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

CARACTERIZAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO NO PANTANAL MATO-GROSSENSE FUNDAMENTADA PELA TEORIA DOS SISTEMAS COMPLEXOS

LUCIENE DE MELLO TAQUES

Prof^a. Dr^a. IRAMAIA JORGE CABRAL DE PAULO Orientadora

Cuiabá, MT dezembro/2017

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

CARACTERIZAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO NO PANTANAL MATO-GROSSENSE FUNDAMENTADA PELA TEORIA DOS SISTEMAS COMPLEXOS

LUCIENE DE MELLO TAQUES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Física Ambiental.

Prof^a. Dr^a. IRAMAIA JORGE CABRAL DE PAULO Orientadora

Cuiabá, MT dezembro/2018

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.



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: · CARACTERIZAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO NO PANTANAL MATO-GROSSENSE FUNDAMENTADA PELA **TEORIA DOS SISTEMAS COMPLEXOS**

AUTORA: LUCIENE DE MELLO TAQUES

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 20 de dezembro de 2017, pela comissão julgadora:

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

Prof. Dr. João Basso Marques **Examinador Interno** Programa Nacional de Pós Doutorado - CAPES Centro Universitário de Várzea Grande

Carle Carlo Ralph De Musis

Examinador Interno Universidade de Cuiabá - UNIC

heia da situa tavanes

Profa. Dra. Andréia da Silva Tavares **Examinadora Externa** UNIVAG

DEDICATÓRIA

A Benedita Fernandes de Mello, minha mãe, pelo amor incondicional e exemplo de vida.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela concessão da bolsa e incentivo à pesquisa;

A Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-graduação em Física Ambiental pelo apoio científico concedido;

A prof^a Dra. Iramaia Jorge Cabral de Paulo, pela orientação, apoio, confiança, companheirismo e amizade, que possibilitaram o desenvolvimento desta dissertação;

Ao prof. Dr. José de Souza Nogueira, Coordenador do Curso de Pós-Graduação, pelo empenho na criação e andamento do curso, bem como, pelos conselhos e incentivo para persistir e concluir esta etapa;

Ao prof. Dr. Sérgio Roberto de Paulo, pelas orientações e paciência;

Aos amigos e colegas da Pós-Graduação em Física Ambiental, pelos momentos de descontração, alegria e companheirismo, em especial a: Juliana Barbosa da Silva Lotufo, Bruno Santos Abdalla, Elio Santos Almeida Junior, Daniela Roberta Borella, Lucas Douglas Rothmund, Luís Philippe de Arruda Lima, Heloisa Agnes Bodnar Massad, Flavia Regina Pereira Santos, Acabias Marques Luiz, Dalila Morgana de Souza Mützenberg, Danielle Cristine Stenner Nassarden, Pablinne Cynthia Batista da Silva e Silva, Keylyane Santos da Silva, Lucas Peres Angelini, Larissa Leite Pavão e Vagner Marques Pavão;

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso por compartilharem seus conhecimentos, contribuindo para o desenvolvimento deste trabalho;

A Cesário, Soilce e Juliana pela colaboração nos serviços da secretaria que auxiliam o desenvolvimento do Programa;

A Jô por realizar um excelente serviço e contribuir para um ambiente limpo e agradável;

A minha família pelo total apoio nos momentos difíceis, em especial a minha mãe Benedita Fernandes de Mello e minha irmã Laura de Mello Taques;

E a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho;

A Deus pela infinita bondade;

EPÍGRAFE

"Bendito seja Deus, que não rejeita a nossa oração, e nem desvia de nós a sua misericórdia".

Salmo 66:20

LISTA DE FIGURAS i LISTA DE TABELASii LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOSiii RESUMOiv ABSTRACT v 3. 4. 4.2 Comparação entre os resultados de evapotranspiração entre o Pantanal Mato-5. 6.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: estruturas fractais na natureza (a) brócolis romanesco; (b) bifurcações de rios; (c) árvores; (d) vasos sanguíneos
Figura 2: espaço dinâmico do pêndulo ideal 12
Figura 3: Trajetória no espaço de fase de um pêndulo13
Figura 4: atratores: pontual, periódico, torus e estranho 14
Figura 5: Atrator de Lorenz 16
Figura 6: Atrator caótico obtido por integração numérica do modelo de Rössler 18
Figura 7: Reconstrução do atrator de Rössler por meio de defasagem de série temporal
Figura 8: Localização da área de estudo25
Figura 9: gráfico de informação mútua28
Figura 10: gráfico log C por log r para os períodos de: seca (a); enchente (b); cheia (c) e vazante (d)
Figura 11: comportamento da dimensão de correlação (d) em função da dimensão de imersão (n), dos períodos de: seca (a), enchente (b), cheia (c), vazante (d)30
Figura 12: atrator reconstruído da variável evapotranspiração para os períodos de: seca (a), enchente (b), cheia (c), vazante (d)
Figura 13: comportamento da dimensão de correlação (d) em função da dimensão de imersão (n), da variável evapotranspiração na Reserva Jaru no período úmido (a) e período seco (b); em Sinop no período úmido (c) e período seco (d)
Figura 14: Atrator reconstruído para a variável evapotranspiração na Reserva Jaru no período úmido (a) e período seco (b); em Sinop no período úmido (c) e período seco (d) 34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Equipamentos utilizados para medição do saldo de radiação (Rn), da radiação solar incidente (Rg), fluxo de calor no solo (G), temperatura e umidade relativa do ar (Ta/UR) e suas respectivas alturas de instalação na área de estudo
Tabela 2: Comparativo da dimensionalidade dos atratores da evapotranspiração entre osperíodos sazonais no Pantanal Mato-grossense
Tabela 3: Comparativo da dimensionalidade dos atratores da evapotranspiração entre o Pantanal Mato-grossense, floresta de transição Amazônia-Cerrado (Sinop) e Amazônia (Reserva Jaru)

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- *Cp* Calor específico em pressão constante
- *d* Dimensão de correlação
- E Evaporação
- ETr Evapotranspiração real
- ETP Evapotranspiração Potencial
- ETo Evapotranspiração de Referência
- ETc Evapotranspiração de Cultura
- ET Evapotranspiração
- F Processo fotossintético
- FAO Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
- G Fluxo de calor no solo
- H Fluxo de calor sensível
- IPCC Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
- J Joule
- K kelvin
- km Quilômetro
- KPa kilopascal
- I Informação mútua
- LE Fluxo de calor latente
- m Metros
- mm Milímetros
- *n* Dimensão de imersão
- β Razão de Bowen
- β Dimensões da região do objeto de estudo
- ρ Número de Rayleigh
- σ Número de Prandtl
- λ Calor latente de vaporização
- τ Tempo de defasagem
- ΔT Diferença de temperatura
- Δe Diferença de pressão de vapor da água
- ppt Precipitação total

- Rg Radiação solar incidente
- Rn Saldo de radiação
- SET Teoria da Endossimbiose Sequencial
- T Temperatura do ar
- T Transpiração
- g Grama
- °C Celsius
- UR Umidade relativa do ar
- Wm⁻² Watts por metro quadrado

RESUMO

TAQUES, L. M. **Caracterização da evapotranspiração no Pantanal Mato-grossense fundamentada pela Teoria dos Sistemas Complexos.** Cuiabá, 2018. 58f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

O objetivo deste trabalho é realizar a caracterização da evapotranspiração em uma área de inundação periódica no Pantanal Mato-grossense, fundamentada pela Teoria dos Sistemas Complexos. Os dados de evapotranspiração do Pantanal foram coletados entre março de 2012 a abril de 2013 por sensores instalados em uma torre de 28 m de altura, localizada na região da Baia das Pedras, município de Poconé, Mato Grosso, Brasil. O utilizado visa reconstruir os atratores característicos método da variável evapotranspiração do Pantanal Mato-grossense dos períodos de seca, enchente, cheia e vazante, determinando sua dimensionalidade: dimensão de correlação da série temporal (d) e dimensão de imersão no espaço de fase (n), comparando-os com resultados obtidos em dois ecossistemas distintos: floresta de transição Amazônia-Cerrado (Sinop) e Amazônia (Reserva Jaru) nos anos de 2007 e 2008 respectivamente. Os resultados mostram que o Pantanal Mato-grossense, do ponto de vista da evapotranspiração é um ecossistema bem-comportado. O período em análise não mostrou uma tendência estocástica e sim um comportamento que tende ao determinismo, com os quatro períodos sazonais apresentando pouca diferença em relação à dimensionalidade. Nota-se uma diferença na dinâmica da evapotranspiração entre o Pantanal Mato-grossense, a floresta de transição Amazônia-Cerrado (Sinop) e a Amazônia (reserva Jaru) em relação à dimensionalidade dos atratores reconstruídos para os períodos seco e úmido.

Palavras-chave: fluxo de calor latente (LE), ecossistema pantaneiro, sistemas fora do equilíbrio

ABSTRACT

TAQUES, L. M. Characterization of the evapotranspiration in the Mato Grosso Pantanal based on Complex Systems Theory. Cuiabá, 2018. 58f. Dissertation (Master's Degree in Environmental Physics) - Postgraduate Program in Environmental Physics, Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso.

The objective of this work is to characterize evapotranspiration in a periodic flood area in the Mato Grosso Pantanal, based on Complex Systems Theory. The Pantanal evapotranspiration data were collected between March 2012 and April 2013 by sensors installed in a 28 m high tower, located in the Baia das Pedras region, in the municipality of Poconé, Mato Grosso, Brazil. The method used is to reconstruct the characteristic attractors of the evapotranspiration variable of the Pantanal Mato Grosso from drought, flood, flood and ebb periods, determining its dimensionality: correlation dimension of the time series (d) and dimension of immersion in the phase space (n), comparing them with results obtained in two distinct ecosystems: Amazon-Cerrado transition forest (Sinop) and Amazonia (Reserva Jaru) in the years 2007 and 2008 respectively. The results show that the Mato Grosso Pantanal from the point of view of evapotranspiration is a wellbehaved ecosystem. The period under analysis did not show a stochastic tendency but a behavior that tended to determinism, with the four seasonal periods showing little difference in relation to dimensionality. There is a difference in the dynamics of evapotranspiration between the Pantanal Mato Grosso, the Amazon-Cerrado transition forest (Sinop) and the Amazon (Jaru Reserve) in relation to the dimensionality of the attractors reconstructed for dry and humid periods.

Keywords: latent heat flux (LE), pantaneiro ecosystem, systems out of balance

1. INTRODUÇÃO

1.1. PROBLEMÁTICA

A maior planície inundável do planeta, o Pantanal, está localizada no centro da América do Sul, nos estados brasileiros de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul além de compreender parte do Paraguai e Bolívia, onde recebe o nome de Chaco. Apresenta variação sazonal no nível da água presente na superfície do solo devido à baixa drenagem proveniente da sua topografia e solo argiloso, tais características modelam a paisagem, atuando como um filtro ao estabelecimento e desenvolvimento da vegetação.

O Pantanal Mato-grossense possui quatro períodos sazonais distintos: seca (de junho a setembro), enchente (de outubro a dezembro), cheia (de janeiro a março) e vazante (abril e maio). A variação temporal no nível d'água, denominada de pulso de inundação, afeta diretamente a distribuição e abundância das espécies. As plantas são submetidas a um elevado estresse hídrico, seja pela falta ou pelo excesso de água. Outros fatores como alterações na superfície do solo provocadas por perturbações antrópicas ou naturais e monodominância de espécies invasoras como o Cambará (*Vochysia divergens* Pohl) tem ameaçado a biodiversidade desse ecossistema.

A capacidade que o Pantanal tem em manter a diversidade de espécies diante de condições ambientais tão adversas, tem despertado o interesse científico. Dentre os processos que ocorrem na interfase biosfera-atmosfera, a evapotranspiração, caracterizada pela perda de água pela transpiração das plantas e evaporação do solo através de sua superfície, tem sido objeto de interesse da área científica por ser um componente importante no ciclo hidrológico, com provável influência no microclima do ecossistema pantaneiro, portanto deve ser melhor analisada.

1.2. JUSTIFICATIVA

Assim como os demais ecossistemas, o Pantanal Mato-grossense é um sistema aberto, ou seja, possui trocas permanentes de fluxo de energia, matéria e movimento com o meio. Essas características favorecem a pesquisa científica voltada ao comportamento de variáveis climatológicas como a temperatura, umidade, precipitação, dentre outras, que podem ser melhor compreendidas através da Teoria dos Sistemas Complexos, que tem sido aplicada com êxito em estudos sobre os sistemas abertos.

