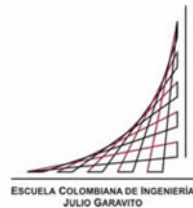


Maestría en Ingeniería Civil

Desinfección de agua residual con ácido peracético

Mónica Helena Rodríguez Mesa

Bogotá, D.C., 27 de abril de 2016



Desinfección de agua residual con ácido peracético

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con
énfasis en Ingeniería Ambiental**

Director:

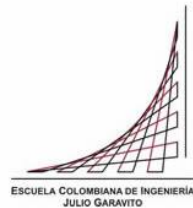
Jairo Alberto Romero Rojas

Jurados:

María Carolina Romero Pereira

Héctor Matamoros Rodríguez

Bogotá, D.C., 27 de abril de 2016



La tesis de maestría titulada “Desinfección de agua residual con ácido peracético”, presentada por Mónica Helena Rodríguez Mesa, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental.

Director de la tesis

Jairo Alberto Romero Rojas

Jurado

María Carolina Romero Pereira

Jurado

Héctor Matamoros Rodríguez

Bogotá, D.C., 27 de abril de 2016.

Con todo mi cariño y esfuerzo,
A Dios y a la Santísima Virgen María por hacer de esto una realidad,
En memoria de Buenaventura Rodríguez por ser siempre mi inspiración,
A María Rosa Elena Mesa y Oscar Rodríguez por su amor y apoyo incondicional,
Y a Mariana y Catalina Rodríguez por ser mi alegría.

Agradezco,

Al ingeniero Jairo Alberto Romero Rojas

por guiarme e instruirme a lo largo de este estudio,

A todos los docentes que hicieron parte de mi formación como magíster,

A Rosa Elena y Oscar por incentivar me en el cumplimiento de nuevas metas,

Y a la Santísima Trinidad por hacer todo esto posible.

Índice

1. Introducción.....	11
2. Definiciones.....	12
3. Marco teórico.....	14
3.1. Composición del APA.....	15
3.2. Mecanismos de oxidación del APA.....	16
3.3. Formación de subproductos con APA.....	17
3.3.1. Formación de aldehídos.....	17
3.3.2. Formación de bromofenoles.....	17
4. Metodología.....	19
5. Resultados.....	20
5.1. Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO.....	20
5.1.1. DBO del agua tratada con APA, $C_2H_4O_3$	20
5.1.2. DBO del agua tratada con cloro, Cl_2	22
5.2. Porcentajes de remoción de DBO con APA, $C_2H_4O_3$	24
5.3. Porcentajes de remoción de DBO con cloro, Cl_2	26
5.4. Residual de APA, $C_2H_4O_3$	28
5.5. Residual de cloro, Cl_2	30
5.6. Coliformes Fecales.....	32
5.6.1. Coliformes Fecales del agua tratada con APA, $C_2H_4O_3$	32
5.6.2. Coliformes Fecales del agua tratada con cloro, Cl_2	34
5.6.3. Porcentajes de remoción de CF con APA, $C_2H_4O_3$	36
5.6.4. Porcentajes de remoción de CF con cloro, Cl_2	38
5.6.5. Remoción de CF con APA, $C_2H_4O_3$, en unidades log.....	40
5.6.6. Remoción de CF con cloro, Cl_2 , en unidades log.....	42
5.7. Coliformes Totales.....	44
5.7.1. Coliformes Totales del agua tratada con APA, $C_2H_4O_3$	44
5.7.2. Coliformes Totales del agua tratada con cloro, Cl_2	46
5.7.3. Porcentajes de remoción de CT con APA, $C_2H_4O_3$	48
5.7.4. Porcentajes de remoción de CT con cloro, Cl_2	50
5.7.5. Remoción en unidades log de CT con APA, $C_2H_4O_3$	52
5.7.6. Remoción en unidades log de CT con cloro, Cl_2	54

6. Costos	56
7. Conclusiones.....	58
Referencias	59

Índice de tablas

Tabla 4.1. Técnicas de análisis	19
Tabla 5.1. DBO del agua tratada con APA, $C_2H_4O_3$, mg/L- O_2	20
Tabla 5.2. DBO del agua tratada con cloro, mg/L- O_2	22
Tabla 5.3. Porcentajes de remoción de DBO con APA.....	24
Tabla 5.4. Porcentajes de remoción de DBO con cloro	26
Tabla 5.5. Residual de APA, $C_2H_4O_3$	28
Tabla 5.6. Residual de cloro, Cl_2	30
Tabla 5.7. Coliformes Fecales del agua tratada con APA, $C_2H_4O_3$, UFC/100mL.....	32
Tabla 5.8. Coliformes Fecales del agua tratada con cloro, Cl_2 , UFC/100mL	34
Tabla 5.9. Porcentajes de remoción de CF con APA, $C_2H_4O_3$	36
Tabla 5.10. Porcentajes de remoción de CF con cloro, Cl_2	38
Tabla 5.11. Unidades log de remoción de CF con APA, $C_2H_4O_3$	40
Tabla 5.12. Unidades log de remoción de CF con cloro, Cl_2	42
Tabla 5.13. Coliformes Totales del agua tratada con APA, $C_2H_4O_3$	44
Tabla 5.14. Coliformes Totales del agua tratada con cloro	46
Tabla 5.15. Porcentajes de remoción de CF con APA, $C_2H_4O_3$	48
Tabla 5.16. Porcentajes de remoción de CT con cloro	50
Tabla 5.17. Remoción en unidades log de CT con APA, $C_2H_4O_3$	52
Tabla 5.18. Remoción en unidades log de CT con cloro	54
Tabla 6.1. Contenido de cloro de los desinfectantes.....	56
Tabla 6.2. Costos para desinfección de 1 m ³ de agua.....	57

Índice de figuras

Figura 5.1. DBO del agua tratada con $C_2H_4O_3$	21
Figura 5.2. DBO del agua tratada con Cl_2	23
Figura 5.3. Porcentajes de remoción de DBO con APA.....	25
Figura 5.4. Porcentajes de remoción de DBO con cloro.....	27
Figura 5.5. Residual de APA, $C_2H_4O_3$	29
Figura 5.6. Residual de cloro, Cl_2	31
Figura 5.7. Coliformes Fecales del agua tratada con APA, $C_2H_4O_3$	33
Figura 5.8. Coliformes Fecales del agua tratada con cloro, Cl_2	35
Figura 5.9. Porcentaje de remoción de CF con APA, $C_2H_4O_3$	37
Figura 5.10. Porcentajes de remoción de CF con cloro, Cl_2	39
Figura 5.11. Remoción de CF con APA, $C_2H_4O_3$, en unidades log.....	41
Figura 5.12. Remoción de CF con cloro, Cl_2 , en unidades log.....	43
Figura 5.13. Coliformes Totales del agua tratada con APA.....	45
Figura 5.14. Coliformes Totales del agua tratada con cloro.....	47
Figura 5.15. Porcentajes de remoción de CF con APA, $C_2H_4O_3$	49
Figura 5.16. Porcentajes de remoción de CT con cloro.....	51
Figura 5.17. Remoción de CT con APA, $C_2H_4O_3$, en unidades log.....	53
Figura 5.18. Remoción de CT con cloro, en unidades log.....	55

Resumen

En 1999 se determinó que el ácido peracético APA, es efectivo contra los coliformes totales. El APA está disponible comercialmente como mezcla cuaternaria en equilibrio de ácido acético, peróxido de hidrógeno, ácido peracético y agua.

En 2002, un segundo mecanismo de desinfección, liberando los radicales de hidróxido y variando la relación de ácido peracético H_2O_2 , demostró que el APA es el responsable de la acción biocida y no el H_2O_2 .

El APA reacciona con la materia orgánica de las aguas residuales. A niveles altos de concentración de materia orgánica, la desinfección ocurre siempre y cuando la dosis inicial sea lo suficientemente alta para satisfacer la demanda de APA del agua.

En 2013 se comprobó que el APA es un oxidante más fuerte que el dióxido de cloro y que el hipoclorito, pero no tanto como el ozono. El APA es un agente oxidante fuerte que puede ser usado como desinfectante de rutina para el agua residual porque no afecta la toxicidad del efluente, así que no necesita ser removido como el cloro.

En el presente estudio se comparó la eficiencia del ácido peracético con la del cloro en remoción de coliformes totales y de coliformes fecales. El APA obtuvo una desinfección del 100% con una dosis de 350 mg/L, y el cloro logró una desinfección del 100% con una dosis de 200 mg/L.

Adicionalmente, con una dosis de 400 mg/L, se encontró que el APA redujo la DBO en 86,9% mientras que el cloro la redujo en una 54,3%.

Capítulo I

Introducción

La importancia del agua radica en el valor que tiene tanto para la vida como para el progreso de la civilización, razón por la cual su contaminación microbiológica es un problema en constante estudio que tiene como base el tratamiento de aguas contaminadas mediante procesos de eliminación de microorganismos patógenos, disminuyendo así el riesgo en las áreas de alta densidad poblacional o en zonas sin acceso a agua potable.

Actualmente, el desinfectante más usado es el cloro (como gas o hipoclorito) debido a su alto poder biocida, pero al reaccionar con la materia orgánica originaria de las fuentes de agua, genera una diversidad de subproductos halogenados.

La necesidad de encontrar alternativas de desinfección que permitan obtener agua segura sin producción de residuales tóxicos, hacen que se justifique la búsqueda de nuevos agentes efectivos para eliminar organismos patógenos del agua. El APA puede ser un sustituto apropiado como desinfectante por sus características:

- Oxidante fuerte
- Ácido débil
- Estable
- Uso seguro
- Reacción rápida
- Residuales no tóxicos
- Residuales biodegradables

Su capacidad como desinfectante está fundamentada en traspasar la membrana citoplasmática de la célula, corroyendo los componentes y devastando el sistema enzimático. Por su evidente capacidad oxidante y su amplio espectro biocida (aun en presencia de materia orgánica) el APA se emplea como agente oxidante para el proceso de desinfección en agua residual (Rossi et al, 2007).

Capítulo II

Definiciones

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO DEL AGUA: Procedimientos de laboratorio que se efectúan a una muestra de agua para consumo humano para evaluar la presencia o ausencia, tipo y cantidad de microorganismos, en este caso: coliformes fecales y totales. (Resolución 2115 de 2007)

ÁCIDO PERACÉTICO, APA: La EPA aprobó el ácido peracético, APA, como un desinfectante para agua residual, el APA es un líquido claro e incoloro aprobado en concentraciones de 12 a 15 por ciento. Con estabilizantes para prevenir su degradación, mostró menos de 1% de disminución en su actividad por año. Al 12 % de concentración, su punto de refrigeración es de 40°C. Sin embargo, es explosivo en concentraciones superiores al 15%. La solución es ácida y requiere cuidado en la manipulación, transporte y almacenamiento. Está disponible en galones, debe ser guardado cerca del punto de aplicación y debe ser bien mezclado para su aplicación. La dosis empleada para desinfectar un efluente secundario depende del organismo objetivo, de la calidad del agua, y del nivel de inactivación requerido. Por ejemplo, una dosis de 5mg/L de ácido peracético al 15% con un tiempo de contacto de 20 minutos puede reducir coliformes totales y fecales 4 a 5 unidades log en efluentes secundarios (Morris, 1993).

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO, DBO: Es la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para oxidar la materia orgánica biodegradable en condiciones aerobias (Romero, 2013).

DESINFECCIÓN: Es considerada como ausencia completa de organismos patógenos, para prevenir propagación de enfermedades. Es importante que el agua residual sea tratada adecuadamente para obtener una desinfección idónea mediante un desinfectante efectivo. (United States Environmental Protection Agency, 2012).

CLORO RESIDUAL LIBRE: Es aquella porción que queda en el agua después de un período de contacto definido, que reacciona química y biológicamente como ácido hipocloroso o como ión hipoclorito. (Resolución 2115, 2007)

COLIFORMES: Grupo de bacterias en forma de bacilo pertenecientes a la familia Enterobacteriaceae, Gram positivas, aerobias y anaerobias facultativas, que no forman esporas, con capacidad de fermentar la lactosa y otros azúcares con producción de ácido y de gas a una temperatura de 35 y 37°C durante un lapso de 24 a 48 horas (González, 2012). Es un indicador de contaminación microbiológica del agua para consumo humano (Resolución 2115, 2007).

COLIFORMES FECALES, CF: Son aquellos coliformes (*Escherichiacoli*) de origen fecal que se encuentran en el intestino de animales de sangre caliente. Es el ensayo más adecuado como indicador de contaminación fecal.

COLIFORMES TOTALES, CT: Conteo total de bacterias coliformes, incluye especies fecales y ambientales. En agua de consumo son el indicador preferido de la eficiencia de la desinfección.

NITRÓGENO AMONIACAL: Se considera nitrógeno amoniacal todo el nitrógeno que existe como ion amonio o en equilibrio: $NH_4^+ = NH_3 + H^+$.

TÉCNICA DE FILTRACIÓN POR MEMBRANA: Técnica aceptada por la legislación colombiana (Resolución 2115 del 22 de julio de 2007) para la detección de coliformes totales, mesófilas y *Escherichiacoli* para agua de consumo. Es altamente reproducible, usa volúmenes de muestra relativamente grandes y se obtienen resultados con rapidez. La principal complicación de esta técnica es la turbiedad de la muestra, la cual se puede disminuir haciendo la dilución (González, 2012).

TIEMPO DE CONTACTO PARA EL DESINFECTANTE: Es el tiempo requerido desde la aplicación del desinfectante al agua hasta la formación como producto del residual del desinfectante, de forma que esa concentración permita la inactivación o destrucción de los microorganismos presentes en el agua (Resolución 2115, 2007).

UNIDADES LOG: Las unidades log corresponden al número de veces de la remoción porcentual (Romero, 2002). Por ejemplo: Si % R = 90%, entonces, $\log\left(\frac{1}{1-0,9}\right) = 1 \log$.

Capítulo III

Marco teórico

El ácido peracético ha sido usado en Europa por varios años para la desinfección del agua residual y constituye una nueva alternativa para aplicaciones en Norteamérica. Con la publicación de Bradly (1991) surgió el interés en el uso del ácido peracético como desinfectante para agua residual y, como todos los desinfectantes, el ácido peracético varía su eficiencia dependiendo del organismo a tratar. Se encontró que el E. coli y el MS-2 colifagos tienen resistencia similar, pero los poliovirus y ecovirus son más resistentes.

