

Evaluación de la eficiencia de los procesos de coagulación-floculación y ozonización a escala de laboratorio en el tratamiento de aguas residuales municipales

Eliet Véliz Lorenzo, José Guadalupe Llanes Ocaña,* Lidia Asela Fernández García y Mayra Bataller Venta.

Centro de Investigaciones del Ozono, Avenida 15 y calle 230, No.1313, Reparto Siboney, Playa, Ciudad de La Habana, Cuba. Código Postal 6412. Correo electrónico: eliet.veliz@cnic.edu.cu, velizl@yahoo.es *Universidad Autónoma de Sinaloa, Ciudad de Culiacán, México.

Recibido: 8 de abril de 2009.

Aceptado: 15 de marzo de 2010.

Palabras clave: aguas residuales, riego agrícola, coagulación-floculación, ozonización, tecnología de tratamiento.
Key words: wastewater, agricultural irrigation, coagulation-flocculation, ozonation, treatment technology.

RESUMEN. La ozonización de aguas y aguas residuales se ha convertido en un método atractivo, debido al poder oxidante y bactericida del ozono, por lo que su combinación con otros procesos tales como la coagulación-floculación, significaría un aumento en la eliminación de la carga orgánica, inorgánica y microbiológica de las aguas residuales, además de aumentar las concentraciones de oxígeno disuelto en las aguas tratadas, lo que posibilitaría su reúso. El objetivo del presente trabajo fue la evaluación a escala de laboratorio de la eficiencia de dos procesos de tratamiento de aguas residuales municipales, coagulación-floculación y ozonización (cada uno por separado y con la combinación de ambos) con el fin de obtener aguas con características físico químicas y microbiológicas, que permitan su vertimiento seguro o su reúso. Se empleó sulfato de aluminio como coagulante en dosis entre 6 y 100 mg/L y un polímero catiónico comercial como floculante en dosis de 0,5 mg/L; la ozonización se estudió para tres puntos de aplicación (antes, durante y después de la coagulación-floculación). Se evaluó la eficiencia de cada proceso para la turbiedad, los sólidos suspendidos totales, el color, los compuestos orgánicos medidos a 254 nm, la demanda química de oxígeno, el pH y oxígeno disuelto, así como la concentración de coliformes fecales. El esquema más eficiente resultó el de la coagulación-floculación con una posterior ozonización, con remociones de contaminantes físico químicos y de coliformes fecales superiores al 90 y 99,999 % respectivamente.

ABSTRACT. Water and wastewater ozonation has become a very attractive treatment method due to the high oxidant and bactericide power of ozone, therefore when ozonation is combined with other treatment processes, such as coagulation-flocculation, could significantly enlarge the elimination of organic, inorganic and microbiological loads from wastewaters, besides the dissolved oxygen concentrations notably increased in the treated waters, allowing their reuse. The objective of the present work was the lab scale evaluation of two wastewater treatment processes, coagulation-flocculation and ozonation (each one separately and both in combination) with the purpose of obtaining waters with appropriate physico-chemical and microbiological characteristics, for disposal or reuse. Aluminum sulfate (in doses between 6 and 100 mg/L) and a cationic polymer (0.5 mg/L) were used as coagulant and flocculant respectively. The ozonation process for three application points (before, during and after the coagulation-flocculation steps) was studied. To each process removal efficiency was evaluated for turbidity, total suspended solids, color, organic matter absorbance at 254 nm, chemical oxygen demand, pH and dissolved oxygen, as well as faecal coliform. The best treatment resulted to be the combination of coagulation-flocculation followed by ozonation, with reductions of physicochemical parameters and faecal coliform higher than 90 and 99.999 % respectively.

INTRODUCCIÓN

Debido a la creciente escasez mundial de agua, la comunidad científica internacional dedica grandes esfuerzos a la búsqueda de soluciones que permitan el tratamiento y la disposición de aguas residuales de distintas procedencias y la posibilidad de ser reutilizadas en diversos usos.

La Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización Panamericana de la Salud (OPS) y el Centro

Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) proponen para países tropicales y subtropicales el uso fundamentalmente de tratamientos biológicos, que pueden emplearse solos o en combinación. Algunos de estos sistemas son las lagunas de estabilización aerobias o facultativas, la digestores anaerobios, lodos activados, filtros biológicos y otros.¹

El CEPIS refiere el grado de eficiencia previsto en la eliminación de los principales agentes patógenos

microbiológicos para varios procesos de tratamiento de aguas residuales (Tabla 1).² Debido a que en las aguas residuales municipales se encuentra la mayoría de estos organismos patógenos en concentraciones elevadas, se recomienda combinar varios de estos procesos para lograr una mayor eficiencia.

Esta misma institución reconoce que con tratamientos convencionales (sedimentación, lodos activados, filtros biológicos, lagunas, zanjas de oxidación o tratamientos primarios avanzados), a menos que se suplementen con un proceso de desinfección, no es posible un efluente con menos de 1 000 coliformes fecales por 100 mL.¹

También refiere que la mayoría de los sistemas biológicos necesitan tiempos de retención de varios días, por lo que requieren grandes extensiones de terreno, además, pueden generar malos olores y vectores, por lo que deben estar alejados de las ciudades.

Todo lo anterior sugiere la necesidad de estudiar otros sistemas compactos, con menores tiempos de retención, elevadas eficiencias de remoción de contaminantes y que puedan ser construidos en las ciudades o en industrias para el tratamiento de sus aguas residuales.

La mejor variante en estos casos debe considerar una combinación de, al menos, dos procesos, uno que permita la remoción de contaminantes físico químicos (por ejemplo, tratamientos biológicos cuando la disponibilidad del terreno lo permita o por coagulación-floculación (C-F) para áreas menores) y un proceso de desinfección.

