



## Informação mútua entre radiação líquida medida e reconstituída a partir de séries temporais de temperatura

Matheus Bruno Rodrigues CERINO<sup>1</sup>, Haline Josefa Araujo da SILVA<sup>1</sup>,  
Sérgio Roberto DE PAULO<sup>1\*</sup>, Denilton Carlos GAIO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil.

\*E-mail: [sergioufmt@gmail.com](mailto:sergioufmt@gmail.com)

Submetido em 26/07/2022; Aceito em 18/01/2023; Publicado em 07/02/2023.

**RESUMO:** Compreender a dinâmica de sistemas ambientais segundo abordagem que envolve a Teoria dos Sistemas Complexos é um objeto de estudo que se apresenta como alternativa perante a utilização de modelagens clássicas. O presente trabalho é dedicado à utilização do Teorema de Takens para reconstruir a dinâmica micrometeorológica da Reserva Biológica de Jarú (RO), utilizando séries temporais da temperatura do ar, particularmente, extraíndo informações sobre a radiação líquida a partir da temperatura do ar, utilizando a técnica da rotação do espaço de tempos defasados. A reprodução da dinâmica do sistema utilizando apenas séries de temperatura do ar indica que essa variável carrega informações das demais variáveis, além de informações do sistema como um todo. Utilizando a análise de informação mútua, foi estudado o quanto de informação a temperatura do ar carrega sobre a radiação líquida. Os resultados apontam que, no período de seca, a temperatura retém cerca de 80% de informação a respeito da radiação líquida e, no período, chuvoso, 60%.

**Palavras-chave:** teorema de Takens; microclimatologia; termodinâmica do não-equilíbrio; análise de séries temporais.

## Mutual information between measured net radiation and reconstructed by means of temperature time series

**ABSTRACT:** Understanding the dynamics of environmental systems according to an approach that involves the Theory of Complex Systems is an object of study that presents itself as an alternative to the use of classical models. The present work is dedicated to the use of Takens' Theorem to reconstruct the micrometeorological dynamics of the Jarú Biological Reserve (RO – Brazil), using time series of air temperature, particularly extracting information about the net radiation from the temperature, using the technique of rotation of lagged times space. The reproduction of the system dynamics using only air temperature series indicates that this variable carries information from the other variables, in addition to information about the system as a whole. Using mutual information analysis, it was studied how much information the air temperature carries on the net radiation. The results indicate that, in the dry period, the temperature retains about 80% of information regarding net radiation and, in the rainy period, 60%.

**Keywords:** Takens theorem; microclimatology; non-equilibrium thermodynamics; time series analysis.

### 1. INTRODUÇÃO

Segundo Woodside (2018), enquanto a lógica dominante atual nas pesquisas científicas ainda tenta identificar a contribuição única e a importância das variáveis independentes em influenciar as variáveis dependentes usando testes simétricos, os modelos baseados em análises de sistemas complexos apresentam maior precisão em determinados casos.

O estudo de sistema abertos, tais como sistemas ambientais, apresenta nível de complexidade maior que sistemas ideais, uma vez que permitem fluxos de matéria e energia. As interações presentes em sistemas ambientais propiciam que sua previsibilidade seja limitada e alvo de estudos segundo tratamento da Teoria da Complexidade (GHIL et al., 2002).

O Teorema de Takens (1981) é uma ferramenta utilizada para reconstrução da dinâmica de um sistema complexo. Esse teorema utiliza uma série de apenas uma variável fortemente correlacionada com o sistema, para extrair

informações a respeito de outras variáveis e da dinâmica do sistema como um todo. Segundo Ramesh et al. (2018), na prática, esse teorema pode ser utilizado por meio da técnica de reconstituição do atrator, com séries temporais com diferentes tempos de defasagem ( $\tau$ ). Capistrano (2007) indicou que a temperatura do ar é a variável que apresenta maior correlação com outras variáveis micrometeorológicas, em um ecossistema de floresta de transição em Sinop-MT. Já Palú (2009) descreveu que o tempo de defasagem ideal para a reconstrução da matriz de tempos defasados da temperatura do ar é de cinco horas para variáveis micrometeorológicas.

De Paulo et al. (2015) obtiveram resultados para a dinâmica de ecossistemas em períodos secos e chuvosos utilizando essa técnica, sendo que seus resultados apontaram que no período chuvoso ocorre aumento na complexidade do atrator reconstruído. Ferreira et al. (2017a,b) também avaliaram os efeitos da sazonalidade climática na dinâmica da temperatura do ar em uma floresta de transição entre cerrado e floresta

tropical úmida no norte de Mato Grosso, e mostraram que os atratores reconstituídos, se apresentaram como estatisticamente compatíveis com os dados instantâneos e se mostraram robustos frente à diferentes anos e estações do ano.

O Teorema de Takens (1981) leva a inferir que há a possibilidade de uma variável reproduzir a dinâmica do sistema, pois essa, devido às interações, carrega informações das demais variáveis ambientais. Para Prado (2017), essa inferência sugere que exista a possibilidade de utilizar uma variável para obter informação das demais variáveis presentes no sistema, sendo que esse autor, realizou uma investigação obtendo o perfil de radiação líquida, rotacionando uma matriz de três dimensões de tempos defasados de temperatura do ar em 250 graus. Os seus resultados sugerem que essa possibilidade de reprodução diminui no período chuvoso.

