

DIFERENÇA ENTRE OS TESTES DE EMERY E DCA NA ESTIMATIVA DO CAMPO DE CORRENTE OCEÂNICA SUPERFICIAL POR MEIO DA TÉCNICA MCC

EDUARDO NEGRIDE OLIVEIRA
JOÃO ANTONIO LORENZZETTI
JOSÉ LUIZ STECH

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{negri, loren, stech}@ltid.inpe.br

Abstract. Sea surface current velocities are estimated by the Maximum Cross Correlation (MCC) technique applied on two sequential images. The method requires the determination of cross correlation coefficients and the identification of its maximum value. The resultant velocity field shows a number of incoherent vectors that are eliminated by using two statistical methods: Emery test and DCA test. The latter shows to perform better.

Keywords: mcc, avhrr, corrente superficial.

1. Introdução

Estimativas de correntes oceânicas superficiais podem ser obtidas por meio dos dados adquiridos pelos sensores orbitais a bordo de satélites, por exemplo: AVHRR/NOAA e Topex-Poseidon. Os dados obtidos pelo satélite AVHRR/NOAA possuem resolução temporal da ordem de duas ou mais passagens por dia, se considerarmos o conjunto de satélites NOAA em órbita, e resolução espacial de aproximadamente 1 km. A partir de um par de imagens AVHRR é possível, por meio do rastreamento das feições termais, estimar o campo vetorial de corrente oceânica superficial, com alta resolução espacial.

A técnica de MCC (Máxima Correlação Cruzada), descrito por Emery et al. (1986), tem sido a mais utilizada para se estimar o campo vetorial a partir de imagens AVHRR/NOAA, e tem apresentado resultados satisfatórios. Entretanto a presença de nuvens e ausência de gradiente termal acentuado, entre outros fatores, faz com que uma parcela dos vetores estimados esteja em desacordo com a dinâmica superficial do oceano.

A fim de se eliminar esses vetores espúrios, o coeficiente de correlação cruzada obtido para cada vetor estimado pelo método MCC é avaliado. Caso o coeficiente de correlação cruzada esteja aquém de um limiar definido, o vetor resultante desse coeficiente de correlação é descartado. O presente trabalho avalia e confronta a eficácia de dois testes, Teste de Emery e Teste DCA, que buscam, de forma distintas, estipular o limiar acima citado.

2. Material

O presente trabalho utilizou dois pares de imagens AVHRR/NOAA com defasagem temporal de aproximadamente 12:00 hs entre as imagens de cada par. O sensor AVHRR é um radiômetro de cinco canais que possui um ângulo de visada de 54,4° para cada lado do nadir, com uma cobertura total de varredura no terreno de aproximadamente 2700Km. O ângulo médio de visada instantâneo é de 1,4 mrad, conferindo uma resolução espacial no terreno da ordem de 1,1x1,1 Km no nadir e de 2,4x6,9 Km para ângulos máximos de varredura (Frulla et. al., 1995). Os cinco canais do sensor são distribuídos do visível ao infravermelho termal. O canal 4 foi utilizado para aplicar a técnica MCC.

3. A Técnica MCC

A técnica MCC para estimativas de campos de velocidades superficiais advectivas consiste, essencialmente, na identificação da máxima correlação cruzada entre matrizes que definem sub-áreas de um par de imagens seqüenciais. Da imagem 1 extrai-se a sub-área que define a janela de moldura, cujo tamanho pode variar de acordo com a área de estudo. Na imagem 2, uma sub-área mais ampla é selecionada e definida como janela de busca, cujo ponto central inicial coincide com o da janela de moldura (**Figura 1**).

