

Appendix 1. Experimental results-Tables

In next pages the results of the different experiments that have been carried out are presented. Firstly, the operating conditions for each experiment are established, by indicating the temperature ($^{\circ}\text{C}$, average value throughout the experiment), initial pH, concentration of ozone in the gas inlet ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), ozone production ($\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$), initial concentration of the target compound ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), recirculating flow rate ($\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$) and $\text{H}_2\text{O}_2/\text{compound}$ or $\text{Fe}^{3+}/\text{compound}$ ratio ($\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$). Next, a table with the following variables is presented:

- Time (min)
- pH
- Concentration of the target compound ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
- Concentration of ozone in the residual gas ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)
- Concentration of ozone in the liquid phase ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
- Total organic carbon (TOC, $\text{mg C}\cdot\text{L}^{-1}$)
- Chemical oxygen demand (COD, $\text{mg O}_2\cdot\text{L}^{-1}$)
- Biochemical oxygen demand (BOD, $\text{mg O}_2\cdot\text{L}^{-1}$)
- Absorbed ozone dose ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
- Average oxidation state (AOS)
- Oxidation reduction potential (ORP, mV)
- Concentration of nitrate ion ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
- Concentration of chloride ion ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
- Concentration of residual hydrogen peroxide ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

Note: The range of the residual ozone measurer is $0\text{-}20\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$. Values given by the measurer out of this range are presented between brackets.

NITROBENZENE (NB)

A1.1. Stripping with oxygen**EXPERIMENT NB-S****EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
18	4.0	-	-	92.5	280

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)
0	4.0	92.53
5	-	91.73
10	-	93.4
20	-	94.7
30	-	92.93
40	-	91.92
60	-	92.15
80	-	92.27
90	4.0	90.4

A1.2. Single ozonation**EXPERIMENT NB-O1****EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
18	-	11.5	4.1	104.9	280

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	-	104.9	-	0
5	-	97.78	6.0	0.020
10	-	87.97	6.2	0.034
15	-	76.53	6.2	0.049
20	-	69.41	6.5	0.063
25	-	61.07	6.8	0.077
30	-	54.16	7.2	0.090
35	-	52.19	7.3	0.102
45	-	43.05	7.6	0.127
55	-	36.04	8.0	0.151
65	-	27.19	8.0	0.174
75	-	22.57	8.2	0.197
85	-	17.09	8.5	0.219
95	-	12.69	8.6	0.241
115	-	7.9	8.2	0.285

EXPERIMENT NB-O2**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O3g} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
20	3.9	21	7.4	99.8	280

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	3.89	99.76	56.2	-	0
2	3.81	94.51	-	7.7	0.011
7	3.72	82.65	51.2	9.0	0.031
12	3.52	69.77	-	10.2	0.049
17	3.39	57.75	-	11.0	0.066
22	3.29	47.27	-	11.9	0.081
27	3.21	39.47	51.72	12.0	0.095
32	3.17	32.04	-	12.6	0.109
37	3.13	26.06	48.52	13.3	0.122
47	3.07	18.51	-	13.8	0.145
57	3.02	11.16	-	14.8	0.167
67	2.98	6.40	-	14.9	0.186
77	2.95	3.77	43.08	16.1	0.204
87	2.92	2.60	-	17.4	0.217
97	2.89	0	-	17.4	0.229
117	-	0	33.45	-	-

EXPERIMENT NB-O3**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O3g} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
19	3.6	31	11.1	97.3	280

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	3.56	97.31	-	0
2	3.65	89.49	13.1	0.016
7	3.47	73.49	15.6	0.042
12	3.34	59.06	18.3	0.065
17	3.2	45.84	18.4	0.085
22	3.13	36.54	19.0	0.105
27	3.08	27.65	20.0	0.123
32	3.02	21.36	(21.4)	0.139
37	2.96	16.16	(21.3)	0.155
42	2.94	13.11	(21.4)	0.170
47	2.91	8.28	(21.8)	0.185
52	-	5.96	(21.3)	0.198
57	-	3.95	(23.1)	0.211

EXPERIMENT NB-04**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
20	3.9	41	14.6	90.6	280

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	3.93	90.60	-	0
2	3.80	80.20	16.6	0.021
7	3.47	61.07	(20.5)	(0.056)
12	3.35	43.91	(24.1)	(0.086)
17	3.17	30.16	(26.5)	(0.111)
22	3.10	20.08	-	-
27	3.02	13.13	-	-
32	2.99	7.57	-	-
37	2.96	4.54	-	-
47	2.93	2.56	-	-
57	2.84	0	-	-

EXPERIMENT NB-05**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
21	6.9	21	7.4	100.4	280

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	6.89	100.4	-	0
2	6.87	97.29	5.5	0.012
7	6.86	82.23	5.9	0.036
12	6.85	67.65	6.6	0.059
17	6.84	53.82	7.4	0.082
22	6.83	41.64	8.1	0.103
27	6.82	32.09	8.9	0.122
32	6.77	24.30	10.1	0.141
37	6.79	17.84	11.1	0.157
47	6.82	10.96	12.4	0.187
57	6.81	4.69	13.7	0.212
67	6.80	2.77	14.6	0.233
77	6.79	0	15.0	0.253
87	6.81	0	15.2	0.272
97	6.80	0	16.5	0.288
107	6.80	0	16.5	0.303
117	6.80	0	16.3	0.317

EXPERIMENT NB-06**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
21	3.0	21	7.4	92.5	280

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	3.0	92.50	-	0
2	3.0	87.56	11.2	0.010
7	2.96	78.20	11.6	0.025
12	2.94	67.27	12.5	0.039
17	2.90	57.28	12.7	0.053
22	2.88	47.75	13.4	0.065
27	2.86	40.13	13.4	0.077
32	2.77	33.18	13.8	0.089
37	2.79	27.72	13.9	0.100
47	2.74	20.00	13.7	0.123
57	2.75	12.95	14.8	0.145
67	2.74	7.86	14.2	0.165
77	2.70	5.03	14.9	0.186
87	2.68	3.02	16.0	0.203
97	2.70	0	16.8	0.218

EXPERIMENT NB-07**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
22	9.3	21	7.4	107.6	280

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	9.31	107.6	-	0
2	9.31	105.9	6.7	0.011
7	9.25	97.10	7.3	0.033
17	9.19	80.69	8.2	0.075
27	9.13	63.86	8.6	0.115
37	9.04	47.23	8.9	0.154
47	8.98	33.90	9.6	0.192
57	8.86	23.53	10.0	0.227
77	8.76	9.22	12.0	0.291
97	8.61	3.41	14.7	0.339
117	8.61	0	15.1	0.378

EXPERIMENT NB-08**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
18	3.9	21	7.4	223.0	280

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	[O ₃ res] (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	3.86	223.0	-	0
5	3.57	213.8	5.9	0.029
10	3.34	197.4	6.6	0.052
15	3.23	180.5	8.0	0.074
20	3.12	166.0	9.3	0.093
25	3.04	155.3	9.3	0.112
30	3.02	138.1	10.4	0.130
35	2.97	133.6	11.3	0.146
45	2.88	118.9	12.2	0.175
55	2.86	95.23	12.0	0.203
65	2.81	91.92	12.5	0.231
75	2.76	72.81	13.5	0.257
85	2.74	69.94	13.2	0.281
95	-	59.35	13.0	0.306
105	-	48.81	12.8	0.332
115	-	35.07	13.2	0.357

EXPERIMENT NB-09**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
18	4.4	21	7.4	246.4	280

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	[O ₃ res] (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	4.15	246.4	-	0
5	3.69	237.9	5.9	0.029
10	3.44	219.9	5.5	0.053
15	3.22	203.0	5.8	0.077
20	3.12	189.2	6.4	0.101
25	3.02	181.8	7.4	0.123
30	3.00	170.4	9.0	0.144
35	2.94	159.2	9.3	0.162
45	2.86	146.8	10.5	0.198
55	2.82	130.1	11.4	0.230
65	-	114.4	12.0	0.259
75	2.78	102.9	12.5	0.287
85	-	92.85	12.5	0.314
95	2.72	82.72	12.5	0.341
105	-	72.28	12.5	0.368
115	2.66	63.58	12.5	0.395

EXPERIMENT NB-O10**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
18	3.8	31	11.1	327.1	280

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)
0	3.78	327.1	-
5	3.34	295.9	5.8
10	3.11	271.7	7.8
15	3.02	247.2	10.5
20	2.93	228.9	13.1
25	2.87	210.9	14.7
30	2.81	192.3	16.1
35	2.77	182.8	16.8
45	2.73	163.1	18.5
55	2.68	141.9	19.5
65	2.64	118.5	20.1
75	2.60	102.2	19.8
85	2.47	87.66	19.6
95	2.54	70.98	20.1
115	2.49	50.67	20.1

EXPERIMENT NB-O11**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	C _{CO₃₂-/HCO₃-} (mol.L ⁻¹)	Recirc.(L.h ⁻¹)
18	10.1	21	7.4	107.3	0.025	280

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	10.15	107.3	-	0
5	10.15	102.7	14.0	0.022
10	10.15	98.28	14.0	0.033
15	10.08	94.12	13.2	0.045
20	10.12	88.31	13.4	0.057
25	10.10	83.20	13.5	0.069
30	10.10	78.74	13.3	0.081
35	10.10	74.96	13.3	0.094
45	10.10	68.60	13.2	0.118
55	10.00	61.61	13.6	0.142
65	10.05	53.90	13.8	0.165
75	10.04	47.54	15.3	0.186
85	10.03	42.44	13.5	0.207
95	10.04	48.41	14.4	0.229
105	10.02	33.41	14.2	0.251
115	10.01	30.18	15.2	0.271

EXPERIMENT NB-O12**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	C _{t-BuOH} (mmol.L ⁻¹)	Recirc.(L.h ⁻¹)
26	-	21	7.4	116.8	3	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	2.79	116.8	-	0
10	3.26	109.9	12.1	0.046
20	3.16	104.4	13.4	0.072
30	2.89	96.86	13.7	0.096
40	2.93	91.20	14.6	0.117
50	2.78	87.56	14.5	0.138
60	3.12	83.91	15.2	0.157
75	2.83	81.64	15.5	0.184
90	2.69	77.27	14.3	0.213
105	3.1	69.75	14.3	0.245
120	2.85	68.25	15.1	0.275

EXPERIMENT NB-O13**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
21	4.5	21	7.4	101.3	230

RESULTS

t (min)	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₁₀ (mg O ₂ .L ⁻¹)	AOS	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorb. O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	101.3	58.72	174	0	0	-0.445	-	0
10	85.76	-	-	-	-	-	6.5	0.056
20	66.44	-	-	-	-	-	7.4	0.101
30	46.21	52.83	111	18	22	0.845	8.6	0.142
40	38.11	-	-	-	-	-	9.5	0.180
50	28.23	-	-	-	-	-	10.5	0.215
60	17.98	52.70	90	26	30	1.438	10.7	0.248
75	12.22	-	-	-	-	-	12.0	0.294
90	4.22	43.96	65	23	29	1.782	10.9	0.339
105	2.61	-	-	-	-	-	12.4	0.384
120	0.49	33.05	52	17	25	1.64	13.1	0.423

EXPERIMENT NB-O14**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O3g} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
25	4.0	21	7.4	108.9	230

RESULTS

t (min)	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₁₀ (mg O ₂ .L ⁻¹)	AOS	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorb. O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	108.9	62.64	179	0	0	-0.286	-	0
10	92.92	-	-	-	-	-	7.2	0.054
20	69.61	-	-	-	-	-	8.4	0.096
30	45.24	55.45	127	-	-	0.564	9.4	0.134
40	39.83	-	-	-	-	-	10.0	0.170
50	31.93	-	-	-	-	-	10.4	0.204
60	18.84	52.00	117	30	46	0.625	11.2	0.237
75	13.92	-	-	-	-	-	11.7	0.282
90	5.04	46.59	73	20	36	1.650	11.9	0.326
105	1.23	-	-	-	-	-	12.0	0.369
120	0	35.86	48	13	25	1.992	11.9	0.412

EXPERIMENT NB-O15**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O3g} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
21	4.5	21	7.4	101.3	230

RESULTS

t (min)	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₁₀ (mg O ₂ .L ⁻¹)	AOS	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorb. O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	101.3	58.72	174	0	0	-0.445	-	0
10	85.76	-	-	-	-	-	6.5	0.056
20	66.44	-	-	-	-	-	7.4	0.101
30	46.21	52.83	111	18	22	0.845	8.6	0.142
40	38.11	-	-	-	-	-	9.5	0.180
50	28.23	-	-	-	-	-	10.5	0.215
60	17.98	52.70	90	25	33	1.438	10.7	0.248
75	12.22	-	-	-	-	-	12.0	0.294
90	4.22	43.96	65	20	31	1.782	10.9	0.339
105	2.61	-	-	-	-	-	12.4	0.384
120	0.49	33.05	52	16	26	1.64	13.1	0.423

A1.3. Ozonation combined with hydrogen peroxide**EXPERIMENT NB-P****EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	H ₂ O ₂ flow (g.min ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
20	5.7	-	-	125.0	0.5	280

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)
0	5.65	125.0
10	6.12	124.2
20	6.23	124.0
30	5.75	123.1
50	6.02	119.6
70	5.97	119.2
90	6.33	119.4
110	5.79	119.0

EXPERIMENT NB-OP1**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mg H ₂ O ₂ /mg O ₃	Recirc. (L.h ⁻¹)
20	-	21	7.4	102.3	10	280

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	-	102.3	-	0
2	-	95.62	8.8	0.011
7	-	85.61	9.1	0.030
12	-	70.86	9.9	0.048
17	-	60.43	11.4	0.064
22	-	49.43	12.1	0.079
27	-	41.40	12.6	0.093
32	-	34.20	12.7	0.106
37	-	28.07	12.9	0.119
47	-	20.58	13.9	0.143
57	-	12.88	13.9	0.166
67	-	7.72	14.8	0.187
77	-	4.43	15.4	0.206
87	-	2.82	16.0	0.222

EXPERIMENT NB-OP2**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mg H ₂ O ₂ /mg O ₃	Recirc. (L.h ⁻¹)
21	4.0	21	7.4	105.7	4	280

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	4.03	105.7	-	0
2	4.04	102.3	7.4	0.011
7	3.74	86.88	8.5	0.032
17	3.46	65.02	10.9	0.068
27	3.27	45.51	11.9	0.098
37	3.09	31.51	12.6	0.126
57	3.00	17.56	13.4	0.177
77	2.96	7.85	13.4	0.225
97	2.96	4.28	13.7	0.272

EXPERIMENT NB-OP3**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mg H ₂ O ₂ /mg O ₃	Recirc. (L.h ⁻¹)
22	4.2	21	7.4	110.8	0.5	280