Lefevre (1992) y Liberti (1999) indicaron que la capacidad desinfectante del ácido peracético se debe a liberación de oxígeno activo, el cual, a su vez perturba los enlaces sulfhídricos y de sulfuro dentro de las enzimas contenidas en la membrana celular, afectando el transporte a través de la membrana, impidiendo así la actividad celular. Además, Liberti determinó que aunque el ácido peracético es efectivo contra los coliformes totales, es inefectivo para Giardia y Cryptosporidium. Así mismo, indicó que el ácido peracético comercial está disponible en una mezcla cuaternaria en equilibrio que contiene ácido acético, peróxido de hidrógeno, ácido peracético y agua. Su forma biocida se considera por ser un ácido no disociado.

Lazarova (1998) expuso que los bacteriófagos tienen una vasta diferencia de sensibilidad al ácido peracético, ya que usando el mismo efluente de agua residual y 120 minutos de contacto, 10 mg/L de ácido peracético fueron capaces de reducir 174 bacteriófagos por 7,5 unidades log, mientras 5mg/L de ácido peracético fueron necesarios para reducir MS-2 colifagos por solo 3,5 unidades log.

La EPA(1999) y Atasi (2001) sugirieron que el ácido peracético puede ser particularmente adecuado para la desinfección de efluentes de alcantarillado combinados, y Gehr (2002) determinó que el ácido peracético sería más apropiado como desinfectante para efluentes de tratamiento biológico, mejores que en aquellos de efluentes físico-químicos.

Un segundo mecanismo de desinfección, sugerido por Lubello (2002), consistió en liberar los radicales de hidróxido variando la proporción de ácido peracético a H_2O_2 , igualmente determinó que el ácido peracético es el responsable por la acción biocida y no el H_2O_2 .

En el mismo año, Gehr presentó resultados de un ensayo donde el ácido peracético fue evaluado como desinfectante tanto para efluentes físico-químicos como biológicos. Para eliminar un nivel de CF de 1000UCF/100mL con tiempos de contacto de 30 a 120 minutos, las dosis de ácido peracético para efluentes físico-químicos variaron entre 2 y 6mg/L, mientras que para efluentes biológicos fueron necesarias dosis más bajas entre 0,6 y 4 mg/L. Otro estudio reciente evaluó la posibilidad de usar ácido peracético en unión con UV como un tipo de proceso de oxidación avanzada.

El ácido peracético reacciona con la materia orgánica presente en las aguas residuales. Si hay poca materia orgánica, la reacción de desinfección será rápida, y la desinfección adicional después de 30 minutos de contacto será insignificante. Sin embargo, a niveles más altos de concentración de materia orgánica, la desinfección también puede ocurrir después de éste tiempo, proveyendo una dosis inicial de ácido peracético lo suficientemente alta para satisfacer la demanda de ácido peracético del efluente del alcantarillado, y para estabilizar el residual.

Con un tiempo de contacto de 30 minutos la eliminación completa de bacterias requiere un residual de cloro libre mayor de 0,2mg/L para pH menor de 9,2 y mayor de 0,6mg/L para pH igual a diez. Alternativamente, el residual de cloro combinado debe ser mayor de 2 mg/L para pH menor de 6,8 y mayor de 3mg/L para pH igual a diez (Romero 2002).

Según Emerging Technologies (2003), el ácido peracético es un oxidante más fuerte que el dióxido de cloro o el hipoclorito, pero no tan fuerte como el ozono. En partes de Europa y Canadá, el cloro no es usado debido al potencial para crear subproductos tóxicos. El APA es un agente oxidante fuerte que puede ser usado como desinfectante de rutina para el agua residual, éste no afecta la toxicidad del efluente, así que no necesita ser removido como el cloro.

El cloro es el desinfectante más comúnmente usado, pero puede, además, generar inconvenientes como los subproductos de la desinfección. El cloro reduce la contaminación microbial y previene la propagación de patógenos en el ambiente. Sin embargo, el cloro puede reaccionar con las sustancias orgánicas naturales presentes en las superficies de agua, aumentando el número de subproductos de desinfecciones volátiles y no volátiles con mutación y/o actividad carcinogénica. Por lo cual fue necesaria la investigación de desinfectantes alternativos diferentes al cloro que fueran efectivos contra la contaminación microbial del agua residual y reducir los subproductos.

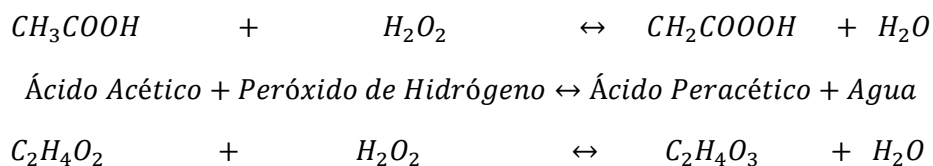
Kitis (2004) afirmó que las aguas residuales incrementan el riesgo del nacimiento de infecciones, demostrando que el agua residual no tratada es la primera contribuyente de bacterias al ecosistema acuático; ya segura que el ácido peracético es una alternativa para la desinfección de efluentes urbanos, ya que es efectivo contra las bacterias y los virus presentes en el agua residual urbana. Además, establece que la desinfección del agua residual es rutinariamente llevada a cabo para prevenir la propagación de patógenos presentes en los efluentes de agua residual. Para este caso, los tratamientos físicos y químicos son aplicados a los efluentes antes de sus emisiones en cuerpos de agua.

3.1. Composición del APA

Actualmente el ácido peracético, $C_2H_4O_3$, se emplea como desinfectante de alto nivel. Posee una rápida acción biocida frente a toda clase de microorganismos, hongos,

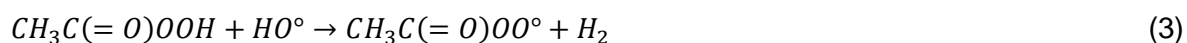
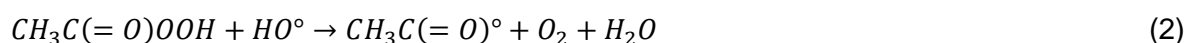
levaduras, bacterias, esporas y virus. La actividad desinfectante radica en su capacidad oxidante sobre la membrana externa de las bacterias, esporas y levaduras.

El comercio de APA es permitido en una mezcla cuaternaria en equilibrio que contiene ácido acético, peróxido de hidrogeno, ácido peracético y agua, como sugiere Gehr (2003) y se muestra a continuación:



3.2. Mecanismos de oxidación del APA

La oxidación por APA, expuesta por Bach, et al. (1996) y estudiada y confirmada en detalle por Rokhina, et al. (2010), se muestra a continuación:



La reacción (1) es la etapa de iniciación y es muy importante porque forma el radical HO[°] que es el que controla la velocidad. Los autores afirman que todos los que forman las especies radicales son contribuyentes activos a cualquier mecanismo de oxidación pero

HO°, y en cierta medida los radicales H₃C°, son los más significativos. La reacción requiere la presencia de un catalizador. Se ha demostrado que la existencia de Fe²⁺, intra o extra celular, es capaz de producir este tipo de reacciones (Imlay y Linn, 1988). Es importante tener en cuenta que se necesitan solo trazas de algunos compuestos de metales de transición para inducir las reacciones mencionadas anteriormente (Li et al. 1997; Nieto-Juarez et al. 2010; Jung et al. 2012).

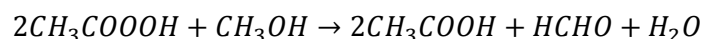
Los radicales libres tales como los de peróxido, el anión superóxido, y el radical hidroxilo son responsables de muchas de las posibles reacciones perjudiciales (McDonell y Russell, 1999; Denyer y Maillard, 2002). Las reacciones en cadena representadas por las ecuaciones (1) a (6) pueden proporcionar una explicación adecuada para la cinética de inactivación del APA, C₂H₄O₃.

3.3. Formación de subproductos con APA

3.3.1. Formación de aldehídos

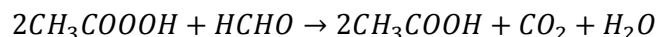
De acuerdo con la investigación de Dell'Erba (2007), existe una finita y modesta formación de aldehídos, directamente proporcional a la relación APA/DQO, alcanzando un máximo a 0,3mg APA/mg DQO y después tienden a desaparecer.

La formación de aldehídos por la acción del APA correspondería a:



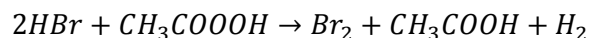
Donde CH₃OH representa el precursor orgánico más simple de un efluente secundario sedimentado.

Los aldehídos, una vez formados, pueden ser oxidados por el exceso de APA y contenidos en ácido carboxílico correspondiente, o en última instancia a dióxido de carbono y desaparecer como se muestra en:

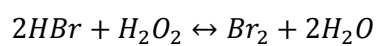


3.3.2. Formación de bromofenoles

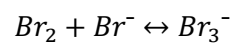
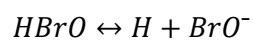
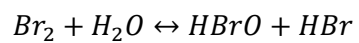
La bromación potencial de fenoles en un medio acuoso enriquecido con iones de Br⁻, cuando se trata con APA puede ser inducido por la oxidación preliminar de bromuros a Br₂ de acuerdo con:



En condiciones ácidas, el peróxido de hidrógeno presente en la mezcla de desinfectante, puede tomar parte en la oxidación de acuerdo con la siguiente reacción:



Una vez formado, Br_2 reacciona con equilibrios conocidos:



Capítulo IV

Metodología

Los procedimientos de laboratorio para controlar la eficiencia del ácido peracético y del cloro, respecto a su función como desinfectantes, se realizaron como se indica en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Técnicas de análisis

Parámetro	Método	Referencia
DBO	10200 J. Metabolic Rate Measurements (pp. 10-32).	Standard Methods. 20th Edition. APHA, AWWA, WEF.
Residual de APA y de cloro	4500-CI G. DPD Colorimetric Method (pp. 4-69).	Standard Methods. 20th Edition. APHA, AWWA, WEF.
CT y CF	9222. Standard total coliform membrane filter procedure (pp. 9-78).	Standard Methods. 20th Edition. APHA, AWWA, WEF.

Las muestras utilizadas para los diferentes ensayos se obtuvieron del contenido de un tanque séptico y se caracterizaron como aguas residuales fuertes con DBO entre 350 a 649 mg/L-O₂ con promedio de 489 ± 90 mg/L; contenido de nitrógeno amoniacal entre 113 y 169 mg/L-N con promedio de 139 ± 21 mg/L-N y densidades de CT de 12E+06 a 33E+06/100mL y de CF de 7E+06 a 23E+06/100mL.

Para los ensayos de tratamiento con APA y cloro se utilizó un tiempo de contacto de 30 minutos en todos los casos.

Capítulo V

Resultados

5.1. Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO

5.1.1. DBO del agua tratada con APA, C₂H₄O₃

Los resultados observados se presentan en la Tabla 5.1. La DBO mínima del agua cruda es de 350 mg/L-O₂, la DBO máxima de 649 mg/L-O₂ y el valor promedio 489 ± 90 mg/L-O₂. Para el agua tratada con C₂H₄O₃, la DBO mínima es de 46 mg/L-O₂ y la máxima de 638 mg/L-O₂. El aumento de la dosis de C₂H₄O₃ (Figura 5.1), evidencia una disminución significativa y proporcional de la DBO.

Para lograr un efluente con la DBO como la requerida por la Resolución 0631 de 2015 del MADS, de 90 mg/L-O₂ para cargas ≤ 3000 kg/d se requeriría una dosis de C₂H₄O₃ superior a 400 mg/L.

Tabla 5.1. DBO del agua tratada con APA, C₂H₄O₃, mg/L-O₂.

Muestra Dosis APA, mg/L-C ₂ H ₄ O ₃	2015-08-31	2015-09-02	2015-09-07	2015-09-15	2015-09-22	2015-10-07	2015-10-14	2016-01-18	2016-02-01	2016-02-02	Promedio	Intervalo
0	649	475	478	529	518	610	423	428	433	350	(489 ± 90)	(350 - 649)
20	638	466	469	508	506	600	411	419	422	344	(478 ± 89)	(344 - 638)
40	612	452	442	488	490	586	389	395	398	324	(458 ± 90)	(324 - 612)
60	593	418	426	469	469	561	369	372	374	314	(437 ± 88)	(314 - 593)
80	575	402	402	445	447	542	341	356	354	292	(416 ± 89)	(292 - 575)
100	549	384	385	427	428	520	325	333	328	270	(395 ± 89)	(270 - 549)
150	503	345	342	387	390	484	287	291	282	243	(355 ± 87)	(243 - 503)
200	467	306	301	349	348	440	246	254	240	202	(315 ± 87)	(202 - 467)
250	424	266	258	305	306	398	204	206	198	160	(273 ± 87)	(160 - 424)
300	380	228	217	262	262	351	163	166	157	126	(231 ± 84)	(126 - 380)
350	339	182	171	220	225	315	122	124	118	88	(190 ± 85)	(88 - 339)
400	299	143	129	172	180	269	74	89	85	46	(149 ± 84)	(46 - 299)

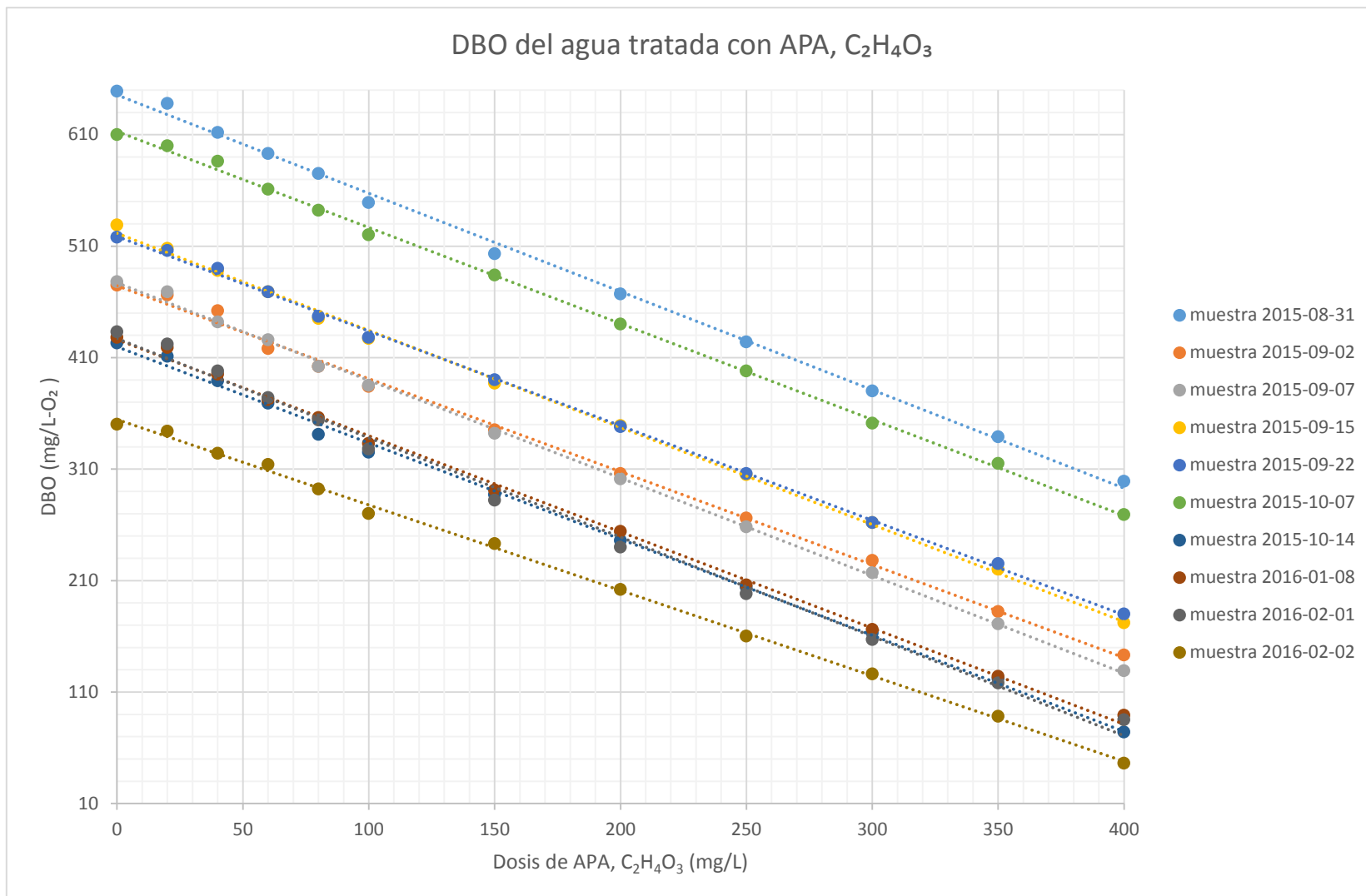


Figura 5.1. DBO del agua tratada con C₂H₄O₃.

