



II-351 – HYDRAULIC /KINETIC MODELLING AND INFLUENCE OF OPERATIVE PARAMETERS ON REMOVAL EFFICIENCY IN BRAZILIAN SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLAND

Giorgio Luciano Vitali⁽¹⁾

Engenheiro Ambiental pelo Politecnico de Milão. Pesquisador pelo DIIAR, Politecnico de Milão.

Elena Ficara

Professor Associado pelo Politecnico de Milão

Débora Parcias Olijnyk

Engenheira Sanitarista e Ambiental e Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Luiz Sergio Philippi

Professor Titular da Universidade Federal de Santa Catarina(UFSC)

Daniel Costa Dos Santos

Professor Titular da Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Endereço⁽¹⁾: via Cesare da Sesto 43, Sesto San Giovanni –MI- C.A.P. 20099 Italia – Tel 00393287056244 e-mail: giorgio-vitali@hotmail.com

RESUMO

A falta de saneamento (em particular a falta de tratamento de esgotos) é a fonte de diversos impactos no Brasil, especialmente nas zonas rurais, onde 97% da população não é servida pelo sistema de esgotos. O wetland construído (WC) é uma tecnologia natural, sustentável e eficiente que pode ser uma forte resposta ao problema da falta de tratamento dos esgotos. Hoje em dia, porém, esta tecnologia não é suficientemente difundida no Brasil como mereceria, principalmente porque não existem diretrizes nacionais e critérios de dimensionamento confiáveis baseados em experiências locais. Com o objetivo de contribuir ao desenvolvimento dessa tecnologia no Brasil, este estudo avalia seja o desempenho de diferentes modelos hidráulico- cinéticos na interpretação de dados de WC locais, seja a influência dos principais parâmetros operacionais dos WC (tais como temperatura, concentração de entrada, superfície específica e outros) sobre a eficiência de remoção da DBO, DQO, SST, NH_4^+ e PO_4^- através do desenvolvimento de matrizes de correlação. Para alcançar os objetivos deste trabalho, foi criada uma base de dados com informações relativas à 31 WC de fluxo subsuperficial (sendo 13 de fluxo vertical e 18 de fluxo horizontal) operantes exclusivamente na parte Sul do Brasil. Mediamente, os sistemas considerados têm bons rendimentos em relação a remoção de DBO (70%), DQO (68%) e SST (58%), enquanto a remoção de NH_4^+ (8%) e PO_4^- (14%) foi baixa. Além disso, precisa salientar que os sistemas são freqüentemente caracterizados por uma grande variabilidade que tornou bem difícil a modelagem: de facto, os modelos têm um desempenho insuficiente. A partir da análise das matrizes de correlação, não foi encontrado nenhum efeito da temperatura. Pelo contrário, a remoção da matéria orgânica parece ser diretamente dependente da concentração do afluente e do tempo de retenção hidráulica. Este estudo demonstrou o ótimo potencial de aplicabilidade dos filtros plantados com macrófitas, especialmente em um ambiente como o rural do sul do Brasil. Todavia, foi também demonstrada a insuficiência dos modelos hidráulico-cinéticos e foram dadas indicações úteis para poder desenvolver futuros modelos

PALAVRAS-CHAVE: wetland construído, filtro plantado, modelagem.

INTRODUÇÃO

A falta de saneamento básico é um grande problema a nível mundial e o primeiro problema ambiental no Brasil, com graves implicações higiênico-sanitárias, econômicas e sociais. De acordo com os dados do censo da IBGE feito em 2000 (PNAD, 2000), existe uma estatística preocupante que demonstra a gravidade da falta de tratamento: dos 1963 municípios brasileiros com mortalidade infantil elevada, a população que vive sem qualquer tipo de tratamento de resíduos é igual a 74%. Segundo um estudo realizado pela Fundação Getúlio Vargas (FGV), estima-se que em 2006, cerca de 53% da população brasileira não recebeu qualquer tipo de tratamento de resíduos, e o dado ainda mais alarmante se encontra nas áreas rurais, onde apenas o 2,9 % da