A evapotranspiração, enquanto processo de transferência de vapor d'água para a atmosfera a partir de superfícies vegetadas e úmidas em biomas sazonalmente inundáveis

como o Pantanal constitui parte importante na compreensão da interação biosferaatmosfera, fornecendo subsídios para a conservação biológica desse ecossistema, mesmo considerando a inevitável ação antrópica.

Este estudo tem como objetivo geral caracterizar a sazonalidade da evapotranspiração, uma das principais variáveis na caracterização do microclima no Pantanal Mato-grossense, fundamentada pela Teoria dos Sistemas Complexos.

Especificamente objetivou-se:

- a) Sistematizar os dados de evapotranspiração coletados pela torre instalada na Baia das Pedras;
- b) Caracterizar a sazonalidade da evapotranspiração na área de estudo nos quatro períodos sazonais: enchente, cheia, vazante e seca;
- c) Reconstruir os atratores característicos para cada período sazonal, determinando sua dimensionalidade: dimensão de correlação da série temporal (*d*) e dimensão de imersão no espaço de fase (*n*);
- d) Realizar um comparativo entre os resultados de evapotranspiração do período seco e úmido, obtidos no Pantanal Mato-grossense e em dois ecossistemas distintos (floresta de transição Amazônia-Cerrado e Amazônia).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.2. PANTANAL

O Pantanal é a maior zona úmida de água doce sazonalmente inundável do planeta, localizado no centro da América do Sul (Junk et al., 2006; Zeilhofer, 2006; Gonçalves et al., 2011). Cobre aproximadamente 150.000 km² da Bacia do Alto Rio Paraguai e seus tributários, com 65% de seu território no estado de Mato Grosso do Sul e 35% no Mato Grosso, além de uma parcela menor que se estende em áreas da Bolívia e Paraguai, onde é conhecido como Chaco (Haase, 1999; Castelnou et al., 2003; Brasil, 2010). Ao utilizar como critério a inundação e o relevo, Silva & Abdon (1998) dividem a área do Pantanal em onze sub-regiões: Cáceres, Poconé, Barão de Melgaço, Paraguai, Paiaguás, Nhecolândia, Abobral, Aquidauana, Miranda, Nabileque e Porto Murtinho.

Com uma extensão aproximada de 500 km de Norte a Sul, e 300 km de Leste a Oeste, o Pantanal é composto por duas áreas que apresentam condições diversas em relação aos recursos naturais: o Planalto e as Planícies (Gonçalves et al., 2011). A declividade da planície é pouco expressiva: em média, 2 a 3 centímetros por km de Norte a Sul, sendo ainda menor de Leste para Oeste. Tal característica deu origem a um complexo sistema de cheias e vazantes dos rios, com baixa velocidade de escoamento das águas, influenciando de forma direta os fenômenos biológicos e ecológicos desse ecossistema (Brandão et al., 2011). A baixa declividade da planície faz com que a água precipitada nas cabeceiras do rio Paraguai tenha um escoamento lento, podendo levar mais de 4 meses para atravessar todo o Pantanal (Castelnou et al., 2003).

Deve ser considerada também a área de influência sobre o Pantanal, com quase o dobro do seu tamanho, localizada nas planícies e serras de Mato Grosso do Sul, Mato Grosso e da Bolívia. Essa região produz grande parte dos sedimentos que hoje preenchem a depressão pantaneira, assim como os nutrientes que garantem sua riqueza biológica (Brandão et al., 2011).

O processo de inundação sazonal é dividido em quatro estações distintas: enchente (período intenso de chuvas na região), cheia (período em que o Pantanal se transforma em um imenso alagado onde os rios, banhados e lagoas se misturam), vazante (quando as águas passam a baixar e correr para os leitos dos rios) e seca (período onde a água fica restrita aos leitos dos rios ou aos banhados e lagoas) (Prado et al., 1994; Rebellato & Nunes da Cunha, 2005). O pulso da inundação é o fator ecológico que determina os padrões e

processos no Pantanal, segue um ciclo anual monomodal (comportamento único), com amplitudes que variam entre 2 e 5 metros e com duração de 3 a 6 meses, onde a extensão média da área alagada pode chegar à 50.000 km² (Harris et al., 2005; Brasil, 2010; Gonçalves et al., 2011). Tal processo causa mudanças físicas, químicas e biológicas nos solos, interferindo na disponibilidade de nutrientes (Pezeshki & Delaune, 2012; Kirk, 2004). A concentração de nutrientes em solos submersos tende a apresentar um aumento inicial, seguido por uma redução e posterior estabilização conforme a duração da inundação (Lima et al., 2005).

O Pantanal pertence à categoria de zonas úmidas temporárias sujeitas a um pulso de inundação monomodal previsível. Este tipo de zona úmida é muito comum em regiões tropicais e subtropicais, com precipitações fortemente sazonais (Junk et al., 2006). Existem diferenças acentuadas entre as porções Norte e Sul do Pantanal: o regime de enchentes e suas flutuações é maior no Norte. Os picos de enchentes produzidos pela descarga do rio Paraguai no Sul ocorrem 4 meses mais tarde do que os picos de chuva nos rios, de modo que as inundações são causadas principalmente pelo transbordamento dos rios e não por precipitações, com exceção de alguns pontos específicos, onde a precipitação local também pode produzir inundações menos expressivas (Hamilton et al., 1996; Gonçalves et al., 2011).

O clima desta região é classificado como úmido tropical com sazonalidade marcada entre os períodos de inverno e verão (Koppen, 1948). O verão, de novembro a abril é caracterizado por altas temperaturas (com média em torno de 34° C) sendo também a estação com o maior precipitação. No inverno, a precipitação diminui, fazendo com que essa estação seja muito seca (De Musis et al., 1997; Arieira et al., 2011). Nesse período, a água tende a ficar restrita aos leitos dos rios, banhados e lagoas localizadas em porções baixas da planície. A umidade relativa média mensal no período chuvoso é de cerca de 85% e pode cair abaixo de 60% durante o período de seca (Schwerdtfeger et al., 2014).

O regime de chuvas no Pantanal determina também uma alternância nas condições do solo, visto que grande parte permanece submerso no verão e exposto e seco no inverno. Apresentam uma ligação com a natureza do material de origem e com os processos de deposição e sedimentação (Coringa et al., 2012). De acordo com Fernandes et al. (2007), geologicamente, os solos da região pantaneira desenvolveram-se a partir de sedimentos inconsolidados arenosos, argilosos e orgânicos, que foram depositados ao longo do período Quaternário. Apresentam uma composição predominantemente argilo-arenosa. Os processos pedológicos estão associados ao hidromorfismo, apresentando

características diferenciadas, desde a extrema pobreza em bases trocáveis à saturação em sódio bastante elevada, o que limita seu uso para o cultivo (Santos et al., 1997).

O Pantanal dispõe de um mosaico de ambientes aquáticos, campos inundáveis, florestas ripárias, savanas (cerrados), cerradão, floresta decidual, e uma grande parte de savanas e florestas pioneiras monodominantes, com aproximadamente 2.000 espécies (Harris et al., 2005; Pott et al., 2011). Aproximadamente 5% das espécies de árvores vivem exclusivamente em áreas de inundação prolongada; 30% são restritas às áreas raramente inundadas; e 65% são amplamente distribuídas dentro do gradiente de inundação do Pantanal (Nunes da Cunha & Junk, 2001).

Sofre influência de grandes sistemas naturais (biomas) da América do Sul: o Cerrado do Brasil Central (englobando desde campos limpos até matas ciliares), Floresta Amazônica (em especial ao longo do rio Paraguai), Chaco Paraguaio/Boliviano e Mata Atlântica (Harris et al., 2005; Pott et al., 2011). Tais influências determinam a origem da flora do ecossistema pantaneiro. Devido às diversas condições ambientais da planície, que favorecem a presença de elementos com necessidades ecológicas distintas, o surgimento de espécies endêmicas (exclusivas) ao sistema fica comprometida, sendo assim, poucas espécies são genuinamente pantaneiras (Brandão et al., 2011).

O Pantanal brasileiro apresenta diversos tipos de vegetação lenhosa, sendo a maior parte delas monodominante, como por exemplo o Acurizal (*Attalea phalerata Mart*), o Cambarazal (*Vochysia divergens* Pohl) e o Carandazal (*Copernicia alba Morong*) (Damasceno-Junior et al., 2005). Boa parte dessas espécies toleram prolongados períodos de inundação, demonstrando uma intrigante capacidade de adaptação diante de condições potencialmente estressantes (Parolin & Wittmann, 2010). Estudos demonstram que a *Vochysia divergens* Pohl, por exemplo, é capaz de expandir sua distribuição durante o período úmido, mas restringe-se no período plurianual de seca por não tolerar danos causados principalmente pelo fogo, extremamente comum nesse período, seja por causas naturais ou antrópicas (Sanches et al., 2011).

A fauna do Pantanal é composta por espécies do Cerrado do Brasil Central e por espécies do Chaco. Embora alguns animais avancem pela planície, grande parte das espécies presentes no Chaco ficam restritas aos limites ocidentais do Pantanal. São registradas também espécies amazônicas em parcelas da região setentrional limítrofe ao Pantanal, e espécies da Mata Atlântica que chegam até a Serra da Bodoquena, ao sul (Brandão et al., 2011). Por repetir anualmente o fenômeno das cheias, a planície de inundação pantaneira tornou-se um dos ambientes naturais mais ricos em espécies, reunindo parte significativa da fauna e flora brasileira, dispondo de aproximadamente 2.500 espécies de plantas, 464 aves, 124 mamíferos, 177 répteis, 41 anfíbios e 325 peixes (Junk et al., 2006).

O território do Pantanal Mato-grossense foi povoado por inúmeros grupos indígenas (Paiaguás, Guaicurus, Bororos e Parecis) que travaram intensas lutas contra os colonizadores espanhóis e portugueses desde o século XVI (Mendes, 2015). Atualmente, as grandes fazendas de criação de gado e as sociedades indígenas, dividem espaço com pequenas comunidades, classificadas como "ribeirinhos" e "pantaneiros". Os ribeirinhos são aqueles que vivem à beira dos rios, desenvolvem atividades predominantemente pesqueiras associadas à agricultura de subsistência. Já os pantaneiros são associados às grandes fazendas. Essas comunidades reconhecem a importância do pulso de inundação para a renovação dos serviços ecossistêmicos e manutenção da vida no Pantanal (Silva & Silva, 1995).

Há tempos, a principal atividade econômica desenvolvida na planície de inundação tem sido a pecuária de corte (Junk & Cunha, 2005), que em tese, oferece um baixo impacto à biodiversidade local quando comparada às demais atividades desenvolvidas em outros ecossistemas brasileiros (Lourival et al., 2009). Atualmente, observa-se uma diversidade maior de atividades econômicas no Pantanal, tais como agricultura, pesca, turismo e até iniciativas de construção de hidrelétricas e termoelétricas (Mesquita et al., 2013).

As atuais tendências de desenvolvimento econômico têm ameaçado o equilíbrio do ecossistema pantaneiro. De maneira gradual, os modelos tradicionais de pesca e pecuária estão sendo substituídos pela exploração intensiva, acompanhada de desmatamentos (Lourival et al., 2009), queimadas e consequente alteração de áreas naturais, gerando modificações relevantes em suas características físicas e biogeoquímicas (Brasil, 2007; Hamilton, 2010).

Devido à exuberância de sua biodiversidade e relevância à nível nacional e internacional (Gonçalves et al., 2011), o Pantanal foi declarado pela Constituição Brasileira de 1988 como "Patrimônio Nacional da União". Pela Convenção de Ramsar foi classificado como "Zona Úmida de Importância Internacional". Em 2000, foi declarado "Reserva da Biosfera" pela Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura (Unesco), além de possuir *status* de Patrimônio da Humanidade (Ana, 2004). Tais

características reforçam ainda mais a necessidade de conhecimento e conservação da extraordinária biodiversidade presente no Pantanal (Harris et al., 2005).

2.3. TEORIA DA COMPLEXIDADE

2.3.1. A revolução no pensamento científico

O epistemólogo da ciência Thomas Kuhn (1922-1996) argumenta em sua obra intitulada "A Estrutura das Revoluções Científicas" que a ciência passa por períodos de revolução, nos quais os paradigmas (problemas, crenças, valores e os métodos legítimos de um dado campo de pesquisa que são compartilhados por uma comunidade científica) mais antigos são, total ou parcialmente substituídos por novos, incompatíveis com os anteriores (Kuhn, 1962). Quando os paradigmas vigentes não conseguem mais explicar os novos problemas que vão surgindo na ciência, novos paradigmas emergem.

