

Aplicação do Operador de Fragmentação Assimétrica (FA) na comparação de dados coletados *in situ* por diferentes sensores e transmitidos pelos satélites brasileiros SCD e CBERS : um exemplo de aplicação ao Sistema de Monitoramento Ambiental (SIMA)

Arcilan Trevenzoli. Assireu¹
José Luiz Stech¹
Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo¹
João Antonio Lorenzetti¹
Ivan Bergier Tavares de Lima¹
João Carlos Carvalho¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Caixa Postal 515 -12201-970 – São José dos Campos – SP, Brasil
{arcilan,stech,evlyn,loren,ivan,jcarlos}@dsr.inpe.br

Abstract. As part of a large limnological project, an autonomous data collection system has been installed at some natural and man-made water reservoirs in Brazil. This is a moored buoy where a special electronics and a suite of meteorological and water quality sensors is used to transmit in near real time the hourly collected data using the Brazilian satellites CBERS-2 and SCD 1/2. Some of the sensors are in duplicate so that we have means of assessing the consistency of the series. This paper discusses the application of the "Phase Space" and the "Gradient Pattern Analysis" methodologies to examine the air and water temperature time series collected by this system. The two analysis methods indicate great potential of tracking the temporal evolution of the variables as well as identifying time change anomalies related to sensor radiometric resolution.

Palavras-chave: Operador de Fragmentação Assimétrica, Assymmetric Fragmentation Operator, Monitoramento Ambiental, Environmental monitoring, dados meteorológicos e limnológicos, meteorological and limnological data.

1. Introdução

Segundo Mandelbrot (1991), um número útil para caracterizar fractais é a dimensão fractal. Esse número quantifica o grau de irregularidade ou de fragmentação de um conjunto geométrico, de uma figura ou de um objeto natural. Este operador propicia uma investigação da complexidade espaço-temporal contida numa série temporal.

O Operador de Fragmentação Assimétrica é uma técnica eficiente para caracterizar padrões de variabilidade espacial e faz parte do método de análise de padrões dos campos gradientes (Gradient Pattern Analysis – GPA, introduzido por Rosa et al. (1998)). O pressuposto adotado no desenvolvimento do GPA é o de que a complexidade de um padrão espacial é caracterizada pela sua falta de simetria e pelo seu grau de fragmentação. Essas propriedades do padrão (falta de simetria e fragmentação) podem ser resumidas no Operador de Fragmentação Assimétrica (FA). Padrões simétricos apresentam valores de Fa iguais ou próximos a zero. A partir da análise de aproximadamente 200 simulações de padrões, Rosa et al. (1998) e Rosa et al. (1999) concluíram que o aumento de FA corresponde a um aumento da quantidade e da extensão de contornos e de estruturas finas em diferentes padrões.

Neste trabalho são aplicadas as técnicas de Construção de Espaço de Fase e Análise por Padrão de Gradientes (APG) em series temporais de dados de temperatura do ar e temperatura da água, coletados no Lago Grande de Curuai e no reservatório hidrelétrico de Tucuruí. Estes dados foram coletados por sensores colocados em sistemas autônomos de coletas e transmissão dos dados via enlace de satélite.

2. Dados e métodos

2.1 Dados

Os dados utilizados neste trabalho são provenientes de um projeto financiado pela FAPESP e CT/Hidro (MCT) e pelo Projeto FURNAS. No âmbito do primeiro projeto foram fundeados dois sistemas de coleta automática e transmissão de dados meteorológicos e limnológicos no Lago Grande de Curuai e no reservatório hidrelétrico de Tucuruí, na região amazônica. Pelo Projeto FURNAS um sistema foi fundeado no Reservatório Hidrelétrico de Serra da Mesa (GO) e o outro no Reservatório Hidrelétrico de Manso (MT). Os dados usados são séries temporais correspondentes ao período de agosto a outubro de 2004, de temperatura do ar, coletados por dois sensores diferentes e temperatura da água a 2,5 m de profundidade, também coletada por sensores diferentes.

