bluewwater

CONTROL, TRATAMIENTO Y REDUCCIÓN DE MICRO PLÁSTICOS
Y CONTAMINANTES EMERGENTES EN AGUAS RESIDUALES
URBANAS Y EN EL MEDIO COSTERO FRONTERIZO

WORKSHOP BLUEWWATER

Tratamento avançado de águas residuais

- Demonstração à escala piloto em ETAR Municipal -

Ana Isabel Gomes
FEUP · LSRE–LCM · ALiCE

Interreg
España – Portugal
Cofinanciado por la Unión Europea
Cofinanciado pela União Europeia
blue wwater

WORKSHOP FINAL
05/NOVEMBRO/ 2026

· FEUP ·
TRATAMENTOS ESCALA PILOTO

DEMONSTRAÇÃO DE TRATAMENTO AVANÇADO À ESCALA PILOTO

Remoção de micropoluentes e produção de água para reutilização numa ETAR municipal.


Vítor Vilar


Ana Gomes


Carla Santos


Bárbara Sousa

Parceiros:

Porto. Águas e Energia do Porto

USC Universidade de Santiago de Compostela

U.PORTO FC Faculdade de Ciências Universidade do Porto

ciimar Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental

Interreg España – Portugal

Cofinanciado por la Unión Europea
Cofinanciado pela União Europeia

blue water

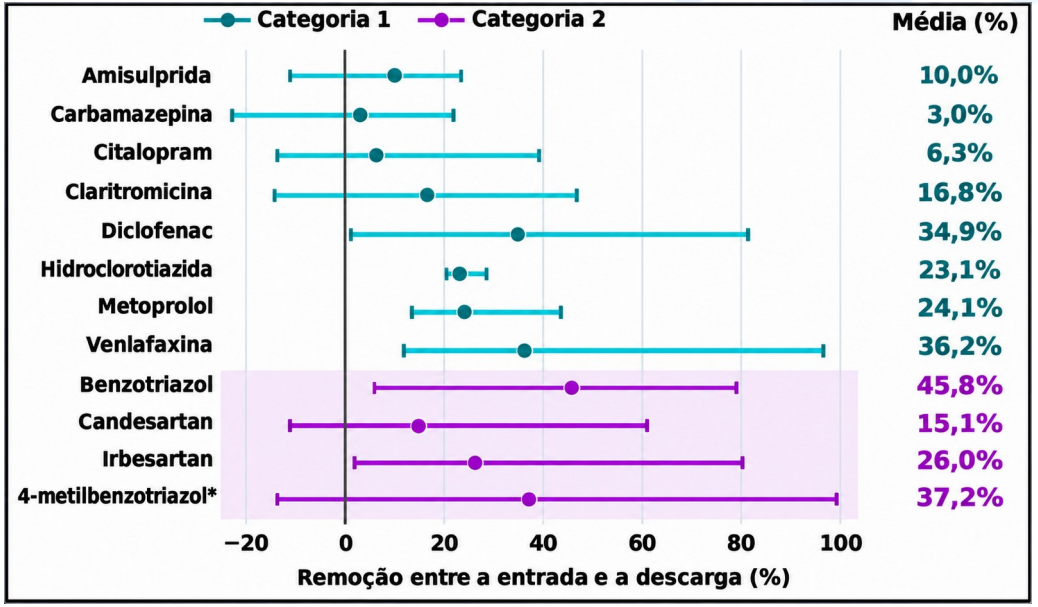
· FEUP ·
RESULTADOS À ESCALA PILOTO

REMOÇÃO DOS MICROPOLUENTES DA DIRETIVA NAS ETAR MONITORIZADAS

Monitorização em 5 ETAR:
4 na Galiza e 1 Norte de Portugal

Porque é necessário tratamento adicional?

A remoção limitada dos indicadores reforça a necessidade de tratamento quaternário para atingir os objetivos da Diretiva (EU) 2024/3019.



Ponto: média das cinco ETAR. Segmento: mínimo–máximo.

