

O impacto da queima doméstica de biomassa lenhosa nos níveis de $PM_{2,5}$ na cidade de Bragança, Portugal

Impact of domestic woody biomass burning on the levels of $PM_{2,5}$ in the city of Bragança, Portugal

Lúcia Dantas, João C. Azevedo e Manuel Feliciano*

Centro de Investigação de Montanha (CIMO), Instituto Politécnico de Bragança, Campus de Santa Apolónia, 5300-253 Bragança, Portugal

*(*E-mail: msabenca@ipb.pt)*

<http://dx.doi.org/10.19084/RCA16191>

Recebido/received: 2016.12.22

Recebido em versão revista/received in revised form: 2017.03.08

Aceite/accepted: 2017.03.09

RESUMO

A influência da combustão doméstica de biomassa lenhosa na fração $PM_{2,5}$ das partículas em suspensão na atmosfera foi avaliada na cidade de Bragança, Portugal. As concentrações de $PM_{2,5}$ foram medidas em 35 locais urbanos, em períodos diurnos e noturnos, entre dezembro de 2013 e maio de 2014. Procedeu-se também à recolha de variáveis potencialmente determinantes da distribuição espacial das concentrações de material particulado e ao estabelecimento de relações estatísticas entre essas variáveis e as concentrações de $PM_{2,5}$. As variações temporais e os padrões espaciais obtidos para os níveis atmosféricos de $PM_{2,5}$ destacaram o elevado contributo das emissões de $PM_{2,5}$ a partir da queima doméstica de lenha. Os níveis noturnos de $PM_{2,5}$ foram em geral mais elevados nas zonas de menor altitude, de maior densidade populacional e de maior intensidade de queima de biomassa. Os resultados também evidenciaram que no período de estudo, as concentrações médias diárias de $PM_{2,5}$ tenderam a ultrapassar o valor de referência de curto prazo de $PM_{2,5}$, estabelecido pela Organização Mundial de Saúde, em mais de metade da área urbana. Este estudo reforça a importância da necessidade de monitorizar e controlar esta fonte de poluição atmosférica em cidades que privilegiam o uso da lenha como recurso energético.

Palavras-chave: Material particulado, combustão doméstica, biomassa lenhosa, krigagem, cokrigagem.

ABSTRACT

We evaluated the influence of residential firewood combustion in the $PM_{2,5}$ fraction of the atmospheric particulate matter in the city of Bragança, Portugal. Day and night time measurements were carried out between December 2013 and May 2014 in 35 urban sampling points. We also collected data on potential influencing factors of air particle concentration which we related statistically with $PM_{2,5}$ observation data. Temporal variation and spatial patterning of atmospheric $PM_{2,5}$ concentrations highlighted the contribution of $PM_{2,5}$ emissions from domestic firewood use. Night time levels of $PM_{2,5}$ were in general higher in areas of lower altitude, higher population density and higher firewood combustion intensity. Our results also indicated that during the study period, mean daily $PM_{2,5}$ concentrations were higher than the World Health Organization reference level in more than half of the city area. This study strengthened the importance of monitoring and controlling this source of atmospheric pollution in cities of high use of firewood for energy.

Keywords: Particulate matter, domestic combustion, woody biomass, kriging, cokriging.

INTRODUÇÃO

De entre os vários poluentes que estão presentes em atmosferas urbanas poluídas, o material particulado é aquele que se torna mais óbvio por ser usualmente visível. As fontes de material particulado podem ser naturais ou antropogénicas, tendo estas últimas, um peso significativo no meio urbano, onde as elevadas densidades populacionais estão estreitamente associadas a atividades que libertam material particulado para a atmosfera, com destaque para o tráfego automóvel, a indústria, a construção e demolição, e ainda a queima doméstica de combustíveis sólidos como a biomassa lenhosa.

