana analisava sistemas com comportamentos complexos em termos das propriedades de suas partes, acreditava-se assim estudar as partes separadamente e compreender o todo. Mas, a ciência que estuda os sistemas abertos mostra que os sistemas vivos não podem ser compreendidos por meio da análise fragmentada. As propriedades das partes não são propriedades intrínsecas de cada parte, podendo somente ser entendidas dentro do contexto de um todo maior.

Para Bohr (2000), dados obtidos em diferentes condições experimentais não podem ser compreendidos dentro de um quadro único, mas devem ser considerados

complementares, no sentido de que só a totalidade dos fatos esgota as informações possíveis acerca dos fenômenos em estudo.

Savi (2007) diz que a complexidade dos sistemas naturais possui características como a capacidade de auto-organização e de adaptação o que possibilita o surgimento de diversos padrões. Ao observarmos a natureza com cuidado, ver-se-ão padrões associados aos furacões e às secas; nas impressões digitais humanas e nos desenhos de uma onça pintada como representamos na figura abaixo extraída do artigo do mesmo autor.



Figura 1 - Padrões em sistemas complexos

Fonte: https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRgI_iwj16zHkNSzy0bnL73L3ojr5SyzAYi0XqOiVTDpLqGYa-h

Para o autor, compreender o caminho das não-linearidades significa definir nossos ritmos de forma apropriada. Compreender os caminhos da complexidade significa constatar que se está imerso na natureza como um dos fios de sua teia. Compreender a natureza permite estabelecer a solidariedade ao invés da competição. E como nossa sociedade também é um fio dessa teia, padrões de justiça e felicidades poderiam prevalecer.

2.4. Sistemas Complexos

A caracterização dos sistemas complexos, enquanto objetos de estudo da Teoria da Complexidade ainda passa por um processo de construção. Segundo Nussenzweig (2003), em seu livro *Complexidade e Caos*, os sistemas complexos também podem ser chamados de adaptativos e apresentam as seguintes características:

1. Dinamicidade: está em constante evolução, formando várias unidades;
2. Interatividade: uma vez que cada unidade interage com seus pares, ou seja, com unidades do próprio sistema;
3. Aberto: interage com o meio ambiente;
4. Frustração: leva-se em conta que o sinal recebido por seus pares, ou pelo meio ambiente, pode ser contraditório, ou em intensidades bastante variáveis, a resposta poderá frustrar algumas entradas;
5. Aprendizagem: uma vez que a arquitetura básica do sistema vai mudando, à medida que evolui e interage com o ambiente;
6. Aleatoriedade: algumas características do sistema são distribuídas ao acaso – podem depender das flutuações do meio (não previsíveis);
7. Ordem Emergente: de maneira espontânea, o sistema é capaz de se auto organizar;
8. Hierarquia: quando um sinal, ou qualquer estímulo o atinge em determinada parte, o mesmo é tratado em níveis diferentes dependendo do grau de interação ou importância para o sistema;
9. Atratores: é uma situação ou um estado para o qual os sistemas dinâmicos tendem a se estabilizar;
10. Histerese: o sistema pode manter sua estabilidade por algum tempo, numa certa “paisagem”, dependendo criticamente da sua história anterior;
11. Propriedades coletivas emergentes: são propriedades ou características qualitativamente novas que surgem a partir da multiplicidade de interações entre suas unidades, que por sua vez competem ou cooperam entre si.
12. Estrutura fractal: em geral, são geometricamente fractais, ou seja, apresentam dimensionalidade fracionária.

Nos sistemas abertos, há um fluxo contínuo de matéria através de um organismo vivo, embora sua forma seja mantida. Diferentemente dos sistemas fechados, que se estabelecem num estado de equilíbrio térmico, os sistemas abertos se mantêm afastados do equilíbrio num “estado estacionário” caracterizado por fluxo e mudança contínuos.

Segundo Massoni (2008), para Prigogine as escolhas, as possibilidades, as incertezas, são ao mesmo tempo uma propriedade do universo e próprio da existência humana. Elas abrem novas perspectivas às ciências e a uma nova racionalidade, na qual a verdade científica não é mais sinônimo de certo ou determinado onde o incerto e o indeterminado não estão fundamentados na ignorância, no desconhecimento. Segundo ele, é o que assinala a marca do nosso tempo; uma ciência em que o ser e a estabilidade deram passagem para a evolução e mudança.

Dos estudos da Teoria da Complexidade e de diversas pesquisas realizadas acerca dos fenômenos complexos, surgem vários novos conceitos, tais como atratores, auto-similaridade, bifurcação, caos, parâmetro de controle e auto-organização. Prigogine advoga que, não causalidade, não determinismo, a não-localidade, são conceitos também aplicáveis ao mundo macroscópico, afirmando que os fenômenos complexos, assim como os estudos no mundo microscópico da mecânica quântica, não são previsíveis e sim probabilísticos.

Thornton & Marion (2011) lembra que no início do século XIX, o famoso matemático francês Pierre Simon de Laplace defendeu a visão divulgada da posição e velocidade de todas as partículas no universo, o que nos levaria a conhecer o futuro o tempo todo. Esta é a visão determinística da natureza. Nos últimos anos pesquisados em várias disciplinas perceberam que conhecer as leis da natureza não é suficiente. Grande parte da natureza parece ser caótica. Neste caso se referindo ao caos determinista, em oposição à aleatoriedade, como sendo o movimento de um sistema cuja evolução do tempo tenha uma dependência sensível às condições iniciais. O desenvolvimento determinista refere-se ao modo que um sistema se desenvolve de um momento ao próximo, onde o sistema atual depende daquele que acabou de passar em um modo bem determinado por meio das leis físicas.

Medições feitas no estado de um sistema em um dado tempo podem não permitir que façamos previsões da situação futura nem mesmo pouco adiante, independente do fato de as equações governantes serem conhecidas exatamente (THORNTON & MARION, 2011).

Fenômenos caóticos foram descobertos em praticamente todas as áreas da ciência e engenharia; em batimentos cardíacos irregulares; movimento dos planetas em nosso sistema solar; água caindo de uma torneira; circuitos elétricos; padrões de tempo; epidemias; populações mutáveis de insetos, pássaros e animais; e o movimento dos elétrons nos átomos, só para dar alguns exemplos. É geralmente dado crédito a Henri Poincaré como o primeiro a reconhecer a existência do caos durante sua investigação da mecânica celeste no final do século 19. Ele chegou à percepção de que o movimento de sistemas aparentemente simples, como os planetas em nosso sistema solar, pode ser extremamente complicado. Embora vários investigadores também chegassem a entender a existência do caos, desenvolvimentos relevantes não aconteceram até a chegada da década de 1970, quando os computadores estavam disponíveis para calcular os históricos de longo prazo necessário para documentar o comportamento (MARION, 2011).

Segundo o mesmo autor o estudo do caos se espalhou, livros especializados se tornaram abundantes para aqueles que desejarem estudos mais profundos. Citou como exemplo que o espaço não nos permite discutir a área fascinante dos fractais e os padrões complicados que emergem dos processos caóticos.

2.5. A dimensão fractal

Estamos acostumados a descrever o mundo a partir de formas geométricas euclidianas. Aprende-se na escola e na vida que nosso corpo e tudo o que tem altura, largura e comprimento (ou qualquer outra nomenclatura que designa três medidas lineares para descrever o objeto) é tridimensional. Assim como a descrição da medida de uma área ou superfície, é bidimensional e de uma linha é unidimensional. Contudo, nada na natureza é absolutamente tridimensional, cada forma naturalmente apresenta um desenho intrincado com orifícios, saliências, reentrâncias, sinuosidades e inúmeras irregularidades estruturais. Assim, qual é a forma geométrica que melhor descreve a natureza?

Mandelbrot (1983) descreve uma geometria que reproduzi com ajuda de grandes computadores uma representação realística de algo familiar, mas com padrões totalmente irregulares na natureza. Ele diz que antes de começar a compreender o que

são fractais o leitor deveria saber com que eles se parecem, examinando cuidadosamente algumas ilustrações. (Ilustrações mostradas na fig. 2).



Figura 2 - Com que se parece? Imagem feita por um computador - Fractal

Fonte: artigo Mandelbrot 1983.

As ilustrações não eram nenhuma fotografia de paisagem na Terra, na Lua ou em qualquer outro planeta, nem mesmo uma pintura feita por artista de ficção científica, ele garantia que nenhuma de suas ilustrações no artigo representava qualquer face atual da natureza e nenhuma é uma obra de arte. Todos segundo ele são 100% garantidos como falsificações geométricas. Eles são representações geradas e plotadas por computadores e são membros de uma família de formatos puramente geométricos chamados fractais.

As ideias apresentadas a seguir são embasadas no artigo de 1983 de Mandelbrot, o “pai” do termo geometria fractal. Quando usarmos outra referência será citada conforme as normas do PGFA.

2.5.1- Geometria fractal pode imitar a natureza

Os formatos fractais são realmente muito simples no sentido de que todos os detalhes deles foram deduzidos sem dúvida de umas poucas linhas de instruções dadas por computadores que as desenharam. Estes formatos são extremamente escondidos e são surpreendentemente diferentes de qualquer uma disciplina familiar da geometria clássica ou Euclidiana. A nova geometria fractal que eles exemplificam é muito diferente da forma de Euclides. Especialmente notável é o fato que o número de dimensões, ou dimensionalidade, de um fractal pode ser uma fração. Esta ideia pode parecer de nenhum significado, uma “ficção geométrica”, mas parte de um capítulo da matemática que é clássica, mas foi obscura até recentemente por falta de aplicações interessantes.

A aplicação de geometria fractal para descrever alguns aspectos muito fragmentados e irregulares da natureza é muito surpreendente e isso fica evidente nas ilustrações, é razoável se surpreender por que não lhe deram atenção antes de 1975 quando a publicação compreensível deste primeiro autor em fractais introduziu o termo e marcou o encontro da disciplina. Ele foi quem encontrou antecipadamente sem dúvida sob um nome diferente e preencheu uma necessidade óbvia de descrever alguns de muitos padrões naturais notáveis – incluindo formatos de montanhas, linhas costeiras e nuvens em que as linhas retas, círculos, elipses, áreas e outros componentes da geometria clássica o representavam, mas de forma incompleta.

A geometria fractal trata dos conjuntos ou estruturas fractais. Os fractais são conjuntos cuja forma é extremamente irregular ou fragmentada e que têm essencialmente a mesma estrutura em todas as escalas. A origem do termo fractal, introduzido por Mandelbrot, está no radical *fractus*, proveniente do verbo latino *fragere*, que quer dizer quebrar, produzir pedaços irregulares; vem de a mesma raiz fragmentar em português (MOREIRA, 2008).

A dimensão fractal foi conhecida por alguns matemáticos e filósofos desde o período de 1875-1925, mas foram deixados de lado como curiosidades sem significado. Não lhe deram atenção porque foram aceitas como não merecedoras de atenção, então ninguém sentiu a necessidade de uma palavra para defini-las.

É útil diferenciar alguns formatos fractais daqueles de Euclides. O círculo, o quadrado e a esfera são os mais simples formatos euclidianos porque, exceto a posição, necessita-se apenas de um parâmetro para descrevê-los; digamos um diâmetro ou o comprimento da diagonal. Qualquer parâmetro alternativo é um múltiplo fixo de um escolhido como base. Um círculo é mais simples do que um quadrado porque envolve menos parâmetros. Um retângulo, uma elipse ou a maioria dos círculos envolvem apenas dois parâmetros. Em adição é óbvio que cada um dos parâmetros requeridos por estes exemplos é uma escala de comprimento.

Este último aspecto leva a uma forte tentação de identificar as noções de escala e de parâmetro e concluir que o formato geométrico que é simples descrever precisa envolver poucas escalas distintas de comprimento.

O termo denotado por D é a dimensão fractal que demanda algumas aplicações. D difere da visão padrão de dimensão quando o número de coordenadas distintas necessita especificar um ponto no espaço. Em uma linha reta é necessário apenas uma coordenada simples para identificar um ponto; em um plano ou em uma paisagem são necessárias duas coordenadas. A noção de dimensão tem mais de um significado, e os fractais são caracterizados pelo fato que diferentes definições de dimensão permitem distinguir valores numéricos.

Quando um computador é programado para desenhar um círculo, ele desempenhará aquela simples tarefa e para. Um típico computador para desenho de fractais é programado para dar laços de forma infinita. Ou seja, após ele ter feito uma simples tarefa designada para ele, e ter finalizado o desenho da curva com uma limitada quantidade de detalhes, ele começa novamente a fazer a mesma tarefa em uma escala pequena de comprimento, então adiciona mais detalhes – e assim segue infinitamente. A razão r entre as escalas envolvidas em estágios sucessivos dá o parâmetro principal, D , característico de tais contornos gerais padronizados. Podemos citar como exemplo a curva do floco de neve; para a curva do floco de neve, este valor é 1,26; para variantes do floco de neve, o valor fica entre 1 e 2 e é de novo uma dimensão fractal. Os “loopings” sem fim é a mágica que faz possível para formatos geométricos que envolvem muitas escalas de comprimento ser contadas entre as mais simples em geometria. Então, o produto de um “looping” ininterrupto que para após um número finito de passos é menos simples do que um “looping” sem fim: ser possível saber quando parar, o programa de desenho precisa incluir um sinal adicional, um parâmetro a mais, tal como um contador ou uma escala menor.

Podemos dizer que as principais propriedades que caracterizam e que permitem definir os conjuntos fractais são a autossimilaridade, que pode ser exata ou estatística, ou seja, o sistema é invariante mantendo a mesma forma e estrutura sob uma transformação de escala (que produz ou amplia o objeto ou parte dele); a extrema irregularidade no sentido de rugosidade ou fragmentação; possuir em geral, uma dimensão fractal não inteira. A dimensão fractal quantifica, de certo modo, o grau de irregularidade ou fragmentação do conjunto considerado. Os fractais são conjuntos definidos por certas propriedades matemáticas e, portanto, têm legitimidade como um conceito matemático coerentemente definido e correlacionado com outros (MOREIRA, 2008).

2.5.2. Autossimilaridade e Dimensão fractal

Um segmento de linha reta tem uma propriedade que é autoevidente, mas merece ser apontada como base de uma generalização posterior. Dado um inteiro N , um segmento de comprimento L é a soma (união) de N segmentos retos de comprimento $r = L/N$, cada um que pode ser obtido do segmento original por uma similaridade de razão, com um ponto focal apropriado. Da mesma forma um quadrado de lado L é o mesmo quando a soma de N^2 quadrados de lado $r = L/N$, cada um que pode ser obtido do original por uma similaridade de razão r . O segmento de linha e o quadrado são descritos como uma entidade autosimilar, e todos os segmentos de linhas e quadrados são replicas aumentadas ou reduzidas de cada um do outro. Na Euclidiana, todos os formatos autossimilares são deduzíveis para os exemplos acima; então autossimilaridade não é uma noção especialmente útil. Os fractais podem ser autossimilares em uma grande variedade de formas. Por exemplo, a curva de floco de neve na fig.3 é autossimilar.