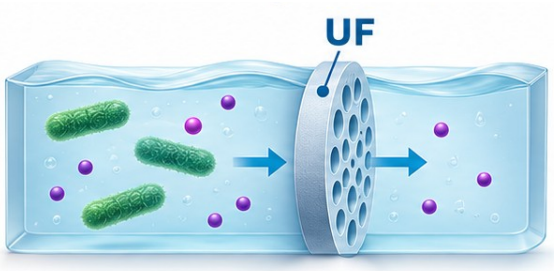
Interreg
España – Portugal
Cofinanciado por la Unión Europea
Cofinanciado pela União Europeia
blue water

· FEUP ·
TRATAMENTOS ESCALA PILOTO

TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO AVANÇADAS AVALIADAS

MBR

Tratamento biológico + ultrafiltração (UF)



Retém microrganismos
Micropoluentes permanecem

Efluente MBR

OZONIZAÇÃO

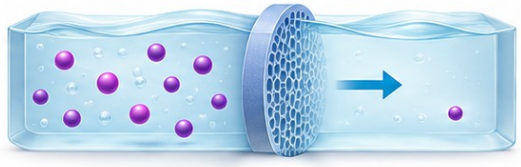
Ozono gasoso dissolvido na água



Oxida e transforma os micropoluentes

NANOFILTRAÇÃO (NF)

Membrana mais seletiva que UF



Retém microrganismos e muitos micropoluentes

Interreg
España – Portugal
Cofinanciado por la Unión Europea
Cofinanciado pela União Europeia
blue water

WORKSHOP FINAL
05/NOVEMBRO/ 2026

· FEUP ·
RESULTADOS À ESCALA PILOTO

FEUP · USC · FCUP · CIIMAR/FCUP



MBR



Ozonização NETmix
FEUP · Tratamento quaternário
Várias condições operacionais



Antes



Após



USC | 24 micropoluentes · 9 indicadores da Diretiva



FCUP | **Rega: alface e milho**
Parâmetros de crescimento, fisiológicos e bioquímicos



CIIMAR/FCUP | Ecotoxicidade · Embriões de peixe-zebra



Nanofiltração
Unidade piloto

Permeado



USC | 57 micropoluentes · 12 indicadores da Diretiva



FCUP | **Rega: alface e milho**
Parâmetros de crescimento, fisiológicos e bioquímicos



CIIMAR/FCUP | Ecotoxicidade · Embriões de peixe-zebra

Concentrado

Caracterização:
57 micropoluentes ·
12 indicadores da Diretiva



Ozonização NETmix
Várias condições operacionais



USC | Remoção de 34 micropoluentes · 12 indicadores da Diretiva



CIIMAR/FCUP | Ecotoxicidade · Embriões de peixe-zebra

· FEUP ·
RESULTADOS À ESCALA PILOTO

EFLUENTE MBR: QUALIDADE PARA REUTILIZAÇÃO

Parâmetro	Intervalo
Turvação (NTU)	**0,15–0,30**
CBO_5 (mg O_2/L)	**<5**
E. coli (NMP/100 mL)	**<1**
COD (mg C/L)	**8,0–9,4**
CQO (mg O_2/L)	**14,2–24,3**