população está conectada à rede de esgotos. Apesar dos dados atestarem que nos últimos anos as condições higiênico-sanitárias no Brasil melhoraram, existe um atraso considerável na situação do saneamento básico no Brasil: os investimentos neste setor por parte do governo foram historicamente inadequados, também por causa dos compromissos feitos com o Fundo Monetário Internacional, que não considera as despesas nesta área como despesas para a saúde pública, mas como aumento do déficit público.

Em tal contexto, portanto, é necessário desenvolver tecnologias que possam contribuir para encarar este problema. Os filtros plantados (ou wetland construídos –WC) são uma resposta válida para a dramática falta de tratamento das águas residuais, que afeta em particular as grandes áreas rurais do Brasil. De fato, como nessas áreas não existem problemas de falta de espaço e por outro lado há necessidade de tecnologias simples, econômicas e que exigem pouca energia, o uso dos filtros plantados destaca-se como uma ótima alternativa, viável, natural, sustentável e eficaz. Todavia esta é uma tecnologia ainda jovem, especialmente no Brasil, onde não foram desenvolvidos muitos estudos sobre esse assunto, e onde não existem muitas aplicações reais. No Brasil não existem diretrizes oficiais relativas aos filtros plantados como acontece, com algumas exceções, nos Estados da Europa. As diretrizes dos países europeus sugerem um dimensionamento simples, utilizando relações m^2/hab que não consideram o efeito dos diversos parâmetros operacionais e ambientais que influenciam o comportamento dos filtros plantados. Como alternativa às indicações m^2/hab são aplicados simples modelos hidráulicos cinéticos. O dimensionamento dos filtros plantados no Brasil é geralmente feito através da adoção desses critérios produzidos na Europa ou nos EUA. De fato, a eficácia do filtro plantado (e das unidades de tratamento em geral) não pode isentar-se do correto dimensionamento que, para isso, exige uma boa modelagem inicial. Nos últimos anos, têm sido feitos vários esforços nesse sentido, e foram gerados rigorosos modelos, mais complexos e de difícil execução, que exigem grandes quantidades de dados para a sua calibração e não podem ser traduzidos em critérios de dimensionamento. Existe uma grande discrepância entre as meras indicações m^2/hab propostas pelas diretrizes e os complexos modelos desenvolvidos por pesquisadores.

Este estudo, desenvolvido por meio de uma colaboração entre Universidade Federal do Paraná, Universidade Federal de Santa Catarina e Politécnico de Milão, propõe-se ao objetivo de avaliar a aplicabilidade de simples modelos hidráulicos cinéticos para a realidade brasileira, estimando parâmetros que maximizam o desempenho destes modelos. Além disso, foram implementadas várias matrizes de correlação para avaliar a eventual correlação entre o desempenho de remoção de DQO, DBO, SST, NH_4^+ e PO_4^- com os parâmetros operacionais de interesse. Em última análise, este estudo visa contribuir para o desenvolvimento dos filtros plantados no Brasil.