A combustão de biomassa lenhosa, a mais antiga e difundida fonte energética, é utilizada no sector doméstico essencialmente para produção de calor para aquecimento das habitações, aquecimento de águas sanitárias ou ainda para a confeção de alimentos. O uso da biomassa lenhosa como fonte energética tem três principais vantagens (Wakelin, 2008): a) balanço de carbono neutro, pois o CO₂ libertado, durante a combustão da biomassa é novamente capturado pela floresta no decorrer do seu crescimento; b) a floresta, da qual provem este combustível, é considerada um recurso renovável quando gerida de forma sustentável; c) o aproveitamento da disponibilidade local deste recurso permite reduzir a dependência energética em relação ao exterior, o que se reflete em benefícios económicos. Apesar de todas estas vantagens, vários estudos têm demonstrado que a queima doméstica de biomassa lenhosa contribui de forma indelével para o aumento das concentrações atmosféricas de PM₁₀ (Krecl, 2008; Bari *et al.*, 2011) e PM_{2,5} (Ward *et al.*, 2006; Molnár e Sallsten, 2013), que por sua vez podem causar graves problemas na saúde humana. Vários estudos epidemiológicos têm associado a presença de material particulado, em particular a fração fina, a múltiplos problemas respiratórios, tais como o agravamento da doença pulmonar obstrutiva crónica (Abbey *et al.*, 1995), a asma (Schwartz *et al.*, 1993; Abbey *et al.*, 1995), o aumento do risco de bronquite crónica (Schwartz *et al.*, 1993) e a redução da função pulmonar (Pope *et al.*, 1991). O material particulado exerce também efeitos significativos a nível do sistema cardiovascular, conforme comprovam os estudos realizados por Dockery *et al.* (1993) e Samet *et al.* (2000).

Atenta a estas evidências empíricas, a Organização Mundial de Saúde (OMS) tem vindo a desenvolver o seu papel no controlo deste fator de risco ambiental, ao estabelecer valores de referência de longo e curto termo para a fração de partículas finas (PM_{2,5}) que são de 10 e 25 µg.m⁻³, respetivamente (WHO, 2005). Portugal ainda não estabeleceu valores-limite para as concentrações no ar ambiente de PM_{2,5}, relativos a exposição de curto prazo (média de 24 horas), mas já definiu o objetivo para a exposição a longo prazo, estabelecendo-o em 25 µg.m⁻³ (Decreto-lei n.º102/2010 de 23 de setembro).

Em cidades como Bragança, situada no nordeste de Portugal, com invernos rigorosos, onde existe uma forte tradição de queima de biomassa lenhosa para aquecimento do ar ambiente no interior das habitações, aquecimento de águas sanitárias e confeção de alimentos (Azevedo *et al.*, 2016), os níveis atmosféricos de PM_{2,5} podem ser fortemente influenciados por esse processo, em particular nos meses mais frios e durante o período vespertino e noturno. A avaliação do impacto da queima doméstica de lenha nos níveis atmosféricos de PM_{2,5} foi o principal objetivo deste estudo, no qual ainda se procurou estabelecer relações estatísticas entre concentrações de PM_{2,5} e variáveis potencialmente determinantes da sua distribuição espacial e modelar o padrão espacial deste poluente, de modo a identificar as áreas mais afetadas por este tipo de poluição.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo foi a cidade de Bragança, localizada no Nordeste de Portugal Continental (41° 48' N, 6° 46' W). Bragança é uma cidade que ocupa uma área de 1400 hectares e possui atualmente uma população residente de 23000 habitantes (INE, 2012). Em termos climáticos Bragança tem um clima temperado com influências tanto continentais como atlânticas, a temperatura média anual é de 12,3°C, sendo janeiro o mês mais frio com uma temperatura média de 4,4°C e julho o mais quente com uma temperatura média de 21,3°C (AEMET-IM, 2011; Gonçalves *et al.*, 2014).

Segundo um estudo desenvolvido por Azevedo *et al.* (2016), o consumo doméstico anual total de biomassa lenhosa, na cidade de Bragança, é de 16765 toneladas, o que corresponde a um consumo médio anual de 4 toneladas por habitação consumidora deste recurso energético. Esse mesmo estudo demonstrou que a lenha é a principal fonte de energia primária no setor residencial (245,6 TJ/ano), sendo utilizada maioritariamente para aquecer o ar das habitações. Nos meses de frio mais intenso e, sobretudo, durante o período vespertino e noite, a queima de lenha constitui a principal fonte emissora de $PM_{2,5}$ para a atmosfera.

Procedimento experimental

As concentrações de $PM_{2,5}$ foram medidas em 35 pontos de amostragem distribuídos pela cidade Bragança, usando um monitor de partículas (ADR-1200s) transportado a bordo de uma carrinha de caixa aberta. Este equipamento foi devidamente instalado e programado para realizar registos a cada 15 segundos. O veículo permaneceu parado em cada ponto de amostragem durante 3-4 minutos, de modo a assegurar uma medição estável durante pelo menos 2 minutos. A monitorização das concentrações de $PM_{2,5}$ realizou-se entre 3 de dezembro de 2013 e 7 de maio de 2014, em períodos diurnos entre as 11h00 e as 15h00 e em períodos noturnos entre as 21h00 e a 01h00. No total, foram realizadas 22 campanhas de monitorização, 10 diurnas e 12 noturnas. As campanhas foram realizadas em diferentes dias da semana, sendo as rotas levadas a cabo ora no sentido horário ora no anti-horário. Os parâmetros meteorológicos temperatura do ar, humidade relativa, velocidade e direção do vento, para cada campanha de monitorização, foram registados com uma resolução temporal de 10 minutos pela estação meteorológica localizada no campus do Instituto Politécnico de Bragança. Durante cada campanha as condições de nebulosidade foram também registadas por inspeção visual.