Armazenamento do efluente MBR

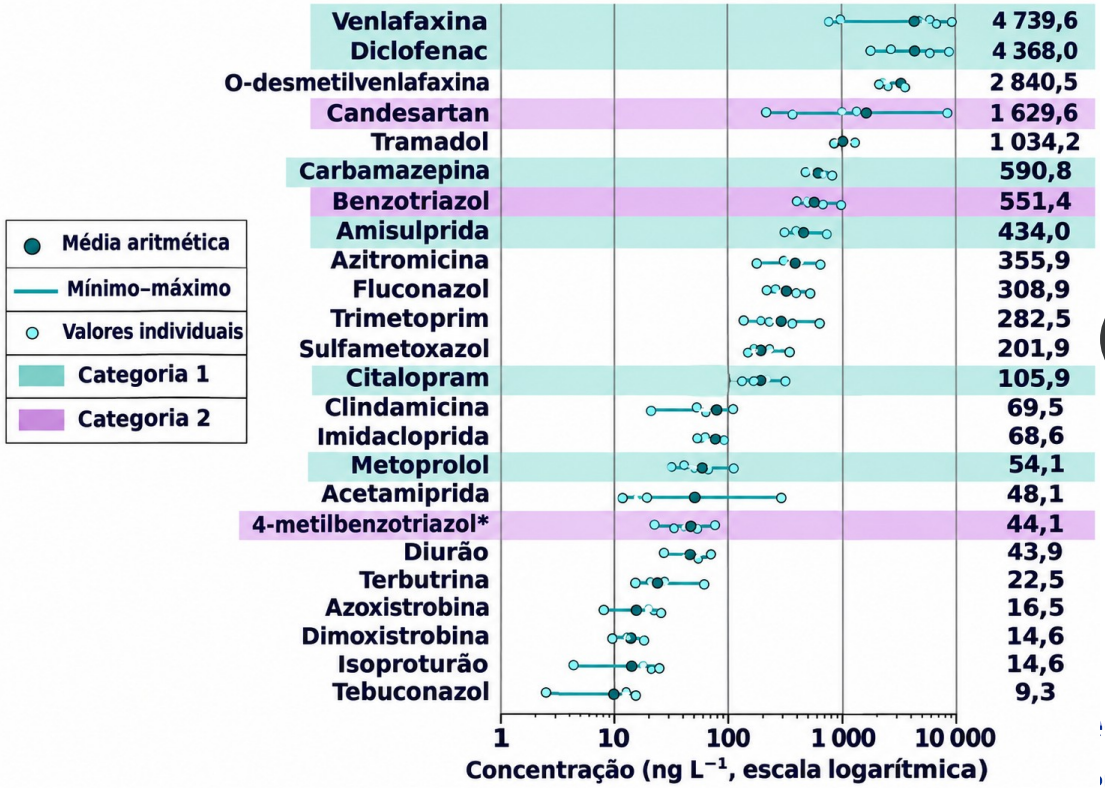
ApR de classe A parâmetros analisados do Regulamento (EU) 2020/741

Interreg
España – Portugal
Cofinanciado por la Unión Europea
Cofinanciado pela União Europeia
blue water

· FEUP ·

RESULTADOS À ESCALA PILOTO

EFLUENTE MBR: MONITORIZAÇÃO DE MICROPOLUENTES



Total 24 MPs
9 ng/L tebuconazol (fungicida)
4,7 µg/L venlafaxina (antidepr.)

∑ concentração 24 MPs
10,0 – 27,6 µg L^{-1}
Média: 17,1 µg L^{-1}

9 dos 24 MPs incluídos na Diretiva (EU) 2024/3019

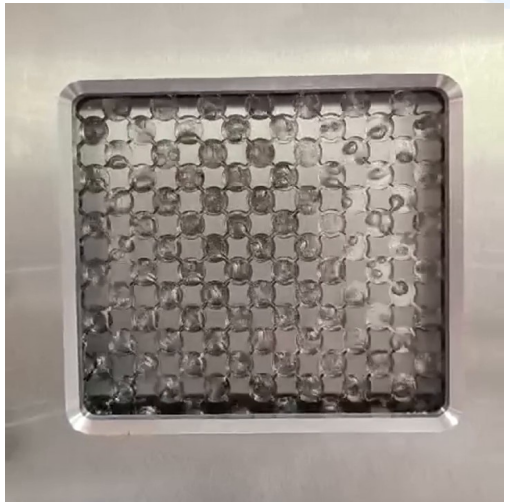
Cofinanciado por la Unión Europea
Cofinanciado pela União Europeia
blue water