Um caso relevante de mudança de paradigma explorado por Kuhn é o surgimento da astronomia de Copérnico em detrimento à de Ptolomeu. Em relação ao movimento dos planetas, as predições de Ptolomeu eram tão boas quanto às de Copérnico, porém com o passar do tempo a complexidade da astronomia ptolomáica se mostrou maior que a sua precisão. Tais dificuldades levaram os astrônomos a reconhecer que o sistema de Ptolomeu estava em crise, culminando na adoção de um novo paradigma, o de Copérnico (Moreira & Massoni, 2009).

2.3.2. O estudo dos sistemas abertos e fora do equilíbrio

Diante do atual quadro das mudanças climáticas globais, a comunidade científica tem intensificado os estudos voltados para o meio ambiente, buscando compreender principalmente como ocorrem os principais processos que regem a dinâmica dos ecossistemas. Por serem sistemas abertos, os ecossistemas terrestres estabelecem uma constante troca de energia, matéria e quantidade de movimento com o entorno. Tais características eram de certa forma ignoradas pela ciência tradicional baseada nos pressupostos racionalistas, solidificados pela descrição de sistemas isolados, baseados em leis determinísticas. Existem sistemas naturais que são modelados por equações que são essencialmente deterministas, mas que vêm frustrando toda a tentativa de se fazer previsões corretas sobre o seu comportamento em tempos mais longos. Um exemplo é o clima (Almeida, 2005). A Segunda Lei da Termodinâmica expressa que a entropia (medida do grau de desordem) de qualquer sistema isolado tende a aumentar com o tempo, até alcançar um valor máximo. Por um longo período, o interesse da termodinâmica estava concentrado em sistemas isolados e em equilíbrio. Hoje, nota-se um interesse pelo não-equilíbrio, por sistemas que interagem com o meio através de um fluxo de entropia. Essa interação significa que estamos lidando com sistemas "embutidos", que se influenciam mutuamente (Prigogine, 1987).

Quando a comunidade científica passou a estudar os sistemas abertos, ficou claro que as condições de equilíbrio não poderiam ser aplicadas. A área de conhecimento pioneira na constatação desse fato foi a Física Quântica, ao perceber que o mundo microscópico estabelece constantes trocas de energia, matéria e quantidade de movimento com o meio, provocando mudanças consideráveis em seu estado quântico. Tais mudanças são imprevisíveis, sendo impossível descrever qual estado o sistema assumirá após a interação. É possível prever, apenas, a probabilidade que o sistema tem de mudar para algum dos estados possíveis. Portanto, não existe a possibilidade de uma interpretação determinística para o mundo microscópico (Neto, 2008; Paulo et al., 2012).

2.3.3. A Teoria dos Sistemas Complexos como nova ciência emergente

Após um abalo nas certezas referentes aos fenômenos naturais, sociais e individuais, emergiram os postulados da complexidade, que de forma resumida, ditam que o complexo comporta a incerteza, é marcado pela imprevisibilidade, é não determinístico, não linear e instável. Da mesma forma, os fenômenos complexos se constroem e se mantêm pela auto-organização, por serem sistemas abertos, dependendo e trocando informações com o meio (Almeida, 2004).

A partir da década de 70, após a publicação de trabalhos na área de físico-química, desenvolvidos pelo Prêmio Nobel em Química, Ilya Prigogine, teve início a consolidação de uma nova ciência. Prigogine analisou o comportamento de reações químicas mantidas fora do equilíbrio, identificando regularidades e desenvolvendo novos conceitos que ajudaram na compreensão de fenômenos complexos tais como a meteorologia, os ecossistemas e a interação biosfera-atmosfera. Este novo campo do conhecimento foi nomeado por Prigogine e colaboradores de "Teoria da Complexidade". Defendiam a ideia que se tratava de uma nova ciência emergente (Nicolis & Prigogine, 1989).

Ilya Prigogine consolidou "complexidade" como um termo científico, estabelecendo os princípios gerais dos sistemas fora do equilíbrio sem abandonar as leis básicas da termodinâmica clássica. Demonstrou em seus trabalhos que sistemas fora do equilíbrio apresentam padrões dinâmicos de auto-organização (Paulo et al., 2012).

Sayama (2015) define auto-organização como "um processo dinâmico pelo qual um sistema forma espontaneamente estruturas macroscópicas não triviais e/ou comportamentos ao longo do tempo". A auto-organização é um fenômeno que ocorre entre dois extremos de regimes de comportamento: o caos e a ordem. A maioria dos fenômenos dinâmicos ocorridos na Terra, incluindo a vida, estão no regime complexo, ou seja, entre a ordem e o caos (Paulo et al., 2012).

A pesquisadora Lynn Margulis (1938-2011) defende em seus trabalhos que a evolução das espécies obedece a processos de auto-organização e autorregulação. Diferente de Darwin que via o adaptacionismo e a competição como aspectos mais fundamentais no processo evolutivo das espécies, Margulis defende a cooperação, fundamentada em estudos que levaram à elaboração da sua Teoria da Endossimbiose Sequencial (SET), onde o conceito de Acoplamento Estrutural se tornou fundamental (Paulo et al., 2012). Para Margulis (2001) a simbiose que ocorre em nosso planeta, possibilita a inovação, a permanência de determinadas espécies em detrimento de outras, agrupando indivíduos diferentes para formar seres maiores e mais complexos.

A década de 80 trouxe novas perspectivas para o estudo da Complexidade, pois começaram a ser constituídos, nos países desenvolvidos, departamentos e institutos especialmente dedicados ao estudo de sistemas complexos. Dentre eles, destaca-se o Instituto de Santa Fé, localizado no estado do Novo México, EUA. O projeto teve a participação de diversos pesquisadores, dentre eles três Prêmios Nobel. Dois deles são conhecidos como os maiores nomes vivos das duas grandes áreas da Física: Murray Gell-Mann, da Física de Partículas, idealizador da Teoria dos Quarks, e Philip Anderson, da Física de Matéria Condensada. O terceiro foi um Prêmio Nobel de Economia: Kenneth Arrow (Paulo et al., 2012).

2.3.4. Geometria fractal

A geometria fractal decorre da necessidade em se descrever com mais precisão os fenômenos e objetos da natureza. A geometria clássica, com suas linhas, retas e círculos perfeitos se mostrou insuficiente quando aplicada na arquitetura natural, onde os objetos

apresentam espaços de dimensão fracionária, não inteira. O termo fractal, proposto pelo francês Benoit Mandelbrot (1977), do adjetivo latino *fractus* e do verbo *frangere*, significa quebrar, produzir pedaços irregulares (Falconer, 2003).

Os fractais apresentam padrões característicos que se repetem em uma escala descendente, onde suas partes, em qualquer escala, possuem semelhança com o todo, Mandelbrot denominou tal propriedade de "autossimilaridade". Após estudar diversas formas da natureza, o pesquisador concluiu que todas apresentavam algumas características comuns e que seria necessário um novo tipo de matemática para descrevê-las e analisá-las. Os resultados desse estudo foram publicados no livro *The Fractal Geometry of Nature* (A geometria fractal da natureza), que influenciou toda uma geração interessada em estudos dos sistemas complexos e caóticos (Paulo et al., 2012).

Existem inúmeros exemplos de estruturas na natureza que obedecem aos princípios da autossimilaridade, onde a forma do todo é semelhante a si mesma em todos os níveis de escala (Figura 1). Um pedaço de couve-flor, por exemplo, se parece com uma couve-flor em miniatura; rochas em montanhas que guardam características similares a pequenas montanhas; bifurcações de grandes rios formando progressivamente rios menores; as ramificações de uma árvore ou as ramificações repetidas dos nossos vasos sanguíneos (Paulo et al., 2012).



Figura 1: estruturas fractais na natureza (a) brócolis romanesco; (b) bifurcações de rios; (c) árvores; (d) vasos sanguíneos Fonte: internet

2.3.5. Espaço de fase e atratores

O espaço de fase é utilizado para verificar a evolução de um sistema ao longo do tempo. Para ilustrar esse conceito vamos utilizar o exemplo do espaço dinâmico do pêndulo ideal. Ele fornece a "fase" do movimento a cada instante, no sentido de "fase temporal", como quando falamos das "fases da Lua". O espaço matemático em que a curva é traçada é chamada de **espaço de fase**, que também poderia se chamar "espaço das variáveis", pois as grandezas que constituem as suas coordenadas são as variáveis independentes (diz-se também "graus de liberdade") do sistema (Bergé et al., 1996). No exemplo do pêndulo, o espaço de fase será o plano formado pelas variáveis envolvidas no sistema: o eixo horizontal (x) representa a posição do pêndulo, e o eixo vertical (v) a velocidade em que se encontra (Figura 2). A dimensionalidade do espaço de fase é o número mínimo de variáveis necessárias para especificar o estado dinâmico do sistema (Hilborn, 1994).



Figura 2: espaço dinâmico do pêndulo ideal Fonte: internet

Suponhamos que ao soltá-lo em uma posição à esquerda da linha vertical que passa pelo centro de suspensão, sua posição nesse momento seja - 10 e sua velocidade igual à 0 (zero). Assim que é liberado (a), a velocidade do pêndulo aumenta

progressivamente à medida que se aproxima da linha vertical (b), neste momento ele está no ponto mais baixo e mais veloz de seu movimento (c), com posição igual a 0 (zero). À medida que se move para a direita, o pêndulo vai perdendo velocidade (d). Ao atingir o outro extremo da oscilação, à direita da linha vertical, o pêndulo para momentaneamente, sendo sua velocidade igual a zero (e). Sua posição é então simétrica à do início do movimento (10, o mesmo valor, porém com sinal negativo).

Ao retornar, o pêndulo passa pela linha vertical e novamente atinge seu ponto mais veloz (g). Por fim, o pêndulo retorna à posição original, fechando o ciclo (a). O movimento prossegue. Em um sistema ideal, desprezando qualquer atrito, o movimento repetir-se-ia infinitamente. Entretanto, em um sistema real, tanto o atrito no ponto de suspensão quanto no ar, reduzem progressivamente a amplitude de oscilação até que o pêndulo pare definitivamente.

No espaço de fase do pêndulo (Figura 3), a evolução do sistema é cíclica, pois trata-se de um sistema conservativo, porém ao considerarmos o atrito (sistema dissipativo, sendo mais próximo da realidade) o pêndulo perde amplitude e velocidade angular, e tende a parar, passando a ser visto no espaço de fase como um espiral chegando ao centro do gráfico (ponto 0,0), assim o estado preferencial do sistema é estar parado. A este estado preferencial, seja ele: ponto, curva, plano ou qualquer forma, que foram generalizados de dimensão inteira ou não, ou até mesmo um conjunto de pontos no espaço de fase de dimensão n é dito **atrator** do sistema. Por definição, o atrator é um conjunto de atração em um espaço de fase, para o qual o sistema converge com o tempo (se a função for contínua) ou por n interações (se a função for discreta) (Eckmann & Ruelle, 1985; Nicolis & Prigogine, 1998).



Figura 3: Trajetória no espaço de fase de um pêndulo Fonte: Silva, 2014

Se o sistema dissipa energia tendendo a um ponto fixo, o atrator será de ordem zero, pontual. Se for possível identificar a tendência que o sistema tem de permanecer em

um ciclo limite, teremos um atrator de ordem um (atrator periódico). Em um regime bi periódico, o atrator será de ordem dois (torus). Os atratores quase periódicos ou fractais são comumente chamados de atratores estranhos, possuem dimensionalidade fracionária e derivam de sistemas caóticos, sendo sensíveis às condições iniciais, conforme mostra a figura 4 (Ruelle & Takens, 1971).



Figura 4: atratores: pontual, periódico, torus e estranho. Fonte: internet

No campo meteorológico, o famoso sistema de equações de Lorenz (Lorenz, 1963) verificou a existência de um atrator no espaço de fase das variáveis, assim como uma sensibilidade às condições iniciais do sistema, marcando de forma decisiva o estudo do caos. Após a publicação de um artigo de conteúdo matemático abstrato, abordando o problema da natureza da turbulência, Ruelle e Takens (1971) apresentaram pela primeira vez a expressão "atrator estranho". Essas descobertas fomentaram a busca pela confirmação da existência de comportamentos não periódicos.