2.2 Espaço de fase

De acordo com a teoria de sistemas dinâmicos, a melhor forma de estudar a dinâmica de um sistema é através do espaço de estado. O espaço de estado é formado por um conjunto de coordenadas que representam as variáveis descritivas do sistema.. Para cada passo de tempo, o sistema pode ser representado por um ponto neste estado de espaço. A partir da conexão destes pontos, define-se uma trajetória que descreve a evolução do sistema. Esta trajetória converge para um atrator, o qual descreve assintoticamente o estado final do sistema. O atrator pode ser uma estrutura topológica simples, como um ponto ou um ciclo limite, como pode ser também uma estrutura caracterizada por geometria fractal (Tsonis & Elsner, 1990). Se a descrição matemática de um sistema dinâmico é dada, o número de variáveis é conhecido e a geração do estado de espaço e do atrator é imediata. Se, no

entanto, a formulação matemática de um sistema for desconhecida, o espaço de estado pode ser substituído pelo espaço de fase. O espaço de fase pode ser construído a partir dos dados observados de uma variável $x(t)$ de um determinado sistema e seus sucessivos deslocamentos (Packard et al., 1980).

Assim, dada uma observação $x(t)$, é possível gerar o estado completo do vetor $X(t)$ usando-se $x(t+\tau)$ como a primeira coordenada, $x(t+2\tau)$ como a segunda coordenada e $x(t+m\tau)$ como a última coordenada. Neste contexto, τ é o intervalo ou o incremento dos dados.

Como as grandezas utilizadas neste trabalho (temperatura, pressão e umidade relativa do ar) são todas escalares, foi feito o seguinte para que estas variáveis pudessem ser representadas num espaço de fase:

1) seja $\alpha = \frac{\Delta G}{\Delta t}$, onde G é a grandeza escalar em análise;

2) a fim de obter uma grandeza adimensional para α , seja: $\theta = \frac{\alpha}{\max(\text{abs}(\alpha))}$;

com $\theta_* = \theta * \pi$

3) Assumindo-se que θ (definido acima) é um equivalente de direção, pode-se definir as componentes de G como:

$$\begin{aligned} G_x &= G \cos(\theta) \\ G_y &= G \sin(\theta) \end{aligned} \tag{1}$$

4) A partir de (1) pode-se construir a pseudotrajetória que retrata a evolução temporal da dinâmica associada a grandeza em questão, a partir da adaptação da seguinte formulação (Emery & Thomson, 2001):

$$(x, y) = (G_{x_0}, G_{y_0}) + \sum (G_{x_i}, G_{y_i}), (i = 1, 2, \dots) \tag{2}$$

2.3 Análise por Padrão de Gradientes

Neste trabalho foi também utilizada a técnica de Análise por Padrão de Gradientes na investigação do grau de complexidade envolvida na evolução das variáveis estudadas. Foi aplicado o Fator de Assimetria (FA) como caracterizador do regime de complexidade médio, cujos detalhes metodologia podem ser encontrados em Rosa et al. (1998 e 1999), Assireu et al. (2002 e 2004). Também foi empregada a versão local do FA cujos detalhes se encontram em Assireu et al. (2004).

3 – Resultados e Discussão

O Operador de Fragmentação Assimétrica (FA), foi aplicado na intercomparação entre séries de temperatura do ar e temperatura da água medidas simultaneamente por dois diferentes sensores instalados no Sistema de Monitoramento Ambiental (SIMA).

