

MODELAÇÃO DO RUÍDO AMBIENTE NO CAMPUS DA ESTG. COMPARAÇÃO ENTRE A UTILIZAÇÃO DE UMA TÉCNICA GEOESTATÍSTICA (KRIGING) E SOFTWARE DE PREVISÃO ACÚSTICA.

Judite Ventura

*Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria, Alto Vieiro, 2401-951 Leiria, Portugal
jventura@estg.ipleiria.pt*

Resumo

Este trabalho teve como principais objectivos a modelação do Ruído Ambiente Exterior no *Campus* da ESTG. Para tal recorreu-se à técnica geoestatística (kriging) através do software ArcGis 9.2 e ao software de previsão acústica (CadnaA). No final efectuou-se uma comparação entre os dois métodos. Existem várias técnicas para efectuar uma estimação “local”, das quais se testaram a Média Aritmética, o Método do Inverso da Distância e o Kriging. Verificou-se que, de entre as três técnicas estudadas, o Kriging é a mais precisa. Esta técnica apresenta um erro associado ao cálculo do estimador menor do que o dos restantes métodos estudados.

Os valores obtidos foram de encontro ao esperado, uma vez que a técnica de Kriging tem em conta, para além dos valores medidos e das distâncias entre os vários pontos, a localização dos mesmos. Os erros calculados para as diferentes técnicas encontram-se no quadro abaixo:

Valores do estimador para LAeq, variância e desvio padrão.

	Média Aritmética	MID	Kriging
T* dB(A)	53,83	54,51	53,69
σ^2 dB(A) ²	12,35	9,02	7,87
σ dB(A)	3,51	3,00	2,80

Para efectuar a comparação proposta nos objectivos, foi necessário recorrer ao software de previsão acústica (CadnaA) e à técnica de interpolação estatística – Kriging (ArcGis 9.2), a fim de elaborar dois Mapas de Ruído. Tal como era esperado, o CadnaA revelou-se mais rigoroso do que o kriging, uma vez que para elaborar o Mapa de Ruído, utiliza a caracterização das fontes (tráfego e ruído industrial) e considera a existência de obstáculos

(edifícios, barreiras e curvas de nível), utilizando as medições apenas para calibrar o modelo. O Kriging, por sua vez, utiliza os valores das medições para interpolar e assim calcular o Mapa de Ruído. Sendo o kriging uma técnica que utiliza apenas os pontos medidos para o cálculo do Mapa de Ruído, concluiu-se que para aproximar o rigor do kriging ao CadnaA seria necessário ter um maior número de pontos medidos. Apesar das limitações apresentadas por esta técnica, analisando o ponto de controlo A, verificou-se uma diferença de apenas 0,4 dBA.

Palavras-chave: mapa de ruído, geoestatística, kriging, semivariograma, cadnaA.

Abstract

The major objectives of this work were the modeling of the environmental noise at the ESTG's campus using two softwares based on two different techniques and results comparison. The two softwares employed were ArcGis 9.2 to support the geostatistical technique kriging and CadnaA. For a local estimation there are several techniques, some of them were studied such as the Arithmetic mean, Inverse Distance Weighting and kriging. Kriging demonstrates more accuracy and presents the lower standard deviation in comparison with the others methods. The obtained values were close to what was expected; this is because kriging automatically takes into account the relationship amongst the samples and not only their values. The standard deviations for the studied techniques are present in the table below:

Estimator values, σ^2 and σ for the studied statistical techniques

	Arithmetic Mean	IDW	Kriging
T* dB(A)	53,83	54,51	53,69
σ^2 dB(A) ²	12,35	9,02	7,87
σ dB(A)	3,51	3,00	2,80

Two noise maps were elaborated. One with CadnaA and the other with the kriging interpolation technique supported by ArcGis 9.2. As expected, CadnaA demonstrates more accuracy because it uses sources (roads) and considers the existence of obstacles (buildings, barriers and contour lines), using measured points to calibrate the model. On the other hand, kriging uses the measured point's values to interpolate and calculate the noise map.