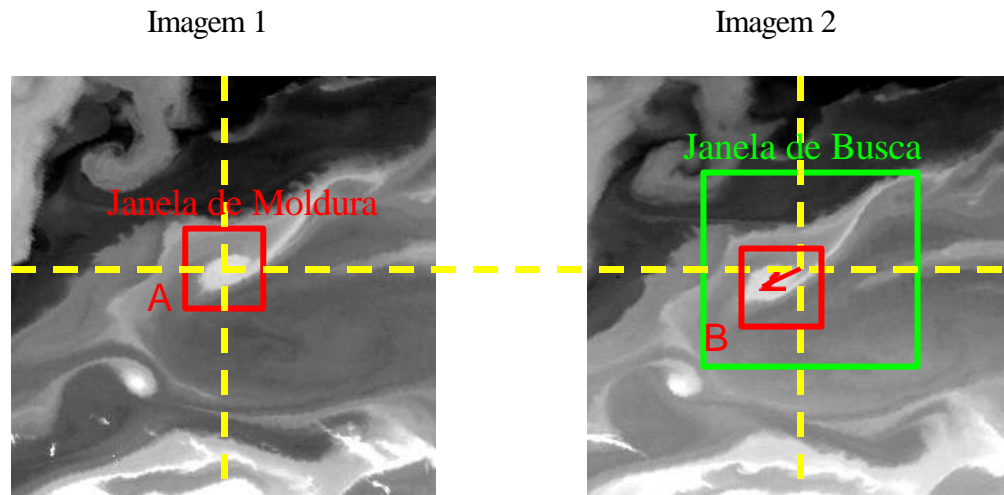


Figura 1 – Janela de Moldura e Janela de Busca
 Vetor deslocamento da feição termal.

A correlação máxima encontrada a partir do deslocamento da janela de moldura sobre a janela de busca, define o vetor velocidade da corrente oceânica superficial. O coeficiente de correlação cruzada é obtido pela seguinte equação:

$$r = \frac{1}{\sigma_A \sigma_B} \sum \sum \{ [A - A_m] [B - B_m] \}$$

r - coeficiente de correlação cruzada,

σ_A e σ_B - desvio padrão para as matrizes A e B, respectivamente,

A e B - janelas de moldura extraídas das imagens 1 e 2, respectivamente,

A_m e B_m - valores médios para cada matriz.

Maiores detalhes sobre a técnica MCC são descritos por Emery et al. (1986), Wu & McNeil (1992), e, mais recentemente, Domingues et al. (2000) e Oliveira et al. (2001) aplicaram a técnica para a região compreendida na Plataforma Continental Sul Brasileira.

4. Metodologia

4.1 Processamento das Imagens

Inicialmente fez-se a correção geométrica das imagens AVHRR/NOAA pelo processo de ajuste polinomial dos seus pontos de controle orbitais, objetivando a maior acurácia possível. Este processo é realizado com a finalidade de regularizar o tamanho dos pixels, eliminando as distorções decorrentes da geometria de aquisição da imagem. A imagem é reamostrada com resolução espacial de 1100 x 1100 metros e geo-referenciada num mapa de projeção geográfica, em termos de latitude e longitude.

Ao aplicar a técnica MCC ao par de imagens selecionado, o campo vetorial de corrente oceânica superficial é gerado para uma grade regular de 15x15 pixels, para que o campo vetorial gerado possa ser melhor observado.

4.2 Teste de Significância do Coeficiente de Correlação Cruzada

A circulação e o campo de temperatura de superfície no oceano apresentam uma dinâmica bastante complexa, de tal forma que em determinadas áreas o padrão de distribuição de temperatura é único. Um campo de velocidade advectiva derivado pelo método MCC, sobre o qual nenhum teste de significância foi aplicado, apresenta inúmeros vetores errôneos, distribuídos aleatoriamente por toda a imagem (devido à limitação do método MCC em capturar todas as feições termais existentes, independentemente do aspecto físico que as tenha gerado). Somente a magnitude do coeficiente de correlação, a partir de um ponto de vista estatístico, não indica o nível de significância esperado. Existem métodos estatísticos para se testar a significância do coeficiente de correlação e conseqüentemente sua validação. A seguir é apresentado o teste proposto por Emery et al (1986), de agora em diante denominado teste de Emery, e o proposto por Wu et al. (1992), denominado de Área de Decorrelação (*Decorrelation Area* - DCA). Ambos os teste buscam definir o grau de liberdade do sistema para que, escolhido o nível de significância, a variável t definida logo a seguir seja confrontada com a tabela t-student a fim de ser verificar se o valor de t está entre os limiares definidos pela tabela t-student. Caso afirmativo, o coeficiente de correlação cruzada é aceito.

