

MODELAGEM GEOESTATÍSTICA A PARTIR DE PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA (IQA-NSF) PARA A SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CASTELO (ES) USANDO SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Geostatistics modeling based on water quality parameters (WQI-NSF) of Castelo River Subwatershed (ES) using Geographic Information System

Rodolfo M. de Castro Junior¹
Frederico G. Sobreira²
Frederico D. Bortoloti¹

¹**Universidade Federal do Espírito Santo**
Centro Tecnológico
Vitória – Espírito Santo – Brasil
rodolfo@npd.ufes.br
freddb@lct.ufes.br

²**Universidade Federal de Ouro Preto**
Departamento de Geologia
Ouro Preto – Minas Gerais - Brasil
sobreira@degeo.ufop.br

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo a criação de modelos Espaço-Temporais a partir da variabilidade dos parâmetros de Índice de Qualidade da Água (IQA) na Sub-bacia Hidrográfica do Rio Castelo (SBHRC) usando de técnicas e ferramentas de Geoestatística do Sistema de Informações Geográficas ArcGIS 9.1. Os parâmetros de IQA foram definidos por (CETESB, 2005) baseados nos padrões Norte Americanos da National Sanitation Foundation (NSF), descritos por (BROWN et al, 1970).

Os valores de IQA no espaço, isto é, ao longo do Rio Castelo, e no tempo, relacionando os meses do ano, foram submetidos aos procedimentos da Geoestatística que, de uma forma genérica, podem ser nomeados de: Estatística descritiva, Análise exploratória, Semivariograma, Krigagem, Validação cruzada.

Esse estudo é parte integrante da caracterização fisiográfica da SBHRC e contribui na elaboração do Diagnóstico e do Zoneamento Geoambiental, na montagem do Plano Diretor de Recursos Hídricos e na conservação e recuperação do meio físico da região de estudo, localizada ao sul do Estado do Espírito Santo, Brasil. Neste artigo serão brevemente apresentados os componentes do meio natural da bacia hidrográfica em questão, tais como: pedologia, geologia, geomorfologia, cobertura vegetal, malha hidrográfica, usos urbano e rural, etc. Serão apresentados ainda, os resultados das análises dos parâmetros IQA/NSF coletados em 13 pontos ao longo do Rio Castelo, no mês de setembro de 2005, os dados referentes a campanhas de campo do Projeto SIHBRI (CASTRO JUNIOR et al, 2000) realizadas nos anos de 2000 e 2001 e os dados de 04 (quatro) estações fluviométricas da (ESCELSA, 2006) com informações de qualidade de água realizados mensalmente desde outubro de 2002. Finalmente, serão apresentados os resultados das análises espaciais e temporais a partir do uso de ferramentas SIG.

O trabalho permitiu gerar um modelo aproximado de valores de IQA para qualquer ponto do Rio Castelo em qualquer época do ano e, através da inserção de novos dados de medição, poderá vir a ser ajustado.

Palavras-chaves: IQA, Diagnóstico Geoambiental, Análise Espacial, Geoestatística, SIG.

ABSTRACT

The present work has as objective the creation of Spatial-Temporal models from the variability of the Water Quality Index (WQI) parameters to the Castelo River Subwatershed (CRSW) using Geostatistics techniques and tools of Geographic Information System ArcGIS 9.1. The WQI parameters were defined by (CETESB, 2005) based on the North American standards from National Sanitation Foundation (NSF), and described by (BROWN et al. 1970).

The WQI values in space, that is, along the Castelo River, and in time, in relation to the months of the year, were submitted to the Geostatistics procedures that, in a generic way, can be named: Descriptive statistics, Exploratory analysis, Semivariogram, Kriging, Cross validation.

This study is integrant part of the physiographic characterization of the CRSW, and it contributes to the elaboration of Diagnosis and Geoenvironmental Zoning, the setting up of Water Resources Director Plan and the conservation and recovering of the environment for the region in study, situated in the South of the State of Espírito Santo, Brazil. In this article, the natural environment components of the watershed under consideration will be briefly presented, such as pedology, geology, geomorphology, vegetation coverage, hydrographic network, urban and rural uses, etc. The results of the analysis of the WQI/NSF parameters collected in 13 points alongside Castelo River in September of 2005, the data referring to field campaigns of SIHBRI Project (CASTRO JUNIOR et al, 2000) executed in the years 2000 and 2001 and the data of 4 fluviometric stations from (ESCELSA, 2006) with information about water quality monthly collected since October of 2002 will also be presented. At last, the results of spatial and temporal analysis using the GIS tools will be presented.

This work allowed generating an approximated model of WQI values to any point over the Castelo River, to any time of the year and, through the insertion of new data readings, it can be adjusted.

Keywords: WQI, Geoenvironmental Diagnosis, Spatial Analysis, Geostatistics, GIS.

1. INTRODUÇÃO

O gerenciamento ou gestão de recursos naturais envolve um conjunto de ações multidisciplinares que visam a compatibilização do uso, o controle e a proteção do meio físico, através de medidas disciplinadoras da ação antrópica, conforme a política nacional para o meio ambiente, buscando atingir o desenvolvimento sustentável.

Dentre os vários princípios básicos para gestão integrada de bacias hidrográficas, apontados por (SILVA & PRUSKI, 2000), estão o conhecimento e o diagnóstico do meio físico, o planejamento ambiental, considerando-se o uso dos solos e o zoneamento ambiental como instrumentos de desenvolvimento social e gestão harmônica do meio ambiente.

O diagnóstico e o conhecimento do meio físico são indissociáveis da coleta e do armazenamento de dados ambientais e sócio-econômicos, que resumem o inventário geoambiental de uma determinada região ou bacia hidrográfica.

Segundo (SILVA, 1993), o zoneamento ambiental, como instrumento de ordenamento territorial, deve ser fruto da análise e tratamento de dados do meio físico e realizado e materializado através de representações cartográficas. Tais considerações conduziram o presente estudo à utilização de técnicas e aplicativos de Sistemas de Informações Geográficas (ArcGis 9.1) como ferramentas indispensáveis e modernas para análises geoambientais de Bacias Hidrográficas.

Neste contexto, os recursos hídricos são um dos componentes do meio físico cuja alteração produz maior impacto no ambiente. Na obtenção de dados

ambientais, o estudo da qualidade da água fornece indicadores interessantes do impacto sofrido pelos recursos hídricos. Com o objetivo de localizar e calcular esse impacto e permitir um gerenciamento preventivo dos recursos hídricos de forma a conter a poluição e ao mesmo tempo otimizar o desenvolvimento ao longo da bacia hidrográfica, é necessário conhecer o comportamento dos diversos parâmetros envolvidos na determinação da qualidade da água ao longo dos mananciais durante as diferentes fases do ano. Existem vários modelos definidos para o comportamento de cada um desses parâmetros que são considerados modelos de simulação, visando tanto fontes pontuais como difusas de poluição. Este trabalho não tem por objetivo definir mais um modelo para simular a qualidade ao novo estabelecimento de fontes pontuais ou difusas para o Rio Castelo. Seu objetivo é estudar a elaboração de um modelo que possa avaliar a qualidade da água pela variabilidade dos parâmetros e do índice de qualidade de água ao longo do rio baseado em cenários passados extraídos de coletas, sem simular cenários futuros a partir de fatores externos como inserção de fontes poluidoras. Para tratamento dos valores desses parâmetros da qualidade, obtidos em leituras e coletas de campo previamente realizadas, de forma a se obter valores para os locais não amostrados, buscou-se, como na tese de (MONTEIRO, 2003) e nos trabalhos de dissertação de (LIMA, 2001), (NASSER, 2001), (LIBOS, 2002) e (SANSONOWSKI, 2003), através do posicionamento geográfico desses valores lidos, métodos de interpolação, adaptando modelos geoestatísticos para distribuir espacialmente as estimativas segundo a variabilidade desses valores da melhor forma possível. A abordagem geoestatística

neste caso baseia-se na Teoria das Variáveis Regionalizadas, onde a probabilidade de ocorrência ou estimativa dos valores dos parâmetros de qualidade torna-se dependente de seu posicionamento geográfico, onde pontos de coleta próximos geograficamente possuem valores de parâmetros semelhantes, conforme os princípios estabelecidos por (MATHERON, 1971) e (BURROUGH, 1987).