Taking into consideration that the kriging technique employs the measured points to calculate the noise map, it was recognised that to increase the accuracy of the kriging a higher number of measured points would be needed. In spite of this limitations, when capered the calculated values in the control point A, it was verified only a 0,4 dB(A) difference.

Keywords: noise map, geostatistic, kriging, semivariogram, cadnaA.

1 Introdução

Verifica-se em muitos trabalhos de engenharia a necessidade de conhecer o valor da variável em análise em toda a zona de estudo [1] e [2]. O valor real da variável estudada é conhecido nos pontos onde se efectuam amostragens, como por exemplo valores de precipitação e temperatura recolhidos em estações meteorológicas. Ainda que se efectuem um número elevado de amostragens ficam ainda muitos lugares (pontos) onde estas não foram realizadas e por conseguinte se desconhece o valor da variável [3]. A Geoestatística permite a partir dos dados observados estimar valores para a propriedade em estudo em locais não amostrados [4].

Para interpolar, várias técnicas podem ser utilizadas tais como média, inverso da distância, inverso do quadrado da distância, e outras. Uma outra técnica denominada por kriging, em homenagem aos trabalhos de Krige D (1951), encontra-se categorizada na teoria das variáveis regionalizadas por Matheron (1965) e tem sido muito utilizada para interpolar propriedades no solo [1], [5] e [6].

O procedimento de kriging assenta em dois passos: (1) calcular o semivariograma e ajustá-lo a um modelo (esférico, exponencial, gaussiano, etc); (2) utilizar o modelo para estimar os valores nos locais não amostrados [7].

A equação para o cálculo do semivariograma é:

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

Em que $\gamma(h)$ é o valor do semivariograma, $Z(x_i)$ é o valor da variável medida no local x_i , e $N(h)$ número de pares de dados separados por uma distância h .

O estimador linear geoestatístico $[Z(x_0)]^* = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i)$, denominado kriging normal, é uma combinação linear do conjunto de N variáveis vizinhas de $x_0 - Z(x_i)$, $i=1, \dots, N$ que cumpre os dois critérios em relação ao erro de estimação $\varepsilon(x_0) = [Z(x_0)]^* - Z(x_0)$: não enviesamento $E\{[Z(x_0)]^* - Z(x_0)\} = 0$: e variância mínima $Var\{[Z(x_0)]^* - Z(x_0)\} = \min$ [5] e [8].

No presente trabalho a variável que se pretende interpolar é o nível de ruído cujo indicador utilizado foi o nível de pressão sonora.

O ruído constitui um dos maiores factores de insatisfação com o ambiente em áreas residenciais. Este facto levou ao desenvolvimento de Directivas, Leis e Normas para a monitorização e controlo do ruído ambiental. Para quantificar e visualizar a distribuição espacial do ruído e estudar o seu impacto podem ser utilizados modelos de previsão acústica e sistemas de informação geográfica (SIG) [9].

Em Portugal, o Regulamento Geral de Ruído (RGR) apresenta no artigo 7º que a elaboração dos Mapas de Ruído devem ter em conta informação acústica adequada, nomeadamente a obtida por técnicas de modelação apropriadas ou por recolha de dados acústicos realizada de acordo com técnicas de medição normalizadas [10]. A Directiva 2002/49/CE considera ainda os Mapas de Ruído como formas privilegiadas de diagnóstico para avaliação da incomodidade das populações ao ruído [11].

2 A área de estudo

A área de estudo do presente trabalho foi o *Campus 2* (ESTG) do Instituto Politécnico de Leiria. A ESTG é constituída por nove edifícios e várias vias de comunicação de acesso aos edifícios e parques de estacionamento (Figura 1). É uma zona cujo tráfego não é muito intenso mas cujos níveis de ruído são significativamente influenciados pelo tráfego que circula no IC2, uma das principais vias de tráfego do País.