4.2.1 O Teste de Emery

Para um coeficiente estimado de correlação cruzada, r, existe um t tal que: $t = r\{N/(1-r^2)\}^{1/2}$; onde N é o número de Graus de Liberdade (GL) do sistema e r o coeficiente de correlação ($-1 \leq r \leq 1$). O parâmetro t corresponde a uma variável randômica que tem uma distribuição *t-student* com N graus de liberdade, o qual pode ser estimado em função dos dados amostrados (Chatterjee e Price, 1977). Para aplicar o teste de significância, escolhe-se primeiramente o nível de significância desejado, denotado por α ($\alpha = 1\%, 5\%, 10\%$ etc). Para uma população correlacionada é possível estipular o GL do sistema, o qual será utilizado para se calcular t, cujo conceito de determinação está vinculado ao processo de decorrelação. Emery et al. (1986) procederam a análise da escala de decorrelação da seguinte forma; previamente determinaram o GL analisando-se a média das matrizes de autocorrelação para todas as janelas de moldura da área que estava sendo estudada, como ilustrado na **Figura 2**.

Determinam-se as distâncias L_x e L_y , conforme a **Figura 2** (onde o contorno é delimitado no momento em que o coeficiente de correlação é zero sobre os eixos x e y). Então calcula-se o comprimento médio de decorrelação, $L = (L_x + L_y)/2$. Onde L é a medida da escala de decorrelação para o caso bidimensional em estudo. Em seguida determina-se o grau de liberdade médio para todas as janelas de moldura como sendo: $N = (\text{número total de pixels na janela de moldura}) / L$. Esse grau de liberdade, único para todas as janelas de moldura, é então utilizado para se estipular o valor de t para que se possa, dentro do nível de significância escolhido, avaliar se o coeficiente de correlação será aceito ou rejeitado.

4.2.2 O Teste DCA

O método aqui explanado, proposto por Wu et al. (1992), difere do método proposto por Emery et. al (1986) no que diz respeito à análise da matriz de autocorrelação. O Teste DCA é efetuado calculando-se a matriz de autocorrelação para cada janela de moldura, de tal forma que cada matriz de autocorrelação é submetida a uma análise individual para se verificar o grau de liberdade para a feição presente na janela de moldura, resultando graus de liberdade

diferentes para cada janela de moldura. No Teste de Emery, ao contrário, todas as matrizes de autocorrelação, oriundas de cada janela de moldura, contribuem para se calcular uma matriz de autocorrelação média. Em seguida é efetuado o cálculo do grau de liberdade médio, que será único e aplicado a todas as janelas de moldura para se validar o coeficiente de correlação cruzada.

