

Efeitos do processo difusivo na estimativa de correntes superficiais pelo método MCC

RENATO DAVID GHISOLFI
CARLOS ALBERTO EIRAS GARCIA

FURG - Fundação Universidade do Rio Grande
Laboratório de Oceanografia Física - Departamento de Física
Caixa Postal 474, 96201-900 Rio Grande, RS, Brasil
{renato.garcia}@calvin.ocfis.furg.br

Abstract. The Maximum Cross-Correlation Method - MCC - (*Leese et al.*, 1971) has been used to estimate sea surface velocities from thermal or coloured sequential images. This velocity is labelled advective once this method assumes that only advection is responsible for the spacial and temporal feature displacement. It is known, however, that other processes such as diffusion and heat exchange between atmosphere and ocean can affect the thermal structure. Therefore it becomes necessary to evaluate how these processes affect this estimate. In this work the influence of non-advective processes are discussed. They are modeled by a set of synthetic images using the diffusive-advective equation. These analysis show that good vectors can be obtained with eddy diffusivity coefficients of order of $10^2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. At the same time, they can be considered as high cut-off values in which correct velocities can be estimated using the MCC method with the time lag between images up to 24 hours.

Keywords: MCC, diffusion, non-advective processes.

1. INTRODUÇÃO

Os recentes avanços na análise de imagens de satélite, geometricamente corrigidas e acuradamente registradas, têm feito com que o seu uso evoluísse de um caráter qualitativo para estimativas quantitativas das correntes superficiais, quer a partir dos padrões térmicos (temperatura superficial), ou então, da análise de dados do sensor Coastal Zone Color Scanner (CZCS) (*Emery et al.*, 1986; *Garcia e Robinson*, 1989; *Kelly*, 1989; *Tokmakian et al.*, 1990; *Wahl e Simpson*, 1990).

Em especial, uma técnica conhecida como Máxima Correlação Cruzada (MCC) desenvolvida inicialmente para detectar o movimento de nuvens (*Leese et al.*, 1971) foi adaptada por *Ninnis et al.* (1986) para detectar o movimento do gelo entre imagens sucessivas do Mar Beaufort/Canadá. Desde então, inúmeros trabalhos têm sido realizados aplicando-se esta técnica para computar velocidades superficiais do oceano. *Ghisolfi* (1995) utiliza o MCC para computar velocidades superficiais no Oceano Atlântico Sul Ocidental.

O fato é que, qualquer estimativa de velocidade feita a partir de um par consecutivo de imagens, assume que somente a advecção seja o mecanismo responsável pelo deslocamento espaço-temporal da feição térmica oceânica. Tal hipótese, baseada na “Turbulência Congelada” de Taylor, assume, para escalas de tempo relativamente pequenas, que o agregado dos vórtices turbulentos que governam as oscilações de velocidade em torno de um ponto fixo sejam transladados, sem variação da velocidade média do fluxo (*Panchev*, 1971). É conhecido, no entanto, que outros processos além da advecção ocorrem concomitantemente, de modo que uma extrapolação pura e simples desta hipótese pode não ser

totalmente verdadeira, chegando, em muitos casos, a inviabilizar a estimativa de velocidade. Neste trabalho, é avaliada a influência dos fatores não advectivos no vetor velocidade quando é utilizado o método do MCC para estimar velocidades superficiais.

2. METODOLOGIA

2.1. O MÉTODO MCC

Basicamente, a técnica do MCC consiste em localizar o máximo bidimensional da correlação cruzada entre sub-áreas de duas imagens subsequentes. Uma pequena área da primeira imagem denominada de janela de procura é *cross*-correlacionada a uma segunda área (maior - janela de espera) da imagem sucessiva, tendo a primeira como seu ponto central. As coordenadas cujo coeficiente de correlação é máximo representam o deslocamento da feição transladada na segunda imagem. Desta forma, um campo vetorial pode ser gerado a partir de duas imagens sucessivas com qualquer resolução espacial desejada, desde que haja uma sobreposição das janelas em detrimento da independência estatística entre elas.

Os tamanhos das janelas e o valor mínimo de correlação utilizados neste estudo estão de acordo com os valores determinados por *Ghisolfi* (1995). As condições reais foram simuladas a partir de um conjunto de imagens sintéticas, e a defasagem temporal imposta entre as imagens sucessivas é concordante com aquela na qual, atualmente, pode-se dispor das imagens.