No presente estudo foi investigado a informação mútua entre os dados reais de radiação líquida medidos na Reserva de Jaru, RO, e os valores de radiação reconstituídos a partir da temperatura do ar, para o período seco e chuvoso. Também foram reconstituídos os atratores de temperatura do ar para os dois períodos.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa utilizou dados obtidos na Reserva Biológica do Jaru. Instituída como área de preservação pelo decreto nº 83.716 de julho de 1979, a Reserva Biológica do Jaru - Rebio Jaru - é localizada em 10° 46' S e 61° 56' O. Disposta na região nordeste do estado de Rondônia, na divisa com o estado de Mato Grosso, entre os municípios de Ji-Paraná, Machadinho d'Oeste e Vale do Anari. Teve sua ampliação decretada em 02 de maio de 2006, compreendendo atualmente uma área de 3.532 km<sup>2</sup> da floresta primária que, segundo Rudke et al. (2013), em grande parte constituída pela floresta primária (Figura 1).

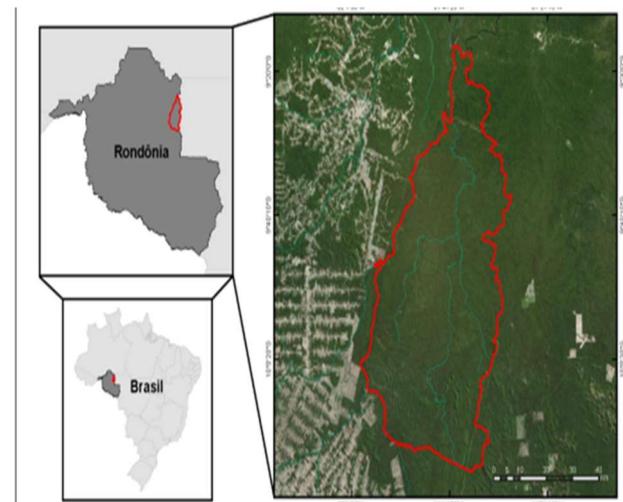


Figura 1. Localização geográfica da Reserva Biológica de Jaru. Fonte: De Souza; Aguiar (2018).

Figure 1. Geographical location of the Jarú Biological Reserve. Source: De Souza; Aguiar (2018).

A obtenção de dados da temperatura do ar e umidade relativa do ar, foram realizadas a 62 m do solo por psicrômetro (HMP 35, Vaisala, Inc., Helsinki, Finland). Após a coleta de dados, o armazenamento foi realizado por meio de sistema de aquisição de dados: Datalogger (CR 10 X,

Campbell Scientific, Int., UT, USA). O sistema do datalogger foi programado realizar o armazenamento de médias dos dados a cada 30 minutos.

O espaço de tempos defasados construído segundo o Teorema de Takens (1981), consiste na obtenção de vetores (série temporal) relacionando a série de dados original e a mesma série com atrasos temporais. Em um espaço de fase  $n$  dimensional definido pelas coordenadas generalizadas  $\{X_k(t)\}$  (sendo  $k = 1, 2, 3, \dots, n$ ), a coordenada " $X_1(t)$ " corresponde a série original. A técnica consiste em desmembrar a série temporal original " $X_1(t)$ " em deslocamentos temporais sucessivos de defasagem " $\tau$ " fixa, analiticamente:

$$\begin{aligned} X_1 &= X_1(t_1), \dots, X_1(t_N) \\ X_2 &= X_1(t_1 + \tau), \dots, X_1(t_N + \tau) \\ &\vdots \\ X_n &= X_1[t_1 + (n - 1)\tau], \dots, X_1[t_N + (n - 1)\tau] \end{aligned} \quad (01)$$

Segundo o Teorema de Takens, se  $X_n$  corresponder à série temporal da temperatura com uma defasagem  $(n-1)\tau$ , se as variáveis radiação líquida e temperatura estiverem suficientemente acopladas, a série temporal  $X_n^*$  correspondente a uma rotação,  $R$ , de  $X_n$ , no espaço de tempos defasados, se aproximará dos dados originais da radiação líquida:

$$X_n^* = R X_n \quad (02)$$

em que:  $R$  é uma matriz (ou operador) de rotação que, no espaço 3D, pode ser definida como:

$$R = \begin{pmatrix} \cos\gamma\cos\beta\cos\alpha - \sin\gamma\sin\alpha & \cos\gamma\cos\beta\sin\alpha + \sin\gamma\cos\alpha & -\cos\gamma\sin\beta \\ -\sin\gamma\cos\beta\cos\alpha - \cos\gamma\sin\alpha & -\sin\gamma\cos\beta\sin\alpha + \cos\gamma\cos\alpha & \sin\gamma\sin\beta \\ \sin\beta\cos\alpha & \sin\beta\sin\alpha & \cos\beta \end{pmatrix}$$

em que:  $\alpha, \beta$  e  $\gamma$  são os ângulos diretores no espaço 3D.

