

FERRAMENTAS DE PREVISÃO DE ESCORRÊNCIAS RODOVIÁRIAS

Duarte GALHARDO¹, João FERNANDES², Ana Estela BARBOSA² e Pedro Santos COELHO¹

¹Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente, 2829-516 Caparica, Almada, Portugal

Email: dg.galhardo@campus.fct.unl.pt <https://www.dcea.fct.unl.pt/>

²Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica e Ambiente, Avenida do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

Sumário

O presente trabalho está relacionado com a previsão da qualidade das águas de escorrência rodoviárias. Partindo de informação sobre um conjunto de 20 estradas europeias (incluindo configuração da via, tráfego e condições climáticas), são implementados quatro modelos de previsão – PREQUALE, HAWRAT, o modelo de Kayhanian (2006) e o SELDM – sendo os seus resultados comparados com os dados de monitorização.

Adicionalmente, foi proposto um novo modelo para o cálculo das concentrações de poluentes médias do lugar (CML).

Os resultados obtidos permitem verificar o carácter estocástico do processo que conduz à incorporação de contaminantes afetando a qualidade das águas de escorrência rodoviárias. Essa característica leva à grande dificuldade de se dispor de um modelo que permita prever, a nível europeu, as concentrações dos principais poluentes.

Palavras-chave: Escorrências rodoviárias, PREQUALE, HAWRAT, modelo de Kayhanian, SELDM, concentrações de poluentes.

1 INTRODUÇÃO

No contexto de uma crescente preocupação ambiental a nível mundial, a qualidade das massas de água tem estado em especial destaque devido à sua relevância como suporte de diferentes ecossistemas. A melhoria dessa qualidade é principalmente efetuada através de estratégias de controlo de poluição difusa e pontual. Assim, e em resposta a estas preocupações, surgiu, a nível europeu, a Diretiva Quadro da Água [1], que requer uma boa compreensão dos impactes das fontes de poluição nos meios recetores.

No que às escorrências rodoviárias diz respeito, [2] defende a importância da avaliação das concentrações e das cargas poluentes que tenham em conta as características conjuntas do tráfego, da estrada e das condições climáticas. A previsão da qualidade da água das escorrências rodoviárias é uma questão bastante desafiadora tendo em conta a sua natureza estocástica e difusa.

Relativamente ao caso nacional, verifica-se a inexistência de legislação específica para as escorrências rodoviárias. Como tal, e de modo a facilitar a tomada de decisão, tem-se utilizado como indicador o Decreto-Lei n.º 236/98, de 01 de Agosto, que, no seu anexo XVIII, estabelece os valores limite de emissão na descarga de águas residuais, com o objetivo de proteger o meio recetor. A utilização deste Decreto-Lei tem várias limitações na aplicação às escorrências rodoviárias, apresentando valores limite de emissão para descargas pontuais, enquanto as escorrências rodoviárias são fontes de poluição difusa.

Neste estudo analisaram-se resultados de monitorização de escorrências rodoviárias de seis países europeus. Procedeu-se à sua comparação com as previsões de quatro modelos disponíveis na literatura.

Resumidamente, na presente comunicação descrevem-se os resultados das seguintes atividades:

- (i) Caracterização de escorrências de estradas a nível europeu;

- (ii) recolha e análise dos resultados de monitorização disponíveis;
- (iii) avaliação das ferramentas de previsão de escorrências rodoviárias (HAWRAT - *Highways Agency Water Risk Assessment Tool*; SELDM - *Stochastic Empirical Loading and Dilution Model*; PREQUALE – Previsão da Qualidade das Águas de Escorrência; uma regressão linear múltipla de Kayhanian); e
- (iv) desenvolvimento de um modelo de previsão que permita estimar as concentrações médias dos principais poluentes de estradas, tendo como premissa, apenas a utilização de parâmetros que estão facilmente disponíveis.