2.2. MODELAGEM DOS PROCESSOS FÍSICOS

Embora na maior parte dos oceanos e durante quase todo ano, as intensidades dos ventos sejam geralmente menores que $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (*Hellerman*, 1967), o cisalhamento

em superfície se constitui numa das principais forças responsáveis pela destruição dos gradientes térmicos. Em velocidades do vento superiores a 20 m.s^{-1} , pode ocorrer uma intensa mistura vertical destruindo os padrões térmicos espaciais, o que acabaria por inviabilizar a estimativa da velocidade. Por sua vez, com ventos inferiores a 10 m.s^{-1} , *Simpson e Dickey (1981)* mostraram que a temperatura da superfície do mar é amplamente determinada pela difusão e pela troca de calor entre o oceano e a atmosfera. Fisicamente, os processos responsáveis pelo seu condicionamento estão englobados nos termos discriminados na equação (2.1) da conservação do calor:

$$\frac{DT}{Dt} = K_H \nabla_H^2 T + K_Z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \sum \frac{1}{c\rho} Q_i \quad (2.1)$$

onde o termo da esquerda é a derivada material da temperatura T pelo tempo. K_H e K_Z são os coeficientes de difusão turbulenta horizontal e vertical, respectivamente, assumidos constantes. Q_i é qualquer fonte de aquecimento ou resfriamento térmico por unidade de volume, c é a capacidade calorífica e ρ é a massa específica da água.

A derivada material da temperatura, considerando-se $\nabla \bar{u} = 0$, é definida por:

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla T \quad (2.2)$$

onde $\bar{u} = (u, v, w)$ é a velocidade do fluido.

Associando-se a equação 2.1 à equação 2.2, obtém-se:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\bar{u} \cdot \nabla T + K_H \nabla_H^2 T + K_Z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \sum \frac{1}{c\rho} Q_i \quad (2.3)$$

a **b** **c** **d**

A equação acima descreve a variação temporal da temperatura como função da advecção, difusão horizontal, e o *entrainment*, respectivamente os termos da direita da equação. O termo **d**) relaciona as trocas de calor com a atmosfera.

2.2.1. CALOR NA INTERFACE OCEANO-ATMOSFERA E O ENTRAINMENT

A última componente da equação 2.3 (**d**), é o fator mais importante na determinação da estrutura termal na superfície do oceano, sendo representada pelos fluxos de calor latente, sensível, radiação de onda longa e fluxo solar incidente, afetados ou não pela cobertura nebulosa. *Ghisolfi et al. (1991)* estimaram os fluxos de calor no oceano adjacente a costa do Rio Grande do Sul e obtiveram resultados que estiveram de acordo com

aqueles descritos por outros autores em regiões semelhantes. Os valores médios calculados por estes autores foram utilizados para estimar a variação na temperatura superficial em função do *entrainment* e das trocas de calor com a atmosfera (item c,d - equação 2.3). A partir de uma análise de escalas, verificou-se que estes fatores podem ser desprezados frente a variação decorrente da advecção horizontal, para escalas de tempo diurnas. Além disso, *Wyrki (1966)*, salienta que na ausência de cobertura nebulosa, a troca de calor com a atmosfera é espacialmente invariável sobre alguns graus de latitude. Sob estas considerações é plausível desprezar-se esses dois efeitos, extraindo-se as respectivas componentes na equação 2.3.

A presença de nuvens, gerando uma troca de calor espacialmente variável, tem seu efeito parcialmente eliminado em função da própria metodologia empregada por *Ghisolfi (1995)* e também neste trabalho que desconsidera *pixels* marcados como nuvens, uma vez que em locais adjacentes a nuvens o campo de vento e a troca de calor pode variar.

Para os termos **a** e **b** da equação 5.3, foram criadas uma série de imagens a fim de verificar-se a resposta que o MCC fornece para cada um dos fatores individuais que afetam o gradiente de temperatura superficial do mar. A cada um dos intervalos de tempo, foi modelada a representação instantânea dos processos individuais, sendo a seguir, aplicada a técnica do MCC para estimar vetores de velocidade entre a primeira e cada uma das imagens da seqüência temporal.