En la desinfección mediante cloración es difícil mantener una tasa elevada y uniforme de eficacia, debido a las dosis necesarias de cloro y otros reactivos químicos para ajustar el pH, costos de operación, transporte y almacenamiento. Por otra parte, en la cloración debido a la reacción con la materia orgánica presente, se forman productos organoclorados tóxicos como los trihalometanos que son cancerígenos,^{3,4} por lo que se han realizado estudios con otras alternativas entre las que se encuentran la desinfección con rayos ultravioletas, el tratamiento con ozono y la solarización (desinfección con la luz solar).⁵

La ozonización de aguas se ha convertido en un método atractivo en varios campos,⁶⁻⁸ por el elevado poder oxidante y bactericida del ozono⁹⁻¹² y se conocen los be-

neficios de su empleo en otros procesos de tratamiento de aguas.¹³⁻¹⁷ Por ejemplo, la aplicación del ozono antes de la C-F, ayuda al proceso de microfloculación o floculación de microcontaminantes solubles. Esto se debe a que en las aguas pueden estar presentes contaminantes orgánicos (compuestos organo-nitrogenados tales como urea, aminoácidos; compuestos organo-clorados tales como cloroisocianuros y trihalometanos, ácido fórmico, fenoles, etc.), cuya velocidad de reacción con el ozono es lenta, por lo que la mayoría de ellos son solo parcialmente oxidados y llegan a generarse productos mucho más polares. Estos grupos polares tales como grupos carbonilos ($=C=O$), carboxilos ($-COOH$) e hidroxilos ($-OH$) al combinarse con los cationes polivalentes presentes (calcio, magnesio, hierro, aluminio, manganeso) producen compuestos complejos, los cuales tienen altos pesos moleculares y pueden llegar a ser insolubles por lo que pueden ser removidos fácilmente por filtración.¹⁷

El punto de aplicación del ozono respecto al proceso de C-F (antes o después de este) depende de varios factores: calidad físico química y microbiológica que se pretenda obtener en el agua tratada, volúmenes de lodos en la C-F, dosis de reactivos, dosis de ozono a aplicar, etc.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la eficiencia, a escala de laboratorio, de la combinación de los procesos de C-F y ozonización, en el tratamiento de aguas residuales municipales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo fue desarrollado en el Laboratorio de Estudios del Agua de la Universidad Autónoma de Sinaloa, Ciudad de Culiacán, México, en conjunto con especialistas del Centro de Investigaciones del Ozono de Cuba. Las aguas residuales se obtuvieron de la planta de tratamiento de la ciudad, a la entrada del canal Parshal (desarenador). Se colectaron en tanques plásticos de 20 L para su inmediata utilización en los experimentos y cuando fue necesario su almacenamiento, se guardaron en refrigeración entre 4 y 8 °C. El muestreo se realizó una vez por semana durante cuatro meses (mayo-agosto).

Los procesos de C-F y ozonización se estudiaron por separado para comprobar la efectividad de cada uno en

Tabla 1. Grado de eficiencia previsto en la eliminación de los principales agentes patógenos.

Procesos de tratamiento ¹	Eliminación (unidades logarítmicas ₁₀)			
	Bacterias	Helminetos	Virus	Quistes
Sedimentación primaria sencilla	0 - 1	0 - 2	0 - 1	0 - 1
Con ayuda química ²	1 - 2	1 - 3	0 - 1	0 - 1
Lodo activado ³	0 - 2	0 - 2	0 - 1	0 - 1
Biofiltración ⁴	0 - 2	0 - 2	0 - 1	0 - 1
Laguna ventilada ⁴	1 - 2	1 - 3	1 - 2	0 - 1
Zanja de oxidación	1 - 2	0 - 2	1 - 2	0 - 1
Desinfección ⁵	2 - 6	0 - 1	0 - 4	0 - 3
Estanques de estabilización de desechos ⁶	1 - 6	1 - 3	1 - 4	1 - 4
Depósitos de efluentes ⁷	1 - 6	1 - 3	1 - 4	1 - 4

¹ Puede incluir otros. ² Se necesitan investigaciones más detalladas para confirmar los resultados. ³ Incluida la sedimentación secundaria. ⁴ Incluidos los estanques de sedimentación. ⁵ Cloración u ozonización. ⁶ Los resultados dependen del número de estanques en serie y de otros factores ambientales. ⁷ Los resultados dependen del tiempo de retención, que varía con la demanda.

la remoción de contaminantes, posteriormente, se realizó la combinación de ambos procesos de tratamiento, evaluando el mejor punto de aplicación del ozono (antes, durante o después del proceso de C-F).

Estudio de ambos procesos de tratamiento por separado

Proceso de coagulación-floculación

Se empleó la prueba de jarras,¹⁸ utilizando 6, 12, 24, 48, 100 mg/L de sulfato de aluminio como coagulante. A cada una de estas dosis se añadieron 0,5 mg/L de un producto floculante (polímero catiónico comercial Pro-sifloc C-24124, México). La agitación rápida se realizó a 250 r/min por un minuto; la lenta a 50 r/min por cinco minutos, seguida de 30 r/min por otros cinco minutos y finalmente, se dejó reposar el agua por 10 min.

Proceso de ozonización (O₃)

Para la generación de ozono se utilizó un ozonizador (OZONO PACIFIC, USA). La concentración de ozono en el gas a aplicar durante todo el proceso se midió en un espectrofotómetro marca DR-4000 (HACH, USA) a una longitud de onda de 256 nm. La ozonización se realizó en una columna de burbujeo de un litro y diámetro de 4 cm con difusor poroso en su parte inferior, se aplicó un flujo de gas de 10 L/h, una concentración de ozono en el gas de 30 mg/L y tiempos de contacto de 5, 10, 20 y 30 min, lo que implicó la utilización de dosis de ozono de 25, 50, 100 y 150 mg/L.

Para la comparación de los parámetros medidos en un mismo gráfico, fue necesario realizar la normalización o estandarización de los resultados, dividiendo los valores de concentración de cada muestra a los diferentes tiempos de contacto por el valor de su concentración inicial.