2. ÁREA DE ESTUDO

A Sub-Bacia Hidrográfica do Rio Castelo (SBHRC) é parte integrante da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim (BHRI), que por sua vez pertence à Região Hidrográfica Costeira do Sudeste (RHCS), sendo essa última constituída pelas bacias hidrográficas de rios que deságuam no Atlântico – trecho Sudeste. A Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim (BHRI), macro-região onde se situa a sub-bacia objeto do presente estudo, localiza-se no sul do Estado do Espírito Santo, entre os meridianos 40°48'e 41°52' de longitude oeste e entre os paralelos 20°10' e 21°15' sul.

A Figura 1 ilustra a Região Hidrográfica Costeira do Sudeste (RHCS) e destaca a Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim. A Figura 2 apresenta a Sub-Bacia do Rio Castelo, compreendendo os municípios de Castelo, Conceição do Castelo, Venda Nova do Imigrante, Vargem Alta, porção oriental do município de Muniz Freire e parte setentrional do município de Cachoeiro de Itapemirim.

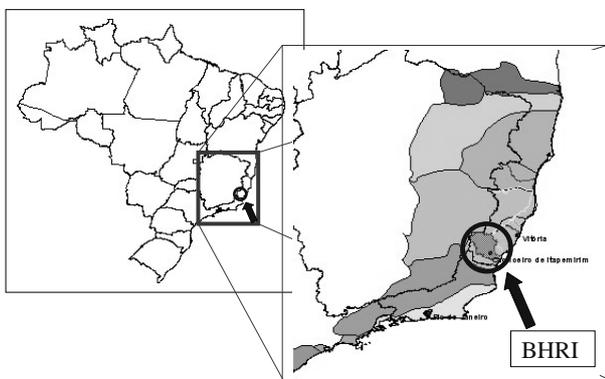


Fig. 1: Região Hidrográfica Costeira do Sudeste destacando-se a Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim (BHRI).

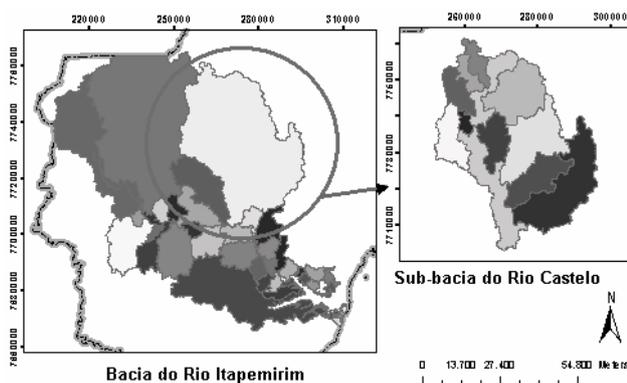


Fig. 2: Sub-bacia Hidrográfica do Rio Castelo (SBHRC).

A SBHRC apresenta problemas ambientais diversos, tais como pequenas áreas erodidas provocadas pelo desmatamento, uso inadequado do solo, assoreamento, focos de desertificação, expansão urbana desordenada, poluição dos recursos hídricos por deposição inadequada de resíduos sólidos e lançamento de efluentes domésticos e provenientes do beneficiamento do mármore e granito, agravados por tratar-se de região de intenso agroturismo.

A SBHRC do Rio Castelo possui uma área de drenagem com cerca de 1.500 Km² de superfície. Tem o Rio Castelo como seu principal curso d'água, concentrando-se às suas margens, grande parte das maiores indústrias de extração de mármore e granito da região. A população da SBHRC representa 15% da população da BHRI e 2,5% da população do Estado do Espírito Santo. A SBHRC responde por cerca de 35% dos investimentos em agroturismo do referido Estado. Detém 40% da produção Cafeeira e conserva em seus limites cerca de 45% de toda a cobertura vegetal da BHRI.

3. CONTEXTO GEOAMBIENTAL DA SBHRC: Aspectos Climáticos, Pedológicos e Hidrológicos

O clima da região compreendida pela Sub-Bacia Hidrográfica do Rio Castelo é tropical, com duas estações distintas: a chuvosa, de novembro a abril, e a seca, entre maio e outubro. A cobertura vegetal natural tem vestígios acentuados de devastação em vários trechos da bacia, embora boa parte da vegetação primária ainda persista nas regiões mais elevadas e nascentes. Estão contidas, total ou parcialmente, dentro da BHRI, cerca de 11 unidades de conservação, dentre elas o Parque Nacional do Caparaó e o Parque Estadual da Cachoeira da Fumaça. O solo segundo (LANI, 1988), predominante é o do tipo latossolo de cores variando do amarelo ao castanho-avermelhado.

A temperatura média anual da SBHRC decresce de 24° C a jusante para 17° C a montante, podendo chegar a 12° C no extremo oeste da bacia. A pluviosidade é baixa na região da foz do Rio Castelo, com 900 mm anuais, enquanto cresce na direção das serras ao norte e a oeste, atingindo 1.600 mm anuais. A época chuvosa é o verão amplo (setembro e abril), sendo dezembro o mês mais chuvoso. A época menos chuvosa é o inverno (julho e agosto), sendo agosto o mês mais seco. O regime fluvial coincide com o pluvial.

Ainda segundo (LANI, 1988), a monocultura da cana de açúcar e posteriormente a do café, seguido pela atividade agropastoril, foram as grandes responsáveis pela exaustão dos recursos florestais que cobriam a região. As modalidades de uso com cultivo de café (28%) e pastagens (48%), totalizam 76% do uso agropastoril do solo.

Existem atualmente, em funcionamento, 3 estações fluviométricas e 5 estações pluviométricas. As

informações coletadas por essas estações são disponibilizadas, em formato Access ou texto, através de um banco de dados denominado HidroWeb, mantido pela Agência Nacional das Águas (ANA, 2005). Estão disponíveis dados referentes aos últimos 70 anos.

A SBHRC possui 11 micro-bacias hierarquizadas segundo a classificação decimal proposta por (STRAHLER, 1952) e nomeadas, extra-oficialmente, neste estudo. A Tabela 1, a seguir, lista as micro-bacias que compõem a SBHRC e suas respectivas áreas de drenagem. As Figuras 3 e 4 ilustram, respectivamente, a distribuição espacial das micro-bacias e a malha hidrológica da SBHRC.