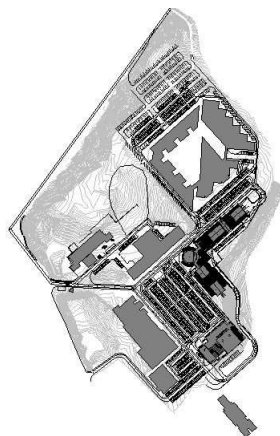


Figura 1 – Cartografia do *campus 2* (IPL)

3 Metodologia

3.1 Software de Previsão Acústica - CadnaA

A metodologia seguida na elaboração do Mapa está de acordo com a respectiva legislação, normas e directrizes referidas no documento técnico da autoria da DGA/DGOTDU, intitulado “Elaboração de Mapas de Ruído – Princípios Orientadores”[12]. A cartografia de ruído foi efectuada com base nos resultados de modelos de previsão de níveis de ruído. Para esse fim, recorreu-se ao programa computacional *CadnaA* (*Datakustik GmbH*, Alemanha) de modelação da emissão e propagação sonora. Sendo a modelação matemática, apoiada pelos actuais meios computacionais, uma ferramenta fundamental para a previsão de níveis de pressão sonora, não é menos importante e torna-se complementar, ou mesmo necessária, a aferição/validação dos seus resultados através de medições acústicas *in situ*. Assim, foram efectuadas campanhas de medições acústicas segundo procedimentos normalizados, quer com esse objectivo de aferição/validação do modelo, quer para a caracterização da emissão de fontes sonoras. As fontes sonoras consideradas foram o tráfego rodoviário e o ruído industrial (ventilador).

3.1.1 Indicador de ruído

Segundo o RGR [10], o indicador de ruído ambiente exterior a utilizar na elaboração de Mapas de Ruído é o nível sonoro médio de longa duração L_{Aeq} , expresso em dB(A). Este indicador é considerado para cada um dos períodos de referência, ou seja, período diurno (07H00-20H00), entardecer (20H00-23H00), e período nocturno (23H00-7H00). Apesar do RGR e a Directiva [11] referirem que se devem efectuar Mapas de Ruído para os três períodos, neste trabalho apenas se realizaram as medições para o período diurno, visto o objectivo do presente trabalho ser, para além da modelação do ruído ambiente, a comparação de vários métodos de elaboração de Mapas.

3.1.2 Dados de base – tratamento cartográfico

A cartografia de base engloba as curvas de nível, a localização dos edifícios e estradas bem como a zona envolvente da ESTG. Para o tratamento da cartografia, foi necessária a caracterização física dos dados de entrada necessários ao modelo. Atribuiu-se volume a barreiras à propagação de ruído nomeadamente a edifícios e ao parque automóvel (Figura 2), e efectuou-se conformação do MDT (modelo digital de terreno) às estradas e/ou ajuste das estradas ao MDT, conforme o caso.



Figura 2 – Altimetria e volumetria do *campus 2*

3.1.3 Fontes de ruído

Tráfego rodoviário: na determinação da média horária do tráfego rodoviário procedeu-se a uma contagem directa dos veículos para cada uma das vias de tráfego, quer no interior da zona em estudo quer na proximidade.

Ruído industrial: no decorrer das medições no parque de estacionamento central foi notória a influência de um ventilador situado ao lado de um dos edifícios do *campus 2*. Como este se encontrava accionado durante o tempo em que foram realizadas medições foi também necessário incluí-lo como fonte de ruído. O valor para a potência acústica do ventilador foi estimado a partir de uma ferramenta do CadnaA -“Optimasable Area Source”.Obteve-se o valor de 94,2 dB(A) em termos de potência acústica.

3.1.4 Medições de níveis de pressão sonora

No presente trabalho efectuarem-se medições de SPL em 30 locais da área de estudo (Figura 3).