Para as figuras autossimilares na Euclidiana é fácil ver que a razão é $D = \log N / \log \frac{1}{r}$ o logaritmo de N dividido pelo log de $1/r$ é idêntica à dimensão da figura, que é um para curvas que se parecem linhas retas e círculos e dois para o domínio planar como o interior de um quadrado. A mesma razão merece ser considerada para formato auto-similar de dimensão fractal. Mas os valores atingidos são muito surpreendentes. Para a curva de floco de neve, $D = \log 4 / \log 3 = 1,26$ que é uma fração!

Um sistema físico pode ter um ponto de atração estável significando um ponto que converge em um devido tempo e que retorna se for perturbado. Um sistema físico pode também ter um ciclo atrativo estável, ou seja, um círculo ou uma elipse. Os planetas e satélites do sistema solar têm uma estabilidade estabelecida, próximo a órbitas elípticas em torno dos corpos-pai. Sistemas dinâmicos cujos atratores são pontos ou próximos de um ciclo circular ou outro formato euclidiano são exceções, o comportamento de muitos sistemas dinâmicos é incomparavelmente mais complicado. Visto em termos de geometria fractal, um notável encontro de Henry Poincaré (em torno de 1885) e Pierre Gatou e Gaston Julia (em torno de 1918) pode ser expresso por dizer que, exceto algumas exceções simples, os atratores são fractais.

Segundo MENDES (1998) chama-se atrator o estado preferencial de um sistema dinâmico. O atrator pode ser ponto, curva, plano ou qualquer forma generalizada de dimensão inteira ou não, ou até mesmo um conjunto de pontos no espaço de fase de dimensão n . Também se pode dizer que um atrator é um conjunto de pontos (ou um ponto) em espaço de fase para o qual um sistema é “atraído” (MARION, 2011).



Figura 3 - Curva do floco de neve – exemplo de autossimilaridade

2.5.3-Evapotranspiração

Para Rodrigues (2014) a medida ou estimativa da densidade de fluxo de calor latente (Le) indica o quanto uma comunidade vegetal utilizou da energia disponível ao meio (Rn) para transpiração das plantas e evaporação de água do solo. No conjunto, a transpiração das plantas e a evaporação de água do solo são chamadas de evapotranspiração.

O mesmo autor quantificar e compreender os componentes da evapotranspiração (ET) é crucial para avaliar os processos ecofisiológicos e físicos de água controlados por fatores ambientais. Há também uma necessidade de entender os fatores bióticos e abióticos subjacentes aos efeitos do balanço de água (recarga de água e déficit) na troca e produtividade de carbono (WILLIAMS et al., 2004; OISHI et al., 2008).

A energia disponível ao meio, expressa o somatório do balanço de radiação de ondas curtas e ondas longas, ou seja, a radiação líquida disponível ao sistema, que é utilizada na evaporação em forma de calor latente (Le), no aquecimento do ar em forma de calor sensível (H), no aquecimento do solo (G). Assim, o balanço de energia de um meio é uma função desses três processos (RODRIGUES, 2014).

$$R_n = H + LE + G$$

Em que R_n ($J\ m^{-2}s^{-1}$) é o saldo de radiação, H ($J\ m^{-2}s^{-1}$) é a densidade do fluxo de calor sensível, Le ($J\ m^{-2}s^{-1}$) é a densidade de fluxo de calor latente, G ($J\ m^{-2}s^{-1}$) é a densidade de fluxo de calor no solo. O Sistema Solo-Planta-Atmosfera está dinamicamente acoplado em um processo físico construído no transporte de energia térmica e massa de água de uma superfície vegetada. Este fenômeno explica, em alguma extensão, a importância do conhecimento acerca da microclimatologia de sistemas de cultivo e florestas (SÁ et al., 1988).

A perda de água do solo por evaporação através de sua superfície ou transpiração pelas plantas é um parâmetro importante no ciclo hidrológico, em especial nas áreas cultivadas. Para cada grama de nutrientes absorvidas pelo solo e pela planta, centenas de gramas de água precisam ser absorvidas. Por essa razão, a transpiração é,

com frequência, chamada também de evaporação produtiva, a fim de contrastá-la da evaporação do solo, chamada de evaporação não produtiva. Essa evaporação da água pela superfície do solo pode, porém, ser do ponto de vista quantitativo de grande importância (REICHARDT, 2004).

Ainda segundo os mesmos autores o processo de evaporação da água é a sua passagem do estado líquido para o gasoso, a temperatura abaixo do ponto de ebulição da água. Em se tratando de mudanças de estado, é um processo que exige energia, no caso o calor latente de evaporação L , tanto maior quanto mais fria a água.

Segundo a teoria cinética dos gases, a passagem da água à fase gasosa se dá como resultado do aumento da energia cinética das moléculas, requerendo, por isso, o dispêndio de certa quantidade de calor (calor latente de vaporização). Assim, a transição de fase líquido-vapor ou sólido-vapor depende do saldo de energia disponível à superfície fonte e, por conseguinte, de sua temperatura (REICHARDT, 2004)

Segundo Sun Lan et al (2001) entre os componentes de aquecimento, o fluxo de calor latente é uma das mais importantes fontes externas de calor para a circulação atmosférica. Em uma média global, o fluxo de calor latente representa cerca de 50% da energia emitida da superfície para o ambiente. A evapotranspiração de superfície terrestre ocupa 15% da precipitação global e 65% da precipitação em superfície. A evapotranspiração modularia o clima assim, reduzindo o transporte de aquecimento, aumentando a umidade do ar.

A energia vem da radiação solar que, por isso, é fator importante no processo. A umidade do ar também é importante. Se o déficit de saturação for grande, a evaporação é estimulada, e quando nulo o que representa um ar saturado, o processo de evaporação cessa, ou melhor, entra em equilíbrio dinâmico no qual o número de moléculas de água que passa para fase gasosa é igual ao número que retorna (PEREIRA, 2007).

O vento é outra variável importante que afeta a evaporação, acelerando-a com a entrada de ar mais cedo, ou retardando-a com a entrada de ar mais úmido. A movimentação atmosférica mantém, portanto, um “poder evaporante”, isto é, capacidade de desumidificação das superfícies, mesmo à sombra sem a presença de radiação solar. (REICHARDT, 2004).

Souza Filho et al (2005) lembra que a evapotranspiração é influenciada pela energia disponível na superfície, pelo gradiente de pressão de vapor d'água entre a superfície e a atmosfera e pelas resistências às transferências de vapor. Para caracterizar o processo de troca do dossel com a atmosfera, e como esses processos são controlados,

em períodos distintos, pelos fatores bióticos e abióticos, é preciso conhecer as médias horárias dos seguintes parâmetros: condutância da superfície, condutância aerodinâmica e o coeficiente de desacoplamento, conceitos que serão discutidos na metodologia do trabalho.

Varejão-Silva (2006) ressalta alguns aspectos importantes em se estudar e compreender os conceitos relacionados à evapotranspiração. Vejamos alguns deles:

Em um planeta em que a água potável está se tornando cada vez mais escassa e conseqüentemente mais cara, o estudo das perdas hídricas assume importância crescente. Para o solo vegetado e para os reservatórios de água doce, a evapotranspiração e a evaporação representam respectivamente uma demanda considerável de água, justificando-se todos os esforços para quantificá-la e tentar minimizá-la. As perdas por evaporação ou evapotranspiração, exatamente por subtraírem uma substancial fração dos recursos hídricos disponíveis, não podem ser negligenciadas em termos de planejamento e tampouco de execução, em inúmeras atividades humanas. Nesse contexto enquadra-se o abastecimento de água para as populações, a agricultura e a indústria.

É muito importante também para as regiões áridas e semiáridas, onde a disponibilidade hídrica é fator limitante da produção agrícola e, em situações menos favoráveis chegam mesmo a por em risco a sobrevivência de populações inteiras, o conhecimento da distribuição espacial e temporal da transferência de vapor de água para a atmosfera facilita bastante o estabelecimento de políticas visando o uso racional da água. Estudos dessa natureza possibilitam a aquisição de conhecimentos que proporcionem melhor controle do aproveitamento de grandes reservatórios, racionalizando a demanda de água para fins industriais, domésticos e agrícolas. Também torna possível quantificar as lâminas de água usadas na irrigação e os turnos de rega, minimizando os desperdícios e mantendo o solo em uma faixa de umidade adequada às plantas.

Para finalizar os aspectos importantes em se estudar os processos de evapotranspirações o autor destaca que o estudo da evaporação e da evapotranspiração reveste-se também de especial importância, mesmo quando são considerados apenas aspectos puramente meteorológicos. É que o vapor da água age como um eficiente meio de transporte meridional de energia (calor latente), interferindo no balanço energético em escala planetária. As áreas que atuam como fontes importantes do vapor da água atmosférico, tais como a zona tropical dos oceanos e as florestas tropicais, representam

sumidouros de energia. Reciprocamente, as porções da atmosfera que atuem como sumidouro de vapor de água são, concomitantemente, fontes de energia, face ao calor latente liberado quando do retorno do vapor de água à fase líquida ou sólida.

No próximo capítulo abordaremos a metodologia usada para elaboração deste trabalho.

3. Material e Métodos

3.1. Descrição das áreas de estudo

O estudo foi realizado em dois ecossistemas distintos que serão descritos separadamente. Um deles é o *ecossistema de transição entre o bioma Cerrado e o bioma Amazônia* situado a aproximadamente 50 km de Sinop ($11^{\circ}24',43,4''S$; $55^{\circ}19'25,7''O$), Mato Grosso, Brasil, a 423 m acima do mar e o outro trata-se de um *ecossistema na Amazônia situado na reserva Jauru*, ($10^{\circ}11'11,4''S$; $61^{\circ}52'29,9''W$), localizado no estado de Rondônia, Brasil.



Figura 4-Localização da área de estudo (Sinop)

Silva (2010) descreve o clima da região *ecossistema de transição entre o bioma Cerrado e o bioma Amazônia* conforme classificação de Köppen, sendo este classificado como, tropical quente e úmido (AW), com temperatura média anual de

24°C e uma precipitação média anual de 2000 mm (VOURLITIS et al., 2005). As estações foram classificadas utilizando o critério hidrológico, que segundo TUCCI (2004) consiste em utilizar a média de precipitação anual como parâmetro de classificação, onde os meses que apresentaram precipitação acumulada menor que a média anual foram classificados como pertencentes à estação seca, e os que apresentaram valores maiores que a média são classificados como sendo da estação chuvosa. A estação seca compreendeu sete meses (abril a outubro), enquanto que, a chuvosa estendeu-se por um período menor de cinco meses (janeiro a março e de novembro a dezembro). A vegetação foi classificada como floresta semidecídua, com altura média do dossel entre 28 a 30 m (SILVA, 2010). A biodiversidade vegetal no local é constituída por aproximadamente 80 espécies, distribuídas em 35 famílias (SILVA, 2010). As principais espécies identificadas no local foram a *Tovomita schomburgkii* (Planch & Triana), *Protium sagotianum* (Marchand), *Brosimum lactescens* (S. Moore), *Dialium guianense* (Aubl.), *Vockysiasp.*, *Ocotea spixiana*, *Dinizia excelsa*, *Quina pteridophilla* e *Mezilaurus itauba* (VOURLITIS et al., 2005).

O ecossistema da Amazônia situado na reserva Jaru (10°11'11,4''S; 61°52'29,9''W), cuja área é de floresta tropical localizada em Rondônia, está representado na Figura 5. A REBIO Jauru é uma unidade de conservação federal de proteção integral do bioma amazônico, criada pelo Decreto 83.716, de 11 de julho de 1979, sob a tutela do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) (AGUIAR, 2013).

A reserva engloba os municípios de Ji-Paraná, Machadinho d'Oeste e Vale do Anari e faz fronteira na porção leste com o Estado de Mato Grosso. Partes dos limites da reserva são delimitadas por rios e igarapés conforme segue: Rio Machado no limite oeste, Igarapé Água Azul no limite sul (que faz divisa com a Terra Indígena Igarapé Lourdes) e pelo Igarapé Buenos Aires ao norte (IBAMA, 2006).

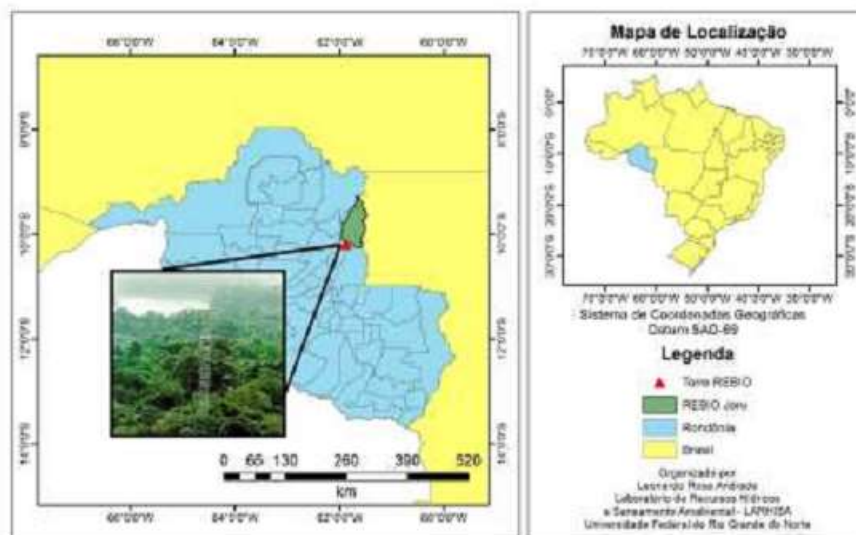


Figura 5 - Localização da torre micrometeorológica na Reserva Biológica do Jaru – Rondônia.

Fonte: Gomes (2011).

A REBIO Jaru apresenta índice de precipitação médio anual superior a 2000 mm (WEBLER et al., 2007), de forma que os mais expressivos volumes de chuva são registrados no período de janeiro a abril e de outubro a dezembro, apresentando um período de poucas ou nenhuma chuva nos meses de junho a agosto. A evapotranspiração varia de 3,2 mm d⁻¹ no período seco a 3,8 mm d⁻¹ no chuvoso (AGUIAR, 2013), temperatura do ar média na estação chuvosa é de 24,8 °C e de 26,2 °C na estação seca. Setembro foi o mês que apresentou em média os maiores valores de temperatura do ar (26,5°C) e o mês de maio, devido à ocorrência dos eventos localmente conhecidos como “friagens” e característicos dessa época do ano, apresentaram os menores valores, 23,2°C (GOMES, 2011).

O relevo é predominantemente plano-ondulado. Em decorrência das áreas onduladas, como a Serra da Providência, são abundantes os pequenos igarapés e nascentes na unidade de conservação, afluentes dos grandes rios, o que dificulta a ocorrência de incêndios na vegetação primária, por causa da alta concentração de umidade (IBAMA, 2006).

A floresta é classificada por Culf et al. (1997) como Floresta Ombrófila Aberta, possui um rico sub-bosque de palmeiras de apenas alguns metros, a altura média do dossel é de cerca de 30 m, mas algumas árvores emergentes chegam a medir 45 m (RUMMEL et al., 2002). O índice de área foliar (IAF) varia de 5 a 6 (ANDREAE et al., 2002).

