

MODELAGEM DE ESTRUTURAS CONVERGENTES DO CAMPO SUPERFICIAL DE CORRENTES NA BACIA DE CAMPOS (RJ): POR SENSORIAMENTO REMOTO

Jaime R. Añazco,¹ Gutemberg. B. França²

Submetido em 2 maio, 2003/Aceito em 10 março, 2004

Submitted May 2, 2003/Accepted March 10, 2004

ABSTRACT

This paper presents results and analyses that indicate, more clearly, the ability of the convergent structure of the Surface Currents Field (CSC) of capturing superficial pollutants. This convergent structure is induced by the frontal interaction of the Brazil Current and the coastal circulation in the off-shore Campos Basin. The characterization of the convergent structure of the CSC is made by particle tracking simulation with a stochastic transport model, parameterized with Wiener-Levy nonhomogeneous process, so that it allows that the advective component, supplied by CSC, be nonuniform. The CSC derived from sequential infrared images of the NOAA satellites, by Maximum Cross Correlation method (CCM), is stationary and with negligible turbulent diffusion. The success of the CCM method for estimating CSC, depends on the perfect correction and registration of the images, as well as on the conditions for a good conservation of the "identity" of the tracers (size of tracer and time between images). These conditions are sufficiently satisfied for the off-shore Campos Basin and the used images. The analysis of the particle tracking from CSC estimates, show clear structures of stationary character, following two patterns: a winter pattern, where the dominant structure is a convergence line and a summer pattern, where the convergent structure is controlled by a meander. In agreement with these convergence patterns, there are also two patterns for both the influence and capture areas: the winter season is dominated by the convergence line and summer season by the meander. Considering that the influence and capture areas are almost totally controlled by the "advective diffusion" (deterministic), induced by the convergent structures of CSC, it is expected that they absorb 90% of the floating substances that eventually can be generated inside their limits, as oil originated by accidental spills or seep accumulation.

Keywords: particle tracking; pollutant transport; advection-diffusion model; satellite images; cross correlation; Campos Basin.

RESUMO

Este trabalho apresenta resultados e análises que indicam, mais claramente, a capacidade da estrutura convergente do Campo Superficial de Correntes (CSC), induzida pela interação frontal da Corrente do Brasil e a circulação litorânea (no mar da Baía de Campos), de capturar poluentes superficiais. A caracterização da estrutura convergente do campo é feita mediante a simulação de trajetórias de partículas com um modelo estocástico de transporte (processo não-homogêneo de Wiener-Levy), que permite que o componente advectivo, fornecido pelo CSC, seja não-uniforme. O CSC estimado a partir de imagens infravermelhas seqüenciais dos satélites NOAA, mediante o método da Correlação Cruzada Máxima (CCM), é estacionário e com difusão turbulenta desprezível. O sucesso do método da CCM, utilizado para se estimar o CSC, usando como traçadores as feições espaciais do campo térmico superficial marinho, depende de correção e registro precisos das imagens, e das condições para uma boa conservação da "identidade" dos traçadores (tamanho de traçador e tempo entre imagens). Condições que são suficientemente satisfeitas no mar da Baía de Campos. A análise das trajetórias das partículas mostra, no CSC estimado, claras estruturas de caráter estacionário, de acordo com dois padrões: um de inverno, dominado por uma linha de convergência e outro de verão, dominado por um meandro. Coerente com estes padrões tem-se também dois padrões de áreas de influência e de captura: o de inverno, dominado pela linha de convergência e o de verão, pelo meandro. Considerando-se que as áreas de influência e captura são quase totalmente controladas pela "difusão advectiva" (determinística), induzida pelas estruturas convergentes do CSC, espera-se que elas abocanhem 90% das substâncias flutuantes que eventualmente passam ser geradas dentro de seus limites, como óleo, produto de derrames acidentais e/ou de acumulação de vazamentos contínuos.

Palavras-chave: trajetória de partículas; transporte de contaminantes; modelo advecto-difusivo; imagens de satélite; correlação cruzada; Baía de Campos.

¹ Observatório Nacional/MCT/Geofísica. General José Cristino 77 – São Cristóvão - RJ – CEP: 20921-400 – Rio de Janeiro – Brasil – E-mail: palacios@on.br

² Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), LAMMA/DEP. Meteorologia /1GEO, bloco G - Ilha do Fundão – Av. Brigadeiro Trompowski, s/n – CEP: 21949-400 – Rio de Janeiro – Brasil – E-mail: gutem@acd.ufrj.br

INTRODUÇÃO

É freqüente a existência de zonas frontais associadas às correntes de fronteira, que são normalmente reveladas pelos gradientes de temperatura e de salinidade. A oceanografia por satélite, na década atual, confirma a existência e discrimina claramente as escalas envolvidas de uma estrutura particular, normalmente convergente, do Campo Superficial de Correntes (CSC, definido no final do parágrafo 4.1) associada a estas interfaces (OKUBO, 1977; NIHOUL, 1984; HOOKER; BROWN, 1996).

Áreas de captura de poluentes superficiais, muito eficientes, poderiam ser induzidas por esta estrutura convergente (ROBINSON, 1991; AÑAZCO, 1998). Esta estrutura, quando formada na periferia imediata de fontes potenciais importantes de poluição, por exemplo, campos de produção de óleo no mar, constitui-se num “sugador natural” de poluentes superficiais que eventualmente podem ser gerados por estas fontes. Evidentemente, nesses casos, o conhecimento de localização, estacionaridade, etc. das áreas de captura associado a esta estrutura, é um complemento importante na otimização dos processos de recuperação, remediação, etc., de derrames de óleo, que normalmente se programa nos planos de contingência. Aqui reside a importância de se “mapear” a evolução espaço-temporal do campo da divergência do CSC nas zonas frontais.

A determinação de áreas de captura de poluentes em zonas frontais é parte do problema de transporte advecto-difusivo. Os modelos numéricos para este problema são alimentados normalmente por um campo de correntes 3-D, obtido de um modelo hidrodinâmico. O campo de correntes nas zonas frontais é difícil de modelar porque os processos envolvidos estão associados à interação da dinâmica local e oceânica (NIHOUL, 1975).

O CSC, derivado de imagens infravermelhas seqüenciais de Satélite, mediante métodos associados ao seguimento de traçadores (VASTANO; REID, 1985; EMERY; THOMAS; COLLINS, 1986; TOKMAKIAN; STRUB; MACCLEAN-PADMAN, 1990; KELLY; STRUB, 1992), parece mostrar uma caracterização representativa do campo real nestas zonas frontais, coerente com as escalas envolvidas, sendo portanto uma entrada alternativa para modelos de transporte nessas zonas frontais.

O CSC, particularmente aquele que é derivado do deslocamento de traçadores passivos com inércia, difusão e deformação desprezível, como por exemplo, “eventos térmicos” contidos em uma imagem infravermelha de satélite — uma vez removidos os componentes da velocidade produzidos pelas marés —, é uma resposta predominante para

as mais baixas freqüências do campo atual subjacente (ROBINSON, 1983). Neste caso é razoável aceitar que as flutuações do CSC são de escala advectiva (determinística).

Os modelos estocásticos de transporte (o poluente é modelado como uma nuvem de parcelas ou macropartículas), que são apropriados para poluentes cujo domínio é pequeno comparado com o domínio marinho, precisam de um campo de correntes não-divergente como entrada (ELLIOTT; DALE; PROCTOR, 1992; LARDNER et al., 1993; CEKIRGE et al., 1995). Sendo por definição o CSC de uma zona frontal fortemente divergente (ou convergente), será necessário fazer adaptações em um destes modelos, de forma que aceite o CSC como entrada.

Uma suposição freqüente, usada em modelos estocásticos, é que as flutuações do campo se descorrelacionam depois de um certo tempo característico (tempo integral Lagrangiano), alcançando após deste tempo, um regime de turbulência relativa assintótica (turbulência Gaussiana ou de Fick (BLOKLAND; HEEMINK, 1994)). Não obstante, trabalhos observacionais em áreas litorâneas, mostrem a coexistência de componentes autocorrelacionados do campo, por dias e até mesmo meses, com turbulência Gaussiana (CSANADY, 1963; ELLIOTT; HURFORD; PENN, 1986). Coexistência semelhante tem sido justificada, tanto teoricamente quanto por aplicações, em processos de transporte advecto-difusivos na atmosfera (HUNT, 1985; KAPLAN; DINAR, 1996).

A não-uniformidade do campo (divergência e vorticidade) manifesta-se em geral, autocorrelacionando-se os componentes do campo, de tal modo que, das estimativas dessas autocorrelações é possível quantificar a “intensidade” desta mesma não-uniformidade do campo (HUNT, 1985; KRAUSS; BÖNING, 1987; KAPLAN; DINAR, 1996).

A área de estudo fica situada entre o Cabo São Tomé e Cabo Frio (Bacia de Campos), no litoral do Estado de Rio de Janeiro (Brasil). Em particular, a interação de águas tropicais e subtropicais, a influência de Cabo Frio (efeito de ponta) e a batimetria local sobre a Corrente de Brasil produzem uma circulação bastante complexa com um intenso gradiente térmico, isto é, uma típica zona frontal (MIRANDA; YKEDA; MASCARENHAS JR, 1970; SIGNORINI, 1976).

Neste trabalho, será estimado o CSC pelo método da Correlação Cruzada Máxima (CCM) (EMERY; THOMAS; COLLINS, 1986), usando-se seqüências de imagens infravermelhas, do Advanced Very High-Resolution Radiometer (AVHRR) dos satélites NOAA da região da Bacia de Campos. Um modelo estocástico, tendo como entrada o CSC estimado, será utilizado para a simulação das trajetórias das partículas sob a influência de zona frontal, e destes resultados se determinará a estrutura da convergência do CSC e as áreas de captura de poluentes associadas.

CONDIÇÕES DO PROBLEMA

- A estrutura convergente do CSC (formada por um meandro e uma linha de convergência), associada à zona frontal formada entre a Corrente do Brasil e a circulação litorânea no mar da Bacia de Campos, apresentaria um padrão sazonal (um durante o verão e outro durante o inverno). Assim sendo, esta estrutura convergente induziria áreas de captura de ação quase permanente [sugestão de Añazco (1998)].
- O CSC obtido de imagens térmicas seqüenciais do AVHRR, pelo método da CCM, é de caráter determinístico.
- Postula-se a influência simultânea das flutuações de CSC de escala advectiva (determinística) e a turbulência Gaussiana, depois de um dia, no transporte de volumes pequenos de derramamentos de óleo nesta área.

DADOS

Foi usado um conjunto de 20 imagens do AVHRR dos satélites NOAA 11, 12 e 14, do canal 4, livres de nuvens, caracterizadas e distribuídas em seis seqüências (Tabela 1). Uma seqüência é composta por quatro imagens seqüenciais, correspondentes a um período aproximado de 24 horas. Essas seqüências são ordenadas cronologicamente: As primeiras três seqüências são do inverno de 1993, a quarta seqüência é do verão de 1993, as duas seqüências finais são do verão de 1995. O intervalo de tempo (t_1) entre as imagens do primeiro par de uma seqüência (imagem 1 e imagem 2) e o intervalo de tempo (t_2) entre as imagens do segundo par da mesma (imagem 3 e imagem 4) são apresentados à direita nas duas colunas finais da Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização das 6 seqüências de imagens infravermelhas, do canal 4, dos satélites NOAA, utilizadas para estimar o CSC.
 Table 1 – Characterization of the 6 sequences of NOAA satellites infrared images, of 4th channel, used to estimate the CSC.