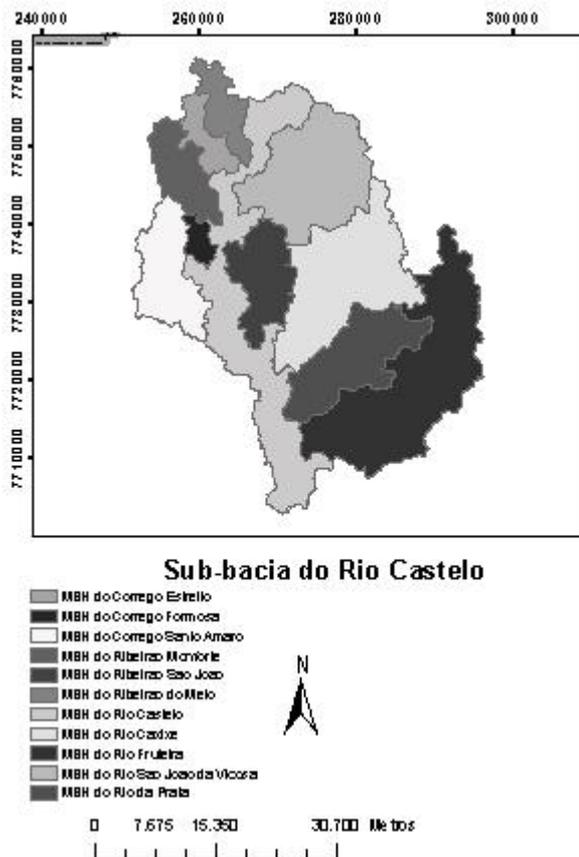
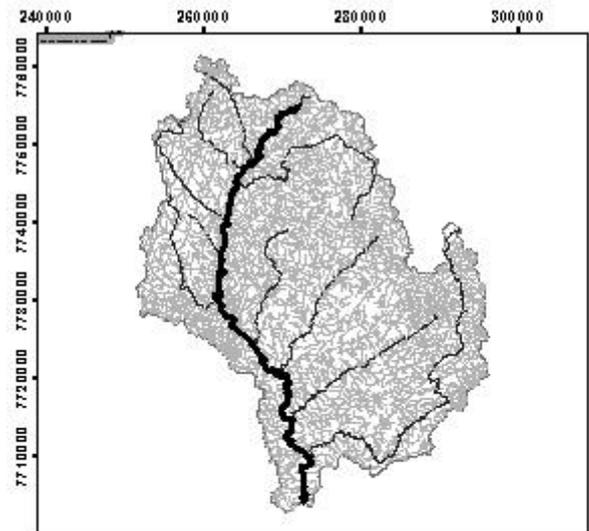


Fig. 3: Micro Bacias da SBHRC



Malha Hidrográfica da Sub-bacia do Rio Castelo

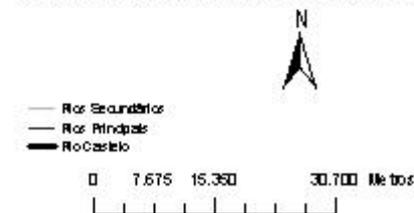


Fig. 4: Malha Hidrográfica da SBHRC

TABELA 1 – MICRO BACIAS DA SBHRC E ÁREAS DE DRENAGEM

Denominação da MBH	Área (Km ²)
MBH do Ribeirão São João	104,64
MBH do Rio São João da Viçosa	150,01
MBH do Córrego Estreito	60,04
MBH do Ribeirão Monforte	67,86
MBH do Córrego Formosa	38,98
MBH do Córrego Santo Amaro	103,79
MBH do Rio Caxixe	223,25
MBH do Rio Castelo	223,13
MBH do Rio Fruteira	298,37
MBH do Rio da Prata	132,58
MBH do Ribeirão do Meio	39,72

4. METODOLOGIAS

4.1 Metodologia de Coleta

O IQA utilizado no presente estudo, segue as determinações da NSF e é utilizado para informar à população em geral sobre qualidade da água e sua tendência de evolução ao longo do tempo. Além disso, o IQA permite uma classificação comparativa dos diferentes cursos d'água de uma bacia hidrográfica e suas contribuições individuais para cada parâmetro observado.

Neste estudo adotou-se uma variação comumente usada para IQA, com valores entre 0 (zero)

e 100 (cem), representando em ordem crescente de valor uma melhor qualidade da água. O IQA deve ser associado ao tipo de uso a que se destinará o corpo d'água em estudo.

A determinação do IQA, segundo o NSF, é obtida pelo produtório ponderado correspondente a 09 parâmetros: Oxigênio Dissolvido (OD), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO5,20), Coliformes Fecais, Temperatura, pH, Nitrogênio Total, Fostato Total, Turbidez e Resíduo Total, conforme Equação 1.

$$IQA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} \quad (1)$$

onde:

IQA - índice de qualidade da água - um número de 0 a 100

q_i - qualidade da i -ésima variável. Um número entre 0 e 100, obtido através do respectivo gráfico de qualidade, em função do resultado da análise

w_i - peso correspondente à i -ésima variável fixado em função de sua importância para a conformação da qualidade, isto é, um número entre 0 e 1, sendo a soma de todos os pesos igual a 1 (ANA, 2005). Os valores de peso utilizados para w_i são mostrados na Tabela 2. A Tabela 3 ilustra os valores referenciais de IQA (NSF), a respectiva descrição do padrão de qualidade e a cor de sua representação temática.

TABELA 2 – VALORES DE w_i PARA O CÁLCULO DE IQA

Parâmetro	Peso - w_i
Coliformes Fecais	0,15
pH	0,12
DBO	0,10
Nitrogênio Total	0,10
Fosfato Total	0,10
Temperatura	0,10
Turbidez	0,08
Resíduo Total	0,08
Oxigênio	0,17

TABELA 3 – VALORES, DESCRIÇÃO E REPRESENTAÇÃO TEMÁTICA DO IQA

IQA	CONCEITO	COR
91 - 100	Ótima	Blue
71 - 90	Boa	Green
51 - 70	Aceitável	Yellow
26 - 50	Ruim	Red
0 - 25	Péssima	Black

As funções polinomiais utilizadas para o cálculo da qualidade para os 09 parâmetros individuais

do IQA foram definidos nos trabalhos de (GASTALDINI & MENDONÇA, 2003).

4.2 Pontos de Amostragem

Os pontos de amostragem foram definidos tomando por base o Rio Castelo em campanhas de campo realizadas pelo Projeto SIHBRI (CASTRO JUNIOR et al, 2000) em 04 pontos no Rio Castelo, coletados no mês de setembro de 2000 e 2001. Completam o conjunto de informações de qualidade da água os dados de 04 (quatro) estações fluviométricas da ESCELSA, com medições mensais de parâmetros de IQA desde outubro de 2002 e uma campanha de campo realizada pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) em setembro de 2005 em 13 diferentes pontos ao longo do Rio Castelo, perfazendo um total de 21 pontos de amostragem. A Figura 5 ilustra a localização dos pontos de amostragem, respectivamente do Projeto SIHBRI, das estações da ESCELSA e da coleta UFES de setembro de 2005. A Tabela 4 apresenta as Coordenadas Plano-retangulares (E, N e Altitude) no sistema projeção UTM dos 21 pontos de coleta.