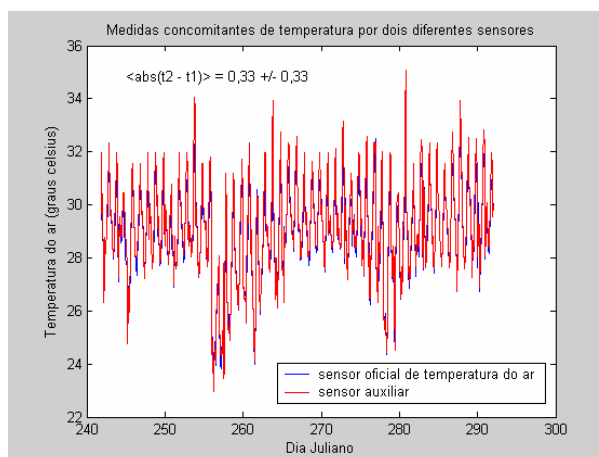


Figura 1 – Série temporal de temperatura do ar medidas simultaneamente pelo sensor principal (azul) e pelo sensor auxiliar (vermelho) (Lago Grande de Curuai).

A resolução nominal do sensor principal é de $0,1^{\circ}\text{C}$ e do sensor auxiliar de $0,3^{\circ}\text{C}$. Note que o desvio padrão da diferença absoluta entre as séries (0,3) (**Figura 1**) é da ordem da resolução do sensor secundário. Isto indica que estas séries, em média, diferem entre si num nível equivalente às suas resoluções individuais e que tais diferenças se devem basicamente às restrições de resolução destes sensores.

Na **Figura 2-a** é mostrado o diagrama de espalhamento entre os valores de temperatura do sensor principal versus sensor secundário e os valores de FA da série temporal oriunda do sensor principal e os valores de FAs obtidos a partir da série do sensor auxiliar (Figura 2-b). A Figura 2-a indica que estas variáveis são muito bem correlacionadas, porém observa-se a existência de um viés não homogêneo, que se intensifica em temperaturas mais altas. Isto é uma primeira indicação de que a diferença entre estes sensores é não sistemática o que parece ser confirmado pelas Figuras 2-b e 3. A Figura 2-b indica que a evolução temporal da temperatura registrada por estes dois sensores é diferente (correlação de 0,72). Na **Figura 3** são marcados com linhas tracejadas os períodos em que as séries apresentaram maiores discrepâncias. Baseado no fato de que a resolução nominal do sensor auxiliar é mais baixa do que a do principal, especula-se que tais diferenças locais na evolução temporal da temperatura se devam a menor estabilidade do sensor auxiliar decorrente da baixa resolução, o que provocaria uma maior contaminação por ruído. Tal afirmação é baseada no fato de o FA médio ser maior para a série relativa ao sensor auxiliar (Figura 3 – gráfico inferior). Note também que o desvio padrão da temperatura medida por este sensor ($1,8^{\circ}\text{C}$) é maior do que a correspondente para o sensor principal ($1,6^{\circ}\text{C}$).