5.1.2. DBO del agua tratada con cloro, Cl₂

Los resultados observados se presentan en la Tabla 5.2. La DBO mínima del agua tratada con cloro es de 160mg/L-O₂ y la máxima de 641 mg/L-O₂. En la Figura 5.2 se expone la disminución de la DBO en función de la dosis de cloro, Cl₂.

Para lograr un efluente de descarga como el requerido por la Resolución 0631 de 2015 del MADS, de 90 mg/L-O₂, para cargas ≤ 3000 kg/d se requeriría una dosis de Cl₂ superior a 400 mg/L.

Tabla 5.2. DBO del agua tratada con cloro, mg/L- O₂

Muestra Dosis cloro, mg/L- Cl ₂	2015-08-31	2015-09-02	2015-09-07	2015-09-15	2015-09-22	2015-10-07	2015-10-14	2015-01-18	2016-02-01	2016-02-02	Promedio	Intervalo
0	649	475	478	529	518	610	423	428	433	350	(489 ± 90)	(350 - 649)
20	641	455	469	528	516	605	412	420	422	336	(480 ± 93)	(336 - 641)
40	629	447	461	523	507	598	399	409	410	325	(471 ± 94)	(325 - 629)
60	617	432	455	515	499	586	388	399	399	314	(460 ± 94)	(314 - 617)
80	608	418	442	509	498	572	378	389	387	306	(451 ± 94)	(306 - 608)
100	599	409	429	495	486	562	369	378	377	295	(440 ± 94)	(295 - 599)
150	593	395	419	475	459	553	349	355	355	274	(423 ± 99)	(274 - 593)
200	577	380	399	460	447	535	329	332	335	253	(405 ± 101)	(253 - 577)
250	562	367	388	442	430	520	305	310	316	235	(388 ± 102)	(235 - 562)
300	558	350	369	427	412	501	284	288	294	202	(369 ± 109)	(202 - 558)
350	543	335	357	407	393	480	264	269	272	181	(350 ± 110)	(181 - 543)
400	524	300	328	382	375	462	243	248	253	160	(328 ± 110)	(160 - 524)

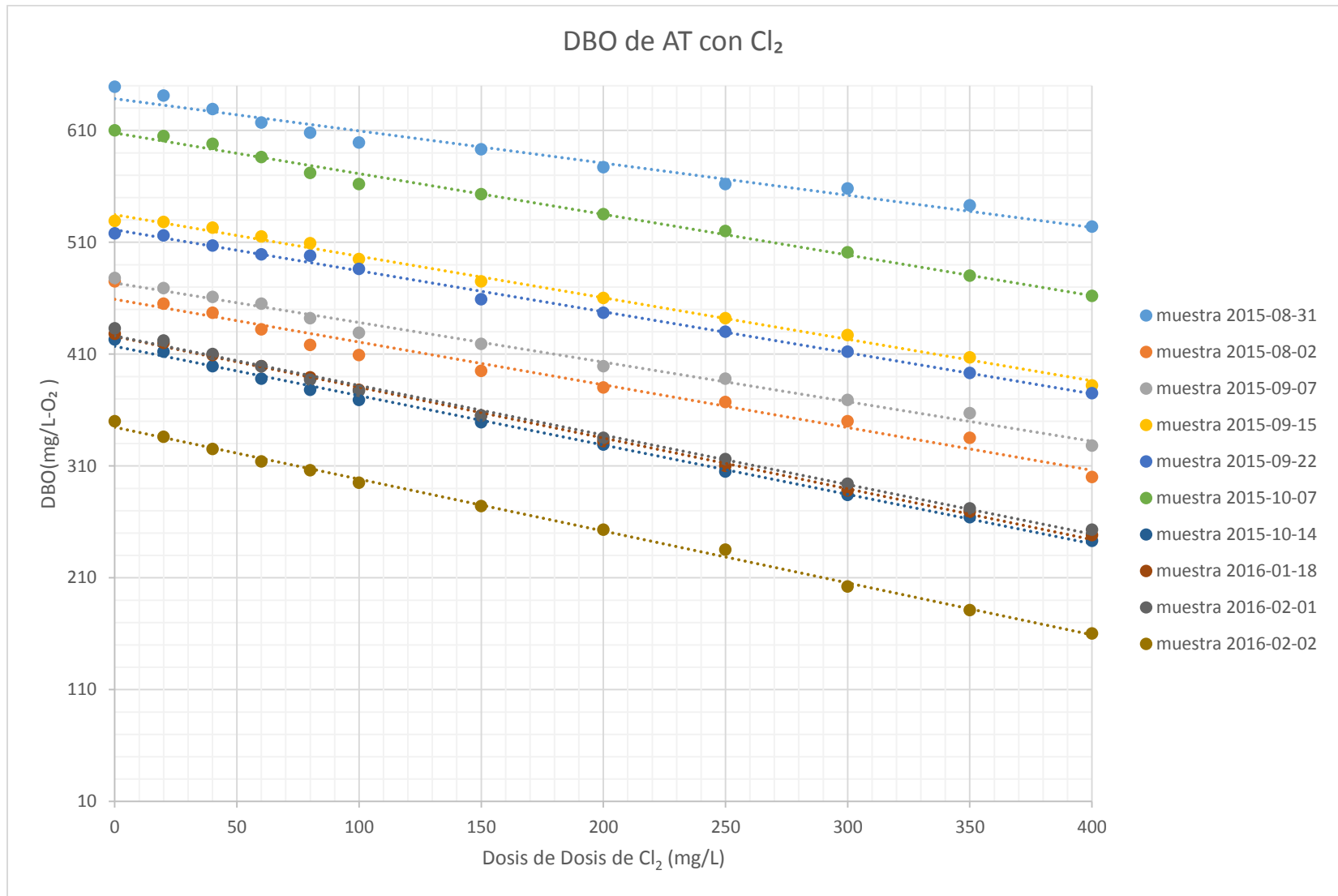


Figura 5.2. DBO del agua tratada con Cl₂

5.2. Porcentajes de remoción de DBO con APA, C₂H₄O₃

En la Tabla 5.3 y en la Figura 5.3 se presentan los porcentajes de remoción de DBO con APA, C₂H₄O₃. Se logran remociones del 86.9% en DBO con dosis de 400 mg/L- C₂H₄O₃ para aguas crudas con DBO de 350 mg/L-O₂.

Tabla 5.3. Porcentajes de remoción de DBO con APA

Muestra Dosis APA, mg/L- C ₂ H ₄ O ₃	2015-08-31	2015-09-02	2015-09-07	2015-09-15	2015-09-22	2015-10-07	2015-10-14	2015-01-18	2016-02-01	2016-02-02	Promedio	Intervalo
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	(0 ± 0)	(0 - 0)
20	1,7	1,9	1,9	4,0	2,3	1,6	2,8	2,1	2,5	1,7	(2,3 ± 0,7)	(1,6 - 4)
40	5,7	4,8	7,5	7,8	5,4	3,9	8,0	7,7	8,1	7,4	(6,6 ± 1,5)	(3,9 - 8,1)
60	8,6	12,0	10,9	11,3	9,5	8,0	12,8	13,1	13,6	10,3	(11 ± 1,9)	(8 - 13,6)
80	11,4	15,4	15,9	15,9	13,7	11,1	19,4	16,8	18,2	16,6	(15,4 ± 2,7)	(11,1 - 19,4)
100	15,4	19,2	19,5	19,3	17,4	14,8	23,2	22,2	24,2	22,9	(19,8 ± 3,3)	(14,8 - 24,2)
150	22,5	27,4	28,5	26,8	24,7	20,7	32,2	32,0	34,9	30,6	(28 ± 4,5)	(20,7 - 34,9)
200	28,0	35,6	37,0	34,0	32,8	27,9	41,8	40,7	44,6	42,3	(36,5 ± 5,9)	(27,9 - 44,6)
250	34,7	44,0	46,0	42,3	40,9	34,8	51,8	51,9	54,3	54,3	(45,5 ± 7,5)	(34,7 - 54,3)
300	41,4	52,0	54,6	50,5	49,4	42,5	61,5	61,2	63,7	64,0	(54,1 ± 8,4)	(41,4 - 64)
350	47,8	61,7	64,2	58,4	56,6	48,4	71,2	71,0	72,7	74,9	(62,7 ± 9,9)	(47,8 - 74,9)
400	53,9	69,9	73,0	67,5	65,3	55,9	82,5	79,2	80,4	86,9	(71,4 ± 11,1)	(53,9 - 86,9)

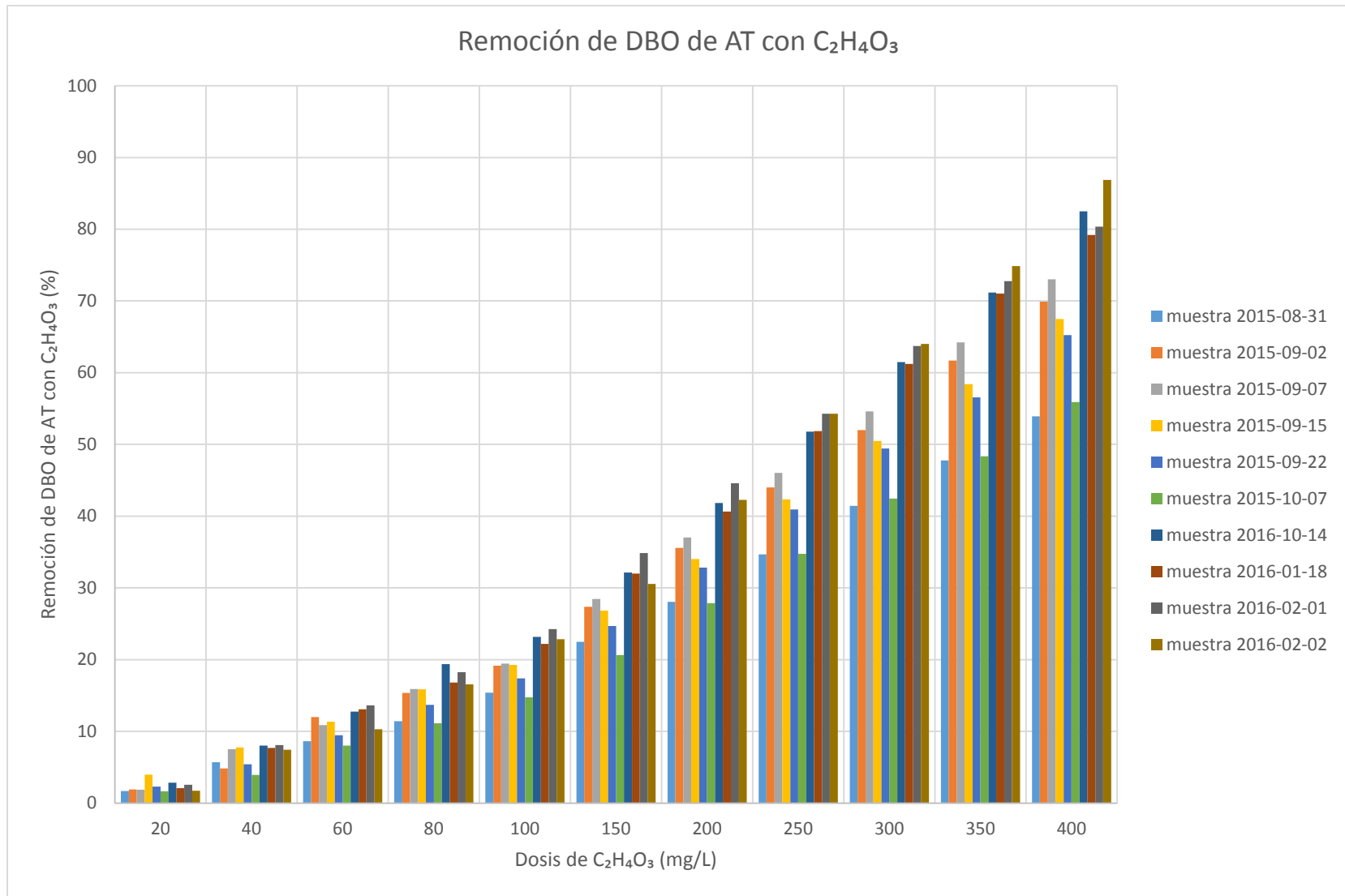


Figura 5.3. Porcentajes de remoción de DBO con APA

5.3. Porcentajes de remoción de DBO con cloro, Cl₂

En la Tabla 5.4 y en la Figura 5.4 se presentan los porcentajes de remoción de DBO con cloro. Con una dosis de 400 mg/L- Cl₂ se logra remoción de 54.3% de DBO para concentraciones de DBO en el agua cruda de 350 mg/L-O₂.