O solo da região, de acordo com Hodnett et al. (1996), apresenta alto teor de areia na superfície (88%) e é caracterizado como *podzólico* vermelho amarelo de textura média. Na Amazônia, os solos *podzólicos* se desenvolvem devido às intempéries nas rochas. Esses solos apresentam o horizonte da subsuperfície cinzento esbranquiçados por causa da ação dos ácidos orgânicos e são típicos de áreas úmidas (QUESADA et al., 2011).

3.2. Instrumentação e medidas

3.2.1. Medidas Micrometeorológicas

As medições do *ecossistema de transição entre o bioma Cerrado e o bioma Amazônia* foram realizadas por equipamentos fixados numa torre micrometeorológica com 42 metros de altura. Os sensores responsáveis pelas medidas de saldo de radiação (W m^{-2}), radiação solar (W m^{-2}), radiação fotossinteticamente ativa ou PAR ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e umidade (%) estão listados na Tabela 1.

Estes foram conectados a um sistema de aquisição de dados (Datalogger CR10X, Campbell Scientific Instrument, Utah, Inc., USA) programado para realizar leitura das medidas a cada 10 segundos e armazenar uma média a cada 30 minutos. Os dados armazenados no datalogger eram transferidos para um disco rígido de computador.

O registro das medidas diárias de precipitação foi fornecido pela estação meteorológica da Fazenda Continental, localizada a aproximadamente 17 km do local do experimento, por meio de um pluviômetro (Modelo 260-2530, Nova Lynx Corporation, USA) instalado em área de manejo florestal.

Tabela 1-Descrição dos instrumentos e alturas de instalação, utilizados nas medidas de saldo de radiação líquida (R_n), radiação solar (R_g), radiação fotossinteticamente ativa (PAR), umidade do ar, temperatura e velocidade de fricção do ar (u^*).

Variáveis	Instrumentos	Altura (m)
R_g (Wm^{-2})	Piranômetro (LI-200SA Pyranometer Sensor, LI-COR, Inc., USA)	42
PAR ($\mu molm^{-2}s^{-1}$)	Sensor quantum (LI-190SZ Quantum Sensor, LI-COR, Inc., USA)	1, 28, 42
UR (%)	Psicrômetro (HMP45C, Campbell Scientific, Inc., USA)	36, 41
T ($^{\circ}C$)	Termopar	41

Os sensores que mediram os dados de saldo de radiação e fluxo de calor no solo no *ecossistema da Amazônia situado na reserva Jaru* (apresentado na Figura 5b) foram acoplados a um sistema de baixa frequência de aquisição de dados (Datalogger CR10X, Campbell Scientific Instrument, Utah, USA) que armazenava os dados em um módulo de memória a cada 10 min e eram semanalmente transferidos para um disco rígido de computador no laboratório.

Detalhes sobre os sensores e as respectivas alturas de instalação na torre estão apresentados na Tabela 2. O funcionamento dos sensores e o estado de conservação foram observados sempre que eram realizadas as coletas (periodicidade semanal), de forma que constantemente foram efetivados procedimentos de limpeza, troca da sílica e eventuais reparos (AGUIAR, 2013).

Tabela 2-Relação das variáveis, dos instrumentos e das alturas dos instrumentos instalados na torre da REBIO Jaru.

Variáveis	Instrumentos	Altura (m)
Fluxo de calor latente e sensível	IRGA, Li-7500, LI-COR, USA e Solent 1012R2, Gill Instruments, UK	63,4
Saldo de radiação	Saldo radiômetro, NR-Lite, Kipp & Zonen, Delft, NLD	58
Fluxo de calor no solo	Flux plates SH1, Hukseflux, NLD	-0,02

As leituras dos dados da reserva Jaru de alta frequência foram realizadas com uma frequência de 10 Hz e os dados brutos foram armazenados a cada 30 min em um microcomputador (palmtop Ipaq rx1950, HP, USA). Esses dados foram coletados semanalmente por meio da troca de um cartão de memória e processados com a rotina computacional Alteddy 3.3, desenvolvida pelo Instituto Alterra Green World Research da Holanda.

Medidas dos fluxos de calor latente e sensível em ambos os ecossistemas foram determinadas pelo método de covariância de vórtices turbulentos com o emprego de um sistema de medidas de alta frequência dos fluxos de superfície (Figura 5a), composto por um anemômetro sônico tridimensional (Solent 1012R2, Gill Instruments, UK), que mede as três componentes da velocidade do vento e a temperatura do ar e um analisador de gás por infravermelho de caminho aberto (IRGA, Li-7500, LI-COR, USA), que mede as concentrações de vapor de água e dióxido de carbono.

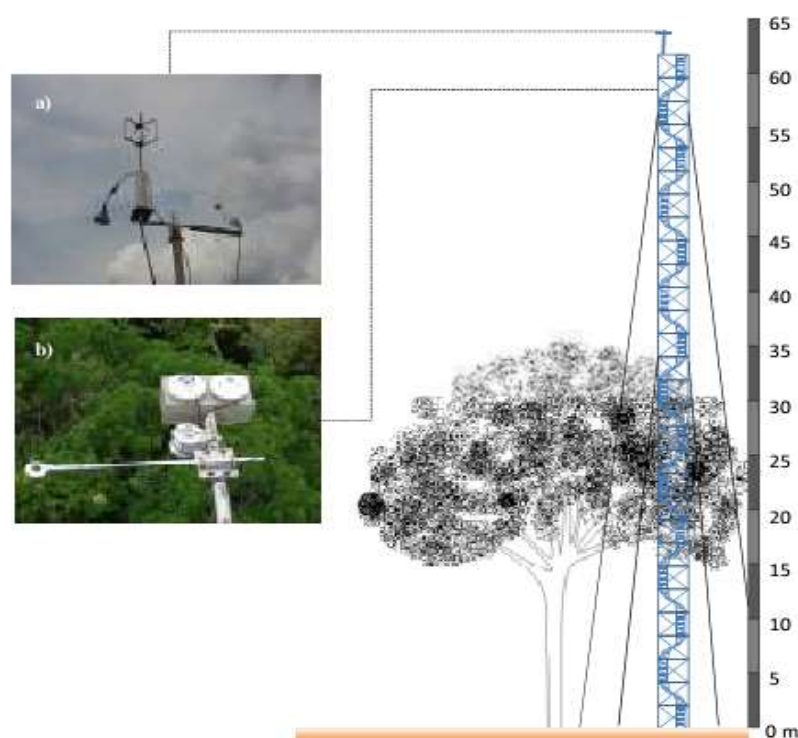


Figura 6 - Disposição dos sensores instalados na torre da REBIO Jaru. a) Anemômetro sônico tridimensional à esquerda e analisador de gás por infravermelho de caminho aberto à direita. b) Sensor do saldo de radiação na ponta da haste à esquerda.

Fonte: Aguiar (2012)

3.2.3 Condutância aerodinâmica

Silva (2010) descreve como foi estimada a condutância aerodinâmica (m s^{-1}) adotando a condição de não neutralidade atmosférica descrita na equação abaixo:

$$C_a = \frac{0,4^2 u^*(z)}{\left[\ln \left(\frac{z-d}{z_0} - \Psi_M \right) \right] \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_0} - \Psi_H \right) \right]}$$

em que, C_a é a condutância aerodinâmica (m s^{-1}), u^* é a velocidade de fricção do ar na altura (z) em que foi mensurado, d é o distanciamento do plano zero parametrizado como 70% da altura do dossel e z_0 é a rugosidade do dossel (m) em que foi adotada a parametrização de 10% da altura do dossel. Foi utilizado ainda o fator de correção para fluxo de momentum (Ψ_M) e fluxo de calor sensível (Ψ_H) em condições de estabilidade e instabilidade.

3.2.4 Condutância de superfície

A condutância de superfície ou estomática (m s^{-1}) é inversamente proporcional a resistência da superfície a difusão do vapor d' água (r_s) conforme Penman Monteith:

$$C_s = (r_s)^{-1} = \left[\frac{\rho_a c_p DPV}{\gamma LE} - \frac{1}{C_a} \left(1 - \frac{\delta H}{\gamma LE} \right)^{-1} \right] \quad (1)$$

O déficit de pressão de vapor (kPa) foi determinado conforme equação:

$$DPV = e_s - e \quad (2)$$

sendo, DPV o déficit de pressão de vapor (kPa), C_s é a condutância de superfície, r_s é a resistência da superfície (m s^{-1}), ρ_a é a densidade do ar ($1,292 \text{ kg m}^{-3}$), c_p é o calor específico do ar úmido ($1013 \text{ J Kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), DPV é o déficit de pressão de vapor (kPa), γ é

a constante psicrométrica ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$), LE é o fluxo de calor latente (W m^{-2}), Ca é a condutância aerodinâmica (m s^{-1}), H é o fluxo de calor sensível (W m^{-2}) e δ é a declividade da curva de pressão de saturação de vapor d'água ($\text{kPa }^\circ\text{C}^{-1}$).

3.2.5 Informação Mútua

Segundo Vidal (2009) o programa (minf), que foi desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Física Ambiental da UFMT, gera informações partindo do número de dados da série e o tempo de defasagem desejado.

Vidal (2012) destaca em seu trabalho que para melhor compreensão do conceito de informação mútua, faz-se necessário entender o conceito de entropia na teoria da informação cujo primeiro trabalho se deve a Shannon. Este mostra que processos aleatórios, tais como a fala ou a música tem uma complexidade abaixo da qual o sinal pode ser comprimido (SHANNON, 1948).

A entropia relativa $D(p:q)$ mede a ineficiência de assumir que uma distribuição é q quando a distribuição verdadeira é p (BARÃO, 2003). Por exemplo, se for conhecida a distribuição verdadeira de uma variável aleatória, pode-se construir um código de comprimento médio $H(p)$. Entretanto, se for usado um código desenhado para uma distribuição q, haveria uma desadequação do código à variável aleatória e seriam necessários $H(p)+D(p:q)$ bits em média para descrever a variável aleatória (VIDAL, 2012).

A entropia relativa entre duas posições p e q é definida por:

$$D(p:q) = \sum_{x \in X} p(x) \log \frac{p(x)}{q(x)} \quad (3)$$

Onde $p(x)$ e $q(x)$ representam as distribuições de probabilidade de p e de q respectivamente e X é a distribuição a que x pertence.

Pode-se definir informação mútua informalmente como uma medida da quantidade de informação que uma variável aleatória contém a respeito de outra

(BARÃO, 2003).

Considerando-se duas variáveis aleatórias x e y com distribuição conjunta $p(x, y)$ e distribuições marginais $p(x)$ e $p(y)$, a informação mútua $I(X, Y)$ é a entropia relativa entre a distribuição conjunta e o produto das marginais. Assim temos:

$$I(X, Y) = \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} p(x, y) \log \frac{p(x, y)}{p(x)p(y)} \quad (4)$$

3.2.6 Construção dos atratores

Segundo Vidal (2012) O primeiro passo para a construção do atrator é identificar o número adequado de variáveis que medem o espaço de fase. Uma maneira conveniente de se fazer isso é desdobrar a série temporal original $X_0(t)$ em defasagens temporais τ múltiplas de um valor de tempo inteiro fixo. Tomando-se N pontos equidistantes a partir de um conjunto de dados, chega-se ao seguinte conjunto de variáveis discretizadas:

$$X_0: X_0(t_1), \dots, X_0(t_n)$$

$$X_1: X_0(t_1 + \tau), \dots, X_0(t_n + \tau)$$

$$X_{n-1}: X_0[t_1 + (n - 1)\tau], \dots, X_0[t_n + (n - 1)\tau] \quad (5)$$

Para uma escolha adequada do tempo de defasagem, espera-se que estas variáveis sejam linearmente independentes e isso é tudo que se faz necessário definir para o espaço de fase. Assim, todas estas variáveis podem ser deduzidas a partir de séries temporais simples pertencentes a $X_0(t)$. Tem-se então informação suficiente para ir além do espaço unidimensional das séries temporais originais.

Esta informação permite que se faça um desenho do sistema ou sua projeção em um subespaço de menor dimensão que o espaço de fase completo.

O próximo objetivo agora é caracterizar a complexidade da dinâmica mais formalmente, utilizando-se de técnicas da teoria de sistemas dinâmicos.

A notação vetorial X_i representa um ponto no espaço de fase cujas coordenadas são $\{X_0(t_i), \dots, X_0[t_i + (n - 1)\tau]\}$. Um ponto de referência X_i é escolhido destes dados

e todas as distâncias $|X_i - X_j|$ dos $N - 1$ pontos restantes são computadas. Isto permite calcular os pontos do conjunto de dados que estão dentro de uma distância r do ponto X_i no espaço de fase. Repetindo o processo para todos os valores de i , chega-se à quantidade expressa pela equação 6:

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^N \theta(r - |X_i - X_j|) \quad (6)$$

onde θ é a função de Heaviside, $\theta(x) = 0$, se $x < 0$ e $\theta(x) = 1$ se $x > 0$. Os valores não-nulos de $C(r)$ medem a extensão em que a presença de um ponto de dados afeta a posição de outros pontos. $C(r)$ pode também ser entendido como uma *função de correlação* integral do atrator (VIDAL,2012).

Suponha que se fixe uma pequena distância ε e se utilize desta para sondar a estrutura do atrator. Se este for uma linha, o número de pontos no interior de uma distância r de um ponto recomendado deve ser proporcional a r/ε . Se tratar-se de uma superfície, este número deve ser proporcional a $(r/\varepsilon)^2$ e se ele tem dimensão d , deve ser proporcional a $(r/\varepsilon)^d$. Então, espera-se que para um r muito pequeno, a variação de $C(r)$ ocorra segundo a equação:

$$C(r) = r^d \quad (7)$$

Em outras palavras, a dimensionalidade do atrator é dado pela inclinação de $\ln C(r)$ versus $\ln r$ em um certo alcance de r . Aplicando o logaritmo neperiano na equação acima, tem-se:

$$\ln C(r) = d \ln r \quad (8)$$

onde a quantidade d é a dimensão de correlação proposta por GRASSBERGER e PROCACCIA (1983).

A dimensão de correlação é muito utilizada para determinar a existência de dinâmica caótica. Caos determinístico é identificado geralmente se a dimensão de

correlação converge para um determinado valor com valores cada vez mais altos da dimensão de imersão (dimensão do espaço de fase).

3.2.7 - Determinação da defasagem pela informação mútua

De cada variável de evapotranspiração, condutância aerodinâmica e condutância de superfície foram obtidas a informação mútua mínima utilizando os dados e número de intervalos igual a 6. O programa utilizado (*minf*), que foi desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Física Ambiental da UFMT, gera informações partindo do número de dados da série e o tempo de defasagem desejado.

3.2.8- Dimensão de correlação

O valor de defasagem temporal obtido pelo programa MINF foi padronizado em 6 dias, devido a grande quantidade de ocorrências, em seguida foram calculados todas as dimensionalidades dos atratores (dimensão de correlação) por meio de um gráfico de $\log C \times \log r$ obtido diretamente pelo programa Heaviside desenvolvido pelo grupo de pesquisa em Física Ambiental da UFMT, com r variando de -2 a 3 de 0,02 em 0,02; totalizando 251 pontos em cada eixo. A dimensionalidade dos atratores é exatamente o maior coeficiente angular obtido em um gráfico de $\log C$ por $\log r$ com n (número de variáveis no espaço de fase) crescente (VIDAL, 2012).