Seqüência	Imagem 1	Imagem 2	Imagem 3	Imagem 4	t_1 (hora)	t_2 (hora)
1 Data Time (UT) Satélite NOAA	26/06/93 18:58 11	26/06/93 22:28 12	27/06/93 06:14 11	27/06/93 09:40 12	03:30	03:26
2 Data Time (UT) Satélite NOAA	20/07/93 19:07 11	20/07/93 22:13 12	21/07/93 06:23 11	21/07/93 09:25 12	03:06	03:02
3 Data Time (UT) Satélite NOAA	21/07/93 06:23 11	21/07/93 09:25 11	21/07/93 18:55 11	21/07/93 21:52 11	03:02	02:57
4 Data Time (UT) Satélite NOAA	14/11/93 06:16 11	14/11/93 09:30 12	14/11/93 18:47 11	14/11/93 21:57 12	03:14	03:10
5 Data Time (UT) Satélite NOAA	10/04/95 16:19 14	10/04/95 22:26 12	11/04/95 03:36 14	11/04/95 09:37 12	06:07	06:01
6 Data Time Satélite NOAA	11/04/95 03:36 14	11/04/95 09:37 12	11/04/95 16:08 14	11/04/95 22:04 12	06:01	05:56

MÉTODOS

A descrição, a implementação e a aplicação do método da CCM e do modelo de partículas são apresentados a seguir.

Correlação Cruzada Máxima (CCM)

O método da Correlação Cruzada Máxima foi aplicado pela primeira vez a dados marinhos, para se estimar o CSC, por Emery e outros (1986), usando-se como traçadores passivos os “eventos térmicos” contidos nas imagens do canal 4 do satélite NOAA.

O método de CCM aplicado a imagens infravermelhas de satélite é dependente dos valores relativos da temperatura do mar (estruturas espaciais), portanto, trabalha bem com valores de radiância ou de brilho. Também descarta a operação de correção atmosférica porque o vapor da água contido na atmosfera tem uma escala espacial maior do que as escalas das janelas de gabarito (*template*) e procura (*search*) que o método normalmente utiliza, e seu efeito (absorção da energia radiante) é eliminado ao subtrair as médias de tais janelas (EMERY; THOMAS; COLLINS, 1986; EMERY; FOWLER; CLAYSON, 1992).

O método supõe que, para duas imagens seqüenciais de mesma região, as feições na segunda imagem, são as mesmas que as da primeira, só que deslocadas de suas posições originais pelo campo de velocidades subjacente. Então, a matriz bidimensional (coeficientes de correlação em posições relativas sucessivas), obtida da correlação cruzada entre a janela gabarito que contém a feição em sua posição original (na primeira imagem) e a janela de procura, que contém a feição deslocada (na segunda imagem), apresentará um coeficiente de correlação máximo (produto da correlação de uma feição consigo mesma, numa posição e num tempo posterior), identificando assim a nova posição da feição dentro da janela de procura. A continuação do vetor deslocamento desta feição e o tempo entre as suas posições inicial e final (tempo entre a primeira e a segunda imagem), estima-se o vetor de velocidade média da feição, que é uma estimativa local do campo de velocidades subjacente, estimativa que com alguns refinamentos adicionais especificados adiante, estamos chamando de CSC. Repetindo este procedimento para o resto de feições nas duas imagens (dividindo a primeira imagem, em $n \times n$ janelas de gabarito e a segunda em $n \times n$, algo maiores, janelas de procura, de tal modo que cada janela de procura e sua correspondente janela de gabarito tenham um centro relativo comum), um campo de velocidades é obtido. Detalhes do método podem ser vistos em Ninnis Emery, Thomas e Collins (1986), Garcia e Robinson (1989), Tokmakian, Strub e Macclean-Padman (1990), Gao e Lythe (1996) e Añazco (1998).

O sucesso do método depende principalmente de uma precisa navegação das imagens [geometricamente corrigidas e registradas em um mapa com um rms global de 0,5 elemento de imagem, no mínimo (EMERY; FOWLER; CLAYSON, 1992)] e de que as feições conservem sua “identidade” (com deformação, difusão e rotação desprezível) durante o intervalo de tempo entre imagens. Este intervalo de tempo deve ser também suficiente para permitir que uma feição qualquer se mova com uma velocidade uniforme (constante) aproximadamente. O melhor intervalo de tempo para isto, em áreas costeiras, é de 4-6 horas (TOKMAKIAN; STRUB; MACCLEAN-PADMAN, 1990; KELLY; STRUB, 1992), que é justo o intervalo típico dos pares de imagens seqüenciais dos satélites NOAA (Tabela 1).

A estimativa do CSC para cada seqüência do estudo (Tabela 1) é obtida pela aplicação das etapas subseqüentes:

Navegação de imagem — todas as imagens do trabalho foram geometricamente corrigidas e registradas mediante uma transformação polinomial definida “conectando” pontos de controle do perfil costeiro (>20) entre cada uma das imagens e um mapa (projeção Mercator equatorial), com um rms de 0,5 de elemento de imagem aproximadamente.

Correlação Cruzada Máxima — o método é aplicado a cada um dos dois pares de imagens navegadas que formam uma seqüência. Neste estudo, foram selecionadas uma janela de gabarito de 16×16 elementos de imagem, de acordo com o tamanho médio do evento térmico, que na área de trabalho é de 14.4km (AÑAZCO, 1998), e uma janela de procura de 32×32 elementos de imagem, de acordo com o tamanho da janela de gabarito e a velocidade máxima do campo superficial, que na área de trabalho é de 0,7m/s (SIGNORINI, 1976; AÑAZCO, 1998). O nível mínimo de significância de 95% adotado para o coeficiente de correlação é 0.4 (EMERY; FOWLER; CLAYSON, 1992; AÑAZCO, 1998). Dividindo, o campo de deslocamentos obtido para cada par da seqüência, pelo intervalo de tempo entre imagens (Tabela 1, t_1 e t_2), obtém-se dois campos de velocidades para cada seqüência, com alguns vetores “incoerentes”.

Filtro de coerência (EMERY; FOWLER; CLAYSON, 1992) — a condição de que o evento térmico se move conservando sua “identidade” é equivalente a se aceitar que o evento se desloca como um corpo sólido, e isto só é possível se o evento é transportado por um campo de velocidade localmente coerente (uniforme) em direção. Neste estudo, um vetor de velocidade será coerente se sua direção é semelhante à da seus vizinhos imediatos, com uma tolerância de $\pm 30^\circ$ (selecionada empiricamente). Os vetores não-coerentes foram substituídos mediante interpolação linear.

Campo residual— na área de trabalho, o componente predominante do campo de velocidades produzido pela maré é de 24 horas (HARARI, 1985). Como o tempo entre os dois campos de velocidades de cada seqüência é de aproximadamente 12 horas (Tabela 1), esse componente de maré está registrado nesses dois campos com uma diferença de fase de 180°. Portanto, o valor médio desses dois campos fornece um campo de velocidade residual (quase sem maré) para cada seqüência. A continuação, para eliminar um nível incipiente de ruído, da ordem de 4% - 5% e obter uma versão de campo mais suave ou coerente, aplica-se a cada componente deste campo residual um filtro de média móvel de 3 x 3 elementos de imagem, tendo-se finalmente o campo superficial de correntes (CSC) para uma seqüência dada.

O CSC de cada seqüência é então: *estacionário*— por ser estimado a partir dos deslocamentos de traçadores passivos, aqueles que respondem às mais baixas freqüências da circulação, que a sua vez são suportadas pelos ventos de escala sazonal (ROBINSON, 1983); *residual*— sem componentes de maré; com uma resolução espacial de 16 km, definida pelo tamanho das janelas de gabarito e procura; *determinístico*— por ter difusão turbulenta desprezível, condicionada pelo tamanho médio do traçador e pelo tempo entre o par de imagens seqüenciais, tempo em que o traçador ainda mantém a sua identidade (TOKMAKIAN; STRUB; MACCLEAN-PADMAN, 1990; KELLY; STRUB, 1992).

O CSC assim obtido, essencialmente a partir do movimento das feições do campo térmico superficial marinho, apesar de não se ter ainda provas conclusivas, corresponderia a componente de baixa freqüência da camada superficial de Ekman própria das áreas costeiras, bem misturada e portanto termicamente homogênea na vertical, de uma espessura média de 20 ou 30 metros (KELLY, 1989; AÑAZCO, 1998).

Modelo de partículas

A interação entre o CSC divergente e a difusão turbulenta de substâncias ou objetos flutuantes, em áreas litorâneas e lagos, têm se manifestado em algumas experiências. Os efeitos mais dramáticos são produzidos por linhas ou pontos de convergência que fazem, por exemplo, que em escalas de horas a dias, um grupo de bóias se alinhem com a linha de convergência e se desloquem rapidamente ao longo da mesma, ou se agrupem ao redor do ponto de convergência. Nesses casos, fica evidente a atenuação ou a reversão da difusão turbulenta, este último, conhecido como "difusão negativa" (CSANADY, 1963; OKUBO, 1977).

Por outro lado, em experiências com derramamentos de óleo de pequeno volume (alguns metros cúbicos) em áreas litorâneas com um CSC não-divergente, as manchas de óleo, horas após ao vazamento,

mostram estruturas alongadas, alinhadas com o vento médio, onde o diâmetro maior (longitudinal) é controlado pela componente da corrente induzida pelo vento sazonal e o diâmetro transversal pela difusão turbulenta Gaussiana (ELLIOTT; HURFORD; PENN, 1986; HURFORD; BUCHANAN, 1989; REED et al., 1991; CEKIRGE et al., 1995). Desses exemplos, é evidente a coexistência de processos advectivos e turbulentos Gaussianos, em escalas de dias a meses, em áreas litorâneas.

Aceitando-se a coexistência desses processos na área de trabalho, modela-se o campo total superficial de correntes, para cada uma das seqüências, como a soma do CSC e um componente turbulento Gaussiano de magnitude igual a 0.01 m/s, isto é, 10% do campo médio de velocidades da região, como sugerido pelos experimentos. Isto situa a questão no contexto dos problemas de transporte advecto-dominados.

Os parâmetros adicionais para o modelamento estocástico, de acordo com as escalas características da turbulência relativa em regime de difusão Gaussiana (FISCHER et al., 1979), são: tempo integral Lagrangiano $T_L = 24$ horas [determinado pela maré dominante da região (ALLEN, 1981; CSANADY, 1983)]; longitude Lagrangiana $L_L = 1$ km; coeficiente de difusão turbulenta $A_H = 10$ m²/s.

Para testar a estrutura da divergência do CSC, uma mancha de traçador passivo é tratada como nuvem de partículas cuja evolução será simulada como um processo estocástico não-homogêneo (dependente da estrutura espacial) de Wiener-Lévy, descrito por uma equação diferencial estocástica de primeira ordem (ITÔ, 1978):

$$(dx_i)_t = u_i dt + (2A_H)^{1/2} (dw_i)_t \quad (1)$$

com $i = 1, 2$.

onde os primeiros termos do lado direito são os componentes advectivos (induzidos pelo CSC) do vetor deslocamento e os termos restantes são os componentes turbulentos, simulados mediante w , isto é, um processo Wiener-Lévy (incrementos independentes, normalmente distribuídos com média = 0 e variância = dt) (DUNSBURGEM, 1994).

Para o propósito deste trabalho, é suficiente a utilização do esquema numérico (estocástico) de Euler de primeira ordem para integrar a equação (1), onde as coordenadas (definidas no sistema de referência do CSC) para a k-ésima partícula da nuvem e o intervalo de tempo $(n+1)\Delta t$ (KLOEDEN, 1994; ROSMAN, 1997; AÑAZCO, 1998) são:

$$(x_1)_{n+1} = (x_1)_n + u_1 \Delta t + (2A_H \Delta t)^{1/2} [(\epsilon_\lambda)_n \cos \theta - (\epsilon_\tau)_n \sin \theta] \quad (2)$$

$$(x_2)_{n+1} = (x_2)_n + u_2 \Delta t + (2A_H \Delta t)^{1/2} [(\epsilon_\lambda)_n \sin \theta - (\epsilon_\tau)_n \cos \theta] \quad (3)$$

onde

$$\cos \theta = \frac{u_1}{(u_1^2 + u_2^2)^{1/2}}, \sin \theta = \frac{u_2}{(u_1^2 + u_2^2)^{1/2}} \quad (4)$$

$(2A_H \Delta t)^{1/2} (\epsilon_\lambda)_n$ Deslocamento longitudinal aleatório (alinhado com velocidade local da partícula).