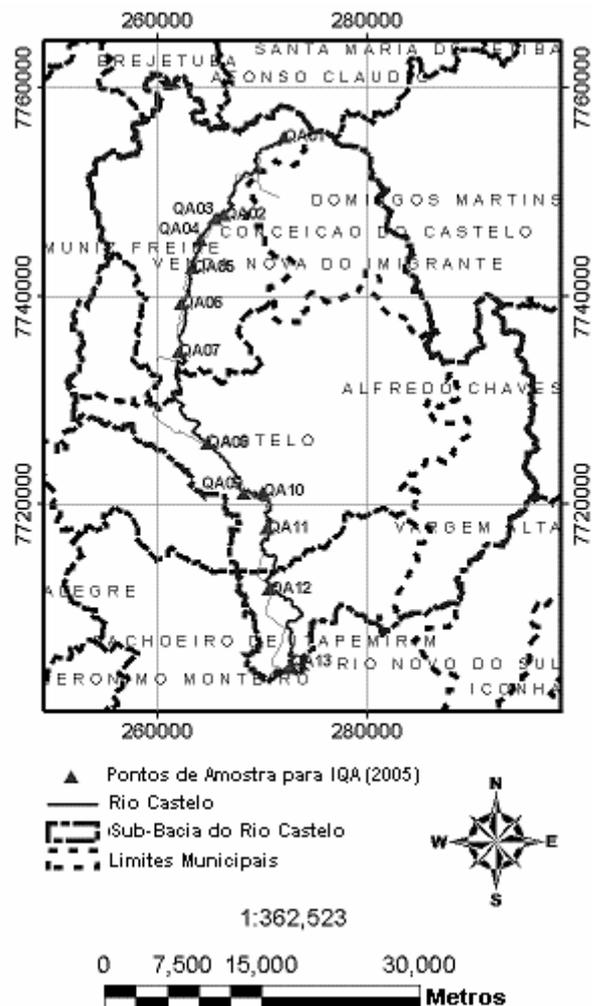


Fig. 5: Distribuição dos Pontos de Coleta ao longo do Rio Castelo

TABELA 4 – COORDENADAS PLANO RETANGULARES DO SISTEMA UTM DOS PONTOS DE COLETA

Ponto	X (m)	Y (m)	Fonte
03	268.146,92	7.751.476,82	SIHBRI
04	264.090,69	7.744.653,58	
07	269.195,96	7.721.096,43	
08	272.695,13	7.704.315,88	
QA01	272.123,13	7.755.327,07	UFES
QA02	266.404,40	7.747.877,80	
QA03	265.590,04	7.747.462,89	
QA04	264.170,48	7.745.468,12	
QA05	263.419,46	7.742.762,14	
QA06	262.353,85	7.739.297,38	
QA07	262.138,36	7.734.700,86	
QA08	264.835,82	7.725.886,53	
QA09	268.281,95	7.721.088,03	
QA10	270.072,47	7.721.252,32	
QA11	270.505,83	7.717.788,59	
QA12	270.734,31	7.711.947,69	
QA13	272.692,84	7.704.327,06	
sjoao01	267.019,28	7.723.503,24	ESCELSA
sjoao02	267.155,25	7.722.249,91	
vicosa01	263.238,67	7.741.860,73	
vicosa02	263.223,44	7.741.703,62	

4.3 Preparação dos Dados Espaciais e Tabulares

Para as análises envolvendo os dados espaciais e tabulares referentes à região de estudo utilizou-se o software ArcGIS 9.1 e suas extensões (Spatial Analyst, 3D-Analyst e Geostatistical Analyst), descritos em (ESRI, 2004) e (ESRI, 2004a), respectivamente. Inicialmente, para os estudos de IQA, foram considerados relevantes os dados espaciais (georeferenciados) referentes à malha hidrográfica, a demarcação das estações pluvio-fluviométricas da região, os dados hipsométricos e os 21 pontos de amostragem de água (Anos 2000 a 2005), com seus respectivos atributos (colhidos e/ou calculados), já ilustrados na Figura 5, anteriormente citada.

4.4 Análises Geoestatísticas

O espaço amostral a partir de uma determinada quantidade de água coletada é definido neste estudo pelas variáveis definidoras da qualidade da água, conforme a NSF, mensuradas no método descrito por (BROWN et al, 1970), bem como as iterações entre as mesmas. Considerando tanto o conjunto das 09 (nove) variáveis que compõem o cálculo de IQA, como também cada uma dessas variáveis individualmente, pode-se, segundo (TOLEDO, 2002) e (HARMANCIOGLU *et al.* 1998) assumir que tais variáveis sejam obtidas a partir de uma distribuição amostral no espaço e no tempo. Sendo assim e levando-se em conta que os modelos de avaliação de qualidade da água, descritos por (GASTALDINI *et al.*, 2002), em sua maioria, consideram distância e tempo, como variáveis básicas, e considerando ainda que os

parâmetros de avaliação de IQA possam ser inferidos por aplicações de estatísticas convencionais, pode-se propor a utilização de métodos de modelagem que agreguem a estatística clássica aos elementos geográficos (espaço-temporais): a Geoestatística. Enquanto a primeira descarta a existência de correlação entre a variação dos parâmetros e a distância entre os pontos de amostragem, a Geoestatística considera a dependência e a sistematização dos dados em função de sua distribuição espacial.

Neste estudo foram aplicadas algumas das ferramentas de geoestatística do módulo Geostatistical Analyst do sistema de informações geográficas ArcGIS 9.1.

De forma genérica pode-se enumerar as etapas para aplicação das técnicas geoestatísticas a um determinado conjunto de dados, com a seguinte seqüência de procedimentos:

- Estatística descritiva
- Análise exploratória
- Semivariograma
- Krigagem
- Validação cruzada

Na etapa chamada de Estatística Descritiva, são determinados os parâmetros estatísticos que descrevem a tendência ou posição central, a dispersão, a assimetria e a curtose da amostra. Nesta etapa são calculados para as amostras os parâmetros clássicos da estatística descritiva, tais como: média aritmética, mediana, moda, desvio-padrão, quartis (inferior e superior), variância, coeficiente de variação, coeficiente de assimetria, coeficiente de curtose e efeito pepita; para brevemente qualificar os valores dos parâmetros. Os cálculos realizados nesta etapa foram obtidos independentemente do SIG ArcGIS 9.1.

Na etapa de Análise Exploratória da variabilidade espacial do conjunto de dados, realizada através do módulo Geostatistical Analyst do ArcGIS faz-se a verificação e a descrição das medidas estatísticas e matemáticas dos dados, visando melhorar a eficiência da etapa inicial e como suporte às hipóteses assumidas, através da identificação de valores discrepantes e da remoção de tendências.

