

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATOGROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**Desenvolvimento de uma metodologia para a obtenção de
informações sobre o saldo de radiação a partir da
temperatura do ar em ecossistemas naturais.**

MARCOS FERNANDO DO PRADO

Prof. Dr. SÉRGIO ROBERTO DE PAULO
Orientador

Cuiabá, MT, março de 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATOGROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**Desenvolvimento de uma metodologia para a obtenção de
informações sobre o saldo de radiação a partir da
temperatura do ar em ecossistemas naturais.**

MARCOS FERNANDO DO PRADO

Prof. Dr. SÉRGIO ROBERTO DE PAULO
Orientador

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

Cuiabá, MT, março de 2017

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

P896d PRADO, Marcos Fernando do.

Desenvolvimento de uma metodologia para a obtenção de informações sobre o saldo de radiação a partir da temperatura do ar em ecossistemas naturais / Marcos Fernando do PRADO. -- 2017

87 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Sérgio Roberto de Paulo.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2017.

Inclui bibliografia.

1. Atrator reconstruído. 2. Teorema de Takens. 3. Rotação do espaço de fases. 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: DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA A
OBTENÇÃO DE INFORMAÇÕES SOBRE O SALDO DE
RADIÇÃO A PARTIR DA TEMPERATURA DO AR EM
ECOSSISTEMAS NATURAIS**

AUTOR: MARCOS FERNANDO DO PRADO

Tese de Doutorado defendida e aprovada em 10 de março de 2017, pela comissão julgadora:


Prof. Dr. Sérgio Roberto de Paulo
Orientador
Instituto de Física - UFMT


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


Prof. Dr. Thiago Rangel Rodrigues
Examinador Interno
Programa Nacional de Pós Doutorado PNPd/CAPES


Prof. Dr. Lúcio Ângelo Vidal
Examinador Externo
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Mato Grosso – IFMT


Prof. Dr. Jonathan Willian Zangeski Novais
Examinador Externo
Universidade de Cuiabá - UNIC

AGRADECIMENTOS

Em minha caminhada, durante essa trajetória acadêmica de formação profissional, estive cercado de pessoas que direta ou indiretamente contribuiriam para o sucesso do meu objetivo. E eu não conseguiria se caminhasse sozinho. Essa conquista não é só minha, sou apenas o representante. E quero agradecer a todas essas pessoas, quero que se sintam abraçados.

À minha mãe Fátima Prado pelo exemplo de pessoa batalhadora e vencedora. E Pela sólida formação dada até à minha juventude, que me proporcionou a continuidade nos estudos até aqui.

Ao meu orientador prof. Dr. Sérgio Roberto de Paulo por acreditar e apostar em meu potencial desde a época de graduação. Pelo suporte que me deste sempre com muita calma e sabedoria.

Ao prof. Dr. José de Souza Nogueira (Paraná) pelo excelente trabalho à frente da coordenação do programa de Pós-graduação em Física Ambiental e pelo incentivo à pesquisa. E particularmente, por sempre com toda sua experiência aconselhar os mais novos no caminho da pesquisa e do profissionalismo.

Aos meus professores de ensino médio e de graduação em licenciatura plena em física que me deram uma boa base para que pudesse sempre assimilar tudo que viesse pela frente.

Aos professores da Física Ambiental por transmitirem seus conhecimentos me proporcionando habilidades suficientes para desenvolver esta pesquisa.

A todos meus amigos acadêmicos que compartilhamos conhecimento e grandes momentos.

À minha irmã Emily Prado pelo apoio e parceria em toda nossa vida e também pela felicidade de me fazer titio.

A duas antigas e importantes amigas, Dayra Cabral e Sheila Guarda, por terem me incentivado a estudar firme e também à Mainara Gouveia por compartilhar e me ajudar em boa parte desta caminhada.

Ao amigo Fernando Sallo, por ter me ajudado em parte deste trabalho.

A todos os funcionários do programa de pós-graduação (PGFA).

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

DEDICATÓRIA

Dedico esta tese de doutorado em memória do meu primo Clodoaldo Edvirges Duarte. Meu maior inspirador a seguir os passos da mesma profissão, minha grande referência pessoal e profissional. À você, meu grande amigo, dedico não apenas esta tese, mas também o sucesso desta longa caminhada acadêmica em física.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	i
DEDICATÓRIA	ii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 - Problemática.....	1
1.2 - Justificativa	2
1.3 - Objetivos	3
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1 - Sistemas Dinâmicos	4
2.2 - O Teorema de Takens	13
2.3 - Teoria da complexidade	15
2.4 - Ciências da biosfera e atmosfera.....	17
2.4 - As Florestas	28
3. MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1 - Área de estudo.....	34
3.2 - Instrumentos de aquisição dos dados	35
3.3 - Métodos.....	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1 - Atratores Reconstruídos Rotacionados	44
4.2 - Comparações entre as séries temporais T_z rotacionada em 250° e R_n . Para a estação seca.	49
4.3 - Modelo “ R_nM ” para Período Seco.	55
4.4 - Comparações entre as séries temporais T_z rotacionada em 250° e R_n , para a estação chuvosa.	61

4.5 - Modelo para Período Chuvoso.....	64
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Trajetória do pêndulo no espaço de fase.	8
Figura 2: Retrato de fases de um pêndulo não-linear, com diferentes energias em seu estado inicial.....	9
Figura 3: Representação do espaço de fases enrolado, do pêndulo ideal.....	10
Figura 4: Representação do espaço de fases enrolado e dobrado em forma de “U”, do pêndulo ideal.	11
Figura 5: figura representativa dos quatro tipos de atratores.	12
Figura 6: Perfil vertical do comportamento da temperatura e pressão na atmosfera. 22	
Figura 7: Representação de uma onda eletromagnética.	24
Figura 8: Espectro eletromagnético.	25
Figura 9: Representação esquemática do fluxo da radiação na atmosfera.	27
Figura 10: Classificação e distribuição geográfica dos tipos de florestas terrestre... 29	
Figura 11: Representação espacial da abrangência dos biomas no Brasil.	31
Figura 12: Os domínios morfoclimáticos do Brasil.	32
Figura 13: Mapa representando a região da Amazônia legal.	34
Figura 14: Foto da torre com os equipamentos de coleta de dados.	36
Figura 15: Séries temporais da temperatura do ar em (°C) do mês de janeiro (a) e junho (b) de 2000.	39
Figura 16: Séries temporais de radiação líquida em (W/m ²) do mês de janeiro (a) e junho (b) de 2000.	40
Figura 17: Séries temporais de Temperatura do ar em (°C) do mês de janeiro (a) e junho (b). Também da variável radiação líquida em (W/m ²) do mês de janeiro (c) e junho (d). Ambos de 2002.....	41
Figura 18: Perfil das séries temporais da temperatura do ar em (°C) dos dois primeiros dias do mês de janeiro (a) e junho (b) de 2000.....	42
Figura 19: Perfil das séries temporais da radiação líquida em (W/m ²) dos dois primeiros dias do mês de janeiro (a) e junho (b) de 2000.....	43
Figura 20: Perfil da temperatura do eixo y (a) e z (b) após rotação de 30° mantendo eixo x fixo.	44

Figura 21: Perfil da temperatura dos eixos x (a) e y (b) após rotação de 30° mantendo eixo z fixo.....	45
Figura 22: Perfil da temperatura dos eixos z após rotação de 240° (a) e y após rotação de 330°(b), mantendo eixo x fixo.....	46
Figura 23: Perfil da temperatura do eixo z após rotação de 230° (a) e 245° (b), mantendo eixo x fixo.....	47
Figura 24: Perfil da temperatura do eixo z após rotação de 250° (a), 255° (b) e 260° (c), mantendo eixo x fixo.	48
Figura 25: Perfil das variáveis Rn e Tz, normalizadas e emparelhadas. Junho de 2000 (a) e junho de 2002 (b).	50
Figura 26: Correlação cruzada entre radiação líquida e T _z rotacionado em 250°.....	51
Figura 27: Perfil das variáveis Rn com defasagem de 5 horas e T _z (a) e Rn com defasagem de 1,5 h e T _z (b), normalizadas e emparelhadas. Junho de 2000.	52
Figura 28: Regressão linear entre T _z e Rn com defasagem de cinco horas para o intervalo de 6h até as 13h (a) e entre para o intervalo de 13h até as 21h (b). Junho de 2000.....	53
Figura 29: Regressão linear entre Tz e Rn com defasagem de uma hora e meia para o intervalo de 13h até as 21h. Junho de 2000.	54
Figura 30: Perfil das variáveis Rn e RnM, emparelhadas. Junho de 2000 (a) e junho de 2002 (b).	55
Figura 31: Regressão linear entre RnM e Rn para junho de 2000 (a) e junho de 2002 (b).	56
Figura 32: <i>Box plot</i> entre as séries Rn e RnM, junho de 2000.....	57
Figura 33: Regressão linear para o período diurno entre RnM e Rn para junho de 2000 (a) e junho de 2002 (b).	59
Figura 34: <i>Box plot</i> do período diurno entre as séries Rn e RnM, junho de 2000.	59
Figura 35: <i>Box plot</i> do período diurno entre as séries Rn e RnM, junho de 2002.	60
Figura 36: Perfil das duas variáveis Rn e T _z , normalizadas e emparelhadas. Janeiro de 2000 (a) e janeiro de 2002 (b).	62
Figura 37: Correlação cruzada entre radiação líquida e T _z rotacionado em 250°, para a estação chuvosa.	63
Figura 38: Perfil das duas variáveis Rn e T _z normalizadas e emparelhadas. Rn com defasagem de 5 horas (a) e defasagem de uma hora e meia (b).	63

Figura 39: Perfil das variáveis Rn e RnM emparelhadas. Janeiro de 2000 (a) e janeiro de 2002 (b).	64
Figura 40: Regressão linear entre Rn e RnM para janeiro do ano de 2000.	65
Figura 41: Box plot das séries Rn e RnM para janeiro de 2000.	65
Figura 42: Regressão linear entre Rn e RnM, para o período diurno de janeiro de 2000.....	66
Figura 43: <i>Box plot</i> de Rn e RnM, para o período diurno de janeiro de 2000.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais componentes gasosos, fixos e variáveis, da atmosfera terrestre.	20
---	----

RESUMO

PRADO, M, F. Desenvolvimento de uma metodologia para a obtenção de informações sobre o saldo de radiação a partir da temperatura do ar em ecossistemas naturais. Cuiabá, 2017. 87f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso.

Este trabalho tem por objetivo simular informações da variável de saldo de radiação líquida (R_n) a partir de dados de temperatura do ar (T), combinando o teorema de Takens (1981) com a técnica de rotação do espaço de fase de tempos defasados. Os resultados estatísticos obtidos neste trabalho indicaram que a técnica de rotação do espaço de tempos defasados apresenta grande potencialidade na simulação de informação de uma variável micrometeorológica a partir das medidas de outra, com grande precisão para a estação seca, enquanto na estação chuvosa o modelo não teve bons resultados. E concluiu-se que o Teorema de Takens é válido no que diz respeito à reconstrução da relação entre tais variáveis.

Palavras chave: Atrator reconstruído, Teorema de Takens, Rotação do espaço de fases

ABSTRACT

PRADO, M, F. **Development of a method to get information on net radiation of the air temperature in natural ecosystems**. Cuiabá, 2017. 87f. (Doctoral Thesis) – Programa de Pós-graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso.

By using data of climatological variables, this study aims to extract net radiation (R_n) information from air temperature data (T), combining the Takens Theorem (1981) with the technique of rotation of the time-lagged space. The results of this study indicate that the rotation technique shows great potential in extracting information from a micrometeorological variable from other data measures, for the dry season. For the wet season, the procedure did not present good results. Therefore, Takens Theorem is valid concerning the reconstruction of the relationship between these variables.

Keywords: Reconstructed Attractor, Takens Theorem, Time Lag Space Rotation

1. INTRODUÇÃO

1.1 - Problemática

Desde o início do Século XX a sociedade já começava demonstrar certa preocupação com o meio ambiente, devido a séculos de exploração dos recursos naturais do planeta e às implicações que a vida do homem moderno poderia causar ao meio ambiente. Mas somente a partir da década de 1970 houve realizações de diversas conferências e foram assinados vários acordos visando à conservação do meio ambiente.

Neste contexto de preocupação com o meio ambiente, as florestas merecem atenção especial devido à sua fragilidade e suscetibilidade às alterações de temperatura do planeta, também pela à devastação que causamos ao longo dos séculos pela exploração de recursos de toda sua biodiversidade e pelas transformações das áreas de florestas em pastos, plantações e cidades. As florestas tropicais trocam grandes quantidades de água e energia com a atmosfera. Sendo a floresta amazônica e o Cerrado, considerados importantes ecossistemas para o controle do clima local e regional da região Norte e Centro oeste do Brasil.

E entender toda essa dinâmica das interações entre as florestas, o meio ambiente e as ações antrópicas é uma tarefa complexa e multidisciplinar. Requer vários equipamentos eletrônicos com diferentes tipos de sensores para a captação dos dados das variáveis físicas ambientais e assim como uso de muitas ferramentas de análise de dados. O grupo de pesquisadores do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental (PGFA) da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) com intuito de entender a dinâmica de ecossistema, instalou algumas estações meteorológicas nos diferentes biomas existentes no Estado.

Uma dessas estações foi instalada em uma floresta de transição Amazônia-Cerrado ao norte do estado, pertencente ao município de Sinop. Essa estação meteorológica abriga vários tipos de equipamentos e sensores diferentes que são usados para captar e coletar as informações das variáveis microclimáticas do local estudado.

Essas informações são armazenadas em um equipamento eletrônico chamado *datalogger*. E os dados são descarregados para um computador portátil quando o pesquisador visita a estação e conecta seu computador ao *datalogger*. Somente a partir de então os pesquisadores tem acesso aos dados, podendo analisar se houve um bom ou mau funcionamento dos equipamentos. Sendo comum a ocorrência de perdas de dados de alguns sensores por mau funcionamento do equipamento, causando lacunas na série temporal de algumas variáveis.

1.2 - Justificativa

E em posse dos dados empíricos é necessário ferramentas teóricas para fazer a análise dos dados. Nesse âmbito, sabendo que o sistema biosfera-atmosfera se trata de um sistema aberto, ou seja, há troca de massa e energia entre o meio externo e que é um sistema complexo que obedece a leis não lineares, parte desses pesquisadores usam ferramentas da teoria da complexidade para desenvolver suas pesquisas e analisar os dados coletados.

Os resultados dos estudos anteriores desse grupo de pesquisa indicaram que de todas as variáveis medidas pela estação a variável mais bem comportada, isto é, com comportamento menos caótico que as demais e por consequência, mais fácil de ser modelada, é a variável temperatura do ar (T). Também se constatou que a temperatura do ar é a variável que mais guarda informações sobre a dinâmica do sistema.

Outra informação valiosa para esse trabalho é o teorema de Takens, que diz que é possível a partir de uma única variável se gerar um atrator que seja topologicamente correspondente ao atrator do sistema todo. Este atrator gerado por apenas uma variável é denominado de atrator reconstruído.

A partir da reflexão de todas essas questões que surgiu a ideia de utilizar a variável Temperatura do ar, gerar os atratores reconstruídos e aplicar rotações de matrizes. Para, a partir dessas rotações, extrair uma série temporal que conseguir simular dados de outra variável acoplada ao sistema.

A Utilização desse modelo gerado poderá servir para preenchimento de falhas em séries de dados, quando o sensor da variável R_n estiver com mau funcionamento ou até mesmo na falta deste equipamento de medida.

1.3 - Objetivos

O objetivo principal deste trabalho consiste em aplicar as ferramentas, rotação e análise do espaço de fases, da teoria da complexidade em dados reais de variáveis micro climatológicas para elaborar um método que consiga simular informações de uma variável a partir de dados reais de outra variável, neste caso em específico, simular dados de Radiação Líquida (R_n) a partir da variável Temperatura do ar (T) no topo da floresta.

Os objetivos específicos:

- Aplicar a técnica da rotação de matrizes para dados defasados no tempo de séries temporais da temperatura do ar;
- Verificar se a rotação dos dados defasados de temperatura gera séries temporais cujo perfil se assemelha ao do saldo de radiação líquida;
- Encontrar o ângulo de rotação que proporciona melhor ajuste entre os dados de temperatura rotacionados e dados de R_n medidos;
- Averiguar quantitativamente o grau de confiabilidade do processo de obtenção de valores numéricos de R_n a partir da técnica desenvolvida neste trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 - Sistemas Dinâmicos

Segundo Monteiro (2011) um sistema pode ser definido como um conjunto de objetos agrupados por alguma interação ou interdependência, de modo que existam relações de causa e efeito nos fenômenos que ocorrem com elementos desse conjunto. E quando algumas das grandezas que caracterizam o sistema variam no tempo denominamos como sistema dinâmico.

Os sistemas possuem grandezas físicas que podem ser classificadas como variáveis independentes, isto é, as variáveis que evoluem livremente sem depender de outra variável. As variáveis dependentes, ou seja, variáveis que tem sua função dependente de outra variável. E os parâmetros, que são grandezas que influenciam o comportamento do sistema, mas seus valores independem das variáveis do sistema (MONTEIRO, 2011).

O estudo de sistemas dinâmicos envolve a modelagem matemática, a análise e a simulação de sistemas físicos. Vários tipos de modelos podem ser construídos e usados para se estudar a evolução temporal de um sistema. Para isso é necessário observar algumas características para classificá-los.

Dois tipos principais de sistemas dinâmicos são encontrados em aplicações: aqueles nos quais a variável tempo é contínua ($t \in \mathbb{R}$) e aqueles nos quais a variável tempo é discreta ($t \in N$) (PAIVA NETO, 2004).

Quando o tempo é discreto, o sistema dinâmico pode ser representado como a iteração de uma função, isto é

$$x_{t+1} = f(x_t), t \in N \quad \text{equação 1}$$

E quando o tempo é contínuo, o sistema dinâmico é descrito por uma equação diferencial.

$$\frac{dx}{dt} = \dot{x} = f(x, t) \quad \text{equação 2}$$

Quanto aos parâmetros do modelo, um sistema pode ser de parâmetros fixos ou variáveis. Num sistema de parâmetros fixos, os coeficientes $a_j(t)$ são constantes. Assim o tempo só pode aparecer explicitamente na função de entrada $F(t)$. Num sistema de parâmetros variáveis, um ou mais coeficientes $a_j(t)$ são funções explícitas do tempo.

Os parâmetros podem ser concentrados ou distribuídos. Nos modelos a parâmetros concentrados as variações espaciais são desprezadas. Enquanto nos modelos a parâmetros distribuídos variações espaciais são consideradas no comportamento das variáveis. Eles são descritos por um número infinito de equações ordinárias ou por equações diferenciais parciais. Todo sistema real é distribuído.

Um sistema pode ser considerado instantâneo ou dinâmico. Num sistema instantâneo, ou sem memória, a resposta num dado instante depende apenas da excitação nesse momento. Enquanto um sistema dinâmico, com memória, a resposta num dado instante depende dos valores das entradas passadas.

2.1.1 - Não linearidade

O modelo de um sistema pode ser linear ou não linear. Um sistema é denominado linear se puder ser escrito como uma equação de diferença linear, ou seja, combinação linear dos termos. Ou por equação diferencial com combinação linear dos termos.

Para sistemas lineares se aplica o princípio da aditividade e o princípio da proporcionalidade entre excitação e resposta. Esses dois princípios quando combinados é definido como princípio da superposição de efeitos. Enquanto para sistemas não lineares esses princípios, em geral, não se aplicam. Segundo Nicolis e Prigogine (1998), em um sistema linear, o efeito final da ação combinada de duas causas diferentes é simplesmente a superposição dos efeitos de cada causa, individualmente consideradas.

As características básicas de sistemas dinâmicos não lineares são a sensibilidade às condições iniciais e à variação de seus parâmetros. Haja vista que uma pequena variação no parâmetro do sistema pode dar início a uma mudança inesperada e súbita no comportamento qualitativo do sistema, muitas vezes para um comportamento bastante caótico (SAVI, 2002).

Sistemas dinâmicos não lineares podem ter o tempo explícito nas equações ou implícito, dando-lhe o nome de não-autônomo e autônomo, respectivamente (OLIVEIRA, 2006).

2.1.2 - Espaço de fases

Segundo Monteiro (2011), existem três técnicas para se investigar os comportamentos de um sistema dinâmico. E todas elas têm sua vantagem e desvantagem. A técnica analítica integra analiticamente as equações, determinando a solução em termos de fórmulas gerais. A técnica numérica integra numericamente as equações, calculando valores para as variáveis dependentes em pontos pré-selecionados da variável independente. E a técnica qualitativa, através de cálculos analíticos relativamente simples, dá pistas de como o sistema evolui. Essa técnica usa a descrição das variáveis de estado e seus resultados são representados no espaço de estados, ou espaço de fases.

Espaço de fases é um espaço abstrato representado por vetores, $x_1(t)$, $x_2(t)$, ..., $x_n(t)$. Pode ter um número arbitrário de dimensões, cujos eixos coordenados são os eixos X_1 , X_2 , ..., X_n . E é caracterizado pelo número de variáveis independentes do sistema (SAVI, 2002).

Um dos maiores matemáticos da idade moderna, o francês Jules Henri Poincaré, introduziu novas técnicas para lidar com as equações diferenciais não lineares. Percebeu que as propriedades qualitativas das soluções podiam ser investigadas, sem que tais soluções precisassem ser determinadas explicitamente. Assim, em vez de procurar fórmulas, ele partiu para uma abordagem que descreve as características da topologia do espaço de fases (OLIVEIRA, 2006).

O recurso da análise topológica do espaço de fase é muito usado na ciência para se estudar a evolução temporal de um sistema. Pois a topologia é uma geometria não

euclidiana, na qual todos os comprimentos, ângulos e áreas podem ser distorcidos à vontade (GLEICK, 1990).

Um único ponto no espaço fase define um estado potencial do sistema no instante t . Chama-se retrato de fases um conjunto de curvas obtidas pela evolução do sistema a partir de um conjunto de condições iniciais (MONTEIRO, 2011).

A evolução temporal do sistema é determinada pelas n equações diferenciais de primeira ordem:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_n, t) \\ \frac{dx_2}{dt} &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_n, t) \\ &\vdots \\ \frac{dx_n}{dt} &= f_n(x_1, x_2, \dots, x_n, t) \end{aligned} \tag{equação 3}$$

As variáveis dependentes x_j são chamadas de variáveis de estado. As funções f_j definem o campo vetorial, ou campo de velocidade do sistema, pois a velocidade instantânea do é dada por $d\vec{x}/dt = \vec{f}$. A dimensão do espaço de fases equivale ao número de equações de primeira ordem necessária para descrever o sistema, que é igual ao número de variáveis de estado (MONTEIRO, 2011).

Um exemplo comum e bastante usado para demonstração sobre o recurso de espaço de fases é o do movimento harmônico simples (MHS) de um pêndulo. Devido ao atrito ser desprezado nesse exemplo o sistema é considerado conservativo, pois não há dissipação de energia do sistema. A energia total do sistema é dada pela função hamiltoniana (H) e é escrita da forma:

$$H = ml \left[\frac{1}{2} l \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + g(1 - \cos\theta) \right] \tag{equação 4}$$

sendo m é a massa do objeto, l é comprimento do braço do pêndulo e θ o ângulo formado entre a normal no ponto de equilíbrio do pêndulo e a abertura do mesmo. A derivada $d\theta/dt$, por definição, é a velocidade angular (ω) do sistema.

No caso deste sistema do pêndulo, o espaço de fase é constituído por apenas duas dimensões, no qual certos pontos correspondem aos estados de movimentos possíveis do pendulo, formado pelas duas variáveis envolvidas no sistema, ângulo θ e a velocidade angular ω .

Se forem marcados todos os pontos possíveis correspondentes aos estados de movimento entre os quatro extremos, dada uma energia inicial e sendo que o sistema é conservativo, notar-se-á que esses pontos distribuem numa elipse fechada (figura 1).

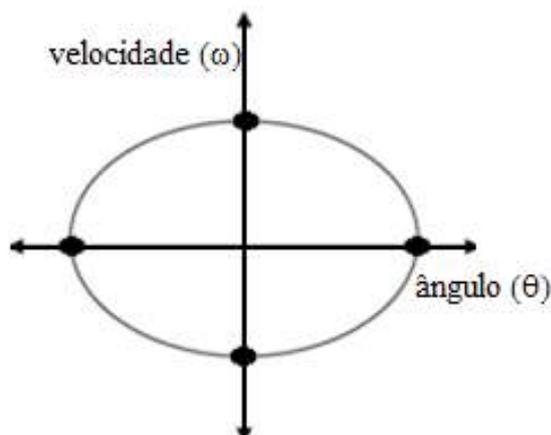


Figura 1: Trajetória do pêndulo no espaço de fase.