Estudio de la combinación de ambos métodos de tratamiento

Se emplearon jarras de un litro para la coagulación-floculación, con difusores porosos ubicados en el fondo para el proceso de ozonización. Se probaron tres puntos de aplicación del ozono respecto a la coagulación-floculación:

- **Preozonización (Pre O₃):** Primero, se realizó la ozonización en las jarras directamente al agua colectada en la planta y posteriormente, el proceso de C-F.
- **Interozonización (Inter. O₃):** El ozono se aplicó durante la agitación lenta del proceso de C-F.
- **Postozonización (Post O₃):** Primero, se llevó a cabo el proceso de C-F. El agua clarificada fue separada por reboso de los lodos formados. Posteriormente, en las mismas jarras, se realizó la ozonización.

Para el estudio a mayor escala, la C-F se realizó en un tanque de 30 L y la ozonización en una columna de 5 L y diámetro de 10 cm. Se aumentó la concentración de ozono en el gas hasta 45 mg/L, teniendo en cuenta un factor de seguridad de 1,5 de acuerdo con experiencias prácticas anteriores. Para el cálculo del flujo de gas necesario, en este caso, ($Q_g = V_{s_{gas}} \times \text{Área}_{columna}$), se mantuvo la velocidad superficial del gas (V_s) de 7,6 m/h calculada para la columna utilizada en el estudio anterior y teniendo en cuenta el área de la nueva columna, se obtuvo que $Q_g = 60$ L/h. Se aplicaron los mismos tiempos de contactos de 5, 10, 20 y 30 min, lo que implicó dosis de ozono de 45, 90, 180 y 270 mg/L.

El diagrama del flujo utilizado a esa escala (Fig. 1) permitió estudiar a ambas combinaciones de tratamiento utilizando un arreglo hidráulico de válvulas. En el caso de la preozonización, se cargó directamente la columna de burbujeo (5) con el agua residual con el empleo de la bomba peristáltica (8). Una vez que finalizó el tratamiento se descargó el agua ozonizada hacia el tanque donde se realizó el proceso de C-F y la posterior sedimentación (12). Para realizar la postozonización, primeramente se cargó el tanque (12) con aguas residuales y se llevó a cabo el proceso de C-F, después, empleando la bomba peristáltica (8) se llenó la columna de burbujeo (5) para la ozonización.

Determinaciones físico químicas y microbiológicas realizados

Las determinaciones físico químicas abarcaron: pH, turbiedad (2130 A), sólidos suspendidos totales (SST) - (2540 D), color (2120 C), demanda química de oxígeno

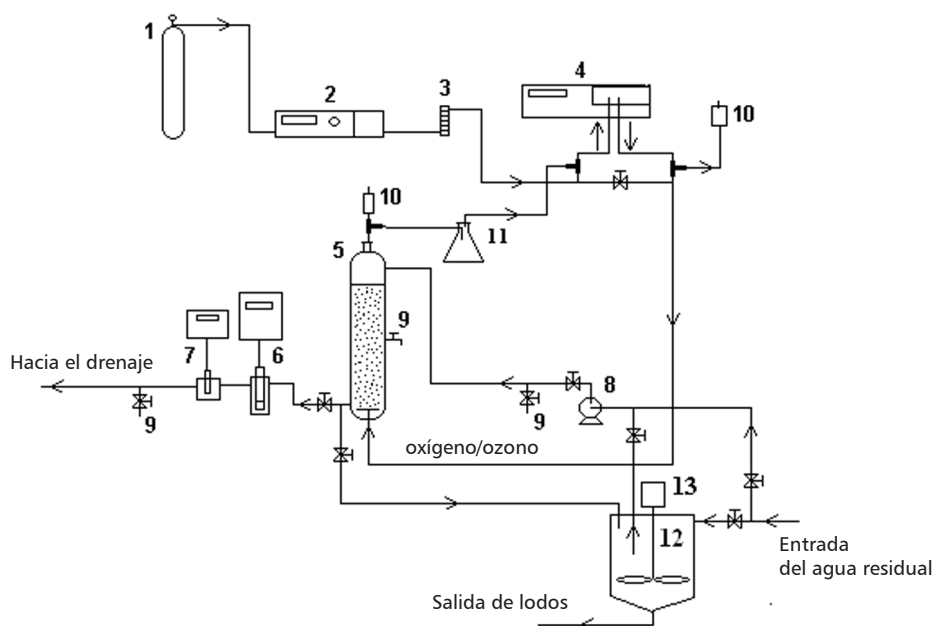


Fig. 1. Diagrama de flujo utilizado en el laboratorio.

1. Botellón de oxígeno. 2. Ozonizador. 3. Flujómetro. 4. Espectrofotómetro. 5. Columna de burbujeo. 6. Medidor de ozono disuelto. 7. Potenciómetro (pH). 8. Bomba peristáltica. 9. Válvula de toma de muestra. 10. Destructores de ozono. 11. Trampa para espumas. 12. Tanque para coagulación-floculación y sedimentación. 13. Agitador mecánico.

(DQO) – (5220 D) y oxígeno disuelto y se realizaron por las técnicas descritas en el Standard Methods (APHA 1995).²⁰

Se determinaron los coliformes fecales por constituir organismos indicadores de contaminación fecal regulados en normas nacionales e internacionales para vertimiento o reutilización de aguas residuales.²⁰⁻²³ Se realizó en el Laboratorio de Análisis Industriales de la Ciudad de Culiacán, México, por la técnica de fermentación en tubos múltiples.

Se determinó además la absorbancia a 254 nm ya que a esta longitud de onda se miden la mayoría de los compuestos aromáticos e insaturados, compuestos precursores de trihalometanos y organoclorados, así como compuestos fenólicos.²⁴

Análisis estadístico

El procesamiento de los resultados se realizó mediante el programa de cómputo STATGRAPHICS Plus versión 5.0. Se determinó la media y la desviación estándar de todos los grupos de datos mediante análisis de varianza (ANOVA) para un 95 % de confianza, posteriormente, para determinar si existían o no diferencias significativas entre los grupos se realizó una prueba de rangos múltiples (Duncan) también para un 95 % de confianza. Cada experimento fue realizado por triplicado (n = 3).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de las aguas residuales empleadas en este estudio

Al analizar los valores promedios de los parámetros medidos, en las aguas muestreadas durante todo el periodo en que se realizaron los experimentos, se pudo comprobar que la mayor contaminación se debió a partículas y coloides en suspensión que aportan al agua una elevada turbiedad y color aparente, así como compuestos que se miden a 254 nm, además, una considerable presencia de coliformes fecales (Tabla 2).