Na obtenção do chamado Semivariograma, segundo (SALVIANO, 1996), busca-se a avaliação do grau de dependência entre amostras experimentais e, através da Krigagem, a definição dos parâmetros necessários para a estimativa de valores para locais não amostrados. O Semivariograma pode ser definido pelas semivariâncias de um conjunto de medidas (amostras) realizadas em campo e que possuem uma determinada distância (d) entre si. Matematicamente, equivale a dizer que se para um ponto P representado por um par de coordenadas (x,y), sendo U(P) o valor obtido para um determinado parâmetro de qualidade de água, para o local P+d o valor U(P+d) para o parâmetro em questão, terá sua variância (S^2) obtida pela soma do quadrado da

diferença de cada valor com a média U, conforme Equação 2 a seguir:

$$S^2 = \left[U(P) - \bar{U} \right]^2 + \left[U(P+d) - \bar{U} \right]^2 \quad (2)$$

Para vários pontos de coleta de amostras, calcula-se o semivariograma médio através da Equação 3, a seguir:

$$\gamma(d) = \frac{1}{2n(d)} \sum_{i=1}^{n(d)} \left[U(P_i) - U(P_i+d) \right]^2 \quad (3)$$

onde:

$\gamma(d)$: Variância em função da distância entre um par de pontos amostrados

$n(d)$: Número de pares de pontos amostrados

$U(P_i)$: Valores e IQA e parâmetros individuais de um determinado ponto amostrado

$U(P_i+d)$: Valores e IQA e parâmetros individuais de um determinado ponto amostrado localizado à distância d de P_i

d: distância entre pontos amostrados ao longo do leito do Rio Castelo.

Em síntese, segundo afirma (ORTIZ, 2002) o semivariograma é o gráfico que expressa a variação da propriedade com a distância entre os pontos de amostragem. Os semivariogramas tratam fenômenos ditos isotrópicos ou anisotrópicos. O primeiro, considerado para o presente estudo, representa fenômenos onde não haja grande variabilidade dos dados nas várias direções em que se encontrem distribuídos os pontos de amostragem. No segundo caso, por tratar-se de um curso d'água (Rio), a área de influência dos pontos amostrados alonga-se de forma elipsoidal num eixo de variância mínima, como um vetor no sentido do comprimento do leito do Rio Castelo.

Os valores de qualidade calculados para os 9 parâmetros e IQA estão listados na Tabela 5.

TABELA 5 – VALORES DE QUALIDADE CALCULADOS PARA OS 9 PARÂMETROS E IQA

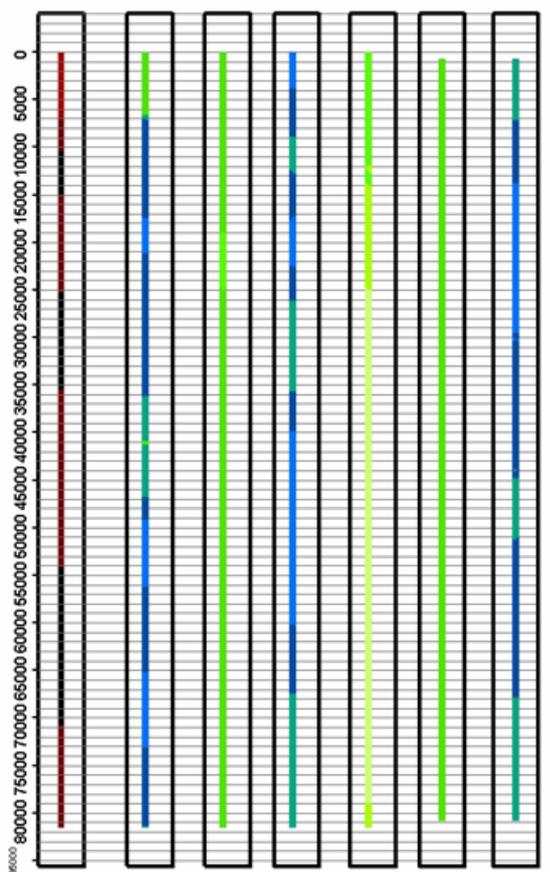
Pto.	Col.	pH	DBO	N	P	Tmp.	Trb.	Sól.	OD	IQA	Class.
Q01	24	83	89	89	100	92	83	87	89	73	Boa
Q02	12	97	92	83	87	80	72	87	99	65	Média
Q03	6	92	79	86	94	92	76	86	94	58	Média
Q04	18	98	92	86	99	89	77	86	98	72	Boa
Q05	14	96	88	78	99	91	66	86	99	68	Média
Q06	7	94	85	83	94	77	69	86	95	59	Média
Q07	6	95	79	83	87	90	70	86	97	58	Média
Q08	14	90	87	85	100	80	67	86	93	66	Média
Q09	12	98	78	85	100	92	71	86	91	65	Média
Q10	7	98	87	85	100	91	67	87	94	61	Média
Q11	4	94	82	84	96	91	71	86	97	56	Média
Q12	7	98	88	84	91	88	64	86	92	60	Média
Q13	18	92	92	84	90	92	73	86	90	69	Média

Para efeito de praticidade de processamento (Krigagem) e representação, o Rio Castelo foi representado como uma coluna em linha reta, classificada em diferentes parâmetros, respeitados seu comprimento original (em escala) e a respectiva distância entre os pontos de coletas envolvidos (Figura 6).

No presente estudo foi estabelecido diferentes modelos de semivariogramas para o IQA e para cada um dos parâmetros que o compõe. A cada parâmetro buscou-se o modelo mais apropriado. Dentre os modelos testados no módulo Geostatistical do ArcGIS 9.1, para cada caso, pode-se citar:

- Modelo Esférico
- Modelo Circular
- Modelo Hole Effect
- Modelo Tetraesférico
- Modelo Pentaesférico
- Modelo Exponencial
- Modelo Rational Quadratic
- Modelo Gaussiano
- Modelo Stable
- Modelo J-Bessel
- Modelo K-Bessel

A etapa chamada de Krigagem fornece estimativas não tendenciosas e com variâncias mínimas para os pontos de coleta de água não amostrados. Nesta etapa o procedimento é semelhante ao de interpolação por média móvel ponderada, porém com pesos determinados a partir de uma análise espacial baseada no semivariograma. Os ponderadores de dados na etapa de Krigagem levam em conta além da distância euclidiana entre as amostras também a variabilidade estatística dos dados (semivariância e covariância) na região de estimação. Os processamentos de krigagem, neste estudo foram realizados utilizando o software ArcGis 9.1.



Parâmetros após tratamento geoestatístico e modelos

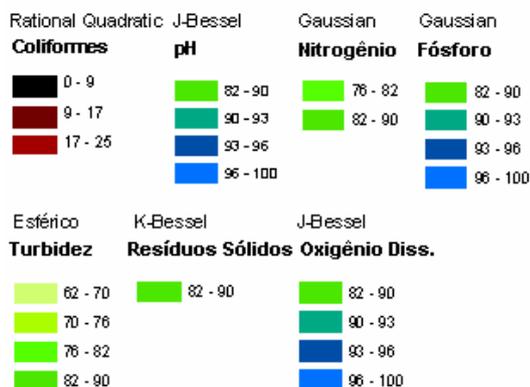


Fig. 6: Classificação dos principais parâmetros do IQA conforme NSF

Na etapa de Validação Cruzada foram realizados os testes para avaliar o grau de incerteza sobre as hipóteses assumidas, os modelos selecionados, os valores dos parâmetros ajustados e a qualidade da krigagem. Segundo (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989), na etapa de Validação Cruzada, cada ponto medido é excluído e seu valor é estimado levando-se em conta os dados restantes. Nessa técnica são estimados os valores de IQA e dos parâmetros individualizados de qualidade da água dos pontos amostrados, sendo em seguida comparados aos novos valores dos dados medidos.