$(2A_H \Delta t)^{1/2} (\epsilon_\tau)_n$ Deslocamento transversal aleatório, e as coordenadas relativas das partículas referidas aos eixos principais (o eixo principal longitudinal alinhado com a velocidade média da nuvem e o principal transversal, normal a esse) são dadas respectivamente por:

$$\chi_n = (x_1 - \bar{x}_1)_n \cos \Theta + (x_2 - \bar{x}_2)_n \sin \Theta \quad (5)$$

$$\gamma_n = (x_2 - \bar{x}_2)_n \cos \Theta + (x_1 - \bar{x}_1)_n \sin \Theta \quad (6)$$

onde

$$\cos \theta = \frac{\bar{u}_1}{(\bar{u}_1^2 + \bar{u}_2^2)^{1/2}}, \sin \theta = \frac{\bar{u}_2}{(\bar{u}_1^2 + \bar{u}_2^2)^{1/2}}$$

sendo: $((\bar{x}_1)_n, (\bar{x}_2)_n)$ e $((\bar{u}_1)_n, (\bar{u}_2)_n)$ a posição e velocidade do centróide da nuvem, no intervalo de tempo $n\Delta t$.

A condição de campo divergente para o CSC, desconecta as equações (1)-(6), da equação de difusão – equação do tipo Fokker-Planck (HEEMINK; BOOGAARD, 1994), não sendo possível obter a concentração, corretamente, da substância flutuante. A meta deste trabalho é a obtenção de informações sobre as trajetórias das partículas e a variância de suas posições relativas, (limitação não muito séria).

O algoritmo utilizado para se estimar as trajetórias das partículas [equações (2) e (3)] calcula a trajetória de uma partícula advectada por um campo dado (componente advectivo), baseado na técnica de partículas traçadoras, aproximando-a como uma soma de segmentos percorridos, cada um deles com uma velocidade constante em intervalos de tempo iguais (CHENG, H.; CHENG, J.; YEH, 1996; AÑAZCO, 1998). O componente turbulento é obtido com ajuda de uma subrotina que implementa o algoritmo Box-Muller para calcular duas seqüências independentes de números aleatórios normalmente distribuídos com média = 0 e variância = 1 (PRESS et al., 1992; BLOKLAND; HEEMINK, 1994). Um tempo de passo, em que é percorrido um segmento de trajetória, $\Delta t = 1$ hora, e o intervalo de tempo para calcular momentos (médias e variâncias) $\Delta t' = 24$ horas, são adotados neste estudo (KLOEDEN, 1994; AÑAZCO, 1998).

De particular interesse para este trabalho são as estimativas das variâncias longitudinal e transversa da nuvem com respeito aos eixos principais, para o intervalo de tempo $n\Delta t$, definidas como o quadrado da média espacial das respectivas coordenadas relativas [equações (5) e (6)] segundo:

$$\text{var}_\chi (n' \Delta t') = \frac{1}{N_{\text{par}} - 1} \sum_{k=1}^{N_{\text{par}}} (\chi_{n'}^k)^2 \quad (7)$$

$$\text{var}_\gamma (n' \Delta t') = \frac{1}{N_{\text{par}} - 1} \sum_{k=1}^{N_{\text{par}}} (\gamma_{n'}^k)^2 \quad (8)$$

com $n' = 0, 1, 2, \dots, 20$ e $\Delta t' = 1$ dia.

São as estimativas dos “diâmetros” longitudinal e transversa da nuvem, que quantificam a difusão da nuvem nestas direções. A raiz quadrada dessas variâncias. Difusão que definimos como difusão estatística $[(\text{var}_{\chi^s})^{1/2}], [(\text{var}_{\gamma^s})^{1/2}]$, por ter as contribuições do efeito da “contração” ou “expansão” da nuvem, induzidas pela convergência ou divergência do CSC respectivamente, efeito que definimos como difusão advectiva $[(\text{var}_{\chi^a})^{1/2}, (\text{var}_{\gamma^a})^{1/2}]$, (de escala determinística), e da difusão turbulenta Gaussiana $[(\text{var}_{\chi^g})^{1/2}, (\text{var}_{\gamma^g})^{1/2}]$. Por extensão, chamaremos de variância estatística, variância advectiva e variância Gaussiana o quadrado das correspondentes difusões.

Pelas condições do modelo aqui proposto, a contribuição Gaussiana das variâncias estatísticas é dada pelas variâncias longitudinal e transversa de uma nuvem de partículas cujo centroide move-se com a velocidade média de um campo não-divergente e que não contém componentes de cisalhamento, em áreas litorâneas e em regime de difusão turbulenta relativa Gaussiana, segundo:

$$\text{var}_{\chi^g} (t) = \text{var}_{\chi^g} (0) + 2A_H t \quad (9)$$

$$\text{var}_{\gamma^g} (t) = \text{var}_{\gamma^g} (0) + 2A_H t \quad (10)$$

Onde $\text{var}_{\chi^g} (0)$ e $\text{var}_{\gamma^g} (0)$ são as variâncias Gaussianas iniciais da nuvem.

Considerando a escala advectiva (determinística), estas variâncias Gaussianas iniciais também podem ser interpretadas como os “componentes” do momento de inércia da nuvem de partículas em relação do centroide da mesma. Este momento de inércia, em geral, muda com o tempo se a nuvem é transportada por um campo não-uniforme, com possíveis incrementos em áreas de divergências ou decrementos em áreas de convergência. Para incluir esta mudança, estes termos são redefinidos como funções de tempo, de tal modo que os desvios, neste

caso, produzidos em relação à contribuição Gaussiana [equações (9) e (10)], constituem-se na contribuição advectiva contida nas variâncias estatísticas definidas pelas equações (7) e (8). Assim sendo, as variâncias advectivas podem ser expressadas pelos desvios $\text{var}_{\chi^a} = (\text{var}_{\chi^a} - \text{var}_{\chi^g})$ e $\text{var}_{\gamma^a} = (\text{var}_{\gamma^a} - \text{var}_{\gamma^g})$. Assim, para um campo não-uniforme, os desvios positivos (acima da reta que descreve a variância Gaussiana) estão associados às divergências do campo médio, e os desvios negativos (abaixo da reta que descreve a variância Gaussiana) às convergências do mesmo.

A vantagem da introdução dessas variâncias advectivas é a possibilidade de estimar efeitos difusivos produzidos por intensa divergência do campo médio, inclusive, efeitos não-lineares.

Os testes são feitos com uma nuvem superficial de 100 partículas normalmente distribuídas, no início, em um disco circular de rádio igual a 2km. Isto corresponde a um derramamento de óleo de 100 barris (14m³), aproximadamente.

Então, com as equações (7) e (8) são calculadas as variâncias estatísticas longitudinal e transversa e com as mesmas equações, considerando a contribuição turbulenta igual a 0, são calculadas as variâncias advectivas longitudinal e transversa. Para efeitos de comparação, as variâncias Gaussianas longitudinal e transversa são calculadas de acordo com:

$$\text{var}_{\chi^g}(n \Delta t) = \text{var}_{\chi^g}(0) + 2A_H n \Delta t \quad (11)$$

$$\text{var}_{\gamma^g}(n \Delta t) = \text{var}_{\gamma^g}(0) + 2A_H n \Delta t \quad (12)$$

sendo $n = 0, 1, 2, \dots, 20$ e $\Delta t = 1$ dia.

Informação adicional é obtida do estudo das trajetórias de “cadeias”, inicialmente circulares, de partículas (de rádio inicial igual a 2km), advectadas pelo CSC. Embora estas cadeias não sejam representativas de uma distribuição real de partículas qualquer, podem ser interpretadas como o perímetro da nuvem de partículas, sendo excelentes “visualizadoras” das estruturas locais do campo da divergência do CSC (AÑAZCO, 1998).

A estratégia para esta parte do trabalho é semelhante à usada por Añazco (1998) – o transporte de três objetos flutuantes será estudado: o transporte advectivo de uma partícula isolada que representa o transporte do centróide da nuvem de partículas; o transporte advectivo de uma cadeia circular que ajudará a revelar as estruturas locais do campo da divergência do CSC; o transporte advectivo de uma nuvem de partículas, do qual se estimarão as variâncias advectivas e finalmente o transporte advecto-difusivo da mesma nuvem de partículas, do qual se

estimarão as variâncias estatísticas (variância advectiva + variância Gaussiana).

RESULTADOS E ANÁLISE

Campo Superficial de Correntes (CSC)

A Figura 1 apresenta o CSC para cada uma das seqüências. Cada um destes campos é sobreposto a uma das imagens térmicas da própria seqüência. As cores destas imagens não se correspondem com a escala térmica comum (são faixas de cores que visualizam melhor os contrastes ou gradientes de cada imagem em particular), selecionadas apenas com o objetivo de ressaltar mais claramente a interface frontal entre a Corrente do Brasil e a circulação costeira. Os CSC da coluna esquerda correspondem a dias de inverno e os da direita a dias de verão. Observando-se as imagens, nota-se um padrão para cada estação: o padrão para os dias de inverno mostra uma interface entre a circulação costeira e a Corrente do Brasil, melhor desenvolvida que a interface correspondente ao padrão dos dias de verão. É possível que o desenvolvimento fraco dessa interface no padrão do verão seja produzido pela frequência maior das passagens das frentes frias, característica típica desta estação. Também é evidente a presença do meandro mencionada antes, nas seis imagens, sendo o mesmo melhor resolvido nas imagens do inverno.

Nas figuras 1(a), 1(d) e 1(e) pode-se notar claramente na interface a tendência do CSC para seguir as isotermas, sendo isto um pouco menos evidente na Figura 1(f). Esse componente significativo do CSC (paralelo às isotermas), típico em zonas frontais, parece corresponder a um forte componente geostrofico de CSC ou a episódios sem vento. Os casos da falta de correlação entre o CSC e as isotermas [figura 1(b) e 1(c)] corresponderiam a episódios de ventos fortes (EMERY; THOMAS; COLLINS, 1986; KELLY, 1989; KAMACHI, 1989).