Um dos desafios no estudo de sistemas complexos (sistemas ambientais, por exemplo) é o fato de não se conhecer todas as suas variáveis (graus de liberdade no espaço de fase) ou até mesmo não poder medi-las em sua totalidade. A fim de resolver essa limitação, Floris Takens desenvolveu em 1981 o Método das Defasagens Temporais, que possibilitou a partir de uma única variável, calcular tantas outras quanto forem necessárias (Takens apud Bergé et al., 1996). Em 1983 os físicos Peter Grassberger e Itamar Procaccia criaram um algoritmo com a finalidade de determinar a dimensionalidade fractal (*correlation dimension*) das trajetórias dos atratores no espaço de fase das variáveis, além de quantificar as variáveis acopladas à dinâmica do sistema em análise (Grassberger & Procaccia, 1983). Este algoritmo revolucionou as análises de séries temporais, e vem sendo aplicado em estudos desenvolvidos nas mais diversas áreas do conhecimento, tais como meteorologia, climatologia, biologia, e até previsões financeiras.

Na busca pela compreensão dos processos naturais, inicialmente é necessário identificar os fenômenos estudados, realizar medidas e finalmente proceder uma análise matemática. Durante esse processo pode surgir a ordem, a complexidade, ou até mesmo o caos. Torna-se necessário um método que encontre uma equação que determine o fenômeno estudado, ou que demonstre que os dados são apenas ruídos sem sentido (Peitgen et al., 2004). Se os dados de uma série temporal possuírem algum padrão, ela poderá fornecer informações valiosas sobre o atrator, sobre sua dimensionalidade, e a dimensionalidade mínima do espaço de fase dentro do qual ele está embutido (Grassberger & Procaccia, 1983; Nicolis & Prigogine, 1989).

O meteorologista norte-americano Edward Lorenz desenvolveu um modelo para convecção em fluidos que ganhou destaque por apresentar um comportamento caótico. O modelo apresenta um atrator estranho no espaço de fase das variáveis, e visa representar a atmosfera terrestre, onde o solo absorve a radiação solar e dissipa a energia térmica para o espaço, ou seja, um modelo aquecido por baixo e resfriado por cima. Possui três parâmetros de controle sendo ρ (número de Rayleigh), σ (número de Prandtl) e β (dimensões da região do objeto de estudo); e ainda três variáveis, sendo x velocidade de convecção, y variação de temperatura horizontal e z variação de temperatura vertical.

Em seu mais famoso artigo "Deterministic Nonperiodic Flow" (Fluxo Não-Periódico Determinista), Lorenz conseguiu através de um conjunto de equações, reconstruir o atrator estranho com os parâmetros de controle: $\rho = 25$ (470/19=24,74), $\sigma =$ 10, $\beta = 8/3$ e a partir das variáveis X, Y, e Z. O atrator de Lorenz possui um formato característico que lembra as asas de uma borboleta (Figura 5).

$$\frac{dx}{dt} = \sigma(y - x) \qquad \frac{dy}{dt} = x (\rho - z) - y \qquad \frac{dz}{dx} = xy - \beta z \tag{1}$$



Figura 5: Atrator de Lorenz Fonte: Soares, 2016

No atrator de Lorenz o ponto movimenta-se ao longo da trajetória no espaço de fase, dando uma espécie de laçada, ilustrando uma rotação lenta, caótica, de um fluido modelado pelas três equações para a convecção (Lorenz, 1963). Uma estrutura em escalas invisivelmente pequenas faz com que o calor crescente do sistema empurre o fluido em uma direção, nesse momento a trajetória permanece do lado direito; quando o movimento rotativo para e se inverte, a trajetória oscila para a outra asa. É um atrator estável, de baixa dimensionalidade fractal e não-periódico (Gleick, 1990).

2.3.6. Dimensionalidade do atrator

É possível reconstruir a trajetória completa de um sistema em um espaço de fase a partir da medida de uma única variável independente (Takens, 1981). Tal método consiste em desmembrar a série temporal original $X_0(t)$ em deslocamentos temporais sucessivos de defasagem fixa τ ($\tau = m \Delta t$, onde *m* é um número inteiro) para *N* pontos equidistantes do conjunto de dados. Isto é:

$$\begin{split} X_{0} &: X_{0}(t_{1}), X_{0}(t_{N}) \\ X_{1} &: X_{0}(t_{1} + \tau), ..., X_{0}(t_{N} + \tau) \\ & \cdot \\ & \cdot \\ & \cdot \\ & X_{n-1} &: X_{0}[t_{1} + (n-1)\tau], ..., X_{0}[t_{N} + (n-1)\tau] \end{split}$$
(2)

Denomina-se **atrator reconstruído**, o conjunto geométrico imerso no espaço de fase, que carrega as informações da dinâmica do sistema e é topologicamente equivalente ao atrator que seria produzido pela solução numérica do sistema dinâmico de equações, caso elas fossem conhecidas (Campanharo, 2006).

O modelo matemático com comportamento caótico proposto por Otto Rössler (1976) ilustra a reconstrução de sistema por análise de séries temporais.

Neste modelo há três variáveis e um termo não linear quadrático:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -y - z \\ \frac{dy}{dt} = x + ay \\ \frac{dz}{dt} = bx - cz + xz \end{cases}$$
(3)

A Figura 6 esboça o resultado das equações do modelo de Rössler no espaço de fase, usando dt = 0,01 e um número de amostragem de 10000, para a = 0,32, b = 0,3 e c = 4,5.



Figura 6: Atrator caótico obtido por integração numérica do modelo de Rössler Fonte: Capistrano, 2007

Através da defasagem é possível traçar um "retrato" do atrator. Comparando as figuras 6 e 7 vemos que a geometria e os traços complicados são semelhantes, porém na figura 7 um pouco distorcidos (Capistrano, 2007).



Figura 7: Reconstrução do atrator de Rössler por meio de defasagem de série temporal **Fonte:** Capistrano, 2007

Nicolis & Prigogine (1989) afirmam que a escolha da defasagem (τ) deve ser aquela na qual a série original (X₀(t)) e a série defasada (X₁(t_N + τ)) apresentem a menor correlação. Outros autores argumentam que o atrator aparecerá no espaço de fase de coordenadas defasadas como se vista nas coordenadas originais, que não são conhecidas, desde que a dimensão do espaço de fase, *n*, seja suficientemente maior que a dimensionalidade do atrator, d (n > 2d). Em linhas gerais, a defasagem deve ser aquela onde se tem o primeiro mínimo em um gráfico de informação mutua média por τ (Capistrano, 2007).

A dimensão (d) de um conjunto consiste no número mínimo de coordenadas necessárias para especificar seu estado, e envolve conceitos geométricos como escalas de volume (V, podendo ser um hipervolume) ou área em função de um parâmetro de comprimento (L) característico.

Assim a dimensão é definida matematicamente como:

$$d = \frac{\log V}{\log L} \tag{4}$$

As análises por meio de dimensão podem ser feitas de forma puramente geométrica, como sendo o número para expressar a quantidade de informação necessária para especificar um estado da precisão de *r* (raio da hiperesfera), comumente chamada de dimensão de informação. Outra análise é a dimensão de correlação, também chamada de dimensão embutida, e é definida como:

$$d = \lim_{r \to 0} \frac{\log C(r)}{\log r}$$

Quanto maior a contagem C(r) para um mesmo raio r, menor será a dimensionalidade do atrator d.

(5)

Sendo que C(r) é a função correlação dada por:

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

Para determinar C(r) pela equação 6 é necessário adotar um ponto de referência X_i no espaço de fase, a partir desse ponto e com o auxílio da função de Heaviside, θ , é contado o número de pontos dentro do raio da hiperesfera (*r*), analisando o quanto a presença deste ponto de referência influencia na posição dos demais dados, que é propriamente a função correlação. Aplica-se este procedimento à todos os dados, sendo a cada seção um dado tomado como referência.

A inclinação máxima das linhas no gráfico de $\ln C(r)$ versus $\ln r$ (gráfico "joelhos") é a dimensão embutida, que aumenta com a dimensão do espaço de fase até a saturação, quando isto ocorre, a dimensão embutida é igual à dimensão do atrator. A dimensionalidade do atrator é dada para a dimensão do espaço de fase que corresponde ao número mínimo de variáveis para explicar o sistema (graus de liberdade). Em sistemas dissipativos o volume ocupado pelo atrator é em geral relativamente muito pequeno comparado com o volume do espaço de fase (Capistrano, 2007).

2.4. EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A evapotranspiração (ET) é o processo simultâneo de transferência de vapor d'água para a atmosfera através da evaporação (E) da umidade existente no substrato (solo ou água) e transpiração (T) resultante da atividade biológica dos seres vivos, principalmente a transpiração vegetal (Allen et al., 1998). A água transferida pela transpiração entra na planta através das raízes, passa pela folhagem onde é vaporizada para a atmosfera por meio da abertura dos estômatos. Em contraste, a água transferida através da evaporação passa diretamente do solo úmido sem vegetação, dos oceanos, lagos, rios e de outras superfícies hídricas naturais para a atmosfera (Brown, 2000).

De acordo com a Teoria Cinética dos Gases, a transição de fase líquido-vapor ou sólido-vapor é resultado do aumento da energia cinética das moléculas, sendo condicionada ao saldo de energia disponível à superfície-fonte (calor latente de vaporização). A difusão do vapor d'água produzido na interface superfície-atmosfera está condicionada à pressão parcial do vapor existente na camada atmosférica vizinha à superfície-fonte. Logo, se essa camada estiver saturada, a quantidade de moléculas que deixam a superfície-fonte (passando ao estado gasoso), em um certo intervalo de tempo, torna-se igual à quantidade das que retornam ao estado líquido, no mesmo intervalo. Nessas condições, a evaporação tende a cessar (Varejão-Silva, 2006).

A energia disponível ao sistema é distribuída entre os processos de aquecimento do ar e das plantas (H – fluxo de calor sensível), do solo (G – fluxo de calor no solo) e evapotranspiração (LE – fluxo de calor latente). Na ET, parte da energia radiante é transformada em calor latente de vaporização. Toda vez que a superfície estiver bem umedecida, a maior parte da energia disponível será utilizada na evapotranspiração, o que representa aproximadamente 70% a 80% do Rn (saldo de radiação). Em superfícies com déficit hídrico, a evapotranspiração é restringida e a maior parte da energia disponível é utilizada no aquecimento do ar, das plantas e do solo, gerando uma elevação brusca da temperatura (Pereira et al., 2007).

Além de consumir uma grande quantidade de água, a evapotranspiração modifica substancialmente o balanço energético da Terra devido ao consumo de uma enorme quantidade de energia durante o processo de conversão de água no estado líquido ou sólido em vapor. Para cada metro cúbico de água evaporada é necessário 2,45 MJ de energia (calor latente de evaporação), aproximadamente (Irmak, 2011).

Aproximadamente metade da energia solar absorvida pela terra volta à atmosfera em forma de fluxo de calor latente por meio da evapotranspiração (Stephens et al., 2012). Como o vapor d'água é o gás de efeito estufa de maior concentração na atmosfera (Held & Soden, 2000), a evapotranspiração é, portanto, crítica na regulação do balanço energético da Terra e consequentemente da sua temperatura (Liu et al., 2014).

O saldo de radiação (Rn) é uma das variáveis fundamentais na modelagem de processos naturais como o balanço de energia e a evapotranspiração. Em termos físicos, o Rn resulta da radiação que entrou e saiu de um sistema, podendo ser contabilizado após as trocas radiantes, representando a energia que ficou disponível ao sistema para que possa realizar os processos fisiológicos da vegetação (Cunha et al., 1993). Obtêm-se os componentes do balanço de energia por meio da equação da razão de Bowen:

$$Rn = LE + H + G + F = 0 \tag{8}$$

Em que Rn é o saldo de radiação; LE e H são os fluxos verticais de calor latente e sensível, respectivamente; G o fluxo de calor no solo e F é a energia utilizada no processo fotossintético, que em geral não é considerada por representar menos de 2% do saldo de radiação (Heilman et al., 1994). Todos os termos da equação são expressos em Wm⁻².