2 CARACTERIZAÇÃO GERAL DE ESCORRÊNCIAS RODOVIÁRIAS

No caso das escorrências rodoviárias, o escoamento superficial abrange uma matriz complexa de poluentes, dependente de vários fatores, como o tráfego, as condições climáticas ou as características do local onde são gerados. O impacto potencial desses poluentes deve ser estudado tendo em consideração não só as características do poluente, mas também a vulnerabilidade do meio recetor.

De acordo com [3], as cinco principais categorias de fatores que afetam as concentrações de contaminantes são: (i) volume e características do tráfego; (ii) características e padrões da precipitação; (iii) uso do solo circundante; (iv) estrutura do pavimento e material utilizado na construção e v) características dos poluentes.

Apesar de haver uma lista extensa de poluentes associados às águas de escorrência de estradas, apenas alguns destes poluentes são monitorizados regularmente. Os mais relevantes são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1. Componentes de uma escorrência rodoviária presentes em [4]

Parâmetros convencionais de qualidade da água	sólidos suspensos totais; sólidos dissolvidos totais; carbono orgânico dissolvido; carbono orgânico total; carência química de oxigénio; carência bioquímica de oxigénio; óleo e borracha; dureza da água como CaCO ₃ ; temperatura e pH.
Metais	Frequentemente monitorizados: Cádmio; Crómio; Cobre; Chumbo; Níquel e Zinco Menos frequentemente monitorizados: Alumínio; Arsénio; Ferro
*Nutrientes	Nitratos; Amónia; Azoto Kjeldhal total; Azoto Total; Fósforo total.
Parâmetros de qualidade de água menos frequentemente monitorizados	Coliformes fecais totais; Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos; Herbicidas e Pesticidas.

*Em [4] é defendido que a presença de azoto e fósforo, como poluentes, numa escorrência rodoviária, pode indicar não só efeitos do tráfego, mas também estar associada a fatores externos.

Importa referir que os poluentes das águas de escorrência de estradas, mencionados no Quadro 1, não são originados apenas pelo tráfego rodoviário. Eles são provenientes de várias fontes antropogénicas ou naturais. Alguns são transportados longas distâncias pelo vento, sendo depositados mais tarde nos mais variados lugares [5]. As fontes de poluição mais relevantes relacionadas com o tráfego incluem a erosão das superfícies das estradas; o desgaste de pneus; fugas de óleos; emissão de gases; desgaste das pastilhas dos travões e das placas de embraiagem.

Após considerar o tráfego rodoviário, a estrada e os poluentes emitidos para a atmosfera como origens de poluição das escorrências rodoviárias, em [2] apontou-se ainda as atividades de manutenção e construção como outra fonte de poluentes.

As escorrências rodoviárias são geradoras de dois tipos de impactes no meio recetor (i) impactes agudos que se encontram associados geralmente a derrames acidentais de poluentes e (ii) os efeitos crónicos associados, por exemplo, a metais que se apresentem moderadamente solúveis e em que a toxicidade apenas ocorre após um processo de acumulação nos tecidos dos organismos.

Em [6] está definido que os impactos agudos são caracterizados por eventos de curta duração e que o impacto diminui após o término da ocorrência. Os mesmos autores referem os nutrientes como outros tipos de poluentes que podem levar a impactos cumulativos, ou seja, à eutrofização de meios hídricos, em especial as massas de água com características lânticas.

O estudo da qualidade das escorrências rodoviárias pode ser feito através das concentrações e cargas poluentes de cada parâmetro/poluento.

Como neste estudo se procede a uma avaliação das concentrações das escorrências rodoviárias, importa definir, à partida, dois conceitos:

- (i) o valor de concentração de cada poluento em cada estrada e evento de precipitação é definido como *Concentração Média do Evento (CME)*; e
- (ii) o valor de concentração característico de um dado local é definido para cada poluento como *Concentração Média do Lugar (CML)* que corresponde à média das CME de vários eventos.