Na figura 7 temos a representação do gráfico de $\log C(r) \times \log r$ (dimensão de correlação) para a variável evapotranspiração na estação úmida da Reserva Jaru em cada valor de dimensão de imersão inteira. Neste trabalho, procura-se verificar se há estabilização ou não da dimensão de correlação em função da dimensão de imersão nas variáveis estudadas de acordo com a estação em função do local.

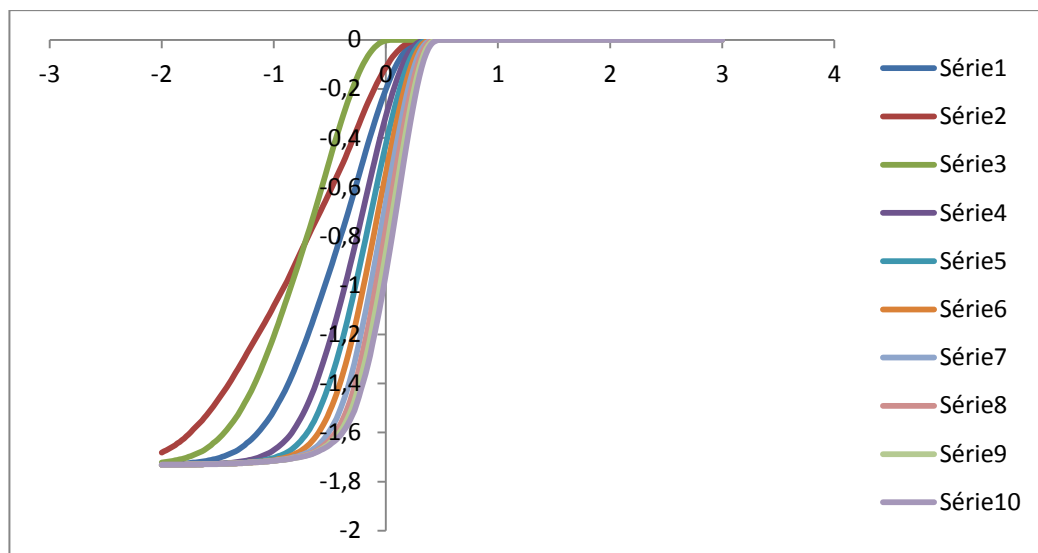


Figura 7- Gráfico de joelhos para a variável evapotranspiração na estação úmida da Reserva Jarú.

4. Resultados e discussões

4.1- Análises dos resultados para região amazônica (Reserva Jaru)

Apresentar-se-ão agora os resultados e as análises dos dados para região amazônica de evapotranspiração, condutância de superfície e condutância aerodinâmica.

4.1.1 - Evapotranspiração

Observa-se pela figura 8 que há estabilização da dimensão de correlação, em torno de 2,6 para uma dimensão de imersão em torno de 11, é interessante observar que essa saturação indica geralmente uma dimensão limítrofe entre a ordem e o caos para uma dimensão de imersão igual a 11. É possível observar no gráfico uma tendência à estabilização da dimensão de correlação no sentido de atingir um patamar horizontal o que indica que a maior parte do comportamento da evapotranspiração pode ser modelada apesar da necessidade de um grande número de variáveis (maior que nove). Na figura 9 exibe-se a reconstrução do atrator para a evapotranspiração na reserva Jaru na estação úmida em um gráfico tridimensional.

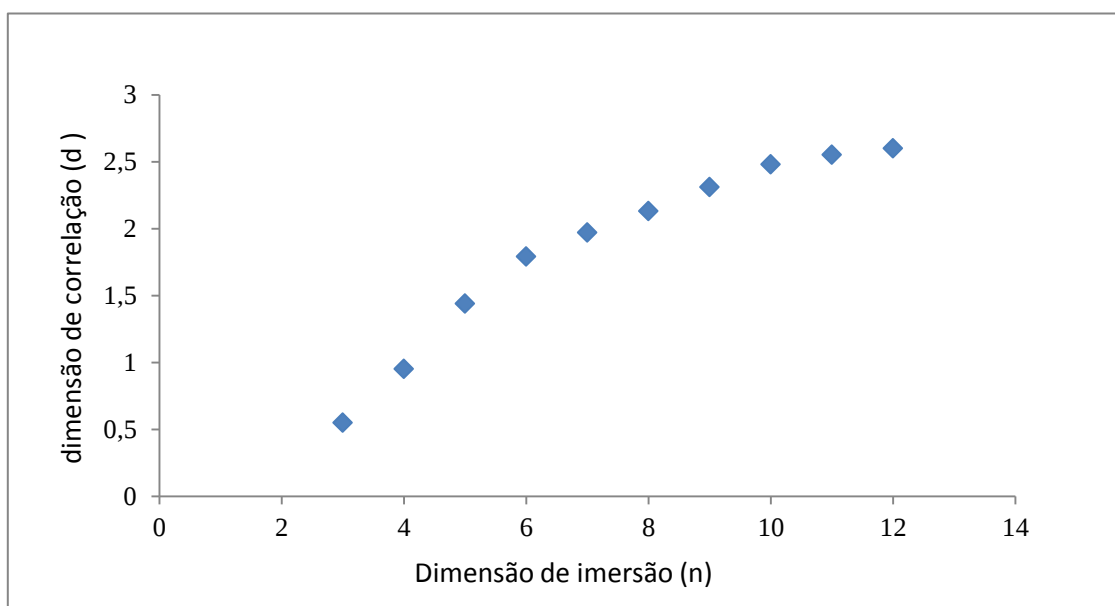


Figura 8 - Dimensão de correlação em função da dimensão de imersão para a variável evapotranspiração na Reserva Jaru na estação úmida.

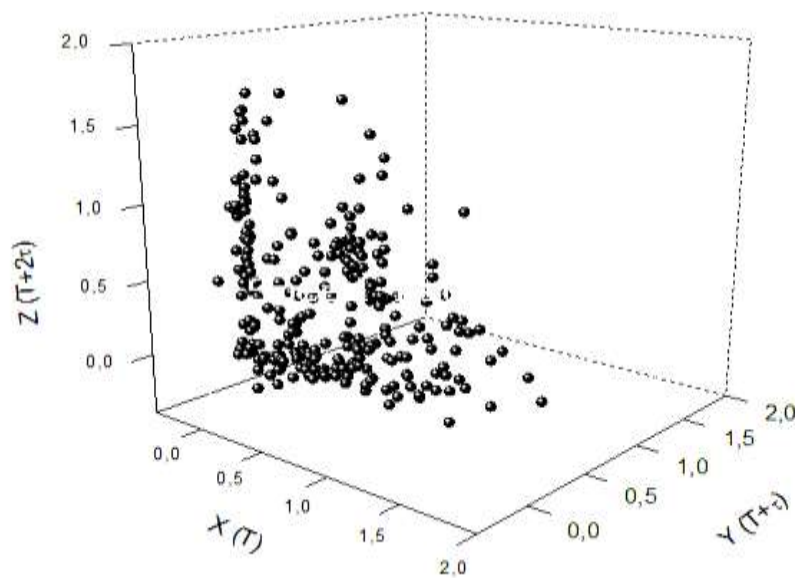


Figura 9-Atrator reconstruído para a variável evapotranspiração na Reserva Jarú na estação úmida.

Na figura 10 há estabilização da dimensão de correlação em 2,5 para uma dimensão de imersão igual a 12 na evapotranspiração na estação intermediária na reserva Jarú. Como a dimensão de correlação obtida é não inteira, o atrator reconstruído num gráfico tridimensional deve ter o perfil estranho e lembrar algo entre um toroide e uma figura tridimensional como sugere de fato a figura 11.

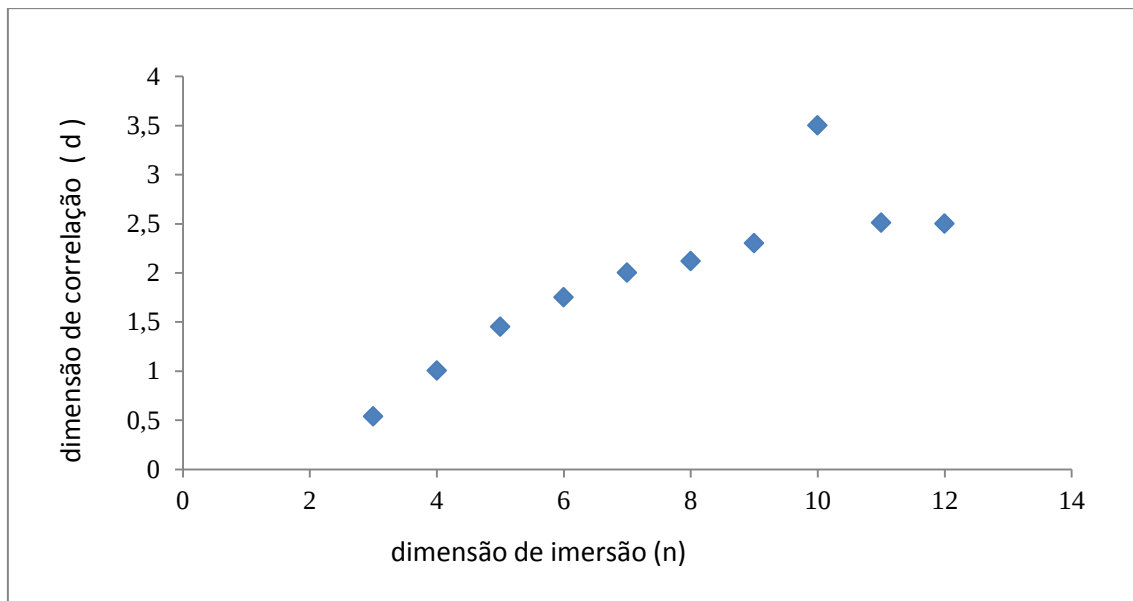


Figura 10 - Dimensão de correlação em função da dimensão de imersão para a variável evapotranspiração na Reserva Jaru na estação intermediária.

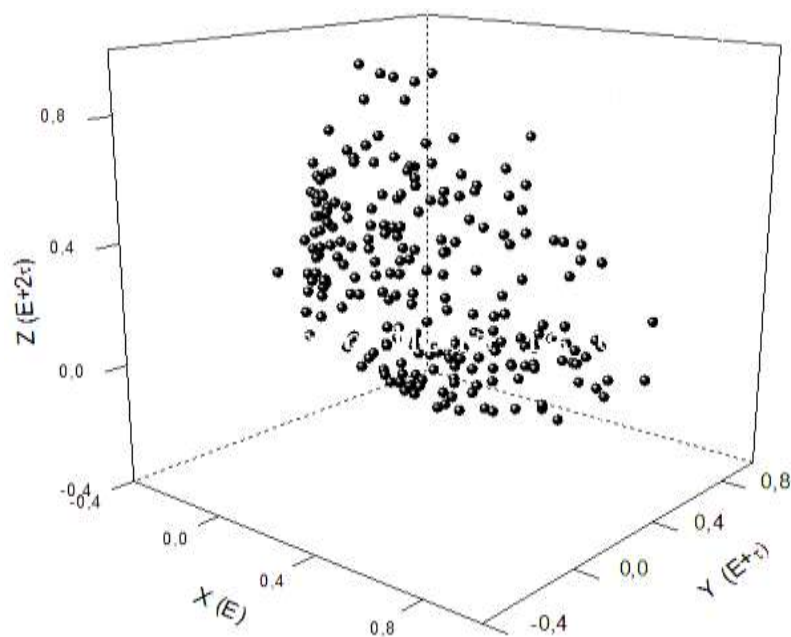


Figura 11 - Atrator reconstruído para a variável evapotranspiração na Reserva Jaru na estação intermediária.

Quando se observa a figura 12, há estabilização da dimensão de correlação em 1,77 - o que indica que o sistema está mais bem comportado (PRIGOGINE, 1989) para uma dimensão de imersão igual a nove na evapotranspiração da reserva Jaru na estação seca. Como a dimensão de correlação obtida é não inteira, mas menor que dois, o

atrator reconstruído num gráfico tridimensional tem o perfil entre o circular e o toroide mostrado na figura 13.

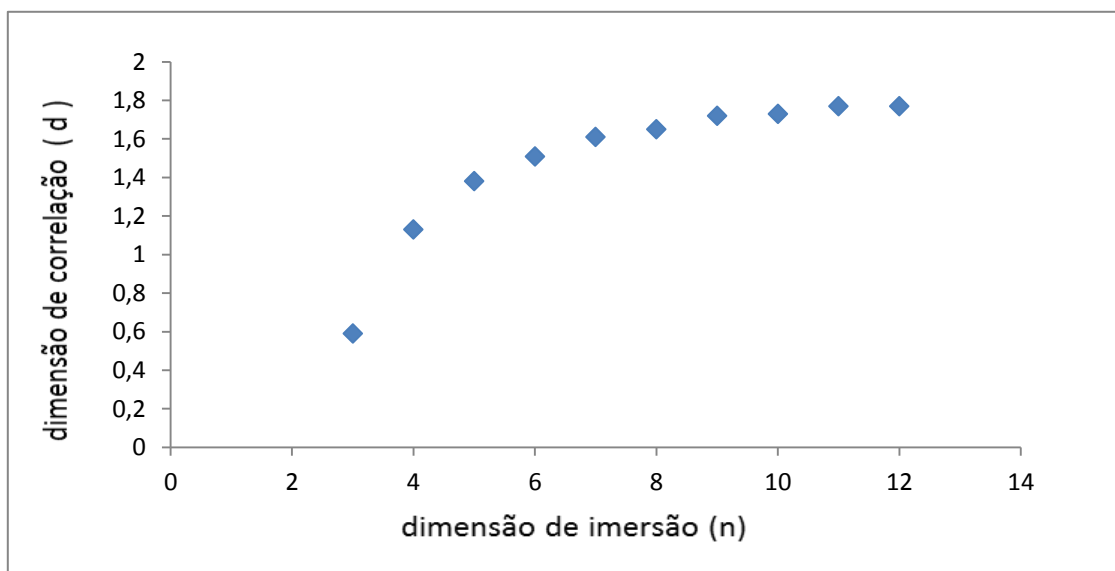


Figura 12 - Dimensão de correlação em função da dimensão de imersão para a variável evapotranspiração na Reserva Jaru na estação seca.

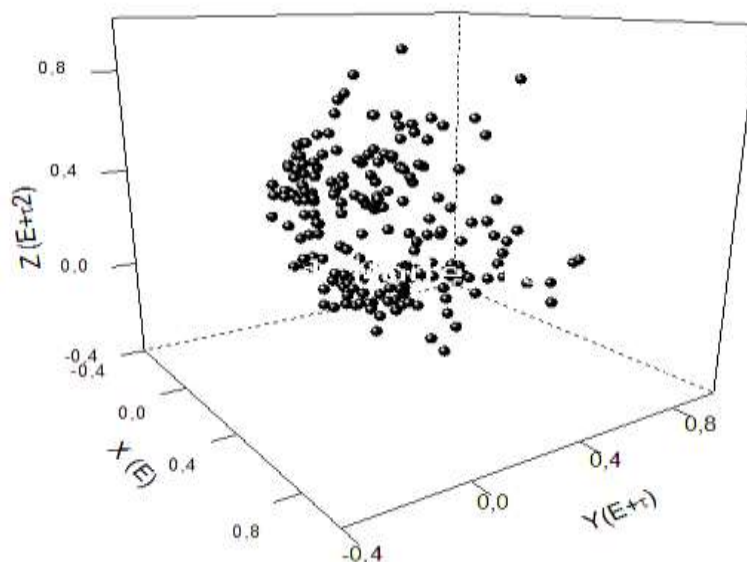


Figura 13 - Atrator reconstruído para a variável evapotranspiração na Reserva Jaru na estação seca.