De acordo com Prado (2017), a combinação de ângulos que melhor permite a extração de dados de radiação a partir de uma série temporal de temperatura são:  $\alpha = 250^\circ$ ,  $\beta = 0$  e  $\gamma = 0$ .

De Paulo et al. (2015) sugerem que, graças a estabilidade dos sistemas ambientais naturais, o estudo pode ser realizado apenas nos meses de maior intensidade do fenômeno estudado – seca e chuva, uma vez que nos demais meses o observado seria um regime de transição, além de que a estabilidade garante que a tendência da dinâmica obtida segundo a técnica será a mesma. Para esse estudo foi utilizado os meses de fevereiro e agosto, respectivamente, períodos chuvoso e seco do local estudado, dos anos de 2008, 2009 e 2010.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Variáveis Estudadas

A Figura 2 descreve a série de temperatura do ar para o período chuvoso dos anos estudados. Os resultados da Figura 3 indicam a série de temperatura do ar para o mês de agosto, período seco, dos anos estudados. É notável em todos os anos que a temperatura do ar no período seco

apresenta maior variação na amplitude térmica diária. No período seco, os máximos e mínimos são mais intensos que no período chuvoso.

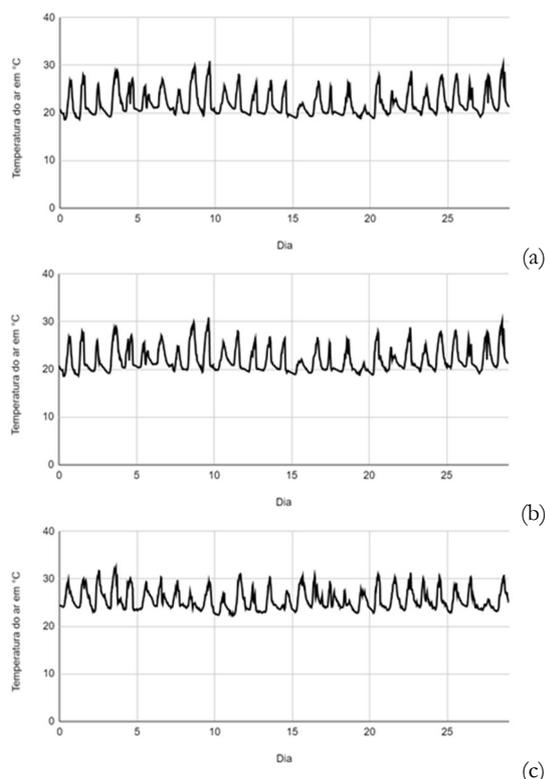


Figura 2. Série de temperatura do ar, ao longo de fevereiro, respectivamente de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.  
Figure 2. Air temperature series, throughout February, respectively from (a) 2008, (b) 2009 and (c) 2010.

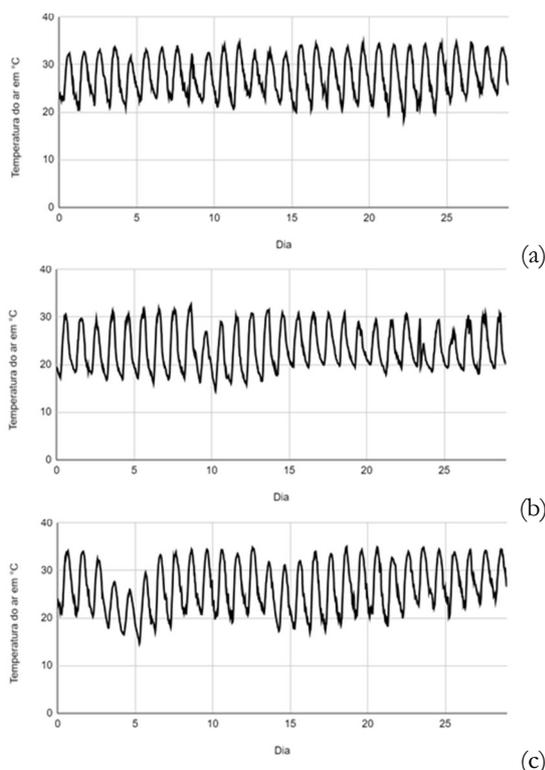


Figura 3. Série de temperatura do ar, ao longo de agosto, respectivamente de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.  
Figure 3. Air temperature series, throughout August, respectively from (a) 2008, (b) 2009 and (c) 2010.

A Figura 4, a seguir, ilustra a série da umidade relativa do ar dos anos estudados, ao longo do mês de maior intensidade das chuvas. Evidentemente, o período chuvoso apresenta considerável variação por se tratar de dados de umidade relativa, com concentração maior em valores próximos a 100%. Já no período seco a variação é observada, porém com intensidade maior, conforme a Figura 5.

A Figura 6 descreve a série da radiação líquida dos meses chuvosos dos anos estudados. O período chuvoso coincide com o verão no local estudado o que proporciona valores de radiação líquida maiores. Já o período seco, série ilustrada a seguir na Figura 7, coincide com o inverno na reserva biológica de Jarú.