Fonte: Stewart (1991)

Esse laço é chamado de trajetória do pêndulo no espaço de fases. Ele descreve completamente o movimento do sistema. Todas as variáveis do sistema são representadas por um único ponto, que sempre estará em algum lugar sobre essa elipse. Analisando topologicamente o espaço de fase do pêndulo em um sistema conservativo, temos que a evolução temporal do sistema é cíclica. Os quatro pontos no espaço de fase, que estão marcados na figura 1 representam os estados extremos do pêndulo — o módulo da abertura máxima $|\theta_{máx}|$ e velocidade angular máxima $|\omega_{máx}|$. Nas elongações horizontais extremas $|\theta_{máx}|$, a velocidade ω é igual a zero. No centro, onde o ângulo θ é zero, o módulo da velocidade se encontra em seu máximo $|\omega_{máx}|$.

Aplicando energias diferentes às condições iniciais do sistema, obtemos o seguinte gráfico.

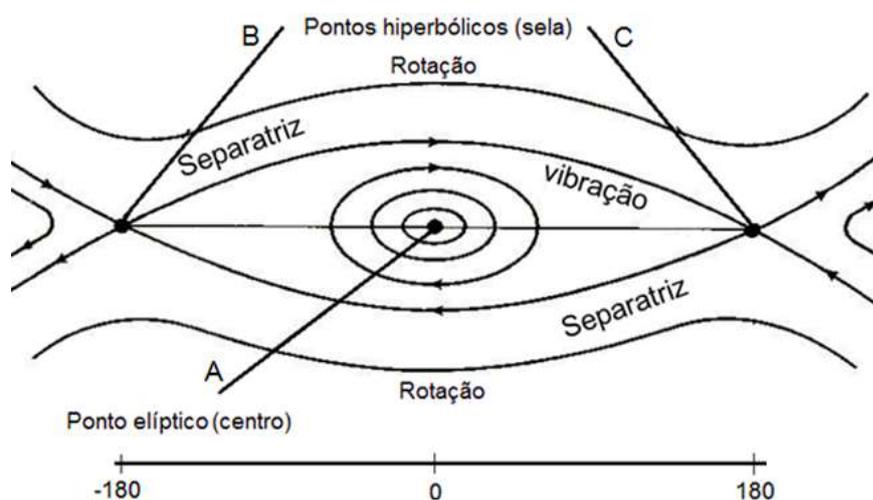


Figura 2: Retrato de fases de um pêndulo não-linear, com diferentes energias em seu estado inicial.

Fonte: Stewart (1991)

Interpretando a figura 2 temos que: o auto-estado sendo um único ponto, o ponto **A** representa o estado mínimo de energia do sistema, classificado como ponto elíptico. Nesse ponto a velocidade angular ω e o ângulo θ são constantes iguais a zero e o pêndulo encontra-se em equilíbrio estável. As curvas elípticas fechadas representam o movimento de vibração, com diferentes energias iniciais. As curvas, além das elipses fechadas, representam um movimento de revolução completa. Nessas condições a energia inicial adicionada ao sistema é tão grande que extrapola a energia máxima para o pêndulo oscilar e o mesmo passa a se comportar como uma hélice, ou seja, o movimento faz uma revolução completa.

Os pontos **B** e **C** que estão nos extremos da maior elipse, classificados como pontos hiperbólicos, têm velocidade angular igual a zero e os módulos das amplitudes seus valores máximos, -180° e $+180^\circ$, respectivamente. Estes pontos **B** e **C** estão em um estado de equilíbrio instável e representam o limiar entre o movimento oscilatório e o movimento de rotação.

De acordo com Stewart (1991), usando recursos matemáticos da topologia pode-se mostrar que fisicamente os pontos **B** e **C** representam um mesmo auto-estado no

espaço de fases. Isto significa que podemos fazer com que o sistema de coordenadas perceba os ângulos de amplitude $-180^\circ = +180^\circ$. Portanto, para chegar a esta representação gráfica é preciso enrolar o plano da figura 2, na horizontal, de modo a juntar os pontos **B** e **C**, formando um cilindro como mostra na Figura 3.

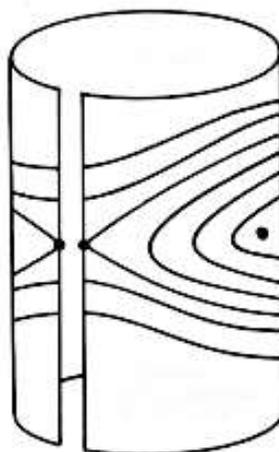


Figura 3: Representação do espaço de fases enrolado, do pêndulo ideal.

Fonte: Stewart (1991)

Logo, enrolando a linha que representa o eixo do ângulo θ em volta do círculo, de tal modo que, quando completar um *looping* completo, isto é, 360° , o sistema estará de volta ao ponto de partida, 0° . Isto significa que acrescentando 360° , ou qualquer múltiplo seu, à medida numérica de um ângulo, tem-se o mesmo ângulo. Haja vista que, $-180^\circ + 360^\circ = +180^\circ$, portanto esses dois ângulos são o mesmo.

No entanto, a figura 3 não deixa claro que o ponto **A** é o estado de mais baixa energia do sistema e nem que os pontos **B** e **C**, que agora é representado por apenas um ponto, tem a maior energia do sistema enquanto o mesmo tem movimento periódico. Contudo, a solução para esse problema é curvar o cilindro da figura 3, transformando-o em um tubo em forma de U (figura 4). Feito isso obter-se-á uma figura que mostra os movimentos do pêndulo e os níveis de energia correspondente. É possível de se ver também que, se a energia for suficientemente elevada à cima do limiar pendular, há dois tipos distintos de movimento rotacional, o pêndulo girando no sentido horário ou anti-horário. Seguindo o caminho da haste da esquerda ou da direita.

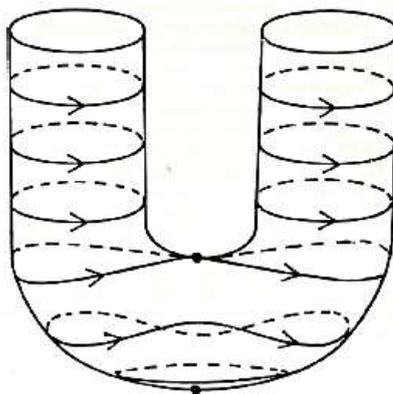


Figura 4: Representação do espaço de fases enrolado e dobrado em forma de “U”, do pêndulo ideal.

Fonte: Stewart (1991)

2.1.3 - Atratores

Um atrator é um conjunto de valores no espaço de fase para o qual o sistema converge com o tempo (se função contínua) ou por iterações (se função discreta), quando um sistema dinâmico eventualmente se estabiliza.

O atrator pode ter tantos graus de liberdade quanto o número de variáveis que influenciam o sistema. E as propriedades gerais da dinâmica de um sistema podem ser deduzidas pela forma de seu atrator. Ou seja, analisando o atrator podemos encontrar informações sobre o comportamento das variáveis do sistema (ECKMANN; RUELLE, 1985).

Segundo Monteiro (2011), um conjunto fechado de pontos A , no espaço de fases de um sistema dinâmico, é definido como um atrator se:

- A é um conjunto invariante: ou seja, qualquer trajetória $\vec{x}(t)$ que começa em A , permanece em A por todo o tempo;
- A atrai um conjunto aberto de condições iniciais: isto é, há um hipervolume B , que contém A , tal que para qualquer condição inicial $\vec{x}(0)$ pertence a B , a distância entre a trajetória $\vec{x}(t)$ correspondente e A tende a zero, quando t tende a infinito. O maior conjunto de condições iniciais que satisfaz essa propriedade é chamado bacia de atração;
- A é mínimo: isto é, não há subconjunto de A que satisfaça as duas condições anteriores.

Na literatura há registros de quatro tipos básicos de atratores, que podem ser classificadas topologicamente, de acordo com suas características no sistema.

- Os atratores estáveis, ou pontuais. São aqueles que derivam de sistemas que atingem um equilíbrio estável. Estes atratores possuem ordem zero e convergem para um único ponto no espaço de fases;
- Os atratores periódicos. São aqueles que derivam de sistemas cíclicos. Estes atratores possuem ordem um e convergem para uma circunferência;
- Os atratores quase-periódicos. São aqueles que derivam de sistemas cíclicos, porem com mais ciclo. Estes atratores possuem ordem dois e perfazem dois ciclos e se estabilizam formando um solenóide;
- Os atratores aperiódicos, ou atratores estranhos. São aqueles que derivam de sistemas caóticos, isto é, são sensíveis as condições iniciais. Estes atratores possuem ordem n , sendo $n > 2$ e pode ser inteiro ou real.

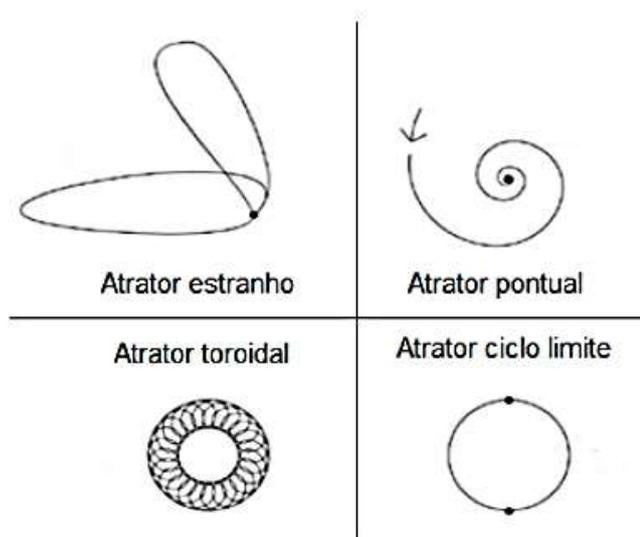


Figura 5: figura representativa dos quatro tipos de atratores.

O modelo publicado por Edward Lorenz em 1963 exibiu um comportamento bastante complexo, embora fosse definido apenas por poucas e simples equações diferenciais. A dinâmica gerada pelo modelo exibiu uma característica não usual (MOREIRA, 1993). Lorenz concluiu que a previsão do tempo em um intervalo de tempo longo não seria possível. Sistemas como o de Lorenz são denominados caóticos

determinísticos, ou seja, embora apresentem um comportamento aperiódico e imprevisível, a sua dinâmica é governada por equações diferenciais determinísticas simples.

No caso de sistemas caóticos, as órbitas do atrator nunca repetem o mesmo caminho. Contudo, as órbitas estão confinadas a uma região limitada do espaço de fases. Atratores de sistemas caóticos são denominados atratores estranhos, terminologia introduzida por Ruelle e Takens (1971) quando estavam questionando a interpretação matemática do fenômeno de turbulência predominante na época e propuseram que turbulência deve corresponder a existência no espaço de configurações de algum "atrator estranho".

Um atrator estranho é um fractal, ou seja, é um objeto geométrico de dimensão não inteira e sua estrutura possui características de auto-similaridade (NETO, 2004). E em geral, os sistemas naturais são sistemas complexos que exibem comportamento fractal. Os fractais são conjuntos de objetos cuja forma é irregular ou fragmentada e têm essencialmente a mesma estrutura em todas as escalas, segundo a definição de (NUSSENZVEIG, 2003).

A partir de Lorenz (1963), Ruelle e Takens (1971) e Grassberger e Procaccia (1983), diversos estudos confirmam a presença de atratores estranhos associados a situações específicas, a partir de séries temporais em diferentes áreas. Atratores estranhos tem sido encontrado em trajetórias de ciclone tropicais (FRAEDRICH; LESLIE, 1989), em séries temporais relacionadas ao fenômeno El Niño (GOBER *et al.*, 1992), em séries temporais marítimas (FRAEDRICH, 1986; NICOLIS; NICOLIS, 1984) e também na dinâmica de florestas da Amazônia Legal (CAPSTRANO, 2007; CAMPANHARO, 2006; MELLO, 2010; PRADO, 2010).

2.2 - O Teorema de Takens

De acordo com Takens (1981), a trajetória completa de um sistema em um espaço de fases pode ser reconstruída a partir da medida de uma única variável independente dos sistemas. Ou seja, em sistemas cujas equações dinâmicas que os regem não são conhecidas, a caracterização do seu atrator associado pode se limitar a conhecer

quando a dimensão do espaço de fase, n , é suficientemente maior que a dimensionalidade do atrator, d ($n > 2d$).

Segundo Abarbanel (1993), o uso de um τ muito pequeno implica em $X(t_N + m\tau)$ e $X(t_N + (m + 1)\tau)$ terem valores próximos e as séries tornam-se indistinguíveis. Na prática, o uso de τ muito pequeno gera atratores reconstruídos com sua trajetória próximos a uma reta. Ao passo, que o uso de um τ muito grande acarreta em $X(t_N + m\tau)$ e $X(t_N + (m + 1)\tau)$ serem completamente diferente uma da outra. Ou seja, que para valores de τ grande de mais, geram atratores com sua trajetória dispersa, ambos os tempos de defasagem geram atratores reconstruídos mal definidos.

2.3 - Teoria da complexidade

“Complexidade é uma idéia que parte de nossa experiência cotidiana. Nós a encontramos em diversos contextos ao longo de nossas vidas, mas mais comumente temos a sensação de que a complexidade é de alguma forma relacionada com as diversas manifestações da vida.” (NICOLIS; PRIGOGINE, 1998, p. 6)

Os processos que estruturam a natureza organizam-se em sistemas que buscam constantemente um determinado equilíbrio a partir de sua dinâmica, devido às trocas constantes, de matéria e energia entre o ambiente interno e externo. Esses sistemas são denominados de sistemas abertos ou sistemas complexos (CHRISTOFOLETTI, 1999).

Sistemas Complexos são compostos por um conjunto de partes conectadas por alguma forma de inter-relação entre elas. Assim, para caracterizar um sistema é necessário não somente conhecer as partes, mas também os modos de relação entre elas. Caracterizam-se também por serem sistemas abertos, dissipativos e distantes do equilíbrio; por apresentarem auto-organização, retroalimentações, eventos dados por bifurcações e diminuição da entropia. E as propriedades emergentes das inter-relações de um sistema complexo decorrem em grande parte de fenômenos não-lineares entre as partes.

Segundo Christofletti (1980) para os sistemas abertos, como por exemplo, a biosfera terrestre, se manterem em funcionamento, esses sistemas necessitam de um ininterrupto suplemento de energia e massa, bem como a constante remoção de tais fornecimentos enquanto os sistemas se auto-regulam. Desta forma, a interação gera realimentações, ou *feedback*, que podem ser positivas ou negativas, criando assim uma auto-regulação. Os fluxos entre sistemas e subsistemas que estão ligados ao processo de realimentação estão relacionados à comunicação e à informação que entra no sistema.

2.3.1 - Surgimento do pensamento sistêmico

No início do século XX a exploração dos mundos atômico e subatômico colocou os cientistas em contato com uma realidade estranha e inesperada. Em seus esforços para apreender essa nova realidade, ficaram conscientes de que suas concepções básicas, sua linguagem e todo o seu modo de pensar cartesiano eram inadequados para descrever os fenômenos atômicos (CAPRA, 2001).

O pensamento sistêmico surge como uma mudança de paradigmas. Este pensamento contempla as ideias da teoria geral dos sistemas, criada em 1968, pelo biólogo austríaco Ludwig Von Bertalanffy. A teoria geral dos sistemas é um importante campo metodológico que se propõe, entre outras coisas, suplantando a fragmentação e perceber os fenômenos a partir de sua interconectividade holística, procura compreender a amplitude das questões, ou seja, busca o entendimento do todo e não das partes de forma isolada. (CAMARGO, 2005).

O objetivo da teoria geral dos sistemas, além de projetar uma nova análise para a compreensão das dinâmicas sistêmicas é também o de atuar em qualquer que seja a natureza dos elementos que compõem uma relação de forças entre eles, o que inclui qualquer disciplina científica (BERTALANFFY, 1968). Segundo Capra (2001), quanto mais é estudado os problemas de nossa época, mais se percebe que eles não podem ser entendidos isoladamente.

A teoria da complexidade é o ramo da ciência que adota uma visão interdisciplinar e estuda o comportamento complexo dos sistemas simples, com poucas partes interagindo “poucos graus de liberdade” e o comportamento coletivo e estruturado dos sistemas complexos, com muitas partes interagindo “muitos graus de liberdade”.

No primeiro caso a noção de complexidade está associada à dificuldade de prever o comportamento do sistema e no segundo à criação de estruturas (MENDES, 1998). Nas ideias de Grégoire Nicolis e Ilya Prigogine, dois dos percussores dessa nova ciência, a complexidade está muito presente em nossas vidas e se manifestam em diversas formas. Pode ser encontrado em vários campos, desde os sistemas naturais, representados pelos sistemas biológicos, físicos e químicos aos sistemas artificiais, tais como sistemas computacionais e também nas estruturas sócio-organizacionais.

2.4 - Ciências da biosfera e atmosfera

A partir do momento em que o homem se tornou ciente da interdependência das condições climáticas e daquelas resultantes de sua deliberada intervenção no meio natural ele passou a registrar o conhecimento sobre os componentes da natureza. Desvendar a dinâmica dos fenômenos naturais foi necessário para que superássemos a condição de meros indivíduos sujeitos às intempéries naturais e atingíssemos não somente a compreensão do funcionamento de alguns fenômenos, mas também a condição de utilizadores e manipuladores desses fenômenos em diferentes escalas (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Dá-se o nome de série temporal é uma coleção sequencial de dados obtidos em intervalos regulares de tempo durante um período específico. Séries temporais podem ser contínuas, isto é, quando as observações são feitas continuamente no tempo. Ou podem ser discretas, quando as observações são feitas em tempos específicos, geralmente igualmente espaçadas (GOMES; VARRIALE, 2004).

Para Morettin e Tolo (2006), de um modo geral, os principais objetivos em se estudar séries temporais podem ser:

- Descrever propriedades da série, como o padrão de tendência, existência de variação sazonal ou cíclica, observações discrepantes, alterações estruturais nas mudanças no padrão da tendência ou da sazonalidade;
- Usar a variação em uma série para explicar a variação em outra série;
- Predizer valores futuros com base em valores passados. Aqui assume-se que o futuro envolve incerteza, ou seja, as previsões não são perfeitas;

- Controle de processos como, por exemplo, o de manufatura, pois os valores da série temporal medem a “qualidade” de um processo.

Se o sistema estudado se tratar de um sistema com comportamento dinâmico e complexo, as séries temporais além de carregar a informação dos dados de uma única variável e descrever seu comportamento padrão no sistema. Pode-se também, quando analisado uma variável de um ponto de vista unidimensional, na realidade, estar levando em conta um grande número de variáveis interdependentes do sistema, devido à sua correlação, ou acoplamento, com outras variáveis importantes para a dinâmica do sistema (NICOLIS; PRIGOGINE, 1998).

Segundo Baldochi et al. (2001) séries temporais de variáveis climatológicas estão sujeitas a influências mútuas que se caracterizam por periodicidades próprias, assim sendo é de se esperar que apresentem um ciclo bem definido de 24 horas que corresponde a influência do ciclo de rotação da Terra.

A ciência que estuda a atmosfera e sua relação com a biosfera terrestre possui duas vertentes, climatologia e meteorologia e entre elas há uma diferença sutil apenas no foco do que se estuda. Para entender a diferença e descrever essas duas vertentes é preciso saber a definição de dois termos importante para ciência atmosférica: tempo atmosférico e clima.

Para Mendonça e Danni-Oliveira (2007), tempo atmosférico pode ser definido como o estado momentâneo da atmosfera em um dado instante e lugar. Onde o estado da atmosfera é o conjunto de atributos que a caracterizam naquele momento, tais como radiação, temperatura, umidade e pressão. E o clima para Ayoade (2006) pode ser definido como sendo a síntese do tempo atmosférico numa determinada região durante um período de aproximadamente 30 a 35 anos. Isto é, o conjunto dos fenômenos meteorológicos que caracterizam a condição média da atmosfera sobre cada região do planeta.

Esses dois termos ajudam a compreender a diferença sutil entre meteorologia e climatologia. A meteorologia é um ramo da física que estuda os fenômenos isolados da atmosfera e do tempo atmosférico. Pode ser definida como sendo a ciência da atmosfera que estuda o tempo climático. Enquanto a climatologia é a ciência da atmosfera que estuda o clima.

O clima influencia diretamente as plantas, os animais (incluindo o homem) e o solo. Desta forma, é possível afirmar que o clima é um fator determinante na dinâmica espacial de distribuição e disseminação dos seres vivos, inclusive os seres humanos (AYOADE, 2006). Existe uma vasta variedade de climas ou de tipos climáticos sobre a superfície da Terra.

Os numerosos tipos climáticos são classificados por meio de vários e diversificados critérios. O sistema de classificação climática mais utilizado é o de Köppen, na sua forma original ou com adaptações (TORRES; MACHADO, 2008). Segundo Ayoade (2006) o campo da climatologia é bem amplo e podem fazer subdivisões com base em tópicos ou com base em escala dos fenômenos. Pode ser abordado nas escalas continental, regional e local.

2.4.1 - Atmosfera

A atmosfera pode ser descrita como uma fina camada de gases, inodoro, incolor e sem gosto, presa a Terra pela ação da força gravitacional. Sendo uma mistura mecânica de gases, e não um composto químico, isto é, exibe as características principais de todos os gases (AYOADE, 2006).

A atmosfera da Terra possui centenas quilômetros de espessura, atingindo altitudes a perder de vista, mas se mudarmos a escala, ou o ponto de vista, e compararmos a atmosfera ao diâmetro da Terra, sua dimensão se torna muito pequena, pois a sua espessura tem aproximadamente, apenas 1% do raio da Terra. Neste contexto a atmosfera é bem fina e frágil. Evoluiu para sua forma e composição atual há pelo menos 400 milhões de anos, quando uma considerável cobertura vegetal já havia se desenvolvido sobre o solo do planeta (BARRY; CHORLEY, 2011), se tornando vital para o desenvolvimento e manutenção da vida terrestre.

Dos diversos gases que a compõem os mais abundantes são o nitrogênio e o oxigênio, respectivamente. Uma das dimensões da diferença enorme em relação todos outros gases que a compõe pode ser observado na (tabela 1), que indicam que o ar seco, em volume, é composto por 99% de nitrogênio e oxigênio. Os gases vão se tornando rarefeitos conforme aumenta a altitude, sendo que praticamente 80% dos gases estão situados numa região de até 16 km da superfície terrestre.

Além desses gases, há na atmosfera partículas de pó, cinzas vulcânicas, matéria orgânica e resíduos industriais em suspensão, que são denominados de aerossóis. Essas partículas na atmosfera tem função importante não somente nos fenômenos de absorção dos raios solares, mas também na formação de nuvens e respectiva precipitação (FOUCALT, 1993).

Tabela 1: Principais componentes gasosos, fixos e variáveis, da atmosfera terrestre.

Componentes	% por volume de ar seco	Concentração em ppm de ar
Fixos		
Nitrogênio (N ₂)	78,084	--
Oxigênio (O ₂)	20,946	--
Argônio (A)	0,934	--
Neônio (Ne)	0,00182	18,2
Hélio (He)	0,000524	5,24
Metano (CH ₄)	0,00015	1,5
Criptônio (Kr)	0,00014	1,4
Hidrogênio (H)	0,00005	0,5
Variáveis		
Vapor d'água (H ₂ O)	≤ 4	--
Dióxido de carbono (CO ₂)	0,0325	325
Monóxido de carbono (CO)	--	< 100
Ozônio (O ₃)	--	≤ 2
Dióxido de enxofre (SO ₂)	--	≤ 1
Dióxido de nitrogênio (NO ₂)	--	≤ 0,2

Fonte: Torres e Machado, 2008.

A atmosfera pode ser convenientemente dividida em camadas horizontais, com base principalmente na temperatura. De acordo com Barry e Chorley (2011) e Ayoade (2006), há evidências que existem três camadas relativamente quentes (perto da

superfície; entre 50 e 60 km; e acima de 120 km), separadas por duas camadas relativamente frias (10 a 30 km; e 80 a 100 km), com camadas de transição entre as cinco camadas principais denominadas de “pausas”.

A troposfera é a camada que está em contato com a superfície terrestre e se estende até aproximadamente 12 km de altitude. É a região onde os fenômenos climáticos e a turbulência atmosférica são mais acentuados, e contém 75% da massa molecular total da atmosfera e praticamente todo o vapor de água e aerossóis. Nesta camada a taxa de variação vertical da temperatura tem valor médio de 6,5° C/km. Na troposfera as propriedades atmosféricas são facilmente transferidas por turbulência de grande escala e mistura. O seu limite superior é conhecido como tropopausa (BARRY; CHORLEY, 2011).