MATERIAIS E MÉTODOS

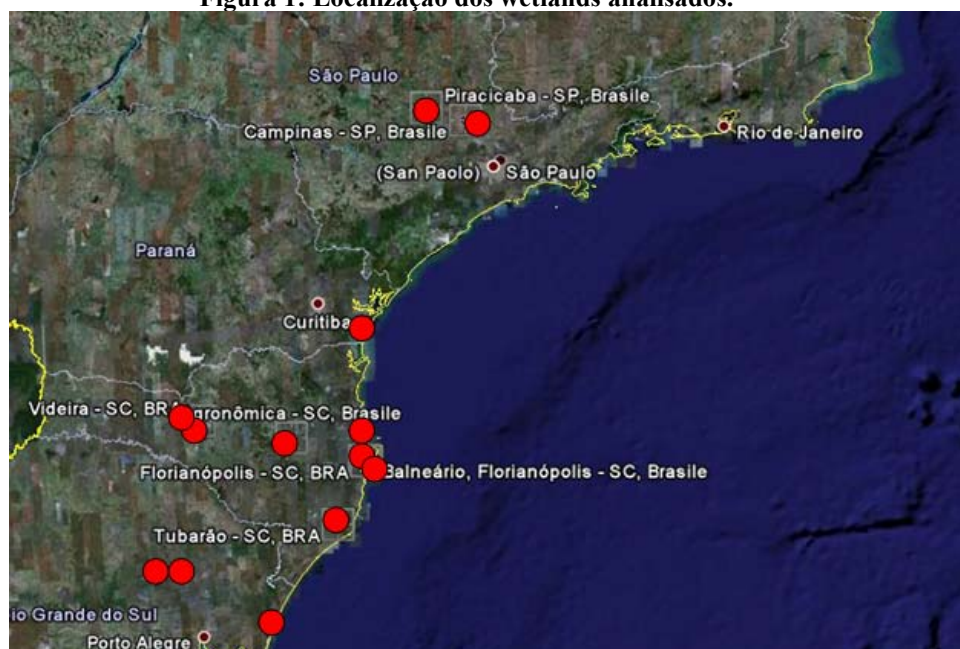
O trabalho é organizado em três etapas que serão descritas a seguir.

PRIMEIRA ETAPA: IMPLEMENTAÇÃO DA BASE DE DADOS

Para alcançar os objetivos deste trabalho, foi criada uma base de dados através de um levantamento de informações da literatura relativos a 30 wetlands de fluxo subsuperficial (sendo 13 de fluxo vertical e 18 de fluxo horizontal). Os parâmetros levantados compreendem, além das concentrações do afluente e do efluente em termos de DQO, DBO, SST, NH_4^+ e PO_4^- , as características dos sistemas, tais como o volume, a vazão, a porosidade do meio filtrante e também a temperatura relativa ao dias dos levantamentos. Ainda foi realizado o monitoramento de um wetland de fluxo vertical em escala real, que recebe o efluente de uma pousada na Lagoa da conceição em Florianópolis/SC. As 31 unidades estudadas foram implantadas nas regiões Sudeste e Sul do Brasil, nos seguintes Estados: São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. A Figura 1 destaca a localização dos sistemas avaliados.



Figura 1: Localização dos wetlands analisados.



SEGUNDA ETAPA: AVALIAÇÃO DOS MODELOS

Os modelos avaliados no presente estudo estão apresentados na Tabela 1. A avaliação se deu em relação à remoção de DBO, DQO, NH_4^+ e PO_4^- .

Tabela 1: Modelos considerados neste trabalho.

Fluxo pistão	Modelo K – C*	Mistura completa	Tanques em série	Regressão linear
$C_e = C_o \exp(-K_T t)$	$\frac{C_e + C^*}{C_o + C^*} = \exp(-K_T t)$	$C_e = \frac{C_0}{1 + K_T t}$	$C_e = \frac{C_0}{\left(1 + \frac{K_T t}{N}\right)^N}$	$C_e = b + mC_0$
Ce = concentração efluente (mg/L); Co = concentração afluente (mg/L); C* = concentração base (<i>background</i>) (mg/L); K _T = constante de reação da cinética de 1ª ordem – dependente da temperatura T (d ⁻¹); t = tempo de retenção hidráulica (d); N = numero de tanques; b, m = parâmetros.		De acordo com a equação simplificada Arrhenius, K _T depende da temperatura do seguinte modo: $K_T = K_{20} \times \theta^{(T-20)}$ K ₂₀ = constante de reação à temperatura de 20 °C; θ = fator de correção da temperatura; T = temperatura do efluente.		

