

Variabilidade espacial de propriedades físico – químicas do estuário “Ciénaga Grande de Santa Marta” - CGSM Colômbia.

Omar Felipe Chaparro Saavedra¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
omar@dsr.inpe.br

Abstract: Geostatistical methods were applied in the modeling of physical and chemical variables measured in the Ciénaga Grande de Santa Marta, located on the Caribbean coast of Colombia. The information taken in march of 1997 was analyzed in this ecosystem. This data set indicates that the variables introduce strong structures of space dependence and thus the application of kriging and the subsequent preparation of maps of distribution are recommended in order to give explanation for this type of information.

Key words: Kriging, spatial dependence, semivariogram, estuaries,

1. Introdução

Os estuários são ambientes aquáticos de transição entre um ou vários rios e o mar. Um estuário sofre a influência e processos de mistura entre águas doces continentais e águas salgadas do oceano por meio das marés, a vazão dos rios, o gradiente de densidade, e apresenta fortes gradientes ambientais, desde águas doces próximos da sua cabeceira, águas salobras, e águas marinhas próximo da sua desembocadura. (MATEUS *et al.*, 2008)

Do ponto de vista da ecologia e da oceanografia, um estuário é uma região semi-fechada do oceano influenciada pelas descargas de água doce de terra, quer seja um ou mais rios, ou apenas da drenagem do continente. As zonas entre marés são geralmente constituídas de lama e outras zonas cobertas de sapais e pântanos que são ótimas para o desenvolvimento de espécies aquáticas.

A Ciénaga Grande de Santa Marta CGSM é um sistema lagunar localizado na costa Caribe Colombiana, entre os 10° 43` e os 11° 00` latitude Norte e os 74° 16` e os 74° 38` longitude Oeste (Figura 1). A área é conhecida também como a planície deltaica do rio Magdalena, estende-se desde a Serra Nevada de Santa Marta até o rio Magdalena. Estima-se que cerca de 4.280 km² são ocupados por este ecossistema dos quais 730

correspondem ao espelho de água. O volume de água é aproximadamente de 2.232×10^6 metros cúbicos, correspondente a Ciénaga Grande y $564 \times 10^6 \text{ m}^3$ ao complexo de Pajarales. (INVEMAR 2008).

O estuário Ciénaga Grande de Santa Marta se originou como uma baía costeira cujas características foram modificadas pela formação gradual da atual Ilha de Salamanca y a acumulação progressiva de sedimentos aportados tanto pelos braços deltaicos do rio Magdalena quanto os rios que descendem do sector ocidental do maciço da Serra Nevada de Santa Marta. Durante o Quaternário recente se formarão três deltas, dos quais os dois primeiros foram destruídos pela erosão (INVEMAR 2008).

No processo de avaliação e diagnóstico da qualidade da água dos ecossistemas estuarinos é necessário estudar a dinâmica de diferentes variáveis físico-químicas, sua inter-relação e a contribuição de cada variável nas mudanças dos ecossistemas (Giraldo *et al.*, 2000).

Para estudar essas variáveis, em contraste com a estatística clássica, os valores não são considerados independentes, no entanto, assume-se implicitamente que são correlacionados um com o outro, isto é, existe uma dependência espacial (Diaz, M 2002). Na presença de informação espacial, é necessário o uso de ferramentas de análise que consideram a correlação espacial como a geoestatística.