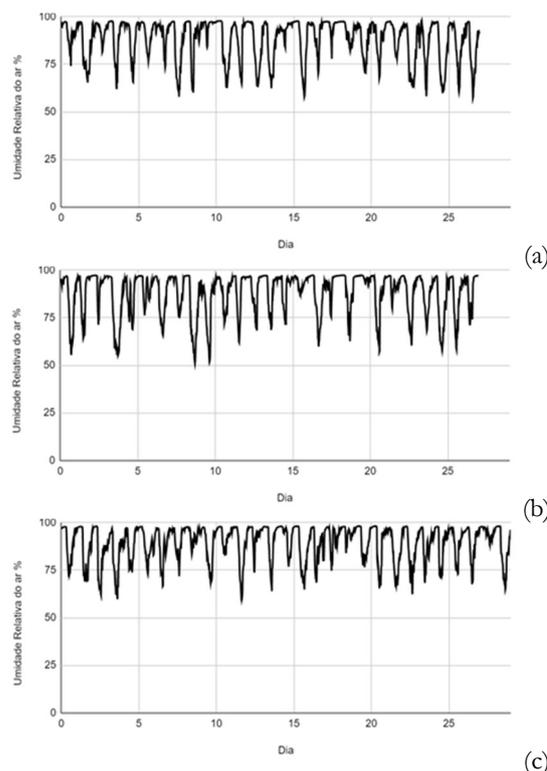


Figura 4. Série de umidade relativa do ar, ao longo de fevereiro, respectivamente de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.  
Figure 4. Series of relative air humidity, throughout February, respectively from (a) 2008, (b) 2009 and (c) 2010.

### 3.2. Atratores de Temperatura do Ar Reconstruídos

Os atratores foram reconstruídos segundo o Teorema de Takens (1981), com tempo de defasagem igual a cinco horas (PALU, 2009). A Figura 8 indica o atrator de temperatura do ar para o período seco num espaço tridimensional de tempos defasados. O eixo x se refere à série temporal de temperatura, o eixo y à mesma série com uma defasagem temporal de 5 horas ( $1 \tau$ ) e o eixo z, com uma defasagem temporal de 10 horas ( $2 \tau$ ).

Em todos os anos foi possível notar no período seco a tendência cíclica no atrator reconstruído. Isso indica que, embora dinâmico, o sistema apresenta um regime de estabilidade. Os atratores obtidos para o período chuvoso estão ilustrados na Figura 9, indicando imagens com complexidade maior, ainda assim, entre elas, existe tendências semelhantes. Esse resultado apresenta consonância com De Paulo et al. (2015), ao indicarem que embora a tendência da configuração do atrator se mantenha, no período chuvoso esse apresenta maior nível de

complexidade. O resultado indica a relação da temperatura do ar com a umidade do ar, de modo que a maior presença de umidade propicia aumento no nível de complexidade do atrator reconstruído.

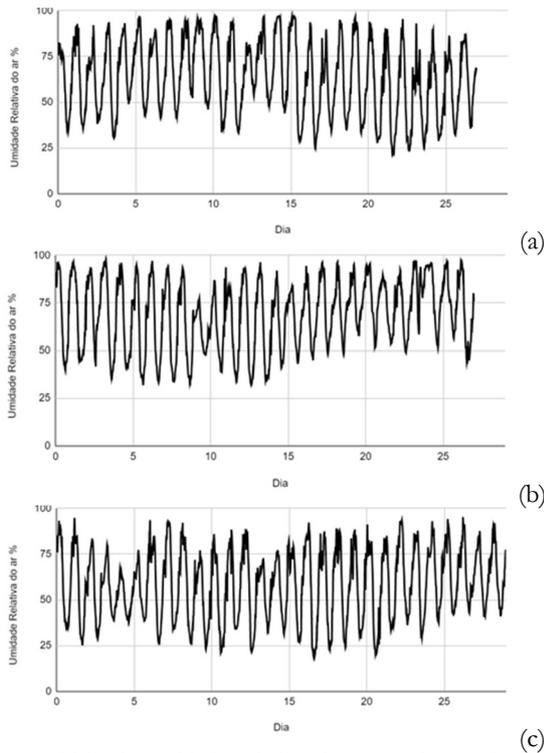


Figura 5. Série de umidade relativa do ar, ao longo de agosto, respectivamente de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.  
Figure 5. Series of relative air humidity, throughout August, respectively from (a) 2008, (b) 2009 and (c) 2010.

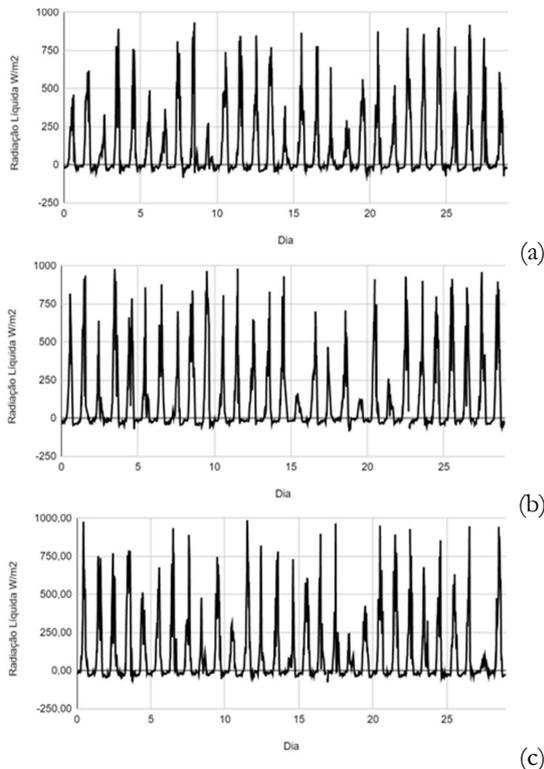


Figura 6. Série de radiação líquida disponível ao longo de fevereiro, respectivamente de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.  
Figure 6. Series of net radiation available throughout February, respectively from (a) 2008, (b) 2009 and (c) 2010.

