

PREVISIBILIDADE DA DINÂMICA OCEÂNICA NA BACIA DE SANTOS ATRAVÉS DE DADOS DE DERIVADORES RASTREADOS POR SATÉLITE

dos Santos¹, F. A.; Assireu^{2,3}, A. T.; Marques da Cruz¹, L. M.; Fragoso¹, M. R.; Pellegrini¹, J. A. C.; Cerrone¹, B. N.; Freitas², R. M.; Rosa², R. R.

¹PROOCEANO – Av. Rio Branco, 311 sl. 1224, Centro – Rio de Janeiro - RJ, francisco@prooceano.com.br

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Av. dos Astronautas, 1758, Jardim da Granja, São José dos Campos-SP

³Laboratório de Ecologia Aquática – Universidade Federal de Juiz de Fora – Juiz de Fora – MG

I. RESUMO

O método de análise da correlação integral proposto por GRASSBERGER & PROCACCIA (1984) foi aplicado aos dados de derivadores oceânicos do Projeto MONDO visando investigar a previsibilidade da dinâmica oceânica na bacia sul/sudeste brasileira. O comportamento das curvas no espaço m-dimensional sugere a presença de um atrator relacionado à escala do raio de Rossby na região, dividindo a dinâmica em dois sub-sistemas. Um primeiro, de maiores escalas e previsibilidade e um segundo, de menor previsibilidade associado aos regimes turbulentos. A entropia calculada sugere uma previsibilidade determinística de aproximadamente 3 dias para fenômenos de escalas espaciais da ordem de 30 Km.

Palavras chave: número de Rossby, sistemas não lineares, previsibilidade lagrangiana.

II. INTRODUÇÃO

A previsibilidade dos fenômenos oceânicos de meso-escala nas bacias Sul/Sudeste brasileiras é uma questão ainda controversa. Inconteste, no entanto, é a importância de seu conhecimento para indústria offshore. O que se sabe até então, sugere a presença de sistemas altamente irregulares, com grande variabilidade de espaço-temporal, cuja previsão deve ser bastante sensível às condições iniciais escolhidas.

Por fornecerem informações quantitativas a respeito da previsibilidade destes fenômenos, métodos de análise de sistemas não lineares vêm sendo usados extensivamente em estudos desta natureza (ECKMANN & RUELE, 1985). GRASSBERGER & PROCACCIA (1984) propõem uma metodologia baseada na escala de correlação integral, amplamente usada no estudo do caos e da dimensionalidade de atratores espaciais. Esta análise permite estimativas sobre a escala temporal de previsibilidade média dos sistemas atuantes (EMERY & THOMSON, 1997).

Usando este método, ASSIREU (2003) analisou os dados provenientes dos derivadores lançados pelo Programa Nacional de Bóias – PNBOIA (www.ltid.inpe.br/pnboia/pnboia.html).

Entretanto, o volume e a resolução espacial/temporal dos dados disponíveis na ocasião não foram considerados suficientes para embasar conclusões a respeito da previsibilidade.

Neste trabalho, o método é aplicado aos dados do Projeto MONDO (PROOCEANO/ENI, 2007), mais adequados à tarefa devido à densidade de dados de derivadores, à alta taxa amostral (3 h) e resolução espacial ($\sim 10\text{m}$) dos equipamentos usados.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados analisados consistem em 3360 informações instantâneas de corrente, transmitidas por 35 derivadores lançados ao mar ao longo de 2 meses (20/09 a 13/11/2007), cobrindo a região entre 24 e 30°S . Estes dados foram tratados seguindo os passos descritos em FRAEDRICH & LESLIE (1989) e apresentados a seguir.

A trajetória de um derivador i , é amostrada em partes de comprimento m , iniciadas no tempo t_i e representadas pelas coordenadas x e y em cada passo de tempo Δt como sendo:

$$X_m(t_i) = [x(t_i), y(t_i); \dots; x(t_i + (m-1)\Delta t), y(t_i + (m-1)\Delta t)] \quad (1)$$

Em seguida, calculam-se as distâncias $d_{ij}(k)$ entre as partes das trajetórias dos derivadores $X_m(t_i)$ e $X_m(t_j)$, para $k = \{0, \dots, m-1\}$ e contam-se quantas mantêm-se, para todo k , a uma distância inferior a o limiar ε escolhido. A normalização desta contagem $N_m(\varepsilon)$ em função do número N_m de combinações possíveis é chamada de Integral de Correlação $C_m(\varepsilon)$ (Eq. 2) e nela encontram-se medidas quantitativas a respeito dos possíveis atratores no espaço de fase.

$$C_m(\varepsilon) = \frac{N_m(\varepsilon)}{(N_m - 1)^2} \quad (2)$$

Para sistemas aleatórios, as curvas de um gráfico de $\ln(C_m) \times \ln(\varepsilon)$ terão uma inclinação $D_2 = 2m$. Por outro lado, a existência de um valor de saturação D_0 a partir do qual o aumento de m não influi sobre a inclinação das curvas, indica que alguma previsibilidade é esperada neste sistema (EMERY & THOMSON, 1997). Além disso, o valor de m a partir do qual D_2 torna-se invariável corresponde ao número de variáveis que precisam ser levadas em consideração por modelos numéricos ou analíticos usados para prever a evolução destes sistemas dinâmicos.