Análise estatística da relação entre $PM_{2,5}$ e variáveis independentes

A análise da relação entre as concentrações de $PM_{2,5}$ registadas nos pontos de monitorização

selecionados na cidade de Bragança e as variáveis potencialmente determinantes dos padrões espaciais deste poluente (variáveis independentes) resultou da identificação prévia de fatores que influenciam a combustão doméstica de biomassa lenhosa e as emissões de partículas, através de pesquisa na literatura e aplicação de conhecimento comum.

Na pesquisa realizada foram identificadas uma série de variáveis que têm vindo a ser associadas à concentração de $PM_{2,5}$ oriunda da queima residencial de biomassa lenhosa (Tian *et al.*, 2004; Larson *et al.*, 2007). Neste estudo optou-se por estudar variáveis independentes como a altitude, densidade populacional, densidade residencial, tipologia de ocupação do solo, idade média do edificado e percentagem de ocupação do solo. A tipologia de ocupação, utilizada como variável categórica, foi agrupada em duas classes distintas, de acordo com o seu potencial de emissão de $PM_{2,5}$: a tipologia 1, que engloba as áreas com um potencial de emissão mais elevado (Residencial Plurifamiliar, Residencial Unifamiliar Recente e Residencial Unifamiliar Tradicional); e a tipologia 2 que integra as áreas potencialmente associadas a menores emissões de $PM_{2,5}$ (Sem Edificado, Zona de Equipamentos, Zona Para-Urbana, Residencial/industrial). No caso da variável dependente foram consideradas duas situações, uma primeira em que a variável é a média local de $PM_{2,5}$ nos pontos de amostragem, tendo por base todos os percursos noturnos realizados ($PM_{2,5}N$) e uma segunda em que a variável é também a média local de $PM_{2,5}$, mas considerando apenas as noites em que a velocidade média do vento foi inferior a 1 m.s^{-1} ($PM_{2,5}N_{vf}$). Das 12 campanhas noturnas, 7 foram conduzidas em condições de vento fraco ($<1 \text{ m.s}^{-1}$) e as restantes com velocidades médias superiores a 1, mas inferiores a $2,5 \text{ m.s}^{-1}$.

A análise estatística compreendeu a análise de correlações de Pearson estabelecidas entre as variáveis independentes e a variável dependente (níveis de $PM_{2,5}$).

Padrão espacial das concentrações de $PM_{2,5}$

A distribuição espacial das concentrações de $PM_{2,5}$ foi modelada a partir dos resultados médios dos

níveis do poluente em cada um dos 35 pontos de amostragem, tendo por base todos os percursos noturnos realizados ($PM_{2,5}N$) e, noutra situação, considerando apenas as noites em que a velocidade média do vento foi inferior a 1 m.s^{-1} ($PM_{2,5}N_{vf}$). Foram, para este fim, aplicadas técnicas de interpolação geoestatística, nomeadamente krigagem e cokrigagem ordinárias, utilizando o modelo matemático esférico.

A variável dependente $PM_{2,5}N_{vf}$ foi criada com o propósito de reduzir a influência do vento e evidenciar o efeito das fontes domésticas, em particular a queima de lenha. Optou-se preferencialmente pela modelação das concentrações de $PM_{2,5}$ no período noturno com o propósito de estabelecer uma relação com a queima residencial de biomassa, que foi considerada a principal fonte do poluente durante a noite.

Os métodos de interpolação geoestatística comumente conhecidos como krigagem têm por base a aplicação da Teoria das Variáveis Regionalizadas, desenvolvida por Georges Matheron (Matheron, 1963), e consiste na aplicação de funções estocásticas na descrição da variação espacial de um determinado atributo ao qual se dá o nome de variável regionalizada. Este método de interpolação assenta na técnica da distância ponderada, sendo que a estimativa do valor de uma determinada variável num ponto x é conseguida através dos pontos de amostragem vizinhos, aos quais são atribuídos diferentes pesos, com os mais próximos a serem mais influentes. Além da distância entre observações e pontos não mensurados, que é levada em conta na determinação das ponderações, a krigagem considera também o arranjo espacial dos pontos de medição através da modelação da autocorrelação espacial (Johnston *et al.*, 2001). A cokrigagem é uma ferramenta de interpolação que permite integrar informação adicional para modelar a distribuição de um atributo de interesse (Jeannée, 2005). Esta informação extra corresponde a dados obtidos por amostragem de uma ou mais variáveis espacialmente correlacionadas com a variável de interesse, sendo o valor destas variáveis e as suas correlações utilizados na estimação em locais não amostrados. Este método de interpolação geoestatística representa uma modificação do princípio base da interpolação em que,

além da utilização da dependência espacial entre amostras, possibilita a utilização da co-variância existente entre a variável de interesse e variáveis independentes correlacionadas (Mesquita, 2009).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise estatística da relação entre $PM_{2,5}$ e variáveis independentes