4.1.2 – Condutância Superficial

Observa-se pela figura 14 que há estabilização da dimensão de correlação em 1,5 para uma dimensão de imersão em torno de 6 na condutância superficial na reserva Jaru na estação úmida. Como a dimensão de correlação obtida é menor que dois, o atrator reconstruído num gráfico tridimensional deve ter o perfil de algo entre um círculo e um toroide como mostra a figura 15.

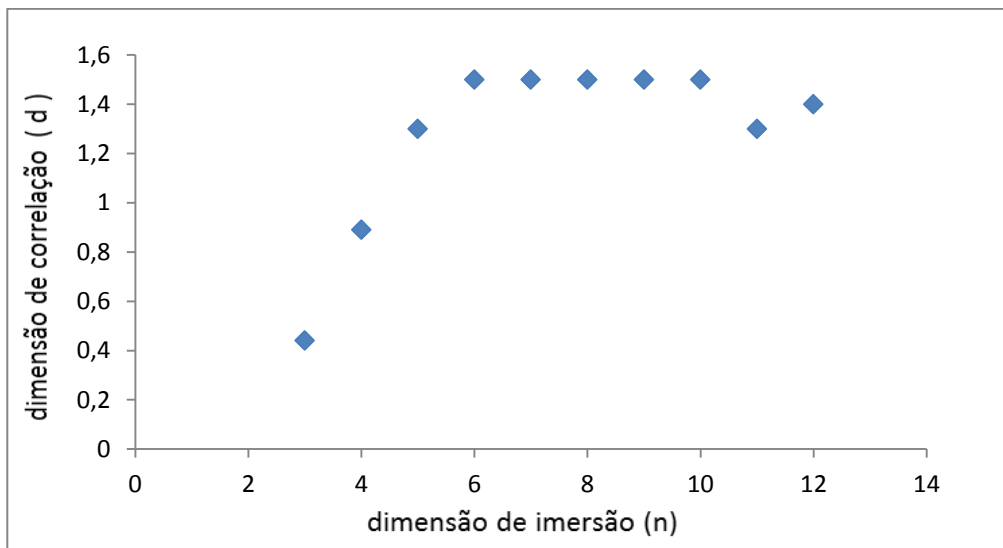


Figura 14 - Dimensão de correlação em função da dimensão de imersão para a variável condutância superficial na Reserva Jaru na estação úmida.

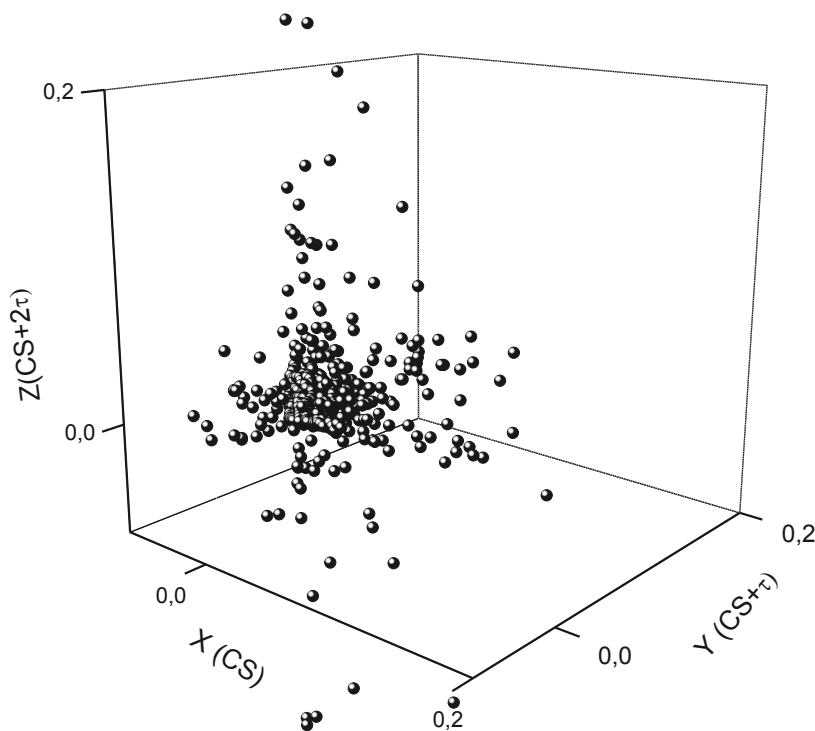


Figura 15 - Atrator reconstruído para a variável condutância superficial na Reserva Jaru na estação úmida.

Na figura 16 há estabilização da dimensão de correlação em 1,3 para uma dimensão de imersão próximo de 8 para variável condutância superficial na reserva Jaru na estação seca. O perfil do atrator é algo entre um círculo e um toroide como mostra a figura 17.

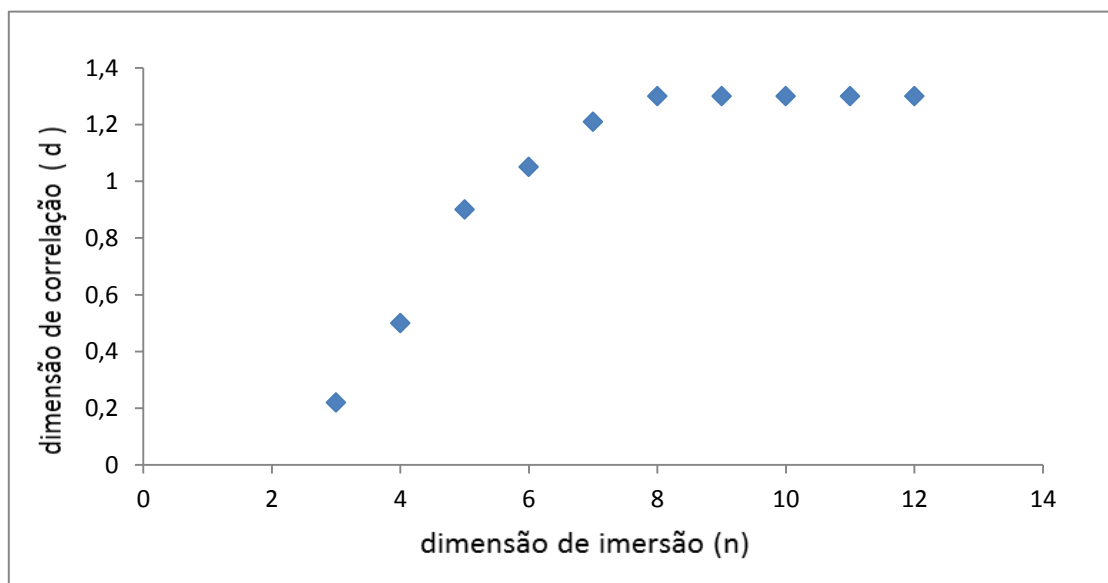


Figura 16 - Dimensão de correlação em função da dimensão de imersão para a variável condutância superficial na Reserva Jaru na estação seca.

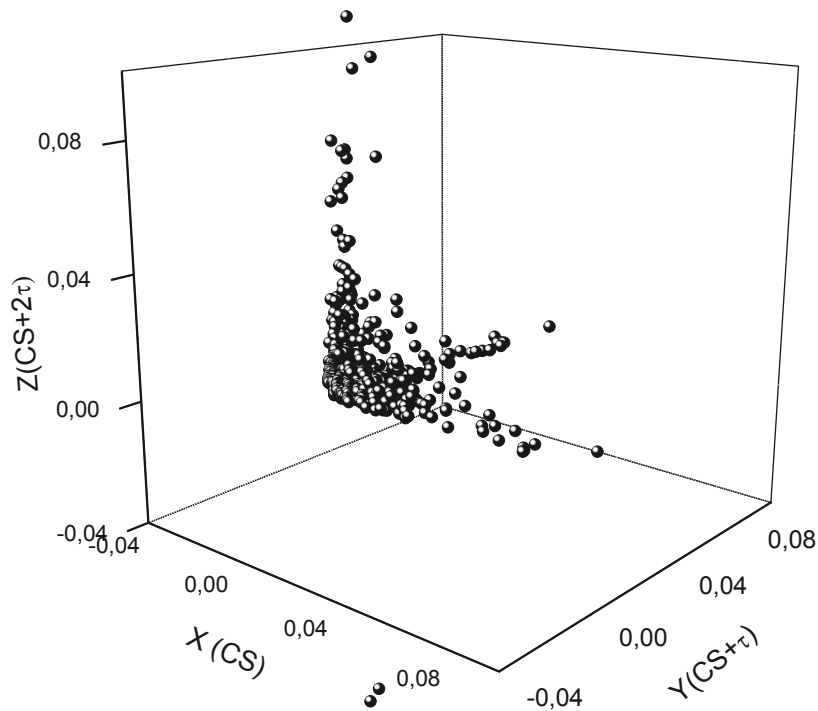


Figura 17 - Atrator reconstruído para a variável condutância superficial na Reserva Jarú na estação seca.

4.1.3 Condutância Aerodinâmica

Na figura 18 o comportamento estocástico se evidencia, o que é esperado em processos aerodinâmicos. Uma possível leitura do quadro que se apresenta seria que o fato dos processos aerodinâmicos terem uma componente estocástica importante não compromete a estabilidade dos processos regulatórios estomáticos. O que se verifica é que em condições em que o vento tenderia a abrir os estômatos à planta consegue mantê-los fechados preservando a integridade morfofisiológica.

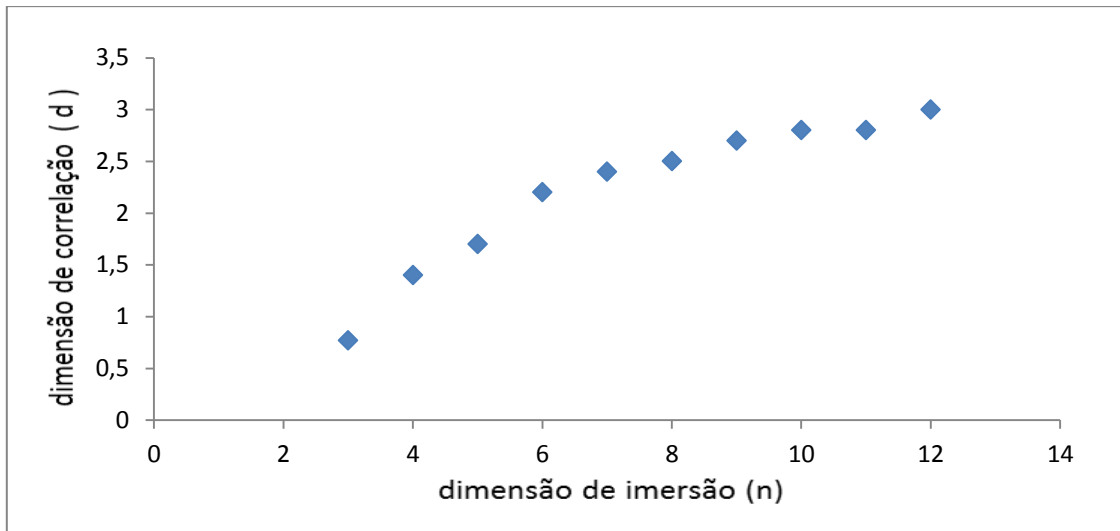


Figura 18 - Dimensão de correlação em função da dimensão de imersão para a variável condutância aerodinâmica na Reserva Jarú na estação úmida.

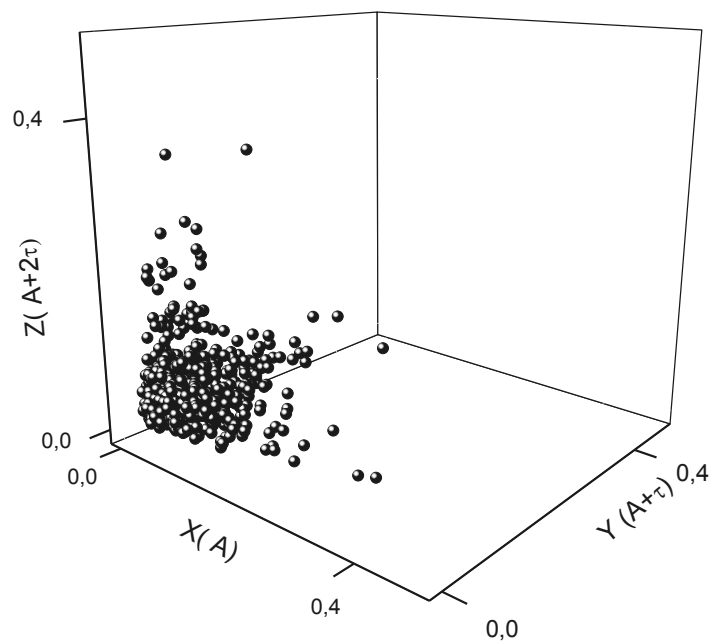


Figura 19 - Atrator reconstruído para a variável condutância aerodinâmica na Reserva Jarú na estação úmida.

Na figura 20, observa-se que há estabilização da dimensão de correlação em 2,8 para uma dimensão de imersão igual a 11 para a condutância aerodinâmica na Reserva Jarú na Estação Seca. Na figura 21, tem-se o perfil do atrator reconstruído que sugere uma região tridimensional.

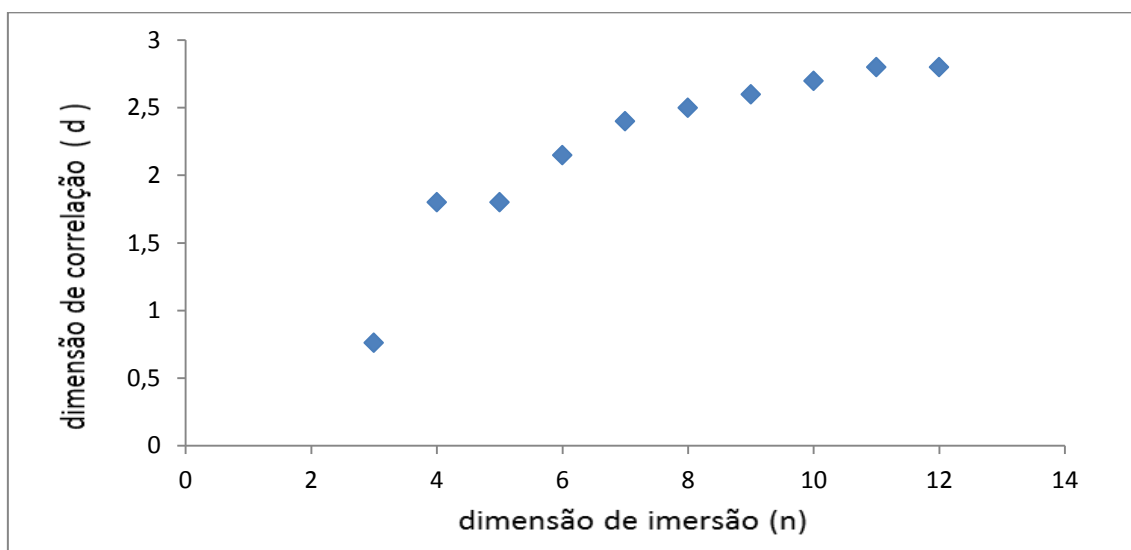


Figura 20 - Dimensão de correlação em função da dimensão de Imersão para a variável condutância aerodinâmica na Reserva Jarú na estação seca.