Tabla 5.4. Porcentajes de remoción de DBO con cloro

Muestra Dosis cloro, mg/L- Cl ₂	2015-08-31	2015-09-02	2015-09-07	2015-09-15	2015-09-22	2015-10-07	2015-10-14	2015-01-18	2016-02-01	2016-02-02	Promedio	Intervalo
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	(0 ± 0)	(0 - 0)
20	1,2	4,2	1,9	0,2	0,4	0,8	2,6	1,9	2,5	4,0	(2 ± 1,4)	(0,2 - 4,2)
40	3,1	5,9	3,6	1,1	2,1	2,0	5,7	4,4	5,3	7,1	(4 ± 2)	(1,1 - 7,1)
60	4,9	9,1	4,8	2,6	3,7	3,9	8,3	6,8	7,9	10,3	(6,2 ± 2,6)	(2,6 - 10,3)
80	6,3	12,0	7,5	3,8	3,9	6,2	10,6	9,1	10,6	12,6	(8,3 ± 3,2)	(3,8 - 12,6)
100	7,7	13,9	10,3	6,4	6,2	7,9	12,8	11,7	12,9	15,7	(10,5 ± 3,4)	(6,2 - 15,7)
150	8,6	16,8	12,3	10,2	11,4	9,3	17,5	17,1	18,0	21,7	(14,3 ± 4,5)	(8,6 - 21,7)
200	11,1	20,0	16,5	13,0	13,7	12,3	22,2	22,4	22,6	27,7	(18,2 ± 5,6)	(11,1 - 27,7)
250	13,4	22,7	18,8	16,4	17,0	14,8	27,9	27,6	27,0	32,9	(21,9 ± 6,7)	(13,4 - 32,9)
300	14,0	26,3	22,8	19,3	20,5	17,9	32,9	32,7	32,1	42,3	(26,1 ± 8,8)	(14 - 42,3)
350	16,3	29,5	25,3	23,1	24,1	21,3	37,6	37,1	37,2	48,3	(30 ± 9,8)	(16,3 - 48,3)
400	19,3	36,8	31,4	27,8	27,6	24,3	42,6	42,1	41,6	54,3	(34,8 ± 10,6)	(19,3 - 54,3)

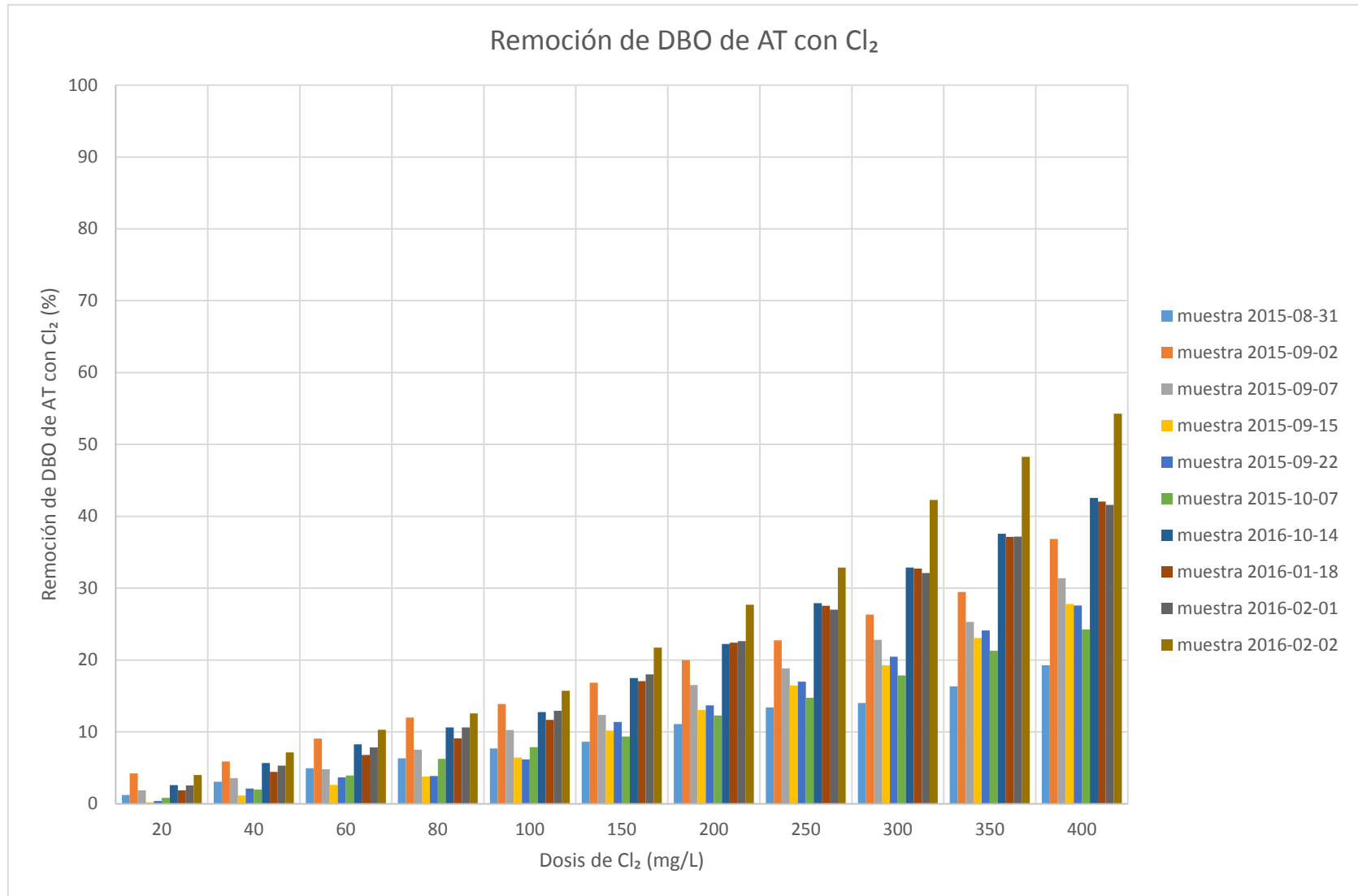


Figura 5.4. Porcentajes de remoción de DBO con cloro

5.4. Residual de APA, C₂H₄O₃

En la Tabla 5.5 y en la Figura 5.5 se presentan los datos de los residuales de APA, C₂H₄O₃ en mg/L. El residual mínimo es de 0 mg/L de C₂H₄O₃ para una dosis de 20mg/L de C₂H₄O₃ y máximo de 4,7 mg/L de C₂H₄O₃ para la dosis máxima empleada de 400 mg/L- APA. A partir de una dosis de 40 mg/L de APA se obtiene residual superior a 0,2 mg/L de C₂H₄O₃ para un tiempo de contacto de 30 minutos.

Tabla 5.5. Residual de APA, C₂H₄O₃

Muestra Dosis APA, mg/L-C ₂ H ₄ O ₃	2015-08-31	2015-09-02	2015-09-07	2015-09-15	2015-09-22	2015-10-07	2015-10-14	2016-01-18	2016-02-01	2016-02-02	Promedio	Intervalo
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	(0±0)	(0 - 0)
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,3	(0,1±0,1)	(0 - 0,3)
40	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,5	(0,3±0,1)	(0,2 - 0,5)
60	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,6	0,5	0,6	0,6	(0,5±0,1)	(0,3 - 0,6)
80	0,4	0,7	0,6	0,6	0,6	0,4	0,9	0,8	0,8	1,0	(0,7±0,2)	(0,4 - 1)
100	0,7	0,9	0,9	0,8	0,9	0,8	1,1	1,1	1,0	1,3	(0,9±0,2)	(0,7 - 1,3)
150	1,1	1,7	1,6	1,2	1,3	1,1	2,0	1,9	1,9	2,3	(1,6±0,4)	(1,1 - 2,3)
200	1,5	2,3	2,3	1,7	1,8	1,5	2,7	2,6	2,6	2,9	(2,2±0,5)	(1,5 - 2,9)
250	2,0	2,8	2,8	2,5	2,5	2,1	3,1	3,1	3,1	3,5	(2,7±0,5)	(2 - 3,5)
300	2,4	3,2	3,2	3,0	3,0	2,5	3,8	3,8	3,7	4,0	(3,3±0,5)	(2,4 - 4)
350	2,8	3,7	3,7	3,4	3,4	2,9	4,1	4,0	4,0	4,4	(3,6±0,5)	(2,8 - 4,4)
400	3,0	3,9	3,9	3,5	3,5	3,2	4,2	4,2	4,2	4,7	(3,8±0,5)	(3 - 4,7)

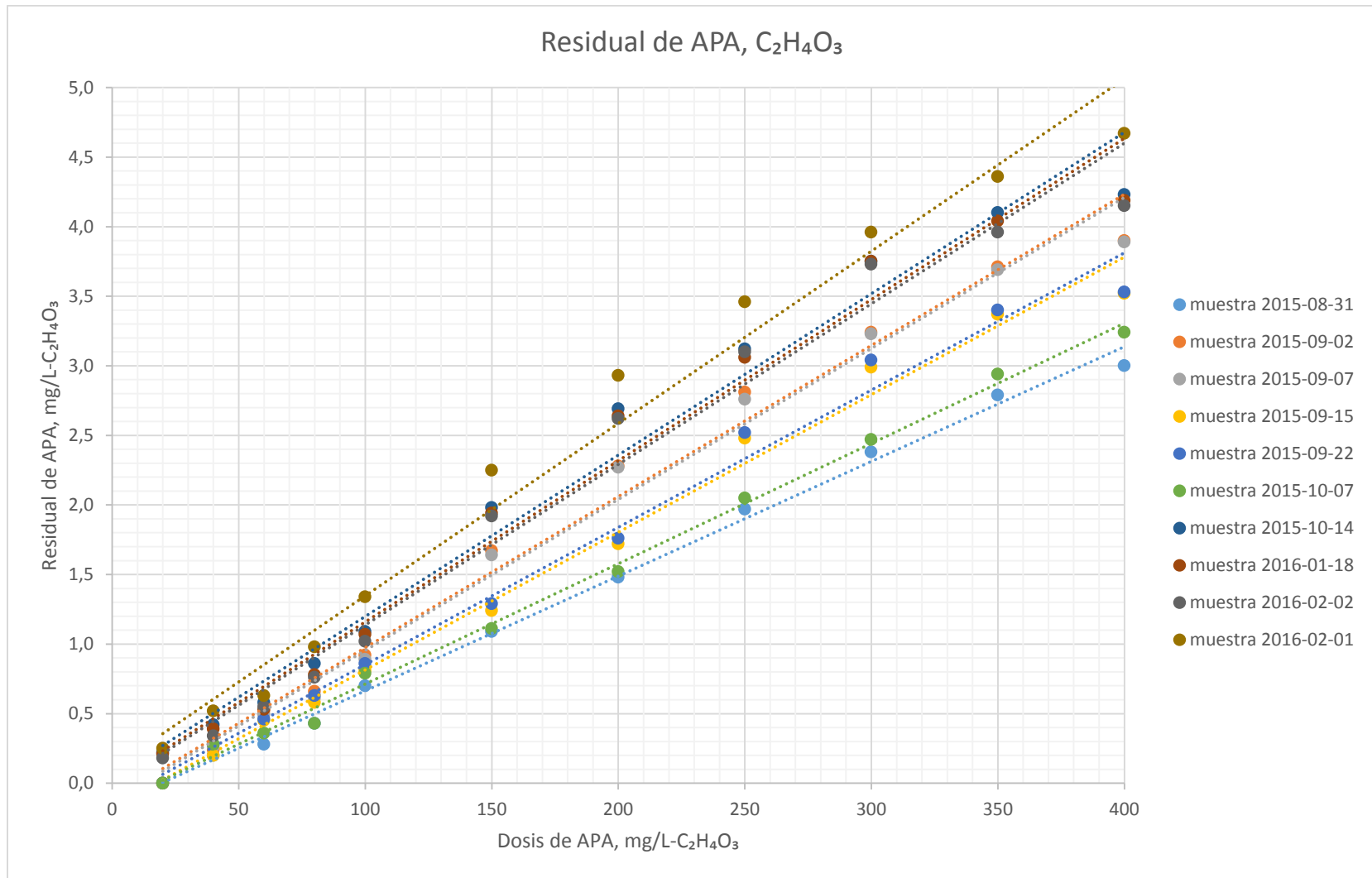


Figura 5.5. Residual de APA, C₂H₄O₃

5.5. Residual de cloro, Cl₂

En la Tabla 5.6 y en Figura 5.6 se presentan los resultados observados del residual de cloro, Cl₂. El residual mínimo es de 0,6 mg/L de Cl₂ para una dosis de 20mg/L de Cl₂ y máximo de 5,9 mg/L de Cl₂ para una dosis de 400mg/L de Cl₂. Dosis de cloro mayores de 40 mg/L- Cl₂ permiten obtener residuales entre 0,9 y 5,9 mg/L- Cl₂.