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	4.17	110.8	-	0
2	4.07	103.3	7.4	0.011
7	3.70	91.19	8.4	0.032
17	3.42	68.84	10.6	0.068
27	3.23	49.44	11.0	0.101
37	3.12	34.66	13.0	0.129
47	3.06	23.01	13.3	0.154
57	3.02	14.09	13.6	0.178
77	2.92	6.97	13.8	0.224
97	2.87	3.08	14.4	0.268

EXPERIMENT NB-OP4**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol H ₂ O ₂ /mol NB	Recirc. (L.h ⁻¹)
22	-	21	7.4	101.4	3	280

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg C.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	[O ₃] res (g/m ³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	-	101.4	58.95	-	0
2	4.47	92.35	-	7.1	0.011
7	3.89	79.14	-	8.6	0.032
17	3.49	58.68	47.30	9.8	0.069
27	3.29	40.04	-	11.0	0.103
37	3.09	23.19	-	11.1	0.135
47	3.07	16.42	-	11.7	0.165
57	3.03	9.46	47.30	11.8	0.194
77	2.95	4.53	-	12.8	0.250
97	2.94	2.43	-	13.4	0.300
117	-	0	33.42	13.4	0.324

EXPERIMENT NB-OP5**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol H ₂ O ₂ /mol NB	Recirc. (L.h ⁻¹)
22	4.3	21	7.4	103.8	6	280

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	4.26	103.8	-	0
2	3.97	92.99	7.5	0.011
7	3.66	78.77	8.8	0.031
17	3.35	57.63	10.4	0.068
27	3.20	38.50	12.4	0.098
37	3.10	28.06	13.3	0.124
47	3.05	18.53	13.3	0.148
57	2.99	10.96	14.0	0.172
77	2.86	4.96	16.1	0.209
97	2.84	2.88	15.4	0.243
107	2.83	0	15.4	0.261

EXPERIMENT NB-OP6**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol H ₂ O ₂ /mol NB	Recirc. (L.h ⁻¹)
24	3.4	21	7.4	101.1	0.1	230

RESULTS

t (min)	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₁₀ (mg O ₂ .L ⁻¹)	AOS	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorb. O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	101.1	59.50	175	0	0	-0.412	-	0
10	92.96	-	-	-	-	-	6.4	0.055
20	77.38	-	-	-	-	-	6.8	0.101
30	62.93	54.88	159	14	17	-0.346	7.6	0.144
40	48.04	-	-	-	-	-	9.7	0.184
50	39.13	-	-	-	-	-	10.3	0.219
60	28.85	51.81	122	24	31	0.468	11.2	0.251
75	19.39	48.50	101	-	-	0.876	11.4	0.297
90	10.99	47.30	94	25	27	1.029	12.1	0.341
105	5.81	-	-	-	-	-	13.0	0.382
120	3.65	39.02	-	26	29	-	13.2	0.419

A1.4. Ozonation combined with Fe(III) ion**EXPERIMENT NB-OF1****EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol Fe(III)/mol NB	Recirc. (L.h ⁻¹)
22	2.9	21	7.4	96.8	1	300

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	2.94	96.76	55.50	-	0
5	2.92	90.37	-	13.1	0.023
15	2.87	80.62	-	12.1	0.050
25	2.83	71.43	53.20	11.8	0.078
35	2.70	58.75	-	11.7	0.108
45	2.70	50.11	-	12.1	0.137
55	2.70	34.83	47.38	11.7	0.165
75	2.63	19.08	-	11.1	0.226
85	-	-	40.09	-	-
95	2.58	10.83	-	10.8	0.290
115	2.54	8.27	33.80	12.0	0.351

EXPERIMENT NB-OF2**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol Fe(III)/mol NB	Recirc. (L.h ⁻¹)
23	3.0	21	7.4	109.1	0.5	300

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	2.96	109.1	-	0
2	3.00	106.6	10.2	0.010
7	2.98	102.3	9.6	0.028
17	2.93	88.24	9.1	0.065
27	2.85	69.28	9.5	0.102
37	2.79	51.32	9.6	0.138
47	2.74	35.71	10.4	0.173
57	2.69	22.81	10.3	0.207
77	2.63	10.04	11.4	0.271
97	2.59	2.44	13.7	0.325
117	2.56	0	14.2	0.370

EXPERIMENT NB-OF3**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol Fe(III)/mol NB	Recirc. (L.h ⁻¹)
23	3.5	21	7.4	104.8	0.1	300

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	3.48	104.8	-	0
2	3.46	97.01	7.4	0.011
7	3.35	86.22	7.6	0.032
17	3.16	62.62	8.8	0.073
27	3.04	42.74	10.0	0.110
37	2.97	27.56	10.9	0.143
57	2.89	12.97	11.1	0.207
77	2.82	3.93	11.7	0.268
97	2.75	0	11.8	0.327

EXPERIMENT NB-OF4**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol Fe(III)/mol NB	Recirc. (L.h ⁻¹)
23	4.0	21	7.4	106.3	0.01	300

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	3.99	106.3	-	0
2	3.85	98.94	7.3	0.011
7	3.65	85.88	8.2	0.032
17	3.32	64.72	10.0	0.070
27	3.14	44.23	11.3	0.103
37	3.05	30.30	12.4	0.132
47	2.99	18.75	13.6	0.157
57	2.94	10.90	13.8	0.180
77	2.88	4.83	15.3	0.221
97	2.84	2.50	15.9	0.256
117	2.74	0	16.9	0.285

A1.5. Ozonation combined with UV radiation**EXPERIMENT NB-R1****EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
25	5.8	-	-	85.4	300

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)
0	5.77	85.43
5	6.01	84.41
10	6.00	84.84
15	6.11	83.12
25	6.17	82.78
36	6.26	82.99
55	6.24	83.80
75	6.24	85.12
95	6.24	82.53
115	6.24	82.39

EXPERIMENT NB-R2**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
25	3.2	-	-	91.5	300

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)
0	3.24	91.49
5	3.28	92.16
10	3.28	95.42
20	3.31	94.08
40	3.32	94.95
60	3.34	94.16
80	3.28	94.10
90	3.37	94.0

EXPERIMENT NB-R3**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
27	9.2	-	-	100.3	300

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)
0	9.22	100.3
5	9.23	101.2
10	9.23	100.3
30	9.23	101.3
50	9.21	103.0
70	9.08	103.1
90	9.19	102.2

EXPERIMENT NB-OR1**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
25	4.5	21	7.4	97.2	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	4.49	97.18	57.57	-	0
3	4.15	91.01	-	7.6	0.016
8	3.74	75.92	55.4	8.0	0.037
13	3.55	68.27	-	8.4	0.058
18	3.39	60.08	-	9.0	0.077
28	3.32	47.94	-	9.7	0.114
38	3.18	36.13	54.84	11.0	0.148
48	3.08	25.21	-	10.7	0.180
58	3.00	14.79	52.22	11.1	0.212
78	2.95	7.66	47.1	10.1	0.278
98	2.92	2.31	37.96	11.5	0.343
118	2.87	0.60	32.05	11.8	0.402

EXPERIMENT NB-OR2**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
25	3.2	21	7.4	98.2	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	3.17	98.18	-	0
3	3.19	95.80	6.4	0.017
8	3.14	86.72	7.1	0.040
14	3.10	74.80	8.2	0.065
18	3.06	65.30	8.6	0.081
28	2.99	52.44	9.8	0.118
38	3.02	41.24	10.3	0.153
48	2.91	32.73	10.7	0.187
58	2.84	24.09	8.8	0.222
78	2.83	12.63	10.9	0.293
98	2.73	4.10	9.9	0.360

EXPERIMENT NB-OR3**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
25	9.4	21	7.4	98.6	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	9.37	98.57	-	0
3	9.36	97.31	6.4	0.017
8	9.36	89.44	7.3	0.039
14	9.35	82.17	7.4	0.065
18	9.38	74.78	7.9	0.082
28	9.33	64.82	7.9	0.124
38	9.33	54.54	8.1	0.165
48	9.27	43.53	8.4	0.206
58	9.24	34.05	8.8	0.245
78	9.19	20.01	9.4	0.321
98	9.13	12.28	9.1	0.395
118	9.09	2.97	9.8	0.469

EXPERIMENT NB-OR4**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
25	5.4	31	11.1	82.3	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	5.35	82.30	-	0
3	4.12	74.92	11.0	0.024
8	3.79	66.00	12.8	0.055
18	3.40	46.65	15.8	0.108
28	3.13	27.79	16.4	0.155
38	3.07	15.63	16.0	0.202
48	3.01	6.10	17.2	0.248

EXPERIMENT NB-OR5**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
24	3.4	31	11.1	89.8	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	3.38	89.79	-	0
2	3.39	82.74	-	0.020
5	3.28	73.85	12.8	0.043
10	3.24	63.48	14.0	0.071
20	3.03	43.78	16.7	0.121
30	2.89	27.56	17.1	0.165
40	2.79	16.96	16.6	0.210
50	2.84	8.93	16.1	0.257

EXPERIMENT NB-OR6**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
27	9.2	31	11.1	102.2	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	9.22	102.2	-	0
5	9.17	92.84	11.0	0.024
10	9.17	79.18	12.0	0.055
20	9.15	64.40	12.4	0.115
30	9.16	49.84	13.0	0.173
40	9.09	37.00	13.5	0.229
50	9.09	24.26	13.4	0.285
60	9.03	14.06	13.7	0.340

EXPERIMENT NB-OR7**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
24	4.0	21	7.4	104.3	230

RESULTS

t (min)	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₁₀ (mg O ₂ .L ⁻¹)	AOS	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorb. O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	104.3	59.70	179	0	0	-0.497	-	0
10	88.60	-	-	-	-	-	5.0	0.057
20	69.35	-	-	-	-	-	5.6	0.107
30	44.12	57.33	123	10	23	0.782	6.9	0.154
40	37.03	-	-	-	-	-	7.9	0.197
50	25.81	-	-	-	-	-	8.8	0.237
60	15.06	49.21	92	9	29	1.196	9.9	0.274
75	9.28	-	-	-	-	-	9.8	0.327
90	3.19	37.62	75	16	20	1.010	10.0	0.380
105	2.12	-	-	-	-	-	10.4	0.432
120	0	23.61	52	7	9	0.696	10.5	0.482

A1.6. Experiments with the combination O₃/UV/H₂O₂**EXPERIMENT NB-ORP1****EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol H ₂ O ₂ /mol NB	Recirc. (L.h ⁻¹)
22	-	21	7.4	94.6	1	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	-	94.56	57.13	-	0
5	-	90.97	-	7.7	0.027
10	-	82.01	-	8.4	0.048
20	-	66.41	55.98	8.9	0.087
30	-	51.63	-	9.2	0.125
40	-	39.51	52.76	9.7	0.162
60	-	24.47	-	10.1	0.232
80	-	12.33	42.91	10.2	0.301
100	-	3.53	-	10.8	0.368
120	-	0.52	25.72	10.7	0.433

EXPERIMENT NB-ORP2**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol H ₂ O ₂ /mol NB	Recirc. (L.h ⁻¹)
26	5.9	21	7.4	92.4	3	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg. L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	[O ₃] dis (mg.L ⁻¹)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	5.88	92.381	53.15	-	0	0
5	-	-	-	3.8	0.321	0.030
10	-	72.327	52.51	5.4	0.476	0.056
20	-	58.338	53.39	7.1	0.524	0.103
40	-	31.148	50.00	8.9	0.440	0.186
62	-	12.169	45.63	9.2	-	0.269
80	-	4.477	38.60	9.5	(1.071)	0.336
100	-	0.357	28.11	10.2	0.607	0.407
120	3.21	0	19.74	10.2	0.298	0.475

EXPERIMENT NB-ORP3**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol H ₂ O ₂ /mol NB	Recirc. (L.h ⁻¹)
20	-	21	7.4	103.0	6	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	-	103.0	0	0
5	-	97.72	8.3	0.027
10	-	85.55	8.7	0.047
20	-	70.81	9.4	0.085
30	-	55.90	10.2	0.120
40	-	41.88	10.4	0.154
60	-	24.70	9.4	0.225
80	-	11.41	11.6	0.291
100	-	2.70	10.9	0.353
120	2,9	0	10.4	0.419

EXPERIMENT NB-ORP4**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol H ₂ O ₂ /mol NB	Recirc. (L.h ⁻¹)
24	3.2	21	7.4	97.4	0.1	230

RESULTS

t (min)	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₁₀ (mg O ₂ .L ⁻¹)	AOS	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorb. O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	97.44	57.90	170	0	0	-0.404	-	0
10	87.86	-	-	-	-	-	7.1	0.054
20	69.74	-	-	-	-	-	8.2	0.096
30	55.28	54.52	140	6	9	0.148	8.9	0.136
40	40.98	-	-	-	-	-	9.4	0.173
50	30.68	-	-	-	-	-	9.3	0.210
60	21.20	51.91	132	19	31	0.417	10.7	0.245
75	12.03	48.46	88	24	34	1.276	11.4	0.293
90	5.63	41.37	65	21	31	1.643	11.6	0.338
105	2.71	-	-	-	-	-	11.6	0.383
120	0	27.94	-	-	-	-	12.0	0.426

A1.7. Experiments with the combination O₃/UV/Fe(III)

EXPERIMENT NB-ORF1

EXPERIMENTAL CONDITIONS

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol Fe(III)/mol NB	Rec. (L.h ⁻¹)
21	2.6	21	7.4	95.1	3 (Cl ⁻)	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	[O ₃ res] (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	2.55	95.14	0	0
3	2.53	91.81	8.8	0.016
8	2.53	91.29	10.3	0.034
13	2.53	87.82	9.4	0.052
18	2.53	82.61	9.6	0.070
28	2.53	75.82	9.8	0.106
38	2.47	68.80	9.3	0.142
58	2.42	56.10	9.0	0.217
78	2.36	44.22	9.4	0.292
98	2.35	31.08	10.2	0.363
118	2.34	20.17	11.6	0.428

EXPERIMENT NB-ORF2

EXPERIMENTAL CONDITIONS

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol Fe(III)/mol NB	Rec. (L.h ⁻¹)
23	2.9	21	7.4	98.2	1 (Cl ⁻)	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	2.8	98.17	-	0
5	-	92.86	9.3	0.026
10	-	88.71	9.0	0.045
15	-	82.60	8.7	0.064
25	-	74.44	8.9	0.103
35	-	63.72	8.7	0.142
45	-	54.64	8.6	0.181
55	-	45.14	8.6	0.220
75	-	31.66	8.8	0.298
95	-	19.12	9.4	0.374
115	-	8.46	9.7	0.446

EXPERIMENT NB-ORF3**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol Fe(III)/mol NB	Rec. (L.h ⁻¹)
21	3.3	21	7.4	100.4	0.1 (Cl)	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	3.32	100.4	60.39	-	0
5	3.51	94.22	-	5.3	0.029
10	3.26	80.42	-	6.6	0.053
20	3.09	62.92	57.81	7.4	0.097
30	2.87	44.64	-	7.8	0.140
40	2.77	30.01	50.17	7.8	0.182
60	2.87	14.18	-	9.6	0.260
80	2.77	3.53	36.73	9.4	0.333
100	2.82	0	23.9	9.2	0.407
120	2.8	0	11.72	-	-