Los valores promedios de DQO obtenidos no indican una gran contaminación química del agua y pudieran haber estar asociados, entre otros, a compuestos surfactantes (detergentes) presentes en estas aguas.

Los niveles de turbiedad y sólidos en suspensión sugirieron que la aplicación de un proceso de C-F pudiera ser efectivo. Debido a la variabilidad observada en todos los parámetros, se sugirió que la tecnología de tratamiento que se implemente disponga de tanques colectores iniciales, con el objetivo de homogenizar las aguas residuales que llegarían al sistema de tratamiento.

Proceso de coagulación-floculación como único tratamiento

Se apreció que con 6 mg/L de coagulante se obtienen remociones de los parámetros físico químicos estudiados, entre 63 y 97 %, sin encontrar diferencias significativas entre las dosis estudiadas al ser comparadas entre ellas, aunque sí con respecto a los valores del agua cruda (Tabla 3). En este caso, el proceso de C-F se favoreció debido probablemente a que las aguas residuales estudiadas presentaron gran contenido de arenas y arcillas (son abundantes en los suelos de la región donde se realizó el estudio) y sólidos en suspensión, que por su propio peso y tamaño ayudan por efecto de arrastre a la sedimentación de los flóculos formados en el proceso.

Esta etapa no resulta eficiente en la eliminación de coliformes fecales (Tabla 4), en la que solo se logran remociones entre 40 y 60 % (alrededor de una unidad logarítmica), resultado que confirma lo planteado por el CEPIS para la eliminación de bacterias, cuando se emplean procesos de sedimentación primaria sencilla con ayuda química (Tabla 1). Para lograr una adecuada remoción de organismos patógenos se necesita disminuir más de cuatro unidades logarítmicas, lo que implica un 99,99 % de eficiencia. De igual forma, se observó que al duplicar las dosis de coagulante no se obtienen valores con diferencias estadísticamente significativas al ser comparadas entre ellas, ni con respecto a los valores del agua cruda. Esto hace necesario que este proceso se complemente con una etapa de desinfección.

Proceso de ozonización como único tratamiento

Se observó que con la ozonización como único tratamiento de esta agua (volumen de ozonización: 1 L), para la mayor de las dosis de ozono aplicadas (150 mg/L), se logran remociones entre 34 y 68 % de los parámetros medidos a los 30 min de ozonización (Tabla 5).

Estos niveles de remoción son favorables si este proceso se utiliza para mejorar la calidad de las aguas para vertimiento, pero no son suficientes si se estas pretenden reutilizar. Por ejemplo, la norma EPA exige para reutilización de aguas residuales en riego agrícola, riego de parques, campos deportivos, zonas verdes y otros usos, concentraciones de turbiedad inferiores a 5 UNT y de sólidos suspendidos totales (SST) menores de 30 mg/L.²¹ Debido a los volúmenes de agua a tratar en la práctica, sería necesario aplicar mayores dosis de ozono que incrementarían el costo del tratamiento, por lo que se recomienda implementar sistemas de pretratamiento a la ozonización.

Tabla 2. Intervalos y promedios de los parámetros medidos a las aguas estudiadas.

Parámetro	Media	Intervalo
pH	7,30	7,07 - 7,75
Turbiedad (UNT)	237	88 - 355
SST (mg/L)	268	110 - 380
Color (U Pt-Co)	1 200	510 - 1 661
Absorbancia a 254 nm	0,900	0,547 - 1,211
Oxígeno disuelto (mg/L)	1,60	0,23 - 3,41
DQO (mg/L)	204	120 - 280
Coliformes fecales (NMP/100 mL)	$2,3 \cdot 10^7$	$(0,9 - 3,7) \cdot 10^7$

n = 12. n Número de mediciones que se realizaron a las aguas muestreadas. UNT Unidades nefelométricas de turbiedad. U Pt-Co Unidades de platino-cobalto. SST Sólidos suspendidos totales. DQO Demanda química de oxígeno. NMP Número más probable.

Tabla 3. Valores promedios y porcentajes de remoción obtenidos para las distintas dosis de coagulante.

Dosis C + F		Turbiedad	R	SST	R	Color	R	Absorbancia	R
(mg/L)	pH	(UNT)	(%)	(mg/L)	(%)	U (Pt-Co)	(%)	(a 254 nm)	(%)
0	7,75	330,5 ± 17,0 ^a	—	324,0 ± 19,3 ^a	—	1550,2 ± 110,8 ^a	—	0,878 ± 0,196 ^a	—
6	7,86	10,3 ± 4,0 ^b	96,8	15,2 ± 3,0 ^b	95,3	128,7 ± 17,4 ^b	91,7	0,326 ± 0,055 ^b	62,9
12	7,83	9,4 ± 2,5 ^b	97,1	14,9 ± 2,5 ^b	95,4	128,1 ± 15,2 ^b	91,7	0,318 ± 0,039 ^b	63,8
24	7,73	7,5 ± 2,5 ^b	97,7	13,3 ± 2,0 ^b	95,8	116,4 ± 12,5 ^b	92,5	0,298 ± 0,024 ^b	66,1
48	7,71	4,1 ± 2,1 ^b	98,7	9,4 ± 3,0 ^b	97,1	88,8 ± 12,3 ^b	94,2	0,263 ± 0,018 ^b	70,0
100	7,47	3,2 ± 1,1 ^b	99,0	5,1 ± 2,5 ^b	98,4	63,4 ± 8,6 ^b	95,9	0,229 ± 0,024 ^b	73,9

C Coagulante. F floculante. n = 3. n Número de réplicas. R (%) Porcentaje de remoción obtenido con respecto al valor de la muestra inicial (Dosis de coagulante = 0). Los resultados se expresan como X ± DS. DS Desviación estándar. SST Sólidos suspendidos totales. Letras iguales (para cada parámetro): No existen diferencias estadísticamente significativas con respecto al valor de la muestra anterior. Letras diferentes (para cada parámetro): Existen diferencias estadísticamente significativas con respecto al valor de la muestra anterior.