2.2.2. DIFUSÃO

Ao nível molecular, a difusão pode ser entendida como um movimento randômico através do qual ocorre a transferência de energia de uma molécula para outra. Embora aparentemente não tenha importância, devido a sua pequena escala espaço-temporal, a difusão é responsável, em última instância, pela dissipação de energia continuamente injetada no sistema de maior escala.

Para modelar o papel da difusão na conservação do calor foi utilizada a solução da equação advectodifusiva (equação 5.4), dentro de uma aproximação Euleriana, que simula o comportamento de um traçador qualquer, a partir de um ponto único de dispersão, baseada nas equações da continuidade do momento e conservação de massa. Informações mais detalhadas a este respeito podem ser encontradas em *Okubo (1968)*; *Fisher et al (1979)* entre outros. Embora a simulação realizada não tenha sido realizada em termos de temperatura, mas de concentração de um dispersante, existe uma completa analogia entre a difusão de calor e a equação de difusão de Fick. Apesar da descrição matemática, os processos físicos presentes são idênticos (*Fisher et al, 1979*). A solução da equação 2.3, desprezando-se os termos **c** e **d**, é:

$$c(x, y, t) = \frac{s_0 \cdot A_{pixel}}{4\pi \sqrt{K_x K_y} t^2} \exp\left(-\frac{(x \cdot 1100 - ut)^2}{4K_x t} - \frac{(y \cdot 1100 - vt)^2}{4K_y t}\right) \quad (2.4)$$

onde,

$c(x, y, t)$ - é a quantidade de um traçador qualquer num determinado *pixel* especificado por suas coordenadas (x, y, t) ;

s_0 - é a concentração inicial no ponto de despejo;

$A_{pixel} = 1100 \cdot 1100 \text{ m}^2$ e corresponde a área de um *pixel* à nadir do sensor AVHRR;

K_x e K_y - são os coeficientes de difusão turbulenta, assumidos isotrópicos nesta análise;

$x \cdot 1100$ e $y \cdot 1100$ - representam as distâncias (em metros), enquanto x e y (em *pixels*) a partir do ponto original de dispersão. As variáveis u e v - correspondem as velocidades de advecção para as direções x e y , respectivamente, e t é o tempo.

Os valores de coeficientes de difusão turbulentos horizontais situam-se na faixa da ordem de $10^0 - 10^2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, maiores que os verticais (da ordem de $10^{-2} - 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). Estimativas destes coeficientes têm sido reportadas por muitos autores, mas (*Okubo, 1971*) se destaca por ter realizado um grande número de experimentos com esta finalidade, em diferentes condições oceanográficas que cobriram escalas espaciais variando de 10 m a 10000 Km. Seus resultados foram sumarizados em uma série de diagramas de difusão oceânicos que sugerem um incremento dos valores de acordo com a relação l elevado a $4/3$ onde l é a escala espacial da difusão. Embora geralmente aceita, não houve até agora nenhuma evidência realmente convincente desta dependência (*Nihoul, 1975*). Apesar disso, é interessante notar que muitos pesquisadores, trabalhando em áreas diferentes e se valendo de uma grande faixa de escalas, têm apresentado coeficientes de difusão próximos de $4/3$ da potência de l .

Poucas medidas de coeficientes de difusão turbulenta foram realizados em águas brasileiras. *Stevenson et al. (1984)*, ao realizarem experimentos na região da Baía de Ilha Grande (Angra dos Reis) estimaram um valor de $0.9 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para o coeficiente de difusão que, num segundo experimento, realizado em local mais abrigado, baixou para $0.35 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Em função da gama de valores descritos na bibliografia, foram selecionados 5 coeficientes -1, 10, 100, 1000 e 10000 $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ - sendo criadas 5 imagens sintéticas para cada um deles, com uma defasagem de 12, 24, 36 e 48 horas entre a primeira e as subsequentes. A partir deste conjunto, a simulação foi realizada para duas condições específicas, a primeira somente analisando a difusão - velocidades u e v nulas - e numa segunda, além da difusão, com o valor de $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ para cada uma das componentes da velocidade advectiva, resultando

num deslocamento para à direita e para baixo ao longo da diagonal das imagens sintéticas.