3 DADOS DE MONITORIZAÇÃO DE ÁGUAS DE ESCORRÊNCIA DE ESTRADAS

A análise às ferramentas existentes para a previsão das CML de escorrência de estradas foi efetuada através da comparação dos resultados dessas ferramentas com resultados de monitorização efetuada em seis países europeus. Os dados angariados representam 20 estradas localizadas em Portugal, França, Holanda, Inglaterra, Irlanda e Noruega, de acordo com o apresentado na Figura 1 (Para mais detalhes relativos aos dados de monitorização destas estradas, consultar [7] e respetivas referências bibliográficas).

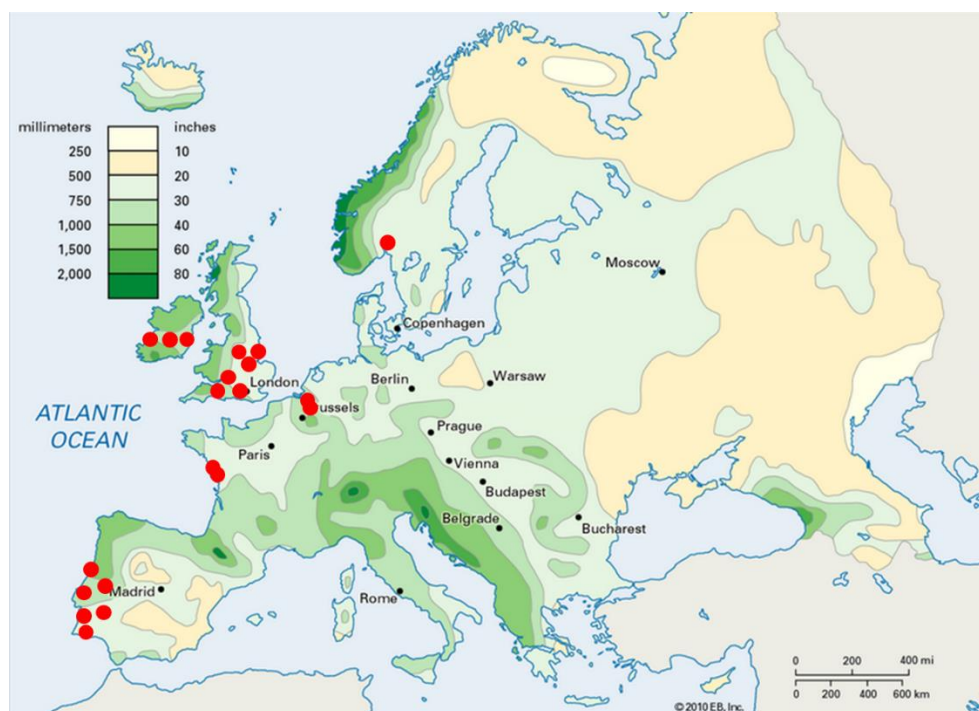


Figura 1. Localização das 20 estradas europeias estudadas, num mapa europeu de precipitação

As 20 estradas apresentam uma gama relativamente alargada de características conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2. Características das estradas com dados de monitorização

Cod.	País	Identificação da estrada	Área de drenagem (DA) (m ²)	Fracção impermeável (IF) (0-1)	Precipitação média anual (P _{annual}) (mm)	Média anual do Tráfego diário (AADT)
P1	Portugal	A 1	22 800	0,41	646	27 746
P2		A 2	1 287	1,00	528	16 344
P3		A 6	5 580	1,00	744	2 918
P4		A 22	15 422	0,85	518	24 000
P5		A 25	287,5	1,00	1 014	15 673
P6		IP 6	7 280	1,00	709	6 539
N1	Holanda	A 27 - pervious	48 590	0,50	776	63 000
N2		A 27 - Impervious	30 510	1,00	776	63 000
N3	Noruega	E 6	22 000	1,00	834	42 000
F1	França	A 11 - pervious	3 200	1,00	786	24 103
F2		A 11 - impervious	3 200	0,50	786	24 103
I1	Irlanda	M 7 - Kildare	14 184	1,00	731	27 500
I2		M 7 - Monasterevin	11 368	1,00	731	27 500
I3		M 7 - Portlaoise	9 600	1,00	731	27 500
E1	Inglaterra	M 4 - Brinkworth	8 755	1,00	745	70 000
E2		M 4 - River Ray	4 348	1,00	745	35 000
E3		M 40	58 680	1,00	615	78 000
E4		A 417	20 232	1,00	843	24 000
E5		A 34 - Gallos Brook	2 760	1,00	660	64 000
E6		A 34 - River Enborne	19 425	0,50	635	36 000