Na região ϵ do gráfico onde D_0 é alcançado, o cálculo do espaçamento entre as curvas de diferentes m representa a entropia (K_2), cujo valor está associado à escala temporal de previsibilidade para a região.

$$K_2(m, \epsilon) = \frac{1}{\Delta t} \left[\frac{\ln(C_m(\epsilon))}{\ln(C_{m-1}(\epsilon))} \right]. \quad (3)$$

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na **Figura 1.a**, nota-se um adensamento das curvas para $m > 4$ entre $\ln(\epsilon) = 3$ e 3.5 (aprox. 20 Km $< \epsilon < 30$ Km), e a existência de um valor de saturação D_0 – ou seja, de um atrator (**Figura 1.b**) – na mesma escala do raio de Rossby na região (HOURY et al., 1987; CHELTON et al., 1998). Uma estimativa da previsibilidade determinística dos fenômenos na escala deste atrator é obtida através do valor médio de $1/K_2$ nesta escala. No gráfico da **Figura 1.c** nota-se que a entropia (K_2) é de aproximadamente 0,0129 ($1/K_2 = 77$ horas), representando uma duplicação do erro inicial após 3 dias da previsão.

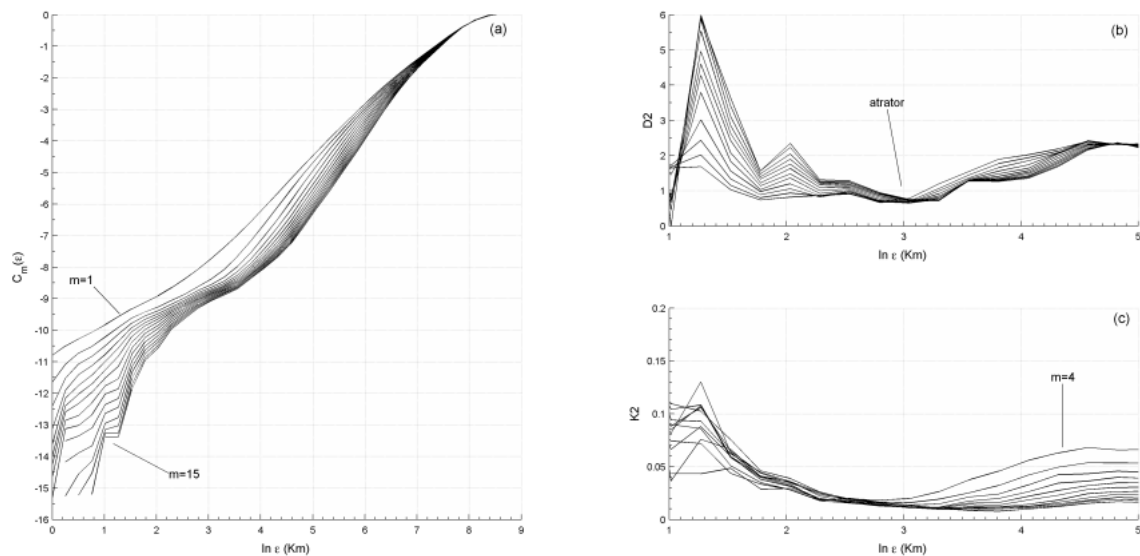


Figura 1: (a) integral de correlação $C_m(\epsilon)$ para $m = \{1, \dots, 15\}$. (b) Inclinação das curvas de $C_m(\epsilon)$, apresentando a dimensão D_2 do atrator para $m = \{4, \dots, 15\}$. (c) Entropia K_2 do sistema para $m = \{4, \dots, 15\}$.

O fato da dimensão D_2 tornar-se constante apenas para $m > 4$ indica que este é o número mínimo de variáveis necessárias para o estudo da dinâmica deste sistema (EMERY & THOMSON, 1997).