Para cada uma das imagens criadas foi estimada a quantidade do suposto traçador dentro de cada *pixel* (1.1 x 1.1 Km), convertendo-se esta quantidade em número digital. Nas coordenadas do despejo original o valor de número digital foi sempre de 255. Todas as imagens possuíram um fundo randômico, para que a estimativa do valor da velocidade não fosse tendenciosa nas bordas do campo.

2.2.3. ADVECCÃO

A advecção corresponde ao deslocamento da feição térmica associado apenas à movimentação da massa de água. Este efeito foi simulado em duas etapas distintas. Inicialmente, foi criada a imagem de uma feição submetida somente a difusão a partir da equação 2.4. Posteriormente, esta foi transladada em x e y , modelando assim a advecção para um valor de $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ para a velocidade nas componentes u e v . A seguir, tal como para a difusão, foram criadas 5 imagens com uma defasagem de 12 horas entre si. O deslocamento total se deu ao longo da diagonal do primeiro (superior esquerdo) para o quarto quadrante (inferior direito).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. ADVECCÃO PURA

No primeiro experimento realizado, foi avaliada a resposta fornecida pelo MCC a um par de imagens no qual a feição foi submetida somente à advecção. Independentemente do intervalo de tempo considerado (o deslocamento em termos de pixels esteve dentro daquele especificado para as duas janelas usadas), o método sempre forneceu como resposta valores de velocidade idênticos aos teoricamente impostos, ou seja, módulo de $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ para cada uma das componentes e um vetor de velocidade no quarto quadrante (inferior direito).

Este resultado mostrou que para as condições especificadas acima, o método fornece ótimos resultados e representa corretamente o processo físico modelado. Tal resposta já era esperada, uma vez que a hipótese básica desta metodologia assume a advecção como o único mecanismo responsável pelo deslocamento das feições térmicas.

3.2. DIFUSÃO PURA

A segunda análise envolveu a resposta do método à difusão pura. O MCC começou a detectar a sua influência, i. é, a difusão começou a apresentar um efeito significativo a partir do $\Delta t = 36 \text{ h}$ para um coeficiente de difusão turbulenta - $K_H = 10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ - (figura 1 - simulação (a)). Nesta situação, de um total de 191 pontos da grade de pontos avaliados, 31 (16.2%) forneceram vetores que apresentaram deslocamentos em linha e/ou coluna. A partir deste limite, o número de estimativas “erradas”

aumentou, fornecendo vetores não nulos em 66.5% dos pontos de grade já para um $K_H = 100 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e um Δt de 12 horas entre as imagens do par (figura 1 - simulação (c)). As simulações realizadas com $K_H = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e $K_H = 10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ com Δt de 12 horas foram virtualmente idênticas, resultando em vetores nulos. O mesmo ocorreu na simulação com $K_H = 10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ - $\Delta t = 24$ horas, que resultou em dois vetores não nulos.

Segundo o diagrama de difusão oceânico apresentando por Okubo (1974), a maior parte das estimativas de coeficientes de difusão situaram-se abaixo dos $10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Se estas medidas efetivamente refletirem o intervalo normal dos valores que poderão ser encontrados no oceano, isto sugere que a difusão, isoladamente, é um processo que pouco influencia a estimativa da velocidade utilizando-se o MCC. A difusão pode se tornar relevante caso o intervalo de tempo entre as imagens, isto é, a escala temporal da análise, for aumentada (figura 1 - simulação (b)).

Resultados semelhantes foram obtidos por Wahl e Simpson (1990). Esses autores salientaram que para valores de K_H superiores a $100 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, a difusão se torna significativa, fazendo com que ocorra uma diminuição considerável no valor do coeficiente de correlação cruzada. Um outro aspecto por eles estudado e não considerado neste trabalho, foi a magnitude do gradiente térmico. Suas análises indicaram que valores de K_H menores que $10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ poderiam ser extrapolados inclusive para regiões de altos gradientes, tais como os encontrados na Corrente do Golfo e Corrente de Kuroshio. Os resultados obtidos neste trabalho se compararam aos indicados acima, podendo-se pressupor que também sejam aplicáveis à Corrente do Brasil.