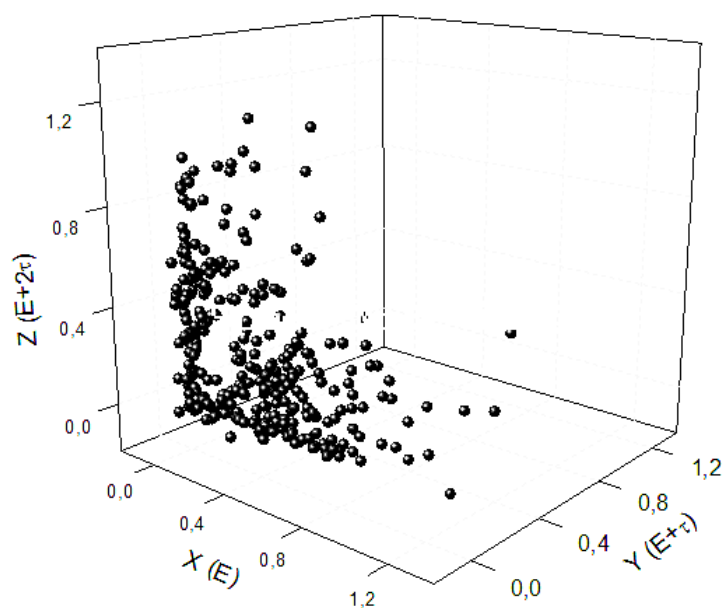


Figura 21 - Atrator reconstruído para a variável condutância aerodinâmica na Reserva Jarú na estação seca.

Observa-se que no atrator da figura 21 existe uma maior densidade de pontos ao longo de duas linhas situadas na parte frontal do atrator. Ambas as linhas contêm dados em que a condutância aerodinâmica é próxima de zero. A organização de pontos ao longo dessas linhas significa que os valores de condutância aerodinâmica próximos de zero são mais prováveis que valores significativamente diferentes de zero e que uma vez

que o valor dessa variável num dado instante de tempo é diferente de zero, no intervalo de 6h (o tempo de defasagem utilizado) ela voltará a ser próximo de zero. Ou seja, a condutância aerodinâmica não se mantém com valores significativamente diferentes de zero por um tempo tão longo quanto 6 horas.

O atrator é oriundo de uma dinâmica fisiológica de ordem próxima a zero e de valor provavelmente fractal, ou seja, existe um estado estacionário estável que se caracteriza como uma tendência, contudo, a dinâmica não é robusta no sentido de que ela é bastante suscetível a perturbações de toda ordem. Nesse trabalho denominamos o atrator com tais características “ouriço tcheco”.

4.2- Análises dos resultados para região de Sinop

4.2.1 - Evapotranspiração

Observa-se pela figura 22 que há estabilização da dimensão de correlação em 2,83 para uma dimensão de imersão igual a 10 na evapotranspiração em Sinop na estação úmida. Como a dimensão de correlação obtida é não inteira, o atrator reconstruído num gráfico tridimensional tem o perfil estranho e quase que tridimensional como sugere a figura 23.

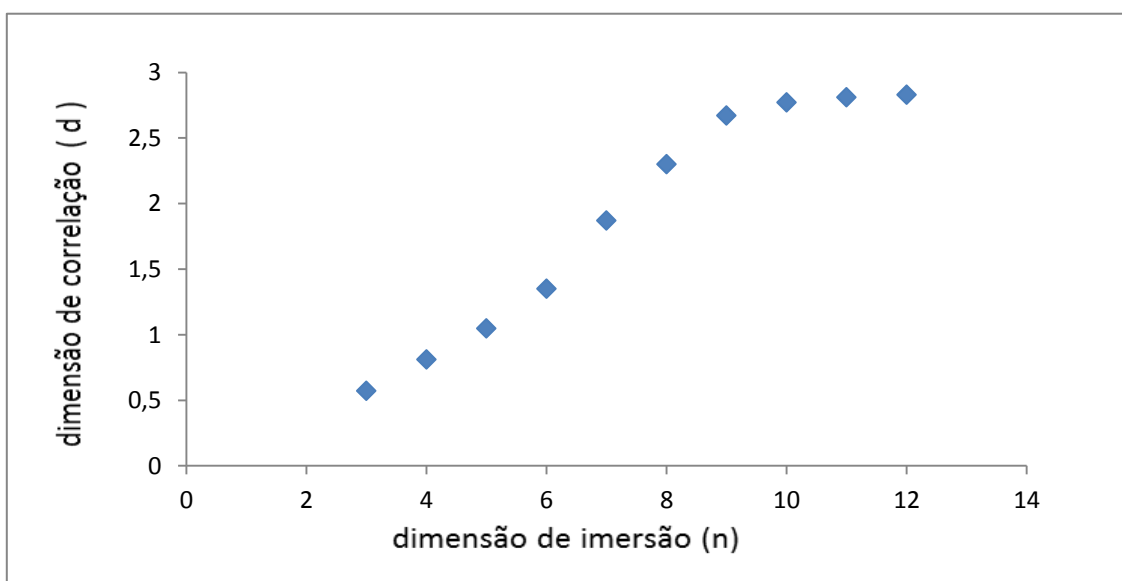


Figura 22 - Dimensão de Correlação em função da Dimensão de Imersão em Sinop para a Variável Evapotranspiração na Estação Úmida.

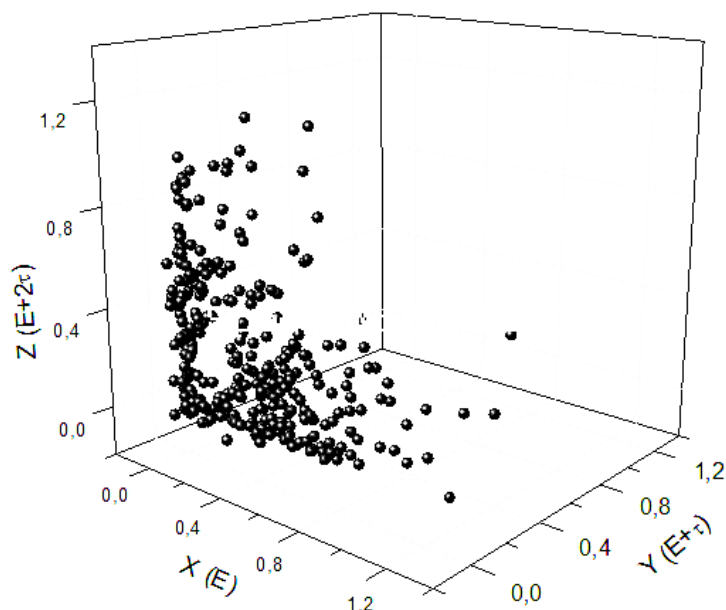


Figura 23 - Atrator Reconstruído para a Variável Evapotranspiração em Sinop na Estação Úmida.

Na figura 24 há estabilização da dimensão de correlação em 2,16 para uma dimensão de imersão em torno de 10. É possível conjecturar que os processos regulatórios na floresta são mais robustos; ou seja, o estresse hídrico é menor durante a estação seca em Sinop. Como a dimensão de correlação obtida é não inteira, o atrator reconstruído num gráfico tridimensional deve ter o perfil estranho como mostra a figura 25.

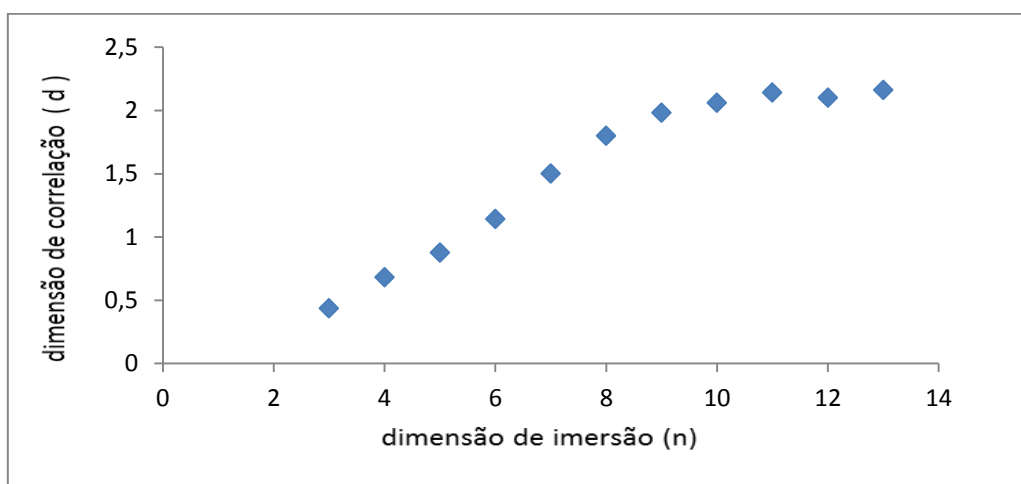


Figura 24 - Dimensão de Correlação em função da Dimensão de Imersão em Sinop para a Variável Evapotranspiração na Estação Seca.

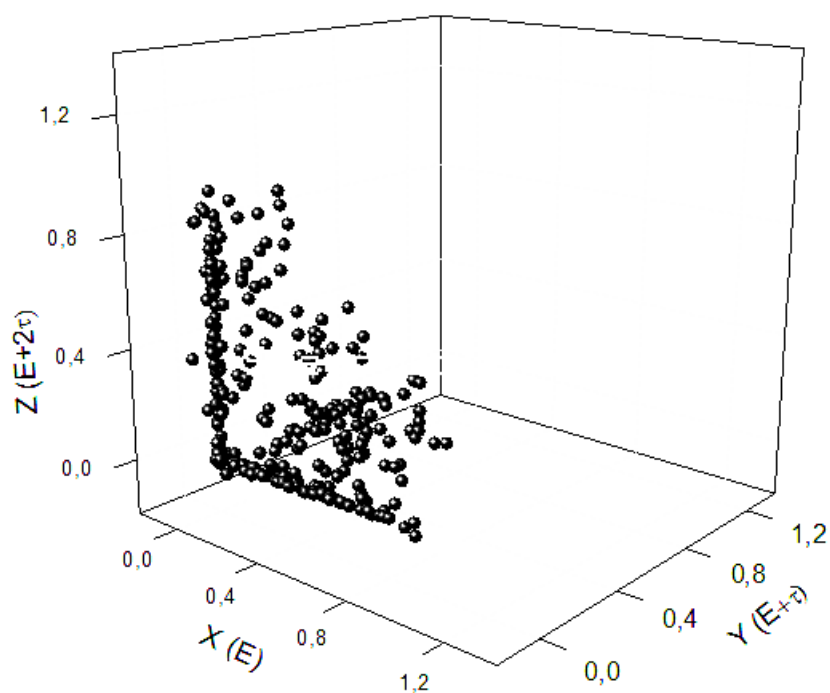


Figura 25 - Atrator Reconstruído para a Variável Evapotranspiração em Sinop na Estação Seca.

4.2.2 – Condutância superficial

Percebe-se pela figura 26 que na condutância superficial em Sinop durante a estação úmida há estabilização da dimensão de correlação em 2,27 para uma dimensão de imersão igual a 10. Isto significa que o atrator reconstruído assemelha-se a um toroide.

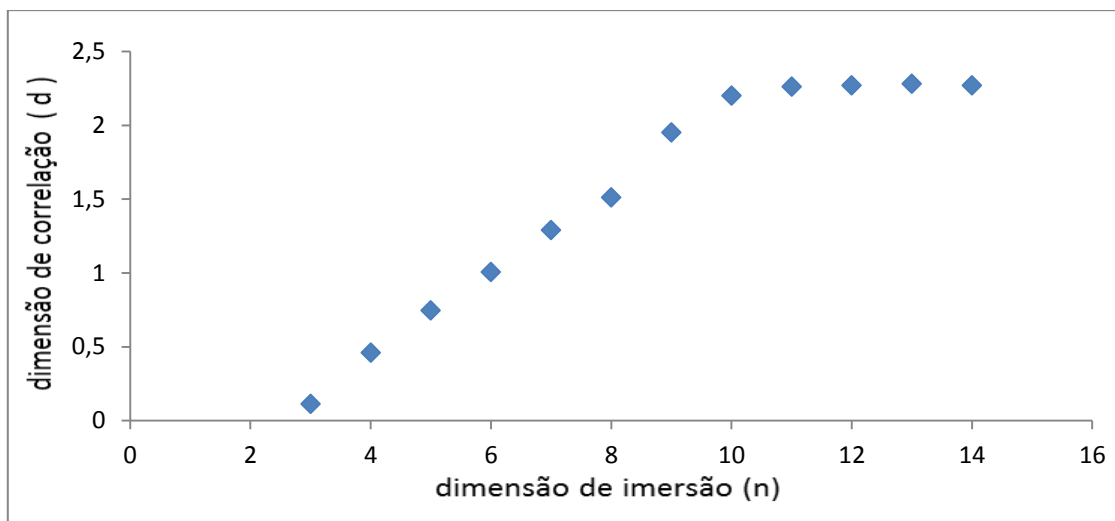


Figura 26 - Dimensão de Correlação em Função da Dimensão de Imersão para a Variável Condutância Superficial em Sinop na Estação Úmida.

Na figura 27 observa-se que a dimensão de correlação estabiliza-se em torno de 0,45 para uma dimensão de imersão igual a nove na condutância superficial de Sinop durante a estação seca. O atrator reconstruído na figura 28 confirma o caráter do atrator tendendo para o pontual.

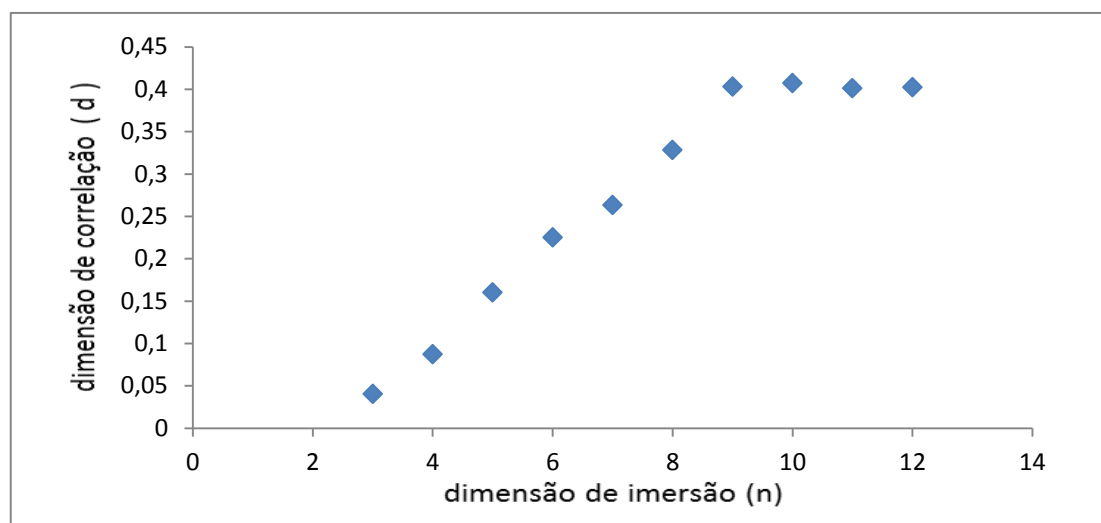


Figura 27 - Dimensão de Correlação em Função da Dimensão de Imersão para a Variável Condutância Superficial em Sinop na Estação Seca.