4 MODELOS DE ESTIMATIVA DAS CONCENTRAÇÕES DE POLUENTES

4.1 PREQUALE

O PREQUALE (*PRE*visão da *QUAL*idade das águas de *Escorrência*) é um modelo desenvolvido no âmbito do programa de investigação financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia *G-Terra*, coordenado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, como demonstrado em [2]. Este modelo utilizou dados de seis estradas portuguesas no seu processo de calibração, calculando diretamente a CML de cada estrada.

A aplicação deste modelo é bastante simples, na qual se inclui os seguintes dados de entrada:

- Área de Drenagem (DA em Km²) – Área que contribui com caudal de escorrência para o ponto de recolha;
- Fração impermeável (IF em %) – Percentagem da bacia que é impermeável;
- Volume médio anual da chuvada com duração idêntica ao período de concentração da bacia (AR em mm);
- Precipitação anual (P_{annual} em mm) – Precipitação anual na bacia.

A equação multiparamétrica toma a seguinte forma:

$$CML = a_i (DA^{\beta_1} \times IF^{\beta_2} \times AR^{\beta_3} \times P_{\text{annual}}^{\beta_4})$$

Onde CML é a concentração média no lugar estimada para cada poluente, sendo que a_i , β_1 , β_2 , β_3 e β_4 são os coeficientes de regressão correspondentes (mais pormenores podem ser obtidos em [2]).

4.2 HAWRAT

O HAWRAT (*Highways Agency Water Risk Assessment Tool*) é um modelo desenvolvido pela *Highways Agency* do Reino Unido para esse país. Os poluentes que se pretendiam estudar neste trabalho não estão presentes na versão disponível do HAWRAT. Desta forma, foi utilizada a equação de base que permite o cálculo das CME através das características da estrada, tráfego e séries de precipitações.

A equação que suporta este modelo resulta de várias monitorizações sendo que, a partir da observação destes resultados, se construiu uma tabela de constantes para cada poluente. Em [8] e [9] podem ser obtidos maiores detalhes relativamente à equação que tem a seguinte forma:

$$\log_{10} CME = PC + CRC + AADTC + MC + \gamma_1 \times MHI + \gamma_2 \times ADP$$

na qual:

- Constante poluente (PC) – Constante associada ao poluente;
- Constante climática (CRC) – Constante associada à localização geográfica;
- Constante de tráfego rodoviário (AADTC) – Constante associada ao tráfego;
- Constante do mês (MC) – Constante associada ao mês em que se realizou a monitorização;
- Precipitação máxima horária (MHI em mm/h) – Maior valor de precipitação horário de um evento;
- Período seco antecedente (ADP em horas) – Período entre dois eventos que provocam escorrência.

4.3 Modelo de Kayhanian

Em [10] foi proposto um modelo de regressão linear múltipla para prever CME. Esta equação teve como base várias monitorizações de 34 estradas do estado da Califórnia, tendo como parâmetros de entrada:

- Altura de água do evento de precipitação (TER em mm) – Precipitação de cada evento;
- Período seco antecedente (ADP em dias) – Período entre dois eventos que provocam escorrência;
- Chuva característica de uma estação (CSR em mm) – Chuva associada a uma estação do ano;
- Área de drenagem (DA em ha) – Área que contribui para a escorrência;
- Tráfego diário (AADT em veículos/dia) – Número de veículos que passam no troço por dia.