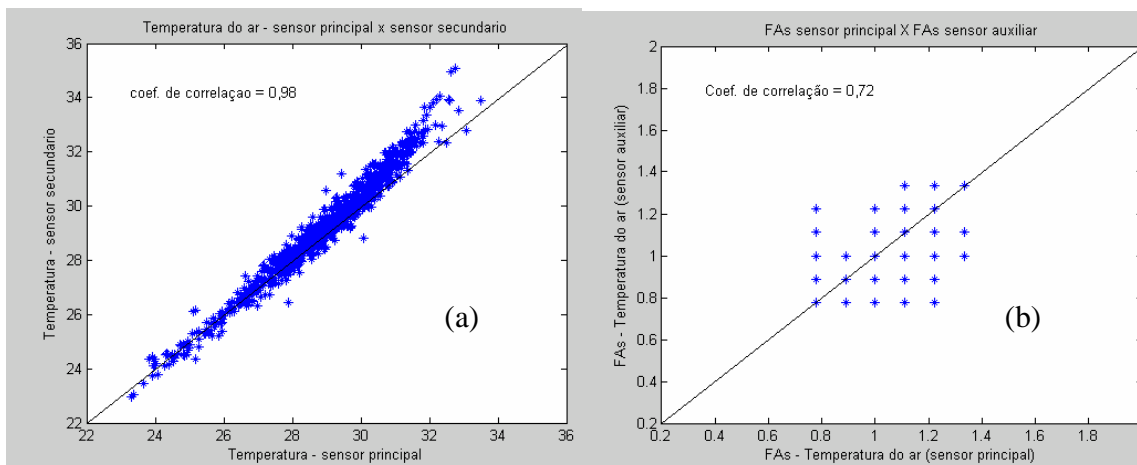


Figura 2 – Espalhamento entre os valores de temperatura (a) e de FA da série temporal oriunda do sensor principal X FAs s (b) obtidos a partir da série oriunda do sensor auxiliar.

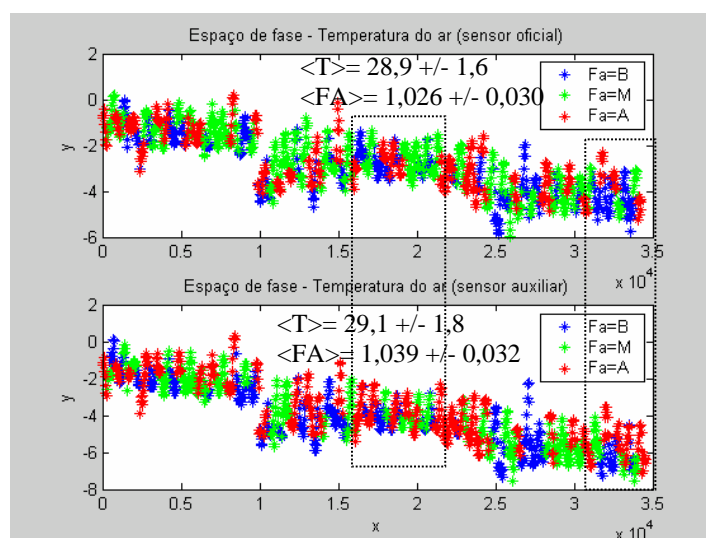


Figura 3 – FA Local ao longo do espaço de fase construído a partir da série de temperatura do sensor principal (gráfico superior) e relativo ao sensor auxiliar (gráfico inferior) (Curuai). São indicados em linhas tracejados os períodos mais persistentes de discrepâncias.

As análises descritas acima foram também aplicadas sobre séries de temperatura da água medidos pela sonda limnológica e pelo termistor fundeado a 2m (profundidade equivalente a amostragem da sonda), ambos instalados no SIMA (Figura 4). Os resultados indicam que o valor médio das diferenças absolutas entre as temperaturas medidas pelos dois sensores ($0,27 \pm 0,15$) ultrapassa a resolução nominal informada pelos fabricantes ($0,01^\circ\text{C}$ para a sonda) e ($0,1^\circ\text{C}$ para o termistor).

Pela Figura 5 percebe-se que a evolução no regime de temperaturas registrado por estes diferentes sensores é o mais diferente dentre todas as séries analisadas. Note que ao contrário dos resultados apresentados nas Figuras 3 e 5, na Figura 5 somente em pequenos

e raros trechos se observa coerência entre os padrões de cores. Isto é reflexo do fato terem estes sensores diferenças de quase uma ordem de grandeza em relação à resolução. Assim, os valores médios de FA maiores para a o termistor (gráfico superior na **Figura 5**) é devido a um maior nível de ruído existente nesta série em decorrência da menor resolução deste sensor em relação à sonda limnológica.