· FEUP ·
RESULTADOS À ESCALA PILOTO

OZONIZAÇÃO ASSISTIDA COM MISTURADOR ESTÁTICO NETmix



Sistema piloto de ozonização instalado em ETAR municipal



Mistura gás–líquido no NETmix

Interreg
España – Portugal
Cofinanciado por la Unión Europea
Cofinanciado pela União Europeia
blue water

· FEUP ·
RESULTADOS À ESCALA PILOTO

OZONIZAÇÃO DO MBR: CONDIÇÕES E DESEMPENHO

	1	2	3	4	5	6
Diclofenac	99,7	99,6	99,6	99,6	95,6	99,9
4-metilbenzotriazol	93,5	80,7	97,7	68,6	54,9	54,4
O-desmetilvenlafaxina	86,1	99,6	99,8	99,5	83,5	88,9
Clindamicina	83,7	99,5	99,5	99,4	90,0	91,6
Trimetoprim	78,5	99,7	99,7	99,6	78,8	86,8
Sulfametoxazol	77,8	98,1	98,6	94,6	46,7	73,0
Carbamazepina	73,3	99,5	99,5	99,4	78,1	85,0
Candesartan	69,7	83,4	96,2	70,8	61,7	76,1
Azitromicina	69,5	92,8	95,3	90,2	70,7	81,8
Amisulprida	56,6	91,7	99,9	86,3	66,1	75,6
Tramadol	54,0	83,0	98,0	74,4	50,5	61,7
Citalopram	53,8	77,1	94,0	80,6	51,3	76,0
Venlafaxina	48,5	82,3	96,6	73,7	53,9	71,5
Fluconazol	39,5	32,8	27,9	<10%	51,7	69,1
Benzotriazol	31,0	63,9	84,3	53,3	<10%	43,8
Diurão	29,7	82,8	96,6	79,1	35,9	50,1
Dimoxistrobina	16,5	91,0	88,8	92,0	18,6	21,7
Azoxistrobina	13,0	93,4	95,9	90,2	22,2	28,4
Tebuconazol	12,8	71,4	74,2	72,8	<10%	27,4
Imidacloprida	10,1	28,1	48,5	29,6	34,9	49,3
Acetamiprida	12,0	20,6	39,0	16,4	21,4	22,0
Metoprolol	82,0	85,9	87,9	81,2	44,4	42,1
Terbutrina	<10%	72,9	91,4	73,3	<10%	59,7
Isoproturão	<10%	72,5	82,2	87,4	18,2	17,4

Indicadores da Diretiva: ● Categoria 1 ● Categoria 2

Exp.	Dose de O_3 (g O_3/g COD)	O_3/H_2O_2
1	0,4	-
2	0,7	-
3	0,9	-
4	0,4	-
5	0,4	1/0,50
6	0,5	1/0,75

Ensaio 3: 20 dos 24 micropoluentes com remoções médias >80%, incluindo os nove indicadores da Diretiva.

Interreg
España – Portugal
Cofinanciado por la Unión Europea
Cofinanciado pela União Europeia
blue water