TRAJETÓRIAS

A Figura 2 mostra as trajetórias de partículas (isoladas) advectadas pelo CSC de cada seqüência (na mesma ordem que da Figura 1). O retângulo preto corresponde à posição média dos campos de produção da PETROBRAS. Na mesma figura também pode se notar um padrão de distribuição de trajetórias para os dias de inverno (Figura 2, coluna esquerda) e outro um pouco difuso, durante os dias de verão (figura 2, coluna direita). No padrão de inverno, depois de bordejar o meandro, as trajetórias tendem a alinhar-se aproximadamente com a interface entre a circulação costeira e a Corrente de Brasil, entrando

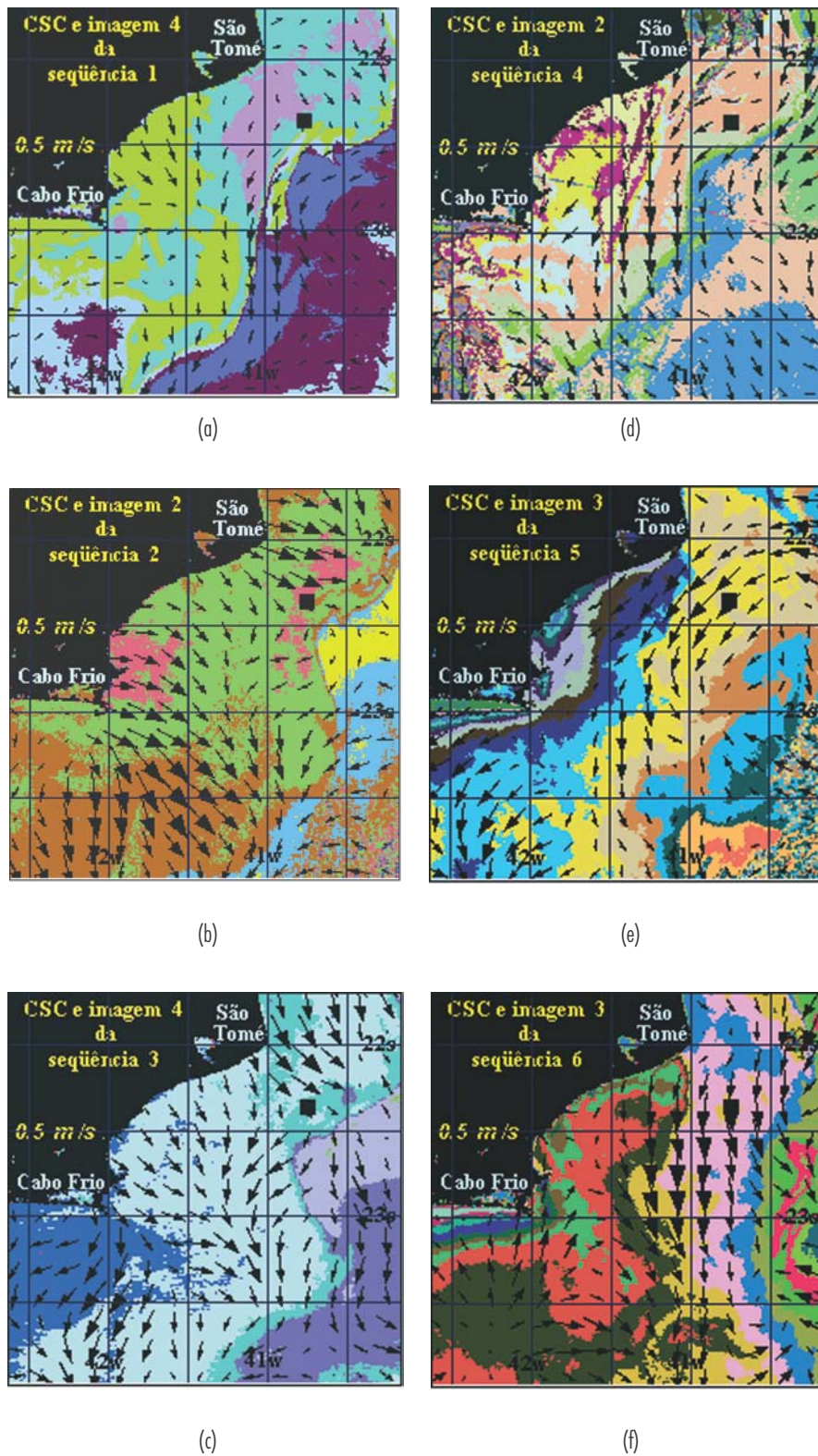


Figura 1 — Campo Superficial de Correntes (CSC) para cada seqüência. O retângulo preto corresponde a posição média dos campos de produção da PETROBRAS.
Figure 1 — Surface Fields of Currents (CSC) for each sequence. The black rectangle corresponds to the mean position of PETROBRAS production fields.

finalmente em uma configuração do tipo linha de convergência. No padrão de verão, as trajetórias revelam uma influência maior do meandro: na Figura 2(d), as partículas se movem entre duas linhas de convergência; na Figura 2(e), um grupo de partículas desloca-se a um pon-

to de convergência; e na Figura 2(f) as cinco trajetórias da direita movem-se aproximando-se lateralmente à uma estrutura de linha de convergência. Fato que fica mais claro na Figura 3.

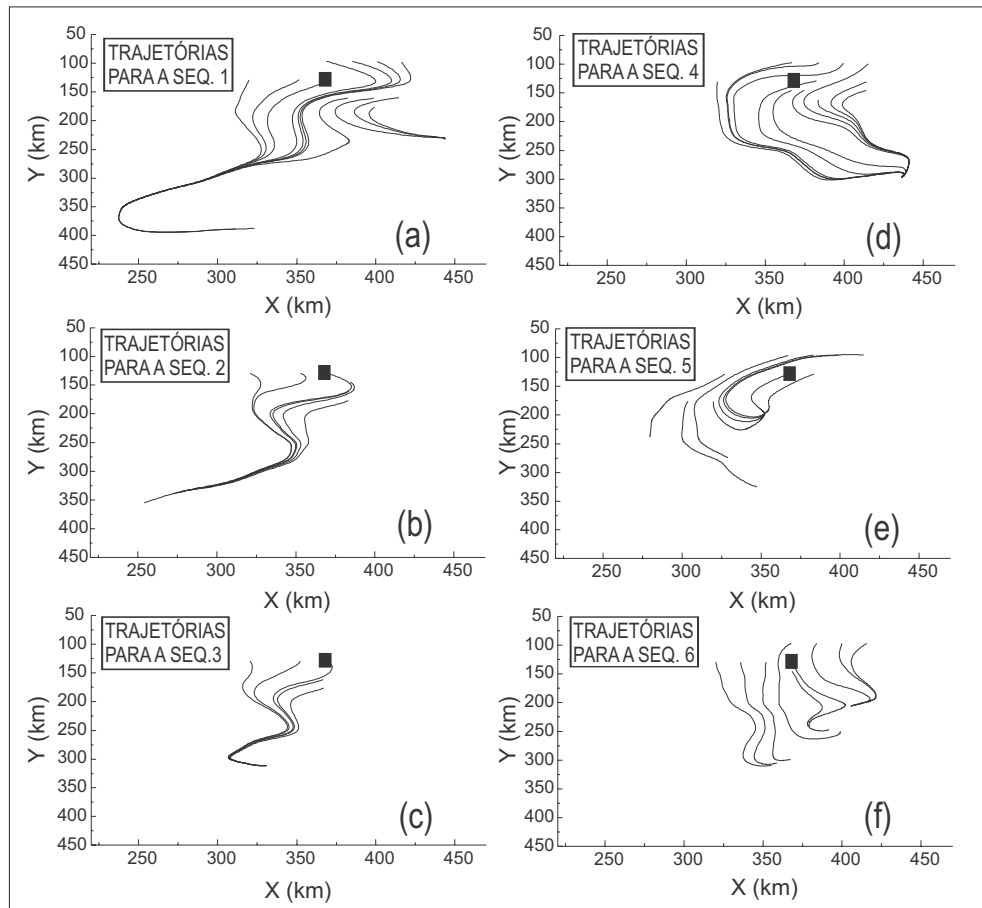


Figura 2 – Trajetórias das partículas advectadas pelo CSC de cada seqüência.
 Figure 2 – Particle tracking advected by the CSC of each sequence.

Na Figura 3, as trajetórias das “cadeias” circulares advectadas pelos CSC são mostradas com seus centros partindo dos mesmos pontos iniciais que as partículas na Figura 2. Em cada trajetória, a posição de cada “cadeia” circular é amostrada com um intervalo de 24 horas. Estas “cadeias” circulares, visualizam a deformação produzida pelo campo, confirmando as conjeturas feitas na Figura 2, e revelam as estruturas da convergência claramente (ou divergência) do campo. O padrão de trajetórias de inverno das “cadeias” circulares (Figura 3, coluna esquerda) é

influenciado intensamente por uma linha de convergência. Esta influência torna-se máxima durante os dias 10 e 12 que é quando o diâmetro transversal das “cadeias” circulares tem-se colapsado completamente (diâmetro = 0). Na Figura 3(b), na vizinhança do meandro, apresenta-se uma área divergente (aumento do diâmetro transversal com o tempo), limitada por duas linhas de convergência. O padrão de trajetórias das “cadeias” circulares (Figura 3, coluna direita), mostra uma influência maior do meandro, de tal modo que estas “cadeias”

circulares, praticamente levam o tempo total do teste (20 dias) em circular este. Particularmente, as três trajetórias da direita na Figura 3(e), finalizam-se em um ponto de convergência localizado aproximadamente no centro do meandro. O caso da Figura 3(d) é semelhante ao da

Figura 3(b): uma área divergente limitada por linhas de convergência. O caso Figura 3(f) mostra a trajetória (segunda da direita) da “cadeia” circular aproximando-se lateralmente, à uma linha de convergência, com um alongamento do diâmetro transverso, para logo introduzir-se nesta.

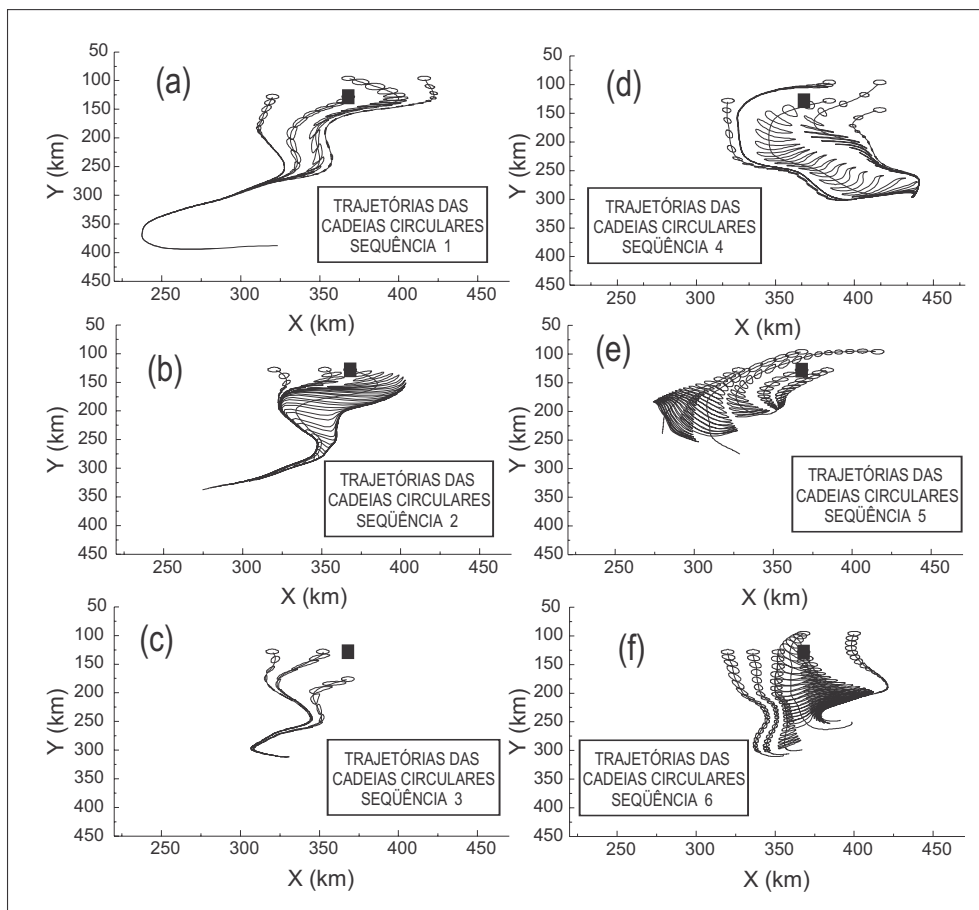


Figura 3 – Trajetórias das “cadeias” circulares advectadas pelo CSC de cada seqüência. Cada trajetória é amostrada com um intervalo de 24 horas.
 Figure 3 – Circular shapes tracking advected by the CSC of each sequence. Each track is sampled with a time interval of 24 hours.