5. RESULTADOS OBTIDOS

Neste estudo foram definidos, para efeito de análise geoestatística dois tipos de modelos comportamentais de IQA a partir dos dados coletados em campo: O Modelo Espacial e o Modelo Temporal. Para os modelos espaciais do IQA e dos parâmetros individuais dos 13 pontos coletados pela UFES em setembro de 2005 foram encontrados, através do processo de krigagem do módulo Geostatistical do ArcGIS 9.1, os modelos geoestatísticos que apresentavam os menores erros médios quadráticos. Após a seleção do melhor modelo comportamental para o IQA e parâmetros individuais, fez-se um refinamento do resultado, variando-se manualmente os coeficientes que compõem as equações dos modelos (efeito pepita, contribuição, parâmetro, maior alcance, etc), buscando encontrar as distâncias de correlação entre os valores das qualidades para cada um dos parâmetros e para o IQA.

Para os modelos temporais do IQA e dos parâmetros individuais foram considerados apenas os dados das 04 (quatro) estações fluviométricas referentes às leituras realizadas nos anos de 2003, 2004 e 2005. Analogamente à modelagem espacial, nesta etapa foram encontrados os modelos que apresentavam os menores erros médios quadráticos após a Krigagem, considerando, para este caso específico, o fator tempo como distância no semivariograma. Não houve refinamento da análise, pois a distância temporal de correlação desejada era padrão ao total de 12 meses.

Assim fora definido a partir dos 13 pontos coletados em setembro de 2005 pela UFES, o Modelo Geoestatístico Espacial (MGE_{SBHRC}) para o comportamento do IQA e respectivos parâmetros (exceto DBO e Temperatura) ao longo de todo o Rio Castelo, da nascente à foz, ilustrados na Figura 7. Uma vez assumida a hipótese de que o MGE_{SBHRC} representava o modelo do comportamento dos índices de qualidade de água do rio em estudo, o modelo fora submetido à validação considerando-se os dados do Projeto SIHBRI e das 04 estações da ESCELSA, localizadas em posições geográficas distintas dos 13 pontos considerados para definição do MGE_{SBHRC}. Para isto, os valores brutos lidos e calculados nos pontos de coleta do Projeto SIHBRI e nas estações fluviométricas da ESCELSA, no mês de setembro dos anos de 2000, 2001, 2003, 2004 e 2005, foram lançados no MGE_{SBHRC}. Com desvio-padrão médio de 2,84 para o IQA fora aceita a hipótese inicial de que o MGE_{SBHRC} tendia à representação da distribuição espacial da qualidade de água do Rio Castelo na maioria dos trechos avaliados (Tabela 6).

Para a formulação da segunda hipótese, foram calculados os denominados Modelos Geoestatísticos Médios Temporais para cada um dos 04 (quatro) pontos de coleta (ESCELSA), considerando-se como variável espacial para a obtenção do semivariograma, não mais a distância entre as estações, mas o espaço de tempo entre as tomadas de leitura (mensais) para os doze meses de

cada ano legal (2003, 2004 e 2005). O $MGMT_{SBHRC}$ fora obtido pelo semivariograma das médias mensais dos meses correspondentes, dos valores de IQA e parâmetros dos anos acima mencionados (Figura 8). Na segunda hipótese formulada esperou-se que a partir dos dados interpolados do MGE_{SBHRC} , para os pontos geográficos específicos dos pontos de coleta da ESCELSA, mês de setembro, viessem a validar os $MGMT_{SBHRC}$ para os anos de 2003, 2004 e 2005. Comparando-se os valores interpolados das respectivas posições geográficas dos 04 pontos de coleta ESCELSA, obtidos no modelo espacial do mês de setembro do ano de 2005, com os valores obtidos para o mesmo mês nos modelos temporais, a partir dos valores médios dos anos 2003, 2004 e 2005, obteve-se os resultados descritos na Tabela 7.

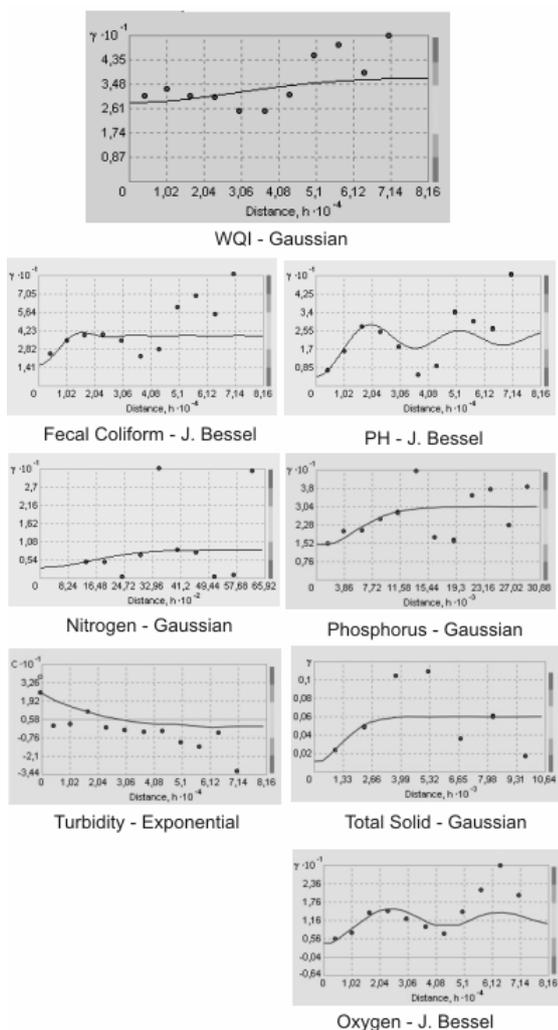
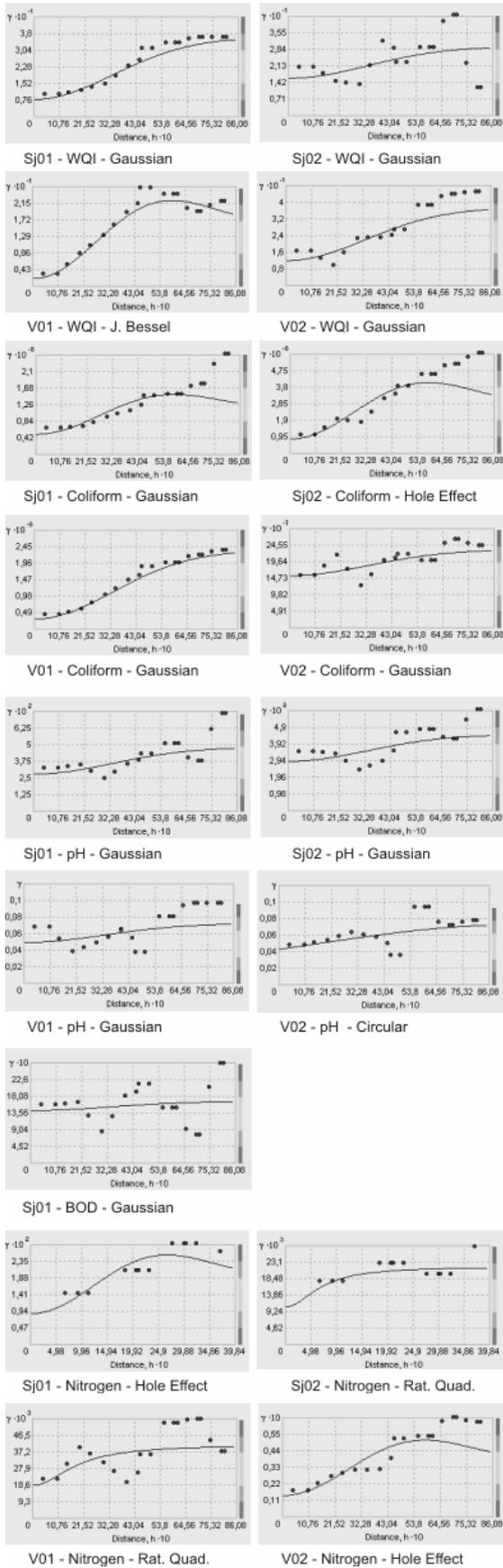