EXPERIMENT NB-ORF4**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol Fe(III)/mol NB	Rec. (L.h ⁻¹)
27	3.7	21	7.4	85.3	0.1 (Cl)	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	[O ₃] dis (mg.L ⁻¹)
0	3.69	85.31	49.00	181.1	-	0
5	3.63	-	-	-	4.9	0.119
10	3.37	-	48.55	-	5.3	0.238
20	3.24	-	47.32	162.3	6.6	0.357
41	3.08	25.93	46.56	130.5	8.2	0.202
60	2.95	-	39.66	87.02	8.3	0.404
82	2.98	1.12	28.79	57.62	8.7	0.107
100	3.03	0	16.00	-	7.7	0.643
120	3.1	0	3.72	0	11.4	0.226

EXPERIMENT NB-ORF5**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol Fe(III)/mol NB	Rec. (L.h ⁻¹)
23	2.8	21	7.4	93.0	1 (NO ₃)	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	2.81	92.98	53.79	-	0
5	2.8	91.91	-	8.5	0.027
10	2.84	82.67	-	9.9	0.045
20	2.84	68.22	51.31	10.5	0.080
30	2.90	54.36	-	8.9	0.115
40	2.72	41.12	40.17	8.9	0.154
60	2.86	26.96	-	9.3	0.229
80	2.76	3.36	18.72	10.3	0.301
100	2.78	0	-	14.1	0.356
120	2.84	0	6.30	14.3	0.400

EXPERIMENT NB-ORF6**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol Fe(III)/mol NB	Rec. (L.h ⁻¹)
22	3.4	21	7.4	90.4	0.1 (Cl)	230

RESULTS

t (min)	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₁₀ (mg O ₂ .L ⁻¹)	AOS	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorb. O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	90.37	52.90	162	0	0	-0.594	-	0
10	73.19	-	-	-	-	-	4.0	0.060
20	51.04	-	-	-	-	-	4.7	0.113
30	26.08	44.20	109	5	20	0.301	5.7	0.163
40	18.37	-	-	-	-	-	6.4	0.211
50	10.13	-	-	-	-	-	7.1	0.256
60	2.99	34.40	51	15	22	1.776	7.6	0.299
75	1.61	-	-	-	-	-	7.9	0.362
90	0	14.32	25	5	6	1.381	8.7	0.423
105	0	-	-	-	-	-	11.6	0.475
120	0	2.9	(10)	1	1	-	13.7	0.514

EXPERIMENT NB-ORF7**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O3g} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{NB} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol Fe(III)/mol NB	Rec. (L.h ⁻¹)
24	3.5	21	7.4	99.4	0.1 (Cl)	230

RESULTS

t (min)	C _{NB} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₁₀ (mg O ₂ .L ⁻¹)	AOS	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorb. O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	99.38	57.33	169	0	0	-0.422	-	0
10	84.86	-	-	-	-	-	4.3	0.058
20	62.39	-	-	-	-	-	4.9	0.110
30	38.18	52.89	111	5	22	0.852	5.7	0.160
40	29.64	-	-	-	-	-	6.1	0.208
50	18.66	-	-	-	-	-	6.6	0.255
60	8.33	43.75	75	15	26	1.429	7.1	0.300
75	4.38	-	-	-	-	-	8.0	0.364
90	0	24.31	33	8	12	1.964	8.6	0.424
105	0	-	-	-	-	-	9.0	0.482
120	0	5.049	(10)	0	0	-	10.7	0.535

2,4-DICHLOROPHENOL (DCP)

A1.8. Stripping with oxygen and volatility

EXPERIMENT DCP-S

EXPERIMENTAL CONDITIONS

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
25	5.5	-	-	99.4	100

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)
0	5.5	99.44	44.22
20	-	97.136	43.20
40	-	94.66	42.91
60	-	93.6	42.36
80	-	92.3	41.93
100	-	92.56	40.95
120	5.5	90.47	39.68

EXPERIMENT DCP-V

EXPERIMENTAL CONDITIONS

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
45	6.0	-	-	106.1	100

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)
0	6.0	106.07	46.63
20	-	103.23	44.94
40	-	101.98	44.93
60	-	101.29	44.94
80	-	101.09	44.71
100	-	97.9	43.96
120	6.0	97.47	43.65

A1.9. Single ozonation

EXPERIMENT DCP-O1

EXPERIMENTAL CONDITIONS

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
21	3.84	21	7.4	87.3	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	3.84	87.398	39.22	0.8	0
5	3.31	53.889	38.65	4.5	0.029
10	3.11	24.229	38.11	6.7	0.054
15	2.96	0	34.78	8.9	0.075
20	2.79	0	35.19	12.6	0.094
30	2.80	0	-	15.5	0.114
40	2.78	0	27.76	16.0	0.133
50	2.77	0	25.94	-	0.166
60	2.74	0	-	15.8	0.207
75	2.80	0	-	17.0	0.229
90	2.81	0	-	17.4	0.247

EXPERIMENT DCP-O2

EXPERIMENTAL CONDITIONS

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
21	4.78	15.3	5.4	101.8	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	4.78	101.773	45.13	0.1	0
3	3.51	85.284	-	0.2	0.014
6	3.06	65.084	-	0.2	0.029
9	2.91	47.224	-	0.4	0.043
12	2.79	30.443	42.88	0.8	0.057
16	2.7	17.857	-	1.3	0.075
18	2.68	13.741	42.28	1.7	0.084
21	2.59	0	39.03	2.5	0.097
24	2.73	0	39.66	3.2	0.108
27	2.94	0	38.49	4.4	0.119
30	2.57	0	-	4.8	0.130
60	2.55	0	31.08	7.5	0.217
90	2.54	0	28.18	8.2	0.288

EXPERIMENT DCP-O3**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
22	-	11.5	4.1	89.66	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	[O ₃] dis (mg.L ⁻¹)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	-	89.656	40.68	0.1	0	0
5	4.11	68.519	-	0.9	0.095	0.017
10	3.33	43.800	39.52	2.8	-	0.033
15	3.27	27.464	-	3.6	0.143	0.046
20	3.14	14.502	36.93	4.3	-	0.058
25	3.07	0	-	5.0	0.226	0.069
30	3.02	0	35.28	5.9	-	0.078
35	2.97	0	-	7.5	-	0.086
40	3.01	0	31.97	8.0	-	0.092
50	2.98	0	-	8.6	-	0.102
60	2.95	0	27.91	8.9	0.393	0.111
80	2.97	0	24.18	9.4	0.262	0.126

EXPERIMENT DCP-O4**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
21	9.0	15.3	5.4	106.0	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	9	106.0	(48.48)	0.2	0
3	9.06	72.781	(47.44)	0.2	0.014
6	9.06	43.79	-	0.2	0.029
9	9.04	22.199	-	0.2	0.043
12	9.02	16.413	(42.08)	0.2	0.058
15	9	0	(40.96)	0.2	0.072
18	8.98	0	(40.8)	1.0	0.086
21	8.96	0	-	2.1	0.099
24	8.98	0	-	3.2	0.111
27	8.99	0	-	3.8	0.122
30	8.96	0	(40.03)	4.4	0.133
40	8.94	0	-	5.1	0.166
50	8.93	0	-	5.7	0.198
60	8.89	0	(40.3)	6.0	0.228

EXPERIMENT DCP-O5**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
25	3.8	15.3	5.4	210.1	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	3.76	210.10	92.80	0.2	0
5	3.58	184.76	-	0.2	0.024
10	3.26	128.45	-	0.2	0.048
15	3.13	94.87	-	0.7	0.072
20	3.04	66.28	86.68	1.6	0.094
25	2.96	43.36	-	2.8	0.115
30	2.82	-	-	3.4	0.134
35	2.83	11.53	-	4.2	0.152
40	2.71	1.643	80.74	4.8	0.170
50	2.75	0	-	6.5	0.200
60	2.63	0	73.21	7.6	0.226
80	2.72	0	66.89	8.2	0.273

EXPERIMENT DCP-O6**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
20	4.4	21	7.4	193.1	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	4.41	193.086	87.51	0.2	0
5	3.63	150.919	-	0.2	0.033
10	3.5	99.326	83.10	0.4	0.066
15	3.35	59.000	-	1.4	0.098
20	3.23	29.221	80.66	2.9	0.128
25	3.21	10.704	-	3.9	0.156
30	3.11	0	75.07	4.7	0.182
40	3.10	0	-	7.0	0.230
50	3.14	0	-	8.6	0.272
60	3.01	0	63.22	9.2	0.311
75	3.01	0	-	10.0	0.365
90	3.07	0	55.26	10.4	0.416

EXPERIMENT DCP-O7**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	C _{t-BuOH} (mmol.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
24	4.2	15.3	5.4	86.8	3	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	4.18	86.756	-	0.1	0
5	3.43	63.358	-	0.2	0.024
10	3.09	33.143	-	1.2	0.047
15	3.03	11.298	-	2.2	0.069
20	3.01	0	-	4.2	0.088
25	2.96	0	-	7.7	0.103
30	2.95	0	-	9.5	0.113
35	2.93	0	-	10.1	0.122
40	2.93	0	-	10.4	0.130
50	3.10	0	-	11.5	0.144
65	2.89	0	-	11.6	0.162
80	2.84	0	-	11.0	0.181

EXPERIMENT DCP-O8**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
24	5.3	15.3	5.4	97.0	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	ORP (mV)
0	5.28	96.998	42.80	117	0	-	229
10	3.47	56.032	40.39	83	-	-	300
20	3.16	23.325	38.50	-	-	-	272
25	2.98	(0)	38.50	65	9	-	250
30	2.97	0	37.66	-	-	-	256
35	2.85	0	33.97	65	6	-	252
40	2.90	0	33.17	49	10	-	258
45	2.80	0	33.24	53	3	-	237
50	2.74	0	29.45	39	1	-	240
60	2.75	0	25.49	27	-	-	234

EXPERIMENT DCP-O9**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
25	5.7	15.3	5.4	97.5	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	C _{Cl-} (mg.L ⁻¹)	ORP (mV)
0	5.69	97.503	42.14	115	0	-	241
5	3.9	78.27	-	-	-	3.9	308
10	3.43	51.516	42	-	-	5.67	293
15	3.28	26.873	-	-	-	14.89	278
20	3.19	13.437	40.41	-	-	15.6	249
25	3.13	5.73	-	-	-	22.69	249
30	2.97	0	37.06	56	4	29.76	249
40	2.93	0	31.62	22	3	32.27	247
50	2.92	0	30.44	18	4	-	245
60	2.91	0	28.07	-	-	42.8	244

EXPERIMENT DCP-O10**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
25	-	15.3	5.4	-	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	C _{Cl-} (mg.L ⁻¹)	ORP (mV)
0	-	-	-	-	0	-	-
5	3.74	71.784	-	-	-	2.84	284
10	3.44	45.902	38.65	-	-	6.38	270
15	3.31	33.09	-	-	-	10.28	279
20	3.19	14.239	37.01	-	-	13.03	269
25	3.13	5.669	-	-	-	17.73	269
30	3.00	0	35.73	65	12	24.47	278
45	3.03	0	30.71	-	-	30.85	267
60	2.97	0	26.87	-	-	30.14	272

EXPERIMENT DCP-O11**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
22	4.4	15.3	5.4	95.6	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	[O ₃] dis (mg.L ⁻¹)	ORP (mV)
0	4.35	95.623	41.03	112	0	0	285
5	3.62	60.8	40.85	94	3	0.0476	290
10	3.36	34.327	38.8	87	6	-	294
15	3.22	13.94	36.23	70	7	-	253
20	3.16	5.348	34.95	-	-	0.238	243
25	3.12	0	-	-	-	-	240
30	3.10	0	28.05	50	-	0.524	239
45	2.99	0	27.7	-	-	-	242
60	3.05	0	26.14	-	-	-	242

EXPERIMENT DCP-O12**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
20	4.7	15.3	5.4	99.0	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	ORP (mV)
0	4.69	98.953	43.7	120	0	-	304
5	3.58	67.422	41.5	97	4	-	331
10	3.39	42.956	41.2	77	4	-	343
15	3.29	26.446	40	74	8	-	337
20	3.17	10.31	39.6	64	11	-	330
25	3.19	2.504	39.3	62	14	-	307
30	2.95	0	41.9	-	-	-	289
45	2.85	0	36.4	-	-	-	289
60	2.88	0	33.73	-	-	-	295

EXPERIMENT DCP-O13

EXPERIMENTAL CONDITIONS

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
20	4.2	15.3	5.4	96.7	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	ORP (mV)
0	4.24	96.733	42.7	-	0	-	312
10	3.35	52.537	41.1	-	-	-	326
20	3.12	18.52	40.1	-	-	-	329
25	3.11	4.285	-	-	-	-	335
30	3	0	38.8	-	-	-	318
35	2.95	0	34.7	50	-	-	290
40	3.02	0	34.2	48	9	-	288
50	3.03	0	32.3	42	9	-	297
60	2.92	0	-	-	-	-	305

EXPERIMENT DCP-O14

EXPERIMENTAL CONDITIONS

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
-	-	15.3	5.4	100	230

RESULTS

t (min)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	AOS
0	0	0	100	44	120	0	-0.095
5	0.4	0.024	67	42.5	97	4	0.542
10	1.4	0.047	43	42	80	4	1.018
15	2.1	0.068	26	40.7	74	8	1.102
20	3.2	0.088	10	39	64	11	1.576
25	4.2	0.107	2.5	38	62	13	1.405
30	5.5	0.123	0	37.5	60	15	1.500
40	6.7	0.153	0	35	48	9	1.834
50	7.2	0.179	0	33	42	9	2.038
60	7.5	0.204	0	30	-	-	2.411
90	8.2	0.275	0	27.5	-	-	-

A1.10. Ozonation combined with hydrogen peroxide

EXPERIMENT DCP-OP1

EXPERIMENTAL CONDITIONS

T (°C)	pH	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol H ₂ O ₂ /mol DCP	Recirc. (L.h ⁻¹)
25	4.0	15.3	5.4	107.8	1	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	C _{Cl-} (mg.L ⁻¹)	ORP (mV)
0	4.02	107.84	47.05	126	0	0	375
5	3.67	83.29	-	-	0	7.8	354
10	3.49	46.782	46.32	-	0	10.99	346
15	3.24	27.242	-	-	0.2	27.3	343
20	3.21	13.254	41.31	86	0.8	30.14	336
25	3.12	5.369	-	-	1.3	39.72	334
30	3.07	0	38.43	-	1.7	40.42	331
35	3.02	0	-	-	2.2	40.78	319
40	3.02	0	31.27	70	3.1	45.39	331
60	3.01	0	27.48	60	3.8	46.1	335
90	2.97	0	19.97	51	3.7	46.1	335
120	3.06	0	10.32	26	3.5	46.81	295