3.3. ADVEÇÃO E DIFUSÃO SIMULTÂNEAS

Por último, foram modelados os processos difusivos e advectivos agindo simultaneamente. Esta é a situação mais importante, pois no oceano real estes processos ocorrem em conjunto. As simulações foram realizadas para cada um dos valores de K_H (10, 100, 1000 e 10000 $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), e alguns dos resultados obtidos são mostrados na figura 2 para diferentes intervalos de tempo entre as imagens. Para efeito comparativo, os campos de velocidade estimados pelo MCC foram sobrepostos à primeira das cinco imagens criadas para cada valor de K_H . O modelo para $K_H = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ não foi realizado, por que o baixo valor de coeficiente de difusão e a velocidade advectiva imposta acarretaram dificuldades na sua simulação. No entanto, os resultados obtidos para $K_H = 10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ podem ser extrapolados e inferidos para valores de coeficiente de difusão turbulenta menores.

Para o valor $K_H = 10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (figura 2 - simulações (a,b)), pode-se ver que os vetores ficaram perfeitamente orientados, com exceção para o $\Delta t = 12$ horas (simulação (a)), que apresentou alguns vetores erráticos ao longo da borda. Este resultado não pode ser

decorrente da influência da difusão (figura 1 - simulação (a)), pois nessas condições o método foi incapaz de detectar sua influência. Sua ocorrência foi, provavelmente, consequência da presença do fundo randômico que, neste caso, foi utilizado no cômputo da correlação cruzada. Nesta condição entre o fundo randômico e a feição propriamente dita ficou estabelecido um gradiente que está influenciando a estimativa dos vetores de borda.

Com o aumento do intervalo de tempo entre as imagens, é verificada uma maior dispersão da feição (atuação da difusão), concomitantemente ao seu deslocamento advectivo, que gerou um alisamento nas bordas. Nestas condições, a correlação pode estar sendo calculada entre o campo randômico da primeira imagem e a feição principal das subseqüentes, ou então relacionando duas áreas com fraco ou nenhum gradiente. Em ambos os casos, obter-se-á como resposta, um vetor de baixa correlação que, pelo limite imposto (65%), não será plotado.

Uma outra situação também detectada, foi o correto ordenamento de alguns vetores da borda com o aumento do intervalo de tempo entre as imagens. Nesse caso, além de estar acontecendo o mecanismo descrito acima, o acerto pode resultar da relação entre as janelas e da disposição da grade regular de pontos em relação ao tamanho da feição que está sendo seguida.

Na prática, situações semelhantes a estas ocorrem quando é estimada a correlação cruzada entre janelas na qual uma delas ou ambas, possuem parte de uma feição nebulosa ou costeira. Conforme descrito acima, existe a atuação de um fator externo que normalmente reduz o coeficiente de correlação ou, então, pode resultar numa estimativa errônea do vetor velocidade.

Os resultados obtidos para $K_H = 100 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (figura 2 - simulação (c)) também foram semelhantes aos de $K_H = 10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, com a ocorrência de muitos vetores ordenados de maneira imprópria àquele teoricamente imposto. Neste caso, é possível atribuir tais desajustes à atuação mais efetiva da difusão (figura 1- simulação (c)), e a influência dos fatores descritos anteriormente para $K_H = 10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e que continuarão a existir para $K_H = 1000 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e $K_H = 10000 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Para o valor de $K_H = 1000 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (figura 2 - simulação (d)) o caráter difusivo ficou bem salientado em função da mudança de direção do vetor calculado pelo MCC. É possível visualizar-se nestas figuras, vetores de maior tamanho no quarto quadrante (inferior direito) pois as duas velocidades – difusiva e advectiva – ocorrem na mesma direção e sentido, ao contrário dos vetores nos demais quadrantes. No primeiro (superior esquerdo), embora possuam a mesma direção, seu sentido é contrário, enquanto nos demais, são adicionados vetorialmente.

Finalmente, para $K_H = 10000 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, os vetores praticamente só respondem ao mecanismo difusivo do modelo utilizado, apresentando uma distribuição radial. Somente os vetores do centro da feição, região na qual existe um forte gradiente em função do próprio caráter da distribuição gaussiana, é que o modelo estimou os vetores corretamente.