Estratosfera é a segunda camada mais próxima da Terra, podendo chegar a até 50 km de altitude e possui aproximadamente 10% da massa atmosférica. A estratosfera é caracterizada por apresentar pouco fluxo de ar e por ser muito estável. Nela, encontra-se o gás ozônio, responsável pela barreira de proteção dos raios ultravioleta, mais conhecida como Camada de Ozônio. O limite superior dessa camada é a estratopausa que está localizada entre 50 a 55 quilômetros de altitude e é onde a atmosfera atinge o valor máximo de temperatura.

Acima da estratopausa encontra-se a mesosfera. É uma camada de grande rarefação do ar, o que diminui consideravelmente a capacidade de seus gases reterem a energia solar, devido a isso a temperatura novamente decresce com a altura, até a mesopausa, que está em torno de 80 km, onde atinge aproximadamente -90°C (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007). Acima da mesopausa, e sem limite superior bem definido, está a termosfera que é a camada mais extensa da atmosfera terrestre, onde a temperatura é inicialmente isotérmica e depois cresce rapidamente com a altitude, como resultado da absorção de ondas muito curtas da radiação solar por átomos de oxigênio e nitrogênio. A parte superior da termosfera é conhecida como ionosfera e é uma camada eletrificada na qual há grande concentração de íons e elétrons livres que refletem alguns tipos de ondas de rádio, região também onde ocorrem as auroras Boreal e Austral.

A termopausa é a camada de transição que separa a termosfera e a última camada da atmosfera, a exosfera. A altura da termopausa varia de acordo com o instante do dia, o fluxo de radiação solar e a estação do ano, podendo situar-se entre 500 km a 1000

km de altitude. A exosfera é a última camada atmosférica antes de atingir o espaço, seu limite inferior não é fixo variando com fatores físicos. Na base da exosfera os átomos de oxigênio, hidrogênio e hélio formam uma atmosfera extremamente rarefeita, e as leis dos gases deixam de valer. Os átomos neutros de hélio e hidrogênio podem escapar para o espaço (BARRY; CHORLEY, 2011).

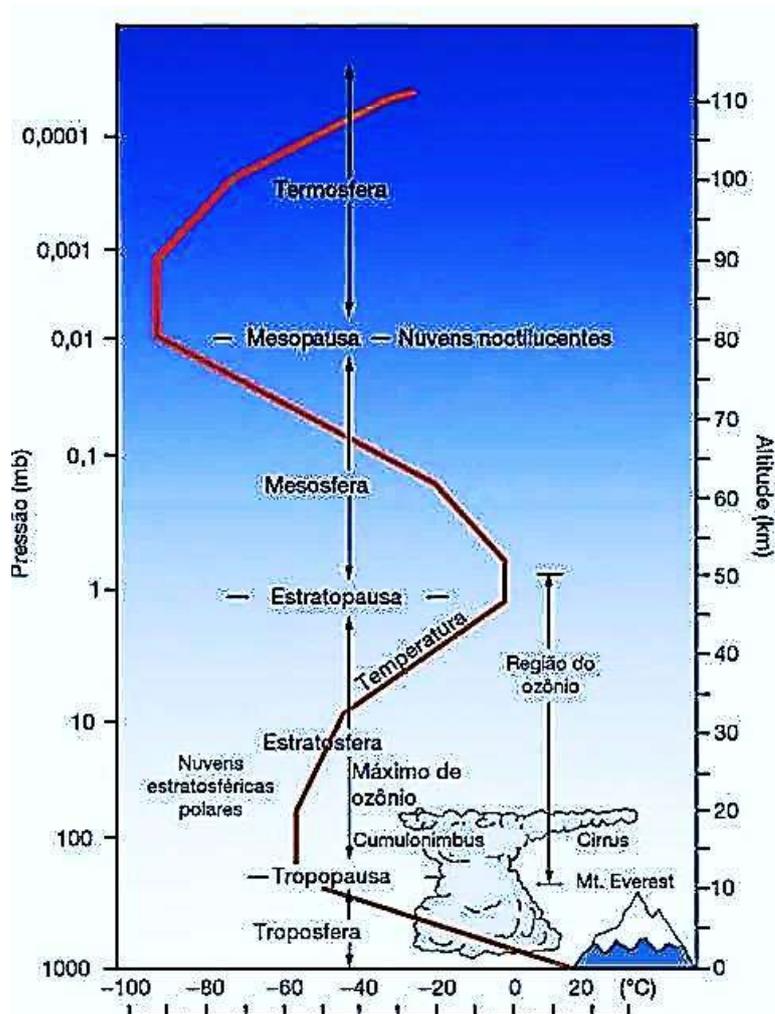


Figura 6: Perfil vertical do comportamento da temperatura e pressão na atmosfera.

Fonte: Barry e Chorley, 2011.

2.4.2 - Variáveis climáticas

O estado da atmosfera pode ser descrito por variáveis físicas que caracterizam sua condição. As variáveis temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento, precipitação, pressão atmosférica, radiação solar são denominadas de elementos meteorológicos. Há também outras variáveis que são denominadas de fatores climáticos que são as condições que determinam ou interferem nos elementos climáticos. Sendo os principais fatores climáticos são: latitude, altitude, maritimidade e continentalidade, massas de ar, vegetação, correntes marítimas (BARRY; CHORLEY, 2011).

Alguns elementos meteorológicos podem atuar também como fatores, o que é o caso da radiação solar, que pode ser tomada tanto como elemento, por ser uma variável que quantifica a disponibilidade de energia solar na superfície terrestre, como também pode ser considerado um fator, por condicionar a temperatura, a pressão e indiretamente outros elementos climáticos.

A radiação solar é fonte primária de toda energia disponível para os processos biológicos, físicos e meteorológicos que se desenvolve na atmosfera e biosfera da Terra (OMETTO, 1981). A sua importância para as plantas é, tanto, quantitativa (densidades de fluxos de energia usada na fotossíntese) como qualitativamente (comprimento de ondas e fotoperíodo, para indução ao florescimento e fotossíntese). A fotossíntese das plantas é a única fonte de fabricação de matéria orgânica a partir das substâncias minerais (PUIG, 2008).

Para Steinke (2012) três pontos, sobre a radiação solar, são fundamentais para compreender o papel da radiação solar na diferenciação climática da Terra: a natureza da energia emitida pelo sol; o efeito da radiação solar no sistema atmosfera-biosfera; e as mudanças que a radiação sofre ao atravessar a atmosfera.

Sobre a natureza da radiação, admite-se atualmente que tem dupla natureza, corpuscular e ondulatória. Só assim se explicam todos os fenômenos ópticos, alguns com a teoria ondulatória, outros com teoria corpuscular. Na escala subatômica as propriedades ondulatória e corpuscular coexistem e se completam. No entanto o aspecto ondulatório é o que interessa à climatologia e meteorologia (VAREJÃO-SILVA, 2001).

Uma onda eletromagnética é gerada por cargas elétricas em movimento não uniforme, que geram um campo magnético. A variação do campo magnético induz um campo elétrico, que por sua vez gera uma variação no campo magnético e o processo continua com os campos elétrico e magnético intrinsicamente acoplados (figura 7). A perturbação, uma vez gerada, toma a forma de uma onda que se propaga a partir da fonte e independente desta. Constituindo uma só entidade, os campos elétrico e magnético regeneram-se mutua e indefinidamente (HECHT, 2002).

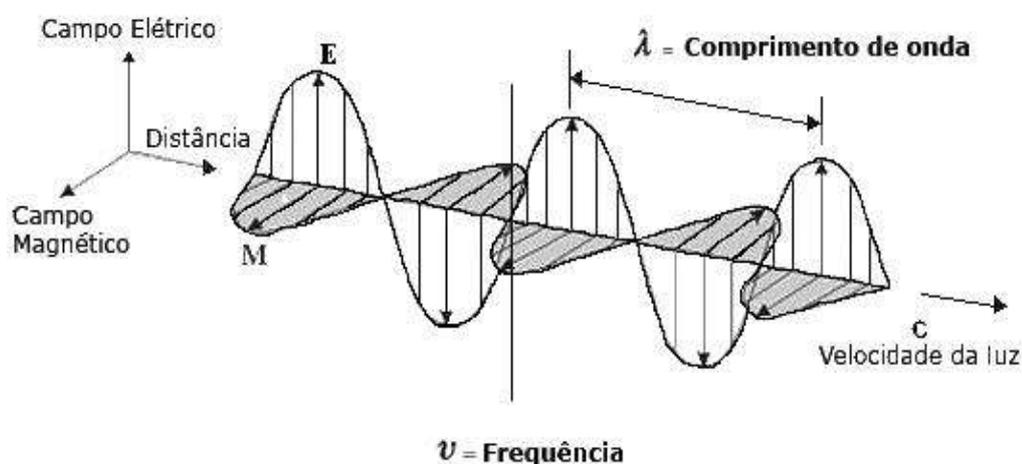


Figura 7: Representação de uma onda eletromagnética.

Fonte: <http://www.guia.heu.nom.br/images/ondaEletroMagnetica.jpg>

Toda onda possui quatro componentes: frequência, amplitude, comprimento de onda e velocidade. No caso da onda eletromagnética ou radiação eletromagnética, as componentes frequência e comprimento de onda servem para classifica-las dentre seu vasto espectro eletromagnético (figura 8).

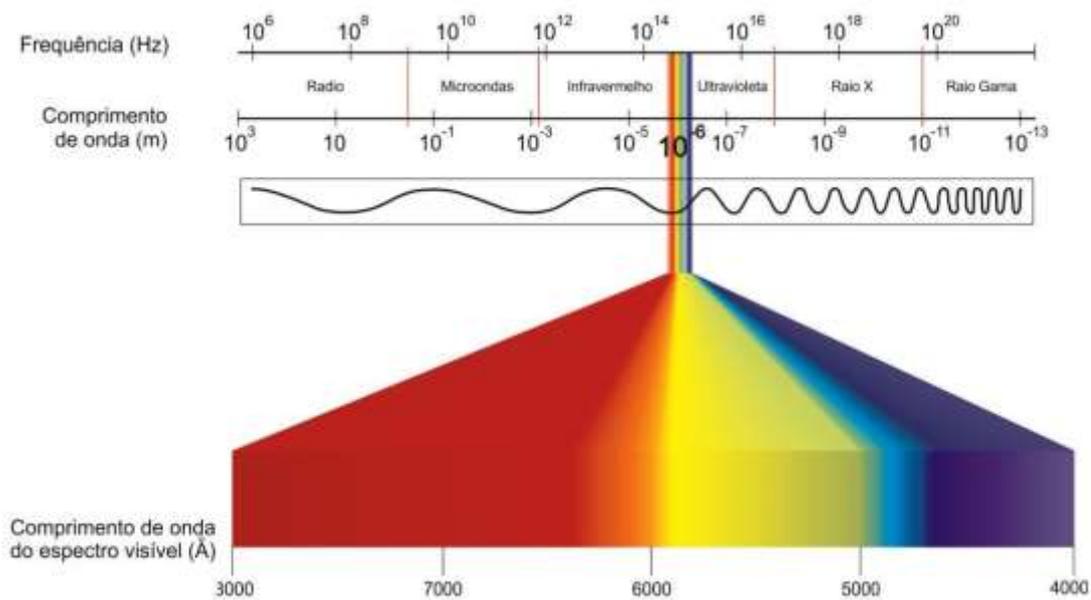


Figura 8: Espectro eletromagnético.

Fonte: http://www.if.ufrgs.br/~fatima/figuras/espectro_luz300dpi.jpg

Vale ressaltar algumas relações importantes envolvendo a radiação eletromagnética. Uma relação importante surgiu a partir das ideias de Max Planck sobre corpo negro que demonstrou que todos os corpos da natureza emitem radiação na forma de ondas eletromagnéticas no espectro do infravermelho desde que esteja com temperatura acima do zero absoluto, zero kelvin. E essa emissão de radiação Q_e de um corpo é proporcional à quarta potência de sua temperatura. Essa relação é conhecida como lei de Stefan-Boltzmann.

$$Q_e = \sigma \cdot T^4 \quad \text{equação 2.1}$$

sendo a constante de proporcionalidade da equação conhecida como constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$.

Outra relação importante é conhecida como lei de Wien e diz que o comprimento de onda em que um corpo tem o pico da radiação inversamente proporcional à sua temperatura.

$$\lambda_{max} = \frac{B}{T}$$

equação 6

sendo a constante de proporcionalidade $B = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}$ e é conhecida como constante de deslocamento de Wien.

A energia emitida pelo Sol consiste em um espectro contínuo de energia eletromagnética com variações de ondas curtas a ondas longas (COULSON, 1975). No entanto a radiação solar esta quase toda na faixa de comprimentos de ondas curtas.

A radiação solar, ao atravessar a atmosfera da Terra, interage com seus componentes e é atenuada pelos processos de reflexão, absorção e difusão. De acordo com Pereira et al. (2002) cerca de 30% da radiação solar incidente no topo da atmosfera é refletida por nuvens, gases, partículas atmosféricas e a superfície terrestre. O restante da radiação solar incidente, correspondente a 70%, é absorvida pelos constituintes atmosféricos e produz o aquecimento do sistema e por consequência a evaporação da água ou convecção.

A fração da radiação solar que atinge a superfície diretamente é denominada radiação solar direta (R_d), outra fração que atinge a superfície após difusão é denominada de radiação solar difusa (R_c). A soma desses dois fluxos de radiação representa a radiação total que atinge a superfície da Terra e é denominada de radiação solar global (R_g) (OMETTO, 1981).

O saldo, ou balanço, de radiação de ondas curtas (BOC) é a diferença entre radiação que chega à superfície e a radiação que é refletida pela mesma. A radiação que é refletida depende no índice de refletância da superfície. Em climatologia esse índice é denominado por albedo (r) e pode ser obtido pela razão entre a radiação incidente e a refletida, por isso é um índice adimensional. Logo o BOC pode ser escrito como:

$$BOC = (R_d + R_c) - (R_d + R_c).r$$

equação 7

A radiação que é absorvida pela atmosfera é depois irradiada em todas as direções em forma de radiação infravermelha. A parcela irradiada em direção à superfície da Terra é chamada de contra radiação (Q_{rc}) (BISCARO, 2007). Existe também a radiação emitida pela superfície da Terra (Q_s). A diferença entre esses dois fluxos de radiação denomina-se saldo, ou balanço, de radiação de ondas longas (BOL).

$$BOL = Q_{rc} - Q_s \quad \text{equação 8}$$

A soma dos saldos de radiação de ondas curtas BOC e de ondas longas BOL é denominado de radiação líquida R_n . Isto é, a energia resultante ao meio, após todas as trocas radiantes terem sido efetuadas (OMETTO, 1981).

$$R_n = BOC + BOL \quad \text{equação 9}$$

A figura 9 ilustra o esquema do balanço do fluxo de radiação entre a atmosfera e a biosfera terrestre.

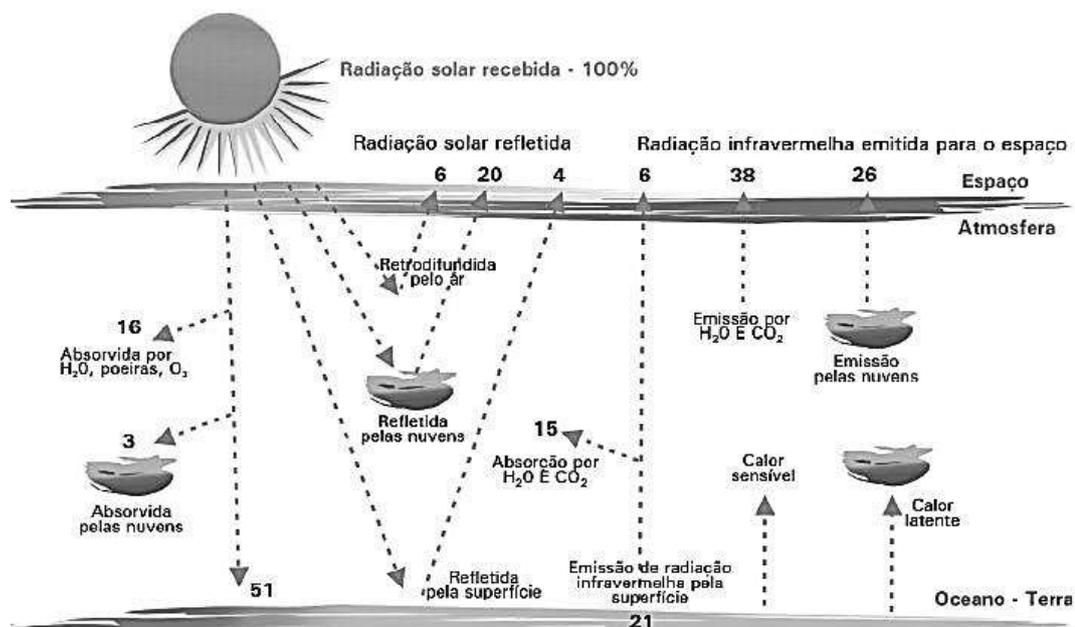


Figura 9: Representação esquemática do fluxo da radiação na atmosfera.

Fonte: Gazzoni e Estevão.

A variável climática temperatura em si pode ser conceituada como sendo a medida do grau médio de agitação molecular e a temperatura do ar pode ser expressa de maneira simples como sendo a energia contida no meio (OMETTO, 1981). Ela está relacionada com a energia cinética média de translação das moléculas (HALLIDAY et. al, 2009).

Desde o nascer do sol, a superfície do solo recebe continuamente energia e à medida que há mudança no movimento aparente do sol, há um aumento da energia incidente e uma conseqüente elevação da temperatura da atmosfera, devido à maior emissão por parte do solo.

No decurso de um dia, as temperaturas mínimas e máximas ocorrem antes do nascer do sol e próximo ao meio dia, respectivamente, caracterizando um ciclo muito bem definido para esta variável, assim como todas as outras que tem o sol como maior influência em seu comportamento. A variação diária da temperatura do ar segue a variação do balanço de radiação.

2.4 - As Florestas

As florestas existem na Terra a muitos milhões de anos. Há indícios que alguns milhões de anos antes que os dinossauros e os primeiros mamíferos. Ao longo desses milhões de anos houve, na Terra, vários períodos com mudanças climáticas globais e essas mudanças paleoclimáticas afetaram diretamente a dinâmica, a extensão e a estrutura das florestas desde sua origem. E a sobrevivência de todo bioma terrestre e a manutenção das florestas só foi possível devido à existência, de que os pesquisadores denominaram, de zonas de refúgio e regiões endêmicas (PUIG, 2008).

As mudanças de eras implicavam em uma mudança na dinâmica das florestas com a atmosfera e oceano. Devido a isso, nesse período as florestas foram encontrando várias mudanças nas condições climatológicas disponíveis alterando seus ciclos biogeoquímicos e o que fez se diferenciar fito-fisionomicamente de sua origem. As florestas se diferenciaram tanto que foi necessário classifica-las.

Os tipos diferentes de vegetação são classificados em: florestas tropicais, florestas temperadas, florestas boreais e savanas. As Florestas citadas acima se caracterizam pela abundante presença de árvores. No entanto, o bioma terrestre também conta com

formações vegetais rasteiras: tundras, padarias e vegetação desértica. A figura 10 contém a classificação e distribuição geográfica dos tipos de florestas terrestre.

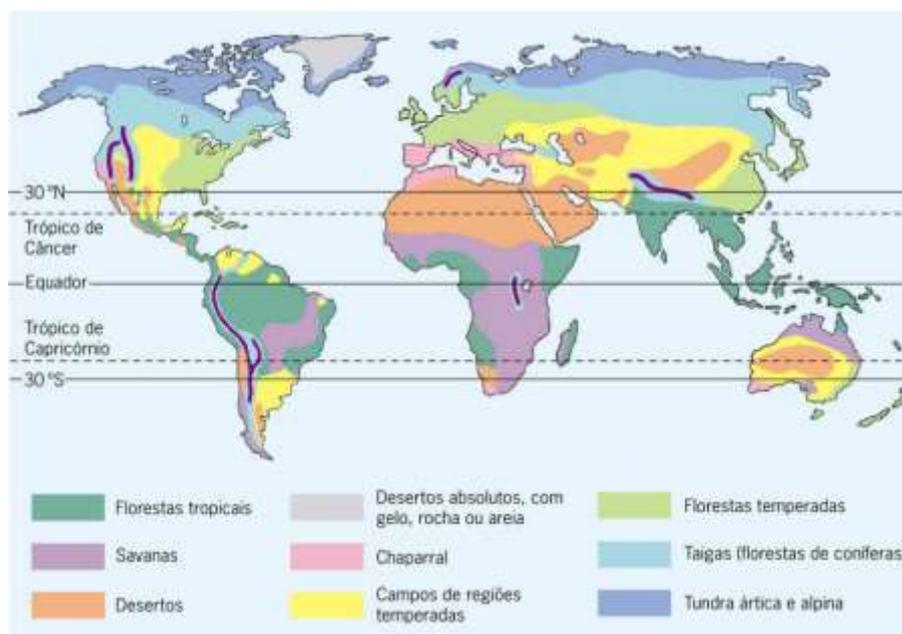


Figura 10: Classificação e distribuição geográfica dos tipos de florestas terrestre.

Fonte: Cesar e Cezar

2.4.2 - Amazônia

As florestas tropicais são florestas que se encontram na faixa intertropical, ou seja, na faixa compreendida entre os dois trópicos: trópico de Câncer no hemisfério norte e o trópico de Capricórnio no hemisfério Sul. A região desta faixa tropical é bem iluminada, variando pouco a quantidade de energia solar incidente em todas as épocas do ano. Segundo, Puig (2008) as espécies da flora tropical estão adaptadas a certa constância do fotoperíodismo, ou seja, a duração e da intensidade da luz durante o ciclo anual.

O clima tropical é considerado quente com temperaturas geralmente compreendidas entre 24° e 28° C, segundo Tricat, 1974, apud Puig 2008. A uniformidade térmica anual também é característica da região enquanto no ciclo diário há forte amplitude térmica. A região intertropical é considerada úmida e é caracterizada também por chuvas abundantes com certa regularidade ao longo do ano. Devido ao ciclo da água e à dinâmica dos ventos da atmosfera.

A Floresta Amazônica é a maior floresta tropical do mundo, sua área corresponde a aproximadamente 37% das florestas tropicais do planeta, com mais de 6,5 milhões de km² e abrange vários países da América do Sul como: Brasil, Venezuela, Colômbia, Peru, Equador, Suriname, Guiana e Guiana Francesa. Sendo que 85% desta floresta esta em território brasileiro (DALMAGRO, 2009).

Informações paleontológicas, geológicas e biológicas disponíveis sobre a Amazônia mostram que a região mudou ao longo da história. Segundo Puig (2008), dois ciclos climáticos foram fundamentais no processo de caracterização da Amazônia: de 20 mil a 14 mil anos, o clima era árido e caracterizado por baixo nível lacustre, baixo nível marinho e regressão da floresta densa e úmida; 12.800 a 9.800 anos, o clima era mais úmido o que permitiu a extensão e a reconquista dos terrenos perdidos de floresta densa e úmida.

Porém, as condições ambientais para que a Amazônia se tornasse tão exuberante, só ocorreram há, aproximadamente, a 6 milhões de anos. E suas características não foram fruto somente das mudanças climáticas e das interações entre as espécies, mas de fatores geológicos, como a elevação de montanhas e a Cordilheira dos Andes, localizada entre o Chile e a Argentina (PUIG, 2008).

Apesar importância da Floresta Amazônica para a região e até mesmo global, o homem vem explorando de forma inconsequente e desenfreada sua região. O desflorestamento da Floresta Amazônica brasileira atingiu cerca 12% de sua cobertura florestal original em três décadas até 2002. Considerando apenas o bioma Amazônia, essa perda foi de aproximadamente de 12% até 2001, segundo (LENTINI et al., 2003)

2.4.3 - Cerrado

A savana brasileira, conhecido também por Cerrado, é o segundo maior bioma brasileiro, ocupando uma área de 2.039.243 km², cerca de 24% do território nacional. Abrange todo o Distrito Federal e partes dos estados de: Goiás (97%), Tocantins (91%), Maranhão (65%), Mato Grosso do Sul (61%), Minas Gerais (57%), Mato Grosso (40%), Piauí (37%), São Paulo (33%), Bahia (27%), Paraná (2%) e Rondônia (0,2%), (IBGE, 2004). Nesta região encontram-se as nascentes das três maiores bacias hidrográficas da América do Sul (Amazônica/Tocantins, São Francisco e

Prata), o que resulta em um elevado potencial aquífero e favorece a sua biodiversidade.

Segundo, Walter (2006) o clima do Cerrado é caracterizado por duas estações bem definidas com invernos secos e verões chuvosos, cujo clima principal é classificado como Aw de Köppen (tropical chuvoso) – clima Aw que coincide com a distribuição da maioria das savanas. A precipitação média anual gira em torno de 1.500 mm, variando de 750 a 2.000 mm. As chuvas concentram-se de outubro a março (estação chuvosa), o período de estiagem vai de abril a setembro (estação seca). Possui um clima quente e quase sem ventos: a temperatura média anual varia entre 21°C e 27°C, podendo chegar a marcações de até 40°C na primavera. As mínimas registradas podem chegar a valores próximos de 10°C ou até menos, nos meses de maio, junho e julho.