Tabla 4. Coliformes fecales promedios y porcentajes de remoción obtenidos para las distintas dosis de coagulante.

Dosis C + F	Coliformes fecales	
	(mg/L)	R
	(NMP /100 mL) ± DS	(%)
0	(2,24 ± 1,27) · 10 ⁷ ^a	—
6	—	—
12	—	—
24	—	—
48	(1,32 ± 0,73) · 10 ⁷ ^a	41,1
100	(9,00 ± 2,27) · 10 ⁶ ^a	59,8

C Coagulante. F Floculante. n = 3. n Número de réplicas. R (%) Porcentaje de remoción obtenido con respecto al valor de la muestra inicial (Dosis de coagulante = 0). Los resultados se expresan como X ± DS. DS Desviación estándar. SST Sólidos suspendidos totales. Letras iguales (para cada parámetro): No existen diferencias estadísticamente significativas con respecto al valor de la muestra anterior. Letras diferentes (para cada parámetro): Existe diferencias estadísticamente significativas con respecto al valor de la muestra anterior.

Al analizar las cinéticas normalizadas (Fig. 2) de los valores referidos en la tabla 5, se puede observar que los compuestos que incrementan la DQO y los que se miden a 254 nm son los de mayor resistencia a la oxidación por el ozono, por lo que se necesitan mayores tiempos de contacto para que las remociones correspondientes tengan diferencias estadísticamente significativas con respecto a la muestra inicial (Tabla 5). Por el contrario, la turbiedad, el color y los SST logran su mayor remoción en los primeros 5 min de ozonización y no se observan diferencias significativas con respecto a los mayores tiempos de contacto (Tabla 5).

La concentración de oxígeno disuelto que se logra con la ozonización, al ser inyectada en el proceso una mezcla oxígeno/ozono, se incrementa como promedio

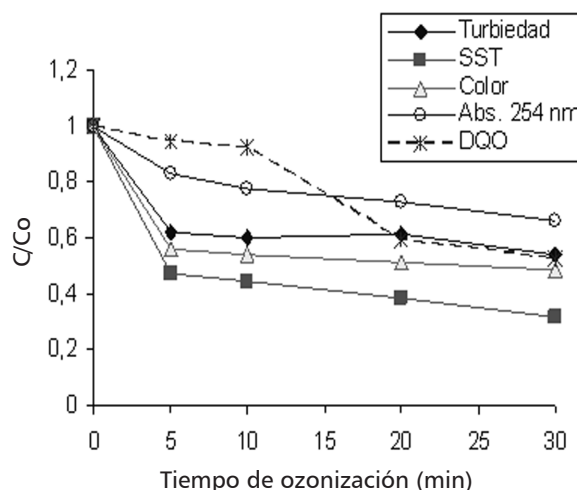


Fig. 2. Cinéticas normalizadas del proceso de ozonización en semicontinuo. C/Co Concentración de cada muestra con respecto a la concentración inicial. SST Sólidos suspendidos totales. DQO Demanda química de oxígeno.

24 veces con respecto a los valores de la muestra inicial, lo que pudiera favorecer la combinación de esta etapa con un posterior tratamiento biológico. Se presenta una tendencia típica de este comportamiento obtenido en los tres experimentos de ozonización realizados como único tratamiento (Fig. 3).

Selección del mejor punto de aplicación del ozono al combinarlo con el proceso de coagulación-floculación

Con la aplicación del ozono posterior al proceso de C-F (Post O₃) es donde se obtienen los mejores resultados de remoción de los parámetros evaluados y donde más se incrementan las concentraciones de oxígeno disuelto en el agua (Fig. 4). La variante menos recomendada es la de ozonizar durante el proceso de C-F (Inter O₃), ya que se observó que las burbujas de la mezcla oxígeno/ozono rompen los flóculos formados y no se logra un efecto de flotación en ellos.

Con la aplicación del ozono posterior a la etapa de C-F se obtuvieron remociones totales promedios entre 16 y 35 % superiores a la preozonización y se observaron

Tabla 5. Valores promedios y porcentajes de remoción totales durante la ozonización.

t_c	Turbiedad \pm DS (UNT)	SST \pm DS (mg/L)	Color \pm DS (Pt-Co)	Absorbancia \pm DS (a 254 nm)	DQO \pm DS (mg O ₂ /L)
0	191,2 \pm 14,1 ^a	215,5 \pm 12,0 ^a	1250,3 \pm 106,1 ^a	1,211 \pm 0,138 ^a	254,7 \pm 9,9 ^a
5	118,2 \pm 5,7 ^b	101,8 \pm 6,4 ^b	700,6 \pm 35,4 ^b	1,003 \pm 0,074 ^a	240,3 \pm 6,4 ^a
10	114,6 \pm 6,4 ^b	96,3 \pm 9,6 ^b	675,4 \pm 53,0 ^b	0,912 \pm 0,009 ^b	235,0 \pm 9,2 ^a
20	117,4 \pm 10,6 ^b	82,2 \pm 5,5 ^{bc}	640,2 \pm 31,8 ^b	0,868 \pm 0,038 ^b	150,8 \pm 10,4 ^b
30	103,1 \pm 7,8 ^b	68,5 \pm 8,7 ^c	605,0 \pm 52,4 ^b	0,799 \pm 0,035 ^b	133,2 \pm 7,7 ^b
R total (%)	46,1	68,4	51,6	34,0	47,6

$n = 3$. n Número de réplicas. t_c Tiempo de contacto gas-líquido. R total (%) Porcentaje de remoción obtenido a los 30 min con respecto al valor de la muestra inicial ($t_c = 0$). Los resultados se expresan como $X \pm DS$. DS Desviación estándar. Letras iguales (para cada parámetro): No existen diferencias estadísticamente significativas con respecto al valor de la muestra anterior. Letras diferentes (para cada parámetro): Existe diferencias estadísticamente significativas con respecto al valor de la muestra anterior.