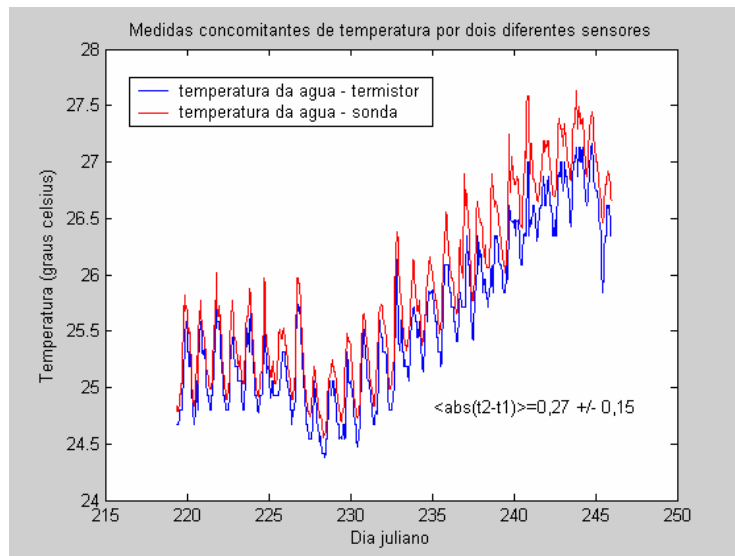


Figura 4 – Séries temporais de temperatura da água medida simultaneamente sonda limnológica (vermelho) e pelo termistor (azul) (lago de Curuai).

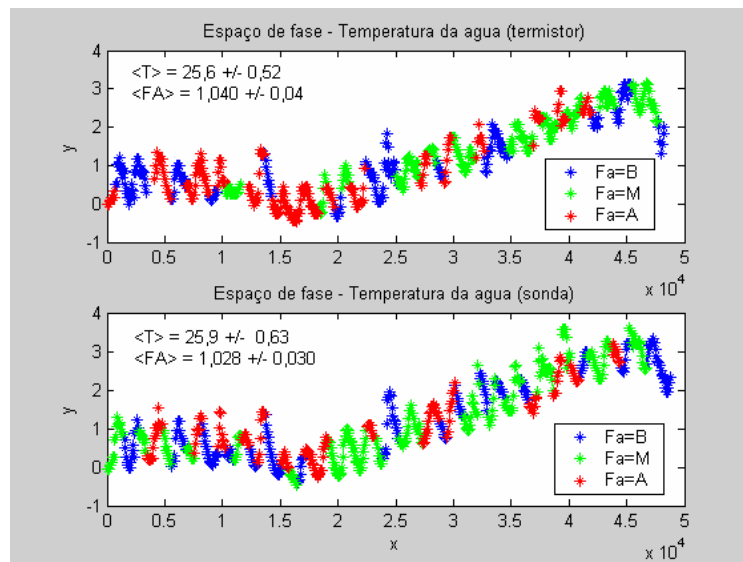


Figura 5 – FA Local ao longo espaço de fase construído a partir da série de temperatura do termistor (gráfico superior) e relativo a sonda limnológica (gráfico inferior) (Reservatório de Serra da Mesa).