Estes modelos foram escolhidos porque os parâmetros dos mesmos podem ser estimados pelos dados disponíveis no banco de dados do presente estudo. Além disso, são modelos que podem ser encontradas referências na literatura passíveis de comparação.

Os parâmetros do modelo (p_i) foram estimados pelo método da minimização dos erros dos mínimos quadrados, por meio da Equação 1.

$$p_i \mid \min \{SSE = \sum (Y_{obs} - Y_{est})^2 = f(p_i)\} \quad \text{Equação 1}$$

O desempenho dos modelos tem sido avaliado pelo coeficiente de determinação R^2 (Equação 2):



$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Y_{obs} - Y_{est})^2}{\sum(Y_{obs} - Y_{médobs})^2} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

- Y_{obs} : valor observado;
- Y_{est} : valor estimado pelo modelo;
- $Y_{médobs}$: média dos valores observados.

TERCEIRA ETAPA: AVALIAÇÃO DAS CORRELAÇÕES ENTRE OS PARÂMETROS OPERACIONAIS

Com o objectivo de pesquisar possíveis correlações entre os principais parâmetros operacionais dos WC analisados, matrizes de correlação foram desenvolvidas utilizando o *software Statistica* (Stat Soft Inc). Foram avaliadas correlações entre os seguintes parâmetros:

- η = eficiência de remoção (%);
- $\sigma \eta$ = desvio padrão da eficiência da remoção (%);
- T = temperatura (°C);
- CV T = coeficiente de variação da temperatura
- TRH = tempo de retenção hidráulica (d);
- Taxa = Taxa hidráulica (cm/d);
- m^2/hab = área superficial recomendada por habitante;
- C = concentração afluenta (mg/L);
- CVC = da concentração do afluenta;
- $Carga_s$ = Carga superficial aplicada ($mg/m^2.d$);
- $CVCarga_s$ = coeficiente de variação da carga superficial aplicada;
- $Carga_v$ = Carga volumétrica aplicada ($mg/m^3.d$);
- $CVCarga_v$ = coeficiente de variação da carga volumétrica aplicada;

σ = desvio padrão;
 μ = valor médio.

Onde:

$$CV = \sigma / \mu$$

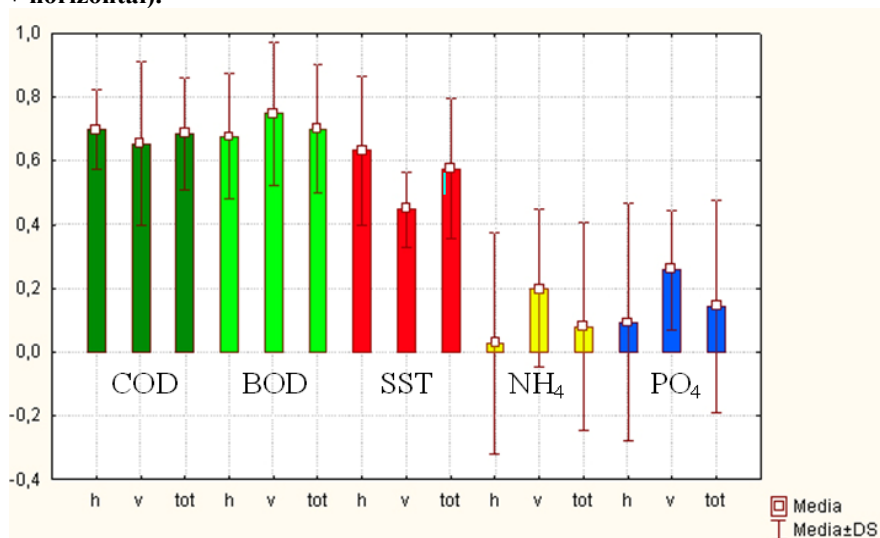
RESULTADOS OBTIDOS

Os WC analisados, como mostrado na Figura 2, apresentam uma eficiência satisfatória na remoção de DBO e de DQO. Entretanto, em relação à remoção de NH_4^+ , os valores observados são baixos, mesmo para os módulos de fluxo vertical.