O Cerrado detém 5% da biodiversidade do planeta, sendo considerada a savana mais rica do mundo. Compreende um mosaico de vários tipos de vegetação, desde fisionomias campestres, savânicas e até florestais, como as matas secas e as matas de galeria (RIBEIRO; WALTER, 2008).

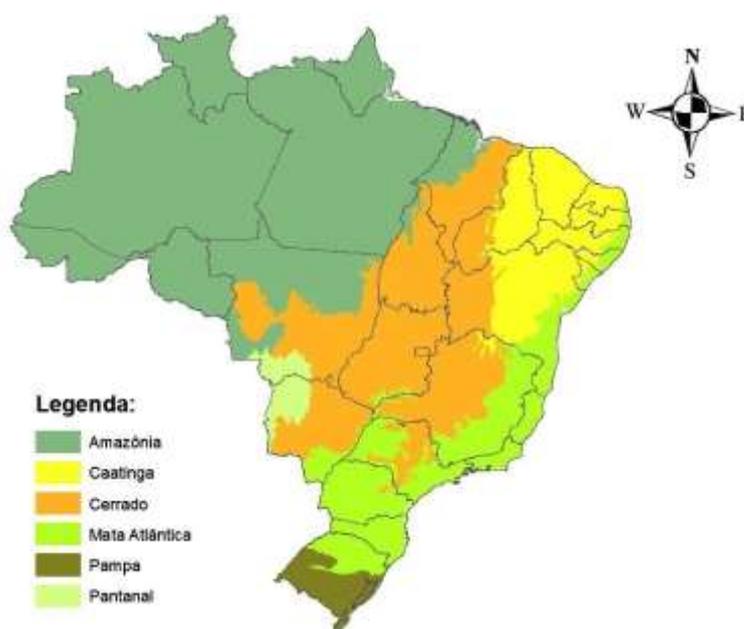


Figura 11: Representação espacial da abrangência dos biomas no Brasil.

Fonte: http://www.florestal.gov.br/snif/images/stories/RecursosFlorestais/bioma_img_snif.jpg.

2.4.4 - Floresta de Transição

As florestas de transição ou écotonos são áreas de transição entre a floresta Amazônica e o Cerrado e/ou Mata Atlântica é definida como duas vegetações distintas que se misturam, entretanto cada uma conserva suas próprias características (ACKERLY, 1989).

À noroeste de Mato Grosso são encontradas extensas áreas de transição entre a floresta Amazônica e o Cerrado, como pode ser observado no mapa dos domínios morfoclimáticos da região brasileira (figura 12) (SILVA, 2006; MONTEIRO et.al., 2004). Esta Floresta abrange em média 42% do território mato-grossense. Está situada em uma região conhecida como arco do desmatamento, região esta que têm sofrido mudanças em sua composição e estrutura, provocando mais alterações do microclima, além de ser considerada uma região mais sensível a mudanças climáticas (VOURLITIS et al., 2005; DALMAGRO et al., 2011; MALHI; WRIGHT 2004).



Figura 12: Os domínios morfoclimáticos do Brasil.

Fonte: <http://docplayer.com.br/docs-images/24/2314095/images/3-0.png>

Segundo Tannus (2004) o estudo de florestas de transição permite conhecer melhor as trocas de energia ainda pouco quantificadas, pois a compreensão do

funcionamento dessas áreas é de fundamental importância para o entendimento dos mecanismos de deslocamentos dos biomas e o destino destes perante as mudanças ambientais.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 - Área de estudo

Este trabalho foi desenvolvido utilizando o banco de dados do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da UFMT, que foram captados dentro de uma floresta em uma região da Amazônia Legal (figura 13) no território de Mato Grosso.

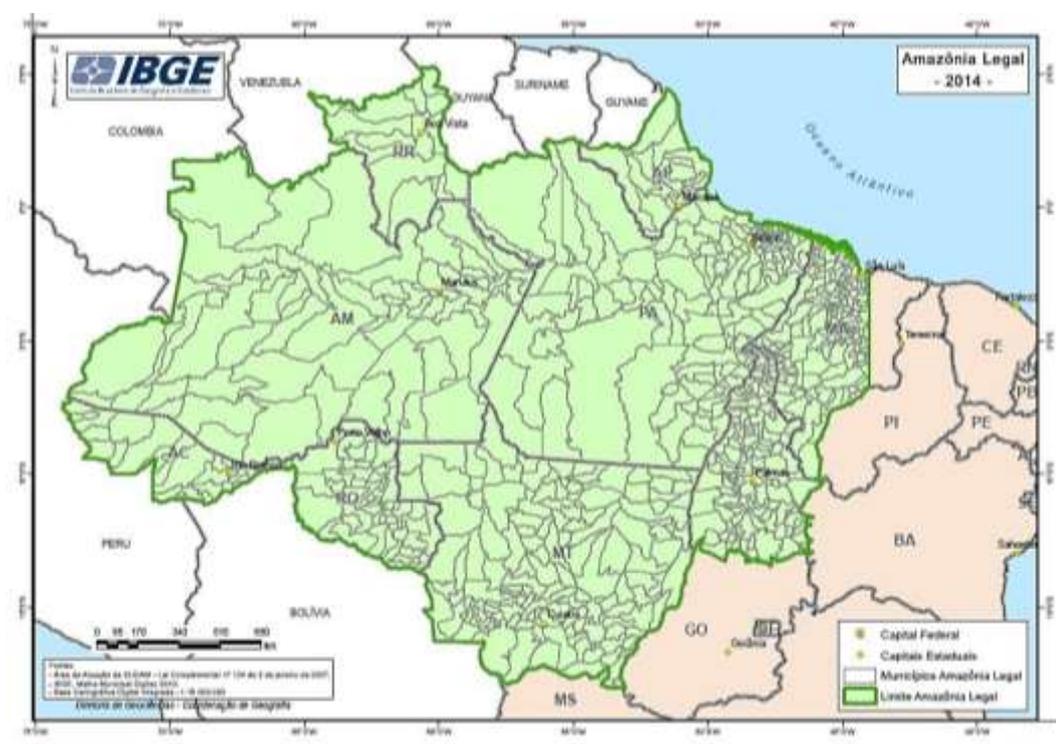


Figura 13: Mapa representando a região da Amazônia legal.

Fonte: IBGE

A área onde foram coletados os dados possui cerca de 20 km², situa-se na fazenda Macaraí e está localizada a aproximadamente 50 km a NE do município de Sinop, na região norte de Mato Grosso (11°24.75'S e 55°19.50'O). Esta região corresponde a uma área de floresta de transição entre a floresta amazônica e o cerrado. Possui um dossel contínuo de altura entre 28 m a 30 m, em terreno plano (VOURLITIS et al., 2005).

O clima da região segundo classificação climática de *Köppen-Geiger* é o *Aw* tropical chuvoso, quente e úmido. É caracterizada por clima tropical úmido, com duas estações definidas, uma estação seca de junho a agosto, e uma estação chuvosa de dezembro a fevereiro, com uma temperatura média anual de 24°C e precipitação de 2000 mm/ano (MIRANDA et al., 2004).

O solo foi caracterizado como Neossolo Quartzarênico Órtico típico A moderado álico. É um solo de textura bastante arenosa com 84% areia, 4% silte, 12% argila na camada superior do solo (50 cm). Este solo tem alta porosidade e capacidade de drenagem rápida da água das chuvas, que se dá entre quatro a sete dias (PRIANTE FILHO et al., 2004). A vegetação local contém espécies arbóreas semidecíduais, como *Tovomita schomburkii*, *Qualea paraensis*, e *Brosimum lactescens* (MIRANDA et al., 2005).

3.2 - Instrumentos de aquisição dos dados

No interior desta área possui uma torre micrometeorológica de 42 m de altura (figura 14) onde foram instalados equipamentos que monitoram constantemente o microclima deste local. Esta torre permaneceu em funcionamento de 1999 até 2005.

Os equipamentos de medidas das variáveis estudadas neste trabalho são: para temperatura do ar foi utilizado um termohigrômetro, modelo HMP-35 (Vaisala, Inc., Helsinki, Finland) e para saldo de radiação, utilizou-se um radiômetro modelo Q*7.1 (REBS Inc., Seattle, Washington).

Estes dados micrometeorológicos obtidos pelos equipamentos eram armazenados em um equipamento com sistema de aquisição de dados, chamado de *Datalogger* (CR10-X, Campbell Scientific, Inc., UT, USA). Este equipamento é programado para fazer leituras das medidas a 10 Hz e armazena uma média a cada 30 minutos.

Para este trabalho foram utilizadas as séries de dados dos equipamentos que estavam instalados no alto da torre a 42 m do solo, aproximadamente 10 metros acima do dossel da floresta.



Figura 14: Foto da torre com os equipamentos de coleta de dados.

Fonte: PGFA

3.3 - Métodos

Foram utilizadas séries de dados de um mês que representassem a estação seca (entre junho e agosto) e um mês que representassem a estação chuvosa (entre dezembro e fevereiro), de acordo com (MIRANDA et al., 2004). As séries de dados escolhidas para representar os períodos chuvoso e seco foram o mês de janeiro e junho, respectivamente. E foram utilizados os bancos de dados dos anos de 2000 e de 2002. O critério de escolha de quais anos seria analisado, baseou-se nos meses que não tivessem ou tivessem poucas falhas nas séries de dados.

3.3.1 - Teorema de Takens

O Teorema de Takens (1981) tem profundas implicações com relação à forma com que as medidas de variáveis microclimatológicas são consideradas e utilizadas na

área de Ciências Ambientais. Se a relação entre um conjunto n de variáveis pode ser obtida a partir do espaço de defasagens temporais utilizando os dados de apenas uma variável, como sugere o teorema, isso significa que informações do conjunto de n variáveis podem ser obtidas a partir dessa variável de referência. Num trabalho recente de Paulo et al. (2015) verificou-se que a variável micrometeorológica que mais guarda informação sobre a dinâmica dos ecossistemas estudados pelo grupo é a temperatura do ar. Assim sendo, de acordo com o Teorema de Takens, é possível retirar informação sobre outras variáveis a partir da variável T .

Quando o atrator é reconstituído a partir de séries defasadas de uma única variável, sua apresentação gráfica, de um modo geral, se apresenta numa escala diferente e rotacionada em relação à figura obtida, graficando-se os valores medidos das séries temporais das n variáveis consideradas (CAPISTRANO, 2007; ABARBANEL et al., 1993). Isso significa que, mediante uma transformação linear e uma rotação (não necessariamente nessa ordem), se pode obter, se não perfeitamente, mas com alguma aproximação, o atrator configurado no espaço de fases (onde as variáveis ocupam os eixos) a partir do espaço de defasagem temporal de uma única variável.

3.3.2 - Rotação de matrizes

Sendo Teorema de Takens aplicável nesse caso, um método para se verificar tal procedimento é construir o espaço de tempos defasados a partir de uma série temporal de dados de temperatura do ar e depois rotacioná-los. Se a projeção dos dados rotacionados num dos eixos corresponder à série temporal de R_n medida no mesmo período, isso significa que, de fato, informação sobre essa variável pode ser obtida a partir da variável T . Adicionalmente, quanto mais os dados rotacionados se parecerem com os dados de R_n , maior é a quantidade de informação de R_n contida em T .

O problema inicial que se apresenta é determinar qual o ângulo de rotação mais adequado a essa análise, sendo esse um dos objetivos deste trabalho. O método desenvolvido consiste na rotação dos dados num espaço tridimensional ($n = 3$). Isso significa trabalhar com os dados originais de temperatura $[T(t)]$ e mais duas séries defasadas $[T(t+\tau)$ e $T(t+2\tau)]$, obtidas a partir da série original, o que corresponde a

um espaço de fase de três variáveis independentes, onde uma delas é a própria temperatura do ar, outra R_n e ainda alguma outra variável a ser identificada.

Num espaço tridimensional, a rotação pode ser obtida através de um aparato matemático correspondente a uma matriz de rotação $[R(\alpha, \beta, \gamma)]$ aplicada aos dados. α , β e γ são os ângulos de rotação, respectivamente em torno do eixo z, do eixo y rotacionado e do eixo x rotacionado (ARFKEN, 1985), obedecendo a seguinte expressão:

$$R(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{pmatrix} \cos\gamma\cos\beta\cos\alpha - \text{sen}\gamma\text{sen}\alpha & \cos\gamma\cos\beta\text{sen}\alpha + \text{sen}\gamma\cos\alpha & -\cos\gamma\text{sen}\beta \\ -\text{sen}\gamma\cos\beta\cos\alpha - \cos\gamma\text{sen}\alpha & -\text{sen}\gamma\cos\beta\text{sen}\alpha + \cos\gamma\cos\alpha & \text{sen}\gamma\text{sen}\beta \\ \text{sen}\beta\cos\alpha & \text{sen}\beta\text{sen}\alpha & \cos\beta \end{pmatrix} \quad \text{equação 10}$$

Se as coordenadas de um ponto no espaço de tempos defasados corresponde a um vetor dado pela seguinte matriz coluna:

$$\begin{pmatrix} T(t) \\ T(t + \tau) \\ T(t + 2\tau) \end{pmatrix} \quad \text{equação 11}$$

O mesmo ponto no espaço rotacionado será:

$$\begin{pmatrix} T_x(t) \\ T_y(t) \\ T_z(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\gamma\cos\beta\cos\alpha - \text{sen}\gamma\text{sen}\alpha & \cos\gamma\cos\beta\text{sen}\alpha + \text{sen}\gamma\cos\alpha & -\cos\gamma\text{sen}\beta \\ -\text{sen}\gamma\cos\beta\cos\alpha - \cos\gamma\text{sen}\alpha & -\text{sen}\gamma\cos\beta\text{sen}\alpha + \cos\gamma\cos\alpha & \text{sen}\gamma\text{sen}\beta \\ \text{sen}\beta\cos\alpha & \text{sen}\beta\text{sen}\alpha & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T(t) \\ T(t + \tau) \\ T(t + 2\tau) \end{pmatrix} \quad \text{equação 12}$$

Neste trabalho os eixos x, y e z correspondem às colunas $T(t)$, $T(t+\tau)$ e $T(t+2\tau)$, respectivamente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos resultados deste trabalho será apresentada em duas secções. A primeira secção consiste na aplicação de uma matriz de rotação no espaço de fases dos atratores reconstruídos, baseado nas séries temporais de temperatura do ar e em seguida analisar a série originada de cada eixo após determinados ângulos de rotação na tentativa de encontrar uma série temporal com perfil parecido com a do saldo de radiação. E a segunda secção consiste em comparar a série gerada com a série de radiação líquida.

A seguir são apresentados os gráficos correspondentes às séries temporais utilizadas na realização deste trabalho. A figura 15 contém os gráficos das séries temporais de temperatura do ar para o mês de janeiro (a) e junho (b), respectivamente, do ano de 2000.

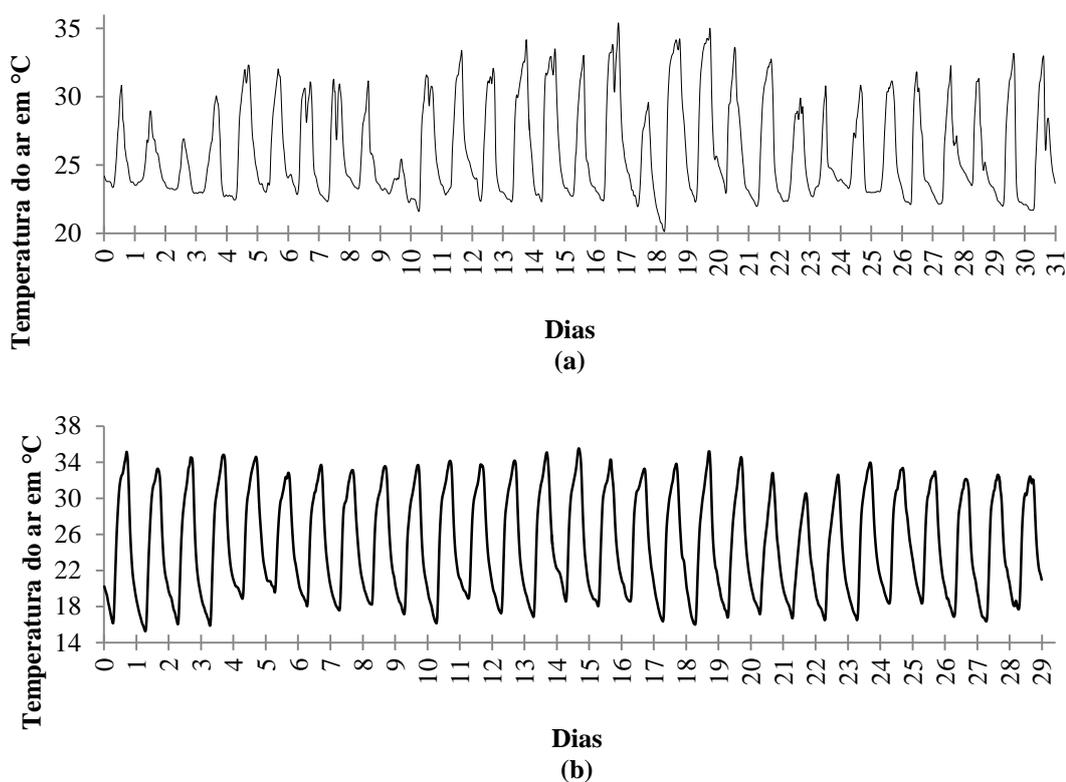


Figura 15: Séries temporais da temperatura do ar em ($^{\circ}\text{C}$) do mês de janeiro (a) e junho (b) de 2000.

Em seguida, a figura 16 contem os gráficos das séries temporais de radiação líquida para o mês de janeiro (a) e junho (b), respectivamente, de 2000.

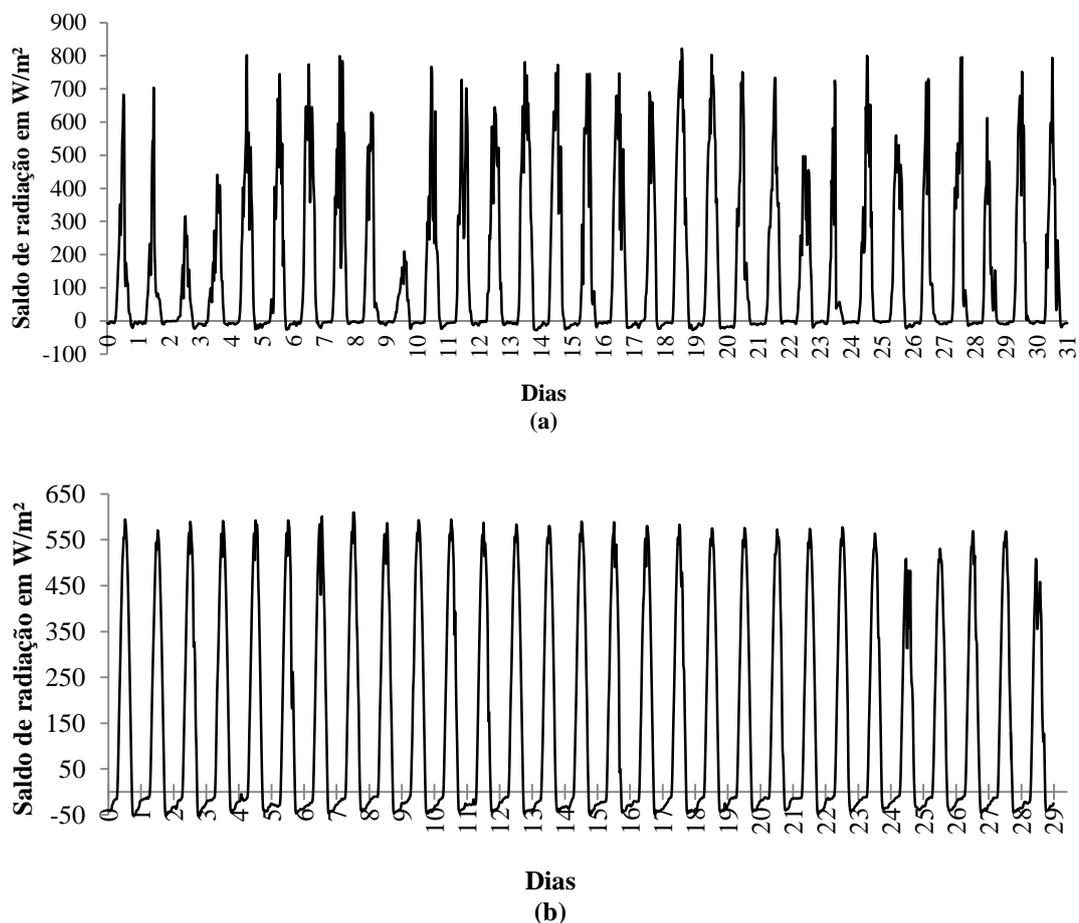


Figura 16: Séries temporais de radiação líquida em (W/m^2) do mês de janeiro (a) e junho (b) de 2000.

A figura 17 contem as séries temporais do ano de 2002 da variável temperatura do ar para o mês de janeiro (a) e junho (b), e também da variável radiação líquida para o mês de janeiro (c) e junho (d), respectivamente.

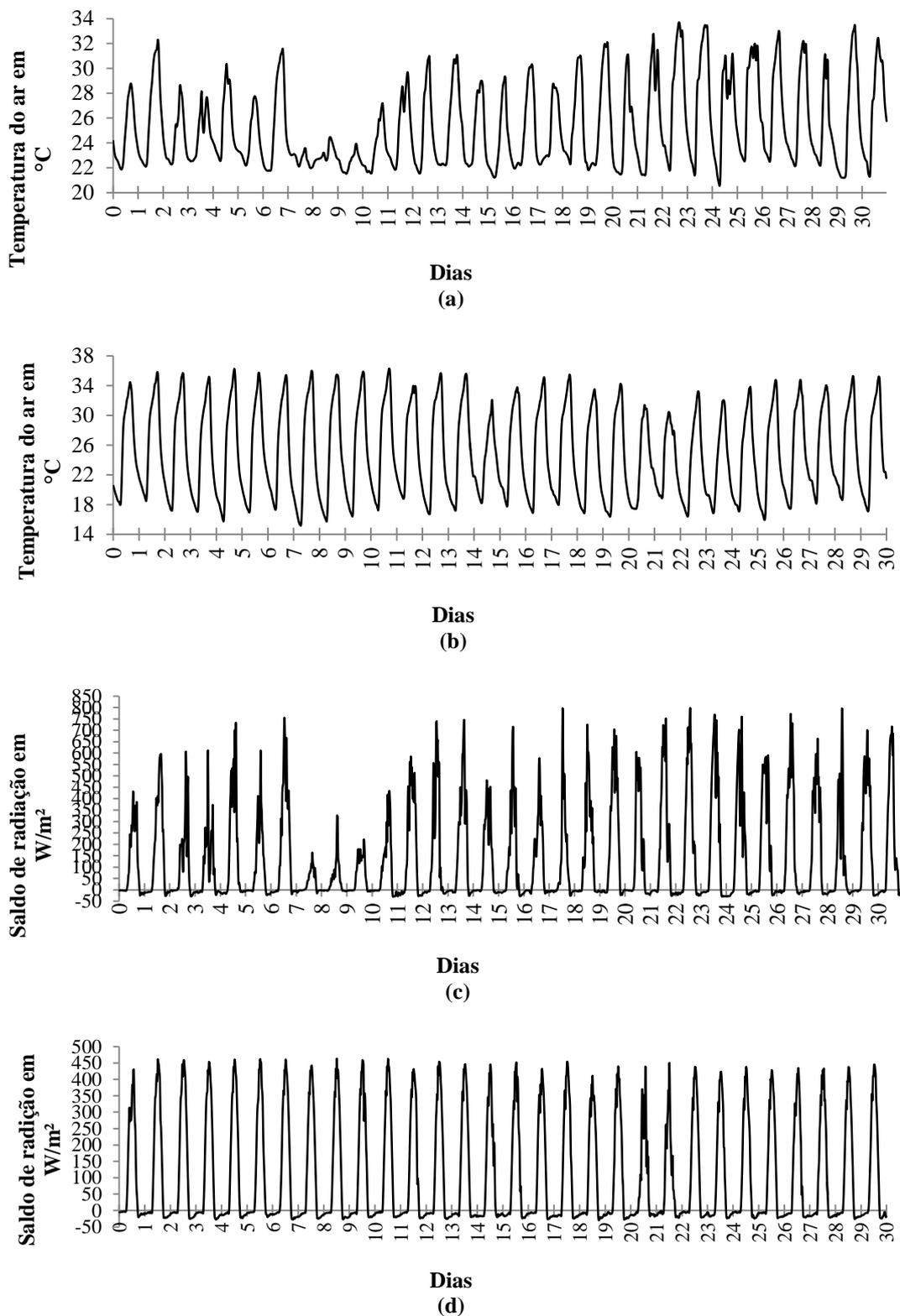


Figura 17: Séries temporais de Temperatura do ar em ($^{\circ}\text{C}$) do mês de janeiro (a) e junho (b). Também da variável radiação líquida em (W/m^2) do mês de janeiro (c) e junho (d). Ambos de 2002.