A interpretação física destes resultados sugere a presença na região de 2 sub-sistemas dinâmicos (ECKMANN & RUELLE, 1985; FRAEDRICH et al., 1990). O primeiro sistema, de escala espacial $\epsilon > 30$ Km, parece estar relacionado à dinâmica de Rossby ($R_0 < 1$), podendo ser descrito com razoável previsibilidade em até 3 dias. O segundo sub-sistema seria forçado pelo primeiro (do qual é dependente), estando confinado às menores escalas espaciais ($\epsilon < 30$ Km, $R_0 \sim 1$) e apresentando um comportamento mais turbulento (e.g. turbulência geostrófica).

Um exemplo da interação entre estes sistemas é evidenciado pelo comportamento de 4 derivadores entre 22/10 e 07/11/2007 (estes derivadores foram lançados da mesma posição em um intervalo de 6 dias). Enquanto 2 derivadores realizam um giro anti-ciclônico relacionado a um vórtice de meso-escala (pertencente ao primeiro sub-sistema descrito no parágrafo anterior), outros dois derivadores desprendem-se desta circulação em pequenos giros ciclônicos de diâmetro inferior a 30 Km provocados pelo cisalhamento gerado pela presença do vórtice de maior escala. (Figura 2).

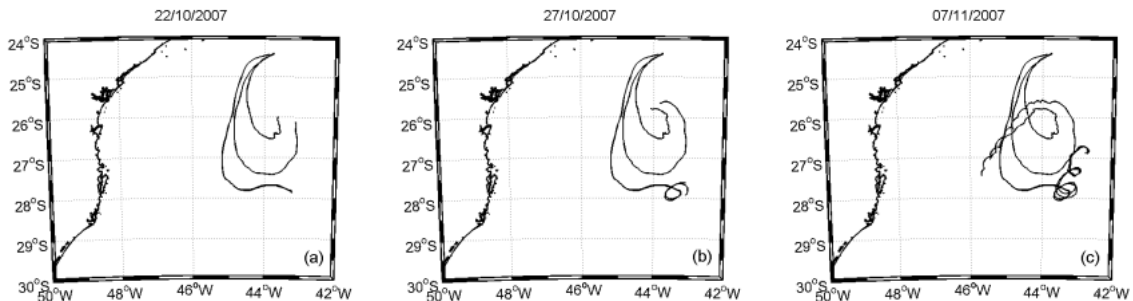


Figura 2: Evolução da trajetória de 4 derivadores do Projeto MONDO no período entre 22/10 e 07/11/2007.

V. CONCLUSÕES

Os métodos de análise não linear aplicados aos dados dos derivadores do Projeto MONDO permitiram estimar a previsibilidade de fenômenos na escala do raio de Rossby na região (~ 30 Km). Os resultados indicam que os erros tendem a duplicar para simulações superiores a 3 dias. Além disso, é sugerido que ao menos 4 variáveis devam ser consideradas em estudos de modelagem nesta região.

Propõe-se, para estudos futuros, uma investigação sobre quais variáveis seriam mais determinísticas para a dinâmica da região, além da realização de estudos de modelagem de forma a testar a escala de previsibilidade proposta.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à ENI Oil do Brasil por tornar públicos os dados do Projeto MONDO.

VII. REFERÊNCIAS

ASSIREU, A. T. 2003. Estudo das Características Cinemáticas e Dinâmicas das Águas de Superfície do Atlântico Sul Ocidental a partir de Derivadores Rastreados por Satélite. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CHELTON, D.B.; deSZOEKE, R. A.; SCHLAX, M.G.; el NAGGAR, K.; SIWERTZ, N. 1998. Geographical variability of the first baroclinic Rossby Radius of Deformation. **J. Phys. Oceanogr.**, 28(3), pp. 433-460.

EKMANN, J.-P.; RUELLE, D. 1985. Ergodic theory of chaos and strange attractors. **Rev. of Mod. Phys.**, Vol. 57, No. 3, Part I.

EMERY, W.J.; THOMSON, R.E. 1997. Data Analysis Methods in Physical Oceanography. Elsevier, Amsterdam, 638 p.

FRAEDRICH, K.; LESLIE, L.M. 1989. Estimates of cyclone track predictability I: Tropical cyclones in the Australian region. **Q. J. R. Meteorol. Soc.**, 115, pp. 79-92.

FRAEDRICH, K.; GROTTJAHN, R.; LESLIE, L.M. 1990. Estimates of cyclone track predictability II: Fractal analysis of mid-latitude cyclones. **Q. J. R. Meteorol. Soc.**, 116, pp. 317-335.

GRASSBERGER, P.; PROCACCIA, I. 1984. Dimensions and entropies of strange attractors from a fluctuating dynamics approach. **Physica D**, 13, pp. 34-54.

HOURY, S.; DOMBROWSKY, E.; DE MEY, P.; MINSTER, J.-F. 1987. Brunt-Väisälä frequency and Rossby Radii in the South Atlantic. **J. Phys. Oceanogr.**, 17(10), pp. 1619-1626.