WORKSHOP FINAL
05/NOVEMBRO/ 2026

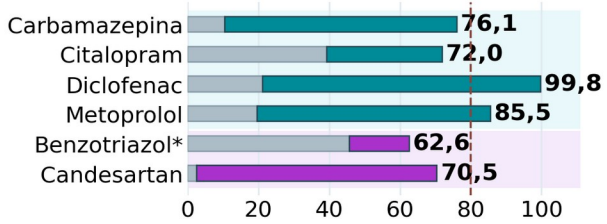
· FEUP ·

RESULTADOS À ESCALA PILOTO

SELEÇÃO DE 6 COMPOSTOS INDICADORES DIRETIVA (EU) 2024/3019

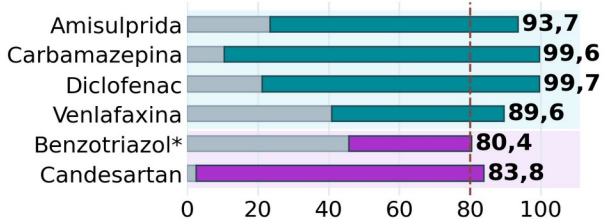
Ensaio 1 · Média: 77,8%

0,4 g O_3/g COD · 5,0 min



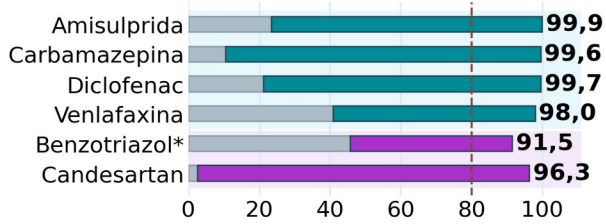
Ensaio 2 · Média: 91,1%

0,7 g O_3/g COD · 8,5 min



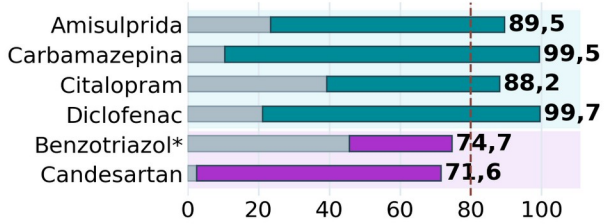
Ensaio 3 · Média: 97,5%

0,9 g O_3/g COD · 13,2 min



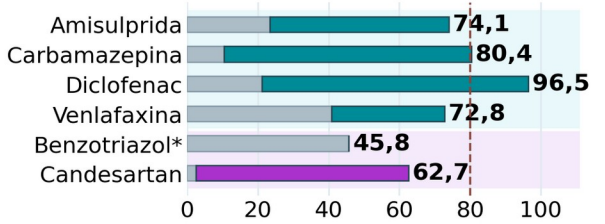
Ensaio 4 · Média: 87,2%

0,4 g O_3/g COD · 4,3 min



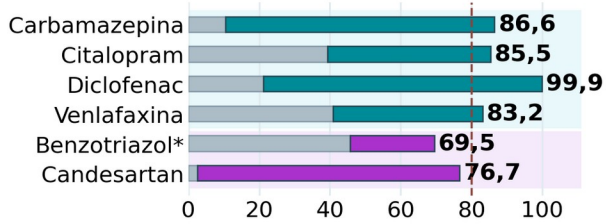
Ensaio 5 · Média: 72,1%

0,4 g O_3/g COD · 5,0 min
O_3/H_2O_2: 1/0,50



Ensaio 6 · Média: 83,6%

0,5 g O_3/g COD · 5,0 min
O_3/H_2O_2: 1/0,75



Remoção de referência | Adicional: categoria 1 | Adicional: categoria 2

Interreg
España – Portugal
Cofinanciado por la Unión Europea
Cofinanciado pela União Europeia
blue water

· FEUP ·
RESULTADOS À ESCALA PILOTO

NANOFILTRAÇÃO: PRODUÇÃO DE ÁGUA PARA REUTILIZAÇÃO



Unidade piloto de NF

MBR e Permeado NF: *E. coli*, SST e turvação cumprem critérios para ApR de classe A