No presente trabalho é realizada um análise geoestatístico de variáveis físico-químicas medidas no estuário Ciénaga Grande de Santa Marta, a fim de estabelecer a distribuição espacial das variáveis selecionadas.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Procedimentos Metodológicos

Para determinar a variabilidade espacial de propriedades físico – químicas do estuário da Ciénaga Grande de Santa Marta se fará uso de 112 pontos amostrais realizados em março de 1997 pelo Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras INVEMAR (Figura 2). As variáveis avaliadas são profundidade (metros), temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidade (ppm) e oxigênio (mg/l) medidos na superfície. Essas variáveis são considerados altamente influentes nos processos de produtividade primária e da biodiversidade dos ecossistemas aquáticos como CGSM (Mateus *et al.*, 2008; Roldán G., & Ramirez J., 2008)

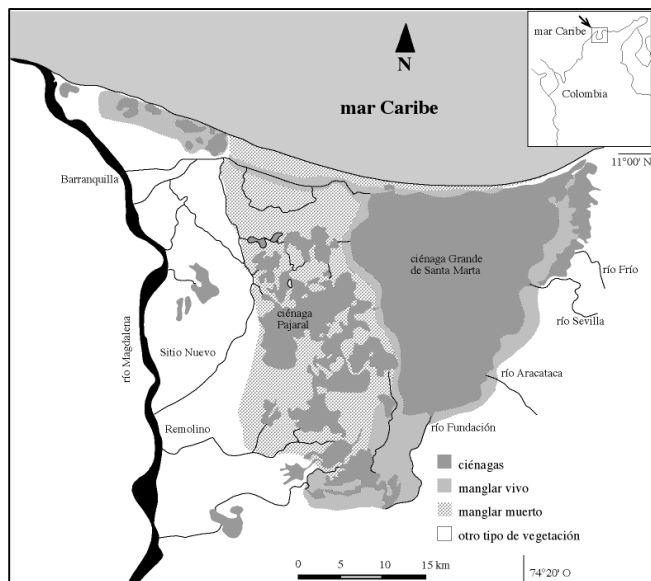


Figura 1. Localização geral da Ciénaga grande de Santa Marta

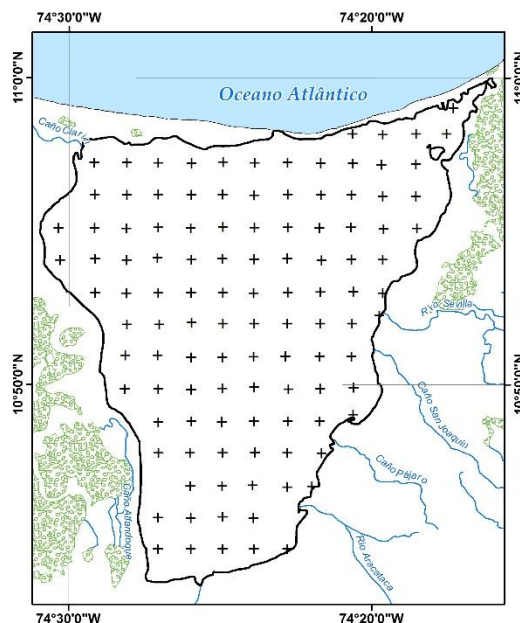


Figura 2. Desenho amostral

Para cumprir com os objetivos estabelecidos, foi calculado em primeira instância, o semivariograma experimental de cada uma das variáveis consideradas. Através do software SPRING 5.2.6 (Camara *et al.*, 1996), foram determinados os modelos com o melhor ajuste. Usando esses modelos, são calculados os pesos (λ) para fazer a predição de cada variável em aqueles locais onde não foram coletadas amostras utilizando a técnica de krigagem. Os resultados obtidos no processo de predição são mostradas nos gráficos utilizando mapas de contorno.

2.2 Análise geoestatística

A Geoestatística é uma ferramenta indispensável quando se deseja analisar os padrões de distribuição espacial das variáveis ecológicas e ambientais a partir de amostras tomadas na área de interesse (Moral F.J 2004). A geoestatística é uma abordagem probabilística de modelagem, que engloba um conjunto de métodos estatísticos, para a análise e mapeamento de dados distribuídos no espaço e/ou no tempo. A modelagem geoestatística envolve três etapas: a *Análise* que objetiva descrever a variabilidade espacial do fenômeno em estudo, denominada de análise estrutural ou modelagem do semivariograma, a *Inferência* que objetiva estimar valores de uma variável distribuída no espaço em locais não amostrados, denominada de *krigeagem* e a *Simulação* que

objetiva construir um conjunto de realizações equiprováveis ou igualmente representativa do fenômeno em estudo.