O calor latente (*LE*) é a energia que deve ser liberada ou absorvida por uma substância para que ocorra a mudança de estado físico, ou seja, para que passe de sólido à líquido, de líquido à gasoso e vice-versa. Em Física Ambiental, o fluxo de calor latente é caracterizado como sendo o fluxo de calor da superfície da Terra para a atmosfera que está associado à evaporação ou transpiração na superfície (e posterior condensação do vapor d'agua na troposfera). É um componente importante do balanço de energia junto a superfície terrestre. O fluxo de *LE* é obtido pela equação descrita por Perez et al., (1999):

$$LE = \underline{Rn} - \underline{G} \tag{9}$$

$$1 + \beta$$

Onde *Rn* é saldo de radiação (Wm⁻²); *G* é o fluxo de calor no solo (Wm⁻²) e β é a razão de Bowen definida como:

$$\beta = \left(\frac{C_p}{\lambda} \cdot 622\right) \cdot \left(\frac{\Delta T}{\Delta e}\right) \tag{10}$$

Em que Cp é o calor específico em pressão constante (1.00467 J g⁻¹ K⁻¹); λ é o calor latente de vaporização (J g⁻¹); 0.622 é a razão do peso molecular da água e do ar, e ΔT e Δe são as diferenças de temperatura (°C) e pressão de vapor da água (KPa), respectivamente, entre as duas diferentes alturas de medida. O calor latente de vaporização (λ) é estimado pela equação:

$$\lambda = 1,919 .\ 10^6 . \left(\frac{T + 273}{(T + 273) - 33,91} \right)$$
(11)

Varejão-Silva (2006) destaca que ao ingressar na atmosfera, o vapor d'água leva consigo o calor latente consumido na transição de fase (sólido ou líquido, ao estado gasoso). Em seguida, transfere ao ambiente o calor latente liberado, quando de sua volta ao estado líquido ou sólido. Tornando-se assim, um eficiente veículo de calor, transportando energia das regiões mais aquecidas da Terra para as mais frias. A combinação entre o fluxo de calor sensível e latente controla a umidade e a estabilidade térmica na camada limite atmosférica, gerando precipitação convectiva, auxiliando no controle do clima (Da Rocha et al., 2009).

A evapotranspiração pode ser afetada por alguns elementos climáticos, tais como: radiação solar, temperatura do ar, déficit de pressão de vapor e velocidade do vento. Algumas características da própria vegetação (tipo da cultura, densidade, variedade e fase de crescimento) também podem influenciar, tendo em vista que diferenças na resistência estomática, altura da cultura, rugosidade do dossel, refletividade e cobertura do solo pela vegetação resultam em diferentes valores de ET sob as mesmas condições climáticas e de solo (Allen et al., 1998).

Os principais conceitos de ET definidos na literatura são: Evapotranspiração Potencial, Real, de Oásis, e de Cultura. De acordo com Pereira et al., (2007) a ET Potencial (ETP) ou de Referência (ETo) é definida como a quantidade de água que seria utilizada por uma extensa superfície vegetada com grama, com altura entre 8 e 15 cm, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo, e sem restrição hídrica. A ET Real (ETr) possui os mesmos contornos da ETo, porém, com ou sem restrição hídrica. ET de Oásis é a quantidade de água utilizada por uma pequena área vegetada (irrigada) que é circundada por uma extensa área seca, de onde provém energia por advecção (transporte lateral de calor por deslocamento da massa de ar). ET de Cultura (ETc) é a quantidade de água utilizada por uma cultura, em qualquer fase de seu desenvolvimento, desde o plantio/semeadura até a colheita, quando não houver restrição hídrica, e por este motivo ela é também chamada Evapotranspiração Máxima de Cultura.

A ET pode ser medida de forma direta por meio de equipamentos, como os lisímetros, ou estimada de forma indireta por meio do balanço hídrico ou de dados meteorológicos aplicados em equações, como a de Thornthwaite e Penman-Monteith, utilizada pela FAO – 56 (Allen, 1998). Utiliza-se também o método Eddy Covariance, que dispõe de medidas atmosféricas em alta frequência. Entretanto, alguns autores questionam tais métodos por estimarem valores pontuais de evapotranspiração para um local específico e não em escala regional. Essa limitação motivou o desenvolvimento do uso de dados obtidos por sensoriamento remoto em pesquisas em que se deseja analisar o processo de evapotranspiração em uma escala maior (Pacheco et al., 2014).

Um dos componentes mais importante do ciclo hidrológico e do balanço hídrico é a evapotranspiração, que juntamente com a precipitação determinam a umidade de uma região (Tao et al., 2015). Para Varejão-Silva (2006), o ciclo hidrológico é uma sequência fechada de fenômenos naturais que pode ser dividida em duas partes: o ramo aéreo, normalmente estudado no âmbito da Meteorologia e o ramo terrestre, objeto da Hidrologia. O limite entre esses ramos é a interface biosfera-atmosfera. Considera-se que o ramo aéreo do ciclo hidrológico se inicia quando a água é transferida para a atmosfera, no estado de vapor, através da evapotranspiração, encerrando-se no momento em que retorna à superfície terrestre, no estado líquido ou sólido.

Apesar dessa relevância para o ciclo hidrológico, a evapotranspiração é considerada um dos componentes com maior dificuldade em se quantificar com precisão, tendo em vista as interferências do ambiente e os fatores climáticos que afetam o processo (Dolman & De Jeu, 2010). Metodologias desenvolvidas recentemente que permitem estimar a ET em grandes regiões para um período de tempo limitado de registros observacionais, tanto *in situ* (Jung et al., 2010; Xiao et al., 2012) quanto por imagens de

satélites (Fisher et al., 2008; Miralles et al., 2011; Mu et al., 2011), buscam compreender as mudanças históricas no processo de evapotranspiração, permitindo uma melhor quantificação da futura disponibilidade hídrica nos continentes (Liu et al., 2014).

Uma das preocupações relativas aos impactos do aquecimento global é a diminuição da disponibilidade hídrica, decorrente de alterações na variabilidade da precipitação e da temperatura do ar. Tais alterações, podem influenciar negativamente a produção mundial de alimentos devido à redução das trocas gasosas no sistema soloplanta-atmosfera. De acordo com o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), o termo mudança climática é caracterizado por alterações nos padrões climáticos, em especial na composição da atmosfera mundial, indo além da variabilidade climática natural, com influência direta ou indireta das atividades humanas, sendo identificadas por meio de variações persistentes por longos períodos (IPCC, 2007).

O uso da terra principalmente para a expansão agrícola pode reduzir os fluxos de vapor d'água para a atmosfera em até 88% quando as florestas tropicais, por exemplo, são substituídas por terras cultivadas ou pastagens (Miralles et al., 2011). Estas alterações geram uma diferença substancial na partição de água na interface biosfera-atmosfera (Lathuilliere et al., 2012).

Existe um consenso de que a disponibilidade de água está se tornando um fator limitante para o desenvolvimento econômico à nível global (Vorosmarty et al., 2010). Com o crescimento da população mundial, a demanda por água está fazendo com que esse recurso se torne progressivamente escasso. As mudanças climáticas podem potencializar a limitação dos recursos hídricos, tendo em vista que o aquecimento futuro elevaria as taxas de evapotranspiração, reduzindo a umidade da superfície terrestre (Huntington, 2006; Douville et al., 2012), principalmente em regiões que já sofrem com a escassez de água (Dorigo et al., 2012).

Diversos estudos ao redor do mundo buscam comprovar que a evapotranspiração pode gerar impactos significativos tanto no clima local, quanto na circulação atmosférica em escala global. Para Lan & Guoxiong (2001) a evapotranspiração modularia o clima global, aumentando a umidade e gerando uma redução da temperatura máxima do ar, afetando significativamente os ciclos biogeoquímicos e a precipitação, com consequentes implicações no ciclo hidrológico dos ecossistemas terrestres (Nepstad et al., 2008).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi conduzido em uma área de inundação periódica no Pantanal Norte, dentro do Centro Avançado de Pesquisas da Universidade Federal de Mato Grosso, localizado no Parque Baía das Pedras (16 ° 43'51 "S: 56° 04'17 "W) na Estância Ecológica SESC-Pantanal, município de Poconé, localizado aproximadamente a 130 km de Cuiabá, Mato Grosso, Brasil.





A vegetação da área de estudo é composta principalmente por estande monodominante de *Combretum lanceolatum* Pohl, espécie invasora conhecida localmente como "pombeiral" (Machado et al., 2016). A topografia é praticamente plana, favorecendo a inundação no período das chuvas, com níveis de água entre 1-2 metros (Nunes da Cunha & Junk, 2004; Fantin-Cruz et al., 2010).

Os solos da região são classificados como Gleyic Solonetz (Zeilhofer, 2006) de origem sedimentar, com predomínio de solos hidromórficos, ocorrendo em fases argilosas e arenosas de forma alternada e descontínua (Amaral Filho, 1984; Coringa et al., 2012). A área de estudo apresenta predominância de solo argiloso (Machado et al., 2015), ácido (pH = 4,7), com conteúdo moderadamente alto de fósforo, cátions e matéria orgânica (Vourlitis et al., 2011; Machado et al., 2015).

O clima da região é classificado como Aw segundo Köppen, apresentando verão chuvoso e inverso seco. A precipitação média anual é de 1400 mm com um período de seca, de maio a setembro e outro chuvoso, de outubro a abril (Nunes da Cunha & Junk, 2004). A média anual da temperatura do ar varia entre 29 e 32 °C (máxima) e entre 17 e 20 °C (mínima) (Biudes et al., 2014).

3.2. MÉTODOS DE ANÁLISE

3.2.1. Medidas micrometeorológicas

Os dados utilizados no estudo referentes ao período de março de 2012 a abril de 2013 foram coletados na região da Baia das Pedras, por sensores instalados em uma torre de 28 metros de altura, com altitude de 150 metros em relação ao nível do mar (Tabela 1). O dossel vegetativo próximo à torre apresenta uma altura de aproximadamente 4 metros, sendo formado basicamente por pequenos estandes de árvores nativas do Pantanal como Pombeiro (Combretum lanceolatum Pohl), Algodão-do-Pantanal (Ipomoea carnea spp.), alguns exemplares de Cambará (Vochysia divergens Pohl), observa-se também a presença de vegetação rasteira, principalmente durante o período seco (Coringa et al., 2012; Nassarden, 2015).

instalação na Variável	a área de estudo. Equipamento	Altura de instalação (m)
Rn	Saldo Radiômetro (NRLITE, Kipp & Zonen, Delft, Netherlands)	20
Rg	Pirômetro (LI200X, LI-COR, Lincoln, NE, USA)	20
G	Termistores 108-L (Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah,	1, 3, 5, 10 e 30
	USA)	cm de
		profundidade

Termo Higrômetros (HMP-45AC, Vaisala Inc., Woburn, MA,

Tabela 1: Equipamentos utilizados para medição do saldo de radiação (Rn), da radiação solar incidente mperatura e umidade relativa do 1o(C) to (\mathbf{T}/\mathbf{I})

Fonte: Rothmund, 2017

USA)

T/UR

Os dados coletados pelos sensores micrometeorológicos foram lidos a cada 10 segundos (0,1s) e armazenados a cada 10 minutos em um datalogger (CR10X, Campbell Scientific, Inc., Ogden, Utah). Todo o sistema foi alimentado por um conjunto de baterias mantidas carregadas por meio de painéis solares com reguladores de tensão (SP 65 Cambpell Scientific Inc. Logan UT USA). Após o armazenamento, os dados gerados foram analisados em planilhas eletrônicas e posteriormente em programas específicos

22/31

desenvolvidos pelo grupo de pesquisa em Sistemas Complexos do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT).

3.2.2. Delimitação dos períodos sazonais da área de estudo

A área de estudo apresenta dois períodos bem característicos: meses secos, com precipitação total mensal inferior a 100 mm, normalmente entre maio a setembro, e meses chuvosos, de outubro a abril, em que a precipitação total mensal é superior a 100 mm (Nunes da Cunha & Junk, 2004). Entretanto, devido ao pulso de inundação (variação temporal no nível d'água), períodos intermediários se formam ao longo do tempo, fazendo com que de fato, o Pantanal Mato-grossense apresente quatro períodos distintos: seca, enchente, cheia e vazante.

O critério utilizado para delimitar os quatro períodos característicos da área de estudo foi a análise das médias mensais da temperatura e umidade relativa do ar (Ta/UR) feita pelos sensores instalados na torre da Baía das Pedras e das médias mensais de precipitação total (ppt) da região, registrada por sensor orbital (satélite) em um ano característico (março de 2012 a abril de 2013) conforme Rothmund (2017). Esses registros corroboram a climatologia regional da área de estudo (Biudes et al., 2015).

Os quatro períodos característicos para a área de estudo foram delimitados entre: seca (julho/12 a setembro/12), enchente (outubro/12 a dezembro/12), cheia (janeiro/13 a março/13) e vazante (abril/12 e junho/12).

3.2.3. Determinação da defasagem temporal

A análise de sistemas complexos, como é o caso do Pantanal Mato-grossense pode ser feita através de séries temporais (sequência de observações feitas sequencialmente ao longo do tempo). Inicialmente, supõe-se que uma única variável está sendo estudada, porém devido à sua correlação (acoplamento¹) com as outras variáveis, ela traz consigo um grande conjunto de informações que são importantes para a dinâmica do sistema (Nicolis & Prigogine, 1989).