4 Conclusão

O Operador de Fragmentação Assimétrica (FA), foi aplicado na comparação entre séries de temperatura do ar e temperatura da água medidas simultaneamente por dois diferentes sensores a bordo do Sistema de Monitoramento Ambiental (SIMA). A análise foi feita sobre o espaço de fase reconstruído de cada variável analisada (conforme discutido em 2.2). A grande vantagem deste tipo de representação é de permitir mapear ao mesmo tempo a evolução instantânea do parâmetro e sua intensidade. Isto permite que se diagnostique em quais períodos estas séries se mantiveram mais coerentes entre si e em que períodos elas apresentaram comportamentos distintos. Note que num sistema multiparâmetro como é o SIMA, isto abre a possibilidade de se investigar as razões físicas que levaram a maior ou menor coerência. A aplicação do método sobre os dados de temperatura da água e do ar indicou que a sonda consegue resolver com melhor exatidão a evolução temporal da temperatura da água quando comparado ao termistor e, portanto, registrar variações mais sutis no campo de temperatura. Este resultado parece óbvio já que sabemos de antemão que a resolução da sonda é superior à do termistor. Porém, vale lembrar que estes sensores são localizados remotamente (e, portanto de difícil inspeção rotineira) e que os dados ao serem transmitidos via enlace com satélite, podem sofrer degradação. O método vem a contribuir como uma ferramenta diagnóstica de qualidade e integridade dos dados. As medidas de temperatura do ar realizadas pelo sensor principal e o auxiliar mostraram-se bastante coerentes entre si. O método indicou também que a discrepância de aproximadamente $0,3^{\circ}\text{C}$, entre as medidas de temperatura do ar dos dois sensores, observadas em Curuai, não é sistemática, porém as variabilidades observadas localmente ao longo das séries, indicam que os dois sensores respondem de forma muito parecida às variabilidades do campo de temperatura do ar. O método mostrou-se eficiente em detectar diferenças e ou semelhanças entre séries de dados que passariam despercebidas pelos métodos convencionais. Destaca-se como grande potencialidade do método a possibilidade de permitir o mapeamento da evolução temporal das variáveis, o que permite, em sistema multiparâmetro tal qual o SIMA, que se investigue as causas e conseqüências envolvidas.

Referências bibliográficas

- Adelsbrunner, H. **Handbook of Convex Geometry** Editors P. M. Gruber and J. M. Wills, Elsevier Science Publishers, 1993.
- Assireu, A.T.; Rosa, R.R.; Lorenzetti, J.A; Vijaykumar, N.L.; Rempel, E.L.; Ramos, F. M.; Sá, L.D. Abreu; Bolzan, M.J.A.; Zanandrea, A.. Gradient pattern analysis of short nonstationary time series: an application to Lagrangian data from satellite tracked drifters. **Physica D**, v. 168-169, p 397-403, 2002.
- Assireu, A. T.; J. A. Lorenzetti; E. M. L. M. Novo; J. L. Stech; C. Z. F. Braga; I. B. T. Lima., 2004. Aplicação do Operador de Fragmentação Assimétrica (FA) na caracterização de controles geomorfológicos em reservatórios hidroelétricos. Aceito na **Revista Brasileira de Geociências**, v. 32, n. 4.
- Emery, W. J. and Thomson, R.E. **Data analysis methods in physical oceanography**. Amsterdam: Elsevier, 2001, 638 p.
- Mandelbrot, B. **Objetos Fractais**. Lisboa: Gradiva, 1991. 250 p.
- Packard, N. H., Crutchfield, J. P. Farmer, J. D. and Shaw, R. S. Geometry from a time series. **Phys. Rev. Lett.**, v. 45, p. 712-716, 1980.
- Rosa, R.R.; Sharma, A.S.; Valdivia, J.A. Characterization of localized turbulence in plasma extended system. **Physica A**, 257, p 509-514, 1998.

Rosa, R.R., Sharma, A.S., Valdivia J.A. 1999. Characterization of asymmetric fragmentation patterns in spatially extended systems. **International Journal of Modern Physics**, v. C10, n. 1, p. 147-163, 1999.

Tsonis, A.A. and Elsner J.B. Multiple attractors, fractal basins and long-term climate dynamics. In: AGU spring meeting. Baltimore, MD. **Abstract volume**. May29-June2, 1990.

ANEXO 1

Segmentação do FA

Como o FA é obtido a partir de matrizes 3x3, é possível mostrar por considerações geométricas, que todos os valores possíveis de FA ficam restritos aos seguintes valores discretos: 0,778; 0,889; 1,000; 1,111; 1,222; 1,333. A fim de facilitar as interpretações, estes valores foram agrupados dois a dois e segmentados em cores, tendo-se usado a seguinte convenção:

0,778 – 0,889 = FA=B(baixa complexidade – azul); 1,000 – 1,111 = FA=M(média complexidade - verde); 1,222 – 1,333 = FA=A(alta complexidade – vermelho).