O semivariograma é uma ferramenta básica de suporte às técnicas de krigagem, que permite representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço (Diaz M, 2002).

$\gamma(h)$ é conhecida como a função semivariância e caracteriza as propriedades de dependência espacial de uma determinada variável. Tendo em conta uma forma de realização de um fenômeno, a função de semi-variância é estimada por meio do semivariograma experimental, o qual é calculado pela seguinte expressão:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2$$

Onde:

- $g(h)$ é o semivariograma estimado;
- $N(h)$ é o número de pares de valores medidos, $z(x_i)$ e $z(x_i+h)$, separados por um vetor distância h ;
- $z(x_i)$ e $z(x_i+h)$, são valores da i -ésima observação da variável regionalizada, coletados nos pontos x_i e x_i+h ($i = 1, \dots, n$), separados pelo vetor h .

Existem vários modelos teóricos de semivariância que podem ser ajustados para o semivariograma experimental. Autores como Câmara G., & Medeiros, J.S. De. (1998) ou Diaz M., (2002), apresenta uma discussão sobre as características e condições que os modelos teóricos deve atender. Em geral, estes modelos podem ser divididos em modelos com patamar (esférica, exponencial, gaussiano) e modelos sem patamar (linear, logarítmica, potencial). Os parâmetros básicos destes modelos são *Efeito Pepita* (C0), que revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras, o *Patamar* (C) que é o valor do semivariograma correspondente a seu *alcance* (a) que é a distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente.

Após ajustar o modelo de semivariograma experimental $\gamma(h)$, é possível realizar a técnica de krigagem. Cada observação - predição é calculada utilizando a seguinte expressão:

$$Z_{x_0}^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i), \quad \text{com} \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

Minimizando a variância do erro ($VAR[Z_{x_0} - Z_{x_0}^*]$) sob a condição de que $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$, os pesos λ_i são obtidos a partir do seguinte sistema de equações, denominado sistema de krigagem ordinária (Câmara G., & Medeiros, J.S. De. (1998)):

$$\left[\begin{array}{l} \sum_{j=1}^n \lambda_j C(x_i, x_j) - \alpha = C(x_i, x_0) \text{ para } i = 1, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \end{array} \right.$$

Onde,

- $C(x_i, x_j)$ e $C(x_i, x_0)$ são respectivamente, a semivariância entre os pontos x_i e x_j e entre os pontos x_i e x_0 .
- α é o multiplicador de Lagrange necessário para a minimização da variância do erro.

3. Resultados e Discussão

Em primeiro lugar os semivariogramas experimentais foram calculados como se apresenta na Figura 3. A forma dos semivariogramas indica que as variáveis apresentam estruturas de dependência espacial, uma vez que a semivariância experimental não é constante em função da distância.

A Tabela 1 apresenta as medidas descritivas das variáveis avaliadas. Os intervalos encontrados nos modelos teóricos ajustados excedam os 14 km e em alguns casos até os 31 km o qual é relativamente alto, considerando que a distância entre as extremidades do estuário não ultrapassa 32 km (Tabela 2).

Tabela 1. Estatísticas descritivas das variáveis físico-químicas medidas no estuário.

Variável	Media	Mínimo	Máximo	Coefficiente de variação
Oxigênio	8,86	3,03	16,29	0,366
Profundidade	1,48	0,25	2,50	0,242
Salinidade	17,61	13,03	34,95	0,162
Temperatura	29,47	26,00	33,20	0,072

Tabela 2. Modelos teóricos ajustados aos semivariogramas experimentais das variáveis físico-químicas medidas no estuário.