Tabla 5.6. Residual de cloro, Cl₂

Muestra Dosis cloro, mg/L-Cl ₂	2015-08-31	2015-09-02	2015-09-07	2015-09-15	2015-09-22	2015-10-07	2015-10-14	2016-01-18	2016-02-01	2016-02-02	Promedio	Intervalo
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	(0±0)	(0 - 0)
20	0,6	1,0	1,0	0,7	0,9	0,6	1,1	1,0	1,0	1,4	(0,9±0,2)	(0,6 - 1,4)
40	0,9	1,5	1,3	0,9	1,1	0,9	1,6	1,7	1,6	2,0	(1,3±0,4)	(0,9 - 2)
60	1,1	1,8	1,6	1,2	1,3	1,2	2,0	1,9	2,0	2,4	(1,6±0,4)	(1,1 - 2,4)
80	1,4	2,2	2,0	1,6	1,7	1,4	2,5	2,4	2,4	2,7	(2±0,5)	(1,4 - 2,7)
100	1,6	2,5	2,3	1,8	1,8	1,6	2,8	2,7	2,6	3,1	(2,3±0,5)	(1,6 - 3,1)
150	1,9	3,1	2,9	2,5	2,5	2,0	3,4	3,3	3,3	3,7	(2,9±0,6)	(1,9 - 3,7)
200	2,0	3,6	3,3	2,9	3,0	2,3	3,8	3,8	3,8	4,3	(3,3±0,7)	(2 - 4,3)
250	2,5	4,0	3,7	3,3	3,3	2,8	4,2	4,1	4,1	4,5	(3,6±0,7)	(2,5 - 4,5)
300	2,9	4,5	4,3	3,8	3,8	3,2	4,7	4,7	4,7	5,1	(4,2±0,7)	(2,9 - 5,1)
350	3,2	4,9	4,7	4,1	4,1	3,5	5,3	5,2	5,2	5,7	(4,6±0,8)	(3,2 - 5,7)
400	3,4	5,5	5,2	4,7	4,7	3,8	5,6	5,6	5,6	5,9	(5±0,9)	(3,4 - 5,9)

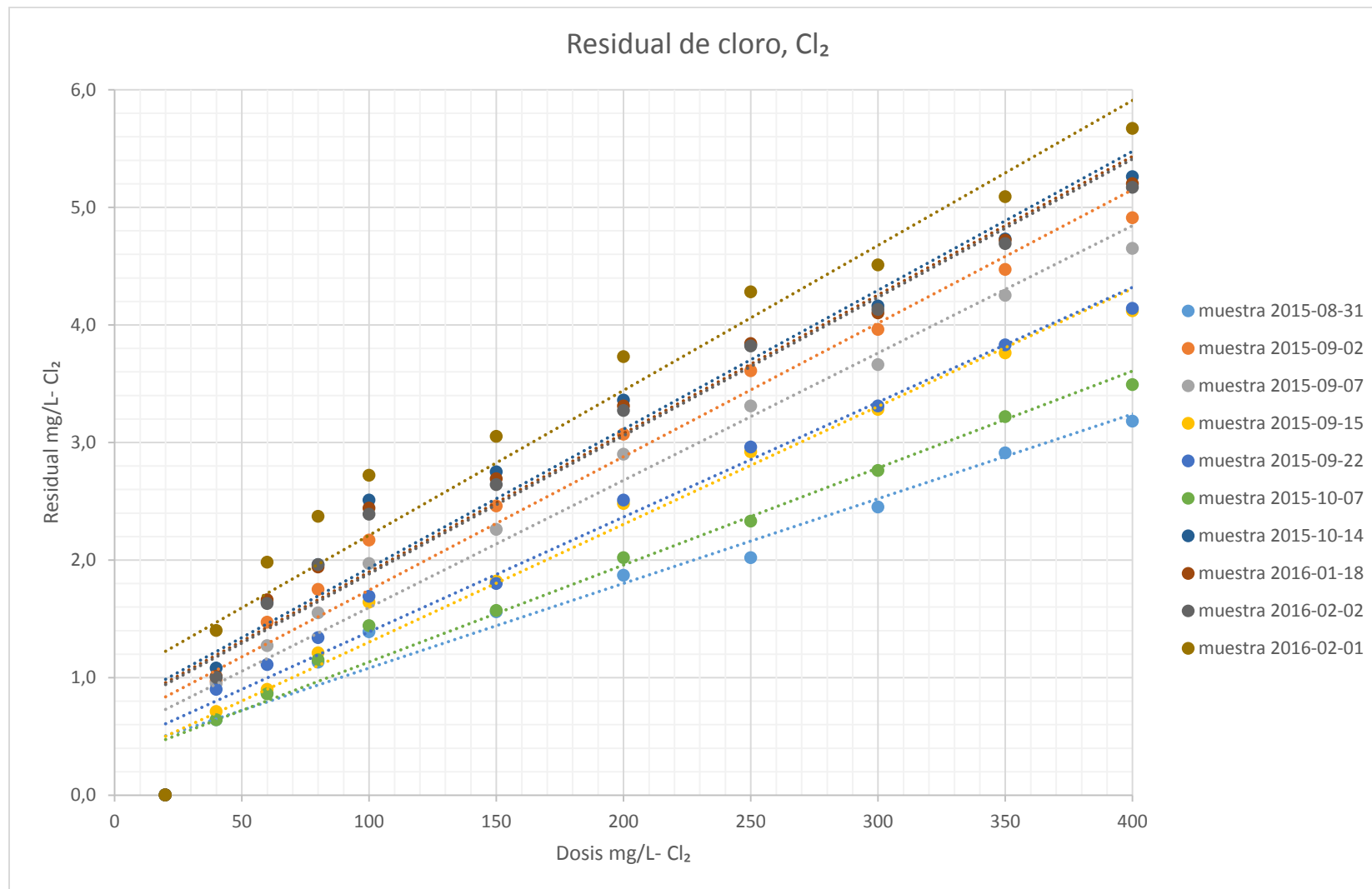


Figura 5.6. Residual de cloro, Cl₂

5.6. Coliformes Fecales

5.6.1. Coliformes Fecales del agua tratada con APA, C₂H₄O₃

Los resultados observados se presentan en la Tabla 5.7 y en la Figura 5.7. Los coliformes fecales del agua cruda varían en un intervalo de 7'000.000 a 23'000.000 UFC/100mL. Para CF del agua cruda entre 7,0E+06 y 1,5E+07 UFC/100mL, se logra desinfección con dosis mayores de 350 mg/L- C₂H₄O₃.

Por otra parte, los resultados indican que a mayor concentración inicial de CF se requiere mayor dosis de APA; 400 mg/L para CF entre 1,6E+07y 1,8E+07 UFC/100mL. Para CF mayores a 2,0E+07 UFC/100mL se requieren dosis mayores de 400 mg/L de APA.

Tabla 5.7. Coliformes Fecales del agua tratada con APA, C₂H₄O₃, UFC/100mL

Muestra Dosis APA, mg/L-C ₂ H ₄ O ₃	2015-08-31	2015-09-02	2015-09-07	2015-09-15	2015-09-22	2015-10-07	2015-10-14	2016-01-18	2016-02-01	2016-02-02	Promedio	Intervalo
0	2,3E+07	1,6E+07	1,8E+07	2,0E+07	2,2E+07	2,3E+07	1,2E+07	1,5E+07	9,0E+06	7,0E+06	16,4E+06 ± 5,64E+06	7E+06 ± 2,3E+07
20	1290	930	985	1360	1095	1225	700	1040	535	420	(958 ± 317)	(420 - 1360)
40	1075	780	900	760	675	630	285	460	410	165	(614 ± 283)	(165 - 1075)
60	1035	730	855	620	485	620	175	200	355	105	(518 ± 310)	(105 - 1035)
80	800	680	760	465	450	470	160	215	325	55	(438 ± 254)	(55 - 800)
100	760	620	715	435	370	460	110	185	185	50	(389 ± 254)	(50 - 760)
150	730	475	470	415	345	560	60	135	85	40	(332 ± 239)	(40 - 730)
200	525	245	405	360	275	300	50	90	70	30	(235 ± 170)	(30 - 525)
250	505	130	190	345	235	290	35	65	50	25	(187 ± 158)	(25 - 505)
300	485	85	125	330	170	280	30	50	35	0	(159 ± 158)	(0 - 485)
350	465	50	60	275	125	270	0	0	0	0	(125 ± 160)	(0 - 465)
400	330	0	0	150	60	210	0	0	0	0	(75 ± 117)	(0 - 330)

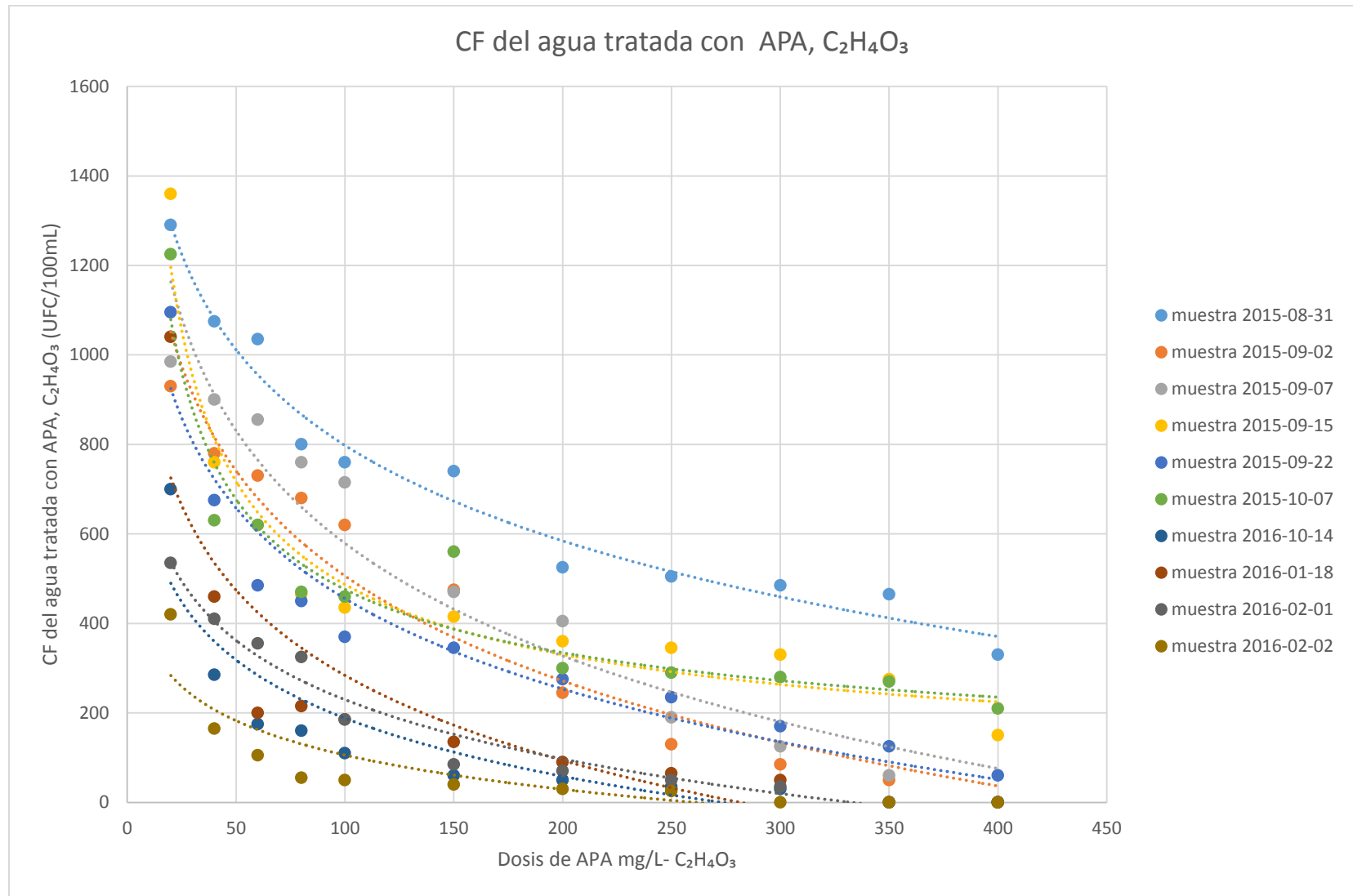


Figura 5.7. Coliformes Fecales del agua tratada con APA, C₂H₄O₃

5.6.2. Coliformes Fecales del agua tratada con cloro, Cl₂

Los resultados observados se presentan en la Tabla 5.8 y en la Figura 5.8. Los coliformes fecales del agua cruda varían en un intervalo de 7'000.000 a 23'000.000 UFC/100mL. Para CF de agua tratada entre 7,0E+06 y 1,5E+07 UFC/100mL se logra desinfección con dosis mayores de 200 mg/L- Cl₂. Por otra parte, los resultados indican que a mayor concentración inicial de CF se requiere mayor dosis de cloro; 400 mg/L- Cl₂ para CF entre 1,6E+07 y 2,3E+07 UFC/100mL.

Tabla 5.8. Coliformes Fecales del agua tratada con cloro, Cl₂, UFC/100mL

Muestra Dosis cloro, mg/L-Cl ₂	2015-08-31	2015-09-02	2015-09-07	2015-09-15	2015-09-22	2015-10-07	2015-10-14	2016-01-18	2016-02-01	2016-02-02	Promedio	Intervalo
0	2,3E+07	1,6E+07	1,8E+07	2,0E+07	2,2E+07	2,3E+07	1,2E+07	1,5E+07	9,0E+06	7,0E+06	16,4E+06 ± 5,64E+06	7E+06 ± 2,3E+07
20	770	595	620	865	765	840	360	415	270	210	(571 ± 242)	(210 - 865)
40	645	425	565	440	420	445	330	375	270	165	(408 ± 137)	(165 - 645)
60	620	390	560	400	360	435	240	200	225	100	(353 ± 164)	(100 - 620)
80	480	295	470	290	325	360	215	175	215	80	(291 ± 126)	(80 - 480)
100	455	260	355	270	245	330	145	110	160	55	(239 ± 123)	(55 - 455)
150	445	185	255	255	220	260	90	90	40	35	(188 ± 127)	(35 - 445)
200	315	175	225	235	150	195	0	0	0	0	(130 ± 120)	(0 - 315)
250	305	115	125	245	110	145	0	0	0	0	(105 ± 108)	(0 - 305)
300	290	40	65	195	50	115	0	0	0	0	(76 ± 98)	(0 - 290)
350	280	0	0	125	30	100	0	0	0	0	(54 ± 92)	(0 - 280)
400	220	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(22 ± 70)	(0 - 220)