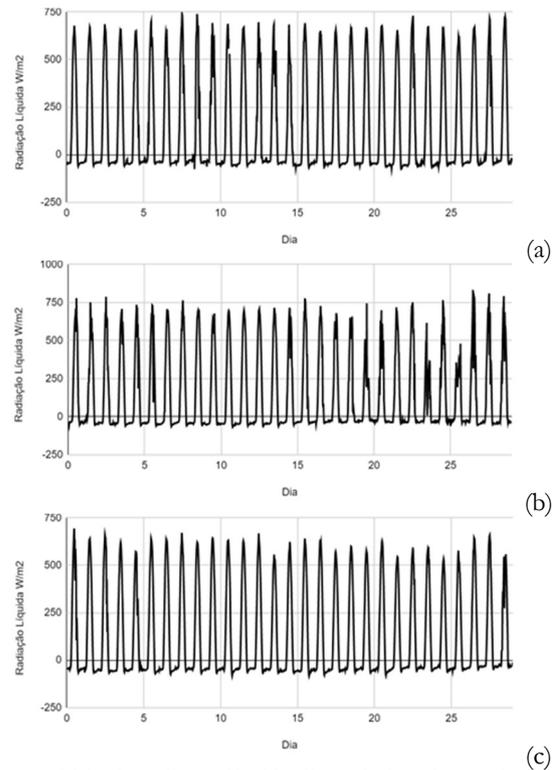


Figura 7. Série de radiação líquida disponível ao longo de agosto, respectivamente de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.  
Figure 7. Series of net radiation available throughout August, respectively from (a) 2008, (b) 2009 and (c) 2010.

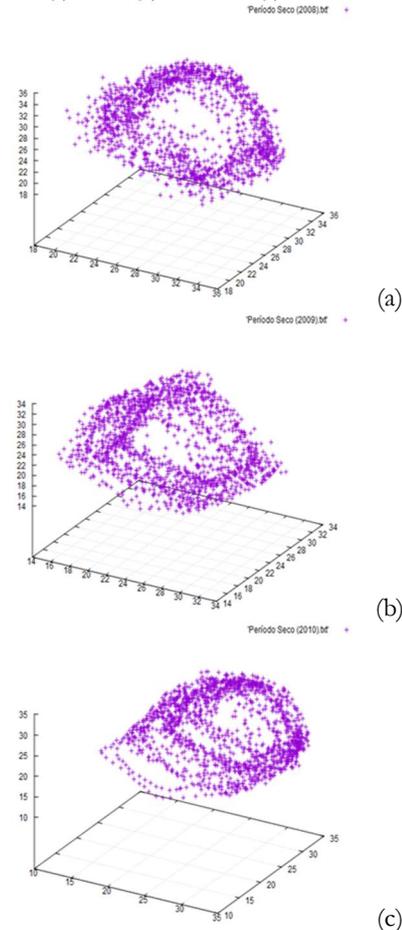


Figura 8. Atratores reconstruídos de temperatura do ar para o mês de agosto de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.  
Figure 8. Air temperature reconstructed attractors for the month of August of (a) 2008, (b) 2009 and (c) 2010.

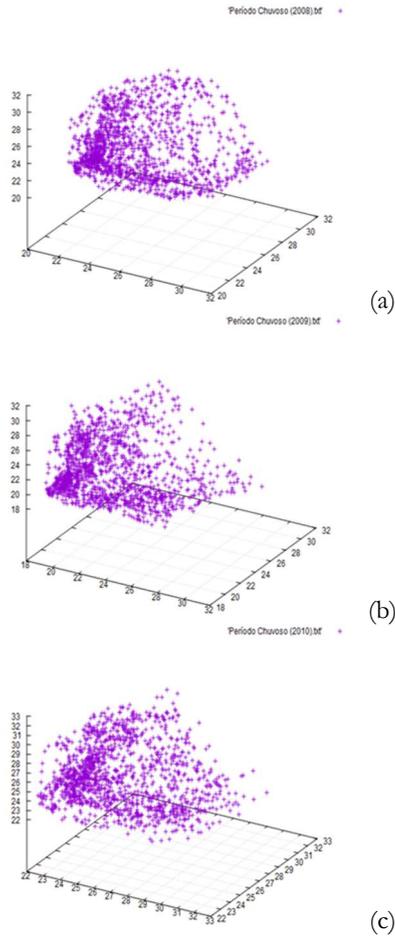


Figura 9. Atratores reconstruídos de temperatura do ar para o mês de fevereiro (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.  
 Figure 9. Air temperature reconstructed attractors for the month of February (a) 2008, (b) 2009 and (c) 2010.