A Figura 4 (para a primeira seqüência) mostra as variações temporais das variâncias da nuvem de partículas, a evolução (advectiva) da “cadeia” circular e a evolução (advecto-difusiva) da nuvem de partículas: na Figura 4(a), as variações temporais de variâncias longitudinais var_{x^e} , var_{x^a} , var_{x^e} ; na Figura 4(b), as variações temporais das variâncias transversais var_{y^e} , var_{y^a} , var_{y^e} ; na Figura 4(c) e Figura 4(d) volta-se a mostrar as variações temporais das variâncias advectivas longitudinais e transversas respectivamente; a Figura 4(e), apresenta “imagens” da “cadeia” circular durante alguns instantes e a Figura 4(f),

“imagens” da nuvem durante os mesmos instantes. Da Figura 5 a 9 apresenta-se informação semelhante para as seqüências 2-6 respectivamente. A posição inicial dos centros das “cadeias” circulares e nuvens é a média dos campos de produção da PETROBRAS.

A Figura 4(e) mostra claramente que o diâmetro transverso de “cadeia” circular colapsa completamente no dia 10, situação similar acontece com a nuvem no mesmo tempo na Figura 4(f), embora nesse caso, a difusão turbulenta não permite o colapso completo do diâmetro transverso. Este fato é quantificado claramente pelas variâncias

advectivas: por um mínimo na variância advectiva longitudinal no dia 12 [Figura 4(c)] e pelo colapso total da variância advectiva transversa a partir do dia 12. Este fato do colapso do diâmetro transverso da nuvem também é registrado tanto pela variância estatística longitudinal [Figura 4(a)] como pela variância estatística transversa [Figura 4(b)].

Na Figura 4(a), para efeitos de comparação, são sobrepostas as três variâncias longitudinais (advectiva, Gaussiana e estatística) e na Figura 4(b) as três variâncias transversais correspondentes. Nota-se que

a variância advectiva longitudinal não é uma contribuição significativa da variância estatística longitudinal durante o período total do teste (20 dias), porém, induz, nesta, uma oscilação clara de 10 dias aproximadamente. No caso da variância estatística transversa, depois do dia 12, esta é governada pela variância advectiva transversa, suprimindo completamente, a variância Gaussiana transversa (caso de difusão “negativa” transversa).

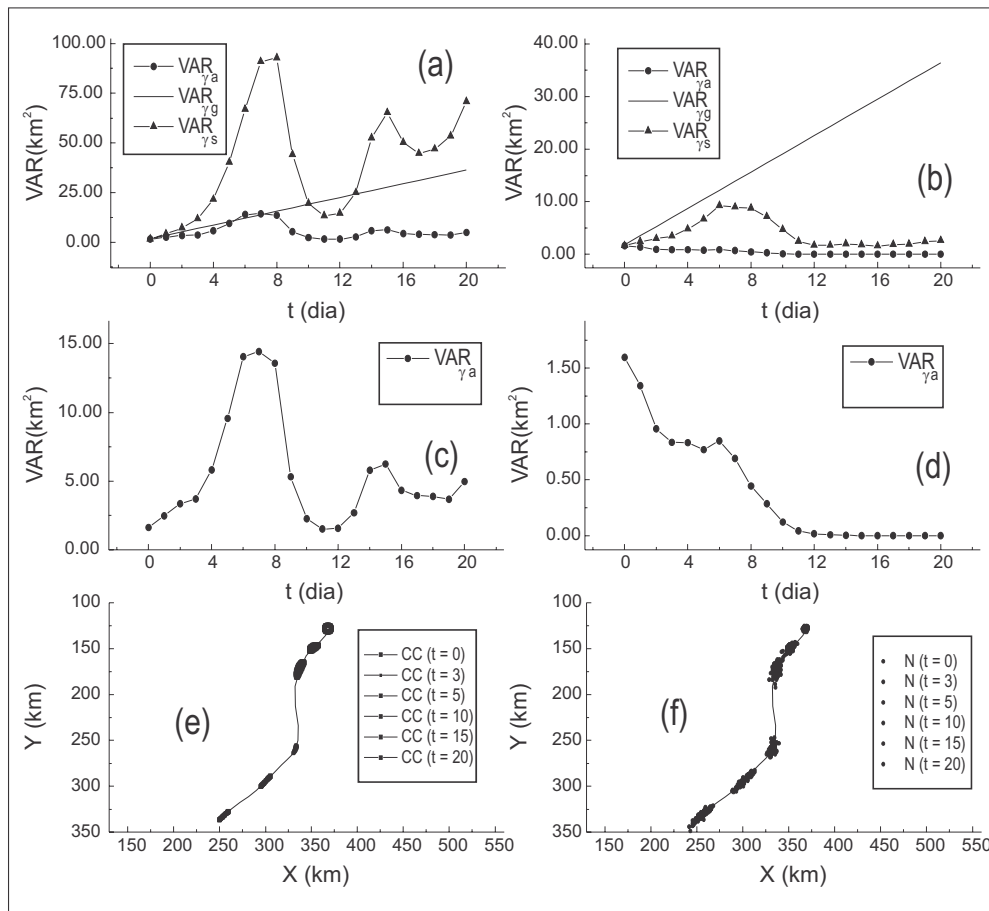


Figura 4 – Variâncias da nuvem de partículas, associada ao CSC da seqüência 1.

$\text{var}_{x_s}, \text{var}_{y_s}$: Variâncias estatísticas longitudinal e transversa ($\Delta-\Delta-\Delta$)

$\text{var}_{x_a}, \text{var}_{y_a}$: Variâncias advectivas longitudinal e transversa ($\bullet-\bullet-\bullet$)

$\text{var}_{x_g}, \text{var}_{y_g}$: Variâncias Gaussianas longitudinal e transversa (—)

Os gráficos (e) e (f) mostram as posições das Cadeias Circulares (CC) e da Nuvem (N) para os dias 0, 3, 5, 10, 15, e 20, respectivamente.

Figure 4 – Variances of the particle cloud, associated to the CSC of the sequence 1.

$\text{var}_{x_s}, \text{var}_{y_s}$: Longitudinal and transverse statistical variances ($\Delta-\Delta-\Delta$)

$\text{var}_{x_a}, \text{var}_{y_a}$: Longitudinal and transverse advective variances ($\bullet-\bullet-\bullet$)

$\text{var}_{x_g}, \text{var}_{y_g}$: Longitudinal and transverse Gaussian variances (—)

The graphics (e) and (f) show the positions of the circular shape (CC) and the cloud (N) for 0, 3, 5, 10, 15, and 20 days, respectively.

As Figuras 5(e) e 5(f) mostram claramente o alongamento gradual do diâmetro transverso, pelo menos até o dia 10, para depois, tanto a “cadeia” circular quanto a nuvem, introduzirem-se na linha de convergência. Isto é confirmado nas Figuras 5(b) e 5(d) — que mostram

o alongamento máximo do diâmetro transverso no dia 9 e o começo do colapso deste diâmetro no dia 14. Da Figura 5 deduz-se a ação de uma área de divergência que se manifesta do dia 2 ao 14, sentindo-se depois a influência de uma linha de convergência.

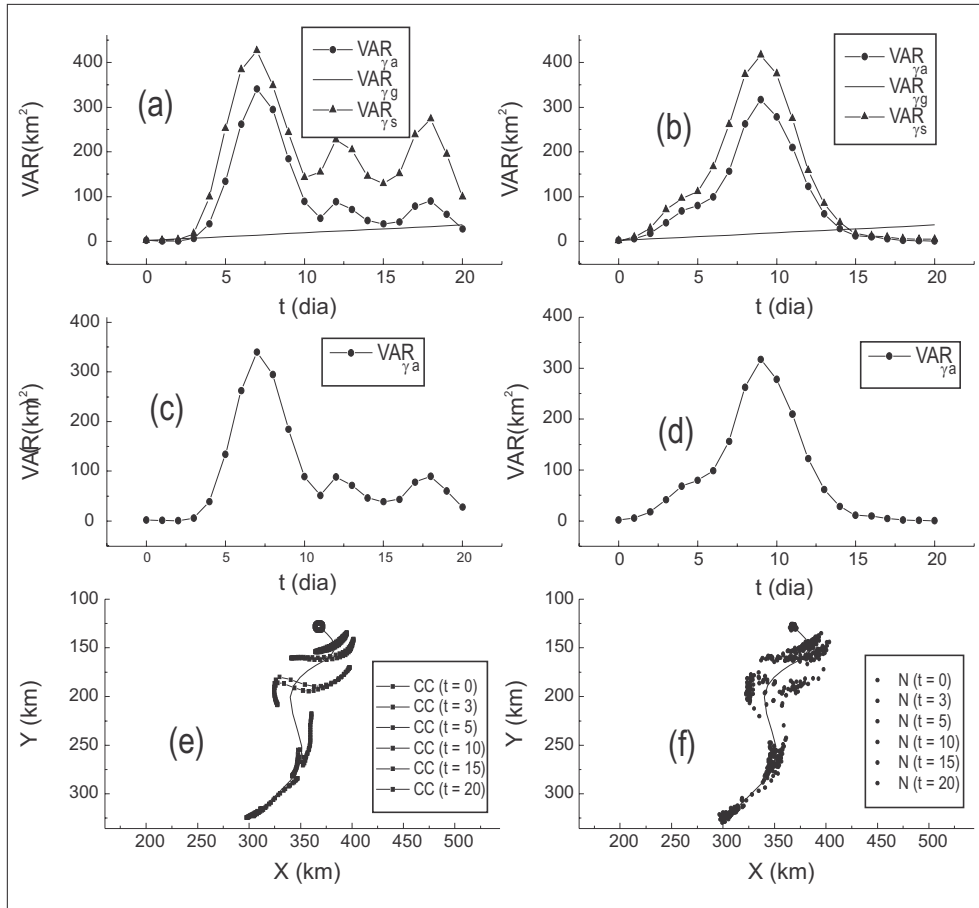


Figura 5 — Variâncias da nuvem de partículas, associada ao CSC da seqüência 2.

var_{x_s}, var_{y_s} : Variâncias estatísticas longitudinal e transversa ($\Delta-\Delta-\Delta$)

var_{x_a}, var_{y_a} : Variâncias advectivas longitudinal e transversa ($\bullet-\bullet-\bullet$)

var_{x_g}, var_{y_g} : Variâncias Gaussianas longitudinal e transversa (—)

Os gráficos (e) e (f) mostram as posições das Cadeias Circulares (CC) e da Nuvem (N) para os dias 0, 3, 5, 10, 15, e 20, respectivamente.

Figure 5 — Variances of the particle cloud, associated to CSC of the sequence 2.

var_{x_s}, var_{y_s} : Longitudinal and transverse statistical variances ($\Delta-\Delta-\Delta$)

var_{x_a}, var_{y_a} : Longitudinal and transverse advective variances ($\bullet-\bullet-\bullet$)

var_{x_g}, var_{y_g} : Longitudinal and transverse Gaussian variances (—)

The graphics (e) and (f) show the positions of the circular shape (CC) and the cloud (N) for 0, 3, 5, 10, 15, and 20 days, respectively.

As Figuras 6(e) e 6(f) mostram que o colapso do diâmetro transverso (tanto na “cadeia” circular como na nuvem) é quase completo ao

redor do dia 5. Isto é confirmado através das Figuras 6(b) e 6(d) como um caso evidente da ação da linha de convergência a partir do dia 6.