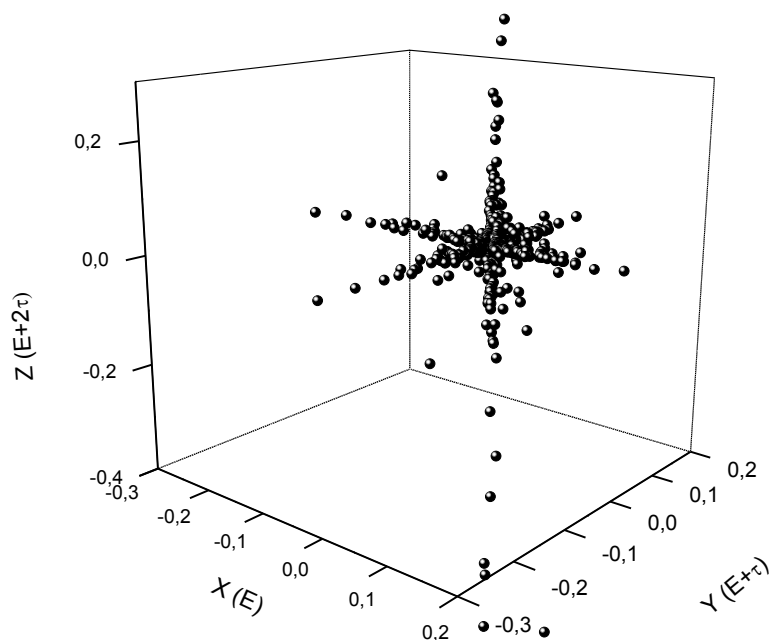


Figura 28 - Dimensão de Correlação em Função da Dimensão de Imersão para a Variável Condutância Superficial em Sinop na Estação Seca.

4.2.4-Condutância aerodinâmica

Observa-se na figura 29 que a dimensão de correlação estabiliza em 3,35 na condutância aerodinâmica em Sinop na estação úmida para uma dimensão de imersão em torno de 8. Então, o atrator reconstruído tem um perfil que assemelha a figura tridimensional como sugere a figura 30.

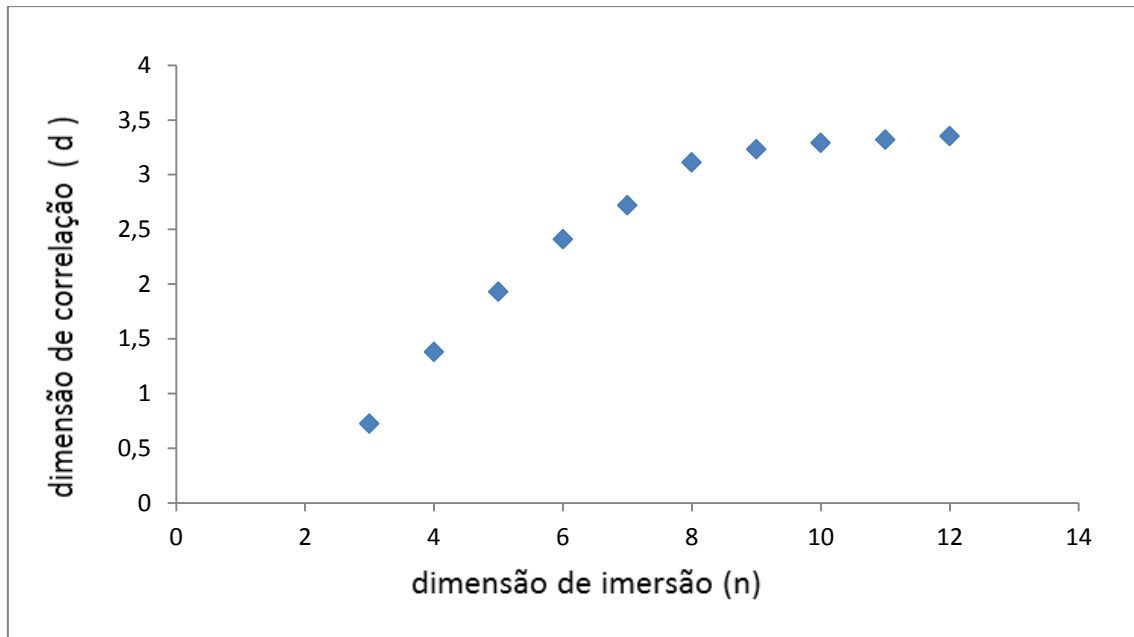


Figura 29 - Dimensão de Correlação em Função da Dimensão de Imersão para a Variável Condutância Aerodinâmica em Sinop na Estação Úmida.

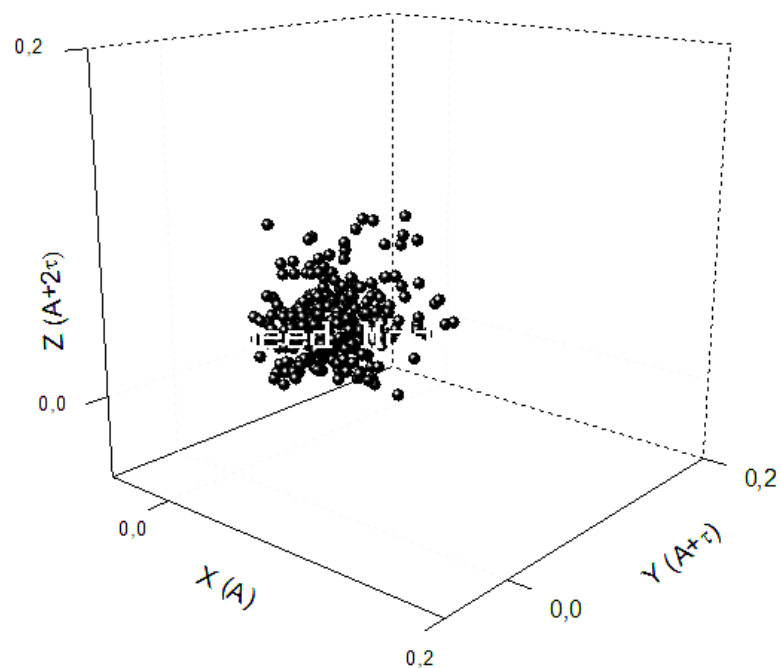


Figura 30 - Atrator Reconstruído para a Variável Condutância Aerodinâmica em Sinop na Estação Úmida.

Na figura 31 percebe-se que há estabilização da dimensão de correlação em 3,5 para uma dimensão de imersão igual a 10 para a condutância aerodinâmica em Sinop na

estação seca. O atrator reconstruído tem um perfil de algo parecido com uma estrutura tridimensional como sugere a figura 32.

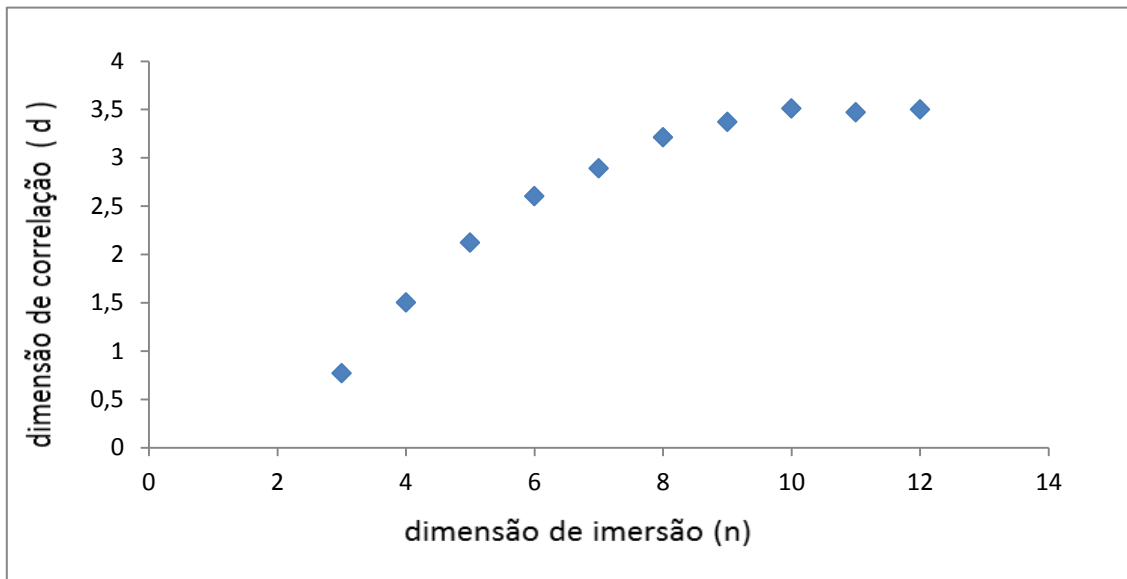


Figura 31 - Dimensão de Correlação em Função da Dimensão de Imersão para a Variável Condutância Aerodinâmica em Sinop na Estação Seca.

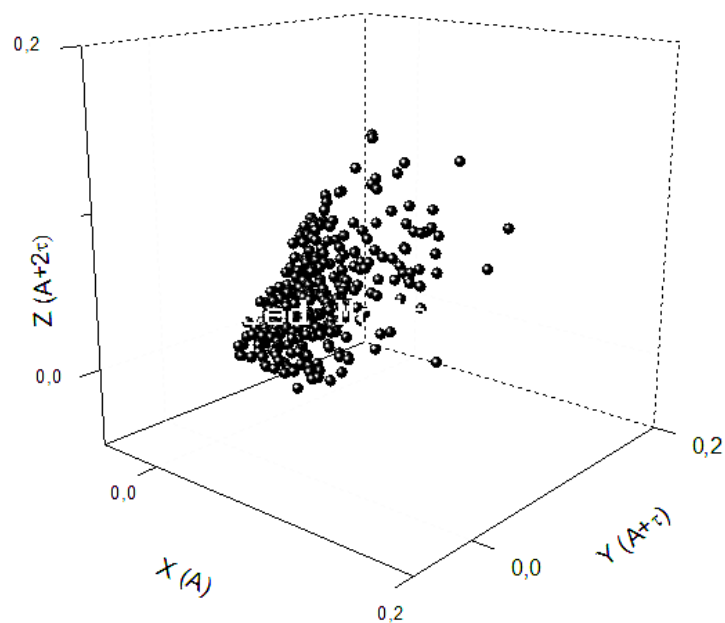


Figura 32 - Atrator Reconstruído para a Variável Condutância Aerodinâmica em Sinop na Estação Seca

As tabelas 9 e 10 resumem os resultados da dimensão de correlação e dimensão de imersão para os dois ecossistemas estudados de acordo com a estação. Assim, podemos visualizar as semelhanças e diferenças para cada um dos ecossistemas.

Tabela 9 - Resumo dos resultados da dimensão de correlação e dimensão de imersão para região do Amazônia (Reserva Jaru).

	n (dimensão de imersão)	d (dimensão de correlação)
Evapotranspiração (úmida)	11	2,6
Evapotranspiração (intermediária- seca-úmida)	11	2,5
Evapotranspiração (seca)	9	1,77
Condutância Superficial (úmida)	6	1,5
Condutância Superficial (Seca)	8	1,3
Condutância Aerodinâmica (úmida)	Não estabiliza	
Condutância Aerodinâmica (seca)	11	2,28

Tabela 3 - Resumo dos resultados da dimensão de correlação e dimensão de imersão para região de Sinop.

	n (dimensão de imersão)	d (dimensão de correção)
Evapotranspiração (úmida)	10	2,83
Evapotranspiração (seca)	10	2,16
Condutância Superficial (úmida)	10	2,27
Condutância Superficial (seca)	9	0,45
Condutância Aerodinâmica (úmida)	8	3,35
Condutância Aerodinâmica (seca)	10	3,5

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para esse trabalho podemos apresentar algumas considerações acerca dos ecossistemas estudados:

Considerando a vegetação como um sistema em busca permanente de estabilidade, pode-se inferir que a partir dos resultados apontados pelos atratores, independente da estação e do ecossistema estudado, configura-se um caráter determinístico às dinâmicas de condutância e evapotranspiração, enquanto as variáveis micrometeorológicas são responsáveis pelo caráter estocástico configurando a dinâmica do sistema.

A maior parte dos atratores obtidos nesse estudo pode ser classificada como estranhos em virtude de sua dimensão de correlação ser fracionária.

Nenhum dos atratores configurou-se como um ciclo, o que leva a crer que todos são fractais próximos de zero. Assim sendo, tem-se um indício de que a dinâmica fisiológica da vegetação ocorre de forma que esta rege a condutância. É possível inferir a partir dos gráficos dos atratores que eles estariam centrados na origem do gráfico, tal dinâmica aconteceria de forma que os estômatos estivessem sempre fechados. Contudo, os valores obtidos da dimensão de correlação não são compatíveis com o que se observa nos gráficos obtidos pelo programa Origin, o que significa que a dinâmica de controle da condutância deve sofrer influência de variáveis microclimatológicas particularmente no sentido de abrir os estômatos.

Ao se comparar uma mesma variável em uma mesma região, percebe-se que geralmente na estação úmida a dimensão de correlação tem valor maior, sendo assim precisamos de um número de variáveis maior para se obter um modelo satisfatório de estudo desse sistema na estação úmida. A exceção fica por conta da comparação entre a condutância aerodinâmica na região de Sinop.

Os resultados das dimensões de correlação foram maiores em Sinop, indicando que o grau de complexidade nesse ecossistema é mais robusto e é necessário um número maior de variáveis para se estabelecer um modelo.

Podemos concluir que o dá estabilidade para os sistema é a vida, esse é um dado que não podemos desconsiderar.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

6.1. BIBLIOGRAFIA CITADA

AGUIAR, R. G. **Balanço de Energia em Ecossistema Amazônico por Modelo de Regressão Robusta com Bootstrape Validação Cruzada**. Cuiabá, 2013, 85 f. Tese (Doutorado em Física Ambiental) - Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

ANDRADE, N. L. R. Fluxo de calor latente em uma floresta tropical da Amazônia: análise de séries temporais com waveletse do produto MOD16. 2013.168 f. Tese (Doutorado em Física Ambiental) – Instituto de Física, UniversidadeFederal de Mato Grosso, Cuiabá, 2013.