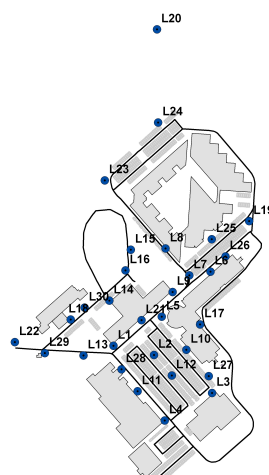


Figura 3 – Localização dos pontos da amostragem.

Na Tabela 1 encontram-se os valores dos níveis de pressão sonora medidos em cada local. As medições foram efectuadas de acordo com o descrito na NP 1730 [13] utilizando um sonómetro integrador 2260 da Brüel&Kjær.

Tabela 1 – Valores de SPL medidos.

Pontos	SPL (dBA)	Pontos	SPL (dBA)
L1	63,2	L16	58,6
L2	52,8	L17	49,2
L3	57,3	L18	65,3
L4	59,7	L19	60,0
L5	60,7	L20	77,9
L6	55,8	L21	63,9
L7	58,6	L22	72,1
L8	52,3	L23	58,9
L9	61,5	L24	57,6
L10	51,7	L25	47,8
L11	60,3	L26	57,9
L12	52,0	L27	55,4
L13	67,1	L28	62,5
L14	52,1	L29	65,3
L15	59,8	L30	61,3

3.1.5 Cálculo do Mapa de Ruído (CadnaA)

Para o cálculo do Mapa de Ruído utilizou-se o *software* de Previsão Acústica CadnaA, desenvolvido pela empresa Alemã *Datakustik GmbH*.

Para a modelação matemática dos fenómenos de propagação das ondas de pressão sonora e caracterização das fontes de ruído foram utilizadas bases de dados e algoritmos *standard* normalizados, conforme recomendado pela Directiva, ou seja, para o ruído de tráfego rodoviário, o método de cálculo francês «*NMPB-Routes-96*» que consta da Norma Francesa «*XPS 31-133 – Acoustique. Bruit des infrastructures de transport terrestres*»; para o ruído industrial, a Norma ISO 9613-2: «*Acoustics – Attenuation of sound propagation outdoors. Part 2: General method of calculation*» [14] e [15].

Os pontos de cálculo (x_i, y_i) localizam-se numa malha (x_i, y_i, z) , onde z representa a altura do ponto de cálculo. O factor de atenuação depende fortemente da altura, já que o percurso de propagação é calculado num espaço tri-dimensional.

Tendo em conta o compromisso entre o rigor e tempo de cálculo foi considerada uma malha de cálculo de 5 m x 5 m como sendo a solução optimizada, com um grau de reflexão de 1ª ordem, um raio máximo de busca de 2000 m e um coeficiente de absorção sonora pelo solo de 0,5.

O RGR recomenda que os Mapas de Ruído sejam calculados a uma altura de 4,0 m, no entanto neste trabalho como um dos objectivos é a comparação entre o cálculo efectuado pelo CadnaA e pela técnica de kriging, e sendo esta última calculada a partir dos valores medidos, o cálculo foi efectuado a uma altura de 1,5 m a mesma a que as medições de ruído ambiente foram efectuadas. O valor do índice indicador de ruído ambiente em cada ponto do domínio de cálculo (receptor) resulta da contribuição das diferentes fontes sonoras localizadas ou que exercem influência na área em estudo e da atenuação do nível da pressão sonora devido à propagação. A atenuação é devida a diversos fenómenos físicos, nomeadamente ao efeito da divergência geométrica, à absorção e reflexão no solo, à absorção

atmosférica, ao efeito da difracção em barreiras ou outras estruturas, aos efeitos de reflexão e ainda aos efeitos meteorológicos.

3.1.6 Aferição/Validação dos Mapas

Dado que os valores obtidos no cálculo dos Mapas de Ruído são, entre outros, função dos dados de entrada, foi necessário recorrer à sua aferição/validação.