Para poder observar com maiores detalhes as características das séries temporais das variáveis temperatura do ar e radiação líquida, foi feito um recorte selecionando apenas dois dias, isto é, a quantidade de 98 dados de cada série de dados e em seguida plotados os gráficos. Como esses gráficos são gerados apenas para poder observar a característica da dinâmica das variáveis em estudo, será apresentado a seguir um gráfico de cada estação das séries temporais dessas variáveis de apenas um ano. E foi escolhido o ano de 2000, arbitrariamente.

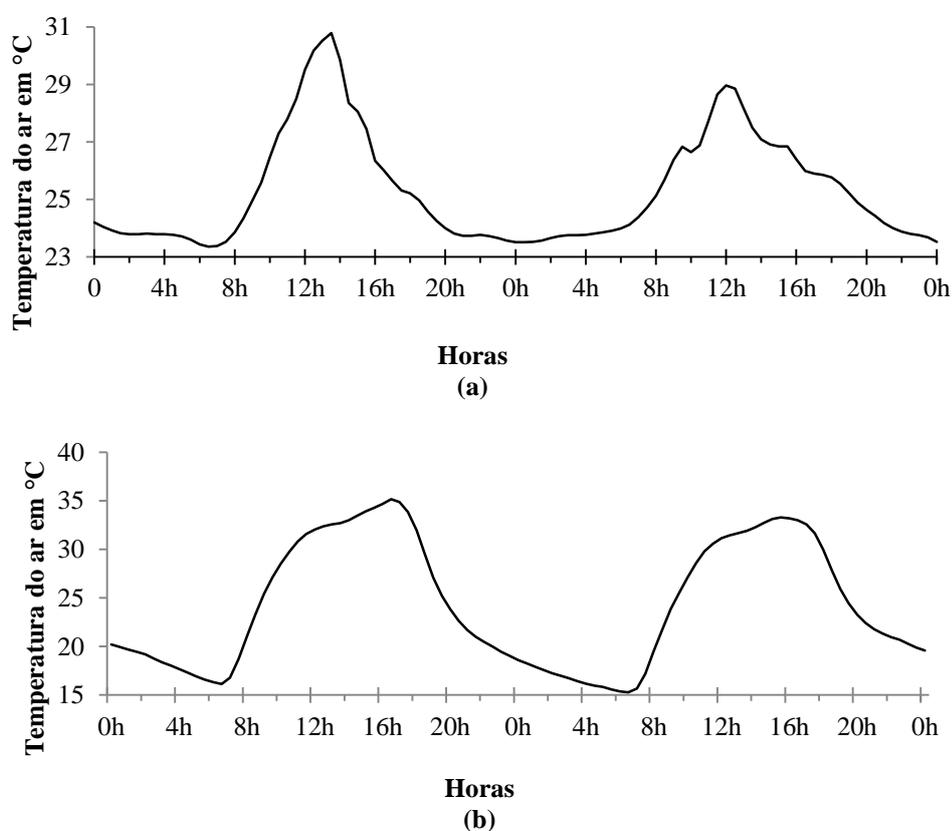


Figura 18: Perfil das séries temporais da temperatura do ar em (°C) dos dois primeiros dias do mês de janeiro (a) e junho (b) de 2000.

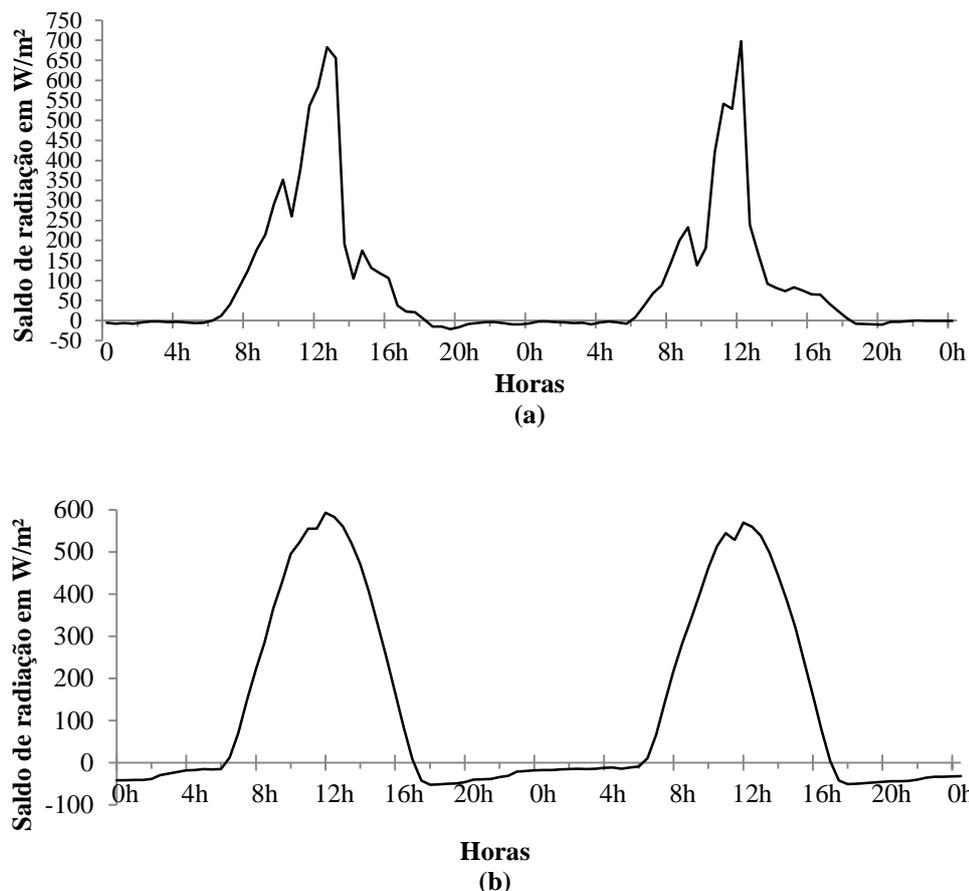


Figura 19: Perfil das séries temporais da radiação líquida em (W/m^2) dos dois primeiros dias do mês de janeiro (a) e junho (b) de 2000.

Observa-se no perfil da série temporal da temperatura que tanto na ascensão quanto no declive uma leve curvatura, deixando característico o aspecto. E o perfil do saldo de radiação não existe a curvatura na ascensão nem no declive. A ascensão acontece de forma bem acentuada e ao atingir seu valor máximo muito rapidamente começa a queda dos seus valores de forma também bem acentuada, isso deixa a parte mais elevada com uma forma pontiaguda, forma parecida como a de um cone. Já na parte mais baixa acontece diferente, após os valores do saldo de radiação caírem acentuadamente ao atingir seu valor mínimo ele permanece levemente estável por um razoável período até que seu valor suba acentuadamente novamente.

4.1 - Atratores Reconstruídos Rotacionados

Inicialmente foram geradas as matrizes correspondentes aos atratores reconstruídos, a partir dos dados de temperatura do ar, para os meses de janeiro e junho dos anos de 2000 e 2002. O tempo de defasagem utilizado para a reconstrução desses atratores foi o de cinco horas, com base nos resultados de (CAPISTRANO, 2007 e PRADO, 2011).

Em seguida, com o objetivo de extrair uma série temporal com características semelhantes às séries de saldo de radiação, aplicou-se a técnica de rotação de matrizes nas matrizes correspondentes aos atratores reconstruídos. Inicialmente foram aplicadas rotações de trinta em trinta graus para cada um dos três eixos [$T(t)$, $T(t+\tau)$ e $T(t+2\tau)$]. Foi convenicionado denominar $T(t)$ de T_x , $T(t+\tau)$ de T_y e $T(t+2\tau)$ de T_z .

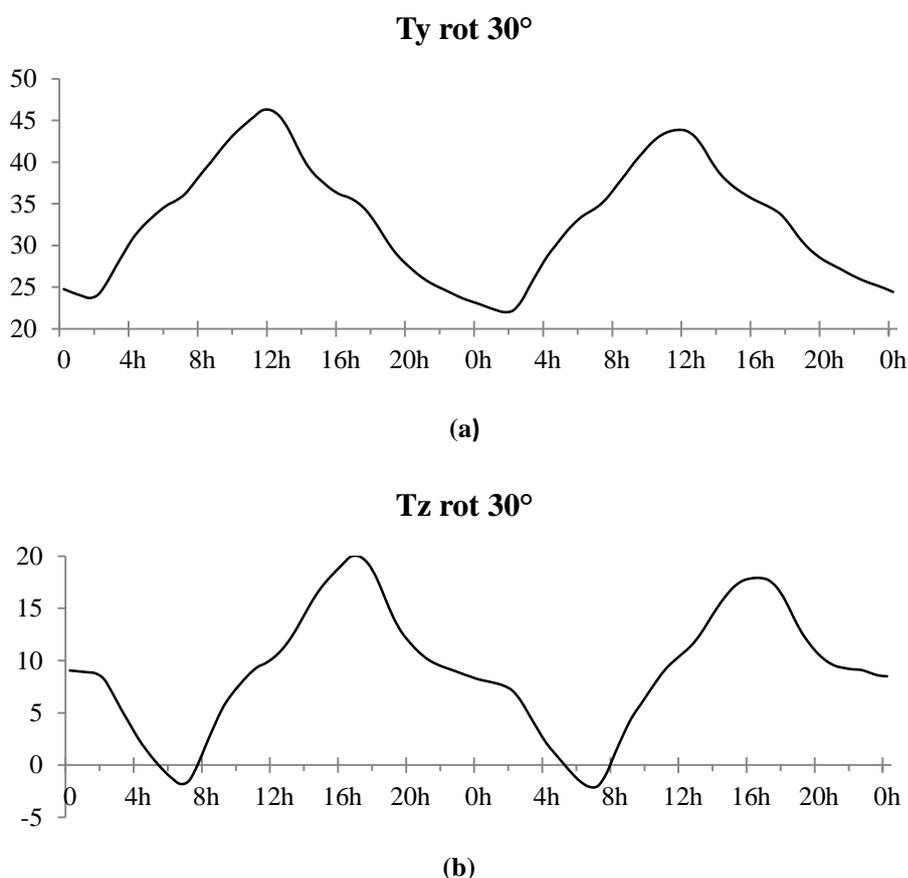


Figura 20: Perfil da temperatura do eixo y (a) e z (b) após rotação de 30° mantendo eixo x fixo.

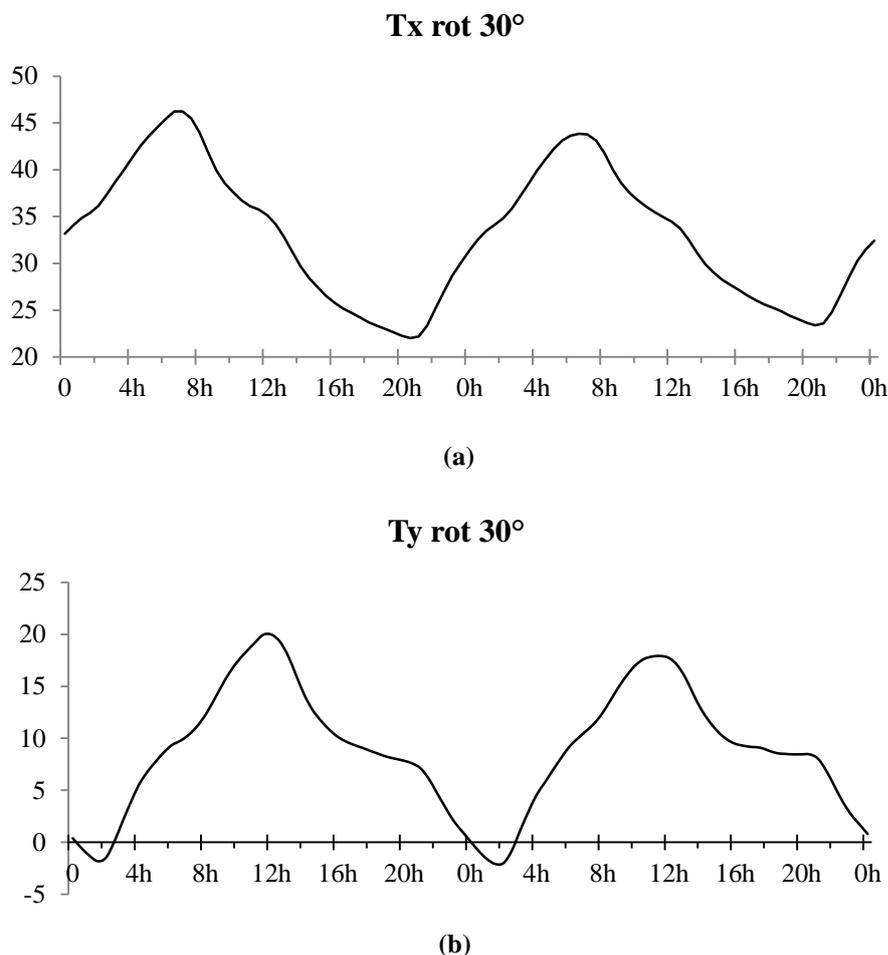


Figura 21: Perfil da temperatura dos eixos x (a) e y (b) após rotação de 30° mantendo eixo z fixo.

Após as rotações para o ângulo de 30° para cada um dos três eixos, foi possível observar que ocorrem mudanças na característica dos eixos rotacionados. Contudo, as mudanças nas características dos eixos rotacionados são as mesmas, independente de qual eixo é mantido fixo. O que muda é apenas qual eixo apresenta as respectivas características. Isto pode ser observado comparando os gráficos das figuras 19 (a) $T_y \text{ rot } 30^\circ$ e a 20 (a) $T_x \text{ rot } 30^\circ$. Assim como os gráficos das figuras 19 (b) $T_z \text{ rot } 30^\circ$ e o 20 (b) $T_y \text{ rot } 30^\circ$.

Outro detalhe que foi observado nesta comparação, é que apesar dos eixos apresentarem as mesmas características para cada rotação os eixos semelhantes estão fora de fase entre si.

Esse fato é reflexo da montagem da matriz gerada com o tempo de defasagem na série temporal da temperatura do ar. Pois são emparelhados os eixos T_x , T_y e T_z , em seguida são descartados os primeiros dados, no período de 2τ , do T_x , do T_y são descartados os primeiros dados, no período de τ e os últimos dados num período de τ , enquanto no T_z são descartados os últimos dados, no período de 2τ . Dessa forma se exclui os elementos vazios desta matriz.

Portanto, a partir dessas observações optou-se por trabalhar apenas com um único eixo fixo. Sendo T_x o eixo escolhido para ser mantido fixo.

Após as rotações de 30° à 330° , com intervalo de 30 em 30 graus, e gerado gráficos de cada um dos eixos rotacionados para analisar quais ângulos geravam séries temporais com características próximas ao do saldo de radiação. Os resultados apontaram que entre as opções testadas, dois ângulos pareceram promissores, isto é, ângulos de rotações que geraram uma série de dados com características parecidas com a série de dados de saldo de radiação, foram os ângulos de 240° para o T_z e 330° para o T_y (figura 21 (a) e (b)).

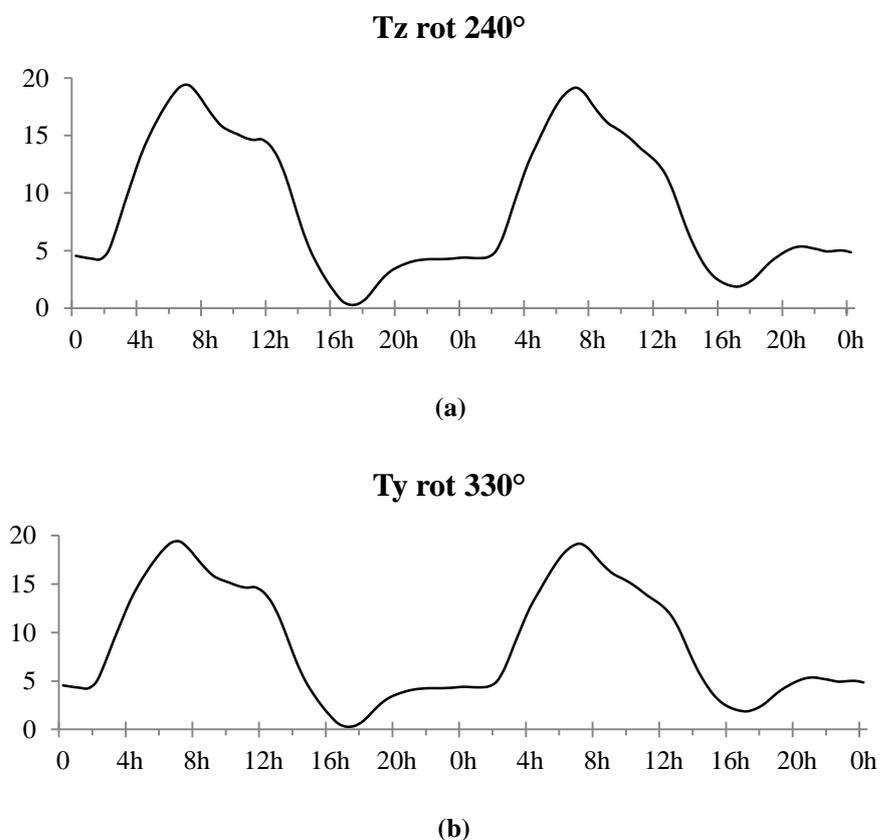


Figura 22: Perfil da temperatura dos eixos z após rotação de 240° (a) e y após rotação de 330° (b), mantendo eixo x fixo.

A partir de então, foi feito um refinamento no intervalo dos ângulos de rotações em torno do ângulo mais promissor. Passou-se então a rotacionar as matrizes de cinco em cinco graus. E optou-se por testar apenas os ângulos próximos ao de 240° para o T_z .

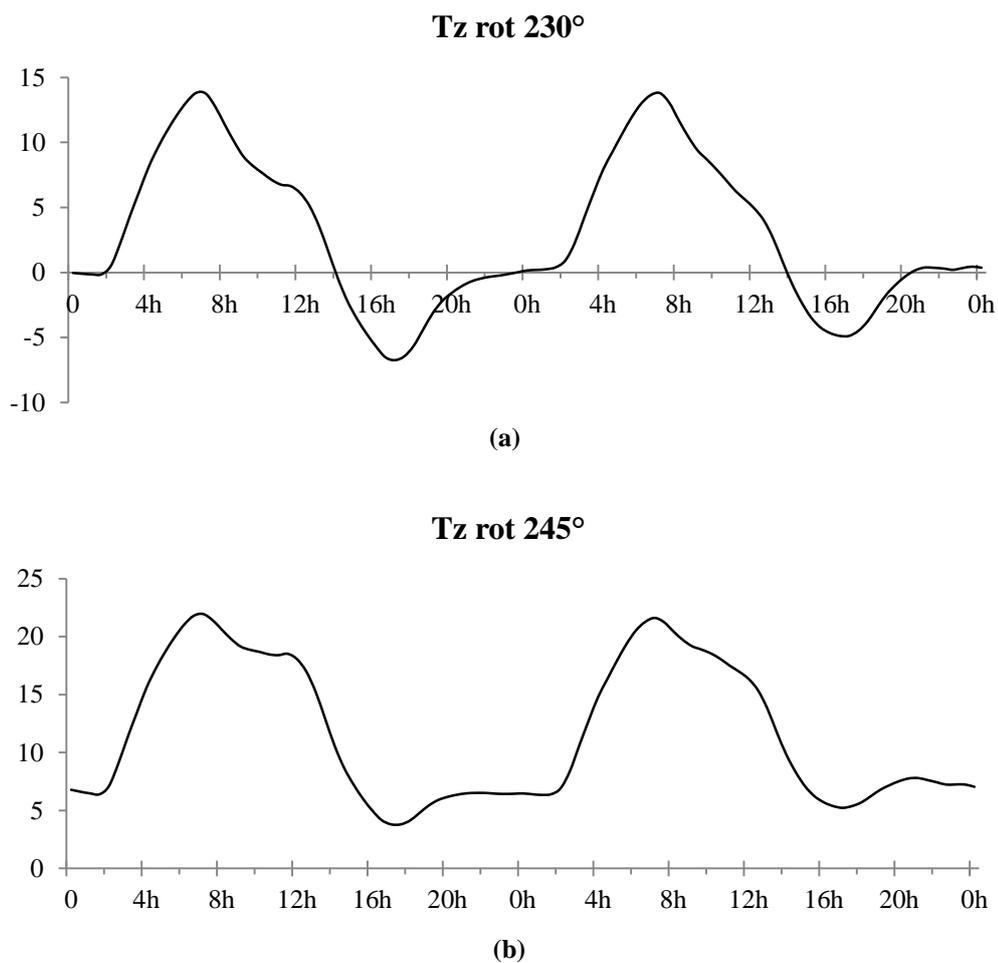


Figura 23: Perfil da temperatura do eixo z após rotação de 230° (a) e 245° (b), mantendo eixo x fixo.

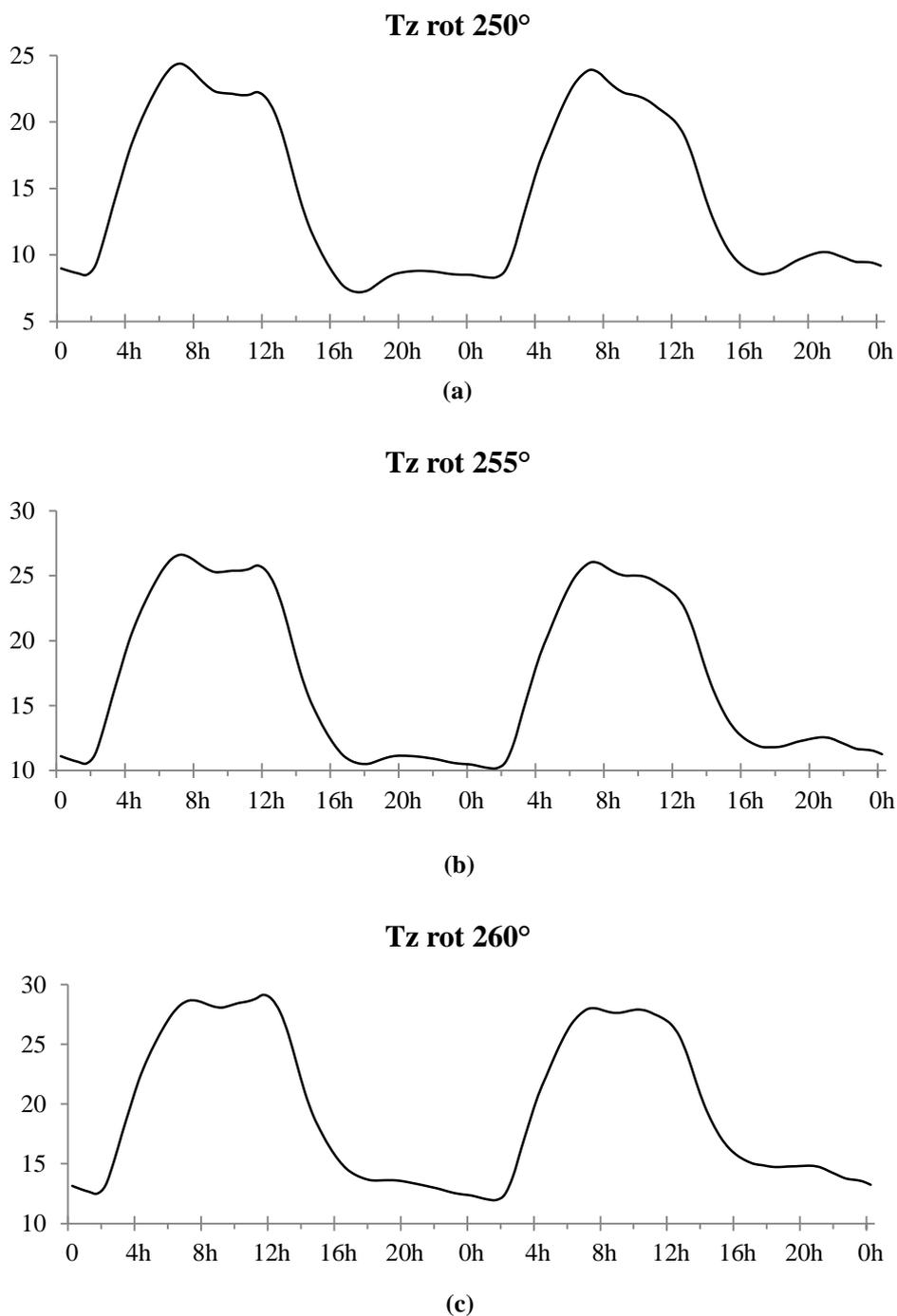


Figura 24: Perfil da temperatura do eixo z após rotação de 250° (a), 255° (b) e 260° (c), mantendo eixo x fixo.