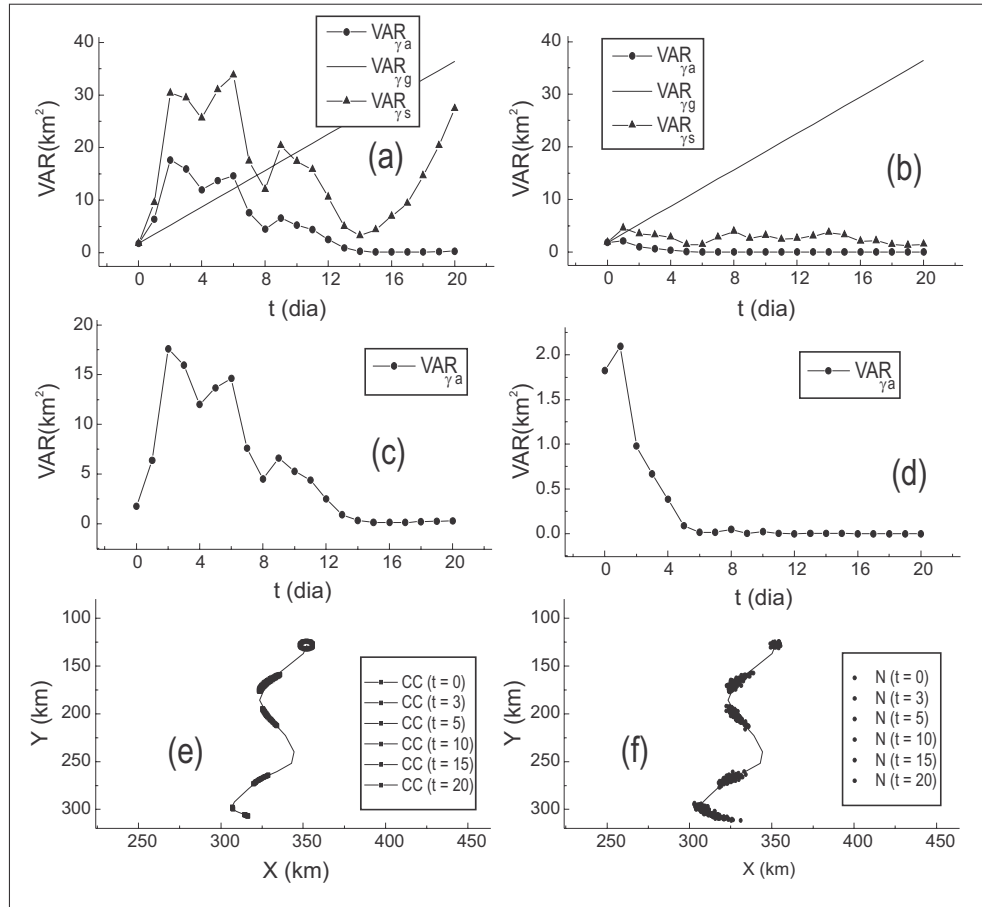


Figura 6 – Variâncias da nuvem de partículas, associada ao CSC da sequência 3.
 $\text{var}_{x_s}, \text{var}_{y_s}$: Variâncias estatísticas longitudinal e transversa ($\Delta-\Delta-\Delta$)
 $\text{var}_{x_a}, \text{var}_{y_a}$: Variâncias advectivas longitudinal e transversa ($\bullet-\bullet-\bullet$)
 $\text{var}_{x_g}, \text{var}_{y_g}$: Variâncias Gaussianas longitudinal e transversa (—)
 Os gráficos (e) e (f) mostram as posições das Cadeias Circulares (CC) e da Nuvem (N) para os dias 0, 3, 5, 10, 15, e 20, respectivamente.
 Figure 6 – Variances of the particle cloud, associated to CSC of the sequence 3.
 $\text{var}_{x_s}, \text{var}_{y_s}$: Longitudinal and transverse statistical variances ($\Delta-\Delta-\Delta$)
 $\text{var}_{x_a}, \text{var}_{y_a}$: Longitudinal and transverse advective variances ($\bullet-\bullet-\bullet$)
 $\text{var}_{x_g}, \text{var}_{y_g}$: Longitudinal and transverse Gaussian variances (—)
 The graphics (e) and (f) show the positions of the circular shape (CC) and the cloud (N) for 0, 3, 5, 10, 15, and 20 days, respectively.

A Figura 7 mostra um caso semelhante ao da Figura 5, sendo a ação da área de divergência mais durável (quase o período inteiro do

teste). Claramente, as Figuras 7(b) e 7(d) mostram o começo da ação de linha de convergência a partir do dia 18.

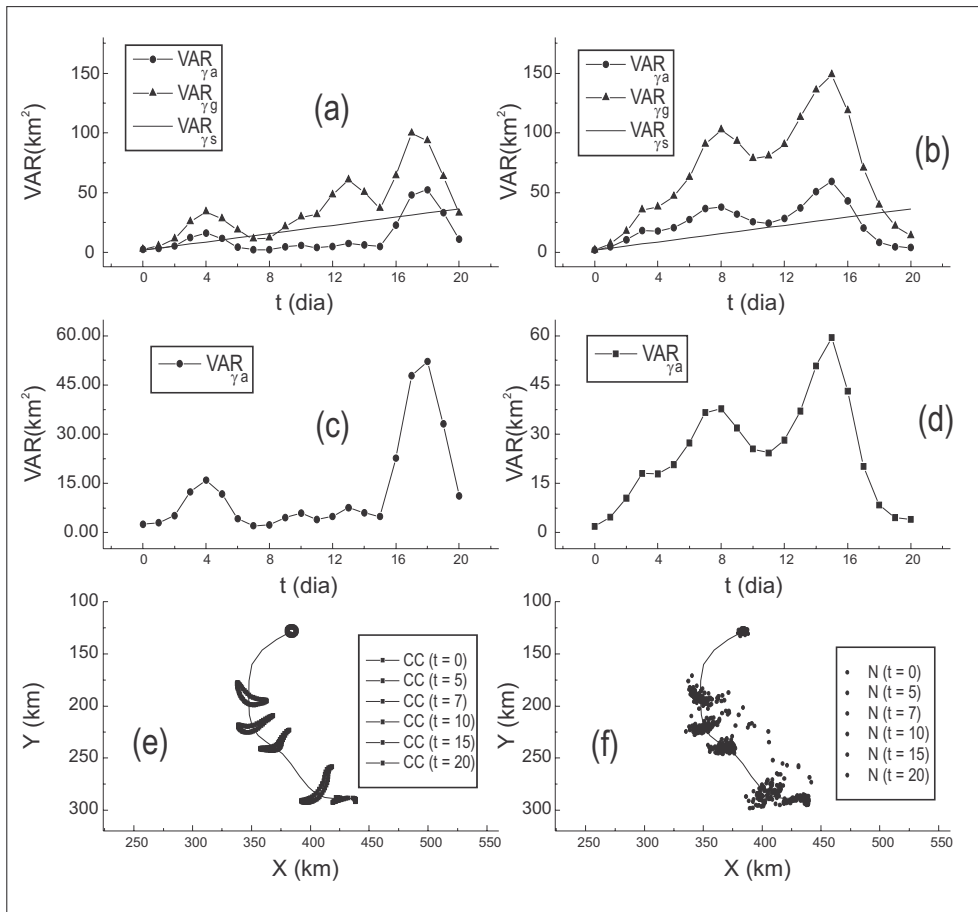


Figura 7 – Variâncias da nuvem de partículas, associada ao CSC da seqüência 4.

var_{x_s}, var_{y_s} : Variâncias estatísticas longitudinal e transversa ($\Delta-\Delta-\Delta$)

var_{x_a}, var_{y_a} : Variâncias advectivas longitudinal e transversa ($\bullet-\bullet-\bullet$)

var_{x_g}, var_{y_g} : Variâncias Gaussianas longitudinal e transversa (—)

Os gráficos (e) e (f) mostram as posições das Cadeias Circulares (CC) e da Nuvem (N) para os dias 0, 5, 7, 10, 15, e 20, respectivamente.

Figure 7 – Variances of the particle cloud, associated to CSC of the sequence 4.

var_{x_s}, var_{y_s} : Longitudinal and transverse statistical variances ($\Delta-\Delta-\Delta$)

var_{x_a}, var_{y_a} : Longitudinal and transverse advective variances ($\bullet-\bullet-\bullet$)

var_{x_g}, var_{y_g} : Longitudinal and transverse Gaussian variances (—)

The graphics (e) and (f) show the positions of the circular shape (CC) and the cloud (N) for 0, 5, 7, 10, 15, and 20 days, respectively.

A Figura 8 apresenta a ação de um ponto de convergência que se manifesta claramente a partir do dia 10. É evidente o colapso simultâneo de ambos os diâmetros [Figuras 8(c) e 8(d)].

A Figura 9 apresenta o caso da influência de uma linha de convergência sobre uma aproximação lateral da nuvem (ou “cadeia” circular). Em uma primeira fase manifesta-se a influência desta linha, pro-

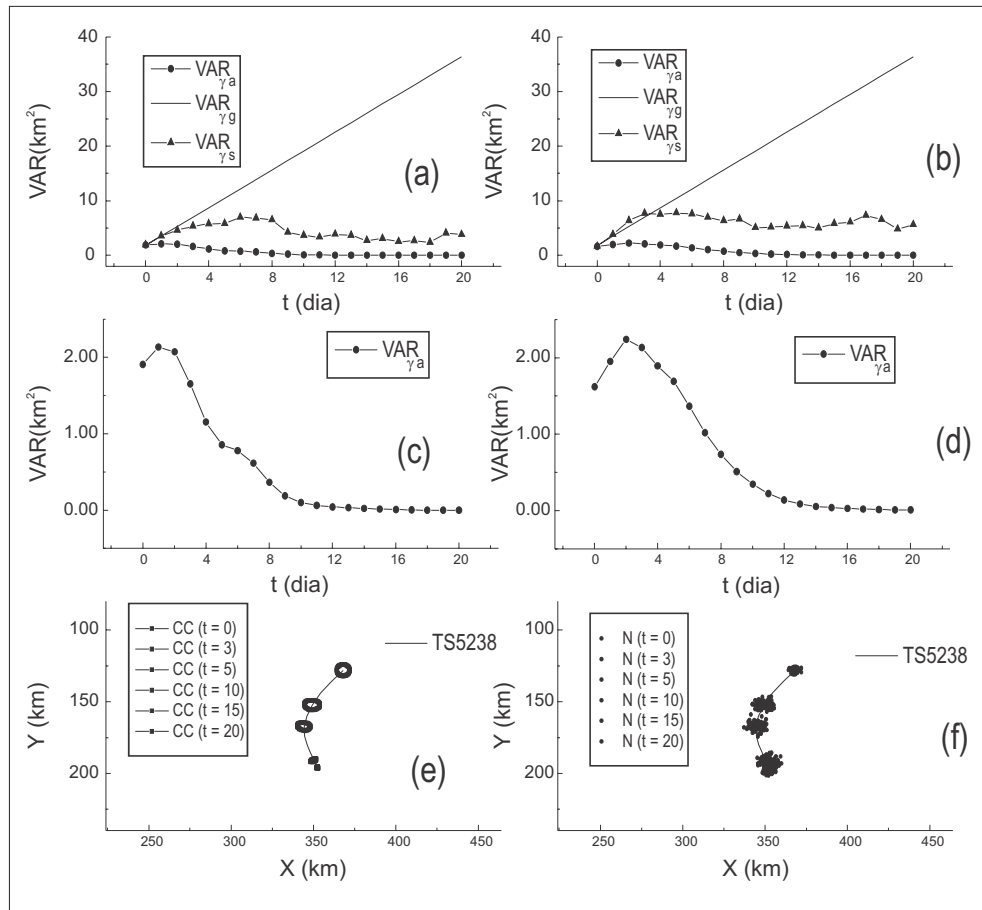


Figura 8 – Variâncias da nuvem de partículas, associada ao CSC da sequência 5.
 $\text{var}_{x_s}, \text{var}_{y_s}$: Variâncias estatísticas longitudinal e transversa ($\Delta-\Delta-\Delta$)
 $\text{var}_{x_a}, \text{var}_{y_a}$: Variâncias advectivas longitudinal e transversa ($\bullet-\bullet-\bullet$)
 $\text{var}_{x_g}, \text{var}_{y_g}$: Variâncias Gaussianas longitudinal e transversa (—)
 Os gráficos (e) e (f) mostram as posições das Cadeias Circulares (CC) e da Nuvem (N) para os dias 0, 3, 5, 10, 15, e 20, respectivamente.
 Figure 8 – Variances of the particle cloud, associated to CSC of the sequence 5.
 $\text{var}_{x_s}, \text{var}_{y_s}$: Longitudinal and transverse statistical variances ($\Delta-\Delta-\Delta$)
 $\text{var}_{x_a}, \text{var}_{y_a}$: Longitudinal and transverse advective variances ($\bullet-\bullet-\bullet$)
 $\text{var}_{x_g}, \text{var}_{y_g}$: Longitudinal and transverse Gaussian variances (—)
 The graphics (e) and (f) show the positions of the circular shape (CC) and the cloud (N) for 0, 3, 5, 10, 15, and 20 days, respectively.

longando o diâmetro transversal, efeito semelhante ao de uma área de divergência (caso da Figura 7) pelo menos até o dia 12, momento de

pois do qual, a nuvem começa a se introduzir dentro da linha de convergência. Daqui por adiante, a influência da linha de convergência é como no caso da Figura 4, isto é, um colapso do diâmetro transversal a partir do dia 18, como é claro nas Figuras 9(b) e 9(d).