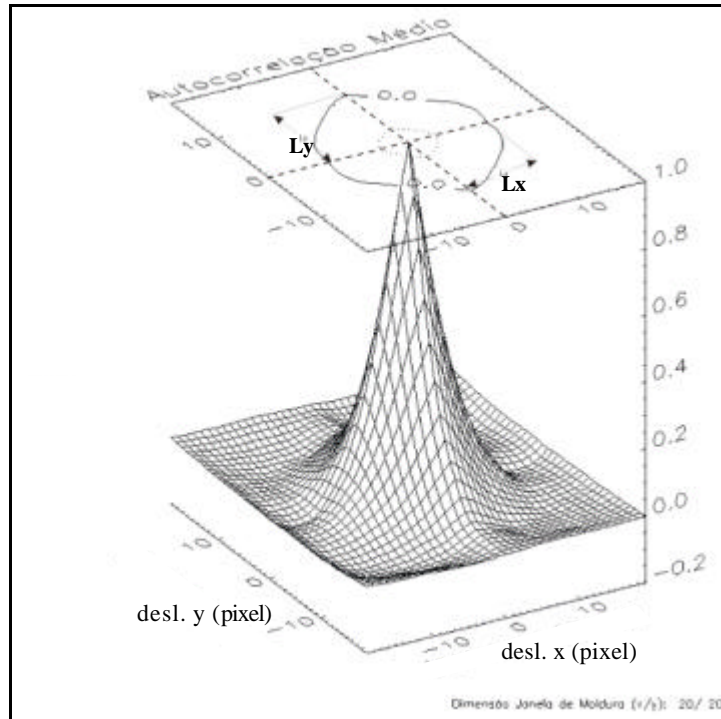


Figura 2 – Exemplo de média de superfície de autocorrelação. x e y variam de $[-P,+P]$ e $[-Q,+Q]$, respectivamente. L_x e L_y representam as distâncias x e y onde a função a autocorrelação é zero. P e Q definem o tamanho da janela de moldura.

O Teste DCA fornece, também uma medida alternativa que possibilita avaliar a compatibilidade da feição termal presente na janela de moldura com o tamanho da janela de moldura. Há situações onde o tamanho da feição termal é maior que a tamanho da janela de moldura, de tal forma que há somente uma pequena variação de temperatura dentro da janela de moldura. Nesse caso, a variação de temperatura se deve basicamente a presença de ruídos, conseqüentemente, a área de decorrelação (DCA), descrita logo abaixo, tende a ser bastante pequena pois ruídos não são espacialmente correlacionados (Wu et. al, 1992). Outro fator complicador diz respeito ao fato de que as áreas onde os campos de correntes superficiais e temperatura são muito complexos podem conter feições termais que impossibilitem o rastreamento destas por uma simples translação, tal qual realizadas no método MCC. Também nessas regiões a DCA tende a ser bastante pequena

O seguinte procedimento é usado para se determinar essa medida alternativa para avaliar a compatibilidade da feição termal presente na janela de moldura com o tamanho da janela de moldura. Todos os valores da matriz de autocorrelação que estiverem acima de 0.5 são mantidos. Dessa forma, uma área central de autocorrelação para cada janela de moldura é determinada.

Se a área compreendida nesse delineamento for superior a um determinado número de pixels (esse número de pixels, definido como d_0 , é obtido através da análise dos histogramas das áreas delineadas para cada janela de moldura), a janela é dita compatível com a feição

termal presente, caso contrário é descartada. O valor de d_b , para o presente trabalho, variou de 4 a 6 pixels, valores próximos do utilizado por Wu et al. (1992) que foi de 3 pixel. Dessa forma evita-se o cálculo da correlação cruzada para janelas de moldura que apresentam feições termais incompatíveis.

Se a feição termal é compatível com a janela de moldura, passa-se para a segunda etapa do método DCA, que é a estimativa da área de decorrelação propriamente dita. Wu et al. (1992) propuseram uma medida estatística, denominada Área de Decorrelação (*Decorrelation Area - DCA*), definida como sendo $1/4$ da área cujo centro contém o pico de autocorrelação, e dentro da qual a magnitude da função de autocorrelação está acima de um valor prescrito, determinado, para cada janela de moldura, da seguinte forma: assume-se que os valores fora da área do pico central da matriz de autocorrelação determinados pela linha de magnitude zero são randomicamente distribuídos e com média zero.

O nível de flutuação da função de autocorrelação após a linha de zero, é estimado através dos valores negativos da matriz. Na prática, aproxima-se o desvio padrão destes valores por:

$$\delta = \left(\sum_{i=1}^S R_i^2 / S \right)^{1/2} ;$$

onde, R_i são os valores negativos e S é o número total de valores negativos presentes na matriz de autocorrelação. δ é então utilizado como sendo um limiar de corte na matriz de autocorrelação, de tal maneira que todos os valores dentro da área central da matriz que forem menores ou iguais a δ serão substituídos por 0 (**Figura 3**). Portanto, a nova área central de autocorrelação, que tem valores acima do nível de flutuação, pode ser isolada por meio dos valores de correlação acima da nova linha de zero. Assim, a área de decorrelação é determinada como $1/4$ desta nova área. O número de graus de liberdade, nesse caso, é estimado como: $N = (\text{número total de pixels presentes na janela de moldura})/d$, onde d é a magnitude da DCA em número de pixels.