O Quadro 1 apresenta a matriz de correlações de Pearson referentes à análise da relação estatística univariada entre as variáveis dependentes, $PM_{2,5}N$ e $PM_{2,5}N_{vf}$, e as variáveis independentes: altitude (Altitude), densidade populacional (DensP), densidade residencial (DensR), tipologia de ocupação do solo (Tipologia2), idade média do edificado (Idd_Ed) e percentagem de ocupação do solo (POcup). A matriz de correlações de Pearson mostra que todas as variáveis independentes apresentaram individualmente, à exceção da idade média do edificado, uma correlação significativa com ambas as variáveis dependentes. No caso da variável $PM_{2,5}N$, a correlação mais forte foi a estabelecida com a variável altitude ($R = 0,502$), seguida pela relação com a tipologia de ocupação do solo ($R = 0,472$), sendo que em ambos os casos a correlação é negativa. A correlação pode ser explicada, no primeiro caso, pelo facto de o aumento da altitude estar associado a uma redução de fontes de emissão e de, no período nocturno, o ar frio tender a escoar para as partes baixas do terreno arrastando com ele o material particulado (Larson *et al.*, 2007). No segundo caso, tal deve-se ao facto da variável Tipologia 2 estar associada a áreas de menor emissão de $PM_{2,5}$. No caso da variável $PM_{2,5}N_{vf}$ a correlação mais forte foi também estabelecida com a altitude ($R = 0,503$), seguida da densidade populacional ($R = 0,471$), tendo esta última uma correlação positiva com a variável dependente uma vez o aumento da densidade populacional se traduz no aumento da quantidade de lenha queimada por unidade de área.

Padrão espacial das concentrações de $PM_{2,5}$

A Figura 1 apresenta os padrões espaciais das concentrações de $PM_{2,5}$ para o período noturno ($PM_{2,5}N$), obtidos pela aplicação das técnicas de

Quadro 1 - Matriz de correlações de Pearson

	Tipologia2	Altitude	Pocup	Idd_Ed	DensR	DensP
PM _{2,5} N	-0.472**	-0.502**	0.420*	0.266	0.425*	0.466**
PM _{2,5} Nvf	-0.461**	-0.503**	0.413*	0.254	0.426*	0.471**
Tipologia2	1	0.294	-0.240	-0.065	-0.548**	-0.484**
Altitude		1	-0.154	-0.201	-0.448**	-0.436**
POcup			1	-0.081	0.543**	0.642**
Idd_Ed				1	0.179	0.022
DensR					1	0.951**
DensP						1

** Nível de significância de 1%; *nível de significância de 5%.

Legenda:

PM_{2,5}N - média de PM_{2,5} em cada ponto de amostragem tendo por base todos percursos noturnos realizados
 PM_{2,5}Nvf - média de PM_{2,5} em cada ponto de amostragem tendo por base todos percursos noturnos realizados com velocidade do vento inferior a 1m.s⁻¹
 Altitude - altitude
 DensP - densidade populacional
 DensR - densidade residencial
 Tipologia2 - tipologia de ocupação do solo
 Idd_Ed - idade média do edificado
 POcup - percentagem de ocupação do solo

krigagem ordinária (Figura 1 esquerda) e cokrigagem ordinária (Figura 1 direita). Os dois mapas apresentam uma distribuição espacial similar do poluente na área de estudo, na medida em que ambos evidenciam claramente que na parte norte e nordeste da cidade as concentrações de PM_{2,5} são mais elevadas do que as prevalentes na parte sul. Não obstante, vislumbram-se algumas diferenças entre os resultados dos dois métodos.

Na cokrigagem, com a introdução de variáveis auxiliares, as concentrações modeladas definem um padrão mais homogêneo, surgindo concentrações mais elevadas em importantes áreas residenciais com elevadas densidades populacionais, e desta forma com maior potencial de queima de lenha, e concentrações mais baixas em áreas de ocupação não residencial.