**3.3. Análise da Informação Mútua**

Para investigar a possibilidade de utilizar a temperatura do ar para reproduzir padrões comportamentais de outras variáveis, foi utilizada a técnica da rotação do espaço de tempos defasados, utilizando dados de temperatura, e, em seguida, os dados de temperatura rotacionada ( $T^*$ ) foram comparados com os dados de medidas da radiação líquida ( $R_n$ ) utilizando o coeficiente de informação mútua, um índice que mede estatisticamente o quanto que duas séries temporais carregam de informação comum (ABARBANEL et al., 1993). Quando esse índice é igual a um, significa que as duas séries temporais são idênticas e, quando é nulo, que as duas séries são completamente independentes. A análise de informação mútua foi realizada para os meses utilizados na reconstrução dos atratores.

Toda a análise foi executada utilizando um *script* escrito na linguagem R. A primeira etapa da análise foi rotacionar os dados de temperatura no espaço tridimensional de tempos defasados, o que equivale a rotacionar os atratores mostrados nas Figuras 8 e 9, tomando a projeção do atrator rotacionado num dos eixos. Contudo, como os dados de temperatura e radiação líquida são dados em unidades diferentes, após a rotação, é necessária ainda a realização de uma mudança de escala, o que é feito através de uma transformação linear. O *script* verifica qual é a transformação linear que melhor ajusta os dados de temperatura rotacionada ( $T^*$ ) com a radiação líquida ( $R_n$ ). A Figura 10 ilustra os resultados obtidos nesse processo, onde são apresentados os dados originais de

temperatura (a) e radiação líquida (b) e os dados de temperatura rotacionada (c) utilizando-se os seguintes valores dos ângulos diretores:  $\alpha = 250^\circ$ ,  $\beta = 0$  e  $\gamma = 0$ .

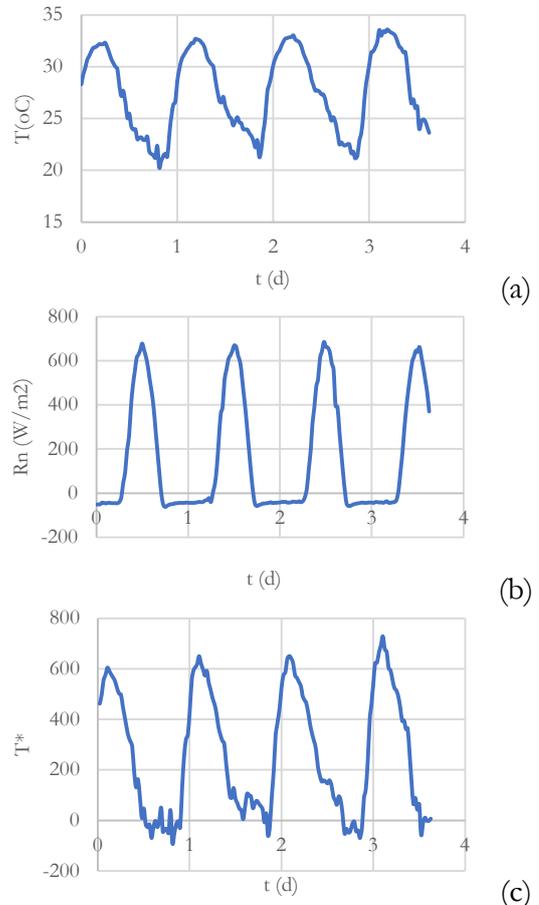


Figura 10. Resultados do processo de rotação dos dados de temperatura no espaço de tempos defasados nos quatro primeiros dias de agosto de 2008. a) Dados originais de temperatura; b) dados de radiação líquida e c) dados de temperatura rotacionada.  
 Figure 10. Results of the temperature data rotation process in the space of lagged time in the first four days of August 2008. a) Original temperature data; b) net radiation data and c) rotated temperature data.

É possível verificar, nessa Figura, que as variáveis temperatura e radiação líquida têm perfis bastante distintos, mas, quando a temperatura é rotacionada, esta assume um perfil que se aproxima da radiação líquida.

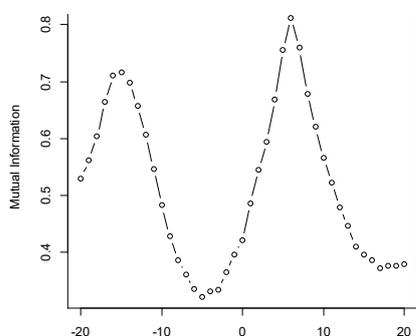
Contudo, os máximos dos picos das Figuras 10b e 10c se encontram em tempos diferentes, ou seja, se encontram defasados. Assim, o *script* em R também desloca os dados de  $T^*$  em diferentes tempos de defasagem, medindo o coeficiente de informação mútua em função do tempo de defasagem. As Figuras 11 e 12 mostram os resultados obtidos com o emprego da técnica, explicitando os valores da informação mútua em função do tempo de defasagem.