A estimativa da dimensionalidade da dinâmica de um sistema é feita através da comparação da série original de uma variável com as séries obtidas a partir da defasagem

¹ Acoplamento estrutural é uma das principais características de um sistema complexo, diretamente responsável pela sua auto-organização.

temporal da série original por um intervalo de tempo fixo, chamado de "tempo de defasagem" (Nicolis & Prigogine, 1989; Abarbanel et al., 1993). Para que se obtenha o máximo de informação possível dessa comparação, é desejável que exista uma correlação mínima entre a série original e a série defasada.

Da variável evapotranspiração foi obtida a informação mútua mínima (medida da quantidade de informação que uma variável aleatória contém acerca da outra) utilizando 57.746 dados. O programa utilizado, desenvolvido pelo grupo de pesquisa em sistemas complexos do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT), gera dados de informação mútua (I) para cada tempo de defasagem (τ). O melhor tempo de defasagem para esse estudo (6 hs) foi escolhido como sendo o valor correspondente ao primeiro mínimo do gráfico (I x τ) de informação mútua (figura 9), por ele medir a independência geral entre pontos sucessivos. Feito isso, usa-se a defasagem para traçar um "retrato" do atrator.



Figura 9: gráfico de informação mútua

3.2.4. Obtenção da dimensionalidade do atrator

Após a escolha da defasagem temporal adequada, foi analisada a dimensionalidade dos atratores (dimensão de correlação² e de imersão³) por meio do gráfico log *C* por log *r* (também chamado de gráfico "joelhos"), obtido através de programa desenvolvido pelo grupo de pesquisa em Física Ambiental da UFMT, com *r*

² Medida da densidade do atrator imerso no espaço de fase. Fornece uma estimativa do número mínimo de equações diferenciais necessárias para descrever a dinâmica do sistema.

³ Número mínimo de variáveis necessárias para modelar o comportamento representado pelo atrator.

variando de -2 a 2 (figura 10). A dimensionalidade do atrator é exatamente o maior coeficiente angular obtido em um gráfico de log C por log r com n (número de variáveis no espaço de fase) crescente.

Para cada período sazonal foi escolhido um mês representativo para gerar o gráfico de log *C* por log *r*. Ficando assim definido: seca (agosto/2012), enchente (dezembro/2012), cheia (fevereiro/2013) e vazante (maio/2012). O objetivo é verificar se há ou não uma estabilização da dimensão de correlação em função da dimensão de imersão da variável evapotranspiração nos períodos de seca, enchente, cheia e vazante no Pantanal Mato-grossense entre março de 2012 a abril de 2013.



Figura 10: gráfico log C por log r para os períodos de: seca (a); enchente (b); cheia (c) e vazante (d)

A figura 10 representa a relação $\log C$ por $\log r$ para a dimensão embutida igual a 2. Em cada uma das curvas correspondentes deve-se calcular por correlação linear a inclinação da cura na sua parte ascendente. Este valor corresponde ao valor da dimensão de correlação para esta dimensão de imersão. Deve-se aumentar a dimensão de imersão obtendo-se novos gráficos $\log C$ por $\log r$ e as dimensões de correlação correspondentes.

Para cada período sazonal foi calculada a inclinação máxima para cada linha (dimensão embutida). As inclinações tendem a aumentar com a dimensão do espaço de fase até saturarem, revelando a dimensionalidade do atrator e a dimensionalidade mínima

necessária para a compreensão da variável analisada. Portanto, espera-se que a análise da dimensionalidade do atrator da evapotranspiração de cada período sazonal do Pantanal Mato-grossense forneça informações válidas sobre a dinâmica do sistema.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. Dimensionalidade e aspecto dos atratores reconstruídos

As figuras a seguir demonstram o comportamento da dimensão de correlação (d)em função da dimensão de imersão (n), e o aspecto dos atratores reconstruídos da variável evapotranspiração do Pantanal Mato-grossense durante os quatro períodos sazonais: seca, enchente, cheia e vazante.



Figura 11: comportamento da dimensão de correlação (d) em função da dimensão de imersão (n), dos períodos de: seca (a), enchente (b), cheia (c), vazante (d).

O valor de saturação de "d" é estimado como sendo a dimensionalidade do atrator representado pela série temporal. Se os valores de d estão entre 1 e 2 correspondem a um comportamento periódico comportado; se d = 2, o sistema apresenta oscilações quaseperiódicas, com amplitude e frequência incertas; se d é um não-inteiro e maior que 2, espera-se que o sistema exiba uma oscilação caótica, com uma imprevisibilidade intrínseca, sendo a variável fortemente influenciada por perturbações (Prigogine, 1987).

O comportamento da dimensão de correlação (d) em função da dimensão de imersão (n) nos quatro períodos sazonais não apresentou diferenças significativas. Os

resultados (figura 11) apontam uma baixa dimensionalidade (d < 1) entre os períodos analisados. Houve saturação da dimensão de imersão em n = 4, representando o número mínimo de variáveis necessárias para modelar o comportamento representado pelo atrator da evapotranspiração no Pantanal Mato-grossense.



Figura 12: atrator reconstruído da variável evapotranspiração para os períodos de: seca (a), enchente (b), cheia (c), vazante (d).

A figura 12 mostra que nos períodos de enchente (b), cheia (c) e vazante (d), os atratores apresentam periodicidade mais bem definida que o período de seca (a), onde os pontos estão mais dispersos. A presença de água pode ser o fator regulatório que estabiliza o ciclo da evapotranspiração no Pantanal Mato-grossense. Os atratores se apresentam em formato aproximadamente triangular, como os que foram obtidos por Tavares (2015) para outros ecossistemas e que serão analisados a seguir.

Períodos sazonais	d (dimensão de correlação)	n (dimensão de imersão)
Seca	0,88	4
Enchente	0,90	4
Cheia	0,90	4
Vazante	0,87	4

Tabela 2: Comparativo da dimensionalidade dos atratores da evapotranspiração entre os quatro períodos sazonais no Pantanal Mato-grossense.

Conforme demonstra a tabela 2, a evapotranspiração nos quatro períodos sazonais pode ser caracterizada como um atrator de baixa dimensionalidade (d < 1). A análise mostrou que com quatro variáveis (n = 4) é possível modelar o processo de evapotranspiração no Pantanal Mato-grossense nos períodos de seca, enchente, cheia e vazante. Resultado semelhante foi encontrado por Mello (2010) ao analisar as séries temporais das variáveis micrometeorológicas Balanço de Radiação (Rn), Temperatura do Ar (T) e Umidade Relativa do Ar (UR) na floresta de Cambarazal no Pantanal Norte Mato-Grossense, com dados referentes ao período de julho de 2007 a maio de 2009, onde os atratores reconstruídos são não-periódicos, de baixa dimensionalidade e com pouca variação sazonal, demonstrando uma estabilidade ecossistêmica.

4.2. Comparação entre os resultados de evapotranspiração entre o Pantanal Matogrossense e dois ecossistemas distintos

Tavares (2015) realizou a comparação entre dois ecossistemas distintos, um deles localizado na floresta de transição Amazônia-Cerrado (Sinop) e outro na Amazônia (Reserva Jaru), no que diz respeito ao cálculo da dimensão de correlação e dimensão de imersão dos atratores das variáveis evapotranspiração, condutância superficial e condutância aerodinâmica em períodos secos e úmidos.

A análise do comportamento da evapotranspiração em ecossistemas distintos desperta o interesse tendo em vista as particularidades intrínsecas de cada região. Diante disso, foram comparados os resultados da dimensão de correlação (d) em função da dimensão de imersão (n), assim como o aspecto dos atratores reconstruídos da variável evapotranspiração nos períodos secos e úmidos entre o Pantanal Mato-grossense e os dois ecossistemas distintos analisados por Tavares (2015). No caso do Pantanal Mato-grossense, em que os períodos secos e úmidos estão distribuídos entre os períodos de seca, enchente, cheia e vazante, foram considerados na comparação com os dois

ecossistemas distintos analisados por Tavares (2015), a seca como período seco, e a cheia como período úmido.



Figura 13: comportamento da dimensão de correlação (d) em função da dimensão de imersão (n), da variável evapotranspiração na Reserva Jaru no período úmido (a) e período seco (b); em Sinop no período úmido (c) e período seco (d). **Fonte:** Tavares (2015)

A figura 13 mostra que no ecossistema Amazônia (Reserva Jaru) a dimensão de correlação no período úmido (a) apresenta uma estabilização em torno de 2,6 para uma dimensão de imersão em torno de 11, indicando que a maior parte do comportamento da evapotranspiração pode ser modelada apesar da necessidade de um grande número de variáveis (n > 9). O período seco (b) apresentou uma estabilização da dimensão de correlação em 1,77 para uma dimensão de imersão igual a 9, indicando que o sistema está mais bem-comportado (Prigogine, 1987).

A análise da dimensão de correlação no ecossistema de transição Amazônia-Cerrado (Sinop) no período úmido (c) apresentou estabilização em 2,83 para uma dimensão de imersão igual a 10. O período seco (d) apresentou estabilização da dimensão de correlação em 2,16 para uma dimensão de imersão em torno de 10, o que segundo Tavares (2015) demonstra que os processos regulatórios na floresta são mais robustos.



Figura 14: Atrator reconstruído da variável evapotranspiração na Reserva Jaru no período úmido (a) e período seco (b); em Sinop no período úmido (c) e período seco (d). **Fonte:** Tavares (2015)

A figura 14 mostra que o atrator reconstruído do período seco (b) do ecossistema Amazônia (Reserva Jaru) apresentou um perfil entre o circular e o toroide, tendo em vista que a dimensão de correlação obtida é não inteira (d = 1,77), mas menor que 2, indicando um comportamento periódico comportado. Como a dimensão de correlação obtida no ecossistema de transição Amazônia-Cerrado (Sinop) nos períodos úmido e seco é não inteira (d = 2,83 / d = 2,16 respectivamente), porém maior que 2, o atrator reconstruído para ambos períodos (c,d) tem o perfil estranho e quase que tridimensional.

Silva (2014) ao observar os efeitos intra-anual da temperatura do ar nos períodos seco e chuvoso no ecossistema de transição Amazônia-Cerrado (Sinop), obteve atratores reconstruídos que compreendem um ciclo com um melhor padrão para o período seco em comparação aos atratores do período chuvoso. Segundo Silva (2014), o calor latente inibe possíveis variações na temperatura, fazendo com os dados fiquem mais concentrados numa determinada região do espaço de fase.

A tabela 3 mostra um comparativo da dimensionalidade dos atratores da evapotranspiração para os dois ecossistemas estudados por Tavares (2015) e os resultados obtidos para o Pantanal Mato-grossense de acordo com o período, apontando as semelhanças e diferenças para cada um dos ecossistemas.

Ecossistema	Período	d (dimensão de correlação)	n (dimensão de imersão)
Pantanal	Seco	0,88	4
	Úmido (cheia)	0,90	4
Amazônia	Seco	1,77	9
	Úmido	2,6	11
Amazônia-Cerrado	Seco	2,16	10
	Úmido	2,83	10

 Tabela 3: Comparativo da dimensionalidade dos atratores da evapotranspiração entre o Pantanal Matogrossense, floresta de transição Amazônia-Cerrado (Sinop) e Amazônia (Reserva Jaru).

Ao analisar os resultados obtidos por Tavares (2015) nos dois ecossistemas distintos com os resultados do Pantanal Mato-grossense, nota-se que os gráficos da dimensão de correlação em função da dimensão de imersão apresentam aspectos diferentes. Os gráficos do Pantanal, não somente dos períodos seco e úmido, mas também os de enchente e vazante (figura 11), apresentam uma curva descendente, onde a dimensão de correlação diminui com o aumento da dimensão de imersão, até à completa estabilização, com d sempre menor que 1. Já nos dois ecossistemas distintos, a curva dos gráficos de dimensionalidade é ascendente (figura 13), a dimensão de correlação aumenta à medida que a dimensão de imersão também aumenta, com *d* menor que 2 apenas no período seco do ecossistema Amazônia (reserva Jaru).