A principal diferença qualitativa entre o comportamento das duas variáveis (T e Rn) consiste em que o saldo de radiação tem um perfil quase constante durante a noite e algo próximo a uma gaussiana durante o dia, enquanto que a temperatura varia continuamente durante dia e noite. Assim, procurou-se, numa primeira aproximação,

escolher-se o ângulo de rotação mais adequado verificando-se quando a temperatura rotacionada apresentaria um perfil que apresentasse um padrão próximo de constante durante certos intervalos de tempo, ou seja, procurou-se um perfil de temperatura rotacionada próxima à configuração gráfica da figura 19 (b).

Após as rotações próximas a 240, optou-se por trabalhar com o ângulo de 250°.

4.2 - Comparações entre as séries temporais T_z rotacionada em 250° e R_n . Para a estação seca.

As comparações entre as séries de dados geradas (T_z) e as séries de dados medidos (R_n) foram feitas, primeiramente, de forma qualitativa (por meio de comparação gráfica visual entre as duas séries) e posteriormente, de forma quantitativa (utilizando a análise de regressão linear e também o teste de kruskal-wallis).

Naturalmente há uma diferença significativa entre as escalas dessas duas variáveis, temperatura do ar e saldo de radiação. Enquanto a variável saldo de radiação R_n chega a registrar uma diferença da ordem de aproximadamente seis centenas entre valores extremos a variável temperatura do ar rotacionada em 250° em torno do eixo x atinge valores menores que três dezenas.

No intuito de comparar as séries em mesma ordem de escala, foi realizada a normalização que fornece uma maneira fácil de comparar valores que são medidos usando escalas diferentes ou diferentes unidades de medida. O valor normalizado é definido como:

$$X' = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad \text{equação 13}$$

Depois de gerada a série da temperatura rotacionada em 250° (T_z) e de aplicada a normalização nas duas séries temporais em estudo, foram plotados os gráficos de T_z e de R_n , de forma emparelhadas para compara-las qualitativamente. Com intuito de observar se há uma semelhança no comportamento dinâmico da série T_z com a dinâmica do saldo de radiação.

A seguir estão os gráficos do mês de junho de 2000, das séries geradas (T_z) e as séries de R_n , ambas normalizadas.

4.2.1 - Variáveis normalizadas, período seco.

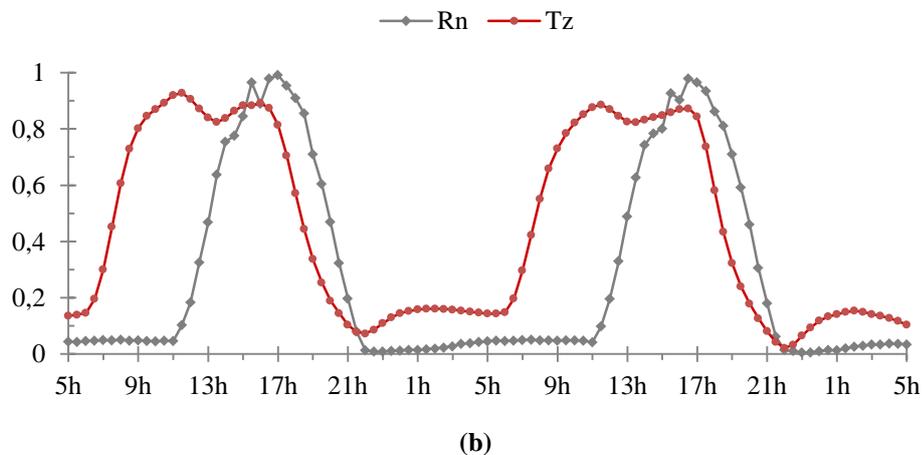
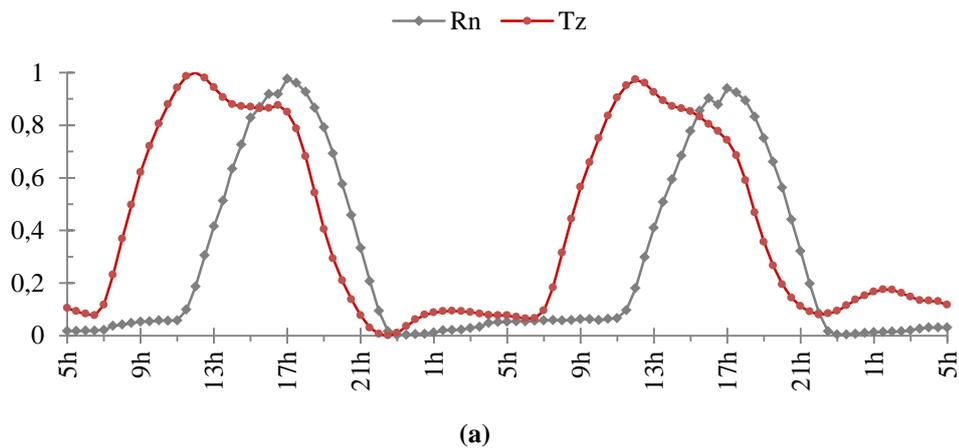


Figura 25: Perfil das variáveis R_n e T_z , normalizadas e emparelhadas. Junho de 2000 (a) e junho de 2002 (b).

Ao plotar as duas séries R_n e T_z e compará-las graficamente, observa-se claramente que há uma diferença de fase entre o T_z e R_n como ilustrado na figura 25. Nota-se também devido a parte de cima da série T_z ser mais larga que de R_n ocorre a possibilidade de se aplicar duas diferentes defasagens em uma das séries para poder colocá-las em fase. Podendo ser ajustada pelo lado esquerdo (parte ascendente do gráfico) ou pelo lado direito (parte descendente do gráfico).

Para obter uma referência exata dessa diferença entre as fases de ajustamentos entre as séries T_z e R_n foi utilizado o teste de correlação cruzada. O resultado do teste (figura 26) quantifica temporalmente a melhor correlação entre as duas séries, aplicando defasagens entre as séries a partir de um ponto de origem, sem defasagem denominado de *lag* 0.

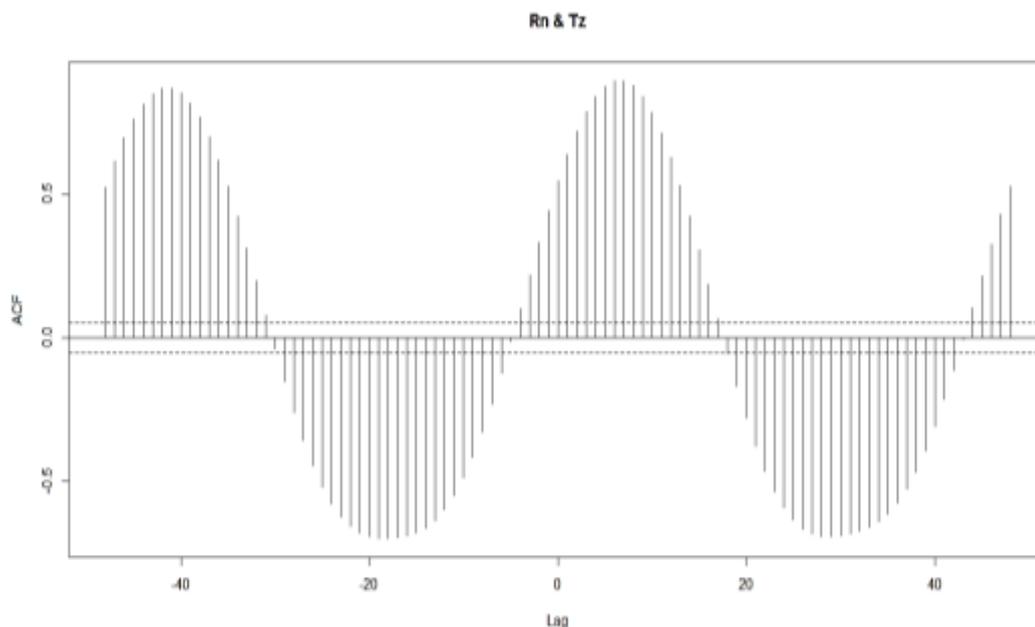


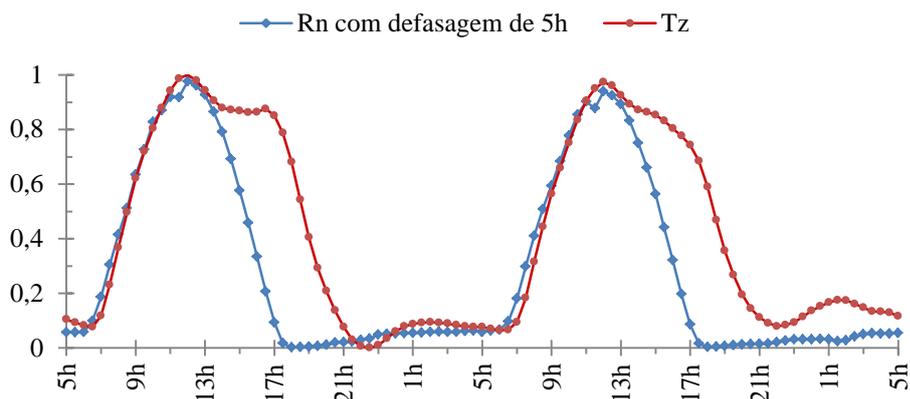
Figura 26: Correlação cruzada entre radiação líquida e T_z rotacionado em 250° .

Para realizar o teste de correlação cruzada foram utilizados 48 dados de cada uma das séries de dados (representando um dia inteiro). O teste realiza a medida de correlação entre os dados e registra a medida, em seguida defasa as séries e realiza nova medida da correlação entre os dados e guarda novo registro e assim sucessivamente até que todas as defasagens sejam testadas em torno da defasagem nula.

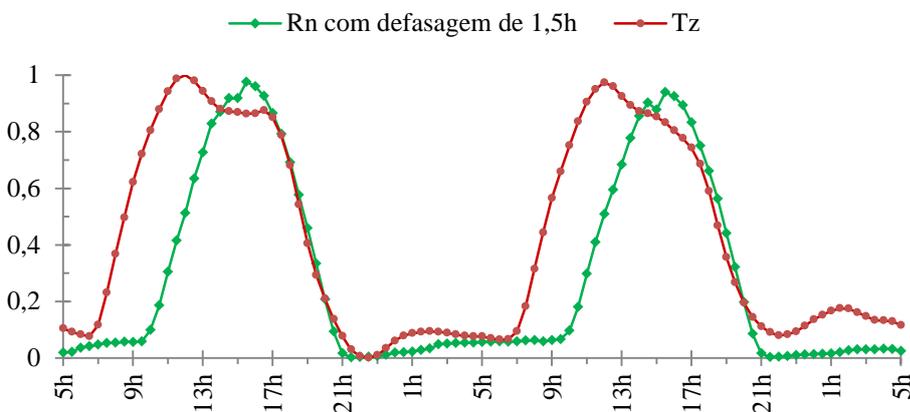
O gráfico do teste mostra no eixo horizontal as defasagens em torno do *lag* 0, tendo 48 possíveis defasagens em um sentido e mais 48 no sentido contrário (-48). E no eixo vertical a medida da correlação entre os dados, podendo essa correlação ser positiva, ou negativa ou nula.

O gráfico de correlação cruzada mostra um intervalo de sete dados entre a origem (*lag* = 0) e a máxima de correlação. Como os dados são medidos com intervalo de 30 minutos, logo o intervalo de sete dados corresponde ao tempo de três horas e meia.

Dependendo da defasagem utilizada, pode-se ajustar melhor o lado esquerdo dos picos (dados correspondentes à radiação no início do dia), ou o lado direito (corresponde ao período vespertino). Na figura 27 (a) e (b) estão os gráficos de comparação entre R_n e as séries T_z com defasagens diferentes.



(a)



(b)

Figura 27: Perfil das variáveis R_n com defasagem de 5 horas e T_z (a) e R_n com defasagem de 1,5 h e T_z (b), normalizadas e emparelhadas. Junho de 2000.

Comparando as informações dos dois gráficos (figura 27) podemos observar que o modelo, usando 5 horas de defasagem, consegue ter um bom ajuste dos dados do lado esquerdo e usando uma hora e meia de defasagem consegue ter um bom ajuste dos dados do lado direito. Essa observação corrobora com o resultado de três horas e meia do teste de correlação cruzada.

4.2.2 - Regressão linear

Baseado nessas informações, foram realizados testes de regressão linear para avaliar o ajuste das séries T_z e R_n com as duas diferentes defasagens, cinco horas de 6h a 13h (figura 28 (a)) e das 13h as 21h (figura 28 (a)) e da defasagem de uma hora e meia (figura 29).

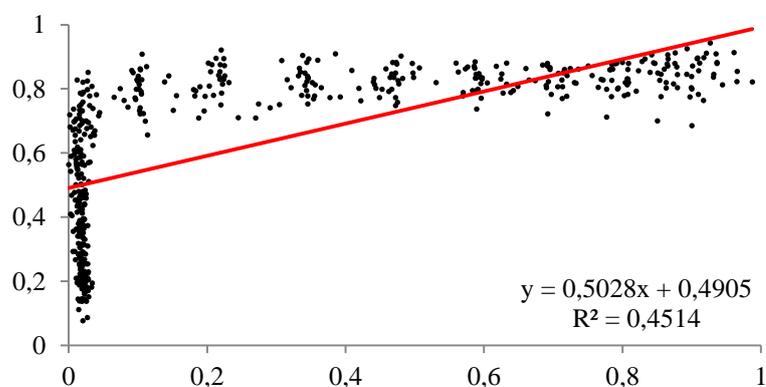
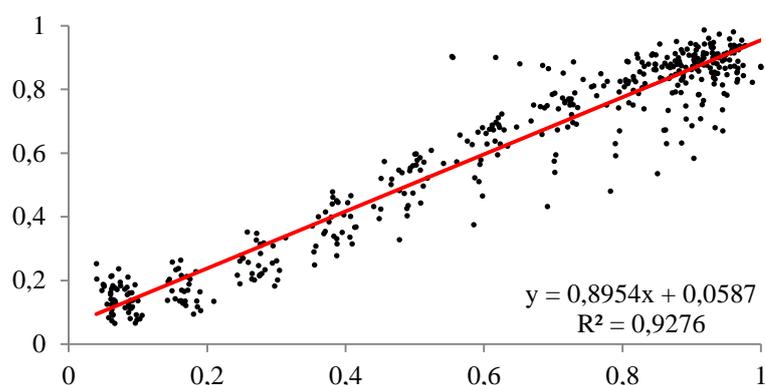


Figura 28: Regressão linear entre T_z e R_n com defasagem de cinco horas para o intervalo de 6h até as 13h (a) e entre para o intervalo de 13h até as 21h (b). Junho de 2000.

O gráfico da figura 28 (a) indica que no período entre as 6h e as 13h o T_z e o R_n com defasagem de cinco horas há um bom ajuste, obtendo um bom valor para o coeficiente de determinação de $R^2 = 0,9276$. E o gráfico da figura 28 (b) mostra que entre as mesmas duas séries não há um bom ajuste entre o período de 13h e 21 h,

com coeficiente de determinação $R^2 = 0,4514$. E é fácil perceber que a distribuição dos dados não tem a forma linear como a linha de tendência.

Este resultado demonstra que o modelo não funciona bem em todo o período do dia, utilizando a mesma defasagem temporal. Então, foi realizado o teste de regressão para o mesmo período, de 13h até as 21h, utilizando a defasagem de uma hora e meia (figura 29).

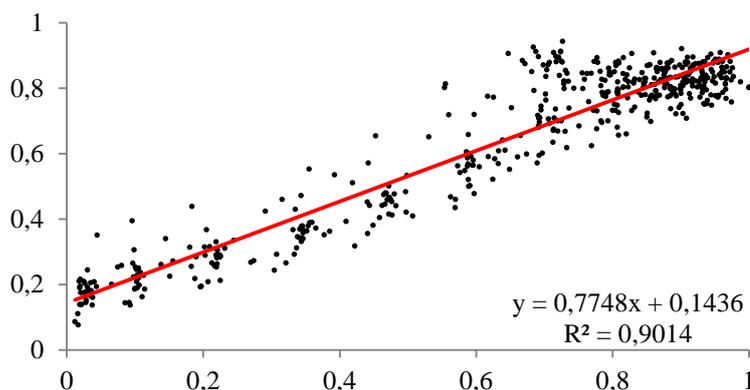


Figura 29: Regressão linear entre T_z e R_n com defasagem de uma hora e meia para o intervalo de 13h até as 21h. Junho de 2000.

O resultado do teste de regressão utilizando a defasagem de uma hora e meia mostrou que há uma boa correlação entre as séries. Obtendo valor do coeficiente de determinação de $R^2 = 0,9014$.

Esses resultados indicaram que o T_z consegue ter uma boa predição dos dados, defasando o R_n em uma hora e meia no período de 13h até as 21h, enquanto para o restante do dia o T_z tem boa predição para R_n defasado em cinco horas.

4.3 - Modelo “RnM” para Período Seco.

O ajuste final no modelo foi realizado utilizando as informações obtidas anteriormente, dos diferentes tempos de defasagens e os resultados dos testes de regressão linear. A partir de então, T_z foi renomeado para Rn Modelado (RnM).

O RnM usa a série gerada pelas rotações na temperatura e com defasagem de uma hora e meia no período de 13 horas e 30 minutos até as 21 horas. Enquanto para o resto do tempo o modelo usa a série com cinco horas de defasagem.

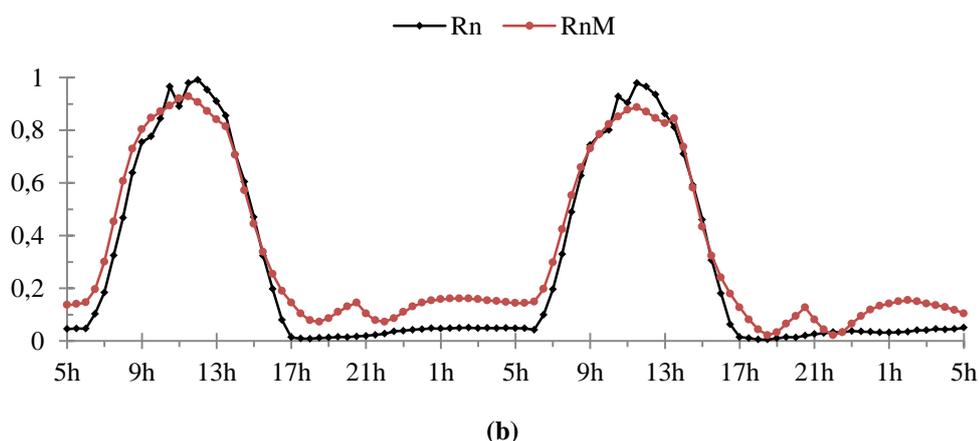
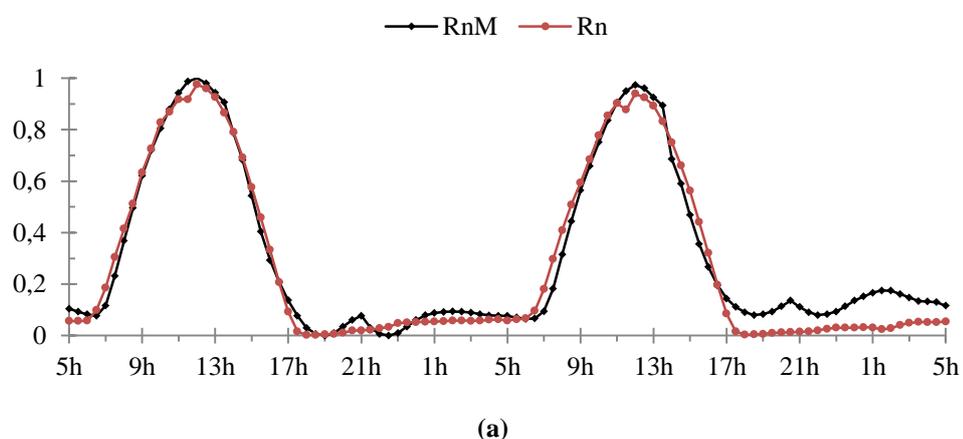
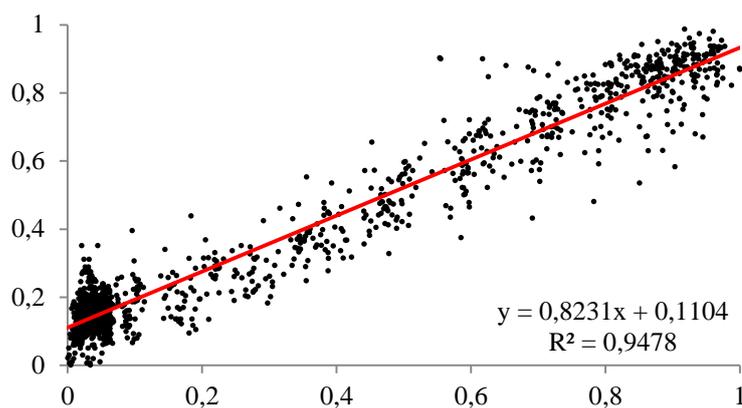


Figura 30: Perfil das variáveis Rn e RnM, emparelhadas. Junho de 2000 (a) e junho de 2002 (b).

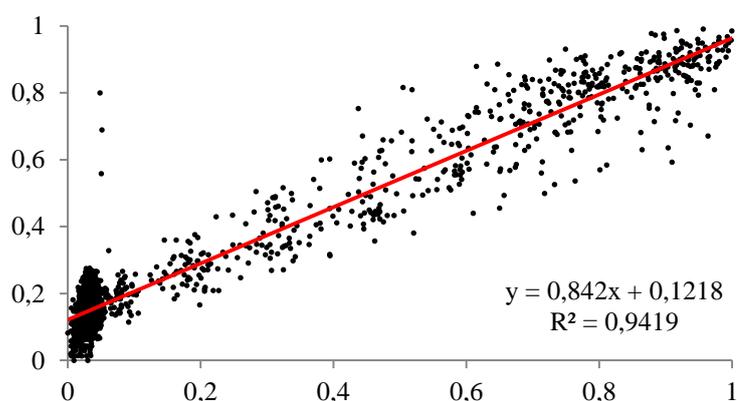
Visualmente o modelo se ajusta bem à série de Rn como mostra o gráfico da figura 31 (a) e (b). Entretanto, durante a parte noturna do dia o modelo (RnM) aponta uma

dificuldade em se ajustar perfeitamente ao Rn. Os valores do RnM neste período é quase sempre maior que os valores de Rn.

4.3.1 - Regressão linear



(a)



(b)

Figura 31: Regressão linear entre RnM e Rn para junho de 2000 (a) e junho de 2002

(b).

O teste de regressão linear aplicado entre o modelo RnM e Rn obteve um bom resultado com coeficiente de determinação $R^2 = 0,9478$, para junho de 2000 (figura 31 (a)) e um coeficiente de determinação $R^2 = 0,9419$ para junho de 2002 (figura 31 (b)). Isto significa que o modelo consegue representar aproximadamente 95% dos dados de Rn medido. No entanto, é possível perceber uma assimetria na distribuição

dos dados com grande concentração dos dados na região próxima de zero. Sendo mais dispersos pelo eixo vertical do que no horizontal.

4.3.2 - Kruskal-Wallis e *box plot*

Para complementar a análise dos dados, fim de verificar a distribuição dos dados e a correlação entre Rn e RnM, foi realizado o teste estatístico de Kruskal-Wallis e gerados gráficos de *box plot* (ou diagrama de caixas) entre as séries (figura 32).

O gráfico de caixa é constituído pela barra grossa que representa o valor da mediana, abaixo da mediana esta o segundo quartil (que constitui o limite inferior da caixa, contem os 25% dos dados mais próximos abaixo da mediana), abaixo esta o primeiro quartil que é limitado pela barra fina inferior (que é o limite inferior dos dados, que contem ou outros 25% dos dados abaixo da mediana). Acima da mediana esta o terceiro quartil (limite superior da caixa, contem os 25% dos dados mais próximos acima da mediana) e acima esta o quarto quartil, que é limitado pela barra fina superior (limite superior dos dados e contem os 25% restantes da amostra de dados superior à mediana).