3.3.1. O MÓDULO DO VETOR VELOCIDADE ADVECTIVA

A tabela 1 mostra o percentual de vetores estimados e agrupados dentro do intervalo de $\pm 20\%$ do módulo de velocidade advectiva. A análise destes resultados mostra que o percentual de velocidades corretamente estimados diminui com o aumento de K_H , estando de acordo com as discussões anteriores, e aumenta com o intervalo de tempo para um mesmo coeficiente de difusão. Esta última, no entanto, é uma conclusão errônea, pois o intervalo de velocidade de $\pm 20\%$ está certamente englobando vetores que não representam a velocidade advectiva, mas uma interação entre esta e a difusiva resultando, coincidentemente, num módulo de velocidade dentro deste intervalo (figura 2 - simulação (d)). A influência do Δt é fácil de ser entendida tendo-se em mente que $V = \text{deslocamento}/\text{tempo}$. Neste sentido, quanto maior for o intervalo de tempo para um mesmo deslocamento, menor será o incremento de velocidade. Portanto, possíveis desvios, que certamente ocorreram para grandes defasagens de tempo, não estão sendo corretamente explicitados na tabela 1.

Na tentativa de eliminar-se tais influências foram

calculados os desvios percentuais (erro) que a estimativa de velocidade mantinha incorporada devido a outros fatores que não a advecção, segundo a relação:

$$\text{erro} = 100 \cdot \left(\frac{\text{Comp.Veloc.Estimada}}{\text{Comp.Veloc.Adveccao}} - 1 \right) \quad (2.5)$$

onde,

Comp.Veloc.Estimada é o módulo da velocidade estimada pelo MCC e Comp.Veloc.Advecção é o valor da velocidade advectiva imposta na simulação = $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Estas estimativas foram graficadas na forma de histogramas (não mostrados), nos quais foi possível visualizar-se que para um mesmo coeficiente de difusão turbulenta, o aumento do intervalo de tempo produziu um agrupamento das classes de variação. Este resultado é conseqüência direta da influência do Δt no módulo da velocidade, uma vez que deslocamentos idênticos resultaram em diferentes incrementos de velocidade. A comparação entre valores de coeficiente de difusão turbulentos para um mesmo Δt mostra que o aumento da importância da difusão resulta num espalhamento das classes de variação, com uma conseqüente diminuição na

frequência percentual de cada uma delas, implicando num incremento substancial do erro (valor máximo superior a 700% - $K_H = 10000 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ - $\Delta t = 12$ horas) sendo incorporado na estimativa realizada.

A análise destes histogramas permitiu retificar os valores obtidos na tabela 1. Fica claro agora que o valor de 48.4%, por exemplo, obtido na tabela 1 para $K_H = 10000 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e $\Delta t = 48$ horas não está correto (ver tabela 5), mas resulta da combinação feliz entre valores errados. Os resultados globais estão sumarizados nas tabelas 2; 3; 4 e 5.

Na prática, somente o percentual de vetores com erro nulo não traz consigo a interferência das possíveis combinações que podem ocorrer entre as velocidades advectivas e difusivas. Um percentual em torno de 70% foi o número máximo conseguido ($K_H = 10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ - tabela 2), diminuindo para os outros valores de K_H até, aproximadamente 6% para $K_H = 10000 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

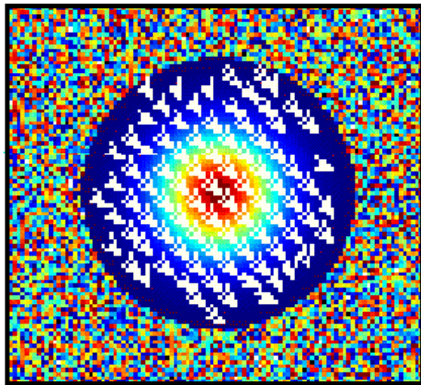
A partir dos resultados mostrados nas tabelas acima, é sugerido que somente para o menor valor de K_H simulado estimou-se mais de 65% dos vetores com exatidão, com um percentual máximo em torno de 87% para uma variação de $\pm 20\%$. Esses resultados, obtidos como média aritmética para os quatro valores de Δt , podem ser extrapolados de modo a afirmar-se que percentuais iguais ou superiores a estes devem ocorrer para $K_H = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ou menores.