O Pantanal Mato-grossense apresenta um atrator de baixa dimensionalidade (d < 1) tanto no período seco quanto no úmido, sendo possível modelar o processo de evapotranspiração com apenas quatro variáveis (n = 4), indicando um comportamento periódico comportado para os dois períodos sazonais. Já a floresta Amazônica (reserva Jaru) e a floresta de transição Amazônia-Cerrado (Sinop) apresentam uma dimensão de correlação entre 1,77 e 2,83, necessitando de mais de 9 variáveis para modelar o processo de evapotranspiração nos períodos seco e úmido.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na busca pela compreensão dos processos que regem a dinâmica dos sistemas abertos, o presente estudo foi pautado exclusivamente na análise da evapotranspiração do Pantanal Mato-grossense, fundamentada pela Teoria dos Sistemas Complexos.

A evapotranspiração do Pantanal Mato-grossense para o período em análise não mostrou uma tendência estocástica (comportamento indefinido, com várias oscilações) e sim um comportamento que tende ao determinismo, devido à baixa dimensionalidade de correlação. Sendo possível inferir que o Pantanal, do ponto de vista da evapotranspiração é um ecossistema bem-comportado, isso para uma área que sofreu pouca interferência antrópica, como perda de vegetação nativa para dar lugar a pastagem e não possui monodominância de espécies invasoras como o Cambará (*Vochysia divergens* Pohl).

Os quatro períodos sazonais apresentam pouca diferença em relação à dimensionalidade, embora o atrator reconstruído para o período de seca apresente uma maior dispersão. Isso reforça o papel regulatório da água no ecossistema pantaneiro. Nos períodos anterior e subsequente à cheia, o Pantanal se comporta como um grande reservatório de água. Porém na seca, a que se supor que ainda permanece uma grande concentração de água no solo.

As diferenças verificadas entre o Pantanal Mato-grossense, a floresta de transição Amazônia-Cerrado (Sinop) e a Amazônia (reserva Jaru) corroboram a complexidade inerente aos sistemas abertos. A capacidade de auto-organização e autorregulação adquiridas ao longo do tempo por esses ecossistemas faz com que eles apresentem um comportamento diferente para uma mesma variável.

Em ambientes naturais, as diversas variáveis se influenciam mutuamente, estabelecendo constantes trocas com o meio, sendo impossível descrever com exatidão qual estado o sistema assumirá após essas interações. Logo, é possível prever, apenas, a probabilidade que o sistema tem de mudar para um dos estados possíveis, tendo em vista que na natureza, alguns processos não são determinísticos, como sugere a dinâmica da evapotranspiração no período em análise do Pantanal Mato-grossense. A comparação entre ecossistemas distintos demonstrou uma tendência estocástica, com oscilações diferentes para a mesma variável, mesmo ela sendo analisada em períodos sazonais semelhantes. Logo, as diferenças apontam uma complexidade maior entre os ecossistemas de transição Amazônia-Cerrado e Amazônica do que no Pantanal Matogrossense.

6. **BIBLIOGRAFIAS**

ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Strategic action program for the integrated management of the Pantanal and the Upper Paraguay River Basin. Brasília, DF: ANA/GEF/PNUMA/ OEA. 315 p., 2004.

ALLEN, R. G. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. **Journal of Hydrology**, v. 229, n.1, p. 27-41, 1998.

ALLEN, R. G; PEREIRA, L. S; RAES, D; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: (FAO – Irrigation and Drainage Paper, 56), 300 p, 1998.

ALMEIDA, M. C. Mapa Inacabado da Complexidade. In: SILVA, A. A. D; GALEANO, A (orgs.). **Geografia, Ciência do Complexus: ensaios transdisciplinares.** Porto Alegre: Sulina, 2004.

ALMEIDA, R. M. C. A ciência da complexidade. Física na Escola, v. 6, n. 1, 2005.

AMARAL FILHO, Z. P. Solos do Pantanal Mato-Grossense. In **Anais** do 1º Simpósio sobre recursos naturais e socioeconômicos do Pantanal. EMBRAPA- CPAP-UFMS, 265 p, 1984.

ARIEIRA, J; KARSSENBERG, D; DE JONG, S. M; ADDINK, E. A; COUTO, E. G; NUNES DA CUNHA, C; SKOIEN, J. O. Integrating field sampling, geostatistics and remote sensing to map wetland vegetation in the Pantanal, Brazil. **Biogeosciences**, v. 8, p. 667–686, 2011.

BERGÉ, P; POMEAU, Y; DUBOIS-GANCE, M. Dos ritmos ao caos. 1. ed. São Paulo, UNESP, 301 p, 1996.

BIUDES, M. S; MACHADO, N. G; DANELICHEN, V. H. M; SOUZA, M. C; VOURLITIS, G. L; NOGUEIRA, J. S. Ground and remote sensing-based measurements of leaf area indexin a transitional forest and seasonal flooded forest in Brazil. **Int. J. Biometeorol.** v, 58, p. 1181–1193, 2014.

BIUDES, M. S; VOURLITIS, G. L; MACHADO, N. G; ARRUDA, P. H. Z; NEVESA, G. A. R; LOBO, F. A; NEALED, C. M. U; NOGUEIRA, J. S. Patterns of energy exchange for tropical ecosystems across a climategradient in Mato Grosso, Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 202, p. 112–124, 2015.

BRANDÃO, L. G; ANTAS, P. T; OLIVEIRA, L. F; PÁDUA, M. T; PEREIRA, N. C; VALUTKY, W. W. **Plano de Manejo da Reserva Particular do Patrimônio Natural do SESC Pantanal.** – 2. ed. – Rio de Janeiro: SESC, Departamento Nacional, 148 p. 2011.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Biodiversidade do Cerrado e Pantanal: áreas e ações prioritárias para conservação.** Brasília. 540 p.: il. color, 2007.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. Florestas do Brasil em resumo. Dados de 2005-2010 – Brasília: SFB, 152 p. 2010.

BROWN, P. **Basics of Evaporation and Evapotranspiration.** College of Agriculture and Life Sciences. Cooperative Extension. The University of Arizona. 2000.

CAMPANHARO, A. L. S. O. Análise de sinais turbulentos na copa da floresta amazônica: em busca de comportamento caótico e estruturas coerentes. Dissertação (Mestrado) – Computação Aplicada, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 122 p, 2006.

CAPISTRANO, V. B. Análise de Séries Temporais de Variáveis Microclimatológicas Medidas em Sinop-MT Utilizando a Teoria da Complexidade. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2007.

CASTELNOU, A. M. N; FLORIANI, D; VARGAS, I. A; DIAS, J. B. Sustentabilidade socioambiental e diálogo de saberes: o Pantanal Mato- grossense e seu espaço vernáculo como referência. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, n.7, p.41-67, 2003.

CORINGA, E. A. O; COUTO, E. G; PEREZ, X. L. O; TORRADO, P. V. Atributos de solos hidromórficos no Pantanal Norte Matogrossense. **Acta Amazonica**, v. 42, p. 19–28, 2012.

CUNHA, G. R; PAULA, J. R. F; BERGAMASCH, H; SAIBRO, J. C; BERLATO, M. A. Balanço de radiação em alfafa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.1, n.1, p.1-10, 1993.

DAMASCENO - JUNIOR, G. A; SEMIR, J; SANTOS, F. A. M; LEITÃO-FILHO H. F. Structure, distribution of species and inundation in a riparian forest of Rio Paraguai, Pantanal, Brazil. **Flora**, v. 200, p. 119-135, 2005.

DA ROCHA, H. R; MANZI, A. O; CABRAL, O. M; MILLER, S. D; COUPE, N. R; SALESKA, S. R; WOFSY, S. C; BORMA, L. S; VOURLITIS, G, L; NOGUEIRA, J. S; ARTAXO NETTO, P. E; CARDOSO, F. L; NOBRE, A.D; KRUIJT, B; FREITAS, H. C; VON RANDOW, C; MAIA, J. F. Patterns of water and heat flux across a biome gradient from tropical forest to savanna in Brazil. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, 2009.

DE MUSIS, C. R; JUNIOR, J. H. C; FILHO, N. P. Caracterização climatológica da Bacia do Alto Paraguai, **Geografia**, v. 22, p. 5–21, 1997.

DOLMAN, A. J; DE JEU, R. A. M. Evaporation in focus. **Nature Geoscience**, v. 3, n. 5, p. 296–296, 2010.

DORIGO, W; JEU, R; CHUNG, D; PARINUSSA, R; LIU, Y; WOLFGANG, W; FERNÁNDEZ-PRIETO, D. Evaluating global trends (1988–2010) in harmonized multisatellite surface soil moisture. **Geophysical Research Letters**, v. 39, n. 18, 2012. DOUVILLE, H; RIBES, A; DECHARME, B; ALKAMA, R; SHEFFIELD, J. Anthropogenic influence on multidecadal changes in reconstructed global evapotranspiration. **Nature Climate Change**, v. 3, p. 59–62, 2012.

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

FALCONER, K. Fractal geometry: mathematical foundations e applications. 2. ed. West Sussex, UK: Jonh Wiley & Sons Ltd, 337 p, 2003.

FANTIN-CRUZ, I; GIRARD, P; ZEILHOFER, P; COLLISCHONN, W; NUNES DA CUNHA, C. Unidades fitofisionômicas em mesoescala no Pantanal Norte e suas relações com a geomorfologia. **Biota Neotropica**, v. 10, n. 2, p 31-38, 2010.

FERNANDES, F. A; FERNANDES, A. H. B. M; SOARES, M. T. S; PELLEGRIN, L. A; LIMA, I. B. T. **Update Map of Soils of the Pantanal lowlands for the Brazilian System of Soil Classification.** Comunicado Técnico 61 - Brasília-DF: Embrapa Pantanal, Corumbá-MS, 6 pp, 2007.

FISHER, J. B; TU, K. P; BALDOCCHI, D. D. Global estimates of the land–atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites. **Remote Sensing of Environment,** v. 112, n. 3, p. 901–919, 2008.

GALLEGO, M. C; GARCIA, J. A; CANCILLO, M. L. Characterization of atmospheric turbulence by dynamical systems techniques. **Boundary-Layer Meteorology.** v. 100, p. 375–392, 2001.

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

GONÇALVES, H. C; MERCANTE, M. A; SANTOS, E. T. Hydrological cycle. **Brazilian Journal of Biology**, v. 71, p. 241–253, 2011.

GRASSBERGER, P; PROCACCIA, I. Characterization of strange attractors. **The American Physical Society.** v. 50, n. 5, p. 346-349, 1983.

HAASE, R. Litterfall and nutrient return in seasonally flooded and non-flooded forest of the Pantanal, Mato Grosso, Brazil. **Forest Ecology and Management**,v. 117, p. 129–147, 1999.

HAMILTON, S. K; SIPPEL, S. J; MELACK, J. M. Inundation patterns in the Pantanal wetland of South America determined from passive-microwave remote sensing. **Archiv fur Hydrobiologie**, v. 137, n. 1, p. 1-23, 1996.

HAMILTON, S. K. Biogeochemical implications of climate change for tropical rivers and floodplains. **Hydrobiologia**, v. 657, p. 19–35, 2010.

HARRIS, M. B; TOMAS, W; MOURÃO, G; SILVA, C. J; GUIMARÃES, E; SONODA, F; FACHIM, E. Safeguarding the Pantanal Wetlands: Threats and Conservation Initiatives. **Conservation Biology.** v.19, n.3, p.714–720, 2005.

HEILMAN, J. L; MCLNNES, K. J; SAVAGE, M. J. Soil and canopy energy in a west Texas vineyard. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.71, n.1, p. 99-114, 1994.

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

HUNTINGTON, T. G. Evidence for intensification of the global water cycle: review and synthesis. **Journal of Hydrology**, v. 319, n. 1, p. 83–95, 2006.

IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

IRMAK, A. Evapotranspiration: Remote Sensing and Modeling. Croatia, 2011.

JUNG, M; REICHSTEIN, M; CIAIS, P; SENEVIRATNE, S. I; SHEFFIELD, J; GOULDEN, M. L; BONAN, G; CESCATTI, A; CHEN, J; DE JEU, R; DOLMAN, A. J; EUGSTER, W; GERTEN, D; GIANELLE, D; GOBRON, N; HEINKE, J; KIMBALL, J; BEVERLY, E; MONTAGNANI, L; UM, Q; MUELLER, B; OLESON, K; DARIO PAPALE, D; RICHARDSON, A. D; ROUPSARD, O; RUNNING, S; TOMELLERI, E; VIOVY, N; WEBER, U; WILLIAMS, C; WOOD, E; ZAEHLE, S; ZHANG, K. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. **Nature**, v. 467 (7318), p.951–954, 2010.

JUNK, W. J; CUNHA, N. C. Pantanal: a large South American wetland at a crossroads. **Ecological Engineering**, v. 24, p. 391-401, 2005.