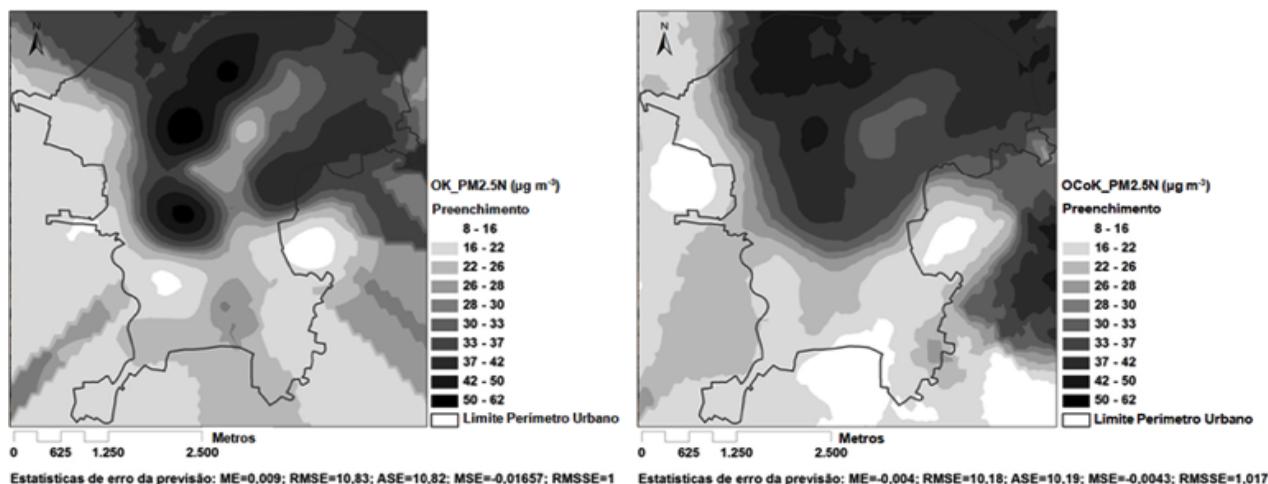


Figura 1 - Mapas de distribuição espacial das concentrações de PM_{2,5}: para períodos noturnos (PM_{2,5}N), interpoladas por krigagem ordinária (esquerda) e cokrigagem ordinária usando a altitude, densidade populacional e tipologia de uso do solo como variáveis auxiliares (direita).

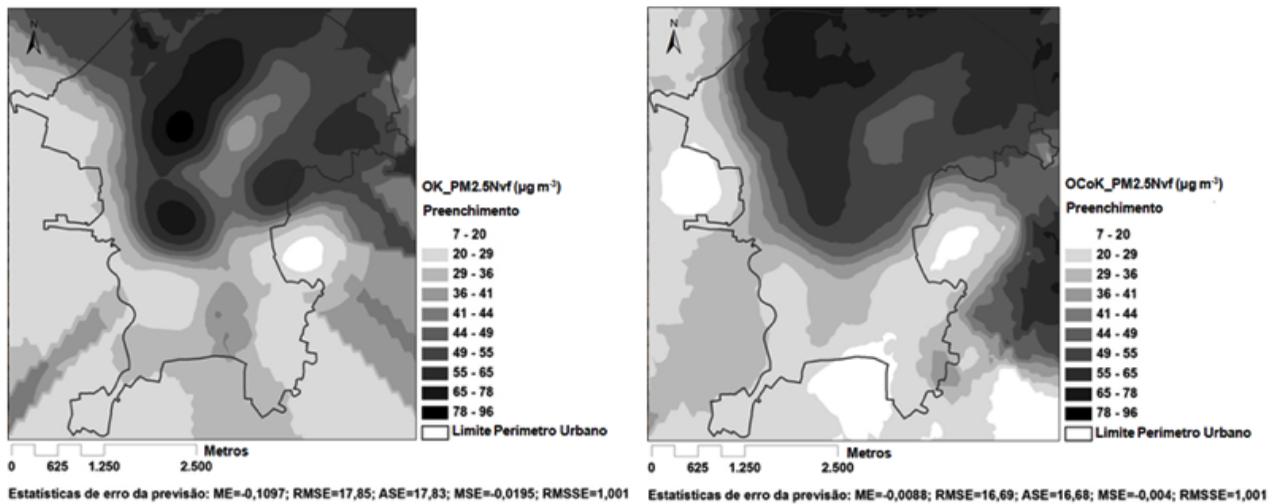


Figura 2 - Mapas de distribuição espacial das concentrações de $PM_{2,5}$ para períodos noturnos com vento fraco ($PM_{2,5}Nvf$) interpoladas por krigagem ordinária (esquerda) e cokrigagem ordinária usando a altitude, densidade populacional e tipologia de uso do solo como variáveis auxiliares (direita).