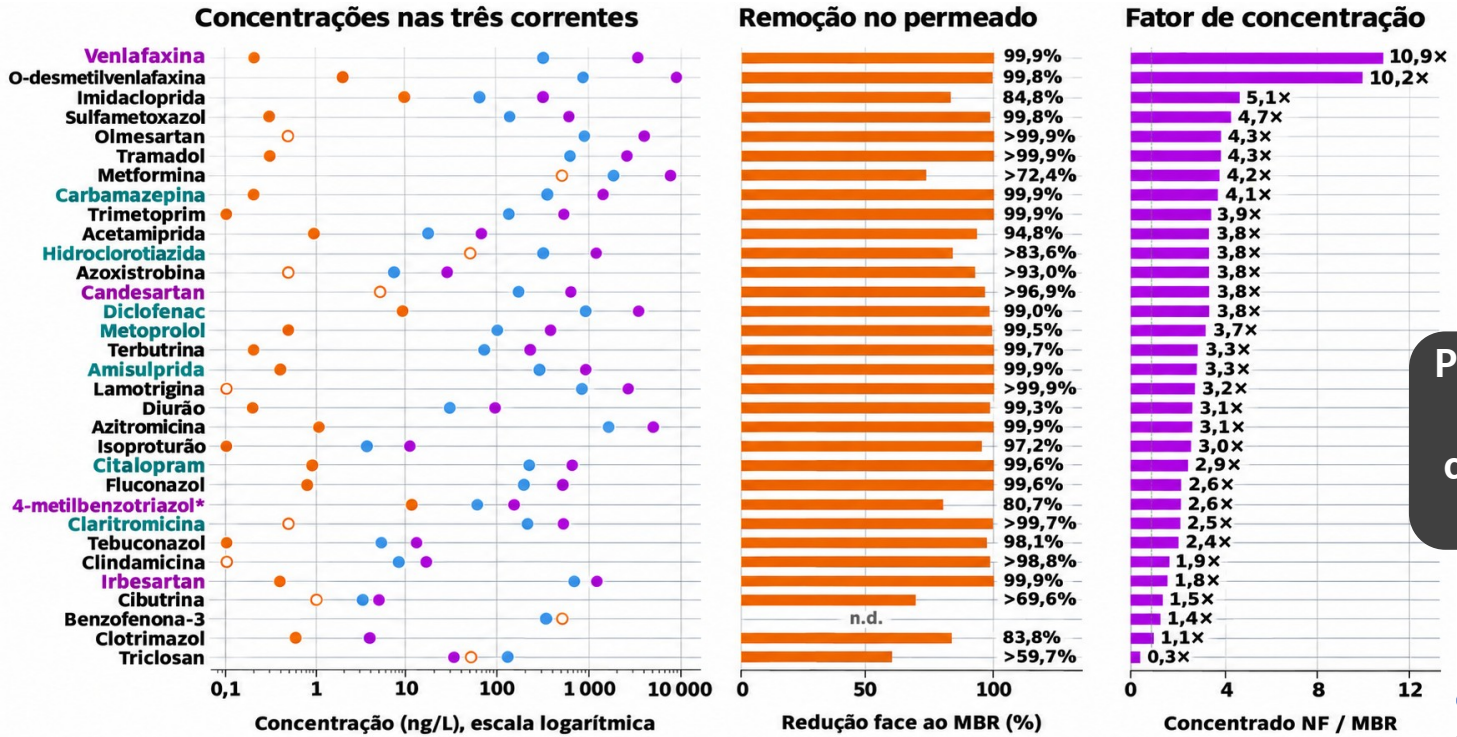
Parâmetro	MBR	Perm. NF	Conc. NF
pH	7,03	5,63	7,70
COD (mg/L)	22,6	4,7	61,6
CQO (mg O_2/L)	46,4	<5	101,3
Abs. a 254 nm	0,259	0,001	0,760
Condut. (µS/cm)	1010	15,8	2785
Turvação (NTU)	4,3	0,05	6,4
SST (mg/L)	4,0	0,4	32,9
MICROBIOLOGIA • log_{10}(UFC/100 mL)			
Enterobactérias	<LOD	<LOD	1,96 ± 0,10
E. coli	<LOD	<LOD	1,00 ± 0,00
Enterococos	<LOD	<LOD	1,50 ± 0,00

LOD = 0,33 UFC/100 mL

Interreg
España – Portugal
Cofinanciado por la Unión Europea
Cofinanciado pela União Europeia
blue water

· FEUP ·
RESULTADOS À ESCALA PILOTO

NANOFILTRAÇÃO: PRODUÇÃO DE ÁGUA PARA REUTILIZAÇÃO



Permeado NF: redução de 84,8% da concentração somada de micropoluentes

· FEUP ·

RESULTADOS À ESCALA PILOTO

OZONIZAÇÃO DO CONCENTRADO DE NANOFILTRAÇÃO

Indicadores da Diretiva: ● Categoria 1 ● Categoria 2 — Remoção média (%) | Dose específica de O_3 (g O_3/g COD)