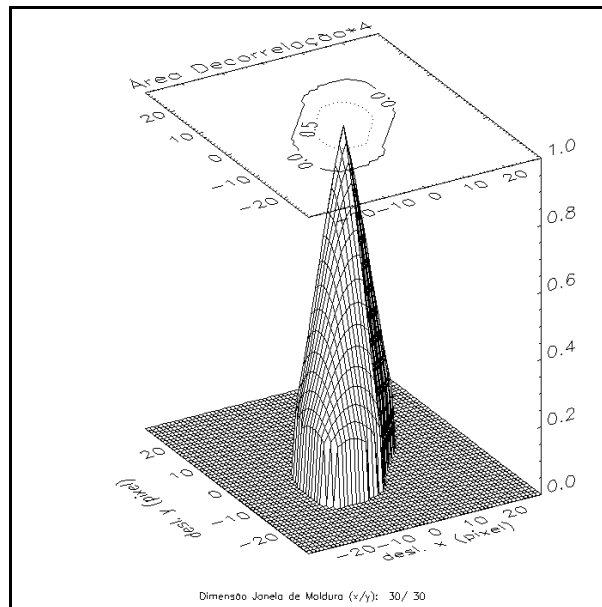


Figura 3 – Exemplo da nova área central de autocorrelação para uma janela de moldura, delimitada pelos valores superiores a δ . A DCA é $1/4$ dos pixels desta área.

Dessa forma, duas etapas são realizadas para o Teste DCA. A primeira etapa envolve uma avaliação do histograma de distribuição do pico central de autocorrelação a fim de se determinar um limiar d_b para se testar a compatibilidade do tamanho da janela de moldura

com feição termal presente nesta. A segunda etapa consiste em se calcular os GL's das DCA's que passaram pela primeira etapa, prosseguindo com o teste de significância para o coeficiente de correlação cruzada. Dessa forma, cada janela de moldura tem seu GL calculado a partir de sua DCA. Esse grau de liberdade é então utilizado para se estipular o valor de t para que se possa, dentro do nível de significância escolhido, avaliar se o coeficiente de correlação cruzada obtido para aquela janela será aceito ou rejeitado.

5. Resultados e Discussões

Os testes de Emery e DCA foram aplicados em dois pares de imagens a fim de se verificar o campo vetorial resultante em função das variações dos parâmetros estatísticos: grau de liberdade e nível de significância.

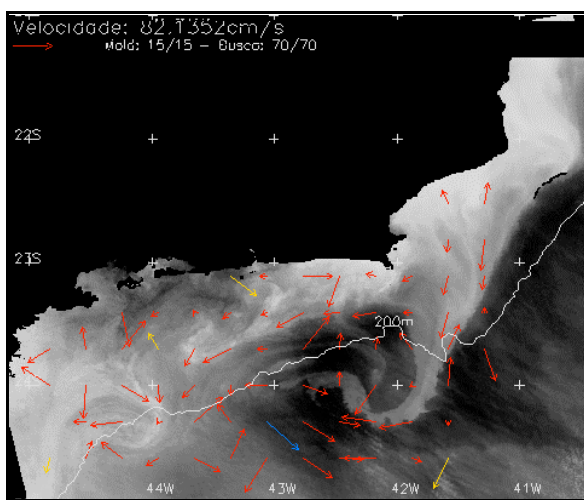


Figura 4 – Teste de Emery. Vetores vermelhos passaram pelo teste $ns=1\%$; vetores amarelos pelo teste, $ns=5\%$. Os vetores azuis, não passaram pelo teste $ns=10\%$.