Variável	Modelo	Efeito Pepita	Patamar	Alcance (m)
Oxigênio	Gaussiano	0,47	15,14	17869
Profundidade	Gaussiano	0,07	0,15	31542
Salinidade	Spherical	1,54	9,47	14774
Temperatura	Gaussiano	0,23	16,61	26389

É importante ressaltar que o valor do efeito pepita não deve exceder o 50% do valor do patamar, o qual, de acordo com Diaz-Francesca (1993), é recomendado para que o modelo de correlação espacial represente bem a realidade.

Pode-se dizer que as variáveis oxigênio dissolvido, profundidade, temperatura e salinidade cumprem com a hipótese de estacionariedade do segundo grau, uma vez que seus modelos são delimitadas ou apresentam patamar.

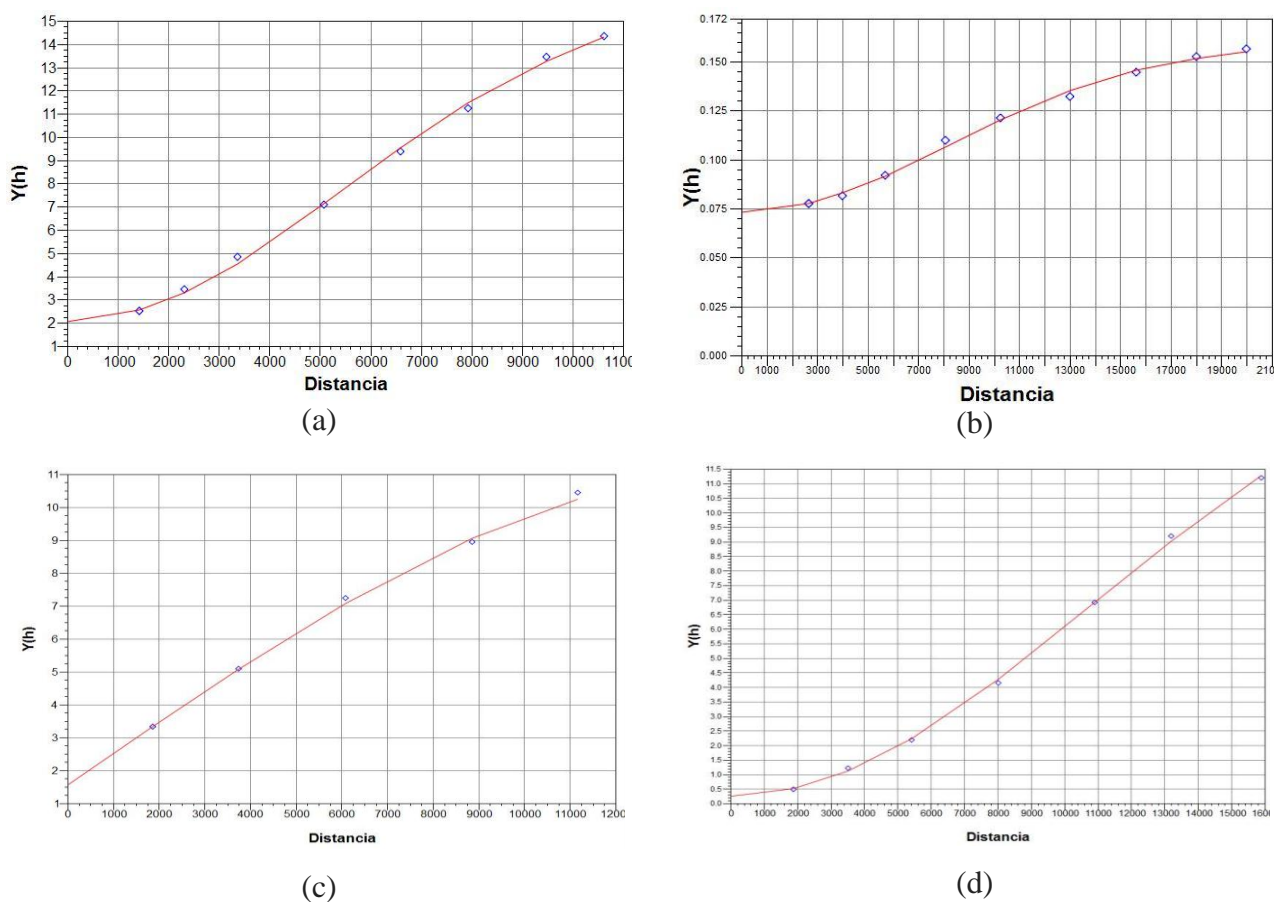


Figura 3. Semivariogramas experimentais e ajuste de modelos teóricos para as variáveis medidas na superfície do estuário Cienaga Grande de Santa Marta. a) Oxigênio, b) Profundidade, c) Salinidade, d) Temperatura.

Uma vez que os resultados descritos acima, com respeito aos semivariogramas experimentais e definidos os modelos teóricos, confirmam a hipótese de correlação espacial das características medidas no estudo estuário, podemos afirmar que os métodos geoestatísticos podem ser uma ferramenta útil em modelagem e interpretações de fenômenos observados nestes ecossistemas.