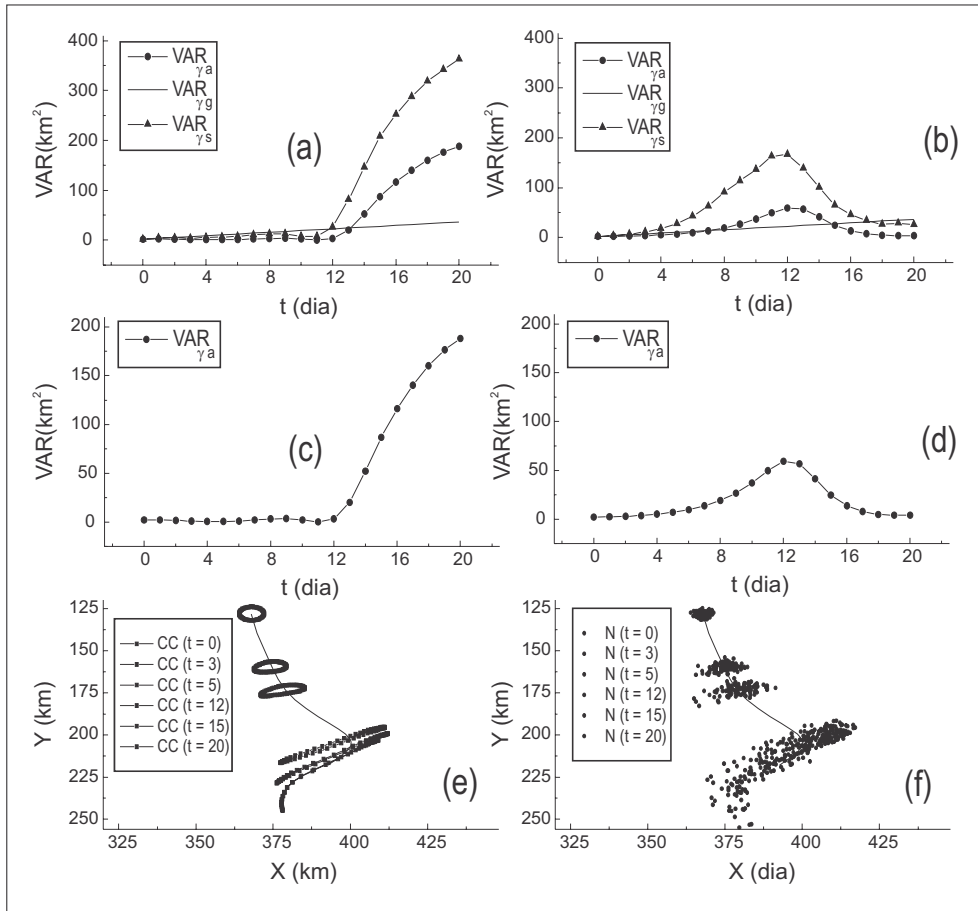


Figura 9 – Variâncias da nuvem de partículas, associada ao CSC da seqüência 6.

var_{x_s}, var_{y_s} : Variâncias estatísticas longitudinal e transversa ($\Delta-\Delta-\Delta$)

var_{x_a}, var_{y_a} : Variâncias advectivas longitudinal e transversa ($\bullet-\bullet-\bullet$)

var_{x_g}, var_{y_g} : Variâncias Gaussianas longitudinal e transversa (—)

Os gráficos (e) e (f) mostram as posições das Cadeias Circulares (CC) e da Nuvem (N) para os dias 0, 3, 5, 12, 15, e 20, respectivamente.

Figure 9 – Variances of the particle cloud, associated to CSC of the sequence 6.

var_{x_s}, var_{y_s} : Longitudinal and transverse statistical variances ($\Delta-\Delta-\Delta$)

var_{x_a}, var_{y_a} : Longitudinal and transverse advective variances ($\bullet-\bullet-\bullet$)

var_{x_g}, var_{y_g} : Longitudinal and transverse Gaussian variances (—)

The graphics (e) and (f) show the positions of the circular shape (CC) and the cloud (N) for 0, 3, 5, 12, 15, and 20 days, respectively.

ÁREAS DE CAPTURA

As regiões de captura são principalmente determinadas pela linha de convergência, de ação predominante no padrão de inverno, e pelo meandro, de ação predominante no padrão de verão, (figuras 2 e 3). Aceitando-se isto, só restaria a delimitação das áreas de influência de cada um destas regiões, para o CSC de cada seqüência.

A metodologia é simples: fixando como limite superior da área de influência a linha horizontal que passa pela posição média dos campos de produção da PETROBRAS (linha PMPET), liberam-se nuvens de partículas em posições próximas a esta linha, de tal modo que pelo menos 90% das partículas que formam a nuvem sejam capturadas por uma área pequena que circunda o começo da linha de convergência ou o núcleo do meandro. Esta condição é imposta com o propósito de se

determinar áreas de influencia com uma clara dominância da difusão advectiva, configurando o problema de captura de nuvens em um problema determinístico.

A Figura 10 mostra as áreas de captura (círculos vermelhos) e as suas áreas de influência. Em geral, considerando as diferenças entre padrões, nota-se que para o padrão de inverno (Figura 10, coluna esquerda), as áreas de influência (com a forma de um delta invertido) têm sua largura maior à altura da linha PMPET, entre 30 e 70km e um comprimento de 100 km aproximadamente. Para o padrão de verão (Figura 10, coluna direita), as áreas de influência, dominadas principalmente pelo meandro, têm largura semelhante as de inverno e comprimento menor entre 50 e 70km aproximadamente). Essas áreas de captura podem ser consideradas de diâmetro aproximado de 10 a 20km (que seria função, entre outras coisas, da área do óleo derramado).

Com esses resultados, pode-se dizer que 90% de vazamentos contínuos de petróleo (ou derramamentos de óleo), produzidos nos poços ao sul da linha PMPET, e entre as trajetórias laterais limite, serão coletados aproximadamente nestas áreas de captura depois de um tempo médio da ordem de 10 dias.

CONCLUSÕES

Os campos térmicos da Figura 1 e o resto de campos térmicos que formam as seqüências, mostram um claro gradiente térmico que corresponde à zona frontal que separa a Corrente do Brasil (que transporta águas de origem equatorial) da circulação costeira, sendo melhor definido e regular este gradiente para o inverno que para o verão. A localização desta zona frontal é semelhante a obtida por Signorini (1976),

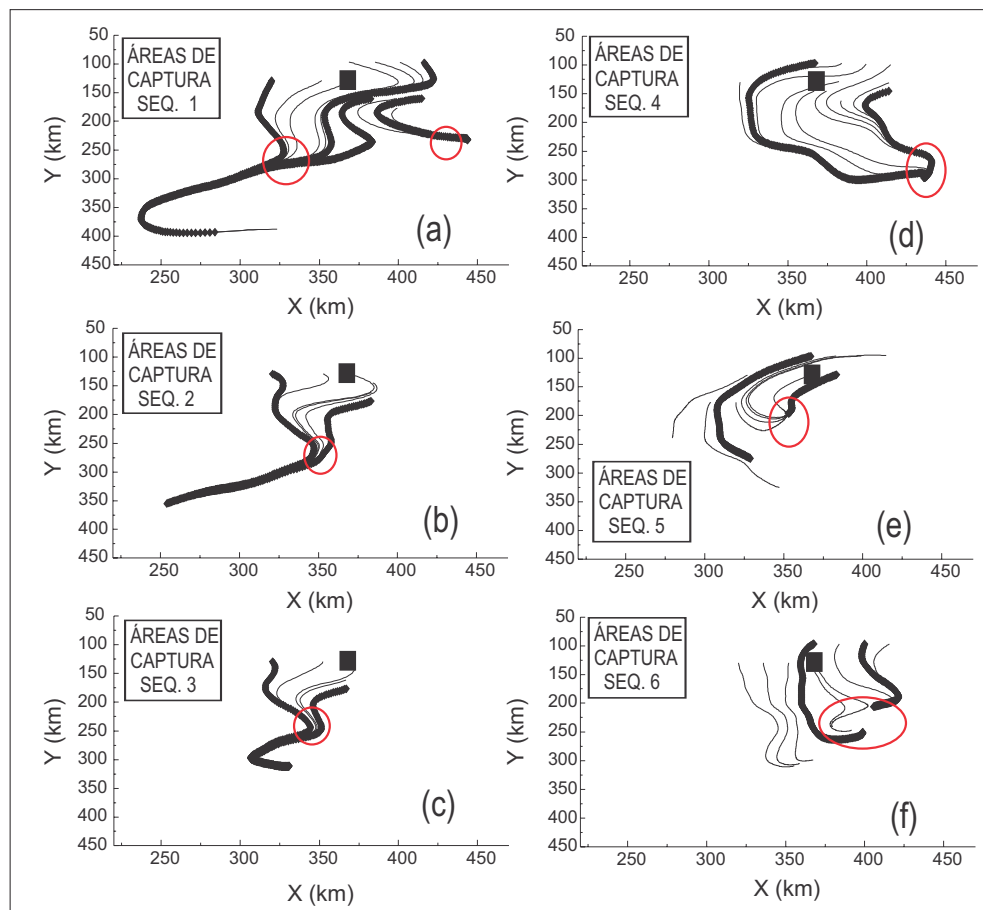


FIGURA 10 – Áreas de captura (círculos vermelhos) e suas respectivas áreas de influência (limitadas por linhas cheias), induzidas pelos padrões das estruturas convergentes do CSC, de inverno (lado esquerdo) e verão (lado direito). O retângulo preto localiza a posição média dos campos de produção da PETROBRAS.
 Figure 10 – The capture areas (red circles) and their respective influence areas (limited by wider lines), induced by the winter (left side) and the summer (right side) patterns of the CSC convergent structure. The black rectangle visualizes the mean position of the PETROBRAS production fields.

com medidas *in situ* de temperatura e salinidade, durante o mês de julho de 1973.

O CSC obtido segundo o método da CCM mostra claras estruturas de caráter estacionário, de acordo com dois padrões: um de inverno onde a estrutura dominante é uma linha de convergência e outro de verão onde a estrutura convergente é controlada por um meandro.

Isotermas superficiais, seguindo um padrão circular ou semicircular, em uma localização semelhante à deste meandro, e portanto, sugerindo a existência do mesmo, é mostrado por Miranda e outros (1970) durante os meses de fevereiro, abril e julho de 1970.

Coerente com estes padrões de convergência, têm-se também dois padrões de áreas de influência e de captura: o de inverno, dominado por uma linha de convergência e, o de verão, pelo meandro. Assegura-se que 90% de um derramamento de óleo ou de vazamentos contínuos acontecidos nos poços de petróleo, ao sul da linha PMPET e entre os limites laterais definidos para as áreas de influência, serão "sugados" pelas áreas de captura entre 10 e 15 dias depois do derrame.