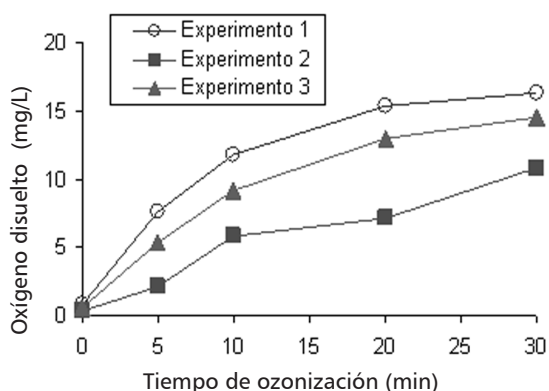


Fig. 3. Incremento de los niveles de oxígeno disuelto durante la ozonización.

diferencias estadísticamente significativas entre ambas combinaciones (Tabla 6). Al mismo tiempo, se observó un incremento en las concentraciones de oxígeno disuelto en esta variante, lo que favorece una mayor biodegradabilidad de esos residuos.

Ozonización después del proceso de coagulación-floculación a mayor escala

A esta escala (volumen de ozonización: 5 L) se confirmó que con la combinación de ambas etapas de tratamiento se logran porcentajes de remoción total de los parámetros físico químicos medidos entre 90 y 98 % (Tabla 7), con lo que se obtiene un agua transparente. Al mismo tiempo, la ozonización permitió la eliminación total del olor característico de las aguas residuales bajo estudio.

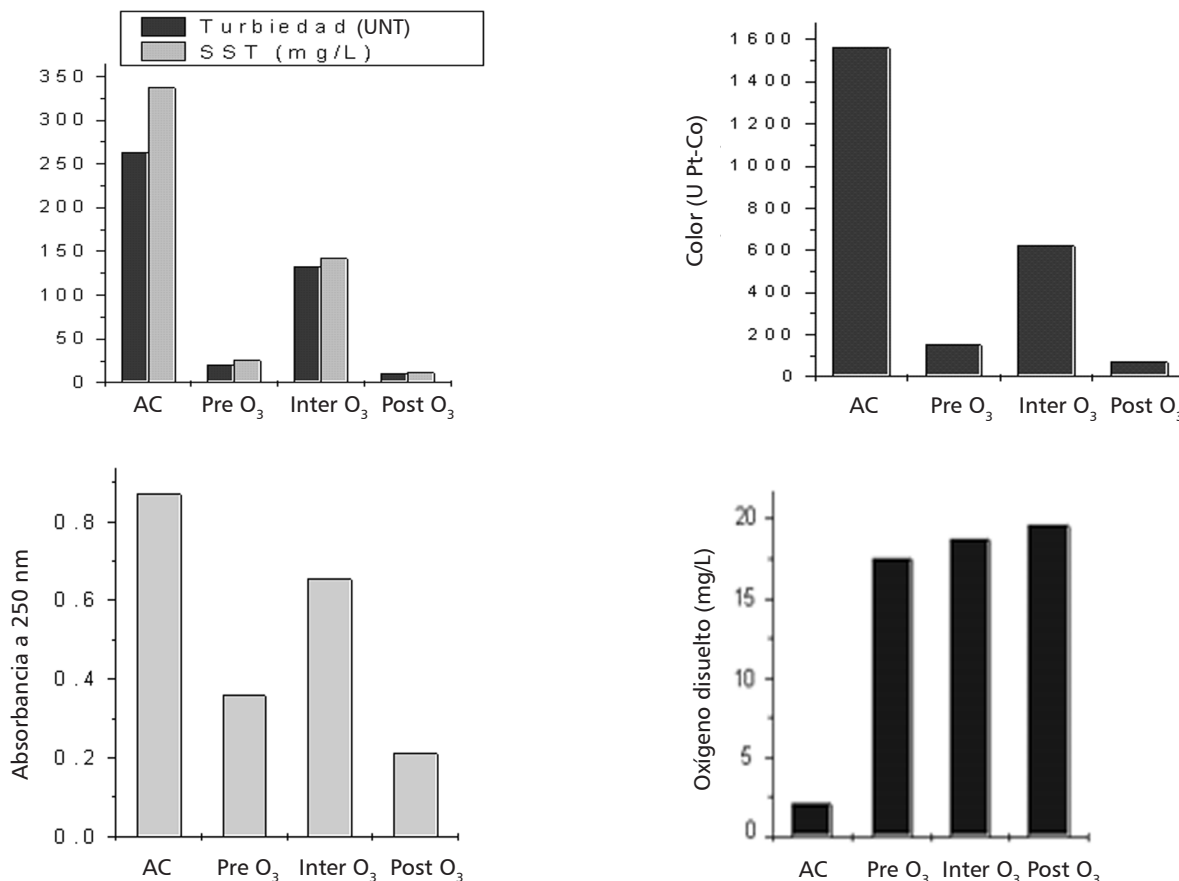


Fig. 4. Influencia del punto de aplicación del ozono (Pre O₃, Inter O₃ y Post O₃), al ser combinado con el proceso de coagulación-floculación. AC Agua cruda sin tratamiento. SST Sólidos suspendidos totales.

Tabla 6. Comparación de los porcentajes de remoción promedios obtenidos entre la preozonización y la postozonización.