EXPERIMENT DCP-OP2

EXPERIMENTAL CONDITIONS

T (°C)	pH	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol H ₂ O ₂ /mol DCP	Recirc. (L.h ⁻¹)
21	4.2	15.3	5.4	94.1	0.5	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	[O ₃] dis (mg.L ⁻¹)	C _{Cl-} (mg.L ⁻¹)	ORP (mV)
0	-	94.148	40.1	-	0	0	-
3	4.24	-	-	101	-	-	319
5	-	65.983	-	-	-	-	-
7	3.69	-	-	-	-	2.84	342
10	-	37.101	38.54	-	0.0357	-	-
15	-	34.361	-	-	0.0476	-	-
18	3.25	-	-	-	-	9.22	327
21	-	6.584	36.18	-	-	-	-
25	-	2.121	-	-	0.0476	-	-
28	3.21	-	-	45	-	28.01	315
30	-	0	31.6	-	-	-	-
35	-	0	-	-	0.0357	-	-
39	3.15	0	-	-	-	26.95	321
40	-	0	29.58	-	0.0357	-	-
50	-	0	-	-	-	-	-
56	3	0	-	23	-	34.75	321

60	-	0	25.73	-	-	-	-
76	3.13	0	-	26	-	-	327
90	-	0	20.34	-	0.048	-	-
115	3.14	0	-	29	-	-	319
120	-	0	13.85	-	0.071	-	-

EXPERIMENT DCP-OP3**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH	C _{O3g} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol H ₂ O ₂ /mol DCP	Recirc. (L.h ⁻¹)
21	4.0	15.3	5.4	91.0	0.1	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	AOS	C _{H2O2} (mg.L ⁻¹)
0	-	91.037	40.92	-	0	-0.032	-
3	3.95	-	-	110	-	-	1-3
5	-	66.187	-	-	-	-	-
7	3.44	-	-	-	-	-	1
10	-	41.727	40.66	-	-	-	-
13	3.18	-	-	-	-	-	1
15	-	22.062	40	-	-	1.300	-
16	3.07	-	-	72	11	-	1-3
20	-	9.766	39.28	-	-	-	-
25	-	2.483	-	-	-	-	-
27	2.88	-	-	-	-	-	3-10 (5)
30	-	0	37.36	-	-	1.993	-
31	2.89	0	-	50	15	-	3-10 (6)
35	-	0	-	-	-	-	-
45	-	0	34.12	-	-	1.934	-
47	2.86	0	-	47	18	-	3
60	-	0	30.44	-	-	2.078	-
61	2.75	0	-	39	-	-	3-10 (5)
80	2.73	0	-	-	-	-	3-10 (5)
90	-	0	26.59	-	-	-	-
115	2.79	0	-	(17)	-	-	3-10 (5)
120	-	0	22.59	-	-	2.871	-

EXPERIMENT DCP-OP4**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol H ₂ O ₂ /mol DCP	Recirc. (L.h ⁻¹)
23	4.5	15.3	5.4	95.0	0.1	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	AOS	C _{H₂O₂} (mg.L ⁻¹)
0	-	94.992	41.16	-	0	(1.1)	0.246	-
1	4.5	-	-	103	-	-	-	-
5	-	73.184	-	-	-	3.2	-	-
10	-	48.173	-	-	-	3.6	-	-
15	-	29.736	40.19	-	-	4.2	0.790	-
16	3.18	-	-	86	3	-	-	3-10 (4)
20	-	12.016	-	-	-	5.5	-	-
25	-	5.011	-	-	-	6.4	-	-
30	-	0	36.55	-	-	7.4	1.373	-
31	2.94	0	-	64	6	-	-	3-10 (6)
45	-	0	33.25	-	-	9.8	1.609	-
46	2.95	0	-	53	11	-	-	3-10 (6)
60	-	0	29.97	-	-	10.4	1.748	-
61	2.9	0	-	45	5	-	-	3-10 (6)
90	-	0	25.97	-	-	11.2	-	-
120	-	0	24.02	-	-	12.2	-	-

EXPERIMENT DCP-OP5**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol H ₂ O ₂ /mol DCP	Recirc. (L.h ⁻¹)
23	4.5	15.3	5.4	95.0	0.1	230

RESULTS

t (min)	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₁₀ (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₅ /COD	BOD ₁₀ /COD
0	94.992	41.16	-	0	0	0	0
1	-	-	103	-	-	-	-
5	73.184	-	-	-	-	-	-
10	48.173	-	-	-	-	-	-
15	29.736	40.19	-	-	-	-	-
16	-	-	86	8	11	0.093	0.128
20	12.016	-	-	-	-	-	-
25	5.011	-	-	-	-	-	-
30	0	36.55	-	-	-	-	-
31	0	-	64	13	22	0.203	0.344
45	0	33.25	-	-	-	-	-
46	0	-	53	16	29	0.302	0.547
60	0	29.97	-	-	-	-	-
61	0	-	45	5	12	0.111	0.267
90	0	25.97	-	-	-	-	-
120	0	24.02	-	-	-	-	-

A1.11. Ozonation combined with ultraviolet radiation

EXPERIMENT DCP-OR1

EXPERIMENTAL CONDITIONS

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
21	-	15.3	5.4	95.5	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	-	95.538	43.85	0	0
3	4.24	84.072	-	0	0.015
6	3.37	65.22	-	1.6	0.028
9	2.99	48.481	40.28	2.7	0.041
12	2.97	34.614	-	3.5	0.053
15	3.04	23.77	38.37	4.0	0.064
18	2.88	14.495	-	4.7	0.074
21	2.75	9.636	37.32	5.8	0.084
25	2.68	0	35.85	6.8	0.095
30	2.75	0	33.74	7.5	0.108
40	2.86	0	-	9.2	0.130
60	2.62	0	23.55	9.1	0.169
80	2.87	0	16.86	10.2	0.205

EXPERIMENT DCP-OR2

EXPERIMENTAL CONDITIONS

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
24	4.3	15.3	5.4	196.6	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	4.29	196.55	88.35	0.1	0
5	3.51	166.35	-	0.2	0.024
10	3.27	135.04	-	0.2	0.048
15	3.1	96.33	-	0.2	0.072
20	2.94	63.56	81.1	1.1	0.095
25	2.91	38.81	-	2.5	0.117
30	2.29	24.11	-	3.5	0.136
35	2.72	6.61	-	4.3	0.154
40	2.65	0	74.7	5.0	0.171
50	2.66	0	-	6.8	0.201
60	2.6	0	64.2	7.5	0.227
80	2.75	0	57.7	8.0	0.275

EXPERIMENT DCP-OR3**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
21	4.3	15.3	5.4	87.3	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	[O ₃] dis (mg.L ⁻¹)	Absorbed O ₃ dose (g.L ⁻¹)
0	4.33	87.271	40.33	0	0	0
4	3.67	71.107	-	0	0	0.019
8	3.38	48.793	-	1.4	0.012	0.038
12	3.18	29.541	37.84	2.4	0.012	0.055
16	3.11	14.095	-	3.4	-	0.071
20	3.05	7.826	-	4.3	0.071	0.085
25	3.0	0	32.43	6.2	0.143	0.101
30	2.96	0	-	7.6	0.143	0.115
40	2.94	0	27.99	8.1	-	0.138
60	2.96	0	20.14	7.8	0.179	0.185

EXPERIMENT DCP-OR4**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
23	4.6	15.3	5.4	89.4	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	AOS
0	5.79	99.03	42.34	120	0	-0.251
5	3.88	77.649	-	-	-	-
10	3.58	53.44	-	-	-	-
15	3.15	27.079	40.0	82	2	0.925
20	3.04	17.986	-	-	-	-
25	3.05	7.874	-	-	-	-
30	3.0	0.221	35.36	73	5	0.903
45	3.04	0	29.81	50	7	1.484
60	3.01	0	22.68	34	-	1.751
90	2.94	0	14.93	-	-	-

EXPERIMENT DCP-OR5**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	Recirc. (L.h ⁻¹)
23	4.6	15.3	5.4	89.4	210

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	AOS	ORP (mV)
0	4.58	89.41	39	110	-0.231	336
5	3.82	72.26	-	-	-	313
10	3.49	44.831	36.34	-	-	306
15	3.24	17.323	35.16	72	0.928	294
20	3.12	9.216	34.68	-	-	285
25	3.03	3.386	-	-	-	275
30	3.03	0	27.86	44	1.631	294
45	3.06	0	24.78	39	-	316
60	3.03	0	20.39	39	1.131	305
75	2.96	0	14.22	-	-	311
90	3.04	0	9.368	23	-	332

A1.12. Experiments with the combination O₃/UV/H₂O₂**EXPERIMENT DCP-ORP1****EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol H ₂ O ₂ /mol DCP	Recirc. (L.h ⁻¹)
21	4.0	15.3	5.4	95.6	0.1	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	AOS	C _{H₂O₂} (mg.L ⁻¹)
0	4.03	95.629	42.0	-	0	-0.214	-
3	-	-	-	118	-	-	1-3 (2)
5	3.39	73.153	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	1
10	3.18	50.791	41.13	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	1-3 (2)
15	3.12	28.753	40.16	-	-	1.311	-
16	-	-	-	72	13	-	3
20	3.0	16.283	39.36	-	-	-	-
25	2.95	7.922	-	-	-	-	-
27	-	-	-	-	-	-	3
30	2.93	0	38.08	-	-	1.558	-
31	-	0	-	62	16	-	3-10 (6)
35	2.92	0	-	-	-	-	-
45	2.89	0	32.35	-	-	2.423	-
47	-	0	-	34	15	-	10
60	2.84	0	25.91	-	-	2.379	-
61	-	0	-	28	-	-	3-10 (9)
80	-	0	-	-	-	-	10
90	2.97	0	11.07	-	-	-	-
115	-	0	-	(10)	-	-	3-10 (7)
120	2.88	0	2.06	-	-	-	-

EXPERIMENT DCP-ORP2**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH	C _{O3g} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol H ₂ O ₂ /mol DCP	Recirc. (L.h ⁻¹)
25	4.2	15.3	5.4	94.8	0.1	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)	AOS	C _{H2O2} (mg.L ⁻¹)
0	-	94.8	42.94	-	0	(1.1)	-0.436	-
1	4.19	-	-	127	-	-	-	-
5	-	78.693	-	-	-	(2.6)	-	-
10	-	53.664	-	-	-	3.3	-	-
15	-	32.913	39.4	-	-	4.1	0.764	-
16	2.97	14.979	-	85	3	-	-	1-3 (2)
20	-	8.589	-	-	-	5.9	-	-
25	-	2.057	-	-	-	7.0	-	-
30	-	0	34.83	-	-	7.6	1.545	-
31	2.79	0	-	57	6	-	-	3-10 (4)
45	-	0	30.56	-	-	8.0	1.693	-
46	2.68	0	-	47	5	-	-	3-10 (9)
60	-	0	25.24	-	-	8.0	2.158	-
61	2.7	0	-	31	6	-	-	3-10 (9)
90	-	0	15.66	-	-	7.8	-	-
120	-	0	6.486	-	-	9.0	-	-

EXPERIMENT DCP-ORP3**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH	C _{O3g} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol H ₂ O ₂ /mol DCP	Recirc. (L.h ⁻¹)
25	4.2	15.3	5.4	94.8	0.1	230

RESULTS

t (min)	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₁₀ (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₅ /COD	BOD ₁₀ /COD
0	94.8	42.94	-	0	0	0	0
1	-	-	127	-	-	-	-
5	78.693	-	-	-	-	-	-
10	53.664	-	-	-	-	-	-
15	32.913	39.4	-	-	-	-	-
16	14.979	-	85	9	11	0.106	0.129
20	8.589	-	-	-	-	-	-
25	2.057	-	-	-	-	-	-
30	0	34.83	-	-	-	-	-
31	0	-	57	10	18	0.175	0.316
45	0	30.56	-	-	-	-	-
46	0	-	47	13	17	0.277	0.362
60	0	25.24	-	-	-	-	-
61	0	-	31	6	9	0.194	0.290
90	0	15.66	-	-	-	-	-
120	0	6.486	-	-	-	-	-

A1.13. Experiments with the combination O₃/UV/Fe(III)**EXPERIMENT DCP-ORF1****EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP⁰} (mg.L ⁻¹)	mol Fe(III)/mol DCP	Rec. (L.h ⁻¹)
25	3.0	15.3	5.4	83.5	1.63 (Cl)	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)
0	3.05	83.521	38.55	0.2
5	3.0	68.874	-	2.2
10	2.94	48.272	36.03	3.5
15	2.89	33.02	-	3.8
20	2.82	22.124	32.46	3.9
25	2.84	14.074	-	3.9
30	2.84	8.509	27.6	3.9
35	2.83	0	-	4.2
40	2.73	0	21.97	4.7
60	2.79	0	15.34	6.9
90	2.77	0	7.962	9.9
120	2.84	0	4.715	10.1

EXPERIMENT DCP-ORF2**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP⁰} (mg.L ⁻¹)	mol Fe(III)/mol DCP	Rec. (L.h ⁻¹)
25	3.2	15.3	5.4	84.9	0.5 (Cl)	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)
0	3.24	84.942	39.18	-
5	2.99	71.608	-	-
10	3.02	51.142	34.92	-
15	2.95	35.496	-	-
20	2.84	24.884	32.58	-
25	2.75	15.463	-	-
30	2.74	8.489	28.84	-
35	2.69	0	-	-
40	2.76	0	22.97	-
60	2.68	0	15.72	-
90	2.73	0	6.393	-
120	2.75	0	1.464	-

EXPERIMENT DCP-ORF3**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol Fe(III)/mol DCP	Rec. (L.h ⁻¹)
27	3.7	15.3	5.4	88.1	0.1 (Cl ⁻)	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)
0	3.7	88.054	41.73	138
5	3.5	70.883	-	-
10	3.2	47.065	39.64	-
15	3.05	29.218	-	-
20	3.01	15.347	36.99	-
25	2.95	6.776	-	-
30	2.91	0	33.46	63
35	2.86	0	-	-
40	2.83	0	28.38	-
60	2.87	0	19.72	-
91	2.94	0	6.399	-
120	3.0	0	0.531	(17.8)

EXPERIMENT DCP-ORF4**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol Fe(III)/mol DCP	Rec. (L.h ⁻¹)
25	2.9	15.3	5.4	91.2	1.63 (SO ₄ ²⁻)	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)
0	2.87	91.218	41.05	0
5	2.8	73.657	-	2.2
10	2.76	55.131	40.76	3.5
15	2.74	38.454	-	3.8
20	2.75	28.321	36.8	4.0
25	2.67	17.113	-	4.3
30	2.76	9.831	-	3.9
35	2.7	0	-	4.1
40	2.68	0	27.65	4.5
60	2.76	0	21.41	5.5
90	2.8	0	10.59	8.9
120	2.8	0	4.65	8.6