A equação tem a seguinte forma:

$$\ln CME = \beta_0 + a \times \ln(TER) + b \times \ln(ADP) + c \times \sqrt[3]{CSR} + d \times \ln(DA) + e \times (AADT \times 10^{-6})$$

4.4 SELDM

O SELDM (*Stochastic Empirical Loading and Dilution Model*) foi desenvolvido pela *Federal Highway Administration* dos Estados Unidos da América e usa aproximações analíticas para estimar os potenciais efeitos dos poluentes de uma escorrência rodoviária nos meios recetores ([11]).

Este modelo prevê CME, caudais e cargas poluentes de cada evento de precipitação. Usando como dados de entrada informações baseadas nas características do local, área de drenagem, altura de água do evento de precipitação, caudal, qualidade da água e performance das medidas de mitigação. Este modelo, disponível através de uma interface gráfica, gera distribuições estatísticas de qualidade de escorrências ([11]).

O SELDM usa uma base de dados de escorrências rodoviárias, dos Estados Unidos da América, que contém dados de mais de 4 000 eventos de precipitação. Estes dados são posteriormente tratados pelo modelo, o qual, utilizando o método de Monte Carlo, gera outputs de CME, como dito em [12].

4.5 Modelo proposto

Tendo em conta o conjunto de dados de entrada caracterizados no Quadro 2, foi desenvolvida e calibrada uma nova equação multiparamétrica de previsão de SST (mg/L), cobre (µg/L), zinco (µg/L), chumbo (µg/L) e cádmio (µg/L). Tendo como principal premissa ser baseada em parâmetros de fácil acesso ao utilizador. A nova equação toma a seguinte forma:

$$\ln(CML) = \delta_1 + \delta_2 \times DA + \delta_3 \times DL + \delta_4 \times IF + \delta_5 \times P_{\text{annual}} + \delta_6 \times AADT$$

Os coeficientes da equação são os apresentados no Quadro 3.

Quadro 3. Coeficientes de correlação.

	δ_1	δ_2 (DA) $\times 10^{-5}$	δ_3 (DL)	δ_4 (IF)	δ_5 (P ^{annual}) $\times 10^{-3}$	δ_6 (AADT) $\times 10^{-5}$
SST (mg/L)	-0,804	-2,6	0,00185	2,089	3,128	-0,7
Cobre (µg/L)	0,677	-1,9	0,00057	0,672	2,530	0,5
Zinco (µg/L)	4,101	-4,1	0,00102	0,455	0,785	-0,9
Chumbo (µg/L)	-2,333	-0,6	0,00003	2,071	4,048	0,9
Cádmio (µg/L)	-6,596	3,3	0,00012	3,342	4,994	-2,3