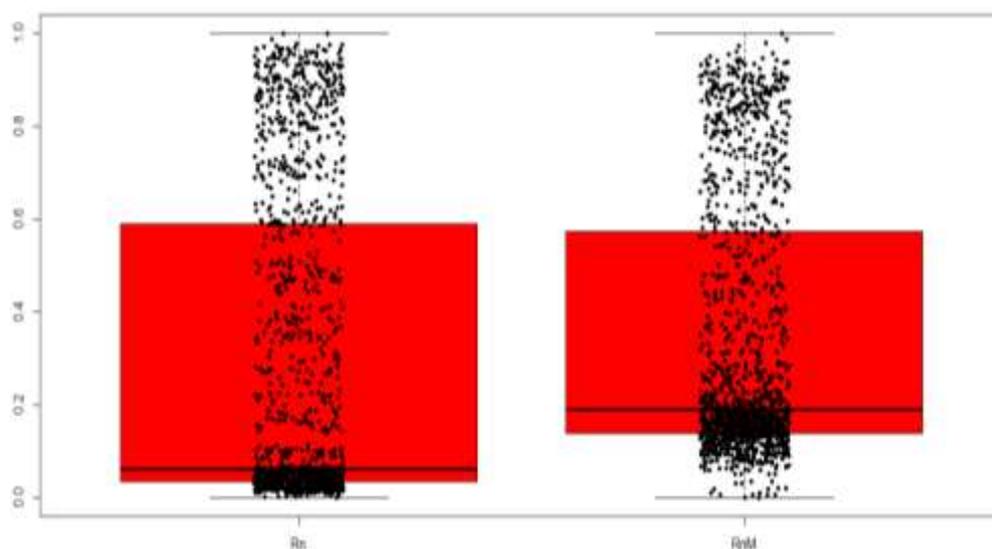


Figura 32: *Box plot* entre as séries Rn e RnM, junho de 2000.

Analisando o resultado do gráfico de *box plot* entre Rn e RnM para o mês de junho de 2000 (figura 32), pode-se obter as seguintes informações:

A mediana do RnM tem um valor ligeiramente maior que a mediana de Rn. Isso mostra que 50% dos dados de RnM está compreendido entre 0 e aproximadamente 0,2 enquanto 50% dos dados de Rn está compreendido entre 0 e aproximadamente 0,1. Isso indica que no período escuro do dia o modelo (RnM) tem uma tendência de superestimar os valores de Rn. Isso fica claro observando a assimetria das caixas.

Para o mês de junho de 2000, o teste Kruskal-Wallis obteve valores de qui-quadrado = 1357, graus de liberdade = 1187 e p-valor = 0.0004047. O valor considerado bom de qui-quadrado deve ser um valor próximo ao valor do grau de liberdade. Neste caso, há uma diferença de mais de 10% entre o valor ideal.

O p-valor (ou nível descritivo) $< 0,01$ significa uma evidência muito forte contra a hipótese nula “ H_0 ” (H_0 é a hipótese de que as séries possuem mesma distribuição).

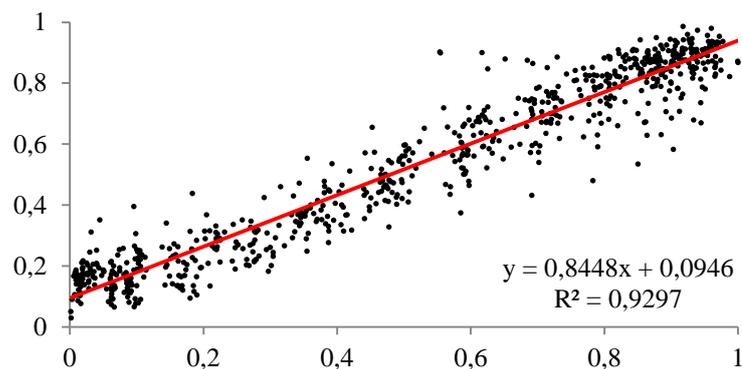
Diante desses resultados que demonstram que durante que o modelo RnM está correlacionado Rn, porem a distribuição dos dados é assimétrica denotando duas correlações distintas entre o período diurno e o período noturno. Os resultados indicaram que no período noturno há uma superestimavas do RnM em relação ao Rn.

4.3.3 - Período diurno

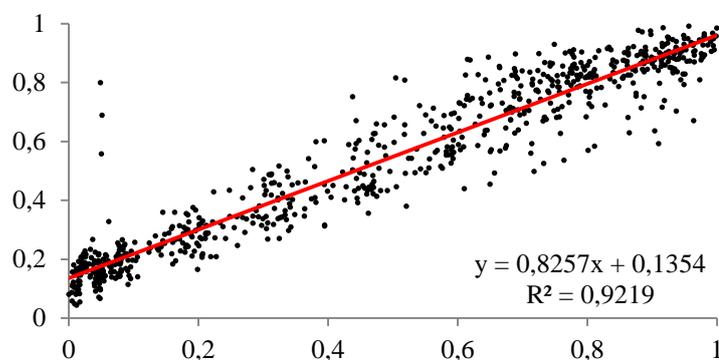
Para o período diurno foram considerados todos os dados compreendidos entre as 6h até às 18h. Depois de selecionado apenas os dados correspondentes ao período diurno foi realizado o teste de regressão linear.

A figura 33 contém os gráficos com os resultados dos testes de regressão linear aplicados entre o modelo RnM e Rn, apenas para o período diurno de junho de 2000 (a) e junho de 2002 (b).

Os resultados dos testes de regressão linear obtiveram bons para os valores para os coeficientes de determinação $R^2 = 0,9297$ (a) e $R^2 = 0,9219$ (b). Indicando que o modelo diurno consegue estimar aproximadamente 93% dos dados de Rn medidos. E que não há muita dispersão dos dados em relação a linha de tendência.



(a)



(b)

Figura 33: Regressão linear para o período diurno entre RnM e Rn para junho de 2000 (a) e junho de 2002 (b).

A seguir o gráfico de caixa de Rn e RnM no período diurno de junho de 2000.

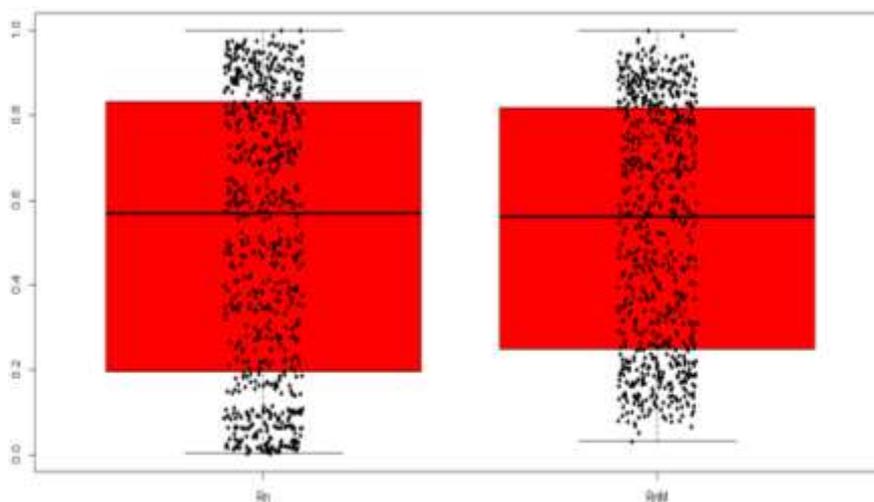


Figura 34: *Box plot* do período diurno entre as séries Rn e RnM, junho de 2000.

O gráfico de *box plot* entre Rn e RnM apenas para o período diurno para junho de 2000 (figura 34), mostra que os dados estão bem distribuídos e com distribuição muito parecidas entre si. A mediana de Rn e RnM tem praticamente o mesmo valor próximo de 0,6 e não ocorre a presença de *outliers*.

Os resultados estatísticos do teste de Kruskal-Wallis obtiveram os seguintes valores de qui-quadrado = 724, graus de liberdade = 724 e p-valor = 0.493. Estes resultados dos valores de qui-quadrado ser idêntico ao grau de liberdade e o p-valor muito próximo de 0,5, representam um valor ótimo. Os resultados indicam que há uma ótima correlação entre Rn e RnM, para o período diurno.

A seguir, o gráfico de *box plot* entre Rn e RnM apenas para o período diurno para junho de 2002 (figura 35), mostra que, assim como o gráfico da figura 34, os dados estão bem distribuídos e com distribuição muito parecidas entre si. A mediana de Rn e RnM tem praticamente o mesmo valor entre 0,5 de 0,6.

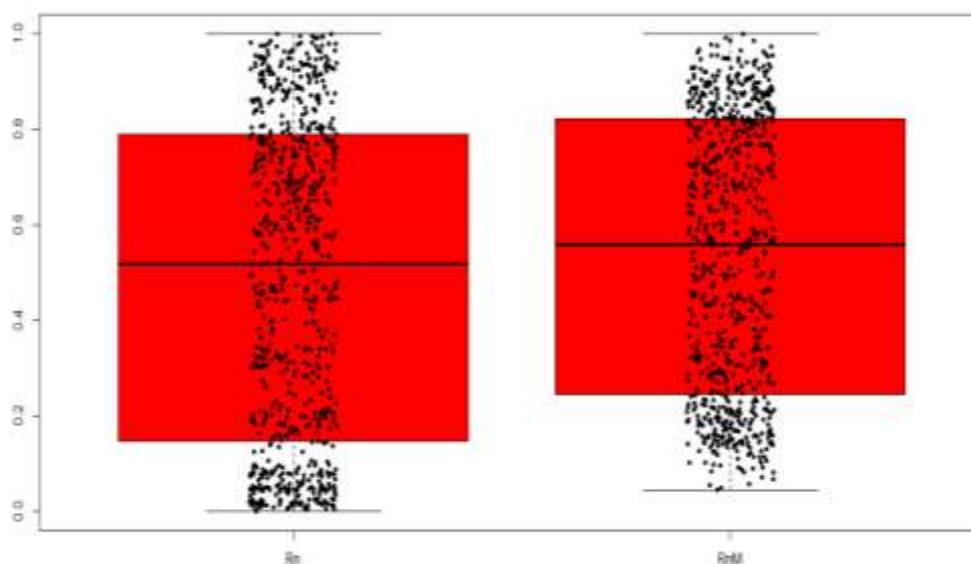


Figura 35: *Box plot* do período diurno entre as séries Rn e RnM, junho de 2002.

Os resultados estatísticos do teste de Kruskal-Wallis têm os seguintes valores de qui-quadrado = 743, graus de liberdade = 743 e p-valor = 0.4931.

Estes resultados mostram que o modelo realmente funciona bem para o período diurno.

4.4 - Comparações entre as séries temporais T_z rotacionada em 250° e R_n , para a estação chuvosa.

No período chuvoso a dinâmica do sistema muda, funcionando de forma bem diferente que no período seco. Quando se compara as séries temporais das variáveis temperatura do ar (figura 15) e saldo de radiação (figuras 16) do período seco com o período chuvoso fica fácil de observar que no período chuvoso essas variáveis apresentam sinais mais caóticos. Isso indica um sistema mais complexo, isto é, que há mais variáveis influenciando o sistema neste estado.

4.4.1 - Gráficos das variáveis normalizadas, período chuvoso.

Mesmo com a sabida diferença entre a dinâmica da floresta entre o período seco e o chuvoso, foram adotados os mesmo passo a passo que foi utilizado para a estação seca e aplicado.

Ao plotar as duas séries R_n e T_z e compará-las graficamente, pode se observar que mesmo com a maior caoticidade do sistema é possível perceber uma tendência no padrão característico do comportamento das duas variáveis e que há uma diferença de fase entre o T_z e R_n como pode ser observado no gráfico da figura 36.

Observa-se também nos dois gráficos, que T_z , mesmo com a normalização, tem amplitude de oscilação menor que R_n . O sinal de T_z demonstra ser menos caótico que R_n e que T_z apesar de aparentar mesma tendência, está deslocado para cima, não se sobrepondo exatamente sobre R_n , isso faz com que quase sempre o modelo R_nM superestime os dados de R_n .

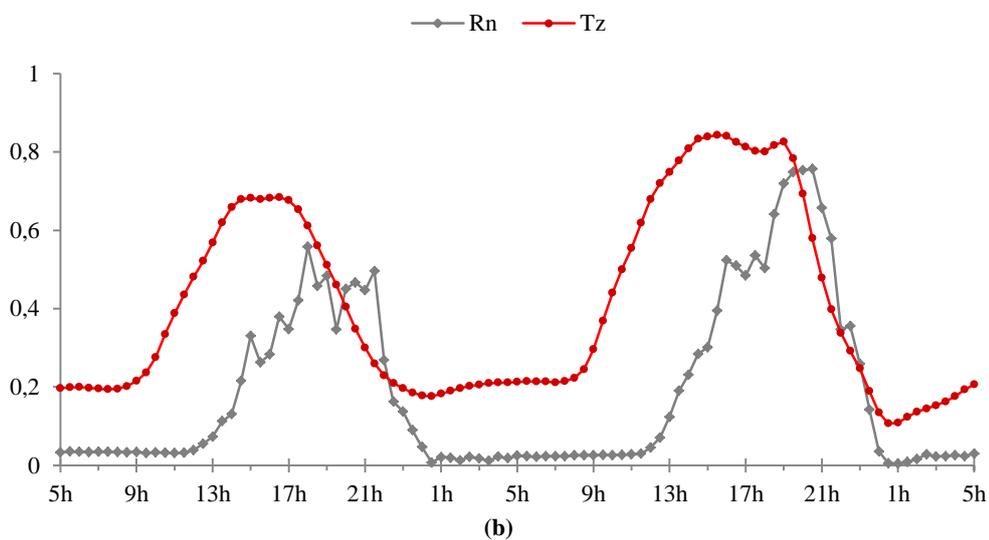
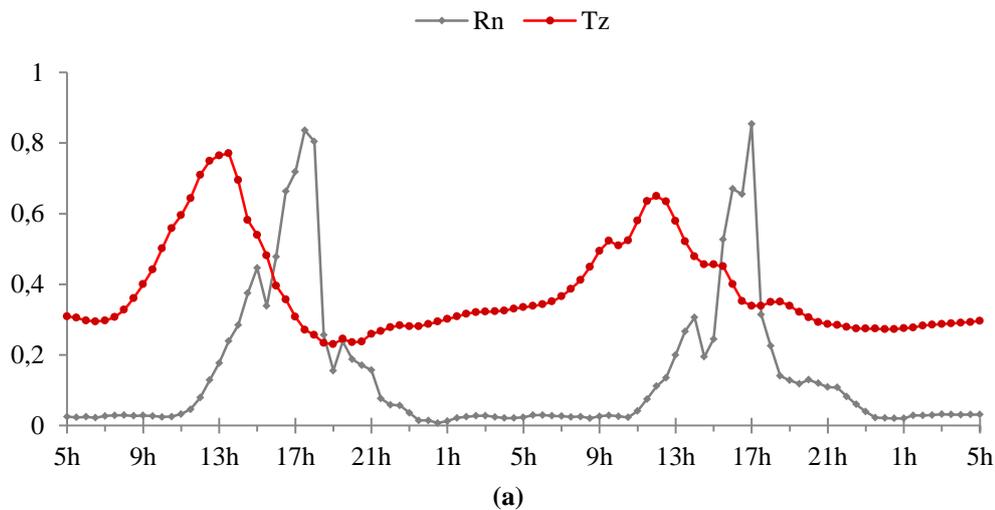


Figura 36: Perfil das duas variáveis R_n e T_z , normalizadas e emparelhadas. Janeiro de 2000 (a) e janeiro de 2002 (b).

Foi realizado o teste de correlação cruzada entre as séries R_n e T_z para a estação chuvosa (figura 37), utilizando novamente 48 dados de cada variável. O teste obteve resultado idêntico ao período seco, com mesma diferença de fases obtida para de três horas e meia.

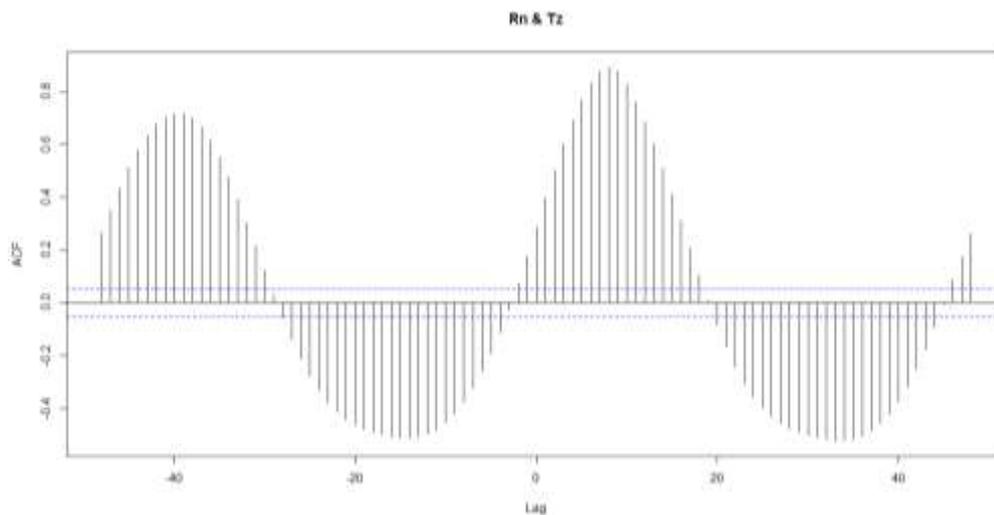
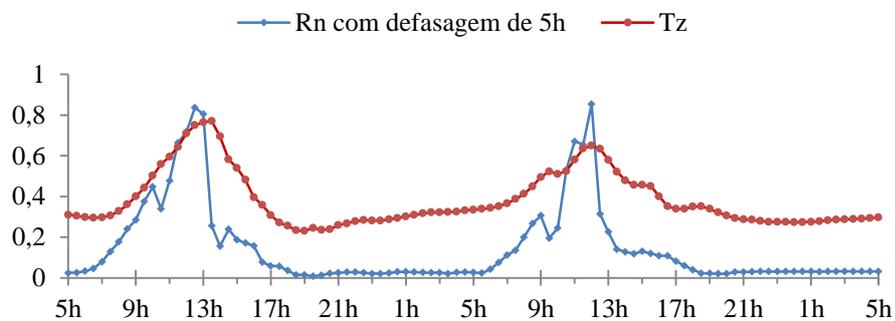
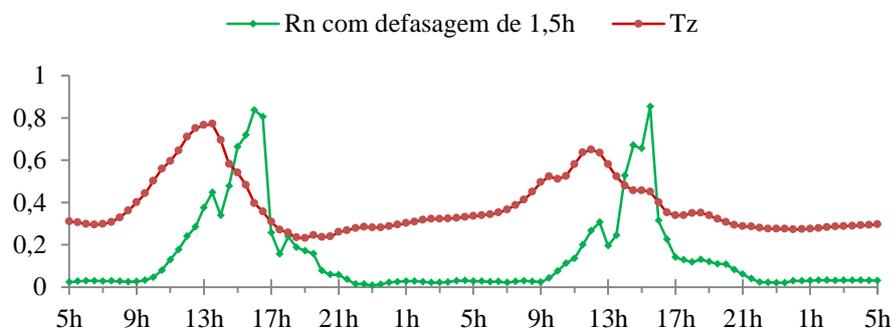


Figura 37: Correlação cruzada entre radiação líquida e T_z rotacionado em 250° , para a estação chuvosa.

Foram então aplicados os mesmos tempos de defasagens entre as séries. Rn com defasagem de 5 horas (a) e Rn com defasagem de uma hora e meia (b).



(a)

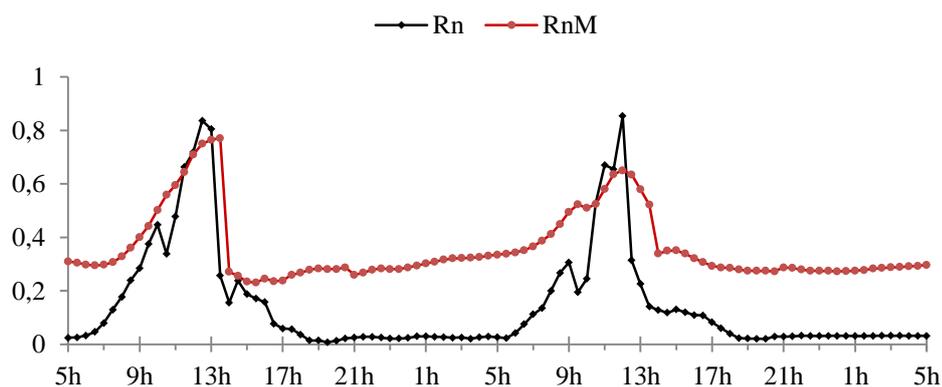


(b)

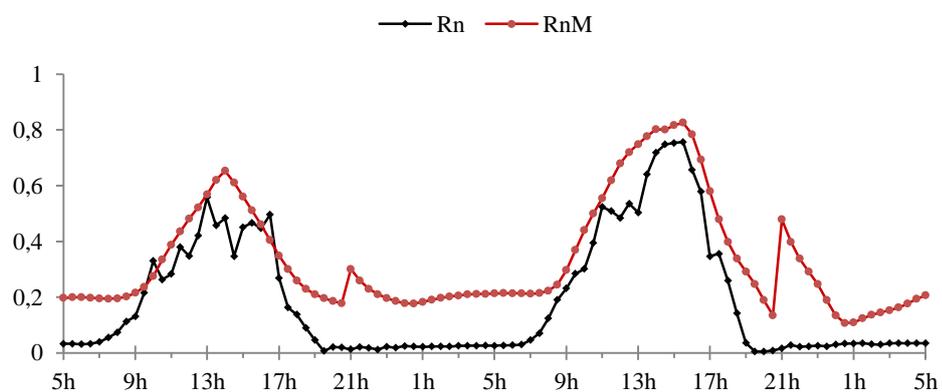
Figura 38: Perfil das duas variáveis Rn e T_z normalizadas e emparelhadas. Rn com defasagem de 5 horas (a) e defasagem de uma hora e meia (b).

4.5 - Modelo para Período Chuvoso.

O modelo para a estação chuvosa foi elaborado usando os mesmos passos e valores usados para a elaboração do modelo da estação seca.



(a)



(b)

Figura 39: Perfil das variáveis Rn e RnM emparelhadas. Janeiro de 2000 (a) e janeiro de 2002 (b).

Mesmo com a diferença na dinâmica do sistema em estações diferentes e de na estação chuvosa o sistema se comportar com maior complexidade, o modelo conseguiu captar o padrão da dinâmica do Rn. No entanto, o modelo acabou superestimando os dados na maior parte do tempo, como pode ser observado nos gráficos da figura 39 (a) e (b).

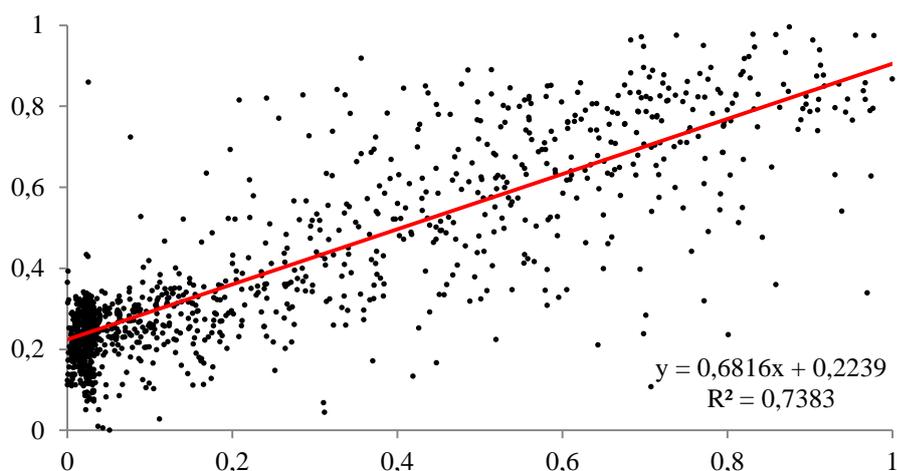


Figura 40: Regressão linear entre Rn e RnM para janeiro do ano de 2000.

O teste de regressão linear aplicado entre o modelo Rn e RnM para a estação chuvosa (figura 40) obteve um coeficiente de determinação $R^2 = 0,7383$. Este resultado da regressão nos mostra que a correlação entre as séries Rn e RnM é muito fraca com $R^2 = 0,252$ e que há dispersão muito grande dos dados em relação à linha de tendência.