A Figura 2 apresenta igualmente a distribuição espacial das concentrações de $PM_{2,5}$, obtida pelos dois métodos de interpolação geoestatística referidos anteriormente, mas apenas considerando as campanhas noturnas em condições de vento fraco ($PM_{2,5}Nvf$). Ambos os padrões espaciais permitem destacar a principal característica referida anteriormente – o contraste entre a zona norte e a zona sul da malha urbana em termos de concentrações de $PM_{2,5}$. No entanto, a magnitude das concentrações interpoladas é maior na globalidade da área em estudo, o que se explica pelas reduzidas velocidades do vento, que não favorecem a dispersão do poluente.

Em ambos os casos a cokrigagem ordinária mostrou, relativamente à krigagem ordinária, uma média dos erros padronizados (MSE) mais próxima de 0, o que revela um menor enviesamento do modelo, a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) mais baixa, o que indica uma maior proximidade entre os valores medidos e os previstos, e igual proximidade do erro padrão da média dos erros (ASE) relativamente à raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE), o que valida os erros padrão da predição. Pode então concluir-se que existem evidências para considerar a performance da cokrigagem melhor do que a da krigagem na interpolação do atributo $PM_{2,5}N$ e $PM_{2,5}Nvf$.

Identificação de Zonas Críticas

Para a identificação de zonas críticas procedeu-se ao cálculo estimativo das concentrações médias diárias (24 h) de $PM_{2,5}$ e avaliou-se a sua magnitude em relação ao valor de referência de curto prazo para proteção da saúde humana ($25 \mu g \cdot m^{-3}$), estabelecido pela OMS. O cálculo da média diária de $PM_{2,5}$ teve por base os valores médios das campanhas noturnas e diurnas e ainda os perfis temporais diários típicos dos níveis de $PM_{2,5}$ obtidos para alguns pontos da cidade.

Os resultados dessa análise encontram-se na Figura 3, na qual se identificam as áreas cujas concentrações médias diárias de $PM_{2,5}$ obtidas por krigagem ordinária (Figura 3 esquerda) e por cokrigagem ordinária (Figura 3 direita), excedem o valor de referência de curto prazo estabelecido pela OMS.

Os resultados obtidos mostram excedências ao valor de referência numa importante extensão da parte norte da cidade, indicando que essa zona é vulnerável do ponto de vista de qualidade do ar, o que pode implicar um risco elevado para a saúde humana, devido à prevalência de níveis elevados de material particulado de baixa granulometria durante um período considerável do ano.

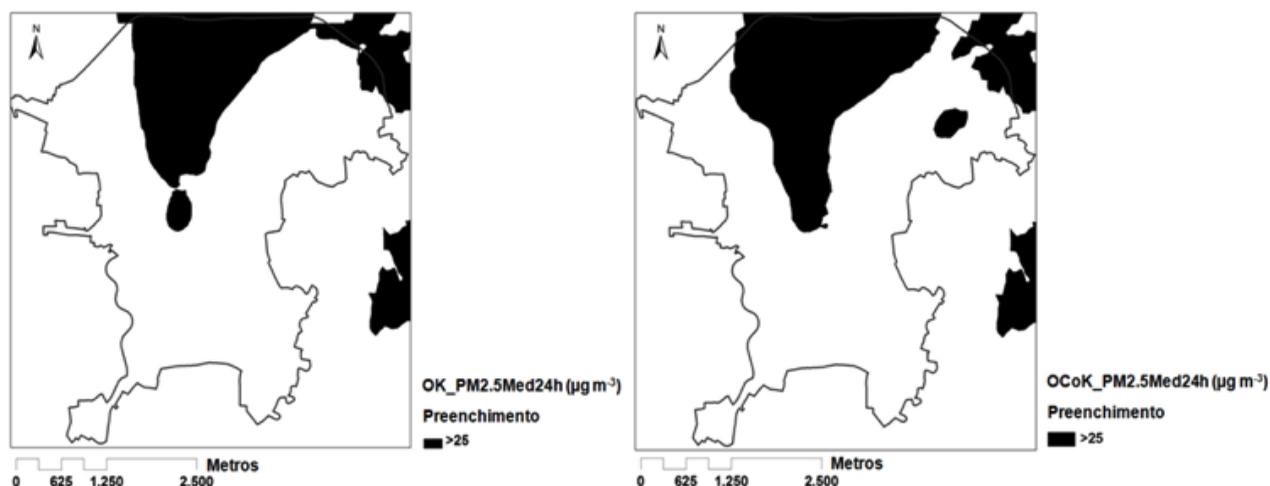


Figura 3 - Mapas de interpolação por krigagem ordinária (esquerda) e cokrigagem ordinária (direita) das concentrações médias de 24 h de $PM_{2,5}$ com identificação das zonas que excedem o valor de referência de curto prazo estabelecido pela OMS.