5 RESULTADOS DA UTILIZAÇÃO DOS MODELOS

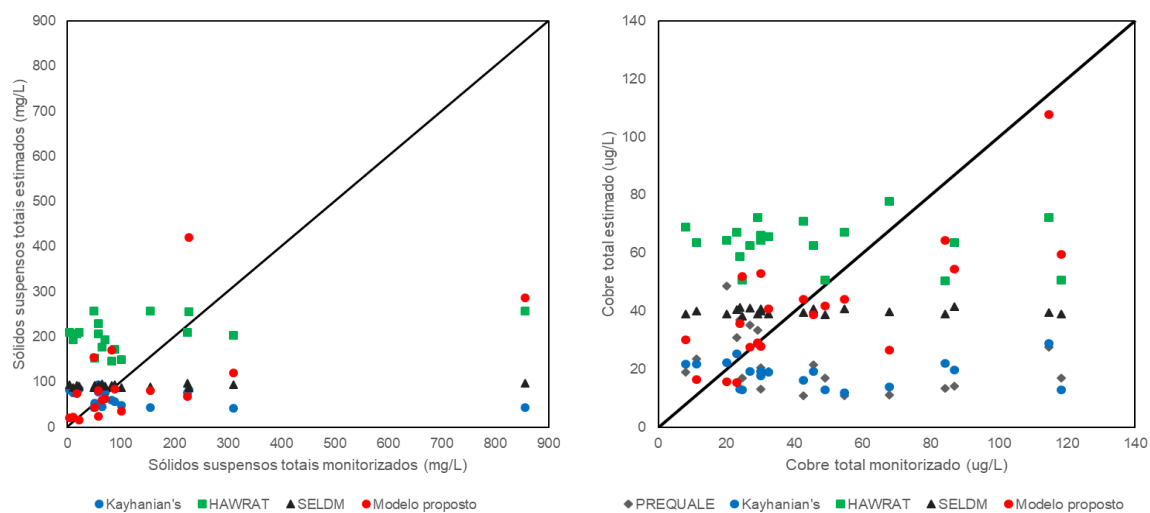
A implementação dos quatro modelos que permitem o cálculo das CME requereu um pré-tratamento da informação, nomeadamente através da análise de séries de precipitação horária, utilizando uma folha de cálculo que permitiu:

- a recolha e identificação dos eventos de precipitação em cada série de precipitações horária;
- o cálculo dos parâmetros associados a eventos: precipitação de cada evento; precipitação máxima horária e período seco antecedente;
- o cálculo dos parâmetros não associados diretamente a um evento de precipitação: precipitação anual média no local; precipitação característica da estação do ano; volume médio anual da chuvada com duração idêntica ao tempo de concentração da bacia.

Considerando as variáveis relacionadas com a precipitação e com o local e configuração da estrada (*e.g.* área de drenagem, tráfego médio diário, fração impermeável), obtiveram-se todos os parâmetros necessários para a implementação dos modelos.

Após o cálculo das CML de cada estrada, para cada poluente, estes foram comparados com as CML monitorizadas.

Os resultados da comparação dos modelos em estudo com os valores monitorizados são apresentados graficamente na Figura 2.