Convém destacar que a maioria dos WC analisados possuem uma baixa relação m^2/hab (geralmente $1 m^2/hab$), enquanto que a literatura recomenda um valor de $3.5 m^2/hab$ (Cooper et. al, 1999). Além disso, foi notado que as concentrações afluentes variam notavelmente até chegar a valores muito elevados (por exemplo, $C_{afluente}$ em termos de DBO do WC de São Joaquim/SC = 207 mg/L; $C_{afluente}$ em termos de DBO do WC de Agrônômica/SC = 993 mg/L). Isso quer dizer que os poluentes são mais ou menos concentrados, devido, principalmente, aos diferentes hábitos das populações locais.



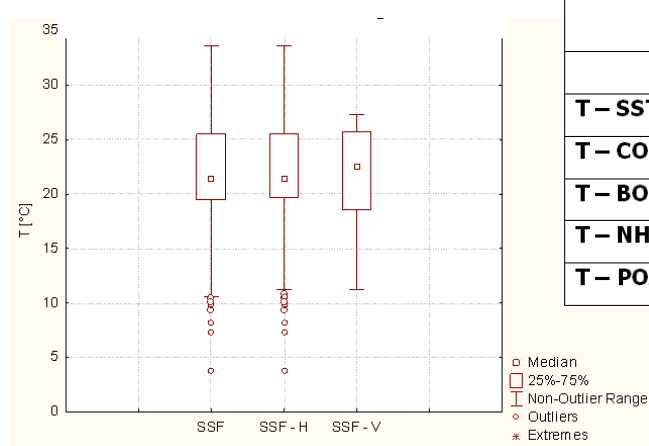
Figura 2: Eficiência de remoção dos WC analisados (onde: h = fluxo horizontal; v = fluxo vertical; tot = vertical + horizontal).



No geral, os modelos exibiram um baixo desempenho. Na metade dos casos, os valores estimados mostraram-se fora da gama dos valores típicos encontrados na literatura. Nos demais casos, não houve diferença significativa entre os modelos fluxo pistão e mistura completa, enquanto que o modelo tanques em séries apresentou sempre o pior desempenho. A utilização da concentração base $C^* > 0$ sempre melhorou o desempenho dos modelos. Inesperadamente, as estimativas de θ foram frequentemente inferior a 1, apresentando-se em contraste com o comportamento normal dos bioreatores exotérmicos.

A matriz de correlação (figura 3) não aponta nenhuma relação entre a temperatura e a eficiência da remoção de todos os poluentes. Como mostrado na figura 3, a temperatura variou dentro de uma faixa estreita e ótima para atividade biológica.

Figura 3: Gráfico do tipo box plot das temperaturas dos WC e matriz de correlação entre a eficiência de remoção e a temperatura, onde n = número de amostras e r = coeficiente de correlação.



	SSF		SSF - H		SSF - V	
	n	r	n	r	n	r
T – SST	501	0,13	432	0,12	69	0,02
T – COD	534	-0,02	436	-0,04	98	0,15
T – BOD	89	-0,21	55	-0,24	33	-0,03
T – NH₄⁺	538	-0,13	436	-0,13	101	-0,16
T – PO₄⁻	519	-0,07	437	- 0,05	81	- 0,14