Oxigênio dissolvido

Os valores medidos de oxigênio variam entre os 3,03 (mg/l) e 16,29 (mg/l) na superfície do estuário (Tabela 2). A Figura 4 mostra que na superfície do estuário, há uma diferença considerável entre as estimativas do centro do sistema (12 a 15 mg/l) e os valores estimados para o nordeste e sul da área de estudo (valores próximos de 6 mg/l).

Isto sugere que ocorrem processos de estratificação no sistema para a área central da superfície da água, onde a produtividade é concentrada proporcionando grandes quantidades de oxigênio para a água durante o dia. (Giraldo R., *et al.*, 2000). Além disso, pode-se ver que os valores de oxigênio diminuem nos limites do sistema devido à troca de fluxos com outros corpos d'água e da contribuição de lixo e matéria orgânica de manguezal.

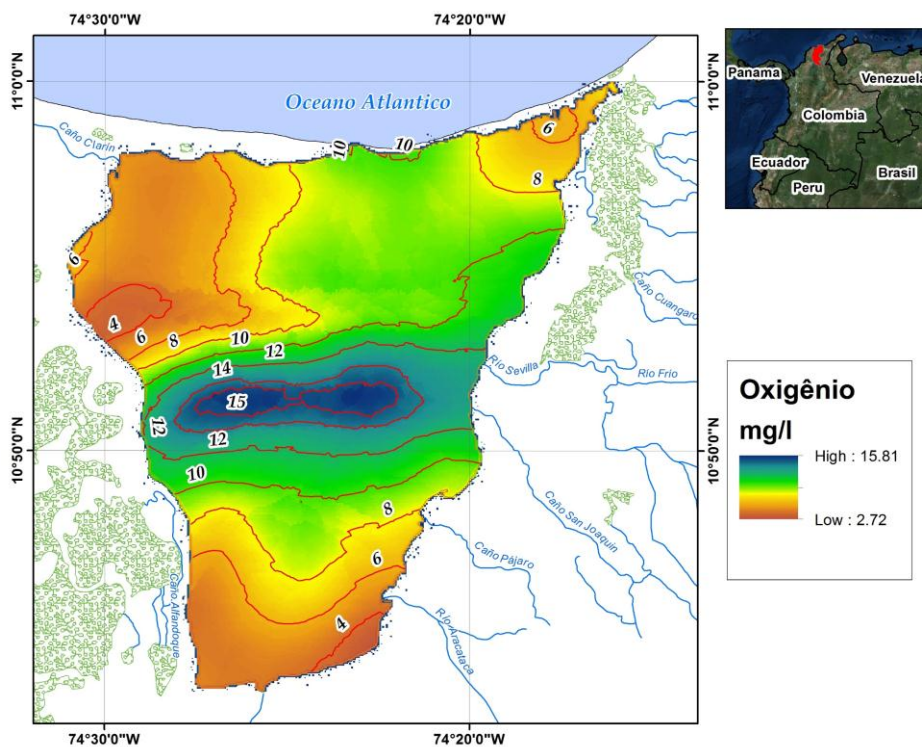


Figura 4. Distribuição espacial do oxigênio dissolvido (mg/l) no estuário Ciénaga Grande de Santa Marta