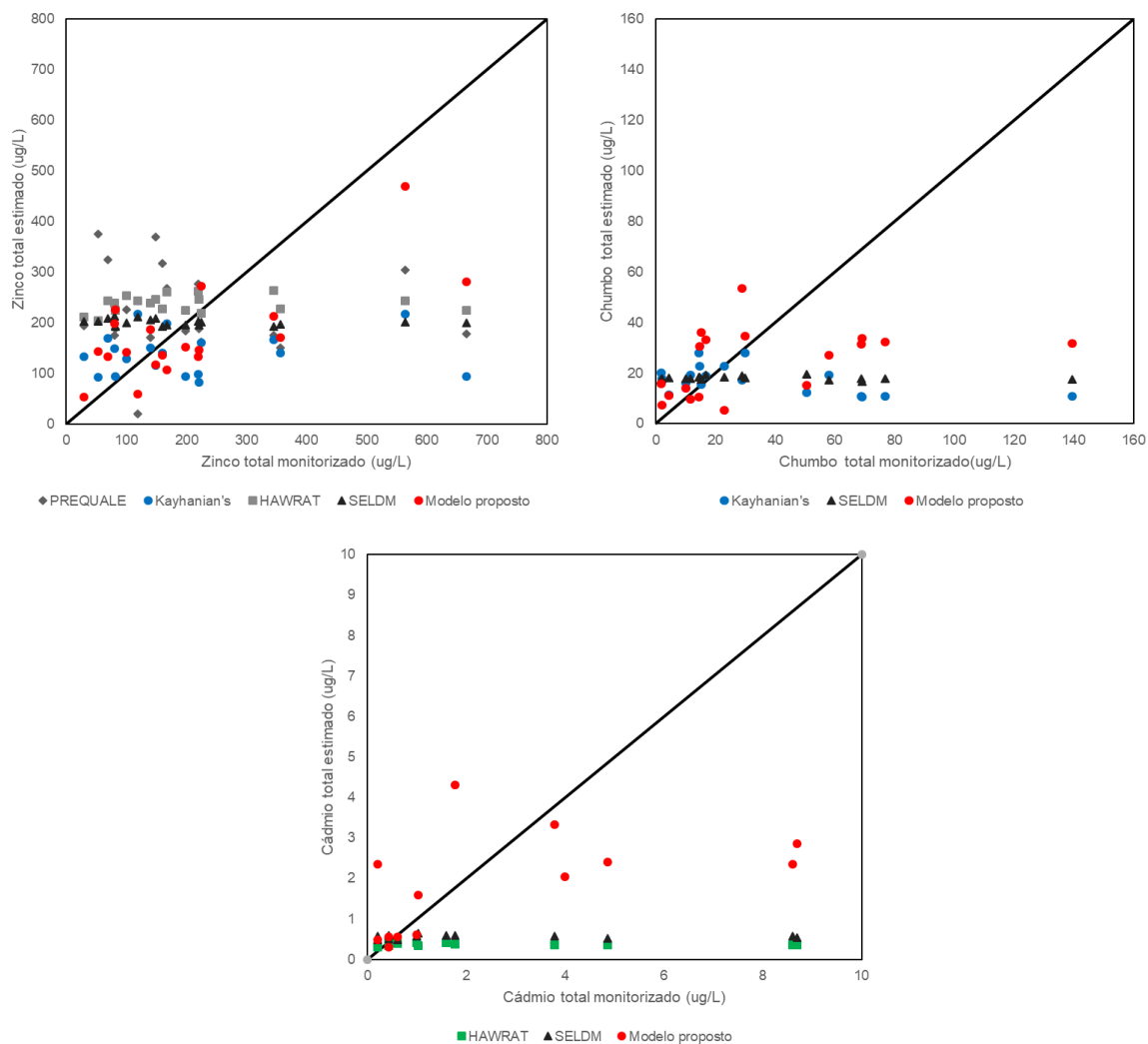


Figura 2. Comparação dos resultados das monitorizações com as estimativas dos modelos

Através da análise dos gráficos anteriores, conclui-se que os resultados não são satisfatórios. De qualquer forma, para uma análise comparativa entre os resultados dos modelos, procedeu-se ao cálculo dos seguintes parâmetros: (i) Coeficiente de determinação; (ii) Coeficiente de Nash-Sutcliffe; (iii) Coeficiente de massa residual e (iv) Raiz do erro quadrático médio. Os resultados para os cinco modelos considerados são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4. Tabela de erros calculados.

		Índices de Erro			
		R ²	ENS	CRM	RMSE
SST	HAWRAT	0,1682	-0,008	-0,500	193,517
	Kayhanian	0,1468	-0,216	0,524	212,501
	SELDM	0,1803	-0,041	0,329	196,671
	Novo modelo	0,3550	0,317	0,258	159,298
Cobre	PREQUALE	0,1219	-0,916	0,523	43,549
	HAWRAT	0,0209	-0,435	-0,377	37,692
	Kayhanian	0,0019	-0,792	0,591	42,112
	SELDM	0,0004	-0,042	0,137	32,123
	Novo modelo	0,5840	0,548	0,107	21,142

Zinco	PREQUALE	0,0087	-0,377	-0,077	193,738
	HAWRAT	0,0111	-0,021	-0,142	166,839
	Kayhanian	0,0072	-0,192	0,330	180,262
	SELDM	0,0685	-0,023	0,032	166,973
	Novo modelo	0,5110	0,447	0,154	122,772
Chumbo	Kayhanian	0,2890	-0,461	0,509	42,047
	SELDM	0,0575	-0,254	0,488	38,961
	Novo modelo	0,1560	0,053	0,317	33,865
Cádmio	HAWRAT	0,0127	-0,658	0,866	3,778
	SELDM	0,0039	-0,551	0,796	3,654
	Novo modelo	0,2600	0,154	0,333	2,698