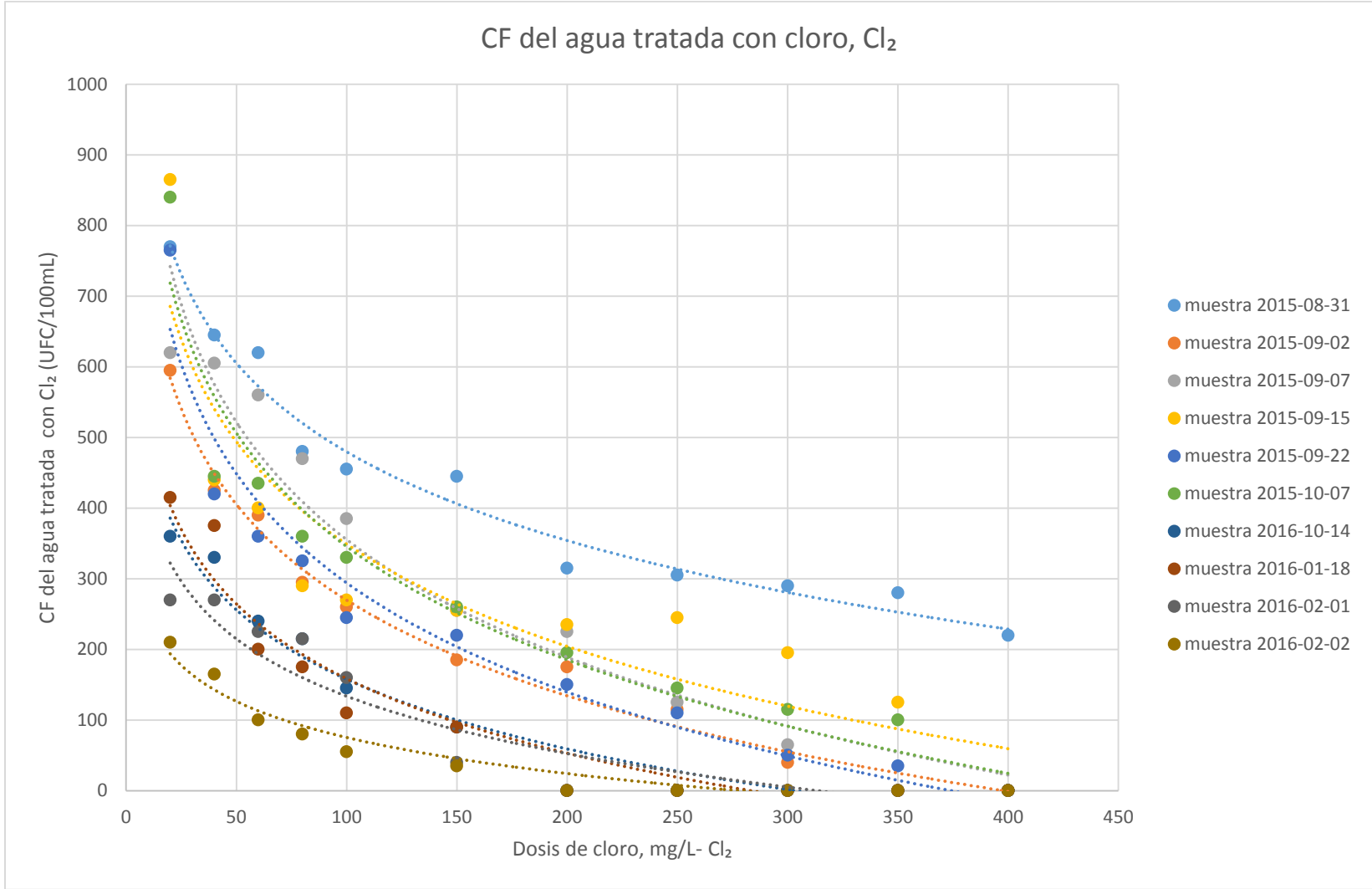


Figura 5.8. Coliformes Fecales del agua tratada con cloro, Cl₂

5.6.3. Porcentajes de remoción de CF con APA, C₂H₄O₃

En la Tabla 5.9 y en la Figura 5.9 se presentan los porcentajes de remoción de CF obtenidos con APA, C₂H₄O₃. Se consiguen remociones del 100% para dosis de 350 mg/L- C₂H₄O₃ para CF en el agua cruda menores de 1,6E+07 UFC/100mL y con dosis de 400 mg/L- C₂H₄O₃ para CF en el agua cruda menores de 2,0E+07 UFC/100mL. Con concentraciones iniciales de CF de hasta 2,3E+07 UFC/100mL se obtienen remociones mayores del 99,9985% con dosis de 400mg/L de APA.

Tabla 5.9. Porcentajes de remoción de CF con APA, C₂H₄O₃

Muestra Dosis APA, mg/L- C ₂ H ₄ O ₃	2015-08-31	2015-09-02	2015-09-07	2015-09-15	2015-09-22	2015-10-07	2015-10-14	2016-01-18	2016-02-01	2016-02-02	Promedio	Intervalo
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(0 ± 0)	(0 - 0)
20	99,9941	99,9942	99,9945	99,9932	99,9950	99,9947	99,9942	99,9931	99,9941	99,9940	(99,9941 ± 0,0006)	(99,9931 - 99,995)
40	99,9951	99,9951	99,9950	99,9962	99,9969	99,9973	99,9976	99,9969	99,9954	99,9976	(99,9963 ± 0,0011)	(99,995 - 99,9976)
60	99,9953	99,9954	99,9953	99,9969	99,9978	99,9973	99,9985	99,9987	99,9961	99,9985	(99,997 ± 0,0014)	(99,9953 - 99,9987)
80	99,9964	99,9958	99,9958	99,9977	99,9980	99,9980	99,9987	99,9986	99,9964	99,9992	(99,9974 ± 0,0013)	(99,9958 - 99,9992)
100	99,9965	99,9961	99,9960	99,9978	99,9983	99,9980	99,9991	99,9988	99,9979	99,9993	(99,9978 ± 0,0012)	(99,996 - 99,9993)
150	99,9966	99,9970	99,9974	99,9979	99,9984	99,9976	99,9995	99,9991	99,9991	99,9994	(99,9982 ± 0,001)	(99,9966 - 99,9995)
200	99,9976	99,9985	99,9978	99,9982	99,9988	99,9987	99,9996	99,9994	99,9992	99,9996	(99,9987 ± 0,0007)	(99,9976 - 99,9996)
250	99,9977	99,9992	99,9989	99,9983	99,9989	99,9987	99,9997	99,9996	99,9994	99,9996	(99,999 ± 0,0006)	(99,9977 - 99,9997)
300	99,9978	99,9995	99,9993	99,9984	99,9992	99,9988	99,9998	99,9997	99,9996	100,0000	(99,9992 ± 0,0007)	(99,9978 - 100)
350	99,9979	99,9997	99,9997	99,9986	99,9994	99,9988	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	(99,9994 ± 0,0007)	(99,9979 - 100)
400	99,9985	100,0000	100,0000	99,9993	99,9997	99,9991	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	(99,9997 ± 0,0005)	(99,9985 - 100)

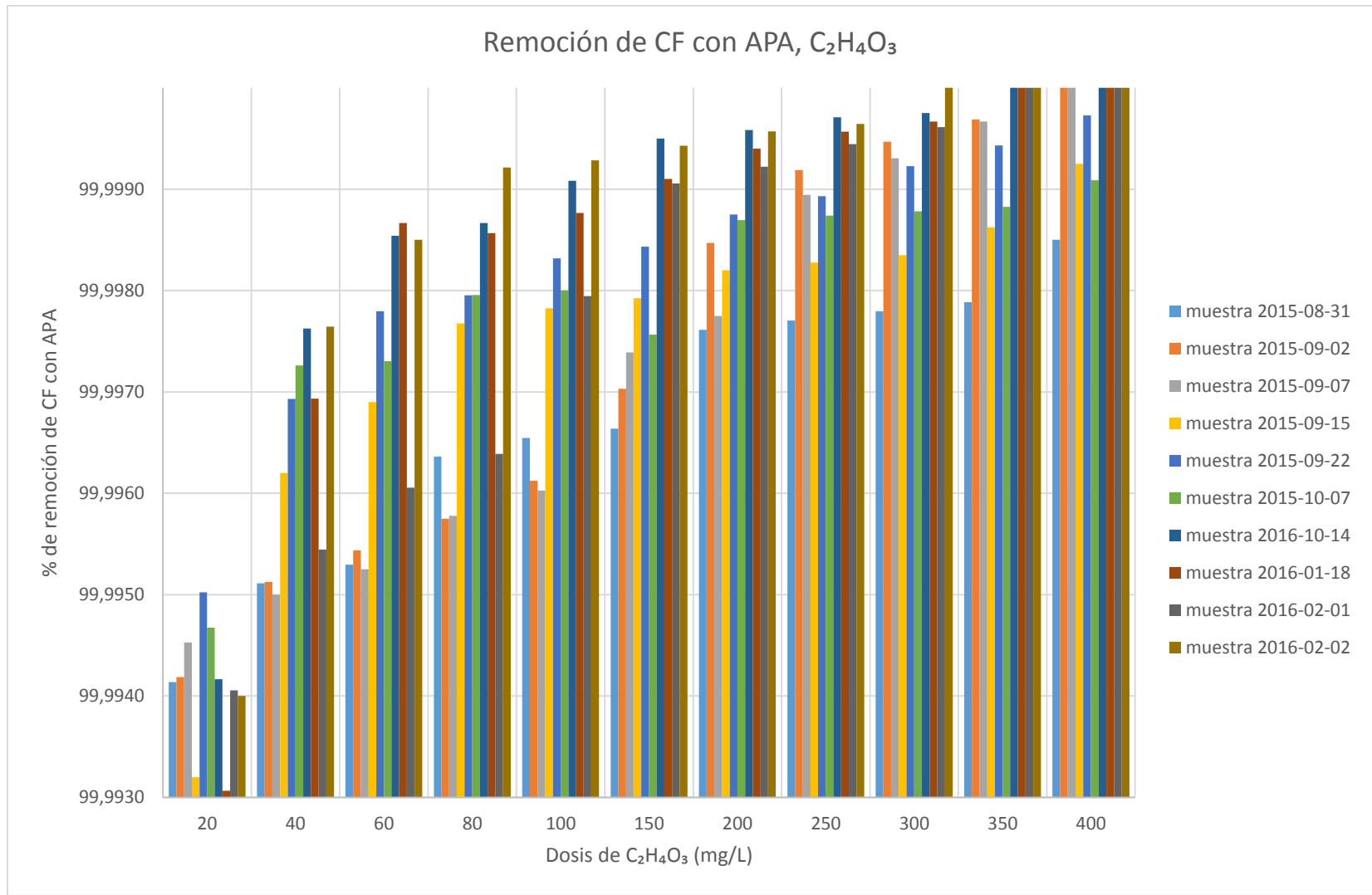


Figura 5.9. Porcentaje de remoción de CF con APA, C₂H₄O₃

5.6.4. Porcentajes de remoción de CF con cloro, Cl₂

En la Tabla 5.10 y en la Figura 5.10 se muestran los porcentajes remoción de CF logrados con cloro. Se obtienen remociones del 100% para dosis de 200 mg/L- Cl₂ para CF en el agua cruda menores de 1,5E+07 UFC/100mL y con dosis de 400 mg/L- Cl₂ para CF en el agua cruda menores de 2,0E+07 UFC/100mL. Con concentraciones iniciales de CF de hasta 2,3E+07 UFC/100mL se obtienen remociones mayores del 99,9990% con 400 mg/L- Cl₂.

Tabla 5.10. Porcentajes de remoción de CF con cloro, Cl₂

Muestra Dosis cloro, mg/L-Cl ₂	2015-08-31	2015-09-02	2015-09-07	2015-09-15	2015-09-22	2015-10-07	2015-10-14	2016-01-18	2016-02-01	2016-02-02	Promedio	Intervalo
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	(0 ± 0)	(0 - 0)
20	99,9965	99,9963	99,9966	99,9957	99,9965	99,9963	99,9970	99,9972	99,9970	99,9970	(99,9966 ± 0,0005)	(99,9957 - 99,9972)
40	99,9971	99,9973	99,9966	99,9978	99,9981	99,9981	99,9973	99,9975	99,9970	99,9976	(99,9974 ± 0,0005)	(99,9966 - 99,9981)
60	99,9972	99,9976	99,9969	99,9980	99,9984	99,9981	99,9980	99,9987	99,9975	99,9986	(99,9979 ± 0,0006)	(99,9969 - 99,9987)
80	99,9978	99,9982	99,9974	99,9986	99,9985	99,9984	99,9982	99,9988	99,9976	99,9989	(99,9982 ± 0,0005)	(99,9974 - 99,9989)
100	99,9979	99,9984	99,9979	99,9987	99,9989	99,9986	99,9988	99,9993	99,9982	99,9992	(99,9986 ± 0,0005)	(99,9979 - 99,9993)
150	99,9980	99,9988	99,9986	99,9987	99,9990	99,9989	99,9993	99,9994	99,9996	99,9995	(99,999 ± 0,0005)	(99,998 - 99,9996)
200	99,9986	99,9989	99,9988	99,9988	99,9993	99,9992	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	(99,9994 ± 0,0006)	(99,9986 - 100)
250	99,9986	99,9993	99,9993	99,9988	99,9995	99,9994	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	(99,9995 ± 0,0005)	(99,9986 - 100)
300	99,9987	99,9998	99,9996	99,9990	99,9998	99,9995	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	(99,9996 ± 0,0005)	(99,9987 - 100)
350	99,9987	100,0000	100,0000	99,9994	99,9998	99,9996	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	(99,9998 ± 0,0004)	(99,9987 - 100)
400	99,9990	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	(99,9999 ± 0,0003)	(99,999 - 100)

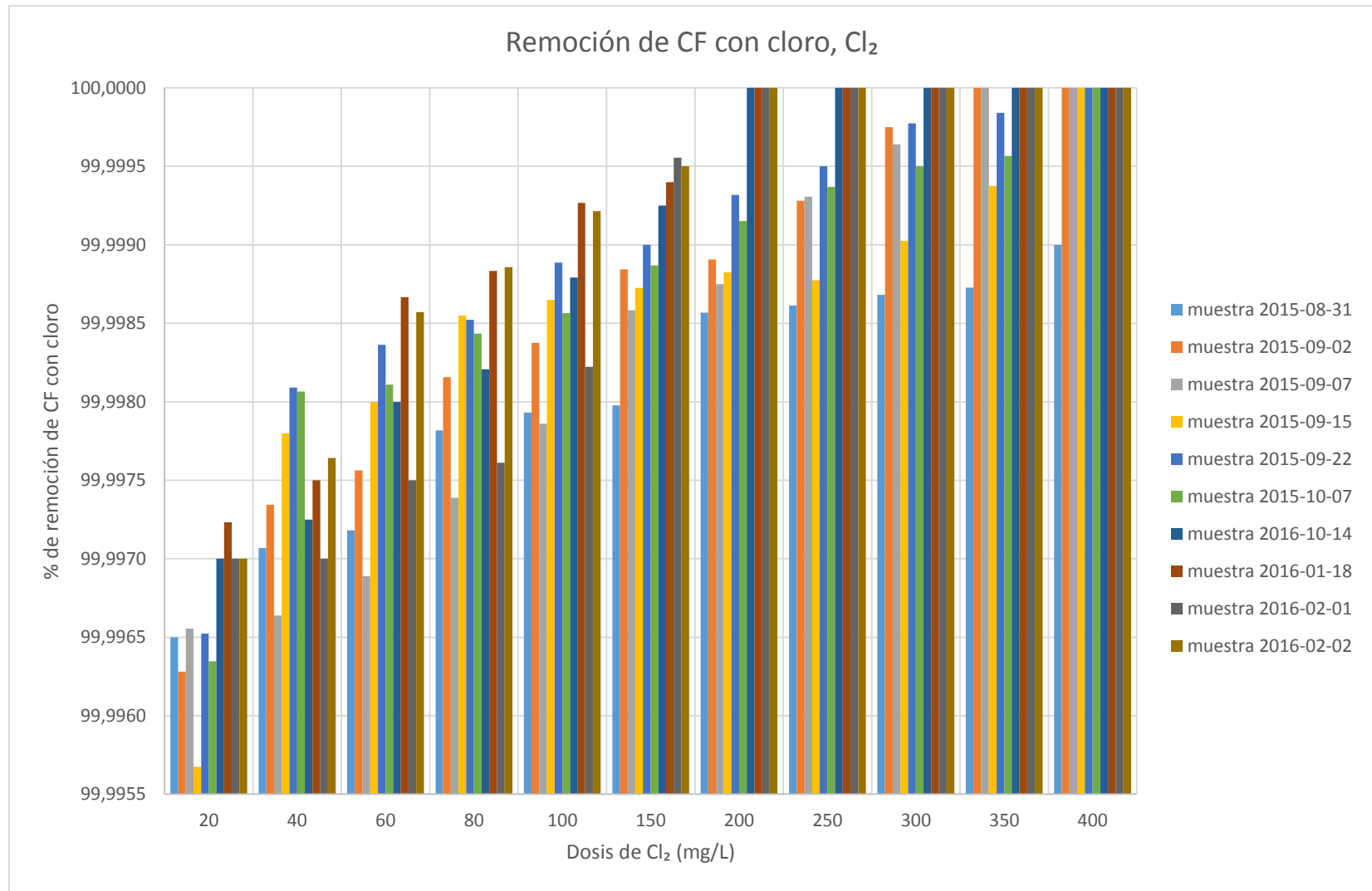


Figura 5.10. Porcentajes de remoción de CF con cloro, Cl₂

5.6.5. Remoción de CF con APA, C₂H₄O₃, en unidades log

Los resultados de remoción de CF, expresados en unidades log, se presentan en la Tabla 5.11 y en la Figura 5.11. Se observa que con dosis de APA de 400 mg/L se obtienen, en todos los ensayos, remociones mayores de 4,8 unidades log es decir mayores de 99,9985%.