EXPERIMENT DCP-ORF5**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol Fe(II)/mol DCP	Rec. (L.h ⁻¹)
26	3.3	15.3	5.4	87.3	1.63 (SO ₄ ²⁻)	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	[O ₃] res (g.m ⁻³)
0	3.3	87.345	40.64	0.2
5	3.04	82.343	-	0.2
10	2.91	70.703	39.46	0.2
15	2.83	57.67	-	0.2
20	2.84	44.172	36.31	0.3
25	2.77	32.984	-	0.8
30	2.77	23.345	31.53	1.2
35	2.72	16.775	-	1.5
40	2.72	12.702	26.56	1.4
45	2.71	7.224	-	1.4
60	2.71	0	19.31	1.7
90	2.73	0	9.955	3.1
120	2.77	0	3.393	4.4

EXPERIMENT DCP-ORF6**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol Fe(III)/mol DCP	Rec. (L.h ⁻¹)
22	3.7	15.3	5.4	89.5	0.1 (Cl ⁻)	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD (mg O ₂ .L ⁻¹)	ORP (mV)
0	3.65	89.468	39.0	120	0	316
5	3.52	73.676	-	-	-	296
10	3.28	49.706	36.8	-	-	282
15	3.17	22.727	33.43	95	6	254
20	2.97	16.769	33.33	-	-	256
25	3.04	7.653	-	-	-	253
30	2.98	0	29.73	58	16	247
35	2.94	0	-	-	-	247
45	2.9	0	20.98	45	9	250
60	2.9	0	15.44	-	-	316

EXPERIMENT DCP-ORF7**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol Fe(III)/mol DCP	Rec. (L.h ⁻¹)
24	3.9	15.3	5.4	93.3	0.1 (Cl ⁻)	230

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	C _{Cl⁻} (mg.L ⁻¹)	ORP (mV)
0	3.92	93.278	40.64	116	0	1.773	291
5	3.63	76.511	-	-	-	3.9	293
10	3.39	49.993	38.92	-	-	4.96	278
15	3.23	33.678	36.98	-	-	9.93	261
20	3.1	18.73	36.66	116	-	12.41	283
25	3.05	8.408	-	-	-	13.12	248
30	3.04	2.272	30.98	66	-	18.44	240
35	2.95	0	26.15	50	10	18.79	234
40	2.91	0	25.32	49	11	23.05	242
50	2.97	0	19.36	33	9	21.63	245
60	2.96	0	15.36	-	-	23.05	257

EXPERIMENT DCP-ORF8**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O_{3g}} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol Fe(III)/mol DCP	Rec. (L.h ⁻¹)
24	3.9	15.3	5.4	93.3	0.1 (Cl ⁻)	230

RESULTS

t (min)	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	AOS
0	93.278	40.64	116	0	-0.281
5	76.511	-	-	-	-
10	49.993	38.92	-	-	-
15	33.678	36.98	95	6	0.147
20	18.73	36.66	-	-	-
25	8.408	-	-	-	-
30	2.272	30.98	58	16	1.192
35	0	26.15	50	10	1.132
40	0	25.34	49	11	1.099
45	0	21.94	45	9	0.923
50	0	19.36	33	9	1.443
60	0	15.36	-	-	-
90	0	6.4	-	-	-
120	0	0.53	-	-	-

EXPERIMENT DCP-ORF9**EXPERIMENTAL CONDITIONS**

T (°C)	pH ⁰	C _{O₃} (g.m ⁻³)	Prod. O ₃ (g.h ⁻¹)	C _{DCP} ⁰ (mg.L ⁻¹)	mol Fe(III)/mol DCP	Rec. (L.h ⁻¹)
22	3.7	15.3	5.4	89.3	0.1 (Cl)	210

RESULTS

t (min)	pH	C _{DCP} (mg.L ⁻¹)	TOC (mg C.L ⁻¹)	COD (mg O ₂ .L ⁻¹)	BOD ₅ (mg O ₂ .L ⁻¹)	AOS
0	3.67	89.31	38.92	112	0	-0.317
5	3.48	71.72	-	-	-	-
10	3.24	44.04	36.3	-	-	-
15	3.12	25.145	34.79	78	-	0.637
20	3.0	8.075	33.14	-	-	-
25	2.95	2.921	-	-	-	-
30	2.95	0	30.89	45	14	1.815
45	2.9	0	20.59	35	13	-
60	2.94	0	15.61	26	-	1.502
75	3.02	0	7.425	-	-	-
90	3.04	0	3.86	(10)	-	-

Appendix 2. Control of the ozone production

The concentration of ozone in the mixture O_3/O_2 produced by the ozonizer depends on the oxygen flow rate and the potential difference between the electrodes, which is regulated by means of an adjustable transformer incorporated in the unit.

In Figure A2.1 the maximum ozone production (in $g.h^{-1}$) and the maximum concentration of ozone in the mixture (in $g.m^{-3}$) vs. the fed oxygen flow rate is represented. From these curves the theoretical maximum values are found. The real value of production or concentration is obtained by multiplying this value by the ozonizer performance at the working intensity. In Figure A2.2 the ozonizer performance is plotted versus the current consumption.

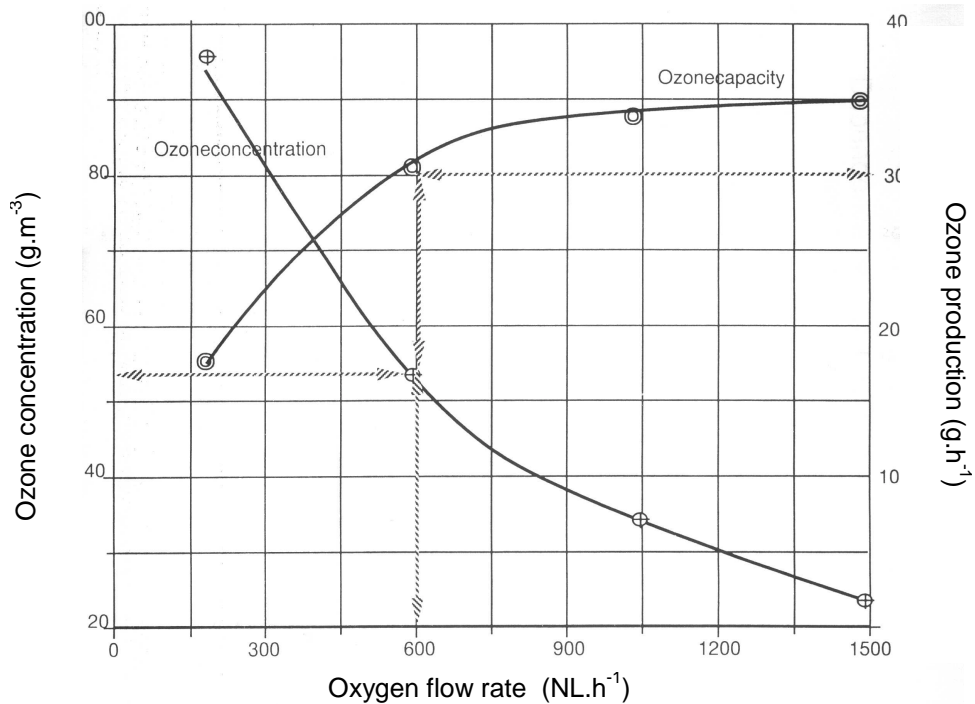


Figure A2.1. Maximum production and concentration of ozone vs. the fed oxygen flow rate

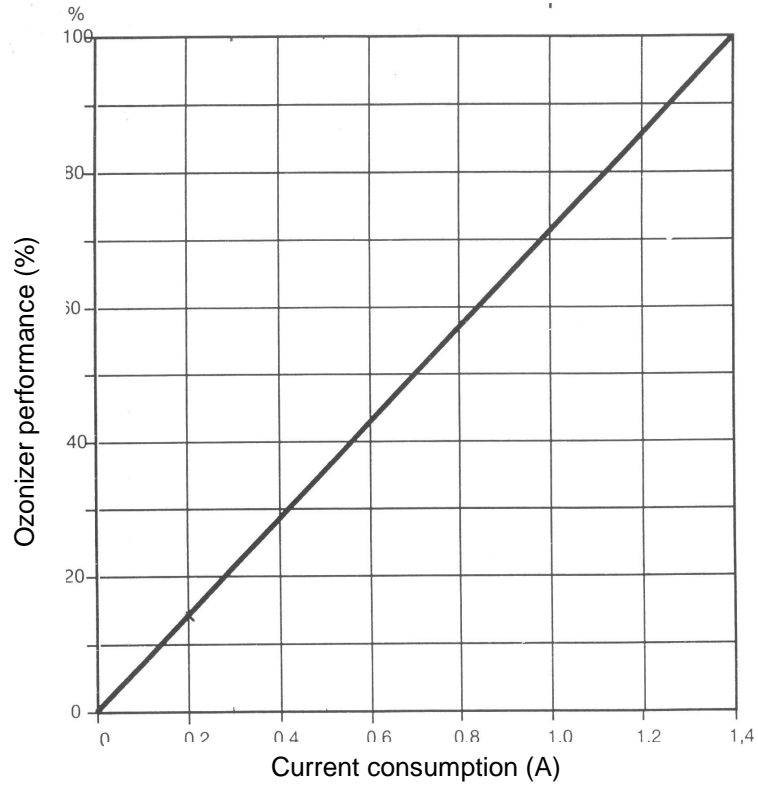


Figure A2.2. Ozonizer performance vs. the current consumption

1. Introducción

El uso doméstico y la actividad industrial, especialmente en los países desarrollados, generan cantidades importantes de aguas residuales, cuyo vertido directo a los cauces naturales provoca un impacto considerable en el medio ambiente. Este hecho, unido cada vez más frecuentemente a la necesidad de reciclar este agua para nuevos usos, hace que sea prácticamente imprescindible la depuración de las aguas residuales hasta la recuperación del grado de calidad adecuado.

Los compuestos nitroaromáticos y clorofenólicos son introducidos en el medio ambiente como consecuencia de la actividad industrial, apareciendo asociados como contaminantes en distintos tipos de aguas y efluentes industriales. Así, los compuestos nitroaromáticos son utilizados en la síntesis de pesticidas, explosivos o tintes industriales. Los clorofenoles derivan del uso incontrolado de pesticidas, funguicidas, herbicidas, así como subproductos del blanqueo de pulpa de papel con cloro o en la desinfección con cloro para potabilización de agua. Varios compuestos de estas familias se encuentran incluidos entre los contaminantes prioritarios seleccionados por la Unión Europea (ver *Table 1.1*) y han sido listados entre los 130 contaminantes prioritarios dados por la US EPA, por ej. nitrobenceno y 2,4-diclorofenol, los cuales han sido también incluidos recientemente en una lista de contaminantes de agua potable para ser investigados en el período 2001-2005.

La degradación de estos compuestos mediante Procesos de Oxidación Avanzada (POAs) basados en ozono ha sido poco estudiada. En el grupo de Ingeniería de los Procesos de Oxidación Avanzada (Grupo de Calidad de la Generalitat de Catalunya) del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Barcelona se dispone de instalaciones adecuadas para dicho estudio, por lo que se ha creído conveniente realizar un estudio del efecto de estos procesos en la degradación y biodegradabilidad de soluciones acuosas de estas familias de compuestos, escogiendo como compuestos modelo el nitrobenceno (NB) y el 2,4-dichlorophenol (DCP).

En el primer capítulo de este trabajo (*Introduction*) se han introducido las características principales de estos compuestos, así como la presencia de estas sustancias en algunas aguas. Un análisis del comportamiento de estas sustancias en cuanto a una posible degradación microbiana aeróbica ha mostrado que ambos son de baja biodegradabilidad e inhibidores de otras fuentes de carbono, lo que hace necesario buscar alternativas a los procesos biológicos convencionales. Así, se ha presentado en la introducción una serie de métodos para el tratamiento de estos compuestos refractarios,

entre los que se encuentra la adsorción en carbón activo, la oxidación húmeda, la oxidación supercrítica, procesos electroquímicos, procesos fotoquímicos, tratamientos químicos clásicos y procesos de oxidación avanzada o POAs. De todos ellos se ha hecho una pequeña búsqueda bibliográfica en cuanto a su aplicación en la eliminación de NB y DCP.

Los POAs se definen como aquellos procesos que implican la generación de radicales altamente reactivos (especialmente radicales hidroxilo) en cantidades suficiente para el tratamiento de una corriente. Estos radicales son muy poco selectivos, lo que les hace atractivos para el tratamiento de aguas, aunque algunos compuestos orgánicos sencillos como los ácidos acético, maleico y oxálico, acetona o cloroformo no son atacados por estos radicales (Bigda, 1995). La versatilidad de los POAs se ve aumentada por el hecho de que estos radicales se pueden formar por medio de distintos procesos.. En la sección 1.3.6. se presentan los principales POAs y las reacciones por las que se generan estos radicales. De todos ellos, los que se han utilizado en este trabajo son los basados en el uso de ozono: ozonación simple (a pH básico el ozono descompone generando radicales hidroxilo, por lo que puede considerarse también un POA; siendo además el componente principal de este grupo de POAs interesa saber su eficacia como oxidante para el tratamiento de estos contaminantes y su comparación con los otros procesos combinados), O_3/UV , O_3/H_2O_2 , $O_3/UV/H_2O_2$ y $O_3/UV/Fe$. En la bibliografía se han encontrado pocos trabajos relativos al uso de estos POAs en la degradación de NB y DCP.

El inconveniente que presentan estos procesos es el uso de reactivos de elevado coste. Una solución potencial sería la combinación de estos procesos con tratamientos biológicos. El POA se utilizaría como pretratamiento para aumentar la biodegradabilidad del efluente o eliminar la toxicidad del mismo. Para ello, es interesante seguir los cambios en la biodegradabilidad del efluente a tratar a lo largo del tratamiento con el POA, para determinar el tiempo óptimo hasta el que convendría aplicar dicho tratamiento, para después tratar ese efluente en un reactor biológico. En la literatura se han propuesto varios indicadores de biodegradabilidad, de los cuales los ratios DBO_5/DQO y DBO_5/COT son los más utilizados (DBO_5 : Demanda Biológica de Oxígeno; DQO : Demanda Química de Oxígeno; COT : Carbono Orgánico Total). En general, se toman como valores de referencia los de un agua residual doméstica; así, se considera que un efluente es biodegradable cuando la relación DBO_5/DQO es mayor de 0.4 o DBO_5/COT mayor de 1 (Metcalf & Eddy, 1985). Pocos artículos han sido encontrados en la bibliografía relativos

al efecto de los POAs basados en ozono en la biodegradabilidad de soluciones acuosas de DCP y ninguno sobre NB.