	0,22	0,35	0,51
Amisulprida	58,3	84,4	99,9
Carbamazepina	75,1	97,4	99,6
Citalopram	63,8	81,9	97,7
Claritromicina	69,9	82,5	90,2
Diclofenac	81,0	99,1	99,1
Hidroclorotiazida	51,5	64,6	92,5
Metoprolol	58,4	66,1	99,5
Venlafaxina	64,9	76,1	99,9
4-metilbenzotriazol	60,6	68,6	99,7
Benzotriazol	56,4	59,2	86,7
Candesartan	55,6	64,7	99,7
Irbesartan	49,3	57,3	86,6
Acetamiprida	53,5	56,4	65,7
Atrazina	—	39,5	39,5
Azitromicina	77,1	94,4	96,8
Azoxistrobina	69,3	82,3	88,9
Benzofenona-3	57,7	69,6	67,2

	0,22	0,35	0,51
Clindamicina	82,4	96,3	96,3
Clotrimazol	33,6	16,8	50,4
Cibutrina	—	38,7	38,7
Diurão	58,3	69,6	90,5
Eritromicina	27,1	27,1	27,1
Fluconazol	44,5	46,1	60,9
Imidacloprida	53,5	37,2	81,9
Isoproturão	65,2	70,2	84,5
Lamotrigina	56,0	57,8	76,6
O-desmetilvenlafaxina	93,8	99,7	99,8
Olmesartan	71,1	91,3	90,9
Sulfametoxazol	71,7	81,0	91,6
Tebuconazol	47,9	58,3	78,9
Terbutrina	60,1	69,4	99,2
Tramadol	64,6	77,9	99,9
Triclosan	0,0	0,0	9,8
Trimetoprim	76,2	98,3	99,1