Desta forma, não podemos deixar de enfatizar a importância do controle desta atividade, não apenas em Bragança mas também noutras realidades onde este tipo de fonte de energia tenha um importante papel, seguindo o exemplo de outros países (e.g. EUA) onde já são aplicadas medidas legislativas e técnicas com vista à redução das emissões resultantes da queima de biomassa (Karvosenoja *et al.*, 2004; Hytonen e Jokiniemi, 2006; Paunu, 2012).

CONCLUSÕES

O estudo desenvolvido permitiu demonstrar que a queima de biomassa lenhosa exerce uma forte influência nos níveis de $PM_{2,5}$ na cidade de Bragança e, possivelmente, em realidades urbanas com características semelhantes em termos de dimensão, nível de desenvolvimento e com forte tradição no uso doméstico de lenha para aquecimento das habitações, águas sanitárias e confeção de alimentos.

O padrão espacial definido pelas concentrações noturnas de $PM_{2,5}$ revelou um elevado contraste entre duas zonas da cidade. A parte norte, onde os níveis de $PM_{2,5}$ prevalecentes durante o período de queima de biomassa, ultrapassaram o valor de

referência de curto prazo estabelecido pela OMS, e a parte sul da cidade, onde os valores de $PM_{2,5}$ foram manifestamente mais baixos. Esta realidade mostra que não se deve negligenciar o impacto da queima doméstica de biomassa no aumento da suscetibilidade aos efeitos nocivos do material particulado fino na saúde humana. Esta situação é ainda mais crítica em condições de vento fraco ($<1 \text{ m.s}^{-1}$), já que estas conduzem ao aumento dos níveis de poluentes na atmosfera, pelo facto de não favorecerem a dispersão (diluição) dos poluentes lançados na atmosfera.

A variabilidade espacial dos níveis de $PM_{2,5}$ reflete sobretudo a distribuição das emissões da principal fonte do poluente durante o período vespertino e noturno dos meses mais frios do ano – a queima doméstica de biomassa lenhosa. A análise de correlações realizada entre os níveis de $PM_{2,5}$ e variáveis como densidade populacional, tipologia de ocupação do solo, altitude e densidade residencial reforçaram esta relação causal.

Os resultados comprovam que a queima doméstica de biomassa lenhosa pode ter um impacto significativo na qualidade do ar de pequenas cidades como Bragança com potenciais efeitos na saúde das suas populações.

A modelação da distribuição espacial das concentrações de $PM_{2.5}$ feita neste estudo pode ser vista como um primeiro passo para a caracterização espacial do risco relativamente aos efeitos nocivos do material particulado na saúde pública, tal como para a realização de estudos epidemiológicos que visem o estabelecimento de relações entre a distribuição espacial do poluente em causa e a taxa de morbilidade por exemplo.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Eng. Arsénio e Eng. Saraiva pela sua contribuição no desenvolvimento do trabalho de campo e ao Professor Luís Nunes pela ajuda no tratamento estatístico dos dados. Gostaríamos também de agradecer ao projecto "IUFRO Landscape Ecology International Conference Bragança 2010" (NORTE-07-0927-FEDER-000058) do Quadro de Referência Estratégico Nacional (QREN) pelo financiamento parcial deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbey, D. E.; Hwang, B.L.; Burchette, R.J.; Vancuren, T. & Milss, P.K. (1995) – Estimated long-term ambient concentrations of PM_{10} and Development of respiratory symptoms in nonsmoking population. *Arch Environ Health*, vol. 50, n. 2, p. 139-151. <http://dx.doi.org/10.1080/00039896.1995.9940891>
- AEMET-IM (2011) – *Atlas Climático Ibérico – Iberian Climate Atlas*. Agencia Estatal de Meteorologia & Instituto de Meteorologia (Ed.), 79 p.
- Azevedo, J.C.; Ferreira, M.C.; Nunes, L.F. & Feliciano, M. (2016) – What drives consumption of wood energy in the residential sector of small cities in Europe and how that can affect forest resources locally? The case of Bragança, Portugal. *International Forestry Review*, vol. 18, n. 1, p. 1-12. <http://dx.doi.org/10.1505/146554816818206177>
- Bari, M.A.; Baumbach, G.; Kuch, B. & Scheffknecht, G. (2011) – Air Pollution in Residential Areas from Wood-fired Heating. *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 11, n. 6, p. 749-757. <http://dx.doi.org/10.4209/aaqr.2010.09.0079>
- Dockery, D.W.; Pope, C.; Xu, X.; Spengler, J.D.; Ware, J. H.; Fay, M.E.; Ferris, B.G. & Speizer, F.E. (1993) – An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *New England Journal of Medicine*, vol. 329, n. 24, p. 1753-1759. <http://dx.doi.org/10.1056/NEJM199312093292401>
- Gonçalves, A.J.; Ribeiro, A.C.; Maia, F. & Feliciano, M. (2014) – *Análise do Clima Urbano da Cidade de Bragança*. Instituto Politécnico de Bragança, 54 p.
- Hytonen, K. & Jokiniemi, J. (2006) – Reduction of fine particle emissions from residential wood combustion. *In: Workshop in Kuopio*. University of Kuopio. Finland.
- INE (2012) – *Censos 2011 – Resultados Definitivos*. Instituto Nacional de Estatística, I.P. Lisboa. Portugal.
- Jeannée, N.; Nedellec, V.; Bouallala, S.; Deraisme, J. & Desqueyroux, H. (2005) – Geostatistical assessment of long term human exposure to air pollution – Geostatistics for Environmental Applications. *In: Proceeding of the GEOENV2004*. Springer, P. 161-172. http://dx.doi.org/10.1007/3-540-26535-X_14
- Johnston, K.; Ver Hoef, J.M.; Krivoruchko, K. & Lucas, N. (2001) – *Using ArcGIS® Geostatistical Analyst*. GIS by ESRI.
- Karvosenoja, N.; Johansson, M.; Kindbom, K.; Lukewille, A.; Jensen, D.; Sternhufvud, C. & Illerup, J.B. (2004) – *Fine particulate matter emissions from residential wood combustion and reduction potential in the Nordic countries*. Finnish Environment Institute. Finland
- Krecl, P. (2008) – *Impact of residential wood combustion on urban air quality*. Tese de Doutoramento. Stockholm University.
- Larson, T.; Su, J.; Baribeau, A.M.; Buzzelli, M.; Setton, E. & Brauer, M. (2007) – A spatial model of urban winter woodsmoke concentrations. *Environmental Science & Technology*, vol. 41, n. 7, p. 2429-2436. <http://dx.doi.org/10.1021/es0614060>