Esta aferição/validação foi baseada na comparação dos valores do indicador L_{AeqT} obtidos pelo cálculo com os valores obtidos pelas medições *in situ* em pontos coincidentes. Após a primeira simulação e nos casos em que se verificou uma diferença superior a ± 2 dB(A) procedeu-se, iterativamente, à alteração do valor da fonte, essencialmente através da alteração do valor da velocidade média dos respectivos veículos, até que esta diferença se situasse dentro do intervalo referido. O Mapa de Ruído obtido está representado na Figura 4.

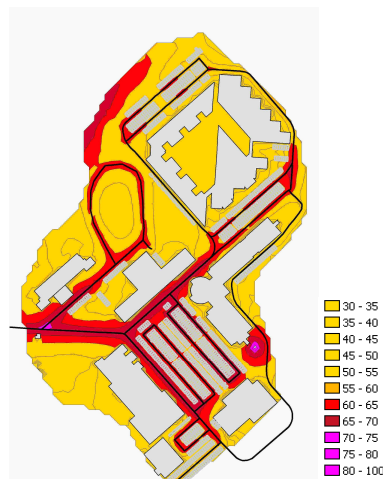


Figura 4 – Mapa de Ruído – CadnaA.

3.2 Técnicas Estatísticas – Kriging

3.2.1 Estimativas para o Indicador

Existem várias técnicas para efectuar uma estimacção “local”, das quais se testaram as seguintes:

- Média Aritmética;
- Método do Inverso da Distância;
- Kriging.

Como se pretende estimar o valor de L_{Aeq} numa área e não apenas num ponto (para poder calcular o Mapa de Ruído), dividiu-se a área em estudo em pequenos blocos, isto é, definiu-se uma malha de cálculo [5], [7] e [15]. Atribuiu-se a letra **T** ao valor de L_{Aeq} , e **A** ao bloco em estudo. Deste modo, definiu-se um bloco com 30 m x 30 m, como mostra a Figura 5.

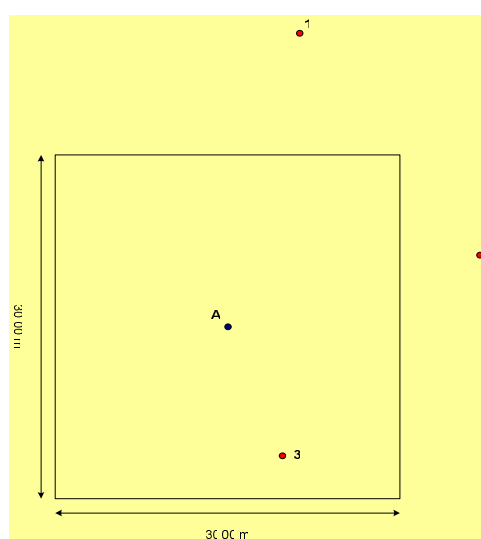


Figura 5 – Bloco de 30 m x 30 m com as amostras seleccionadas.

Neste exemplo existe um conjunto de três amostras, 1, 2 e 3 que correspondem na planta a L6, L25 e L26 respectivamente (Figura 3). De forma a proceder à estimação é necessário conhecer os valores medidos e as distâncias entres os pontos 1, 2, 3 e A. Procedeu-se também ao cálculo do erro associado a cada técnica. A Tabela 2 mostra os valores obtidos no cálculo do estimador para cada técnica e respectivo erro. Estes cálculos foram efectuados no *MS Excel*.

Tabela 2 – Valores do estimador para LAeq, variância e desvio padrão.