Profundidade

As estatísticas da variável profundidade (Tabela 1) e o mapa da distribuição espacial gerado confirmam o dito por Giraldo et al 2000 e INVEMAR 2008, os quais afirmam que a área de estudo é um estuário raso, com profundidades média de cerca de 1,5 m. A Figura 5 mostra que existe um gradiente positivo na direção leste - oeste e sul noroeste, respectivamente, o que pode estar relacionado com os processos sedimentação que têm ocorrido nos últimos anos perto do setor Boca da Barra (Noroeste), como resultado da redução dos fluxos de água que fluem a partir da Sierra Nevada de Santa Marta e os canais que se comunicam com o rio Magdalena.

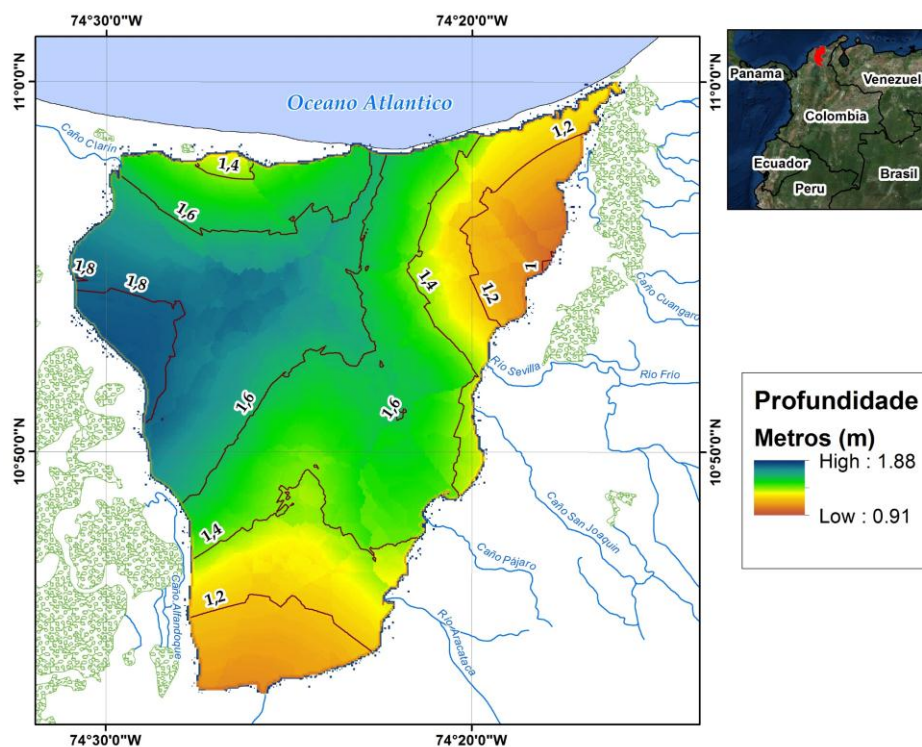


Figura 5. Distribuição espacial da profundidade (m) no estuário Ciénaga Grande de Santa Marta

Salinidade

Os valores medidos variaram entre os 13,03 e 34,95 (Tabela 1). Olhando para o mapa da distribuição espacial desta variável (Figura 6), podemos concluir que existe uma grande homogeneidade em todo o corpo de água, exceto para a parte nordeste, já que os valores só variam em torno de 16,34 e 18,44 unidades (quartil inferior e superior respectivamente).