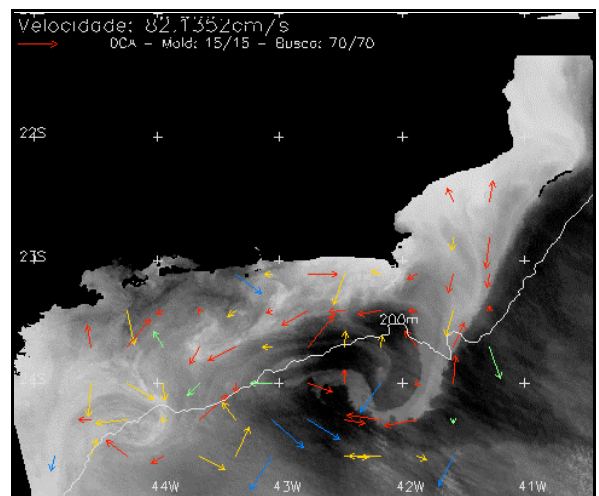


Figura 5 – Teste DCA. Vetores vermelhos passaram pelo teste $ns=1\%$; vetores amarelos pelo teste, $ns=5\%$; vetores verdes pelo teste, $ns=10\%$. Os vetores azuis, não passaram pelo teste $ns=10\%$.

Através de uma análise qualitativa da **Figura 4** é possível verificar que o teste de Emery é pouco susceptível ao decréscimo do nível de significância. Mesmo com um nível de significância de 1% poucos foram os vetores eliminados. Por gerar um grau de liberdade único através da média das matrizes de autocorrelação o teste de Emery não se mostrou muito eficiente, pois tende a generalizar o comportamento das feições termais presentes nas janelas de moldura (Wu et. al., 1992).

Os resultados da aplicação do teste DCA, **Figura 5**, mostram um progressivo rigor na aceitação do campo vetorial com a redução do nível de significância escolhido. Com o nível de significância de 10%, foram eliminados 7 vetores (as setas em azul) que nitidamente não possuem relação alguma com a dinâmica da corrente oceânica superficial da região. Conforme o decréscimo do nível de significância outros vetores são removidos. É interessante notar que para o nível de significância de 1% restaram apenas aqueles vetores situados nas regiões onde o gradiente termal é significativo.

Analisando a **Figura 6** constata-se que mesmo com o nível de significância de 1% nenhum vetor foi removido, ou seja, o campo vetorial originalmente gerado pelo método MCC permaneceu o mesmo após a aplicação do teste de Emery. Isso evidencia que em alguns casos o teste de Emery pode se mostrar ineficiente na avaliação do grau de liberdade e compatibilidade da feição termal com a respectiva janela de moldura que a incorpora.

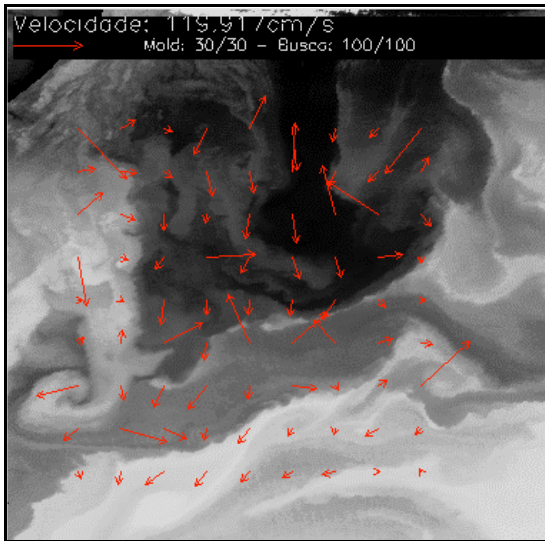


Figura 6 – Teste de Emery. Vetores vermelhos passaram pelo teste $ns=1\%$. Mesmo com $ns=1\%$ nenhum vetor foi eliminado.