Dado que la base de los procesos utilizados en el presente estudio es el ozono, se ha considerado apropiado hacer un capítulo (*The Ozone*) donde se resumen las propiedades físicas y químicas del ozono, mecanismo de descomposición radicalaria, generación, transferencia de ozono a la fase líquida, toxicología y un apunte de la aplicación de ozono al tratamiento de aguas.

El objetivo del presente trabajo es, pues, el estudio de la aplicación de los POAs basados en ozono en el tratamiento de compuestos de baja biodegradabilidad y/o tóxicos, en concreto, NB y DCP. Para ello, se han establecido los siguientes objetivos:

- Estudio del efecto en la eliminación y mineralización de estos compuestos mediante los procesos. O_3 , O_3/UV , O_3/H_2O_2 , $O_3/UV/H_2O_2$ y $O_3/UV/Fe$.
- Estudio del efecto de dichos AOPs en la biodegradabilidad de soluciones de NB y DCP, utilizando las relaciones DBO/DQO y DBO/COT como indicadores
- Estudio de la biodegradación de soluciones de 100 ppm de DCP después de ser preozonadas en reactores biológicos
- Identificación de los principales intermedios de reacción, intentando relacionarlos con los cambios producidos en la biodegradabilidad
- Establecer un modelo para el tratamiento de un agua mediante ozonación y tratamiento biológico, centrado en el efecto potencial del ozono residual en el funcionamiento del reactor biológico

Para ello, se han puesto a punto las siguientes técnicas analíticas: HPLC, para determinar la concentración de los contaminantes; DQO; DBO; TOC y análisis de ozono en fase gaseosa y líquida (Ver capítulo 4, "*Materials and Methods*"). La instalación experimental utilizada consiste básicamente en un depósito-contactador en PVC transparente para 21 L de carga, un intercambiador de calor, una bomba centrífuga para la recirculación, una lámpara UV de 26W que emite a 253.7 nm y un fotoreactor UVA, con 8 lámparas negras (emiten en el rango 300-420 nm, con un máximo centrado en 360 nm) de 15 W cada una. El ozono se genera a partir de oxígeno y se transfiere al sistema mediante un inyector venturi. Se opera en discontinuo y el líquido es totalmente recirculado a un caudal de unos 230 L.h⁻¹. En las *Figures 4.4* y *4.5* se muestran fotos recientes de la instalación experimental. En cuanto a los reactores biológicos utilizados,

consisten en dos reactores semicontinuos agitados, de 1.5 L, alimentados por aire mediante un difusor y agitación magnética (Ver *Figure 4.6*). Como inóculo se ha utilizado lodo de la depuradora de Gavá (Barcelona). En uno de los reactores este lodo fue previamente aclimatado a fenol.

2. Resultados y discusión

En primer lugar se realizaron dos experimentos preliminares para comprobar el efecto del stripping por oxígeno, comprobándose que el grado de volatilización debido al paso de oxígeno a través de las soluciones de NB y DCP era despreciable.

NITROBENCENO (NB)

2.1. Ozonación de NB

En el proceso de ozonación simple se ha estudiado la influencia de la cantidad de ozono alimentada, del pH, de la concentración inicial de NB y de la presencia de secuestrantes de radicales, así como el efecto de la ozonación en la biodegradabilidad de soluciones acuosas de NB.

2.1.1. Influencia de la producción de ozono

Se ha estudiado el efecto de la cantidad de ozono alimentada en la eliminación de NB, en el rango de producciones 4.1 a 14.6 g.h⁻¹ (concentración inicial de NB aprox. 100 ppm, temperatura ambiente, pH libre). Como se puede observar en el *Graph 5.2*, al aumentar la producción de ozono se aumenta la conversión de NB a un tiempo determinado. En la *Table 5.1* se muestran las velocidades de eliminación de NB (en mg.min⁻¹) para cada una de las producciones estudiadas. Sin embargo, al representar la cantidad de NB eliminado frente a la dosis de ozono absorbido (calculada de restar a la concentración de entrada de ozono la concentración de éste en el gas de salida (ozono residual)), se puede observar (ver *Graph 5.3*) que ésta aumenta sólo ligeramente al aumentar la producción de ozono, indicando quizás que hay un mayor control de la reacción de ozono con NB que de la transferencia de materia.

El análisis de la concentración de ozono en el gas residual (*Graph 5.4*) muestra la presencia de unos plateaus, sugiriendo cambios en la reactividad del sistema, probablemente debido a que los intermedios formados son más reactivos que el NB. El coeficiente estequiométrico de la reacción ozono-NB ha sido también estimado,

encontrándose para el rango de producción estudiada aprox. 4 moles de O₃ consumido por mol de NB eliminado (ver *Graph 5.5*).

2.1.2. Efecto del pH

El pH es una variable importante en los procesos de ozonación, debido a la acción catalítica de los iones hidroxilo en la descomposición de ozono (ecuación [2.4]). Se ha estudiado la influencia del pH en la eliminación de NB en el rango 3-9 (concentración inicial de NB aprox. 100 ppm, producción de ozono 7.4 g.h⁻¹), encontrándose que esta variable no presentaba un efecto importante, si bien a pH 9 sí se observa un leve efecto inhibitor (ver *Graph 5.7*). La representación del ozono en el gas residual (*Graph 5.6*) sí muestra un mayor consumo de ozono, probablemente descompuesto en radicales hidroxilo. Sin embargo, este aumento de radicales no se traduce en un aumento de la velocidad de eliminación. Esto podría sugerir que la principal vía de actuación del ozono sería la directa a través del ozono molecular. Sin embargo, a raíz de los experimentos hechos en presencia de secuestrantes de radicales (ver sección 5.3.4) y de la bibliografía consultada se desprende que la principal vía de actuación sea la radicalaria.

2.1.3. Influencia de la concentración inicial de NB

Se ha estudiado el efecto de la concentración inicial de NB en el rango 100-250 ppm, ya que a mayores concentraciones se producían problemas de espumas. El pH se ha dejado evolucionar libremente y la producción de ozono se fijó en 7.4 g.h⁻¹. Un aumento de la concentración inicial produce una disminución de la conversión para un tiempo determinado. En este rango de concentración, la velocidad de desaparición de NB no parece depender de la concentración inicial, e inicialmente es igual a 55 mg.min⁻¹ (ver *Graph 5.9*). La evolución de la concentración de NB con el tiempo se ha ajustado a una cinética de pseudo-primer orden y se han estimado los valores de las constantes cinéticas, encontrándose que al doblar la concentración se reduce a la mitad el valor de esta constante (ver *Table 5.2*). Los valores de dichas constantes son del orden de magnitud de los hallados en la bibliografía. La concentración de ozono en el gas residual, como era de esperar, disminuye al aumentar la concentración (ver *Graph 5.11*).

2.1.4. Influencia de la presencia de secuestrantes de radicales hidroxilo: carbonatos y t-BuOH

Se ha comprobado el importante efecto inhibitor de los iones carbonato (ver *Graph 5.12*) y del t-BuOH (ver *Graph 5.14*) en la velocidad de desaparición del NB,

poniendo de manifiesto la importancia de la vía radicalaria en la ozonación de NB bajo las condiciones de trabajo estudiadas.

2.1.5. Estudio de biodegradabilidad

Se ha estudiado el efecto de la ozonación a pH libre y con producción de ozono 7.4 g.h^{-1} en la biodegradabilidad de soluciones de 100 ppm de NB. Previamente, se realizó con estas soluciones un análisis de DBO, obteniéndose tanto a 5 como a 21 días un valor de cero, así como un test de inhibición, encontrándose que incluso a baja concentración la presencia de NB es inhibidor de la oxidación biológica de otras fuentes de carbono (ver *Graph 5.16*).

La DBO ha sido medida a lo largo del experimento durante 5 y 10 días, encontrándose los valores más altos cuando la concentración de NB era menor del 20% de la inicial (*Graph 5.17*). Esto puede justificarse por el carácter inhibidor del NB y/o a que los intermedios formados inicialmente (principalmente nitrofenoles, ver *Figure 1 y 2*) no son fácilmente biodegradables, necesiéndose mayores tiempos de oxidación para lograr intermedios más biodegradables. Se ha encontrado un tiempo óptimo de tratamiento de unos 60 minutos: en este punto los ratios DBO_5/DQO (*Graph 5.18*) y DBO_5/COT (*Graph 5.19*) aumentaron de 0 a 0.27 y 0.5 respectivamente. También se presentan los valores de $\text{DBO}_{10}/\text{DQO}$ y $\text{DBO}_{10}/\text{COT}$.

2.2. Eliminación de NB mediante $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$

2.2.1. Efecto de la concentración de H_2O_2

Se ha estudiado el efecto de la adición de peróxido de hidrógeno al proceso de ozonación, encontrándose que ni la velocidad de degradación ni la de mineralización se ven mejoradas significativamente. El peróxido de hidrógeno se añadió tanto al inicio, en relación a la cantidad de NB inicial (ratios 3:1 y 6:1 mol $\text{H}_2\text{O}_2/\text{mol NB}$) como dosificado en relación a la cantidad de ozono alimentado (de 0.5 a 10 mg $\text{H}_2\text{O}_2/\text{mg O}_3$) (ver *Graph 5.21*), intentándose establecer la dosis óptima para la eliminación de NB, como se ha establecido con otros compuestos en la literatura. Esto no fue posible al encontrar el efecto de la adición de H_2O_2 despreciable. En la literatura se apunta como posible explicación que la reacción [1.13] del ozono con el ion hidroperóxido no sea la iniciadora de la producción de radicales hidroxilo, sino que la presencia de otras sustancias, como

los nitrofenoles (identificados entre los intermedios de reacción) podrían inducir la formación de radicales peróxido, iniciándose así las reacciones radicalarias.

2.2.2. Estudio de biodegradabilidad

El estudio de biodegradabilidad se realizó con una concentración de H_2O_2 de 0.1 mol H_2O_2 /mol NB, producción de ozono 7.4 $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$, pH libre y una concentración inicial de NB de aprox. 100 ppm. Se ha encontrado que la adición de peróxido tampoco mejoró la biodegradabilidad de estas soluciones. Los mayores valores de DBO se encontraron también cuando la concentración de NB era menor del 30% de la inicial (ver *Graph 5.23*) y los ratios DBO_5/DQO y DBO_5/COT se aumentaron de 0 a 0.20 y 0.46, respectivamente, después de 60 minutos de tratamiento. También se presentan los valores de $\text{DBO}_{10}/\text{DQO}$ y $\text{DBO}_{10}/\text{COT}$ (ver *Graph 5.24* y *5.25*).

2.3. Eliminación de NB mediante $\text{O}_3/\text{Fe(III)}$

Previo a la experimentación con la combinación $\text{O}_3/\text{UV}/\text{Fe}$, se estudió la ozonación catalítica de ozono con Fe(III). Los experimentos se realizaron a producción de ozono 7.4 $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$, pH libre (inicial aprox. 3) y concentración de Fe relativa al NB inicial entre 1 y 0.01 mol Fe(III)/mol NB. El efecto de la adición de Fe(III) fue nulo o incluso inhibitorio de la velocidad de eliminación de NB (ver *Graph 5.26*). Tampoco mejoró la velocidad de mineralización de NB.

2.4. Eliminación de NB mediante O_3/UV

2.4.1. Fotólisis directa de NB: Efecto del pH

Previamente a la experimentación con esta combinación se realizaron dos actinometrías para determinar el flujo de radiación entrante, encontrándose un valor de aprox. 23.7 $\mu\text{Einstein}\cdot\text{s}^{-1}$ (1 Einstein = 1 mol fotones). También se miró el efecto de la fotólisis directa de NB a 254 nm a pH 3, 9 y libre, encontrándose que a las condiciones de trabajo la contribución de la fotólisis directa es prácticamente nula (ver *Graph 5.28*). En trabajos previos realizados por el grupo de investigación (Rodríguez et al., 2000) se encontró un valor de rendimiento cuántico de $(6 \pm 0.5)\cdot 10^{-3}$ mol.Einstein⁻¹.

2.4.2. Combinación O₃/UV: Efecto del pH

La combinación de ozono con radiación UV tampoco mejoró la velocidad de desaparición ni de mineralización obtenida mediante ozonación (ver *Graph 5.28 y 5.53*). Esto podría ser debido a la baja relación radiación/ozono del sistema. El efecto del pH también se estudió (pH 3, 9 y libre), encontrándose el mismo efecto inhibitorio a pH 9 ya observado en la ozonación (ver *Graph 5.32*). Sin embargo, sí se observó una mayor descomposición de ozono en radicales hidroxilo (*Graph 5.33*), sugiriendo que quizás en la combinación O₃/UV no es la vía radicalaria la principal vía de actuación.

2.4.3. Uso de radiación UVA – Estudio de biodegradabilidad

En lugar de radiación UV (254 nm) se utilizaron lámparas de luz negra emitiendo en el rango 300-420 nm, centrado en 360 nm, previo a la experimentación con la combinación O₃/UVA/Fe(III). En este caso, la principal fuente de radicales hidroxilo sería la reacción de ozono con el peróxido producido. Por otra parte, el NB absorbe a longitudes de onda de hasta 400 nm (ver *Figure 4.7*) y en trabajos realizados por el grupo de investigación se observó que la fotólisis directa contribuía de manera notable a la degradación de NB (Rodríguez et al., 2000a).

El uso de luz UVA en vez de UV no mejora la velocidad de desaparición del NB (*Graph 5.34*) pero sí la velocidad de mineralización (*Graph 5.48*). La contribución de la fotólisis directa del NB a estas longitudes de onda podría justificar la diferencia. Sin embargo, no mejora el efecto logrado por la ozonación simple en la biodegradabilidad de soluciones de NB. Los valores más altos de DBO₅/DQO y DBO₅/TOC se obtuvieron después de 90 minutos de tratamiento y fueron 0.20 y 0.43, respectivamente (ver *Graph 5.36 y 5.37*). También se presentan los valores de DBO₁₀/DQO y DBO₁₀/COT.

2.5. Eliminación de NB mediante O₃/UV/H₂O₂

2.5.1. Efecto de la concentración de H₂O₂

Se estudió el efecto de la combinación O₃/UV/H₂O₂ en soluciones acuosas de 100 ppm de NB, producción de ozono 7.4 g.h⁻¹, pH libre y concentración de peróxido entre 6:1 y 1:1 mol H₂O₂/mol NB. La adición de peróxido a la combinación O₃/UV no mejoró la velocidad de desaparición de NB (*Graph 5.38*), aunque sí la velocidad de mineralización (ver *Graph 5.40*), viéndose favorecido ligeramente por el aumento de la concentración de peróxido.