Além disso, a influência das entradas de água doce e salgada sobre a magnitude da variável dentro do sistema é evidente. A salinidade máxima ocorre através entrada de água salgada na área do nordeste no ponto chamado Boca de la Barra (Figura 1) com valores acima de 30 unidades. Da mesma forma se pode ver que o sector oeste apresenta dados intermediários (19 unidades). Isto pode ser devido ao efeito de permuta de água, através dos canais existentes no Complexo Pajarales (Figura 1), onde um processo de lavagem ocorre na estação das chuvas ou quando há inundações.

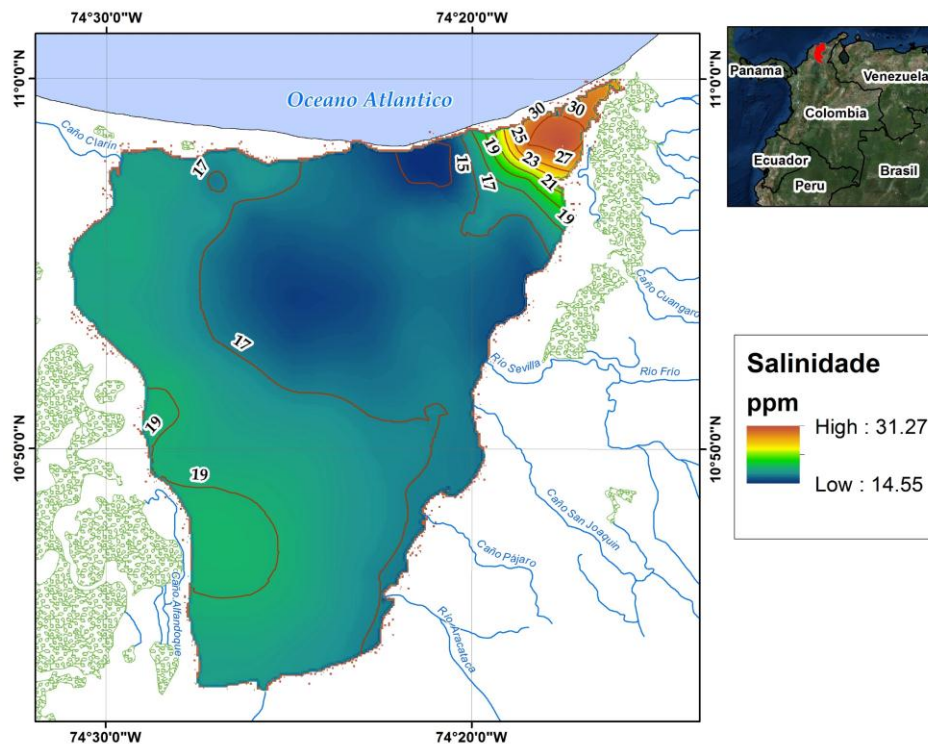


Figura 6. Distribuição espacial da salinidade (ppm) no estuário Cienaga Grande de Santa Marta

Temperatura

Os valores medidos variaram entre os 26 e 33.2 °C (Tabela 1). A Figura 7 mostra o mapa da distribuição espacial desta variável onde podemos concluir que existe uma grande influência das entradas de água sobre a magnitude desta variável dentro do sistema. As maiores temperaturas ocorrem no setor leste através da entrada de água doce do rio Sevilla e o Caño Joaquin principalmente.