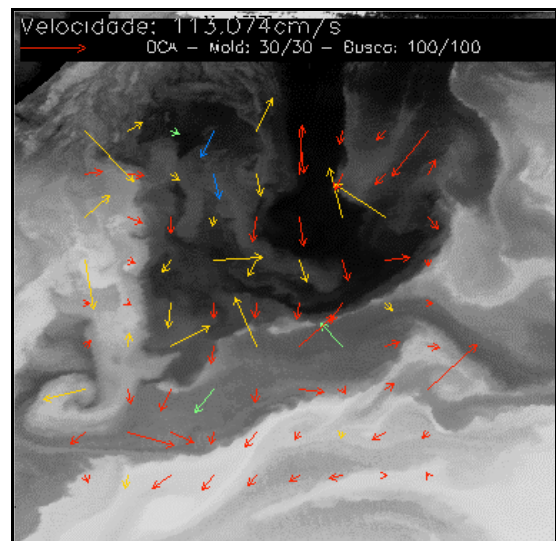


Figura 7 – Teste DCA. Vetores vermelhos passaram pelo teste $ns=1\%$; vetores amarelos pelo teste, $ns=5\%$; vetores verdes pelo teste, $ns=10\%$. Os vetores azuis, não passaram pelo teste $ns=10\%$.

Por outro lado, o teste DCA, por avaliar o padrão termal presente em cada janela de moldura, consegue filtrar o campo vetorial em função da variação do nível de significância, conforme **Figura 7**. Dessa forma é permitida a obtenção de campos vetoriais onde uma parcela significativa dos vetores espúrios seja removida. Observa-se na **Figura 7**, que além dos vetores espúrios, alguns outros que apresentam uma coerência com os vizinhos e com a dinâmica superficial, foram removidos conforme a variação do nível de significância. Isso pode ser explicado pelo baixo valor do coeficiente de correlação cruzada, r .

6. Conclusão

O MCC é uma técnica rápida, econômica e extremamente útil para se estimar velocidades advectivas superficiais, principalmente em regiões onde as medidas diretas são escassas ou inexistentes.

O teste DCA mostrou-se mais eficiente na aplicação do nível de significância, e conseqüentemente na estimativa do GL, conseguindo incorporar de maneira mais satisfatória o padrão termal presente em cada região.

Embora o teste DCA apresente resultados mais satisfatórios que o teste Emery, ele ainda apresenta algumas limitações que não estão relacionadas diretamente ao teste, mas sim à dimensão da janela de moldura. Quando se escolhe a janela de moldura, busca-se otimizar a dimensão da mesma com as feições termais presentes na região de aplicação do método. No entanto, nem sempre é possível definir uma janela de moldura que incorpore de maneira satisfatória todas as feições presentes na área, logo há uma perda de eficiência no rastreamento de algumas feições que não estão bem representadas na janela de moldura (Kelly e Strub, 1992). Nestes casos, obtém-se um coeficiente de máxima correlação cruzada não elevado o suficiente para passar pelos sucessivos testes de níveis de significância.

Referências

Chatterjee, S; Price, B.; *Regression Analysis by Example*. John Wiley, 1977. 228p.

Domingues, C.M.; Gonçalves, G.A; Ghisolfi, R.D.; Garcia, C.A.E. ; Advective surface velocities derived from sequential infrared images in the southwestern atlantic ocean. *Remote Sensing of Environment*. v. 73, p. 218:226, 2000.

Emery, W.J.; Thomas, A.C.; Collins, M.J.; An Objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images. *Journal of Geophysical Research*. v. 91, p. 12865-12878, 1986.

Frulla, L.A.; Milovich, J.A.; Gagliardini, D.A.; Illumination and observation geometry for NOAA-AVHRR images. *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 16, no.12, p. 2233-2253, 1995

Kelly, K. A; Strub, P.T.; Comparison of velocity estimates from advanced very high-resolution radiometer in the coastal transition zone. *Journal of Geophysical Research*. v. 97, n. c6, p. 9653-9668. June/1992.

Oliveira, E.N; Estimativas de correntes oceânicas superficiais pelo método da máxima correlação cruzada. São José dos Campos. 85 p. (INPE). *Dissertação* (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001.

Wu, Q.X.; Pairman, D.; McNeill, S.J.; Barnes, E.J.; Computing advective velocities from satellite images of sea surface temperature. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. v. 30, n. 1, p.166-176. January/1992.