No período seco em todos os anos, embora haja dois picos de informação mútua é possível observar que o máximo, o pico maior, acontece para valores de defasagem positivos, o que indica que a série de temperatura do ar está atrasada em relação a radiação líquida. Porém ainda assim, em todos os anos o máximo de informação mútua é superior a 70%.

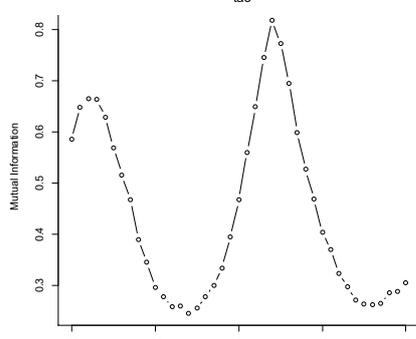
A Figura 12 apresenta novamente dois máximos de informação mútua, no período chuvoso, entretanto os picos

mais acentuados apresentam menor intensidade quando comparados com os da Figura 11. A informação mútua entre as séries de radiação líquida e temperatura do ar no período chuvoso fica abaixo dos 60%. Isso indica que a capacidade da temperatura do ar reproduzir dados de radiação diminui, no período chuvoso.

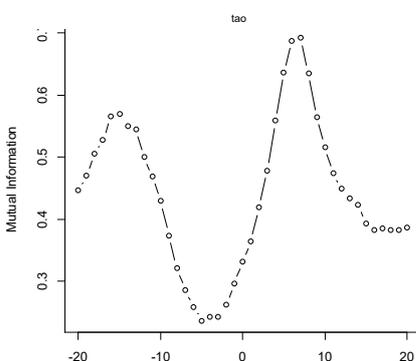
acontecer de duas formas: i) a água absorve informação da radiação e ii) a chuva introduz, na série temporal da temperatura, uma componente estocástica que faz com que a informação se dissipe. Os papéis exercidos pelos fatores i e ii merecem uma investigação futura mais detalhada.



(a)



(b)



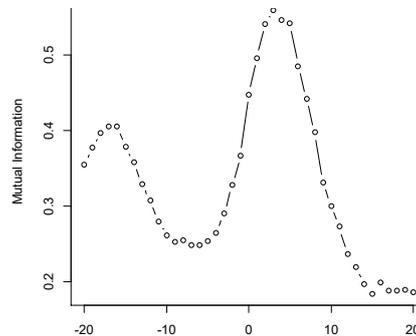
(c)

Figura 11. Análise da informação mútua vs tempo de defasagem entre radiação líquida e temperatura do ar rotacionada para agosto de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.

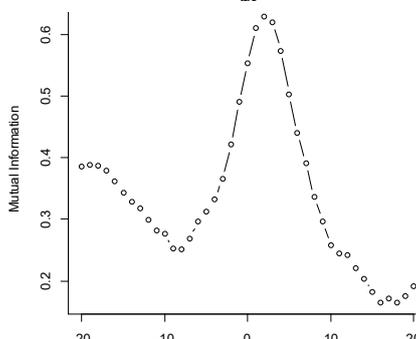
Figure 11. Analysis of mutual information vs lag time between net radiation and rotated air temperature for August (a) 2008, (b) 2009 and (c) 2010.

#### 4. DISCUSSÃO

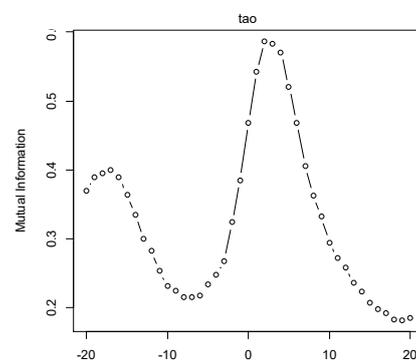
De um modo geral, o que a análise mostra é que é possível reproduzir os dados de radiação líquida a partir da temperatura a um nível de 80% de reprodutibilidade no período seco e 60% no período chuvoso. Tal resultado, tem direta implicação no processo de transferência de informação entre as variáveis nos processos de interação física de troca de energia e matéria no ecossistema. Pode-se dizer assim que essa análise indica que a temperatura retém 80% da informação sobre a radiação no período de seca. E fato desse montante se reduzir no período de chuva indica que a presença de água no ar reduz a transferência de informação da radiação para a temperatura. Hipoteticamente, isso pode



(a)



(b)



(c)

Figura 12. Análise da informação mútua vs tempo de defasagem entre radiação líquida e temperatura do ar rotacionada para fevereiro de (a) 2008, (b) 2009 e (c) 2010.

Figure 12. Analysis of mutual information vs lag time between net radiation and rotated air temperature for February (a) 2008, (b) 2009 and (c) 2010.