2.5.2. Estudio de biodegradabilidad

El estudio de biodegradabilidad se realizó con una concentración de H_2O_2 de 0.1 mol H_2O_2 /mol NB como en el caso de la combinación $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$, producción de ozono 7.4 $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$, pH libre y una concentración inicial de NB de aprox. 100 ppm. Se ha encontrado que la adición de peróxido tampoco mejoró la biodegradabilidad de estas soluciones. Los mayores valores de DBO se encontraron también cuando la concentración de NB era menor del 10% de la inicial (ver *Graph 5.41*) y los ratios DBO_5/DQO y DBO_5/COT se aumentaron de 0 a 0.32 y 0.49, respectivamente, después de 75-90 minutos de tratamiento, similares a los obtenidos mediante ozonación simple. También se presentan los valores de $\text{DBO}_{10}/\text{DQO}$ y $\text{DBO}_{10}/\text{COT}$ (ver *Graph 5.42* y *5.43*).

2.6. Eliminación de NB mediante $\text{O}_3/\text{UV}/\text{Fe}$

2.6.1. Efecto de la concentración de Fe(III)

Se ha estudiado el efecto de la concentración de Fe(III) en relación 3:1 a 0.1:1 mol Fe(III)/mol NB en soluciones acuosas de aprox. 100 ppm NB y producción de ozono 7.4 $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$. El pH no fue ajustado, aunque inicialmente era aprox. 3. La adición de Fe(III) a la combinación O_3/UV no mejora la velocidad de desaparición de NB, es más, ésta se ve inhibida a concentraciones de Fe(III) altas (*Graph 5.44*), pero sí aumenta significativamente la velocidad de mineralización (*Graph 5.46*). La fotodescarboxilación de los complejos de Fe(III), las reacciones tipo Fenton y de los iones de Fe(III) con UV en disolución acuosa se apuntan como posibles causas de la mejora observada con esta combinación.

2.6.2. UVA vs. UV – Estudio de biodegradabilidad

En lugar de radiación UV (254 nm) se utilizaron lámparas de luz negra emitiendo en el rango 300-420 nm, centrado en 360 nm, ya que los complejos de Fe(III) absorben notablemente en el rango 300-390 nm. El uso de luz UVA en vez de UV no mejora la velocidad de desaparición del NB (*Graph 5.47*) pero sí la velocidad de mineralización con respecto a la combinación $\text{O}_3/\text{UV}/\text{Fe(III)}$ (*Graph 5.48*), siendo el proceso con el que se ha logrado el mayor grado de mineralización. Sin embargo, no mejora el efecto logrado por la ozonación simple en la biodegradabilidad de soluciones de NB. Los valores más altos de DBO_5/DQO y DBO_5/COT se obtuvieron después de 90 minutos de tratamiento y fueron 0.24 y 0.40, respectivamente (ver *Graph 5.50* y *5.51*). También se presentan los valores

de DBO_{10}/DQO y DBO_{10}/COT . Se ha de tener en cuenta, sin embargo, que la DQO mediante este proceso disminuye significativamente. En el análisis de intermedios se ha observado la presencia de nuevos intermedios (entre ellos el 2-nitroresorcinol) y una mayor concentración de nitrofenoles. Siendo estos compuestos difícilmente biodegradables, junto con el mayor grado de mineralización logrado, podría justificar los resultados de biodegradabilidad obtenidos.

2.7. Comparación de los distintos procesos estudiados para la degradación de NB

2.7.1. Velocidades de desaparición y mineralización

En este apartado se han comparado los distintos procesos estudiados en cuanto a la velocidad de desaparición de NB (ver *Graph 5.52*) y de mineralización (ver *Graph 5.54*). Se han ajustado las velocidades de desaparición de NB a una cinética de pseudo-primer orden, presentándose en la *Table 5.3* los valores de las constantes cinéticas, siendo la ozonación y la combinación O_3/H_2O_2 los más elevados. En cuanto al grado de mineralización, los procesos que han mostrado una mayor eficacia han sido las combinaciones $O_3/UV/Fe$ y $O_3/UVA/Fe$ (ver *Graph 5.53* y *Table 5.7*). Se ha realizado también el ajuste a un modelo cinético simple en dos etapas planteado en la bibliografía (Ku et al., 1996) ([5.8] a [5.15] y *Table 5.6*).

2.7.2. Aumento de la biodegradabilidad

Se han comparado los ratios DBO_5/DQO y DBO_5/COT para los distintos procesos estudiados. Así, se ha encontrado que los mayores valores se han obtenido después de 60-90 minutos de tratamiento. Los procesos que han mostrados mejores efectos en cuanto a aumento de la biodegradabilidad han sido la ozonación simple y la combinación $O_3/UV/H_2O_2$ (ver *Graphs 5.56* y *5.57*), con un ratio DBO_5/DQO de 0.32 tras 90 minutos de tratamiento.

2.7.3. Estimación de costes

Se ha realizado una estimación de los costes de operación, en base al coste de los reactivos utilizados y consumo eléctrico (ver *Table 5.8*). Como base se ha utilizado la cantidad de NB eliminado (€/kg NB) y de COT eliminado (€/kg C) tras 60 y 90 minutos de tratamiento. Los resultados se presentan en la *Table 5.9*. En cuanto a la mineralización de soluciones acuosas de NB, el proceso que presenta mejores costes es $O_3/UV/Fe$.

2.8. Identificación de intermedios

Muestras tratadas mediante los procesos O_3 , O_3/UVA y $O_3/UVA/Fe$, han sido analizadas mediante HPLC/MS. Se han podido identificar entre los intermedios de reacción los tres isómeros de nitrofenol y nitrocatecol. En este apartado se comenta un posible mecanismo de degradación del NB.

2,4-DICLOROFENOL (DCP)

2.9. Ozonación de DCP

En el proceso de ozonación simple se ha estudiado la influencia de la cantidad de ozono alimentada, la ozonación a pH básico, el aumento de la concentración inicial y de la presencia de secuestrantes de radicales, así como el efecto de la ozonación en la biodegradabilidad de soluciones acuosas de DCP. Además, se ha estudiado la oxidación biológica de una solución de 100 ppm de DCP preozonada.

2.9.1. Influencia de la producción de ozono

Se ha estudiado el efecto de la cantidad de ozono alimentada en la eliminación de DCP, en el rango de producciones 4.1 a 7.4 g.h⁻¹ (concentración inicial de DCP aprox. 100 ppm, temperatura ambiente, pH libre). Como se puede ver en el *Graph 5.56*, al aumentar la producción de ozono se aumenta la conversión de DCP a un tiempo determinado. En la *Table 5.10* se muestran las velocidades de eliminación de DCP (en mg.min⁻¹) para cada una de las producciones estudiadas, las cuales son más de 2 veces mayores que las obtenidas para NB. Sin embargo, al representar la cantidad de DCP eliminado frente a la dosis de ozono absorbido, se puede observar (ver *Graph 5.58*) que ésta no parece variar con la producción de ozono, indicando quizás que hay un mayor control de la reacción de ozono con DCP que de la transferencia de materia, como ya se observó en el caso del NB. La presencia de ozono disuelto (*Graph 5.60*) inmediatamente después de iniciarse el proceso y a lo largo del mismo parece confirmar esto último.

El coeficiente estequiométrico de la reacción ozono-DCP ha sido también estimado, encontrándose para el rango de producción estudiada aprox. 2.7 moles de O_3 consumido por mol de DCP eliminado (ver *Graph 5.61*). En la literatura se apunta un coeficiente estequiométrico de 2. También se ha calculado en base a COT, encontrándose un coeficiente de 3-4 moles de O_3 consumido por mol de COT eliminado.

2.9.2. Ozonación a pH básico

En este caso, sólo se ha estudiado la ozonación a pH básico para comparar con la ozonación a pH libre (concentración inicial de DCP aprox. 100 ppm, producción de ozono $5.4 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$). De los *Graph 5.64* y *5.66* se desprende que a pH 9 se mejora la velocidad de eliminación y mineralización del DCP: a pH básico no sólo se produce la descomposición de ozono en radicales hidroxilo sino que también se produce la disociación de DCP en iones diclorofenolatos, que pueden reaccionar con ozono molecular muy rápidamente.

Del análisis de la cantidad de ozono en el gas residual (*Graph 5.65*) se observa que la concentración de ozono residual fue cero mientras hubo DCP en solución: cuando éste es eliminado, la cantidad de ozono no reaccionado aumenta.

2.9.3. Influencia de la concentración inicial de DCP

Se ha estudiado el efecto del aumento de la concentración de DCP a 200 ppm (no se ha aumentado más para evitar problemas de espumas) a dos producciones de ozono diferentes. El pH se ha dejado evolucionar libremente y la producción de ozono se fijó en $5.4 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$. Como en el caso del NB, un aumento de la concentración inicial produce una disminución de la conversión para un tiempo determinado. Se ha ajustado la evolución de la concentración de DCP a una cinética de pseudo-primer orden y se han estimado los valores de las constantes cinéticas (*ver Table 5.11*), encontrándose también en este caso que al doblar la concentración se reduce a la mitad el valor de esta constante. En comparación al NB, los valores obtenidos son aprox. 3 veces mayor. Se han calculado también las velocidades de eliminación de DCP y estimado el coeficiente estequiométrico (*ver Table 5.12*).

También se ha ajustado la evolución del COT (*Graph 5.71*) a una cinética de pseudo-primer orden (indicada en la bibliografía), presentándose en la *Table 5.13* los valores de dichas constantes y el coeficiente estequiométrico en base al COT eliminado.

2.9.4. Influencia de la presencia de secuestrantes de radicales hidroxilo: t-BuOH

Al contrario de lo observado con NB, la ozonación en presencia de t-BuOH no disminuye la velocidad de desaparición de DCP (*ver Graph 5.73*), sugiriendo que a valores de pH bajo es el ataque directo por ozono molecular la principal vía de eliminación de DCP.

2.9.5. Estudio de biodegradabilidad: Influencia de la preozonación en la biodegradación de DCP

Se ha estudiado el efecto de la ozonación a pH libre y con producción de ozono 5.4 g.h^{-1} en la biodegradabilidad de soluciones de 100 ppm de DCP. Previamente, como en el caso del NB, se realizó con estas soluciones un análisis de DBO a 5 y 21 días y un test de inhibición, encontrándose que incluso a baja concentración la presencia de DCP es inhibidor de la oxidación biológica de otras fuentes de carbono (ver *Graph 5.75*) y no es biodegradable según el análisis de DBO.

La DBO ha sido medida a lo largo del experimento durante 5, 10 y 21 días, encontrándose los valores más altos cuando la concentración de DCP era menor del 10% de la inicial (*Graph 5.76*). Esto puede justificarse por el carácter inhibidor del DCP y/o a que los intermedios formados inicialmente no son fácilmente biodegradables, necesiéndose mayores tiempos de oxidación para lograr intermedios más biodegradables. Se ha encontrado un tiempo óptimo de tratamiento de unos 25-30 minutos (o 12 g.L^{-1} dosis de ozono): en este punto los ratios DBO_5/DQO (*Graph 5.77*) y DBO_5/COT (*Graph 5.78*) aumentaron de 0 a 0.25 y 0.4 respectivamente. También se presentan los valores de $\text{DBO}_{10}/\text{DQO}$, $\text{DBO}_{21}/\text{DQO}$, $\text{DBO}_{10}/\text{COT}$ y $\text{DBO}_{21}/\text{COT}$. En el *Graph 5.80* se muestra la evolución del AOS (Average Oxidation State) frente a la dosis de ozono. La evolución del ion cloruro se ha seguido también a lo largo del proceso de ozonación (ver *Graph 5.81*): cuando se ha eliminado todo el DCP de la solución la decoloración no es completa, lo que indica la presencia de intermedios clorados (la clorobenzoquinona ha sido identificada entre los intermedios de reacción).

La solución de 100 ppm de DCP, tras ser tratada mediante ozonación durante 30 minutos (tiempo establecido como óptimo), se alimentó a dos reactores biológicos trabajando con lodo de una depuradora municipal (Gavà, Barcelona), de los cuales en uno la biomasa fue previamente aclimatada a fenol (al que denominaremos *reactor aclimatado a fenol*). Dichos reactores fueron alimentados por la solución preozonada mezclada con agua residual doméstica (en el reactor no aclimatado) o con una solución de 100 ppm de fenol (en el reactor aclimatado) en diferentes porcentajes y a diferentes tiempos hidráulicos de retención. El porcentaje de la muestra se fue aumentando hasta que únicamente se alimentó a cada uno de los reactores la solución preozonada. En las *Tables 5.14* y *5.15* se presenta el resumen de los datos obtenidos durante la experimentación con los dos reactores biológicos. Del estudio se ha desprendido que un reactor trabajando con lodo de una depuradora municipal sería adecuado para el tratamiento de soluciones de DCP después de ser tratadas mediante ozonación,

lográndose con esta combinación hasta una eliminación del 80% del COT inicial (ver *Graph 5.85*).

Se ha intentado realizar ajustes cinéticos a distintas linearizaciones del modelo de Monod. De todos ellos, el que presentaba un mejor ajuste es el de pseudo-primer orden, aunque los errores asociados al ajuste se han encontrado demasiado elevados (ver *Graphs 5.86 to 5.89*). En la *Table 5.16* se resumen los valores de las constantes de pseudo-primer orden encontradas.

2.10. Eliminación de DCP mediante O_3/H_2O_2

2.10.1. Efecto de la concentración de H_2O_2

Se ha estudiado el efecto de la adición de peróxido de hidrógeno al proceso de ozonación, viéndose que no mejora significativamente la velocidad de degradación. El peróxido de hidrógeno se añadió al inicio, en relación a la cantidad de DCP inicial en el rango 0.1-1 mol H_2O_2 /mol DCP) (ver *Graph 5.90*). Sí se observó un efecto positivo en la eliminación de COT (ver *Graph 5.91*), mayor cuanto mayor era la cantidad de peróxido. Del análisis de la concentración de ozono disuelto (*Graph 5.92*) se desprende que la descomposición de ozono en radicales es mayor en presencia de peróxido.

2.10.2. Estudio de biodegradabilidad

El estudio de biodegradabilidad se realizó con una cantidad de H_2O_2 de 0.1 mol H_2O_2 /mol DCP, producción de ozono 5.4 g.h⁻¹, pH libre y una concentración inicial de DCP de aprox. 100 ppm. La adición de peróxido no mejoró la biodegradabilidad de estas soluciones. Los mayores valores de DBO se encontraron también cuando el DCP ya había sido eliminado (ver *Graph 5.95*) y los ratios DBO_5/DQO y DBO_5/COT se aumentaron de 0 a 0.30 y 0.55, respectivamente, después de 45 minutos de tratamiento. También se presentan los valores de estos ratios a 10 y 21 días (ver *Graph 5.96 y 5.97*).