- Matheron, G. (1963) – Principles of geostatistics. *Economic Geology*, vol. 58, p. 1246-1266. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.58.8.1246>
- Mesquita, S.M.P. (2009) – *Modelação da Distribuição espacial da qualidade do ar em Lisboa usando sistemas de informação geográfica*. Tese de Mestrado. Universidade de Lisboa.
- Molnár, P. & Sallsten, G. (2013) – Contribution to PM_{2,5} from domestic wood burning in a small community in Sweden. *Environmental Science: Processes & Impacts*, vol. 15, n. 4, p. 833-838. <http://dx.doi.org/10.1039/c3em30864b>
- Paunu, V. (2012) – *Emissions of Residential Wood Combustion in Urban and Rural Areas of Finland*. Master Thesis. Aalto University. Finland.
- Pope, C.; Dockery, D.; Spengler, J. & Raizenne, M. (1991) – Respiratory health and PM10 pollution. A daily time series analysis. *American Review of Respiratory Disease*, vol. 144, n. 3, p. 668-674. http://dx.doi.org/10.1164/ajrccm/144.3.Pt_1.668
- Samet, J.; Dominici, F.; Currier, I. & Zeger S. (2000) – Fine particulate air pollution and mortality in 20 U.S. cities, 1987-1994. *New England Journal of Medicine*, vol. 343, n. 24, p. 1742-1749. <http://dx.doi.org/10.1056/NEJM200012143432401>
- Schwartz, J.; Slater, D.; Larson, T.; Pierson, W. & Koenig J. (1993) – Particulate air pollution and hospital emergency room visits for asthma in Seattle. *American Review of Respiratory Disease*, vol. 147, n. 4, p. 826-831. <http://dx.doi.org/10.1164/ajrccm/147.4.826>
- Tian, Y.Q.; Radke, J.D.; Gong, P. & Yu, Q. (2004) – Model Development for spatial variation of PM_{2,5} emissions from residential wood burning. *Atmospheric Environment*, vol. 38, n. 6, p. 833-843. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.10.040>
- Wakelin, T. (2008) – *Emissions from wood-fired combustion equipment*. Ministry of Environment. British Columbia.
- Ward, T.J.; Rinehart, L.R. & Lange, T. (2006) – The 2003/2004 Libby, Montana PM_{2,5} Source Apportionment Research Study. *Aerosol Science and Technology*, vol. 40, n. 3, p. 166-177. <http://dx.doi.org/10.1080/02786820500494536>
- WHO (2005) – *WHO air quality guidelines global update 2005*. Copenhagen, Denmark, World Health Organization Regional Office for Europe.