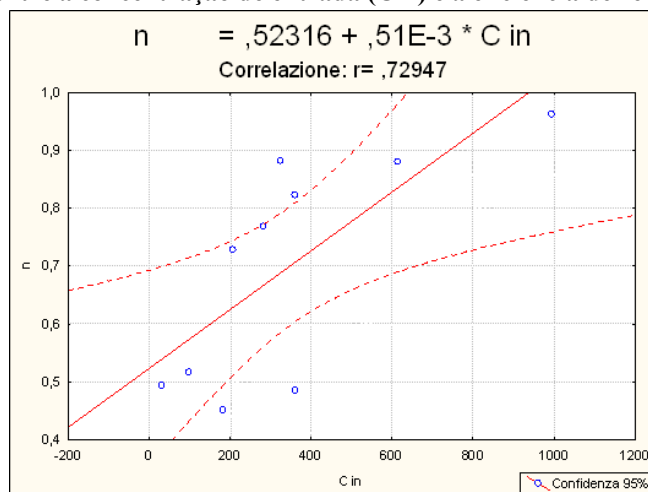
A partir da análise das matrizes de correlação foram obtidos os seguintes resultados:

- Uma boa relação inversa entre a eficiência de remoção e o do desvio-padrão do mesmo parâmetro para todos os poluentes analisados. Isto significa que, em geral, um WC com um bom desempenho

também apresenta um desempenho constante. Isso sugere que, se forem bem dimensionados e implantados, os WC podem alcançar um bom, constante e, então, confiável desempenho.

- Uma boa correlação direta entre tempo de residência hidráulico e a eficiência de remoção, especialmente para a remoção do DQO. Este resultado foi bastante previsível.
- Uma inesperada correlação entre a concentração afluyente e a eficiência de remoção, especialmente para a remoção de DBO (Figura 4) e de DQO, seja para fluxo vertical, seja para fluxo horizontal. Isso comprova a inadequação da cinética de ordem zero (para a qual a eficiência de remoção é inversamente dependente da concentração do influente) e, ao mesmo tempo, também levanta dúvidas sobre a adequação do pressuposto da degradação de primeira ordem (onde a eficiência de remoção não é dependente da concentração afluyente). Como mencionado anteriormente, as concentrações afluentes variaram muito, até chegar a valores bastante elevados. Porém as elevadas concentrações afluentes não afetaram negativamente o desempenho do sistema como poderia ser esperado, aliás, parecem melhorar o desempenho do WC.

Figura 4: Correlação entre a concentração de entrada (C_{in}) e a eficiência de remoção (η) da DBO.



CONCLUSÕES/ RECOMENDAÇÕES

Este trabalho destaca a inadequação dos atuais critérios de dimensionamento: os modelos hidráulico-cinéticos não apresentaram um bom desempenho e não foi encontrada uma forte relação entre a razão m^2/hab e a eficiência de remoção. Algumas sugestões que podem ser utilizadas em obras futuras são propostas. Em particular, não foi encontrado nenhum efeito da temperatura. Pelo contrário, a remoção da matéria orgânica parece ser diretamente dependente da concentração do afluyente e do tempo de retenção hidráulica.

No geral, os 31 WC analisados mostraram uma boa remoção de DBO e de DQO, mas uma baixa eficiência na remoção dos nutrientes. Deve ser salientado que alguns destes WC garantiram um ótimo e constante desempenho.

Para poder melhorar o conhecimento do comportamento dos WC, cujo desempenho depende das condições ambientais locais, adicionais medidas em campo são sugeridas para enriquecer o banco de dados. Em estudos futuros, recomenda-se de considerar os dados de evapotranspiração e de precipitação, porque os mesmos afetam o balanço hidrológico dos wetlands e, portanto, a eficiência de remoção dos poluentes.

Os esforços devem ser dedicados a desenvolver modelos confiáveis e aplicáveis, cujo principal objetivo deve ser a produção de critérios de design confiáveis, os quais são a essência das necessárias diretrizes nacionais.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. COOPER P., THORNTON A., PEARCE G. Constructed wetlands to remove pollutants in drainage water – The potential for application of constructed wetlands in the water cycle in developing countries; 1999.
2. LANGERGRABER Modelling of processes in Subsurface Flow Constructed wetlands: a review. Vadose zone journal, Vol.7, no. 2. 2008.
3. PNAD, Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios, Disponível em: www.ibge.com.br, 2000