A imprecisão cresce para os demais casos e os vetores corretamente estimados somente são encontrados no centro da feição modelada em função do alto gradiente presente nesta região.

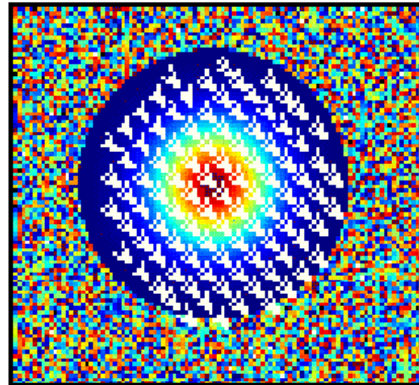
Finalizando, pode-se dizer que coeficientes de difusão da ordem de $10^2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ se constituem em limites superiores para a obtenção de boas estimativas de velocidades, da mesma forma que para a difusão pura. Ao mesmo tempo, em regiões onde os coeficientes de difusão são superiores a estes, é possível ainda obter resultados de velocidade advectiva se as imagens consecutivas possuírem pequenos intervalos de tempo entre si e existirem fortes gradientes térmicos.

4. CONCLUSÕES

- Os campos de velocidade estimados na simulação da advecção pura resultaram em vetores corretos tanto em módulo, quanto em direção e sentido. Isto está de acordo com a hipótese básica do método que assume a advecção como o mecanismo responsável pelo deslocamento da feição térmica.
- O número de vetores incorretamente estimados nas simulações da difusão pura e difusão e advecção atuando simultaneamente aumentou com o incremento de K_H e Δt . Erros máximos de até 700% estiveram incorporados nestas estimativas. No entanto, valores de coeficientes desta ordem são infreqüentes no oceano para escalas de fenômenos (l) menores que 100 Km, sendo, portanto, sua

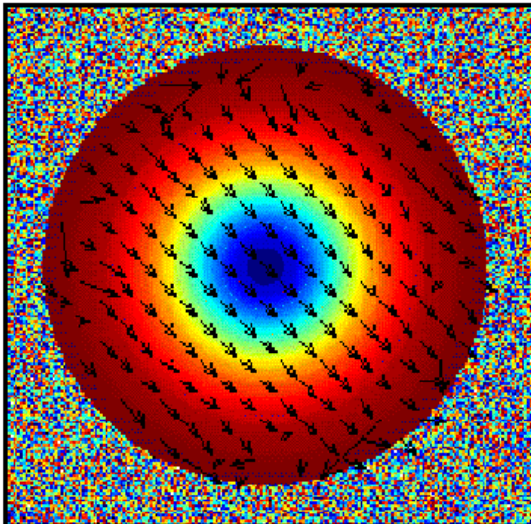


a)



b)

c)



d)

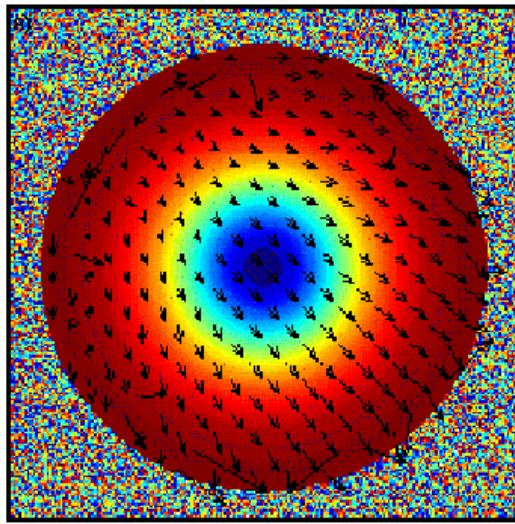


Figura 2 - Campos de velocidade advectiva obtidos a partir de imagens sintéticas que simulam o efeito difusivo e advectivo agindo simultaneamente. **a)** $K_H=10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ $\Delta t=12 \text{ h}$; **b)** $\Delta t=36 \text{ h}$ **c)** $K=100 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ $\Delta t=12 \text{ h}$ e **d)** $K_H=1000 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ $\Delta t=12 \text{ h}$. Tal como na figura 1, todos os campos estão sobrepostos a primeira imagem da sequência.
Obs: Os vetores, tanto na figura 1 como na figura 2, não possuem a mesma escala.