	Média Aritmética	MID	Kriging
T^* dB(A)	53,83	54,51	53,69
σ^2 dB(A) ²	12,35	9,02	7,87
σ dB(A)	3,51	3,00	2,80

Com se pode verificar através da Tabela 2, a média aritmética é a técnica menos rigorosa pois tem em conta apenas os valores medidos atribuído pesos iguais a todas as amostras e é a que apresenta o erro maior. O método do inverso da distância é mais rigoroso que a média aritmética, pois esta técnica tem em conta, para além dos valores medidos, as distâncias entre os locais de medição, atribuindo pesos maiores às amostras mais próximas e pesos inferiores às amostras mais afastadas. O erro associado ao cálculo do estimador T^* por este método é inferior ao erro associado ao da média aritmética. Por último, o erro associado ao cálculo do estimador T^* , através do kriging, é o menor de todos, sendo portanto esta técnica, entre as estudadas, a mais precisa para efectuar uma estimação local, uma vez que tem em conta, para além dos valores medidos e das distâncias entre os vários pontos, a localização dos mesmos.

3.3 Cálculo do Mapa de Ruído (Kriging – ArcGis 9.2)

Foi utilizada a técnica geoestatística kriging para o cálculo do Mapa de Ruído visto ser a técnica que apresentou menor erro neste estudo. Para calcular o Mapa de Ruído utilizou-se o software ArcGis 9.2 (ESRI). Para o cálculo definiu-se o método (kriging normal), malha de cálculo (5 por 5), número de pontos (30) e o modelo esférico para o semivariograma. O modelo do semivariograma obtido, também

por *software*, apresenta as seguintes características: amplitude (90 m), patamar (50 dBA) e efeito pepita (20 dBA).

O resultado do cálculo do Mapa de Ruído está apresentado na Figura 6.

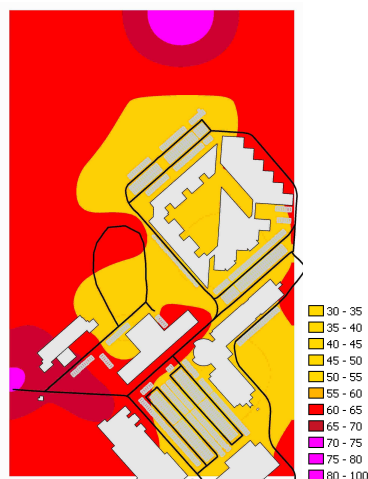


Figura 6 – Mapa de Ruído – Kriging.

3.4 Comparação CadnaA vs Kriging

Neste artigo apresenta-se uma comparação efectuada para o bloco A, o mesmo já utilizado nos cálculos do estimador T efectuados no *MS Excel*.



Figura 7 – CadnaA.

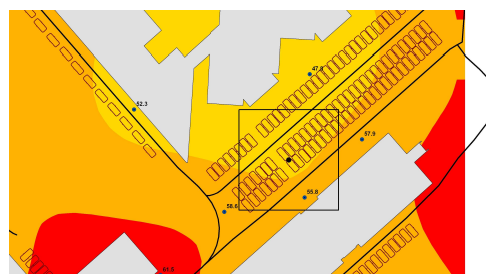


Figura 8 – Kriging.

Apesar dos Mapas diferirem apresentam alguma consistência entre si nomeadamente os valores de ruído serem mais elevados junto às fontes (estradas) e mais baixos junto aos edifícios.

Os valores obtidos para o ponto central do bloco A através do CadnaA e do Kriging foram de 53,8 dB(A) e 54,2 dB(A), respectivamente, verificando-se uma diferença de apenas 0,4 dB(A).

4 Conclusões

Os Mapas de Ruído constituem um elemento importante para a incorporação da poluição sonora na tomada de decisões e nos processos de planeamento. Nos mapas é possível identificar as principais fontes de ruído, as áreas prioritárias para a redução de níveis de ruído, visualizar e quantificar as áreas de influência acústica das principais fontes sonoras existentes. Este caso de estudo ilustra a elaboração de Mapas de Ruído utilizando dois métodos diferentes. Aplicou-se a técnica de kriging, amplamente

utilizada noutras áreas [1] e [17], para interpolar os dados de ruído. A análise de dados e a determinação de um “bom” variograma é indispensável. Comparativamente com o *software* de previsão acústica CadnaA, o kriging revelou-se menos robusto ainda que demonstrasse alguma consistência de valores. Sendo o kriging uma técnica que utiliza os pontos medidos para o cálculo do Mapa de Ruído, concluiu-se que para aproximar o rigor do kriging ao CadnaA seria necessário aumentar o número de pontos medidos. Apesar das limitações apresentadas por esta técnica, analisando o ponto de controlo A, verificou-se uma diferença de apenas 0,4 dBA.