Uma limitação deste trabalho é a falta de validação dos resultados com dados de terra. Mas isto pode ser parcialmente resolvido, se considerarmos os resultados de um programa de monitoramento de derramamento controlado de óleo realizado por THRETEK LTDA, com dados do satélite canadense RADARSAT, em setembro de 1995, onde a mancha de óleo se "posicionou" no núcleo do meandro depois de nove dias do derrame (Vassallo, comunicação pessoal). A mesma tendência apresentou pequeno derrame de óleo produzido nos campos de produção da PETROBRAS, em dezembro de 1997 (NUNES, 1998).

O caráter essencialmente determinístico e estacionário do CSC obtido pelo método da CCM, corrobora a condição de se considerar a não-uniformidade do campo (estruturas convergentes) como componente da parte advectiva do campo médio. Deste modo, o método proposto neste trabalho, inicialmente testado por Añazco (1998), apresenta-se particularmente útil para caracterizar estruturas convergentes estacionárias em zonas frontais.

RECOMENDAÇÕES

Para tornar o método aplicável às áreas imediatas da costa, o mesmo poderia ser complementado com um modelo apropriado para remover as correntes produzidas por marés, de um modo mais eficiente, que o método utilizado neste trabalho.

Uma forma de validar a existência dessas áreas de captura seria mediante estudos complementares de refletividade da superfície marinha, com imagens de satélite no canal visível, que poderiam revelar a acumulação de poluentes flutuantes nessas áreas.

Um dos problemas sérios com as imagens de NOAA é a aquisição de imagens livres de nuvens. Embora a resolução espacial de imagens térmicas do satélite GOES seja menor, sua resolução temporal é muito maior, o que permitiria obter imagens "limpas", com maior facilidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Divisão de Satélites Ambientais (DAS/CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), por prover os dados usados neste trabalho e ao Observatório Nacional (ON/CT), por permitir o processamento das imagens.

Nossos agradecimentos também a Maria Del Rosario Velarde, pela digitação e composição do texto.

Este trabalho foi apoiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio de Janeiro (FAPERJ), No: E-26/150.810/98.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, C. M. Numerical simulation of contaminant dispersion in estuary flow. *Proc. R. Soc. Lond.*, [S.I.], v. A381, p. 179-194, 1981.
- AÑAZCO, J. R. *Estudo do transporte de poluentes flutuantes por correntes superficiais, na região da Baía de Campos (RJ, Brasil)*. 1998. 161f. Tese (Doutorado)-Observatório Nacional/MCT, [S.I.], 1998.
- BLOKLAND, P. A.; HEEMINK, A. W. A Random flight model in general coordinates. In: HIPEL, K. W. (Ed.). *Stochastic and statistical modelling with groundwater and surface water applications*. v. 2. [S.I.]: Kluwer Academic Publishers, 1994. p. 197-209.
- CEKIRGE, H. M. et al. State-of-the-art techniques in oil spill modeling. *Proc. Oil Spill Conference*. API, Washington, DC, p. 67-72, 1995.
- CHENG, H. P.; CHENG, J. R.; YEH, G.T. A particle tracking technique for the Lagrangian-Eulerian finite element method in multi-dimensions. *Int. J. Numer. Methods Eng.*, [S.I.], v. 39, p. 1115-1136, 1996.
- CSANADY, G. T. Turbulent diffusion in Lake Huron. *J. Fluid Mech.*, [S.I.], v. 17, p. 360-384, 1963.
- _____. Dispersion by randomly varying currents. *J. Fluid Mech.*, [S.I.], v. 132, p. 375-394, 1983.
- DUNSBURGEN, D. W. Particle models for transport in three-dimensional shallow water flow. 1994. These (PhD) — Delft University, 1994.
- ELLIOTT, A. J.; DALE, A. C.; PROCTOR, R. Modelling the movement of pollutants in the UK shelf seas. *Mar. Pollut. Bull.*, [S.I.], v. 24, p. 614-619, 1992.
- _____; HURFORD, N.; PENN, C. J. Shear diffusion and the spreading of oil slicks. *Mar. Pollut. Bull.*, [S.I.], v. 17, p. 308-313, 1986.

- EMERY, W. J.; FOWLER, C.; CLAYSON, C. A. Satellite-image-derived Gulf Stream currents compared with numerical model results. *J. Atmos. Oceanic. Tech.*, [S.l.], v. 9, p. 286-304, 1992.
- _____; THOMAS, A. C.; COLLINS, M. J. An objective method of computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images. *J. Geophys. Res.*, [S.l.], v. 91, p. 12865-12878, 1986.
- FISCHER, H. B. et al. *Mixing in inland and coastal waters*. [S.l.]: Academic Press, 1979.
- GAO, J.; LYTHER, M. B. The maximum cross-correlation approach to detecting translational motions from sequential remote-sensing images. *Comp. & Geosci.*, [S.l.], v. 17, p. 525-534, 1996.
- GARCIA, C. A. E.; ROBINSON, I. S. Sea surface velocities in shallow seas extracted from sequential coastal zone color scanner satellite data. *J. Geophys. Res.*, [S.l.], v. 94, p. 12681-12691, 1989.
- HARARI, J. Desenvolvimento de um modelo numérico hidrodinâmico tridimensional linear, para a simulação e a previsão da circulação na plataforma brasileira, entre 23º e 26º S. *Bolm Inst. Oceanogr.*, São Paulo, v. 33, n. 2, p. 159-191, 1985.
- HEEMINK, A. W.; BOOGAARD, H. F. P. van den. Identification of stochastic dispersion models. In: HIPEL, K. W. (Ed.). *Stochastic and statistical modelling with groundwater and surfacewater applications*. v. 2. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 1994. p. 41-54.
- HOOKE, S. B.; BROWN, J. W. Dipole rings and vortex interactions of the Brazil Current, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, [S.l.], v. 34, n. 6, p. 1323-1329, 1996.
- HUNT, J. C. R. Turbulent diffusion from sources in complex flows. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, [S.l.], v. 17, p. 447-85, 1985.
- HURFORD, N.; BUCHANAN, I. Results of the 1987 forties crude oil trial in the North Sea. Proc. Oil Spill Conference. API, Washington DC, p. 525-532, 1989.
- ITÔ, K. (Ed.). *Stochastic differential equations*. New York: John-Wiley & Sons, 1978.
- KAMACHI, M. Advective surface velocities derived from sequential images for rotational flow field: limitations and applications of maximum cross-correlation method with rotational registration. *J. Geophys. Res.*, [S.l.], v. 97, p. 18227-18233, 1989.
- KAPLAN, H.; DINAR, N. A Lagrangian dispersion model for calculating concentration distribution within a built-up domain. *Atmos. Environ.*, [S.l.], v. 30, n. 24, p. 4197-4207, 1996.
- KELLY, K. An inverse model for near-surface velocity from infrared images. *J. Phys. Oceanogr.* [S.l.], v. 19, p. 1845-1864, 1989.
- _____; STRUB, P. T. Comparison of velocity estimates from advanced very high resolution radiometer in the coastal transition zone. *J. Geophys. Res.*, [S.l.], v. 97, p. 9653-9668, 1992.
- KLOEDEN, P. E. Stochastic differential equations in environmental modelling and their numerical solution. In: HIPEL, K. W. (Ed.). *Stochastic and statistical modelling with groundwater and surfacewater applications*. v. 2. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 1994. p. 21-31.
- KRAUSS, W.; BÖNING, C. W. Lagrangian properties of eddy fields in the Northern-North Atlantic as deduced from satellite-tracked buoys. *J. Mar. Res.*, [S.l.], v. 45, p. 259-291, 1987.
- LARDNER, R. W. et al. Computation of the residual flow in the Gulf using the Mt Mitchell data and the KFUPM/RI hydrodynamical models. *Mar. Pollut. Bull.* [S.l.], v. 11, p. 61-70, 1993.
- MIRANDA, L. B.; YKEDA, Y.; MASCARENHAS JR., A. S. Flutuações da Corrente de Brasil e variações da distribuição horizontal da temperatura na região costeira entre Cabo de São Tomé e a Ilha de São Sebastião em Janeiro/Fevereiro e Abril de 1970. In: SIMPÓSIO DE ECOLOGIA TROPICAL, 1970, Salvador; REUNIÃO ANUAL DA SBPC, 22., 1970, Salvador. *Resumos..* Salvador: [s.n.], 1970.
- NIHOUL, J. C. J. Hydrodynamic Models. In: NIHOUL, J. C. J. (Ed.). *Modelling of marine systems*. Amsterdam: Elsevier, 1975. p. 41-66.
- _____. Contribution of remote sensing to modeling. In: NIHOUL, J. C. J. (Ed.). *Remote sensing of shelf sea hydrodynamics*. Amsterdam: Elsevier, 1984. p. 25-36.
- NINNIS, R. M.; EMERY, W. J.; COLLINS, M. J. Automated extraction of pack ice motion from advanced very high resolution radiometer imagery. *J. of Geophys. Res.*, [S.l.], v. 91, p. 10725-10734, 1986.
- NUNES, L. M. P. *Modelagem numérica para valoração de dano ambiental por óleo: Aplicação para a Baía de Campos - RJ*. 1998. 186 f. Tese (Mestrado)-COPPE/UFRJ, [S.l.], 1998.
- OKUBO, A. Advection-Diffusion in the presence of surface convergence. In: BOWMAN, M. J.; ESAIAS, W. E. (Ed.). *Oceanic fronts in coastal processes*. [New York]: Springer-Verlag, 1977. p. 23-28.
- PRESS, W. H. *Numerical recipes in fortran*. The art of scientific computing. Cambridge: University Press, 1992.
- REED, M. et al. Field test of satellite tracked buoys to simulate oil drift. In: INTERNATIONAL OIL SPILL CONFERENCE, 1991, San Diego. *Proceedings...* Washington DC: [s.n.], 1991. p. 619-628.
- ROBINSON, I. S. Tidally induced residual flows. In: JOHNS, B. (Ed.). *Physical Oceanography of Coastal and Shelf Seas*. Amsterdam: Elsevier, 1983. p. 321-355.
- _____. *Satellite oceanography, an introduction for oceanographers and remote-sensing scientists*. New York: Ellis Horwood, 1991.
- ROSMAN, P. C. C. Métodos numéricos em recursos hídricos, 3. [S.l.]: ABRH, 1997.

- SIGNORINI, S. R. Contribuição ao estudo da circulação e do transporte de volume da corrente do Brasil entre o Cabo de São Tomé e a Baía de Guanabara. *Bolm Inst. Oceanogr.*, São Paulo, v. 25, p. 157-220, 1976.
- TOKMAKIAN, R.; STRUB, P. T.; MACCLEAN-PADMAN, J. Evaluation of the maximum cross-correlation method of estimating sea surface velocities from sequential satellite images. *J. Atmos. Oceanic. Tech.*, [S.l.], v. 7, p. 852-865, 1990.
- VASTANO, A. C.; REID, R. O. Sea surface topography estimation with infrared satellite imagery. *J. Atmos. Oceanic. Tech.*, [S.l.], v. 2, p. 393-403, 1985.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Jaime Rinau Añazco Palácios é graduado em Física, em 1983, pela Universidad Nacional Mayor de San Marcos (Lima-Perú). Mestrado (1993) e Doutorado (1998), em Geofísica, pelo Observatório Nacional (RJ). Atualmente Pesquisador-bolsista do CNPq, no Observatório Nacional. Suas áreas de interesse são Geofísica Ambiental e aplicações de sensores geomagnéticos satelitais.

Gutemberg Borges França é graduado em Física (1985) pela Universidade Federal do Mato Grosso do Sul. Mestrado em Análise de Sistemas e Aplicações (1988) pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (SP). Ph.D. (1994), pela University of Dundee (U. K.). Publicou 37 trabalhos e resumos em congressos e revistas especializadas. Atualmente é Professor Adjunto da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Suas áreas de interesse são Meteorologia por Satélite e Sensoriamento Remoto da Atmosfera.