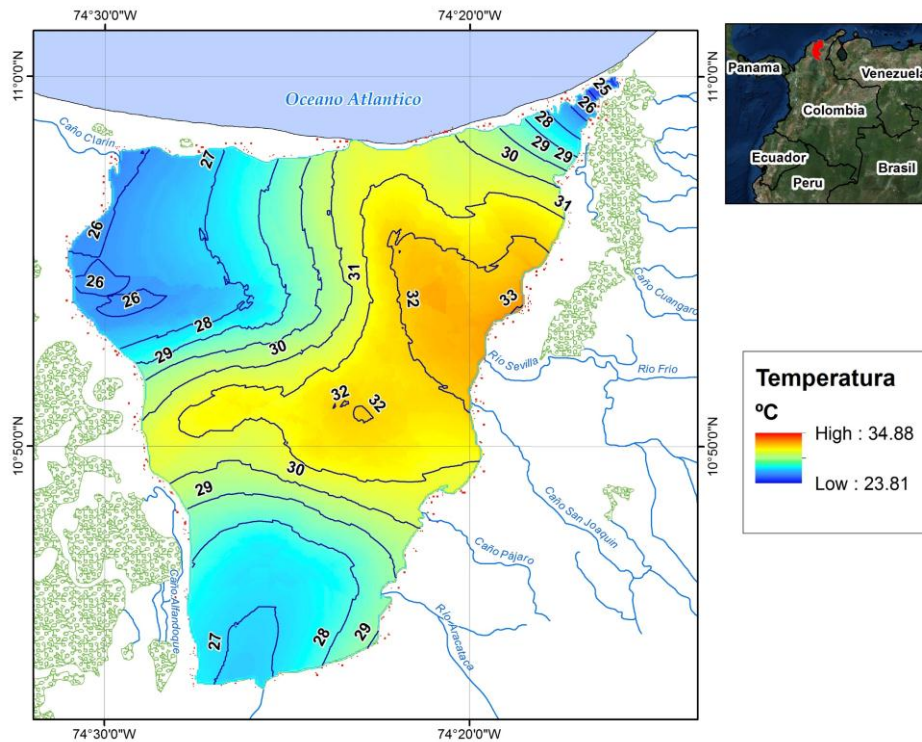


Figura 7. Distribuição espacial da temperatura (°C) no estuário Cienaga Grande de Santa Marta

4. Conclusões

As faixas encontradas nas semivariogramas ajustados indicam uma forte associação espacial. Este resultado confirma a necessidade de utilizar métodos geoestatísticos para o estudo de informação em sistemas estuarinos como a área de estudo.

As variáveis estudadas no estuário CGSM mostraram estacionariedade e por causa da existência de informações suficientes foi aplicada a técnica kriging (krigagem ordinária).

Existe a possibilidade de implementar o cokrigagem para futuros estudos na área, reduzindo assim os custos na tomada de amostras com alta associação espacial com outras que podem ser registradas com mais intensidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CÂMARA G, SOUZA RCM, FREITAS UM, GARRIDO J. 1996 "SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling". *Computers & Graphics*, 20: (3) 395-403.

CÂMARA, G, & MEDEIROS, J. S. DE. 1998. Geoprocessamento para projetos ambientais. São José dos Campos, SP. INPE

DIAZ M., 2002. Geoestadística aplicada. Instituto de Geofísica, UNAM, Instituto de Geofísica y Astronomía, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba, 135 págs.

GIRALDO H. R., W. TRONCOSO, J. E. MANCERA & MÉNDEZ N. 2000. Geoestadística: una herramienta para la modelación en estuarios. *Rev. Acad. Colombiana de Ciencias*. 24(90): 59-72. ISSN 0370-3908.

INVEMAR 2008. Monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales y de los recursos pesqueros durante la rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Instituto de investigaciones Marinas y Costeras INVEMAR. Colombia.

MATEUS, M., MATEUS, S. & BARETTA, J. "Basic Concept of estuarine ecology". In: NEVES, Ramiro, (ed). *Perspectives on integrated coastal zone management in South America*, PRESS, 2008, pp. 3-28.

MORAL GARCÍA F.J. 2004. Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Ecosistemas* Vol 13 (No 1): pag 78-86. ISBN 1697-2473.

ROLDAN G., & RAMIREZ J., 2008. Fundamentos de limnología neotropical. Ed. Universidad de Antioquia. Colombia.