ANDREAE, M. O.; ARTAXO, P.; BRANDÃO, C.; CARSWELL, F. E.; CICCIOLI, P.; COSTA, A. L.; CULF, A. D.; ESTEVES, J. L.; GASH, J. H. C.; GRACE, J.; KABAT, P.; LELIEVELD, J.; MALHI, Y.; MANZI, A. O.; MEIXNER, F. X.; NOBRE, A. D.; NOBRE, C.; RUIVO, M. L. P.; SILVA-DIAS, M. A.; STEFANI, P.; VALENTINI, R.; JOUANNE, J.; WATERLOO, M. J. Biogeochemical cycling of carbon, water, energy, trace gases, and aerosols inAmazonia: The LBA-EUSTACH experiments. **Journal of Geophysical Research**. v. 107, p. 33-1 – 33-25, 2002.

BARÃO, M.J.S. **Entropia, Entropia Relativa e Informação Mútua**. Departamento de Informática, Universidade de Évora, 2003.

BOHR, N.D. **Física atômica. Ensaios**. Instituto de Física.UFRJ (2000).

COSTA, M. H.; YANAGI, S. N. M.; SOUZA, P. O. J. P.;RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P. Climate change in Amazonia caused by soybean cropland expansion, as compared to caused by pastureland expansion. **Geophysical Research Letters**, v. 34, p. L07706 1-4, 2007.

CULF, A. D.; FISCH, G.; MALHI, Y.; NOBRE, C. A. The influence of the atmospheric boundary layer on carbon dioxide concentrations over a tropical forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 85, p. 149-58, 1997.

CAPRA, F. – **A teia da vida – uma nova compreensão científica dos sistemas vivos**. São Paulo. Ed. Cultrix. 1996. 258f.

FELFILI, J. M.; NOGUEIRA, P. E.; SILVA JÚNIOR, M. C.; MARINON, B. S.; DELITI, W. B. C. Composição florística e fitossociologia do cerrado restrito do município de Água Boa, MT. **Acta Botânica Brasílica**, v. 16, p. 103-112, 2002.

GOMES, J. B. **Conversão de florestas tropicais em sistemas pecuários na Amazônia**: quais são as implicações no microclima da região? 2011. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Rondônia-Campus de Ji-Paraná, Ji-Paraná, 2011.

GRASSBERGER, P.; PROCACCIA, I. **Characterization of Strange Attractors**, Physical Review letters, v.50, n.5, p. 346 349, 1983.

HODNETT, M. G.; OYAMA, M. D.; TOMASELLA, J. **Comparisons of long-term soil water storage behaviour under pasture and forest in three areas of Amazonia**. In: Gash, J. H. C.; Nobre, C. A.; Roberts, J. M.; Victoria, R. L. *Amazonian Deforestation and Climate*. Chichester: John Wiley, 1996a. p. 57-78.

IBAMA. **Plano de prevenção e combate aos incêndios florestais na reserva biológica do Jarú** (2006-2007). Ji-Paraná, 2006. 16 p.

IÓSIFOVICH, A. I. (2003). *Caos y Auto organización*. Editorial URSS. Moscou.

KUHN, T. S. - **A Estrutura das Revoluções Científicas**. Editora Perspectiva. 1962.

MANDELBROT, B. **The Fractal Geometry of Nature**, W.H. Freeman and Co. New York (1983).

MASSONI, N. T. – **Ilya Prigogine: uma contribuição à filosofia da ciência**. Física na Escola, v. 30, n. 2, f. 2308. 2008.

MÉIO, B. B.; FREITAS, C. V.; JATOBÁ, L.; SILVA, M. E. F.; RIBEIRO, J. F.; HENRIQUES, R. P. B.; Influência da flora das florestas Amazônica e Atlântica na vegetação do cerrado sensu stricto. Revista Brasileira de Botânica, v.26, p.437-444, 2003.

MENDES, R.V. **Medidas de Complexidade e Auto-Organização**, Universidade Técnica de Lisboa, pg. 3 – 14 1998.

MOREIRA, I.C –**Complexidade e Caos** – Editora UFRJ/COPEA. 2008.

MOTTA, P. E. F.; CARVALHO-FILHO, A.; KER, J. C.; PEREIRA, N. R.; CARVALHO, JR. W. E.; BLANCANEUX, P. Relações solo-superfície geomórfica evolução da paisagem em área do Planalto Central Brasileiro. **Pesquisa Agropecuária brasileira**, v. 37, p. 869-878, 2002.

NICOLIS, G.; PRIGOGINE, I. – Exploring Complexity – W.H. Freeman, New York, 1989.

NICOLIS, C.; NICOLIS, G. Is there a climatic attractor? 1984.

NICOLIS, G. E NICOLIS, C. , **Fundamentos de Sistemas Complexos** Cingapura: World Scientific (2009).

NUSSENZVEIG, H.M. **Complexidade e Caos** .3.ed. Editora UFRJ/COPEA, 2008.

OISHI, A.C., OREN, R., STOY, P.C. Estimating components of forest evapotranspiration: a footprint approach for scaling sap flux measurements. **Agricultural and Forest Meteorology** 148, 1719–1732., 2008.

PAULO, S. R. ; PAULO, I. J. C. ; RINALDI, C. - . **Bases conceituais e filosóficas**

para uma proposta de reestruturação curricular da Educação em Ciências no Ensino Médio. Grupo de Pesquisa em Ensino de Física – IF – UFMT. 2006 (Artigo Científico em Preparação).

PEREIRA, A. R., ANGELOCCI, L.R., SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas.** Guaíba: Livraria e Editora Agropecuária, 2002. 478p.

PEREIRA, P. S. F. S. **Plantio de Quatro Espécies Leguminosas Arbóreas em uma área de Cerrado no Distrito Federal, Brasil.** 68 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 1997.

PRIGOGINE, I – **As leis do caos.** São Paulo. Editora UNESP. 1996. 202f.

_____. – **O fim das certezas: tempo, caos e as leis da natureza.** São Paulo. Editora UNESP. 2002. 114f.

QUESADA, C. A.; LLOYD, J.; ANDERSON, L. O.; FYLLAS, N. M.; SCHWARZ, M.; CZIMCZIK, C. I. **Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites.** Biogeosciences, v. 8, p. 1415-40, 2011.

REICHARDT, K. 1940 – **Solo, planta, atmosfera: conceitos, processos e aplicações/** Klaus Reichardt, Luís Carlos Timm – Barueri, SP Manole 2004.

SÁ, L.D.A.; VISWANADHAM, Y.; MANZI, A.O. Energy flux partitioning over the Amazon Forest. **Theoretical and Applied Climatology**, v.39, p.1-16, 1988.

RODRIGUES, T.R. **Análise de parâmetros biofísicos que controlam o fluxo de calor latente em área de Cerrado Campo Sujo.** 2014. 94p. Tese (Doutorado em Física Ambiental), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2014.

RUMMEL, U.; AMMANN, C.; GUT, A.; MEIXNER, F. X.; ANDREAE, M. O. **Eddy covariance measurements of nitric oxide flux within an Amazonian rain forest.** Journal of Geophysical Research, v. 107, p. 17-1 – 17-9, 2002.

SAVI, M.A. **Caos e Complexidade: O Filme da Vida**. Almanaque Reflexivo:—Uma Visão Cognitiva de Mundo a Partir do que Sabemos Sobre Neurônios e Linfócitos. Editora Fiocruz, 2007.

SHANNON, C. E. **A Mathematical Theory of Communication**. The Bell System Technical. Journal, 27:279–423, 623–656, 1948.

STANHILL, O. **The water flux in temperate forests: precipitation and evapotranspiration**. In: **Analysis of Temperate Forest Ecosystems**. Springer-Verlag, Berlin, 1973. p. 242-255.

SILVA, L. B. **Componentes da dinâmica de CO₂ em floresta semidecídua no norte de Mato Grosso**. Cuiabá, 2010. 74 f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

SOUZA-FILHO, J. D. C.; RIBEIRO, A.; COSTA, M. H.; COHEN, J. C. P. Mecanismos de controle da variação sazonal da transpiração de uma floresta tropical no nordeste da Amazônia. **Acta Amazônica**, vol. 35, p. 223-229, 2005.

SUN, L, WU, G – **Influence of land evapotranspiration on climate variation**. Science in China Series D: Earth Sciences, 2001 – Springer.

TAVARES, A. S. **Física Ambiental e teoria da complexidade: inserção de tópicos essenciais da teoria da complexidade no ensino médio – a viabilidade de uma proposta**. Cuiabá – MT. 113f. (Mestrado em Física Ambiental), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

THORNTHWAITE, C.W., 1944. On evapotranspiration. In: Wilm, H.G. (Ed.), **Report of the Committee on Transpiration and Evaporation**, 1943–44. Transactions of the American Geophysical Union, vol. 25, pp. 686–693.

THORNTON, S. T; MARION, J.B. **Dinâmica clássica de partículas de sistemas**. São Paulo : Cengage Learning, 2011.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4 ed. Porto Alegre: Ed. UFRGS. 2004. 158 p.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Editora Pax, 2ª versão digital, Recife, 2006.

VIDAL, L. A. **Análise de Séries Meteorológicas de Altitude na Grande Cuiabá com Métodos da Teoria da Complexidade**. Cuiabá, 2012. P. Tese (Doutorado) –Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso.

VOURLITIS, G. L.; NOGUEIRA, J. S.; PRIANTE-FILHO, N.; HOEGER, W.; RAITER, F.; BIUDES, M. S.; ARRUDA, J. C.; CAPISTRANO, V. B.; FARIA, J. L. B.; LOBO, F. A. The sensitivity of diel CO₂ and H₂O vapor exchange of a tropical transitional forest to seasonal variation in meteorology and water availability, **Earth Interact**, v. 9, p. 1 -13 , 2005.

VIDAL, L. A. **Estudo da Dinâmica de Variáveis Microclimatológicas da Estação Meteorológica de Superfície do Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Cuiabá**. Cuiabá, 2009. 79f. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

WALDROP, M. M. – **Complexity, the Emerging Science at the Edge of Order and Chaos** – Touchstone, New York, 1992.

WEBLER, A. D.; AGUIAR, R. G.; AGUIAR, L. J. G. Características da precipitação em área de floresta primária e área de pastagem no Estado de Rondônia. **Revista Ciência e Natura**, v. esp, p. 55-8, 2007.

WEBER, R. O.; TALKNER, P.; STEFANICKI, G.; ARVISAIS, L. **Search for Finite Dimensional Atracttors in Atmospheric Turbulence**. Boudary-Layer Meteorology, v.73, 1995.

WILLIAMS, D.G., CABLE, W., HULTIN, K., HOEDJES, J.C.B., YEPEZ, E.A., SIMONNEAUX, V., ER-RAKI, S., BOULET, G., DE BRUIN, H.A.R., CHEHBOUNI, A., HARTOGENSIS, O.K., TIMOUK, F. Evapotranspiration components determined by stable isotope, sap flow and eddy covariance techniques. **Agricultural and Forest Meteorology** 125, 241–258., 2004.

6.2. BIBLIOGRFIA CONSULTADA

ALMEIDA, R. M. C. – **A Ciência da Complexidade**. Física na Escola, v. 6, n. 1, f. 48-53. 2005.

AMAKU,M; MORALES,M; HORODYNSKI, L.B; PASCHOLATI, P.R. **Fractais no Laboratório Didático**.Revista Brasileira de Ensino de Física,São Paulo,v.23.n 4,Nov.2001.

FIEDLER-FERRARA JUNIOR, N -. **O pensar complexo: construção de um novo paradigma**. In: XV Simpósio Nacional de Ensino de Física, 2003, Curitiba. Atas do XV Encontro Nacional de Ensino de Física, 2003. p. 69-81.

GLEICK, J. – **Caos: a criação de uma nova ciência**. Rio de Janeiro. Ed. Elsevier / Campus. 1989. 316f.

GLEICK, J. **Chaos: Making a new science**. Viking, New York, N.Y., U.S.A, 1987.

LOVELOCK, J – **Gaia: cura para um planeta doente**. São Paulo. Ed. Cultrix. 2006. 194f.

LOVELOCK, J. – **The Ages of Gaia** – W.W.Norton, New York, 2010.

LORENZ, E. N. **Dimension of weather and climate attractors**. Nature 353, 241–244. 1991.

LORENZ, E. N. **Dimension of Weather and Climate Attactors**, Institute for nonlinear science, University of California, San Diego, USA. Nature, 1991.

KOKUBUN, F. - **Complexidade versus Simplicidade na Física**. Rev. Eletrônica Mestrado em Educação Ambiental. v. especial, f. 110-117. 2004.

KURTZ DOS SANTOS, A. C. - **Algumas idéias sobre universo, vida e complexidade**. Revista Eletrônica Espaço Acadêmico, Maringá, v. 33, f. 1-9, 2004.

MARGULIS, LYNN E DORION SAGAN, **microcosmos**, Summit, Nova York, 1995.

NOGUEIRA, M. C. J. A.; NOGUEIRA, J. S. – **Diretrizes para elaboração de dissertações e teses no programa de pós-graduação em física ambiental**. Cuiabá. UFMT. 2008

OTT, E. **Chaos in dynamics system**. New York: 1ª ed. Cambridge Press, 385p.1993.

PAULO, I. J. C.; PAULO, S. R. ; JORGE NETO, M. . **Introdução à teoria da complexidade**. 1. ed. Cuiabá: Universidade Aberta do Brasil, 2012. v. 1. 73p.

PEREIRA, ANTONIO ROBERTO – **Evapotranspiração/** Antônio Roberto Pereira, Nilson Augusto Villa Nova, Gilberto Chohak Sediya – Piracicaba: FEALQ, 1997.

PESSOA JR., O. - **Auto-Organização e Complexidade: Uma Introdução Histórica e Crítica**. Universidade Federal da Bahia/Universidade Estadual de Feira 78de Santana. Salvador. 2001. Disponível em <http://www.fflch.usp.br/df/opessoa/AO&C-tex.pdf>

SAVI, M. A. **Caos em Sistemas Mecânicos**. Série Arquimedes – Volume 1, p.1-27,2002. Ed. J.M. Balthazar, M. Boaventura, G.N. Silva, M. Tsuchida. SBMAC – Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional.

SILVEIRA, F.L. - **Determinismo, previsibilidade e caos**. Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, v.10, n.2: f.137-147, ago.1993.

STEWART, I. **Será que Deus joga dados?: A nova matemática do caos**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1991. P. 336. Coleção ciência e cultura.

VOURLITIS, G. L; PRIANTE FILHO, N.; HAYASHI, M. M.; NOGUEIRA, J. S.de; CASEIRO, F.; CAMPELO JR., J. H. **Seasonal variations in evapotranspiration of a**

transitional tropical Forest of Mato Grosso, Brazil. Water Resources Research, Vol. 38, n° 6, p. 30-1 - 30-11. 2002.

WEBER, R. O.; TALKNER, P.; STEFANICKI, G.; ARVISAIS, L. Search for Finite **Dimensional Atracttors in Atmospheric Turbulence.** Boudary-Layer Meteorology, v.73, 1995.

W. WEAVER, **Science and complexity.** American Scientist, 36: 536-544, 1948. A classic article by an influential 20th century scientists/mathematician, on why science should focus on complex systems.