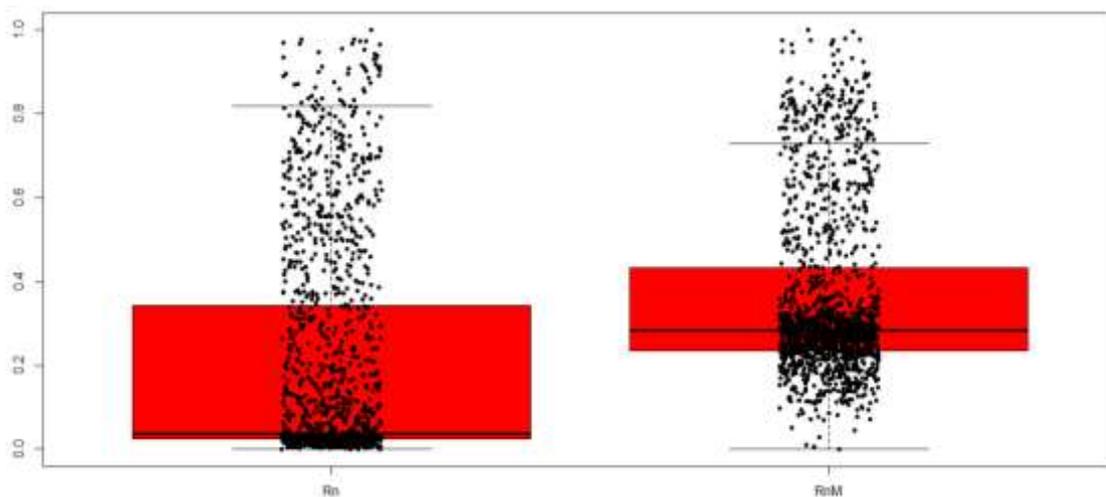


Figura 41: Box plot das séries Rn e RnM para janeiro de 2000.

A seguir o resultado do *box plot* para janeiro de 2000 (figura 41), nos mostra que a distribuição dos dados é muito diferente uma série da outra. O primeiro e segundo quartil de Rn são muito pequenos, concentram 50% da amostra entre 0 e menos de 0,1, ou seja 50% dos dados estão ocupando menos de 10% do tamanho do espaço

amostral. Enquanto os outros 50% acima da mediana estão distribuídos bem espalhadas, causando uma enorme assimetria na distribuição dos dados.

O *box plot* de RnM mostra uma distribuição bem diferente de Rn, a mediana tem valor maior que 0,3 e 50% dos dados estão compreendidos entre 0 e 0,3 aproximadamente. A assimetria da distribuição de RnM é menor que Rn. E em ambos tem a aparência de dados considerados *outliers*. Fica fácil observar pela grande diferença de valores entre as medianas isso quer dizer que o modelo acaba superestimando os dados de Rn em grande parte do tempo.

Os resultados estatísticos do teste de Kruskal-Wallis apresentaram valores de qui-quadrado = 1387,2, graus de liberdade = 1246 e p-valor = 0,003053, para janeiro de 2000. Esses resultados demonstram que os dados não são correlacionados.

4.5.1 Período diurno

A fim de testar se o modelo funciona no período diurno na estação chuvosa foi utilizado o mesmo critério que para a estação seca. Selecionado todos os dados contidos entre 6h até as 18h foi realizado então o teste de regressão linear na amostra.

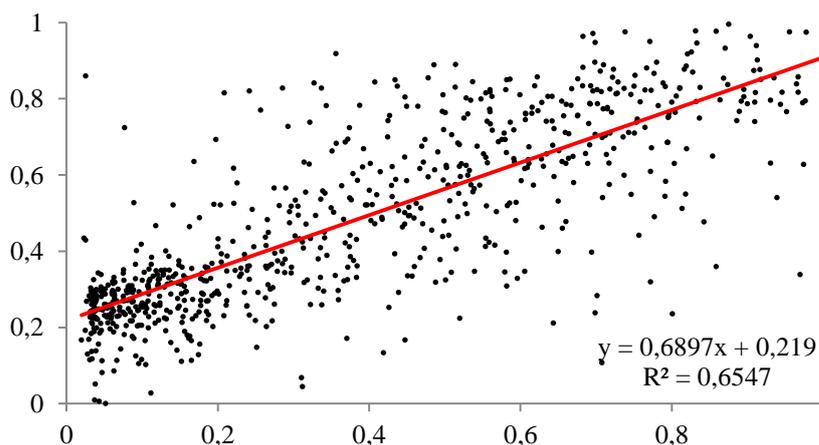


Figura 42: Regressão linear entre Rn e RnM, para o período diurno de janeiro de 2000.

O resultado da regressão linear obteve um valor baixo do coeficiente de determinação $R^2 = 0,6547$, indicando que o modelo consegue representar apenas

cerca de 65% dos dados medidos de Rn. E mostra também que as distribuições dos dados não são semelhantes.

O *box plot* apresenta resultados que confirmam que a distribuição dos dados de Rn e RnM para a estação chuvosa não é simétrica, e confirma também a tendência do modelo em superestimar os dados de Rn. Porém não aparece mais os possíveis *outliers*.

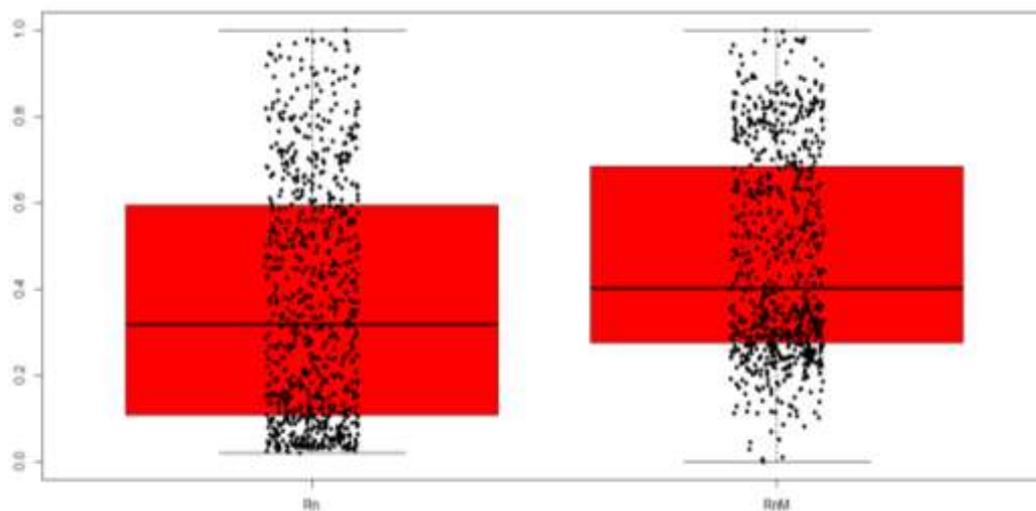


Figura 43: *Box plot* de Rn e RnM, para o período diurno de janeiro de 2000.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste trabalho indicaram que a técnica de rotação do espaço de tempos defasados apresenta grande potencialidade na simulação de informação de uma variável micrometeorológica a partir das medidas de outra. E que o Teorema de Takens se mostra válido no que diz respeito à reconstrução da relação entre tais variáveis.

De um modo geral, pode-se dizer que a temperatura guarda informação a respeito do saldo de radiação e parte significativa dessa informação pode ser resgatada a partir da técnica de rotação de séries temporais. Em particular, por exemplo, no período de seca, os valores do saldo de radiação podem ser obtidos a partir da série temporal de temperatura através do seguinte procedimento:

- 1) Construir o espaço de tempos defasados, em três dimensões, com um tempo de defasagem de 5h;
- 2) Multiplicar a matriz do atrator reconstruído pela matriz de rotação, utilizando o ângulo de 250 graus em torno do eixo x;
- 3) Tomar a projeção dos dados no eixo z, desta matriz rotacionada, obtendo nova série temporal, T_z ;
- 4) Aplicar uma defasagem de 5h, para corrigir a diferença de fase entre as séries;
- 5) Realizar uma normalização para transforma-las em mesma escala.

Após a realizações destes procedimentos, foi gerado o modelo “RnM”, que para a estação seca, se mostrou muito eficaz, principalmente durante o período diurno, como demonstram os resultados estatísticos obtidos. Com o coeficiente de determinação do teste de regressão linear aproximadamente $R^2 = 0,93$ (valor bem próximo do ideal) como mostram os gráficos da figura 33, para o teste de Kruskal-Wallis com valores de p-valor aproximadamente 0,49 e qui-quadrado idêntico ao valor do grau de liberdade (o que é um ótimo resultado) e o gráfico *box plot* mostra

uma ótima distribuição dos dados e bem semelhantes entre si como pode ser observado nos gráficos da figuras 34 e 35.

Enquanto, para o período noturno há uma tendência de o modelo “RnM” superestimar os valores medidos de radiação líquida, como pode ser visto nos gráficos da figura 30.

Isso demonstra que durante o dia a dinâmica da floresta há uma forte correlação entre as variáveis temperatura do ar e a radiação líquida, que neste período possui valores positivos e tem uma grande amplitude de oscilação. E durante o período noturno, a dinâmica da floresta é diferente, a radiação líquida contém praticamente ondas longas (infravermelho) e não oscila muito. Este fato abre a possibilidade de trabalhos futuros para realização de um ajuste no modelo para o período noturno.

Já para a estação chuvosa, os resultados estatísticos demonstram que não se pode utilizar a mesma transformação para simular com precisão considerável os dados da radiação líquida, com o coeficiente de determinação $R^2 = 0,7383$ do teste de regressão linear e os resultados do teste de Kruskal-Wallis para p-valor = 0,003053 e qui-quadrado com mais de 10% de diferença do valor do grau de liberdade, indicando assim fraca correlação entre as séries. Embora a série obtida a partir da rotação, de um modo geral, o modelo consegue representar o perfil da radiação líquida como pode ser observado nos gráficos da figura 39. Porém, a amplitude de sua oscilação é sempre menor que o saldo de radiação. Devido a isso o modelo acaba superestimando os dados de Rn.

A causa dessa fraca correlação na estação chuvosa pode ser devido à maior complexidade do sistema. Isto é, na estação chuvosa há um maior número de variáveis influenciando o sistema, ocasionando assim o aparecimento de sinais de mais variáveis na série de temperatura rotacionada.

Novamente, este trabalho abre uma possibilidade para trabalhos futuros para se fazer um ajuste no modelo que consiga simular com maior precisão os dados de saldo de radiação para a estação chuvosa.

Ademais, a técnica desenvolvida nesse trabalho permite o delineamento de outras linhas de investigação futuras, como, por exemplo, a identificação da “terceira variável”, ou seja, a segunda variável do sistema mais fortemente acoplada à temperatura, depois da radiação líquida. Isso pode ser feito investigando a série

temporal rotacionada, em 250 graus em torno do eixo x, que se configura no eixo y (T_y).

Há que se destacar que essa técnica é inédita e jamais foi utilizada empregando-se dados de variáveis reais. Os resultados obtidos nesse trabalho têm importância também para a modelagem das variáveis micrometeorológicas pertinentes para a compreensão da dinâmica de ecossistemas vegetados.

6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

ACKERLY, D. D.; THOMAS, W. W.; FERREIRA, C. A. C; PIRANI, J. R. **The forest–cerrado transition zone in southern Amazonia**: results of the 1985 Projecto Flora Amazonica Expedition to Mato Grosso. *Brittonia*. Vol. 41, p.113–128. 1989.

ABARBANEL, H. D. I; BROW, R.; SIDOROWICH, J. J.; TSIMRING, L. Sh. The Analysis of Observed Chaotic Data in Physical Systems. **Review of Modern Physics**. Vol. 65, n. 4, p.1331-1392. 1993

ARFKEN, G. **Mathematical Methods for Physicists**. Boston. Academic Press, 1985.

AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 11a ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006. 332p.

BALDOCHI, D.D.; FALGE, E.; WILSON, K.; **A spectral analysis of biosphere-atmosphere trace gas flux densities and meteorological variables across hour to multi-year time scale**. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.107, n.1, p.1-27, mar. 2001.

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. **Atmosfera, tempo e clima**. 9 ed. Bookman, 2011. 528p.

BERTALANFFY, L. V. **Teoria geral dos sistemas**. Petrópolis: Vozes, 1968.

BISCARO, G. A. **Meteorologia Agrícola Básica**. 1 ed. Cassilândia. UNIGRAF, 2007. 87p.

CAMARGO, L. H. R. **A ruptura do meio ambiente: Conhecendo as mudanças ambientais do planeta através da uma nova percepção da ciência: a geografia da complexidade**. 1 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005. 240p.

CAMPANHARO, A. L. S. de O. **ANÁLISE DE SINAIS TURBULENTOS NA COPA DA FLORESTA AMAZÔNICA: EM BUSCA DE COMPORTAMENTO CAÓTICO E ESTRUTURAS COERENTES**. São José dos Campos, 2006. 122p.

Dissertação (Mestrado) – Computação Aplicada, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

CAMPANHARO, A.S.L.O.; RAMOS, F.M.; MACAU, E.E.N.; ROSA, R.R.; BOLZAN, M.J.A.; SÁ, L.D.A. **Searching chaos and coherent structures in the atmospheric turbulence above the Amazon forest**. Phil. Trans. R. Soc. A, Vol. 366, p. 579-589, 2007.

CAPISTRANO, V. B. **Análise de Séries Temporais de Variáveis Microclimatológicas Medidas em Sinop Mato Grosso Utilizando a Teoria da Complexidade**. 2007. 47p. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá

CAPRA, F. **A teia da vida: uma nova compreensão científica dos sistemas vivos**. 6.ed. São Paulo: Cultrix, 2001. p.256.

CAPRA, F. **O ponto de mutação: A ciência, a sociedade e a cultura emergente**. São Paulo: Cultrix, 1982. p.447.

CHRISTOFOLETTI, A. **A geomorfologia**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1999. 236p.

COULSON, K. L. **Solar and terrestrial radiations: methods and measurements**. New York: Academic, 1975. 322p.

DALMAGRO, H. J. **Dinâmica da Assimilação do Carbono em Brosimum lactescens S Moore (Moraceae) na Floresta de Transição Amazônia-Cerrado**, 2009. 75 p. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá 2009.

DALMAGRO, J.H.; ALMEIDA LOBO, F.; ORTÍZ, C. E. R.; BIUDES, M. S.; NOGUEIRA, J. S.; VOURLITIS, G. L.; PINTO JUNIOR, O. B. **Trocas gasosas de uma espécie Lenhosa na floresta de transição Amazônia - cerrado**. Ciência e Natura, Vol. 33, N. 2, p. 147-165, 2011.

De PAULO, S. R.; de PAULO, I. J. C.; de DECKER. **Reconstructing the micrometeorological dynamics of the southern Amazonian transitional forest.** Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 30 p. 2015.

Do PRADO, M. F. **Modelagem Primária Da Temperatura Do Ar Em Uma Floresta De Transição Amazôniacerrado No Norte De Mato Grosso.** Cuiabá, 80 p. 2011. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental – Instituto de Física. Universidade Federal de Mato Grosso.

ECKMANN, J. P.; RUELLE, D. **Ergodic Theory of Chaos and Strange Attractors.** USA, Review of Modern Physics, Vol. 57, n. 3, p. 617-656. 1985.

FERREIRA, D. F. **Estatística Básica.** 2. Ed. rev. Lavras. Ed. UFLA, 2009. 664p

FOUCAULT, A. **O clima: história e devir do meio terrestre.** Portugal. Instituto Piaget. 1993. 303p.

FRAEDRICH, K. **Estimating the dimensions of weather and climatic attractors.** Journal of Atmospheric Science, v.43, p. 419 – 432, 1986.

FRAEDRICH, K.; LESLIE, L. M. **Estimates of cyclone track predictability.** Q. J. R. Meteor. Soc. 155, 79–92. 1989

GALLON, M. M. P. **Um estudo sobre a dinâmica de sistemas complexos a partir de séries temporais de dados microclimatológicos para uma floresta de Transição no Noroeste de Mato Grosso.** Cuiabá, 2005. 115p. Dissertação (Mestrado) - Física e Meio Ambiente, Universidade Federal de Mato Grosso.

GLEICK, J. **Caos: A criação de uma nova ciência.** 3.ed. Rio de Janeiro: Campus, 1990. 310p.

GOBER, M.; HERZEL, H.; GRAF, H. **Dimension analysis of El Niño/southern oscillation time series.** Ann. Geophys. 10, 729–734. 1992

GOMES, A. G & VARRIALE, M. C. **Modelagem de ecossistemas: uma introdução.** 2. ed. Santa Maria: UFSM, 2004. 503p.

HALLIDAY, RESNICK, WALKER. **Fundamentos de Física. Vol. 4.** 8 ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2009.

HECHT, E. **Óptica.** 2.ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002. 790 p.

HILBORN, R. C. **Chaos and Nonlinear Dynamics. An Introduction for Scientists and Engineers.** ed.2. New York: Oxford University Press, 1994. 650p.

IBGE. **Mapa de Biomas do Brasil, primeira aproximação.** Rio de Janeiro: IBGE. 2004. Acessível em www.ibge.gov.br.

LEFF, E. **Epistemologia Ambiental.** 4. ed. São Paulo: Cortez, 2006. p.159-226.

LENTINI, M; VERÍSSIMO, A; SOBRAL, L. **Fatos Florestais da Amazônia 2003.** Belém. Imazon, 110 p. 2003.

LORENZ, E. **The essence of chaos.** USA/Seattle: University of Washington Press, 1993. 227p.

LORENZ, E. Deterministic nonperiodic flow. **Journal of the Atmospheric Sciences**, Vol. 20. p. 130-141. 1963.

MALHI, Y.; WRIGHT, J.; Spatial patterns and recent trends in the climate of tropical rainforest regions. **Philosophical Transactions of The Royal Society B.** Vol. 359, N 1434, p. 311-329. 2004.

MELLO, G. J. **Análise de Séries Temporais de Variáveis Micrometeorológicas Medidas em Floresta de Cambarazal no Pantanal Matogrossense Utilizando a Teoria da Complexidade.** Cuiabá, 2010. 90p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental – Instituto de Física. Universidade Federal de Mato Grosso.

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

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil.** São Paulo: Oficina de Texto, 2007. 206 p

MIRANDA, E. J.; PRIANTE FILHO, N.; PRIANTE FILHO, P. C.; CAMPELO JÚNIOR, J. H.; SULI, G. I.; FRITZEN, C. L.; NOGUEIRA, J. de S.; VOURLITIS, G. L.. Maximum leaf photosynthetic lights response for three species in a transitional tropical Forest in Southern Amozonia. **Revista Bras. de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Vol. 8, nº 1, p. 164-167. 2004.

MONTEIRO, A. L. S.; SOUZA Jr, C. M.; BARRETO, P. G.; PANTOJA, F. L. S.; GERWING, J.J. Impactos da exploração madeireira e do fogo em floresta de transição da Amazônia Legal. **Scientia Forestalis**, n. 65, 2004. p.11-21.

MONTEIRO, L. H. A. **Sistemas Dinâmicos**. 3.ed. São Paulo, editora Livraria da Física, 2011. 670p.

MORAN, E.; OSTROM, E. (Org.). **Ecosistemas florestais: interações homem-ambiente**. São Paulo, Editora Senac; Edusp, 2009. 544p.

MORETTIN, P. A. e TOLOI, C. M. C. **Análise de Séries Temporais**. 2°.ed. São Paulo, Egard Bluncher, 2006. 538p.

MOREIRA, I. de C. Sistemas Caóticos em Física – Uma Introdução. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. Vol. 15, p. 1-19. 1993.

NICOLIS, G. e PRIGOGINE, I. **Exploring Complexity – An Introduction**. 5° ed. New York, U.S.A.: W. H. Freeman and Company, 1998. 312p.

NUSSENZVEIG, H. M. **Complexidade e caos**. 2° ed. Rio de Janeiro: editora UFRJ, 2003. 276p.

OLIVEIRA, E. L. de. **Análise da dinâmica de um pêndulo elástico com excitação vertical no suporte**. São José do Rio Preto, 2006. 68p. Dissertação (Mestrado) – Matemática Aplicada, Universidade Estadual Paulista.

OMETTO, J.C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres, 1981. 440p.

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

PAIVA NETO, A. **Visualização Robusta de Atratores Estranhos**. Rio de Janeiro, 2004. 45p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada.

PALÚ, A. E. R. **Determinação do Tempo de Defasagem Mais Adequado Para Análise de Séries Temporais de Variáveis Microclimatológicas Medidas Numa Floresta de Transição no Norte de Mato Grosso**. Cuiabá, 2008. 48p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Física – Universidade Federal de Mato Grosso.

PACKARD, N. H.; CRUTCHFIELD, J. P.; FARMER, J. D.; SHAW, R. S. Geometry from a Time Series. **Physical Review Letters**, v.45, n.9, p.712-716, 1980.

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

PICAZZIO, E. (org). **O céu que nos envolve: introdução à astronomia para educadores e iniciantes**. 1º ed. Odysseus, 285p. 2011.

PRIANTE FILHO, N.; HAYASHI, M. M. S., NOGUEIRA, J. S. de; CAMPELO JR, J. H., NUNES, P. C.; SANCHES, L.; COUTO, E. G.; HOEGER, W.; RAITER, F.; TRIENWEILER, J. L.; MIRANDA, E. J.; PRIANTE, P. C.; PEREIRA, L. C.; BIUDES, M. S.; FRITZEN, C. L.; LACERDA, M.; SULI, G. S.; SHIRAIWA, S.; 113 SILVEIRA, M.; VOURLITIS, G. L. **Comparison of the mass and energy Exchange of a pasture and a mature transitional tropical forest of the southern Amazon basin during the wet-dry season transition**. *Global Change Biology*, Urbana – IL – USA, Vol. 10, p. 863-876. 2004.

PUIG, H. **A Floresta Tropical Úmida**. São Paulo. Editora UNESP. 1998. 493 p.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. **As principais Fitofisionomias do Bioma Cerrado**. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J.F. *Cerrado: ecologia e flora*. Embrapa: Brasília – DF, 2008. 1.279p.

ROSSLER, O. E. An equation for continuous chaos. **Physics Letters**, Vol. 57A, n. 5, p. 397-398, 1976.

RUELLE, D. **Change and chaos**. 10^o ed. United States of American: Princeton University Press. 1991. 195p.

RUELLE, D. **Chaotic evolution and strange attractors: the statistical analysis of time series for deterministic nonlinear systems**. United Kingdom: Cambridge University Press, 2003. 96p.

RUELLE, D., TAKENS, F. On the nature of turbulence. **Communications in Mathematical Physics**, v.20, p.167-192, 1971.

SALGADO-LABOURIAU, M. L. **História ecológica da Terra**. São Paulo: Edgard Blücher, 1994. 306p.

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.

SILVA, C. J. **Contribuição de Folhas na Formação de Serapilheira e no Retorno de Nutrientes em Floresta de Transição no Norte do Mato grosso**. Cuiabá, 2006. 64p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Física – Universidade Federal de Mato Grosso

SOKAL, R.R.; F.J. ROHLF. **Biometry: the principles of statistics in biological research**. New York, Freeman, 1995. 887p.

STEINKE, E. T. **Climatologia Fácil**. 1^o ed. Oficina de Textos, 2012. 148p.

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

TANNUS, R.N. **Funcionalidade e Sazonalidade sobre Cerrado e ecótono Floresta Cerrado: Uma investigação com dados micrometeorológicos de energia e CO₂**. 2004. 92p. Dissertação de Mestrado, ESALQ, Piracicaba, 2004.

TAKENS, F. **Detecting strange attractors in turbulence**. In **Dynamical systems and turbulence** (eds D. A. Rand & L. S. Young). Lecture notes in mathematics, no. 898, pp. 366–381. Berlin, Germany: Springer. 1981.

TORRES, F. T. P.; MACHADO, P. J. O. **Introdução à Climatologia**. Ubá. Editora Geographica, 2008. 214p.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia**. 2ª edição. Brasília: INMET, 2001. 532p.

VOURLITIS, G. L. L.; PRIANTE FILHO, N.; HAYASHI, M. M. S.; NOGUEIRA, J. de S.; CASEIRO, F. T.; e CAMPELO JR, J. H. Seasonal variations in the net ecosystem CO₂ exchange of a mature Amazonian tropical transitional forest (cerradão). **Functional Ecology** Vol. 15, p. 388-395. 2001.

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, nº 6, p. 30-1 - 30-11. 2002.

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. e ALMEIDA LOBO, F. **The sensitivity of diel CO₂ and H₂O vapor exchange of a tropical transitional forest to seasonal variation in meteorology and water availability**. Earth Interactions. Vol. 9, p. 9-27. 2005.

WALTER, B. M. T. **Fitofisionomias do bioma cerrado: síntese terminológica e relações florísticas**. Brasília, 2006. 389 p. Tese (doutorado) – Instituto de ciências Biológicas – Universidade de Brasília.

YANG, Q.; ZHANG, K.; CHEN, G. **Hyperchaotic attractors from a linearly controlled Lorenz system**. Nonlinear Analysis: Real World Applications, V. 10, June 2009, p. 1601-1617, ISSN 1468-1218.