JUNK, W. J; NUNES DA CUNHA, C; WANTZEN, K. M; PETERMANN, P; STRUSSMANN, C; MARQUES, M. I; ADIS, J. Biodiversity and its conservation in the Pantanal of Mato Grosso, Brazil. **Aquatic Sciences**, v. 68, p. 278–309. 2006.

JUNK, W. J; BROWN, M; CAMPBELL, I. C; FINLAYSON, M; GOPAL, B; RAMBERG, L; WARNER, B. G. The comparative biodiversity of seven globally important wetlands: a synthesis. **Aquatic Sciences**, v. 68, p. 400-414, 2006.

KIRK, G. **The Biogeochemistry of Submerged Soils.** John Wiley & Sons, Chichester. 2004.

KOPPEN, W. Climatologia, Fundo de Cultura, Buenos Aires, Argentina, 1948.

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

LAN, S; GUOXIONG, W. Influence of land evapotranspiration on climate variations. **Science in China**. v. 44 n. 9, 2001.

LATHUILLIERE, M. J; JOHNSON, M. S; DONNER, S. D. Water use by terrestrial ecosystems: temporal variability in rainforest and agricultural contributions to

evapotranspiration in Mato Grosso, Brazil. **Environmental Research Letters**, v. 7, 2012.

LIMA, H. N; MELLO, J. W. V; SCHAEFFER, C. E. G. R; KER, J. C. Dinâmica da mobilização de elementos em solos da Amazônia submetidos à inundação. Acta Amazonica, v. 35, p. 317-330, 2005.

LIU, Y; ZHUANG, Q; PAN, Z; MIRALLES, D; TCHEBAKOVA, N; KICKLIGHTER, D; CHEN, J; SIRIN, A; HE, Y; ZHOU, G; JERRY MELILLO, J. Response of evapotranspiration and water availability to the changing climate in Northern Eurasia. **Climatic Change**, v. 126, p. 413–427, 2014.

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

LOURIVAL, R; MCCALLUM, H; GRIGG, G; ARCANGELO, G; MACHADO, R; POSSINGHAM, H. A systematic evaluation of the conservation plans for the Pnatanal Wetlands in Brazil. **Wetlands.** v, 29. n 4. 1189-1201. 2009.

MACHADO, N. G; SANCHES, L; SILVA, L. B; NOVAIS, J. W. Z; AQUINO, A. M; BIUDES, M. S; PINTO-JUNIOR, O. B; NOGUEIRA, J. S. Soil nutrients and vegetation structure in a neotropical seasonal wetland. **Applied Ecology and Environmental Research**. v. 13, n. 2, p. 289–305, 2015.

MACHADO, N. G; BIUDES, M. S; ANGELINI, L P; MÜTZENBERG, D. M. S; NASSARDEN, D. C. S; BILIO, R. S; SILVA, T. J. A; NEVES, G. A. R; ARRUDA, P. H. Z; 2, NOGUEIRA, J. S. Sazonalidade do Balanço de Energia e Evapotranspiração em Área Arbustiva Alagável no Pantanal Mato-Grossense. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, p. 82-91, 2016.

MARGULIS, L. **O planeta simbiótico: uma nova perspectiva da evolução.** Rocco. Rio de Janeiro. 2001.

MELLO, G. J. Análise de Séries Temporais de Variáveis Micrometeorológicas Medidas em Floresta de Cambarazal no Pantanal Matogrossense Utilizando a Teoria da Complexidade. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso. 78 p, Cuiabá, 2010.

MENDES, M. A. **História e geografia de Mato Grosso**. 4 ed. Cuiabá: Cafarnaum, 354 p, 2015.

MESQUITA, F. L. L; MARQUES FILHO, E. P; KARAM, H. A; ALVALÁ, R. C. S. Balanço de radiação no pantanal sul mato-grossense durante a estação seca. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 1, p. 65-74, 2013.

MIRALLES, D. G; DE JEU, R. A. M; GASH, J. H; HOLMES, T. R. H; DOLMAN, A. J. Magnitude and variability of land evaporation and its components at the global scale, **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, p. 967–981, 2011.

MOREIRA, M. A; MASSONI, N. T. Subsídios Epistemológicas para o Professor Pesquisador em Ensino de Ciências: epistemologias do século XX. Porto Alegre, 2009.

MU, Q; ZHAO, M; RUNNING, S. W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 8, p.1781–1800, 2011.

NASSARDEN, D. C. S. **Dinâmica Sazonal de nutrientes no solo em diferentes fitofisionomias vegetais no Norte do Pantanal Mato-Grossense.** Dissertação (mestrado em Física Ambiental) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2015.

NEPSTAD, D. C; STICKLER, C. M; SOARES-FILHO, B; MERRY, F. Interactions among Amazon land uses, forests and climate: prospects for a near-term forest tipping point, **Phil. Trans. R. Soc. B**, v. 363, p. 1737–1746, 2008.

NETO, M. J. **Física ambiental e teoria da complexidade: possibilidades de ensino na educação básica.** Dissertação (mestrado em Física Ambiental) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2008.

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

NICOLIS, G; PRIGOGINE, I. **Exploring Complexity – An Introduction.** 5^a edição. New York, U.S.A.: W. H. Freeman and Company, p. 312, 1998.

NUNES DA CUNHA, C; JUNK, W. J. Distribution of wood plant communities along the flood gradient in the Pantanal of Poconé, Mato Grosso, Brazil. **International Journal of Ecology and Environmental Sciences**, v. 27, n. 1, p. 63-70, 2001.

NUNES DA CUNHA, C; JUNK, W.J. Year-to-year changes in water level drive the invasion of Vochysia divergens in Pantanal grasslands. **Applied Vegetation Science**, v. 7, p. 103-110. 2004.

PAULO, I. J. C; NETO, M. J; PAULO, S. R. Introdução a Teoria da Complexidade. Cuiaba: Ed UFMT, 2012.

PACHECO, A. P; CERQUEIRA, M. A; SILVA, B. B; NICÁCIO, R. M. Análise espaçotemporal da evapotranspiração na Área de Preservação Ambiental da ilha de Santa Rita, Alagoas, Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 38, n. 3, p. 453-460, 2014.

PAROLIN, P; WITTMANN, F. Struggle in the flood: tree responses to flooding stress in four tropical floodplain systems. **AoB Plants**, v. 3, 2010.

PEITGEN, H; JORGENS, H; SAUPE, D. Chaos and fractals: new frontiers of science. 2. ed. New York: Springer-Verlag, 864 p, 2004.

PEREIRA, A. R; ANGELOCCI, L, R; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia Agrícola.** Edição Revista e Ampliada. Departamento de Ciências Exatas. Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP, 2007.

PEREZ, P. J; CASTELLVI, F; IBANEZ, M; ROSELL, J. I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 97, p. 141-150, 1999.

PEZESHKI, S. R.; DELAUNE, R. D. Soil Oxidation-Reduction in Wetlands and Its Impact on Plant Functioning. **Biology**, v. 1, p. 196-221, 2012.

POTT, A; OLIVEIRA, A. K. M; DAMASCENO-JUNIOR, G. A; SILVA, J. S. V. Plant diversity of the Pantanal wetland. **Brazilian Journal of Biology**., v. 71, n. 1, p. 265-273, 2011.

PRADO, A. L; HECKMAN, C. W; MARTINS, F. R. The seasonal succession of biotic communities in wetlands of the tropical wet-and-dry climatic zone: II. The aquatic macrophyte vegetation in the Pantanal of Mato Grosso, Brazil. **Internatertionale Revue gesamten Hydrobiologie**, v. 79, n. 4, p. 569-589, 1994.

PRIGOGINE, I. Exploring complexity. **European Journal of Operational Research**, v. 30, p. 97-103, 1987.

REBELLATO, L; NUNES DA CUNHA, C. Efeito do "fluxo sazonal mínimo da inundação" sobre a composição e estrutura de um campo inundável no Pantanal de Poconé, MT, Brasil. Acta Botanica Brasilica, v. 19, n. 4, p. 789-799, 2005.

ROTHMUND, L. D. **Efeito da cobertura vegetal na dinâmica dos fluxos de energia no pantanal mato-grossensse**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2017.

RUELLE, D; TAKENS, F. On the nature of turbulence. **Commun. Math. Phys**. v.20, p.167–192, 1971.

SANCHES, L; VOURLITIS, G. L; CARVALHO ALVES, M; PINTO- JÚNIOR, O. B; AND SOUZA NOGUEIRA, J. Seasonal patterns of evapotranspiration for a Vochysia divergens forest in the Brazilian Pantanal. **Wetlands**, v. 31, p. 1215-1225, 2011.

SANTOS, R. D. DOS; CARVALHO FILHO, A; NAIME, U. J; OLIVEIRA, H; MOTTA P. E. F; BARUQUI, A. M; BARRETO, W.O; MELO, M. E. C. C. M; PAULA, J. L; SANTOS, E. M. R; DUARTE, M. N. Pedologia. In: Plano de conservação da Bacia do Alto Paraguai - PCBAP: diagnóstico dos meios físico e biótico - meio físico. Brasília, DF: **PNMA**, v. 2, p.127-307, 1997.

SAYAMA, H. Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems. Binghamton, NY / Natick, MA / Dresden, Germany. 498 p. 2015.

SCHWERDTFEGER, J; JOHNSON, M. S; COUTO, E. G; AMORIM, R. S. S; SANCHES, L; CAMPELO JR, J. H; WEILER, M. Inundation and groundwater

dynamics for quantification of evaporative water loss in tropical wetlands. **Hydrology** and Earth System Sciences, v. 18, p. 4407–4422, 2014.

SILVA, J. S. V; ABDON, M. M. Delimitação do Pantanal brasileiro e suas sub-regiões. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, p. 1703-1711, 1998.

SILVA, H. Análise da Temperatura do Ar Utilizando a Teoria da Complexidade em Floresta de Transição no Norte de Mato Grosso. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) - Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2014.

SIVAKUMAR, B. Chaos theory in hydrology: important issues and interpretations. **Journal of Hydrology**, v. 227, p. 1–20, 2000.

SOARES, M, R. Matemática e complexidade. Complexitas, v. 1, n. 1, p. 63-77, 2016.

STEPHENS, G. L; LI, J; WILD, M; CLAYSON, C. A; LOEB, N; KATO, S; L'ECUYER, T; STACKHOUSE JR, P. W; LEBSOCK, M; ANDREWS, T. An update on Earth's energy balance in light of the latest global observations. **Nature Geoscience**, v. 5, p. 691–696, 2012.

TAKENS, F. Detecting strange attractors in turbulence. In Dynamical systems and turbulence. Lecture notes in mathematics, n. 898, p. 366–381. Berlin, Germany: Springer, 1981.

TAO, X; CHEN, H; XU, C; HOU, Y; JIE, M. Analysis and prediction of reference evapotranspiration with climate change in Xiangjiang River Basin, China. **Water** Science and Engineering. v. 8, n. 4, p. 273 – 281, 2015.

TAVARES, A. S. Análise da evapotranspiração e condutância como processo dinâmico em dois ecossistemas amazônicos na perspectiva da teoria da complexidade. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2015.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia.** Versão digital 2. Pernambuco, Brasil. 2006.

VOROSMARTY, C. J; MCINTYRE, P. B; GESSNER, M. O; DUDGEON, D; PRUSEVICH, A; GREEN, P; GLIDDEN, S; BUNN, S. E; SULLIVAN, C. A; LIERMANN, C; DAVIES, P. M. Global threats to human water security and river biodiversity. **Nature**, v. 467 (7315), p. 555–561, 2010.

VOURLITIS, G. L; LOBO, F. A; BIUDES, M. S; ORTÍZ, C. E. R; NOGUEIRA, J. S; Spatial variations in soil chemistry and organic matter content across a Vochysia divergens invasion front in the Brazilian Pantanal. **Soil Science Society of America Journal**, v. 75, n. 4, p. 1554–1561, 2011.

XIAO, J; CHEN, J; DAVIS, K. J; REICHSTEIN, M. Advances in upscaling of eddy covariance measurements of carbon and water fluxes. **Journal of Geophysical Research**, v. 117, 2012.

XIN, L; FEI, H; GANG, L. Characteristics of chaotic attractors in atmospheric boundary-layer turbulence. **Boundary-Layer Meteorology**, v, 99. P. 335–345, 2001.

ZEILHOFER, P. Soil mapping in the Pantanal of Mato Grosso, Brazil, using multitemporal Landsat TM data. **Wetlands Ecology and Management**, v. 14, p. 445-461, 2006.