6 CONCLUSÕES

Com o desenvolvimento deste trabalho, foi possível retirar várias conclusões relativas às concentrações de poluentes associados às escorrências rodoviárias. Regista-se a lacuna de um instrumento legal que regule e controle especificamente este tipo de poluição difusa. A legislação normalmente utilizada (Decreto-Lei n.º 236/98, de 01 de Agosto) é um mero indicador visto ser destinada a descargas pontuais de poluição, cujas águas residuais apresentam características que em muito diferem das escorrências rodoviárias.

Os quatro modelos estudados neste trabalho são pouco robustos na estimativa das concentrações de poluentes de outras estradas que não no âmbito do contexto em que foram estabelecidos. Partindo da estimativa das concentrações de poluentes, e tendo em conta a vulnerabilidade dos meios recetores, os modelos SELDM e HAWRAT permitem analisar a necessidade de tratamento dos efluentes.

O modelo criado apresenta resultados satisfatórios para o conjunto de estradas para o qual foi desenvolvido. Mesmo tendo em conta a gama limitada de estradas que deram origem ao modelo, considera-se que este pode constituir-se numa ferramenta útil na estimativa de concentrações de poluentes para casos em que não seja possível proceder a campanhas regulares de monitorização e em que a informação disponível seja limitada.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. OJEC (2000) Jornal Oficial da comunidade Europeia. Diretiva 2000/60/EC do Parlamento Europeu e do Conselho (2000). Acedido a 10 de Junho de 2018 através de <https://eur-lex.europa.eu>
2. Barbosa, A. E., Almeida, L. V., Antunes, P. B., Baguinho, R., Fernandes, J. N., Jessica, C., Ramísio, P. J., Vieira, J., Whitehead, M., & Telhado, A. (2011) Directrizes para a Gestão Integrada das Águas de Escorrência de Estradas em Portugal. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, Portugal, Europress, Lda.
3. Higgins, N. (2006). Analysis of highway runoff in Ireland. Tese de Doutoramento, Trinity College Dublin
4. Kayhanian, M., Fruchtmann, B. D., Gulliver, J. S., Montanaro, C., Ranieri, E., & Wuertz, S. (2012). Review of highway runoff characteristics: Comparative analysis and universal implications. *Water Research*, 46(20), 6609–6624.
5. Winkler, M. (2005). The characterization of highway runoff water quality. Tese de Mestrado, University of Graz
6. Hvitved-Jacobsen, T., & Youssef, Y. (1991). Capítulo 5 Highway runoff quality, environmental impacts and control. In Hamilton R.S., Harrison, R.M. (Eds.). *Studies in Environmental Science*, 44, pp. 165-208
7. Galhardo, D. (2018). Tools to predict road runoff pollution. Tese de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa.
8. Crabtree, B., Dempsey, P., Moy, F., Brown, C., Song, M. (2008). Improved determination of pollutants in highway runoff. Etapa 3 do relatório final. United Kingdom Highways Agency.

9. Dempsey, P., e Song, M. (2008). Improved determination of pollutants in highway runoff. Etapa 4 do relatório final. United Kingdom Highways Agency.
10. Kayhanian, M., Suverkropp, C., Ruby, A., & Tsay, K. (2006). Characterization and prediction of highway runoff constituent event mean concentration. *Journal of Environmental Management*, 85, 279–295.
11. Granato, G. (2013). Stochastic Empirical Loading and Dilution Model (SELDM) Version 1.0.0. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, No. 4, Ch. C3, 112 pp.
12. Gardiner, L.R., Moores, J., Osborne, A., Semadeni-Davies, A. (2016). Risk assessment of road stormwater runoff. New Zealand Transport Agency. Wellington, New Zealand: ARRB Group Ltd.