Agradecimentos

Ao Laboratório de Acústica da ESTG por disponibilizar o sonómetro 2260 e o *software* CadnaA.

Referências

- [1] Carlon, C., Critto, A., Marcomini, A., Nathanail, P. Risk based characterization of contaminated industrial site using multivariate and geostatistical tools. *Environmental Pollution*, 111, 2001, pp. 417-427.
- [2] Moral, F., Álvarez, P., Canito, J. Mapping and hazard assessment of atmospheric pollution in a medium sized urban area using the Rash model and geostatistics techniques. *Atmospheric Environment*, 40, 2006, pp. 1408-1418.
- [3] García, F. J. M. *La representación gráfica de las variables regionalizadas. Geoestadística Lineal*. Universidad de Extremadura, Servicio de Publicaciones, Cáceres, 2003.
- [4] Goovaerts, P. Performance comparison of geostatistical algorithms for incorporating elevation into the mapping of precipitation. *Proceedings of Geocomputation 99*, 1999.
- [5] Liu, C., Jang, C., Liao, C. Evaluation of arsenic contamination potential using indicator kriging in the Yun-Lin aquifer (Taiwan). *Science of the Total Environment* 321, 2004, pp. 173–188.
- [6] Liu, X., Wu, J., Xu, J. Characterizing the risk assessment of heavy metals and sampling uncertainty analysis in paddy field by geostatistics and GIS. *Environmental Pollution*, 141, 2006, pp. 257-264.
- [7] Li, B. G., Cao, J., Liu, W. X., Shen, W. R., Wang, X. J., Tao, S. Geostatistical analysis and kriging of Hexachlorocyclohexane residues in topsoil from Tianjin, China. *Environmental Pollution*, 142, 2006, pp. 567-575.
- [8] Soares, A. *Geoestadística para as ciências da terra e do ambiente*. 2ª edição, IST, Lisboa, 2006.
- [9] Li, B., Tao, S., Dawson, R. W., Cao, J., Lam, L. A GIS based road traffic noise prediction model *Applied Acoustics* 63, 2002, pp. 679–691.
- [10] Regulamento Geral de Ruído, Decreto-lei 9/2007 de 17 de Janeiro.
- [11] Directiva 2002/49/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 25 de Junho de 2002 relativa à avaliação e gestão do ruído ambiente, 2002.
- [12] Elaboração de Mapas de Ruído – Princípios Orientadores, *Direcção Geral do Ambiente/ Direcção Geral do Ordenamento do Território e Desenvolvimento Urbano*, Outubro de 2001.
- [13] Norma Portuguesa NP 1730. *Acústica. Descrição e medição do ruído ambiente*. Parte 1: grandezas fundamentais e procedimentos. Parte 2: Recolha de dados relevantes para o uso de solos, 1996.

- [14] Norma Francesa XPS 31– 133: Acoustique. Bruit des infrastructures de transport terrestres, 2001.
- [15] ISO 9613. *Acoustics. Attenuation of sound during propagation outdoors*. Part 2: General method of calculation, 1996.
- [16] Yilmaz, G., Hocabli, Y. Mapping of noise by using GIS in Sanliurfa. *Environmental Monitoring and Assessment*, 121, 2006, pp. 103–108.
- [17] Tavares, M. T., Sousa, A. J., Abreu, M. M. Ordinary kriging and indicator kriging in the cartography of trace elements contamination in São Domingos mining site (Alentejo, Portugal) *Journal of Geochemical Exploration* 98, 2008, pp. 43–56.