Parámetros	Etapas	
	Ozono + Coagulación-floculación Preozonización (Porcentaje de remoción total)	Coagulación-floculación + Ozono Postozonización (Porcentaje de remoción total)
	(%)	
Turbiedad (UNT)	55,1 ± 2,2 ^a	89,3 ± 3,4 ^b
SST (mg/L)	73,4 ± 1,4 ^a	93,5 ± 1,2 ^b
Color (U Pt-Co)	69,2 ± 1,8 ^a	91,7 ± 2,1 ^b
Absorbancia a 254 nm	40,5 ± 0,4 ^a	75,4 ± 0,7 ^b
DQO (mg O ₂ /L)	53,6 ± 3,3 ^a	69,4 ± 3,0 ^b
Coliformes fecales (NMP/100 mL)	99,17 ± 0,01 ^a	99,99 ± 0,01 ^b
Oxígeno disuelto (mg/L)*	21*	101*

n = 3 n Número de réplicas. Ozono: 30 mg/L . Tiempo de contacto: 30 min . Coagulación-floculación: Coagulante (6 mg/L) + Flocculante (0,5 mg/L). * Número de veces que se incrementa el valor. Remoción total (%): combinación ambas etapas. NMP Número más probable. DQO Demanda química de oxígeno. SST Sólidos suspendidos totales. Los resultados se expresan como X ± DS. DS Desviación estándar. Letras diferentes (para cada parámetro): Existen diferencias estadísticamente significativas entre ambas combinaciones.

Al compararse estadísticamente los valores de los parámetros físico químicos para las cuatro dosis de ozono estudiadas, con respecto a los valores obtenidos en el proceso de C-F, se observó que para lograr una remoción significativa de DQO, se necesitan dosis de ozono de 180 mg/L . Para el resto de los parámetros, es suficiente una dosis de 90 mg/L .

El proceso de ozonización fue efectivo en la eliminación de los coliformes fecales, pues con la menor dosis

estudiada (45 mg/L), se lograron remociones superiores al 99,97 %. Para destinar estas aguas tratadas para reúso en riego agrícola, sería recomendable aumentar la dosis de ozono hasta 90 mg/L, lo que permitiría cumplir con las regulaciones internacionales establecidas para este microorganismo patógeno (< 1 000 NMP/100 mL de coliformes fecales).²⁰⁻²⁸ La dosis de 180 mg/L permite el cumplimiento de las normativas más estrictas establecidas por algunos estados y países.^{21,29} El análisis estadístico

Tabla 7. Valores promedios de los parámetros medidos y porcentajes de remoción parciales de cada etapa y totales para todo el tratamiento.

Parámetros	Etapas		Ozonización. Dosis O ₃ (mg/L)				Total R(%)
	AC	C-F	45	90	180	270	
T (UNT)	330,5 ± 17,0	9,1 ± 2,2	5,2 ± 1,8 ^a	4,9 ± 1,2 ^a	4,3 ± 0,4 ^a	4,4 ± 0,8 ^a	—
R(%)	—	97,2	42,9	46,1	52,7	51,6	98,7
SST (mg/L)	324,0 ± 19,3	17,5 ± 4,5	7,2 ± 3,4 ^a	7,2 ± 2,2 ^a	6,9 ± 2,6 ^a	7,3 ± 1,7 ^a	—
R(%)	—	94,6	58,9	58,9	60,6	58,3	97,7
Color (U Pt-Co)	1 550,2 ± 110,8	144,2 ± 8,5	46,5 ± 5,1 ^a	40,8 ± 2,0 ^{ab}	33,3 ± 3,1 ^{bc}	30,2 ± 1,5 ^c	—
R(%)	—	90,7	67,7	71,7	76,9	79,1	98,1
Absorbancia	0,878 ± 0,196	0,331 ± 0,02	0,143 ± 0,004 ^a	0,107 ± 0,005 ^b	0,091 ± 0,002 ^b	0,09 ± 0,002 ^b	—
R(%)	—	62,3	56,8	67,7	72,5	72,8	89,7
DQO (mg O ₂ /L)	178,4 ± 8,7	44,1 ± 4,5	36,2 ± 4,0 ^a	30,5 ± 2,5 ^a	18,4 ± 2,5 ^b	15,8 ± 2,0 ^b	—
R(%)	—	75,3	17,9	30,8	58,3	64,2	91,7
Col. Fec. (NMP/100 mL)	(2,24 ± 1,27) · 10 ⁷	(9,20 ± 0,81) · 10 ⁶	(2,42 ± 0,62) · 10 ³ ^a	530 ± 85,0 ^b	12 ± 3,5 ^b	0 ^b	—
R(%)	—	58,180	99,975	99,989	99,999	100	100

T Turbiedad. SST Sólidos suspendidos totales. Absorbancia a 254 nm . DQO Demanda química de oxígeno. Col. Fec. Coliformes fecales. n = 3. n Número de réplicas. AC Agua cruda sin tratamiento. Muestra inicial. C-F Etapa de coagulación-floculación (6 mg/L sulfato de aluminio + 0,5 mg/L polímero). Dosis O₃ Dosis de ozono aplicadas en la etapa de ozonización (mg/L). R(%) Porcentaje de remoción parcial, al compararse los valores obtenidos en cada etapa con respecto al valor de la muestra en la etapa anterior. Total R(%) Porcentaje de remoción total, al compararse los valores obtenidos con la mayor dosis de ozono con respecto al valor de la muestra inicial del agua cruda sin tratamiento. NMP Número más probable. Los resultados se expresan como X ± DS. DS Desviación estándar. Letras iguales (para cada parámetro): No existen diferencias estadísticamente significativas con respecto al valor de la muestra anterior. Letras diferentes (para cada parámetro): Existen diferencias estadísticamente significativas con respecto al valor de la muestra anterior.

demonstró que no existen diferencias significativas entre los valores al comparar las dosis de 90, 180 y 270 mg/L con respecto a la muestra inicial, por lo que no se justifica proponer un aumento hasta la mayor de las dosis de ozono, a no ser que se desee obtener un 100 % de eliminación de coliformes fecales.

Al comparar los niveles obtenidos de remoción de contaminantes físico químicos y microbiológicos para la dosis de ozono de 180 mg/L (Tabla 6), con los parámetros de calidad de agua residual tratada para su reutilización en riego agrícola establecidos por la Agencia de Protección Ambiental (EPA)²¹ (Turbiedad < 5 UNT; SST < 30 mg/L; Coliformes fecales: 0 a 200 NMP/100 mL en dependencia de si los cultivos se consumen crudos o procesados y DBO < 30 mg/L^a) y teniendo en cuenta el incremento de las concentraciones de oxígeno disuelto, se puede sugerir que el esquema tecnológico evaluado pudiera emplearse para la reutilización de aguas residuales urbanas para riego agrícola.