Fig. 7: Modelos Geostatísticos Espaciais da SBHRC (IQA e Parâmetros)

TABELA 6 – VALIDAÇÃO ESPACIAL – ANOS 2000, 2001, 2003, 2004 E 2005

Ponto	Ano	Mês	Fonte	Val. Lido	Val. Modelo	Erro	Valid.
3	2000	Ago	SIHBRI	68,30	66,14	2,16	OK
4	2000	Ago	SIHBRI	78,90	64,94	13,96	Não

7	2000	Ago	SIHBRI	67,30	62,22	5,08	OK
8	2000	Ago	SIHBRI	78,90	63,19	15,71	Não
3	2001	Set	SIHBRI	71,50	66,14	5,36	Não
4	2001	Set	SIHBRI	66,30	64,94	1,36	OK
7	2001	Set	SIHBRI	74,60	62,22	12,38	Não
8	2001	Set	SIHBRI	72,50	63,19	9,31	Não
vicoso01	2003	Set	ESCELSA	62,07	64,53	-2,46	OK
vicoso02	2003	Set	ESCELSA	63,61	64,52	-0,91	OK
sjoao01	2003	Set	ESCELSA	63,22	62,84	0,38	OK
sjoao02	2003	Set	ESCELSA	62,35	62,79	-0,44	OK
vicoso01	2004	Set	ESCELSA	64,27	64,53	-0,26	OK
vicoso02	2004	Set	ESCELSA	68,28	64,52	3,76	OK
sjoao01	2004	Set	ESCELSA	69,75	62,84	6,91	OK
sjoao02	2004	Set	ESCELSA	68,96	62,79	6,17	OK
vicoso01	2005	Set	ESCELSA	61,69	64,53	-2,83	OK
vicoso02	2005	Set	ESCELSA	61,75	64,52	-2,77	OK
sjoao01	2005	Set	ESCELSA	61,14	62,84	-1,7	OK
sjoao02	2005	Set	ESCELSA	48,55	62,79	-14,24	Não
Média				66,70	63,85		OK
DesvPad					2,85		OK



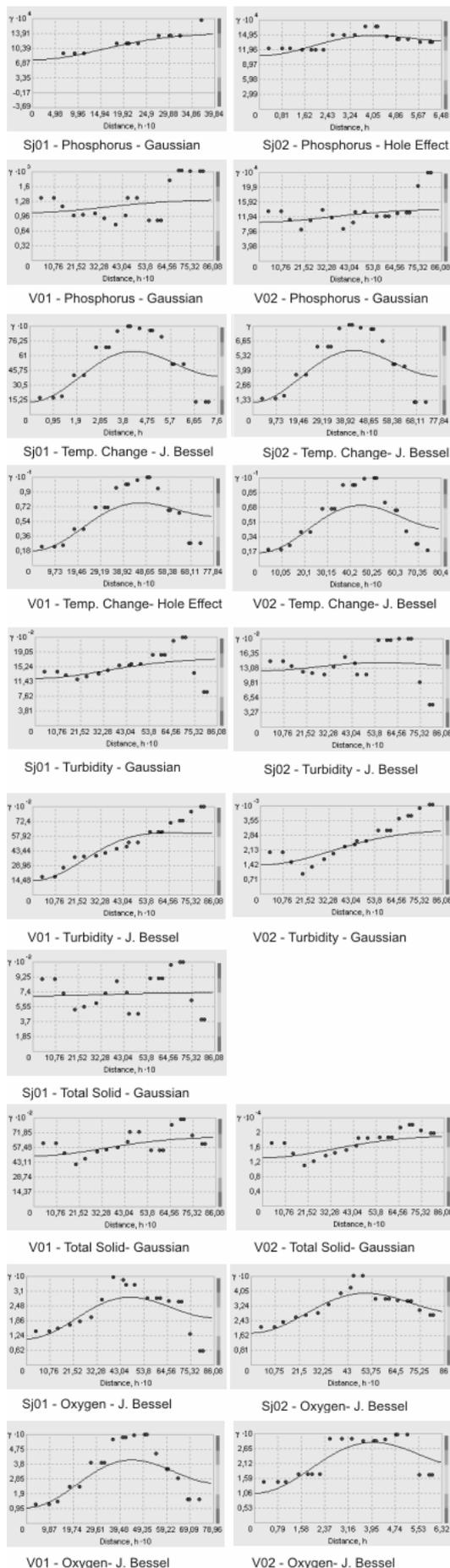


Fig. 8: Modelos Geoestatísticos Médios Temporais – 2003, 2004 e 2005 da SBHRC

TABELA 7 – VALIDAÇÃO TEMPORAL – ANOS 2003, 2004 E 2005

Ponto	Mês	Fonte	Val. Interp.	Val. Modelo	Erro	Validado
vicosa01	Set	ESCELSA	64,53	62,85	1,68	OK
vicosa02	Set	ESCELSA	64,52	63,97	0,55	OK
sjoao01	Set	ESCELSA	62,84	62,84	0	OK
sjoao02	Set	ESCELSA	62,79	60,98	1,81	OK
Média			63,67	62,66		OK
DesvPad				1,01		OK

A validação dos modelos para avaliação dos 09 (nove) parâmetros individualizados do IQA, será realizada em estudos vindouros. Campanhas de coleta a serem realizadas ao longo do ano de 2006 poderão ajustar os modelos propostos no presente estudo, e torná-los em simuladores confiáveis do comportamento do índice de qualidade das águas do Rio Castelo.

6. CONCLUSÕES

A contribuição dos centros urbanos banhados pelo Rio Castelo, as atividades agropastoris às suas margens, da nascente à foz e o grande número de atividades de extração e beneficiamento de granito e mármore ao longo de seu curso ou de seus afluentes, são os fatores preponderantes nos resultados da qualidade das águas do referido rio. A modelagem espacial de parâmetros tais como Temperatura e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), não encontrou resultado satisfatório para a correlação destes com a distância entre os pontos de coleta. Uma das possíveis causas seria a tomada não simultânea dos parâmetros citados ou o fato de eles não terem qualquer correlação espacial.