2.11. Eliminación de DCP mediante O_3/UV

La combinación de ozono con radiación UV tampoco mejoró la velocidad de eliminación de DCP obtenida mediante ozonación (ver *Graph 5.100*). Esto podría ser debido a la baja relación radiación/ozono del sistema, como se ha comentado en el caso

del NB. En cuanto a la velocidad de mineralización, la adición de radiación UV a la ozonación aumentó la cantidad de COT eliminado en un 50% (ver *Graph 5.131*). La concentración de ozono disuelto fue menor durante este proceso, especialmente al inicio (*Graph 5.102*). Se ha estimado una velocidad de desaparición de DCP y de COT mediante esta combinación de $109 \text{ mg DCP}\cdot\text{min}^{-1}$ y $7.2 \text{ mg C}\cdot\text{min}^{-1}$, respectivamente.

La combinación de ozono con radiación UV no mejora el efecto logrado por la ozonación simple en la biodegradabilidad de soluciones de NB. Los valores más altos de DBO_5/DQO y DBO_5/COT se obtuvieron después de 45 minutos de tratamiento y fueron 0.14 y 0.23, respectivamente (ver *Graph 5.107* y *5.108*). Entre los intermedios formados no se detectó clorobenzoquinona pero sí nuevos intermedios que no pudieron ser identificados.

2.12. Eliminación de NB mediante $\text{O}_3/\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$

En este caso, sólo se ha estudiado el efecto de esta combinación en la biodegradabilidad de soluciones de DCP. El estudio se realizó con una cantidad de H_2O_2 de $0.1 \text{ mol H}_2\text{O}_2/\text{mol DCP}$ como en el caso de la combinación $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$, producción de ozono $5.4 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$, pH libre y una concentración inicial de DCP de aprox. 100 ppm. Se ha encontrado que la adición de peróxido y radiación UV tampoco mejoró la biodegradabilidad de estas soluciones. Los mayores valores de DBO se encontraron también cuando el DCP había sido ya eliminado (ver *Graph 5.110*) y los ratios DBO_5/DQO y DBO_5/COT aumentaron de 0 a 0.28 y 0.44, respectivamente, después de 45 minutos de tratamiento (ver *Graphs 5.111* y *5.112*). Se ha estimado una velocidad de desaparición de DCP y de COT mediante esta combinación de $85 \text{ mg DCP}\cdot\text{min}^{-1}$ y $6.6 \text{ mg C}\cdot\text{min}^{-1}$, respectivamente, no mejorando pues los ya obtenidos por la combinación O_3/UV . Como en el caso de ésta, se detectaron nuevos intermedios, entre los cuales no se encontraba la clorobenzoquinona.

2.13. Eliminación de NB mediante $\text{O}_3/\text{UV}/\text{Fe}$

2.13.1. Efecto de la concentración de Fe(III)

Se ha estudiado el efecto de la concentración de Fe(III) en relación $1.63\text{-}0.1 \text{ mol Fe(III)}/\text{mol DCP}$ en soluciones acuosas de aprox. 90 ppm DCP y producción de ozono $5.4 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$. El pH no fue ajustado, aunque inicialmente era aprox. 3. La adición de Fe(III) a la

combinación O_3/UV no mejora la velocidad de desaparición de NB, es más, ésta se ve inhibida a concentraciones de Fe(III) altas (*Graph 5.113*), pero sí aumenta la velocidad de mineralización (*Graph 5.114*), aunque no tan significativamente como en el caso del NB. La fotodescarboxilación de los complejos de Fe(III), las reacciones tipo Fenton y de los iones de Fe(III) con UV en disolución acuosa se apuntan como posibles causas de la mejora observada con esta combinación.

2.13.2. Efecto del tipo de sal de Fe(III)

Dado que en la literatura se comenta el carácter secuestrante de los iones cloruro y durante todo el estudio se utilizó $FeCl_3$ como sal de Fe(III), se quiso comprobar esto comparándolo con un experimento llevado a cabo con $Fe_2(SO_4)_3$. Sin embargo, no se observaron diferencias significativas ni en la velocidad de eliminación de DCP (*Graph 5.116*), ni en la mineralización (*Graph 5.117*) ni en la concentración de ozono en el gas residual (*Graph 5.118*).

2.13.3. Uso de Fe(II) vs. Fe(III)

Se ha estudiado también el uso de Fe(II) en lugar de Fe(III), observándose un periodo de inducción en el caso del uso de Fe(II) (ver *Graph 5.119*), probablemente debido al consumo de ozono por Fe(II) para pasar a Fe(III). El grado de mineralización obtenido ha sido similar en ambos casos (*Graph 5.120*).

2.13.4. Estudio de biodegradabilidad

Los resultados obtenidos mediante esta combinación son ligeramente mejores que los de ozonación simple. El estudio se efectuó con una cantidad de Fe(III) de 0.1 mol Fe(III)/mol DCP. Los valores de DBO encontrados son similares a los de ozonación (ver *Graph 5.122*), pero mediante esta combinación se disminuyen los valores de DQO y COT, obteniéndose unos ratios DBO/DQO (*Graph 5.123*) y DBO/COT (*Graph 5.124*) mayores: los valores obtenidos después de 30 minutos de tratamiento fueron 0.28 y 0.44, respectivamente. En este caso sí se detectó clorobenzoquinona entre los intermedios, pero en menor concentración, desapareciendo antes que en la ozonación simple.

2.13.5. UVA vs. UV

En lugar de radiación UV (254 nm) se utilizaron lámparas de luz negra emitiendo en el rango 300-420 nm, centrado en 360 nm, ya que los complejos de Fe(III) absorben notablemente en el rango 300-390 nm. El uso de luz UVA en vez de UV no mejora la velocidad de desaparición del DCP (*Graph 5.125*) ni significativamente la velocidad de

mineralización con respecto a la combinación $O_3/UV/Fe(III)$ (*Graph 5.126*). En cuanto a la biodegradabilidad, se han obtenido mejores resultados, que habría que contrastar (*Graph 5.128*).

2.14. Comparación de los distintos procesos estudiados para la degradación de NB

2.14.1. Velocidades de desaparición y mineralización

En este apartado se han comparado los distintos procesos estudiados en cuanto a la velocidad de desaparición de DCP (ver *Graph 5.129*) y de mineralización (ver *Graph 5.131*). Se han ajustado las velocidades de desaparición de DCP a una cinética de pseudo-primer orden, presentándose en la *Table 5.17* los valores de las constantes cinéticas, siendo la ozonación y la combinación O_3/UV los más elevados. En cuanto al grado de mineralización, siendo los procesos que han mostrado una mayor eficacia han sido las combinaciones $O_3/UV/Fe$ y $O_3/UVA/Fe$ (ver *Graph 5.131*). También se ha ajustado la evolución del COT a una cinética de pseudo-primer orden (ver *Table 5.18*). Se ha realizado también el ajuste a un modelo cinético simple en dos etapas planteado en la bibliografía (Ku et al., 1996) ([5.8] a [5.15] y *Table 5.21*).

2.14.2. Aumento de la biodegradabilidad

Se han comparado los ratios DBO_5/DQO y DBO_5/COT para los distintos procesos estudiados. Así, se ha encontrado que los mayores valores se han obtenido después de 30 minutos de tratamiento. Los procesos que han mostrado mejores efectos en cuanto a aumento de la biodegradabilidad han sido la ozonación simple y la combinación $O_3/UV/Fe(III)$ (ver *Graphs 5.133* y *5.134*), con un ratio DBO_5/DQO de 0.25 y 0.28 tras 30 minutos de tratamiento.

2.14.3. Estimación de costes

Se ha realizado una estimación de los costes de operación, en base al coste de los reactivos utilizados y consumo eléctrico (ver *Table 5.8*). Como base se ha utilizado la cantidad de NB eliminado (€/kg NB) y de COT eliminado (€/kg C) tras 30 y 60 minutos de tratamiento. Los resultados se presentan en la *Table 5.22*. En cuanto a la mineralización de soluciones acuosas de NB, el proceso que presenta mejores costes es $O_3/UV/Fe$.

2.15. Identificación de intermedios

Se trató de identificar los intermedios de reacción mediante el análisis de las muestras por HPLC. Únicamente se ha podido identificar la clorobenzoquinona entre los intermedios formados. En la literatura se apuntaba como posible intermedio la clorohidroquinona, pero ésta no ha sido detectada entre los intermedios.

2.16. Tratamiento de aguas residuales mediante ozonación y oxidación biológica: modelo matemático

En el capítulo 6 se ha planteado un posible modelo matemático para la combinación de un proceso de ozonación con un tratamiento biológico, centrado en el efecto potencial de la presencia de ozono residual en el rendimiento del reactor biológico. Este modelo se ha creado adaptando un modelo planteado en la bibliografía para la desinfección mediante ozono a un sistema de fangos activos trabajando en presencia de ese ozono residual. Este modelo permitiría predecir el comportamiento del reactor biológico bajo diferentes cargas de sustrato y de concentraciones de ozono residual, ayudando a identificar aquellas situaciones en que sería necesario un “stripping” antes del reactor biológico.

3. Conclusiones

Del presente estudio se han extraído principalmente las siguientes conclusiones:

- 1) Los POAs basados en ozono estudiados han resultado eficaces en la degradación y aumento de biodegradabilidad de soluciones acuosas de NB y DCP.
- 2) La velocidad de eliminación de NB se encontró en el rango de $37 \text{ mg}\cdot\text{min}^{-1}$ (para $4.1 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$ producción de ozono) a $78 \text{ mg}\cdot\text{min}^{-1}$ (para $14.6 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$ producción de ozono), mientras que en el caso de DCP las velocidades de eliminación oscilan entre 80 y $127 \text{ mg}\cdot\text{min}^{-1}$ para producciones de ozono de 4.1 y $7.4 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$, respectivamente. Por lo tanto, la velocidad de eliminación de DCP es aprox. 2 veces mayor que la del NB.

- 3) Se estimaron los coeficientes estequiométricos de la reacción de ozono con NB y DCP, siendo 4.0 and 2.7 mol O₃ consumido per mol de compuesto eliminado, respectivamente.
- 4) Con respecto al efecto del pH en la ozonación, esta variable no pareció tener un efecto importante en la eliminación de NB en el rango estudiado (3 a 9). Se apreció una leve inhibición a pH 9. Sin embargo, en el caso de DCP al aumentar el pH se produce una mejora de la velocidad de eliminación y de mineralización.
- 5) Se ajustó la evolución de la concentración de ambas sustancias a una cinética de pseudo-primer orden con respecto a la concentración del contaminante, siendo los valores de las constantes para el DCP aprox. 3 veces mayores que para el NB.
- 6) La ozonación en presencia de carbonatos y t-BuOH se vio fuertemente inhibida en el caso de soluciones de NB, señalando la importancia de la vía radicalaria en la eliminación de este compuesto en las condiciones de trabajo. Por el contrario, no se observó ninguna inhibición en el caso de la ozonación de DCP en presencia de t-BuOH: la ozonación de DCP a valores bajos de pH transcurriría pues por vía directa a través de ozono molecular.
- 7) La ozonación demostró ser eficaz en el aumento de la biodegradabilidad de soluciones acuosas de NB y DCP. En el caso de NB, se aumentaron las relaciones DBO₅/DQO y DBO₅/COT de 0 a 0.27 y 0.5, respectivamente, tras 60 minutos de tratamiento (dosis de ozono 0.25 g.L⁻¹). En el caso de DCP, estas relaciones aumentaron de 0 a 0.25 and 0.4 respectivamente, tras una dosis de ozono de 0.12 g.L⁻¹ (30 minutos de tratamiento). Los mayores valores de DBO se han obtenido cuando estos compuestos fueron eliminados. Este hecho se podría atribuir al carácter inhibidor de ambas sustancias y/o a que los intermedios formados inicialmente no son fácilmente biodegradables, necesitando una mayor oxidación.
- 8) Se encontró un tiempo óptimo de tratamiento para un proceso combinado ozonación-oxidación biológica de 30 y 60 minutos para el DCP y NB, respectivamente, bajo las condiciones de trabajo. En el caso de DCP, las soluciones preozonadas se alimentaron a dos reactores biológicos, mostrando que lodo activo de una depuradora municipal es adecuado para el tratamiento de estas soluciones preozonadas. Mediante la combinación de estos procesos se logró hasta un 80% de eliminación de COT.

- 9) La adición de peróxido de hidrógeno no mejoró la velocidad de eliminación ni la biodegradabilidad de las soluciones de NB y DCP. Sí mejoró la velocidad de mineralización, aumentando con la concentración de peróxido.
- 10) De la misma manera, la combinación de ozono con radiación UV no mejoró la velocidad de eliminación ni la biodegradabilidad de estas soluciones. Con respecto a la mineralización, la adición de radiación UV aumentó levemente la cantidad de COT eliminado en el caso de DCP, mientras que en el caso de NB no se observó ninguna mejora.
- 11) La combinación de ozono con radiación UV y peróxido de hidrógeno aumentó significativamente el grado de mineralización con respecto a la ozonación simple, de aprox. 40 al 65% después de 120 y 90 minutos de tratamiento en el caso de NB y DCP, respectivamente. No se observó mejora en el caso de la velocidad de eliminación ni la biodegradabilidad.
- 12) La combinación $O_3/UV/Fe(III)$ presentó los mayores porcentajes de mineralización de ambos compuestos. Con respecto a la ozonación simple, la cantidad de COT eliminado aumentó del 40 al 80% tras 120 y 90 minutos de tratamiento en el caso de NB y DCP, respectivamente. Este hecho se podría atribuir a la fotodescarboxilación de los complejos de $Fe(III)$, las reacciones Fenton y las de los iones $Fe(III)$ con radiación UV. Mediante el uso de luz UVA en lugar de UV se aumentó el porcentaje de mineralización a un 90%.
- 13) La ozonación simple ha demostrado ser el proceso más eficaz para el aumento de la biodegradabilidad de soluciones acuosas de NB y DCP, mientras que la combinación $O_3/UVA/Fe(III)$ se propone como mejor método para la mineralización de estas soluciones.
- 14) Se han identificado los tres isómeros de nitrofenol y nitrocatecol entre los intermedios generados en el tratamiento de NB. Entre los intermedios de DCP, se identificó la clorobenzoquinona en muestras tratadas por ozonación y $O_3/UV/Fe$.
- 15) Se han estimado los costes de operación para el tratamiento de soluciones de estos dos compuestos, encontrándose un coste de aprox. 13 €/kg NB eliminado (tras 60 minutos de tratamiento) y 4 €/kg DCP eliminado (tras 30 minutos de tratamiento) para los distintos procesos estudiados. Con respecto al COT, $O_3/UV/Fe$ se ha mostrado como la opción más atractiva, con aprox. 63€ y 41€/kg COT eliminado para NB y DCP, respectivamente.

- 16) Se ha desarrollado un modelo matemático para la estimación de la concentración de A (contaminante), S (intermedio biodegradable), N (biomasa), X ("*fast ozone demand groups*") y ozono (disuelto) con el tiempo de residencia para un reactor biológico en presencia de ozono residual. Este modelo ayudaría a predecir las situaciones en que sería necesario un *stripping* previo entre la ozonación y el reactor biológico.