CONCLUSIONES

Para las dosis y condiciones de operación evaluadas, los procesos de coagulación-floculación y ozonización por sí solos pueden ser empleados para mejorar la calidad de las aguas residuales para su vertimiento, pero no son suficientes si se pretende reutilizar estas aguas.

La combinación más eficiente de ambos procesos resultó la coagulación-floculación seguida de la ozonización.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria. Tratamiento de aguas residuales [monografía]. [Consultada: 14 de septiembre de 2007]. Disponible en: <http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/fulltext/repind53/dis/discap74.html>.
2. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria. Tratamiento de aguas residuales [monografía en internet]. [Consultada: 14 de septiembre de 2007]. Disponible: <http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/fulltext/repind53/dis/discua75.html>.
3. DeMarini DM, Abu-Shakra A, Felton CF, Patterson KS, Shelton ML. Mutation Spectra in Salmonella of Chlorinated, Chloraminated or Ozonated Drinking Water Extracts: Comparison to MX. *Environmental and Molecular Mutagenesis*. 1995;26:270.
4. International Agency for Research on Cancer. Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, chlorinated drinking water; chlorination by-products, some other halogenated compounds. Lyon, 52;1991.
5. Blatchley III ER, Y Xie. Disinfection and antimicrobial processes. *Water Engineering Research*. 1994;67:475-481.
6. Le Pauloue J, Langlais B. State of the art of ozonation in France. *Ozone Science & Engineering*. 1999;21(2):153.
7. Rice RG. Ozone in the United States of America-State of the art. *Ozone Science & Engineering*. 1999;21(2):99.
8. Mork D. Tecnología en la generación de ozono. Pasado, presente y futuro. [CD-ROM Conferencia regional IOA]. Ciudad México; 2002.
9. Finch GR, Black EK, Gyüreck L. Ozone disinfection of Giardia and Cryptosporidium. American Water Works Association Research Foundation. Denver; 1994.
10. Liberti L, Notarnicola M, Lopez A. Advanced treatment for municipal wastewater reuse in agriculture. III- Ozone disinfection. *Ozone Science & Engineering*. 2000;22:151-166.
11. Roustan M, Stambolieva Z, Duguet JP, Wable O, Mallevalle J. Influence of hydrodynamics on Giardia cyst inactivation by ozone. Study by kinetics and by "CT" approach. *Ozone Science & Engineering*. 1991;13:451.
12. Lezcano I, Pérez Rey R, Baluja C, Sánchez E. Ozone inactivation of *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*, *Shigella sonnei* and *Salmonella thyphimurium* in water. *Ozone Science & Engineering*. 1999;21(3):293.
13. Orta de Velásquez MT, Altamirano JM, Monje I, Manero O. Improvement of wastewater coagulation using ozone. *Ozone Science & Engineering*. 1998;20:151-162.
14. Mathonnet S., Casellas C., Bablon G. and Bontoux J. Impact of preozonation on the granulometric distribution of materials in suspension. *Ozone Science & Engineering*. 1995;7:107-120.
15. Durán A, González E, and Ramírez RM. Comparación de dos procesos fisicoquímicos para el tratamiento de aguas residuales. *Tecnología Ciencia y Educación (IMIQ)*. 2001;16:28-41.
16. Seo GT, Lee TS, Moon BH, Lim.JH. Ultrafiltration combined with ozone for domestic wastewater reclamation and reuse. *Water Supply*. IWA Publishing. 2001;1:387-392.
17. Rice RG. Chemistries of ozone for pools and spa water treatment. *Proceeding 9th Ozone Word Congress*, New York. 1989;2:390.
18. Santiago JF. Manual de potabilización de aguas. Centro de Información de agua y saneamiento, INRH, La Habana, 1997:p.97-101.
19. APHA, AWWA, WPCE. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Ed. 1995:p.19.
20. World Health Organization. Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture. Technical report, Series 778, WHO, Geneva, Switzerland, 1989.
21. US Environmental Protection Agency/ US Agency for International Development. Guidelines for water reuse. Office of Wastewater Enforcement and Compliance, Technical report No. EPA/625/R-92/004, Washington, DC, 1992.
22. Norma oficial mexicana. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario oficial de la Federación. 1997:p.68-85.
23. NC. 27: 1999. Vertimiento de Aguas Residuales a las Aguas Terrestres y al Alcantarillado. Especificaciones.
24. Beltrán FJ. Ozone Reaction Kinetics for Water and Wastewater systems. Lewis Publishers, Washington, D.C, 2004:p.124.
25. Blumenthal UJ, Duncan D, Peasey A, Ruiz G, Stott R. Guidelines for the microbiological quality of treated wastewater used in agriculture: recommendations for revising WHO guidelines. *Bulletin of the World Health Organization*. 2000;78:9.
26. Bontoux L. The regulatory status of wastewater reuse in the European Union. *Wastewater Reclamation and Reuse*. Technomic Publishing Co; Lancaster, PA, USA. 1998:1463-1475.
27. Crook J. Water reclamation and reuse criteria. *Wastewater Reclamation and Reuse*. Technomic Publishing Co; Lancaster, PA, USA. 1998:489-520.
28. Asano T, Levine AD. Wastewater reclamation recycling and reuse: past, present and future, *Water Science Technology*. 1996;33(10):1-14.
29. State of California. Wastewater reclamation criteria. Berkeley, CA: Department of Health Services; California administrative code: 22, Division 4, Environmental Health. 1978.
30. Menéndez C, Pérez JM. Procesos para el tratamiento biológico de aguas residuales industriales. Editorial Félix Varela, La Habana, 2007:p.82.

^a Como la DQO promedio obtenida para esta dosis es 18,4 mg/L y teniendo en cuenta una relación práctica de DBO₅/DQO en el intervalo de 0,55 a 0,70,³⁰ se considera que se cumple con el criterio para la DBO de la EPA.