Os 13 pontos de coleta de setembro de 2005 (UFES) foram visitados em um único dia, da nascente à foz do Rio Castelo por uma única equipe. A tomada dos dados relativos à temperatura, principalmente, sofreu alterações conforme a variação da temperatura ambiente ao longo do dia. As maiores discrepâncias observadas na validação espacial do modelo proposto para o IQA foram referentes principalmente à Turbidez, nos pontos de coleta dos anos de 2000 e 2001 do SIHBRI e nas estações Sjoao01 e Sjoao02 dos anos de 2004 e 2005 da ESCELSA.

Outras variações na medida de Sólidos Totais, Coliformes e pH, em alguns poucos pontos, não chegaram a comprometer a modelagem espacial, considerando que grande parte dos parâmetros, na grande maioria dos pontos de coleta, manteve a correlação procurada.

Neste estudo buscou-se encontrar, a partir de um maior número de pontos de coleta, distribuídos espacialmente ao longo de todo o rio, a melhor

representação comportamental do Índice de Qualidade de Água, em uma determinada época do ano. A comparação destes resultados comportamentais com períodos análogos de tempo, de diferentes pontos de coleta ao longo do rio, permitiu definir a correlação espaço-temporal no que diz respeito aos valores indicativos de qualidade das águas do Rio Castelo e, através da modelagem geoestatística, encontrar as prováveis variações de IQA em qualquer ponto do rio em qualquer época do ano. Os modelos espaciais elaborados no presente estudo aplicam-se à estação seca. Novos modelos poderão ser desenvolvidos para o período chuvoso aplicando-se a mesma metodologia adotada neste trabalho, através dos dados de novas campanhas executadas nas estações chuvosas. Além dos ajustes aos modelos Espaciais e Temporais propostos neste estudo através da inserção de dados futuros lidos pelas estações fluviométricas ou por novas campanhas, poderão ser realizadas aplicações de técnicas de Ajustamento de Observações através de métodos paramétricos ou mínimos quadrados (MMQ) aos dados obtidos direta e indiretamente das estações e dos modelos simulados.

Este estudo também permitirá o apontamento das prováveis variações físico, químicas e biológicas causadas ao IQA por cada um dos parâmetros envolvidos na obtenção do mesmo, permitindo assim associar as flutuações no MGE_{SBHRC} à sazonalidade das chuvas, dos períodos agrícolas de adubação e lançamento de defensivos agrícolas, nas intensificações da extração mineral e nas épocas de maior atividade agroturística.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA – Agência Nacional das Águas – (2005). Acesso em: 02 de março de 2005. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb/>
- BROWN, P.M.; MCCLELLAND, N.I.; DENINGER, R.A.; TOZER, R.G. **A water quality index - do we dare?** Water & Sewage World, 1970. pp. 339-343.
- BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment.** Oxford, Clarendon Press, 1987. 193p.
- CASTRO JUNIOR, R.M.C.; Temoteo, J.P.S., Bortoloti, F.D.; Carneiro, E.F.; Alves, M.H. **Sistema de Informações Hidrológicas da Bacia do Rio Itapemirim utilizando ArcView**, VII Conferência Latino-America de Usuários ESRI-ERDAS, Costa Rica, Setembro. Anais...CD ROM. 2000. 8 pp.
- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Secretaria de Estado do Meio Ambiente.** Acessado em 16 de agosto de 2005. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/>
- ESCELSA – Energias do Brasil. **Manutenção e Operação de Estação Fluviométrica e Pluviométrica e Monitoramento da Qualidade da Água.** Relatórios Semestrais: Análises de Resultados por Período. Cedido por: Grupo de Estudos e Ações em Recursos Hídricos GEARH/UFES/FEST. 2006.
- ESRI (2004). **Using ArcMap.** Redlands, CA – USA: ESRI Press, 2004. 598 pp.
- ESRI (2004a). **Using ArcGis. Geostatistical Analyst.** Redlands, CA – USA: ESRI Press, 2004. 300 pp.
- GASTALDINI, M.C.C.; SEFFRIN, G.F.F.; PAZ, M.F. **Diagnóstico atual e previsão futura da qualidade das águas do Rio Ibicuí utilizando o modelo Qual2e.** Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, Vol. 7 - Nº 3 - jul/set 2002 e Nº 4 - out/dez, pp. 129-138.
- GASTALDINI, M.C.C.; MENDONÇA, A.S.F. **Conceitos para a Avaliação da Qualidade da Água.** In: PAIVA, J.B.D. **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas.** Porto Alegre: ABRH, 2003. pp. 429 a 490.
- HARMANCIOGLU, N.B.; OZKUL, S.A.; ALPLASN, M.N. **Water monitoring and network design.** The Hague: Kluwer Academic Publishers. 1998 pp..61-100.
- ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics.** Oxford University Press, New York. 1989. 561 pp.
- LANI, J.L. **Deltas dos rios Doce e Itapemirim: solos, com ênfase nos tiomórficos, água e impactos ambientais do uso.** Universidade Federal de Viçosa. Tese de Doutorado. 1988. 169 pp.
- LIBOS, M. I. P. C. **Modelagem da Poluição Não Pontual na Bacia do Rio Cuiabá Baseada em Geoprocessamento.** 2002. 269 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, 2002.
- LIMA, E.B.N.R. **Modelagem integrada para gestão da qualidade da água na Bacia do Rio Cuiabá.** 2001. 184 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2001.
- MATHERON, G. **The theory of regionalized variables and its applications.** Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, Paris, 1971. 211p.
- MMA – Ministério do Meio Ambiente – **Conselho Nacional do Meio Ambiente.** 2005. Disponível em: http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res3570_5.pdf. Acesso em: 28 de abril de 2005.

NASSER, V. L. , **Sensoriamento remoto e geoestatística aplicados ao estudo de qualidade de água da baía deGuanabara**. 2001. 167 f. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, 2001.

ORTIZ, G.C. **Aplicação de métodos geoestatísticos para identificar a magnitude e a estrutura da variabilidade espacial de variáveis físicas do solo**. Piracicaba. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. 2002. 75 pp.

SALVIANO, A.A.C. **Variabilidade de atributos de solo e de Crotalaria juncea em solo degradado do município de Piracicaba-SP**. Piracicaba. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. 1996. 91 pp.

SANSONOWSKI, R.C. **A Modelagem numérica como instrumento de apoio à avaliação ambiental**. 2003. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Petróleo) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2003.

SILVA, J.N. **Programa Levantamentos Geológicos do Brasil. Cachoeiro de Itapemirim**. Folha SF-24-V-A-V. Estado do Espírito Santo. Escala 1:100.000. Org. por Jodauro Nery da Silva. Brasília, DNPM/CPRM. 1993. 165 pp.

STRAHLER, A.N. **Hypsometric analysis of erosional topography**. Geol. Soc. America Bulletin, 63.1952. pp. 1117-1142.

SILVA, D.D.; PRUSKI, F.F. **Gestão de Recursos Hídricos: Aspectos Legais, econômicos, administrativos e sociais**. Brasília – DF: Secretaria de Recursos Hídricos. Viçosa-MG: Universidade Federal de Viçosa. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 2000. 659 pp.:il.

TOLEDO, L.G.; NICOLELLA, G. **Water quality index for agricultural and urban watershed use**. Sci. agric. (Piracicaba, Braz.), Jan./Mar, vol.59, no.1, ISSN 0103-9016. 2002. pp.181-186.