Tabla 5.11. Unidades log de remoción de CF con APA, C₂H₄O₃

Muestra Dosis APA, mg/L-C ₂ H ₄ O ₃	2015-08-31	2015-09-02	2015-09-07	2015-09-15	2015-09-22	2015-10-07	2015-10-14	2016-01-18	2016-02-01	2016-02-02	Promedio	Intervalo
20	4,2	4,2	4,3	4,2	4,3	4,3	4,2	4,2	4,2	4,2	(4,2 ± 0)	(4,2 - 4,3)
40	4,3	4,3	4,3	4,4	4,5	4,6	4,6	4,5	4,3	4,6	(4,5 ± 0,1)	(4,3 - 4,6)
60	4,3	4,3	4,3	4,5	4,7	4,6	4,8	4,9	4,4	4,8	(4,6 ± 0,2)	(4,3 - 4,9)
80	4,4	4,4	4,4	4,6	4,7	4,7	4,9	4,8	4,4	5,1	(4,6 ± 0,2)	(4,4 - 5,1)
100	4,5	4,4	4,4	4,7	4,8	4,7	5,0	4,9	4,7	5,1	(4,7 ± 0,3)	(4,4 - 5,1)
150	4,5	4,5	4,6	4,7	4,8	4,6	5,3	5,0	5,0	5,2	(4,8 ± 0,3)	(4,5 - 5,3)
200	4,6	4,8	4,6	4,7	4,9	4,9	5,4	5,2	5,1	5,4	(5 ± 0,3)	(4,6 - 5,4)
250	4,6	5,1	5,0	4,8	5,0	4,9	5,5	5,4	5,3	5,4	(5,1 ± 0,3)	(4,6 - 5,5)
300	4,7	5,3	5,2	4,8	5,1	4,9	5,6	5,5	5,4	*	(5,2 ± 0,3)	(4,7 - 5,6)
350	4,7	5,5	5,5	4,9	5,2	4,9	*	*	*	*	(5,1 ± 0,3)	(4,7 - 5,5)
400	4,8	*	*	5,12	5,56	5,04	*	*	*	*	(5,1 ± 0,3)	(4,8 - 5,6)

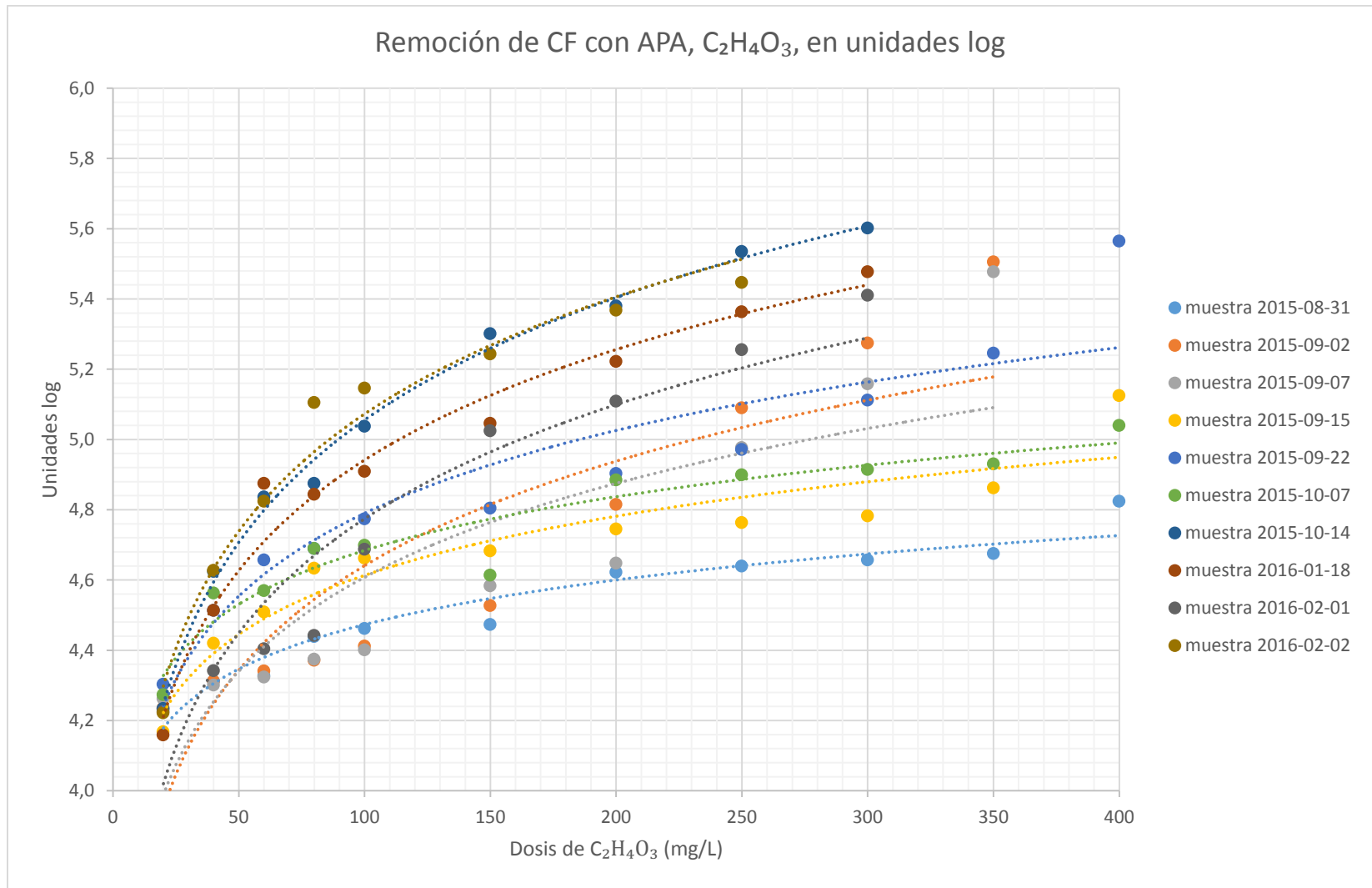


Figura 5.11. Remoción de CF con APA, C₂H₄O₃, en unidades log

5.6.6. Remoción de CF con cloro, Cl₂, en unidades log

Los resultados de remoción de CF con cloro, expresados en unidades log, se presentan en la Tabla 5.12 y en la Figura 5.12. Se observa que con dosis de 400 mg/L- Cl₂ se obtienen remociones mayores de 5,0 unidades log, es decir mayores del 99,9990%.

Tabla 5.12. Unidades log de remoción de CF con cloro, Cl₂

Muestra Dosis cloro, mg/L-Cl ₂	2015-08-31	2015-09-02	2015-09-07	2015-09-15	2015-09-22	2015-10-07	2015-10-14	2016-01-18	2016-02-01	2016-02-02	Promedio	Intervalo
20	4,5	4,4	4,5	4,4	4,5	4,4	4,5	4,6	4,5	4,5	(4,5 ± 0,1)	(4,4 - 4,6)
40	4,5	4,6	4,5	4,7	4,7	4,7	4,6	4,6	4,5	4,6	(4,6 ± 0,1)	(4,5 - 4,7)
60	4,6	4,6	4,5	4,7	4,8	4,7	4,7	4,9	4,6	4,8	(4,7 ± 0,1)	(4,5 - 4,9)
80	4,7	4,7	4,6	4,8	4,8	4,8	4,7	4,9	4,6	4,9	(4,8 ± 0,1)	(4,6 - 4,9)
100	4,7	4,8	4,7	4,9	5,0	4,8	4,9	5,1	4,8	5,1	(4,9 ± 0,2)	(4,7 - 5,1)
150	4,7	4,9	4,8	4,9	5,0	4,9	5,1	5,2	5,4	5,3	(5 ± 0,2)	(4,7 - 5,4)
200	4,8	5,0	4,9	4,9	5,2	5,1	*	*	*	*	(5 ± 0,1)	(4,8 - 5,2)
250	4,9	5,1	5,2	4,9	5,3	5,2	*	*	*	*	(5,1 ± 0,2)	(4,9 - 5,3)
300	4,9	5,6	5,4	5,0	5,6	5,3	*	*	*	*	(5,3 ± 0,3)	(4,9 - 5,6)
350	4,9	*	*	5,2	5,8	5,4	*	*	*	*	(5,3 ± 0,4)	(4,9 - 5,8)
400	5,0	*	*	*	*	*	*	*	*	*	(5 ± 0)	(5 - 5)

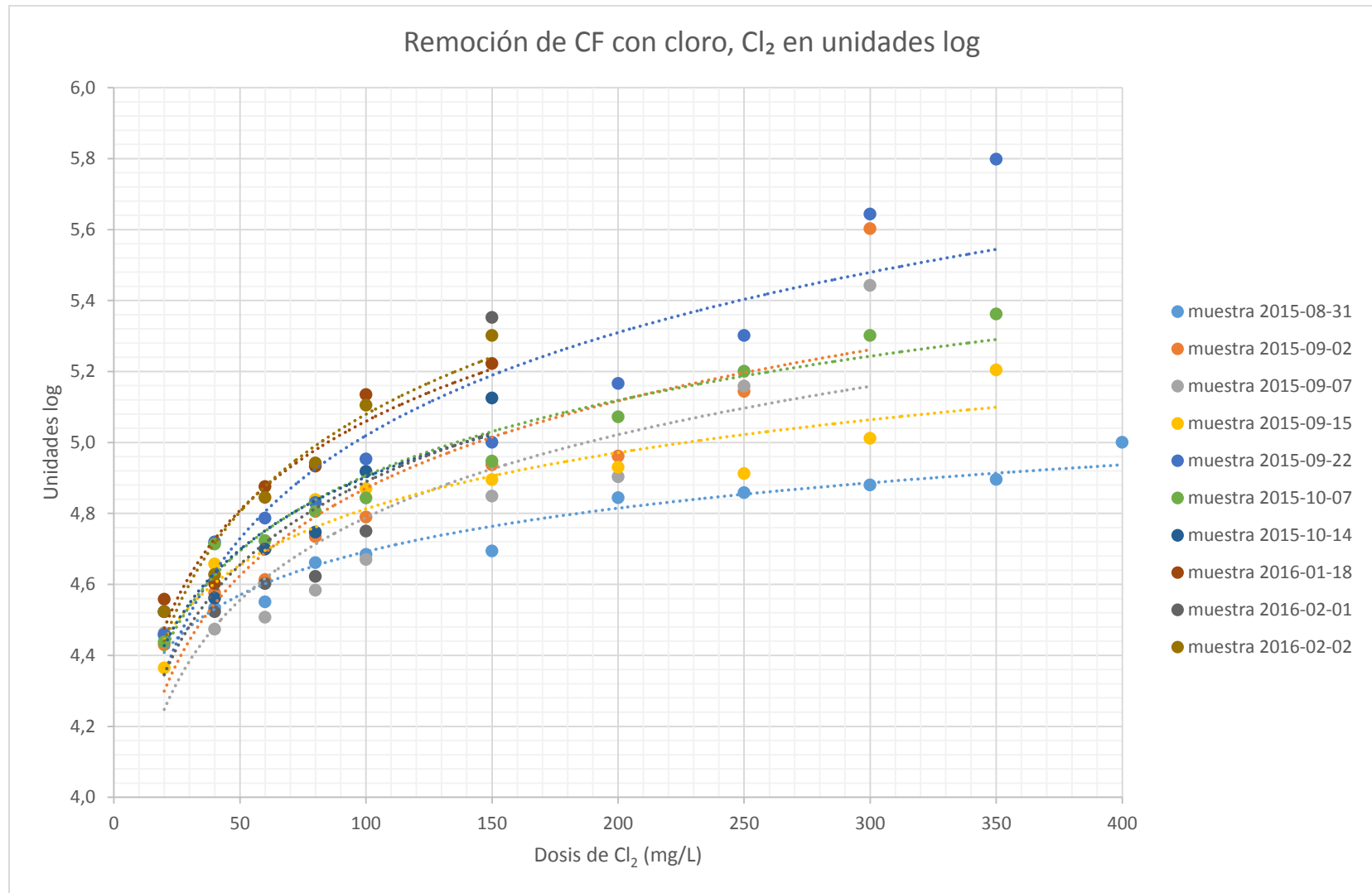


Figura 5.12. Remoción de CF con cloro, Cl₂, en unidades log.

5.7. Coliformes Totales

5.7.1. Coliformes Totales del agua tratada con APA, C₂H₄O₃

Los resultados observados se presentan en la Tabla 5.13 y en la Figura 5.13. Los coliformes totales del agua cruda varían en un intervalo de 12'000.000 a 33'000.000 UFC/100mL. La dosis de APA requerida para desinfección del agua cruda es función del contenido inicial de CT. Con una dosis de 400 mg/L- C₂H₄O₃ se logra desinfección para aguas crudas con CT menores de 2,4E+07 UFC/100mL.