#### 5. CONCLUSÕES

A utilização de dados da temperatura do ar de um sistema para a reprodução da dinâmica desse sistema é possível, por conta da forte interação dessa variável com o sistema. Entretanto, no período chuvoso, a configuração dinâmica obtida segundo a reconstrução do atrator apresenta nível de complexidade maior. Nessa perspectiva, a análise da informação mútua apresenta que a temperatura preserva informação sobre a radiação, o que indica que é possível obter dados das demais variáveis através de séries de temperatura utilizando a técnica de rotação do espaço de tempos defasados. Entretanto, a preservação de informação tem sensibilidade à presença de umidade, pois no período

chuvoso a informação mútua entre radiação líquida e temperatura do ar rotacionada tende a diminuir. Futuros estudos devem ser realizados para melhor compreender a interrelação e descrever metodologias que possibilitem a utilização da temperatura do ar para a obtenção de dados das demais variáveis.

## 6. REFERÊNCIAS

- ABARBANEL, H. D. I.; BROWN, R.; SIDOROWICH, J. J.; TSIMRING, L. S. The analysis of observed chaotic data in physical systems. **Reviews of Modern Physics**, v. 65, n. 4, 1993. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.65.1331>
- ANDRADE, N. L. R.; AGUIAR, R. G.; SANCHES, L.; ALVES, É. C. R. F.; NOGUEIRA, J. S. Partição do saldo de radiação em áreas de floresta amazônica e floresta de transição Amazônia-cerrado. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 3, p. 346-355, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862009000300008>
- CAPISTRANO, V. B. **Análise de Séries Temporais de Variáveis Microclimatológicas Medidas em Sinop-MT Utilizando a Teoria da Complexidade**. 62p. Dissertação [Mestrado em Física Ambiental] - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2007.
- DA FRANCA, R. R. Climatologia das chuvas em Rondônia - período 1981-2011. **Revista Geografias**, p. 44-58, 2015. <https://doi.org/10.35699/2237-549X.13392>
- DE PAULO, S. R.; DE PAULO, I. J. C.; DE DECKER. Reconstructing the micrometeorological dynamics of the southern Amazonian transitional forest. **Chaos**, v. 25, e123123, 2015. <https://doi.org/10.1063/1.4938188>
- FERREIRA, H. S.; DE PAULO, S. R.; DE PAULO, I. J. C. Dinâmica da temperatura do ar de uma floresta de transição no norte de Mato Grosso. **Nativa**, v. 5, n. esp., p. 504-508, 2017a. <http://dx.doi.org/10.5935/2318-7670.v5i74516>
- FERREIRA, H. S.; DE PAULO, S. R.; DE PAULO, I. J. C. Aplicação do método de variáveis defasadas no estudo da temperatura média do ar em uma floresta de transição do norte de Mato Grosso. **Nativa**, v. 5, n. esp., p. 477-482, 2017b. <http://dx.doi.org/10.5935/2318-7670.v5i7.4497>
- GHIL, M.; ALLEN, M. R.; DETTINGER, M. D.; IDE, K.; KONDRASHOV, D.; MANN, M. E.; ROBERTSON, A. W.; SAUNDERS, A.; TIAN, Y.; VARADI, F.; YIOU, P. Advanced Spectral Methods for Climatic Time Series. **Reviews of Geophysics**, v. 40, n. 1, p. 3.1-3.41, 2002. <https://doi.org/10.1029/2000RG000092>
- PALÚ, A. E. R. **Determinação do tempo de defasagem mais adequado para análise de séries temporais de variáveis microclimatológicas medidas numa floresta de transição no Norte de Mato Grosso**. 48p. Dissertação [Mestrado em Física Ambiental] - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2008.
- PRADO, M. F. **Desenvolvimento de uma metodologia para obtenção de informações sobre saldo de radiação a partir da temperatura do ar em ecossistemas naturais**. 68p. Tese [Doutorado em Física Ambiental] - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2017.
- RAMESH, N.; CANE, M. A. The predictability of tropical Pacific decadal variability: insights from attractor reconstruction. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 76, n. 3, p. 801-819, 2019. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-18-0114.1>
- TAKENS, F. Detecting strange attractors in turbulence. In: RAND, D. A.; YOUNG, L. S. (Eds). **Dynamical systems and turbulence**. Lecture Notes in Mathematics, n. 898, p. 366-381. Berlin, Germany: Springer. 1981.
- WOODSIDE, A. G.; NAGY, G.; MEGEHEE, C. M. Applying complexity theory: a primer for identifying and modeling firm anomalies. **Journal of Innovation & Knowledge**, v. 3, n. 1, p. 9-25, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2017.07.001>

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, ao professor Leone Francisco Amorim Curado, bem como ao CNPq, pelo apoio financeiro.

### Contribuições dos Autores:

Todos os autores deste trabalho contribuíram da mesma forma em todas as funções no artigo, desde sua concepção até a redação. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

### Financiamentos:

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – Processo 443163/2020-0.

### Revisão Institucional:

Não se aplica.

### Comitê de Ética da área:

Não se aplica.

### Disponibilização dos dados do estudo:

Os dados desse estudo podem ser obtidos mediante solicitação ao autor correspondente ou ao primeiro(a) autor(a), via e-mail. Não está disponível em sites, pois o projeto de pesquisa ainda está em desenvolvimento.

### Conflito de interesses:

Os autores declaram que não existem conflitos de interesses. As entidades/instituições de apoio não tiveram nenhum papel na concepção do estudo, na coleta, análise ou interpretação de dados, na redação do manuscrito, ou na decisão de publicar os resultados.