0,22 g O_3/g COD

3/32 remoção >80%

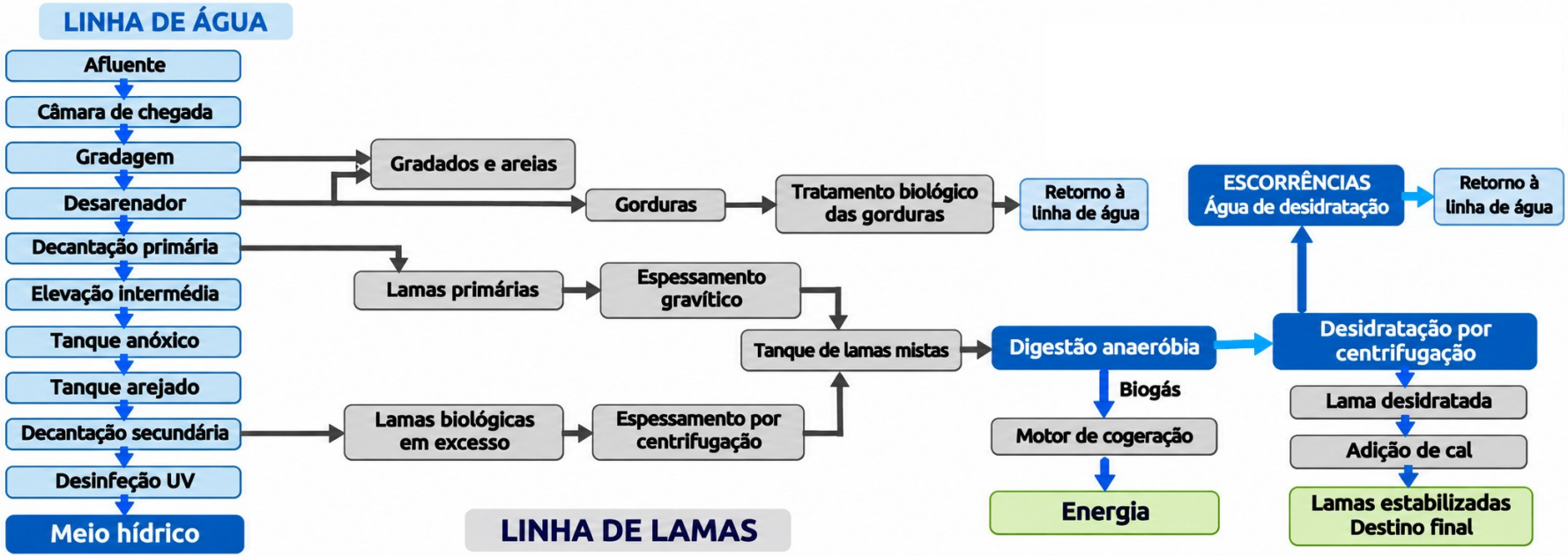
0,35 g O_3/g COD

12/32 remoção >80%

0,51 g O_3/g COD

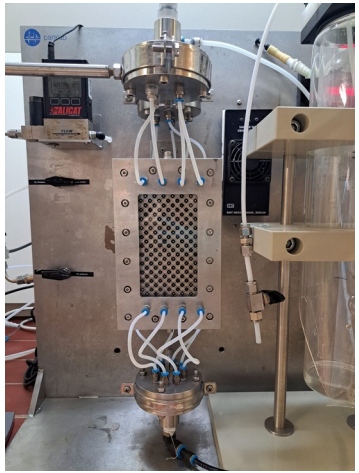
24/32 remoção >80%

ESCORRÊNCIAS: ORIGEM E RECIRCULAÇÃO NA ETAR



· FEUP ·
RESULTADOS À ESCALA PILOTO

ESCORRÊNCIAS: RECUPERAÇÃO DE NUTRIENTES E OZONIZAÇÃO



Ozonização NETmix



Cristalização Estruvite

À mesma dose: 0,55 g O_3/g COD

Resultado	Filtração + O_3	Cristalização + O_3
Remoção média de MPs (%)	86 ± 13	71 ± 25
MPs com remoção ≥80%	7	4

RECUPERAÇÃO DE ESTRUVITE
37,2 g
1,1 kg/m³ de escorrências

Interreg
España – Portugal
Cofinanciado por la Unión Europea
Cofinanciado pela União Europeia
blue water

PRINCIPAIS CONCLUSÕES DA DEMONSTRAÇÃO PILOTO

Ozonização do efluente MBR

A qualidade do efluente MBR para reutilização classe A não dispensa o tratamento quaternário para o cumprimento dos níveis de remoção para compostos indicadores da Diretiva (UE) 2024/3019.

A ozonização assistida por NETmix permitiu atingir a meta de remoção dos indicadores com 0,7 g O_3/g DOC e 8,5 min de contacto, existindo margem para reduzir a dose e o tempo de tratamento

Nanofiltração e tratamento do concentrado

A nanofiltração permitiu obter um permeado para reutilização classe A, melhorando a qualidade físico-química e reduzindo a concentração de micropoluentes, mas a sua aplicação exige integrar o tratamento do concentrado gerado.

Valorização e tratamento das escorrências

Recuperação de nutrientes sob a forma de estruvite articulada com a remoção de micropoluentes por ozonização.

AGRADECIMENTOS

FCT/MCTES (PIDDAC): 0048_BLUE_WWATER_1_E - Control, tratamiento y reducción de microplásticos y contaminantes emergentes en aguas residuales urbanas y en el medio costero transfronterizo - co-financed by the European Union, in the scope of Interreg VI A Spain - Portugal Cooperation Program (POCTEP) 2021-2027

WAVES (NORTE2030-FEDER-02716600), funded through the NORTE2030 program, under the Support System for the Creation of Scientific and Technological Knowledge – Integrated R&D Projects (SACCCT – IC&DT), call NORTE2030-2024-84

Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P./MECI through national funds: LSRE-LCM, UID/50020/2025 (DOI: 10.54499/UID/50020/2025); and ALiCE, LA/P/0045/2020 (DOI: 10.54499/LA/P/0045/2020).