Tabla 5.13. Coliformes Totales del agua tratada con APA, C₂H₄O₃

Muestra Dosis APA, mg/L-C ₂ H ₄ O ₃	2015-08-31	2015-09-02	2015-09-07	2015-09-15	2015-09-22	2015-10-07	2015-10-14	2016-01-18	2016-02-01	2016-02-02	Promedio	Intervalo
0	2,90E+07	2,00E+07	2,40E+07	2,50E+07	3,00E+07	3,30E+07	2,00E+07	2,20E+07	1,20E+07	1,30E+07	22,8E+06 ± 6,9E+06	12E+06 ± 33E+06
20	1355	970	1000	1410	1140	1275	700	1040	535	420	(985 ± 339)	(420 - 1410)
40	1175	810	925	810	735	685	285	460	410	165	(646 ± 311)	(165 - 1175)
60	1115	775	885	670	495	680	175	200	355	105	(546 ± 336)	(105 - 1115)
80	855	740	800	495	475	525	160	215	325	55	(465 ± 276)	(55 - 855)
100	810	670	740	450	400	490	110	185	185	50	(409 ± 272)	(50 - 810)
150	740	500	485	420	365	600	60	135	85	45	(344 ± 248)	(45 - 740)
200	590	295	415	370	280	320	50	90	70	40	(252 ± 185)	(40 - 590)
250	610	180	195	350	245	295	45	65	50	40	(208 ± 180)	(40 - 610)
300	510	110	125	330	180	285	40	50	45	0	(168 ± 162)	(0 - 510)
350	500	40	60	275	135	280	0	0	0	0	(129 ± 170)	(0 - 500)
400	370	0	0	150	65	210	0	0	0	0	(80 ± 127)	(0 - 370)

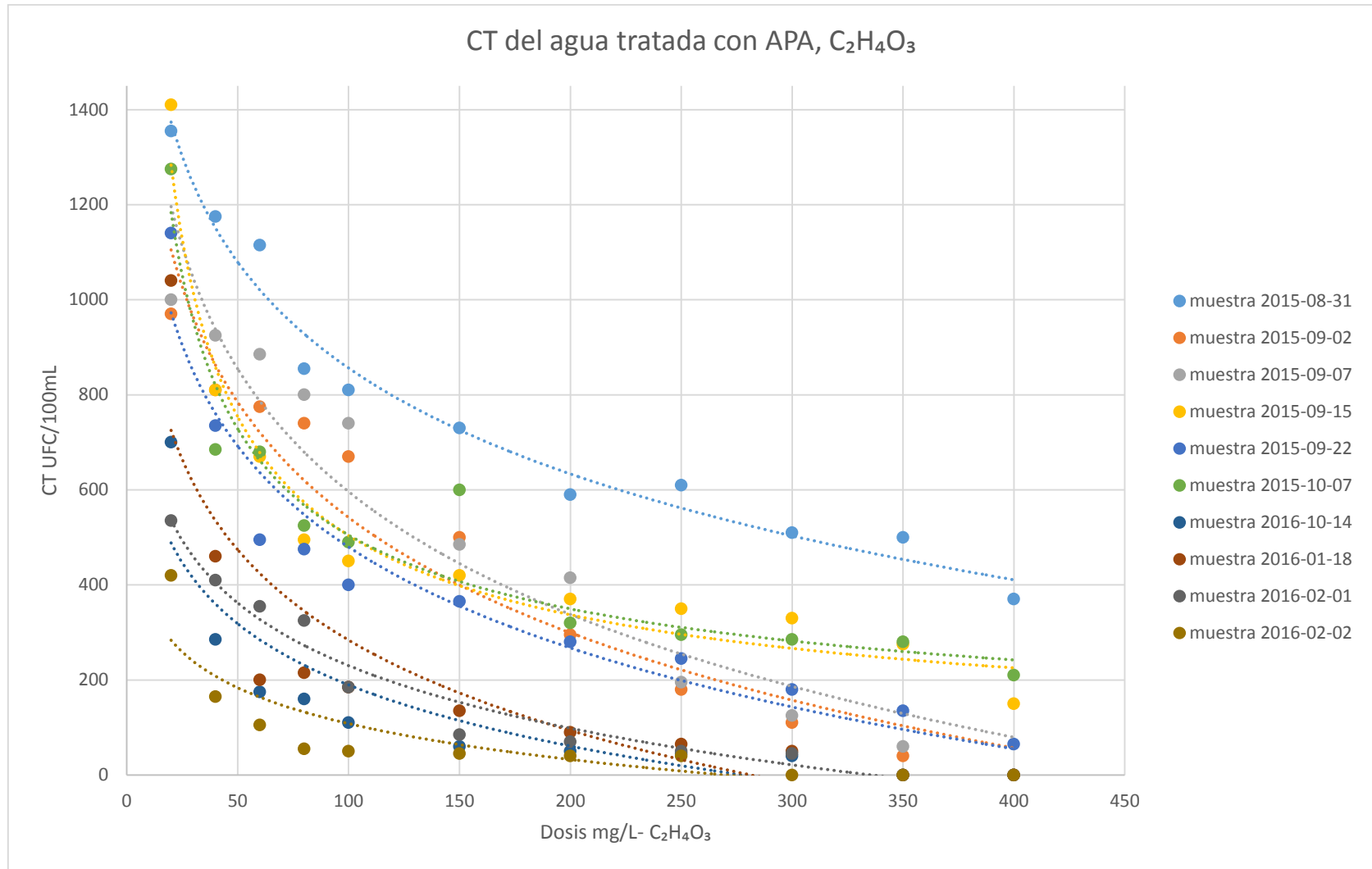


Figura 5.13. Coliformes Totales del agua tratada con APA

5.7.2. Coliformes Totales del agua tratada con cloro, Cl₂

Los resultados observados se presentan en la Tabla 5.14 y en la Figura 5.14. Los coliformes totales del agua cruda varían en un intervalo de 12'000.000 a 33'000.000 UFC/100mL. La dosis de cloro requerida para desinfección del agua cruda es función del contenido inicial de CT. Con una dosis de 400 mg/L-Cl₂ se logra desinfección para aguas crudas con CT menores de 2,5E+07 UFC/100mL.

Tabla 5.14. Coliformes Totales del agua tratada con cloro

Muestra Dosis cloro, mg/L-Cl ₂	2015-08-31	2015-09-02	2015-09-07	2015-09-15	2015-09-22	2015-10-07	2015-10-14	2016-01-18	2016-02-01	2016-02-02	Promedio	Intervalo
0	2,90E+07	2,00E+07	2,40E+07	2,50E+07	3,00E+07	3,30E+07	2,00E+07	2,20E+07	1,20E+07	1,30E+07	22,8E+06 ± 6,9E+06	12E+06 ± 33E+06
20	810	600	625	965	790	855	380	420	270	210	(593 ± 263)	(210 - 965)
40	685	435	605	530	445	450	330	375	270	165	(429 ± 155)	(165 - 685)
60	665	400	620	500	360	435	240	200	225	100	(375 ± 186)	(100 - 665)
80	510	295	490	375	325	360	215	175	215	80	(304 ± 137)	(80 - 510)
100	495	260	385	320	245	330	145	110	160	55	(251 ± 136)	(55 - 495)
150	505	185	255	305	220	260	90	90	40	35	(199 ± 145)	(35 - 505)
200	345	180	225	295	150	195	0	0	0	0	(139 ± 132)	(0 - 345)
250	330	115	125	250	110	145	0	0	0	0	(108 ± 114)	(0 - 330)
300	305	40	65	195	60	115	0	0	0	0	(78 ± 102)	(0 - 305)
350	290	0	0	125	35	100	0	0	0	0	(55 ± 95)	(0 - 290)
400	220	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(22 ± 70)	(0 - 220)

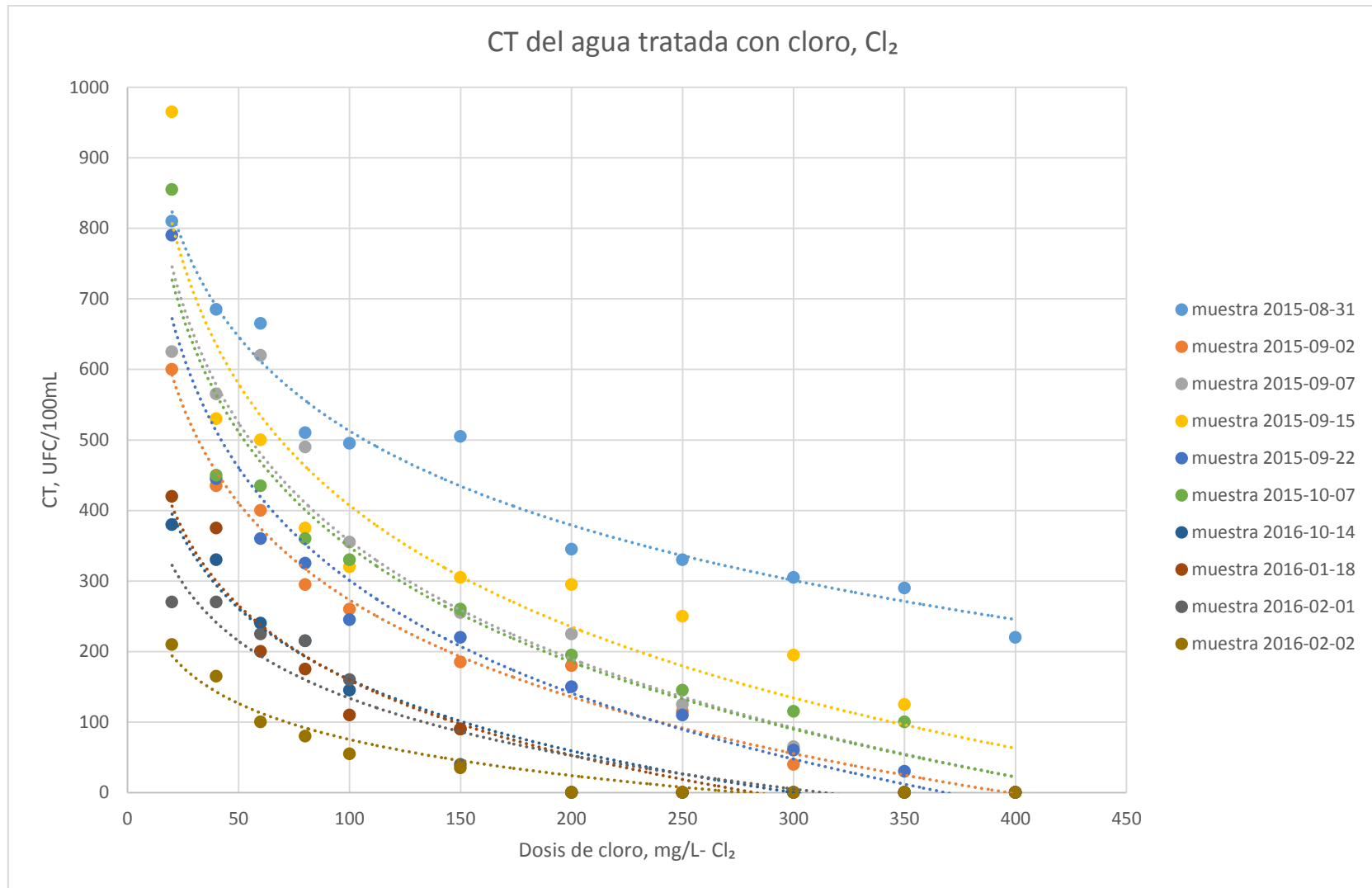


Figura 5.14. Coliformes Totales del agua tratada con cloro

5.7.3. Porcentajes de remoción de CT con APA, C₂H₄O₃

En la Tabla 5.15 y en la Figura 5.15 se presentan los porcentajes remoción de CT con APA, C₂H₄O₃. Se logran remociones del 100% en CT con dosis de 400 mg/L- C₂H₄O₃ para aguas crudas con CT de 2,4E+07 UFC/100mL.

Tabla 5.15. Porcentajes de remoción de CF con APA, C₂H₄O₃

Muestra Dosis APA, mg/L-C ₂ H ₄ O ₃	2015-08-31	2015-09-02	2015-09-07	2015-09-15	2015-09-22	2015-10-07	2015-10-14	2016-01-18	2016-02-01	2016-02-02	Promedio	Intervalo
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(0 ± 0)	(0 - 0)
20	99,9953	99,9952	99,9958	99,9944	99,9962	99,9961	99,9965	99,9953	99,9955	99,9968	(99,9957 ± 0,0007)	(99,9944 - 99,9968)
40	99,9959	99,9960	99,9961	99,9968	99,9976	99,9979	99,9986	99,9979	99,9966	99,9987	(99,9972 ± 0,0011)	(99,9959 - 99,9987)
60	99,9962	99,9961	99,9963	99,9973	99,9984	99,9979	99,9991	99,9991	99,9970	99,9992	(99,9977 ± 0,0012)	(99,9961 - 99,9992)
80	99,9971	99,9963	99,9967	99,9980	99,9984	99,9984	99,9992	99,9990	99,9973	99,9996	(99,998 ± 0,0011)	(99,9963 - 99,9996)
100	99,9972	99,9967	99,9969	99,9982	99,9987	99,9985	99,9995	99,9992	99,9985	99,9996	(99,9983 ± 0,001)	(99,9967 - 99,9996)
150	99,9975	99,9975	99,9980	99,9983	99,9988	99,9982	99,9997	99,9994	99,9993	99,9997	(99,9986 ± 0,0009)	(99,9975 - 99,9997)
200	99,9980	99,9985	99,9983	99,9985	99,9991	99,9990	99,9998	99,9996	99,9994	99,9997	(99,999 ± 0,0006)	(99,998 - 99,9998)
250	99,9979	99,9991	99,9992	99,9986	99,9992	99,9991	99,9998	99,9997	99,9996	99,9997	(99,9992 ± 0,0006)	(99,9979 - 99,9998)
300	99,9982	99,9995	99,9995	99,9987	99,9994	99,9991	99,9998	99,9998	99,9996	100,0000	(99,9994 ± 0,0005)	(99,9982 - 100)
350	99,9983	99,9998	99,9998	99,9989	99,9996	99,9992	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	(99,9995 ± 0,0006)	(99,9983 - 100)
400	99,9987	100,0000	100,0000	99,9994	99,9998	99,9994	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	(99,9997 ± 0,0004)	(99,9987 - 100)

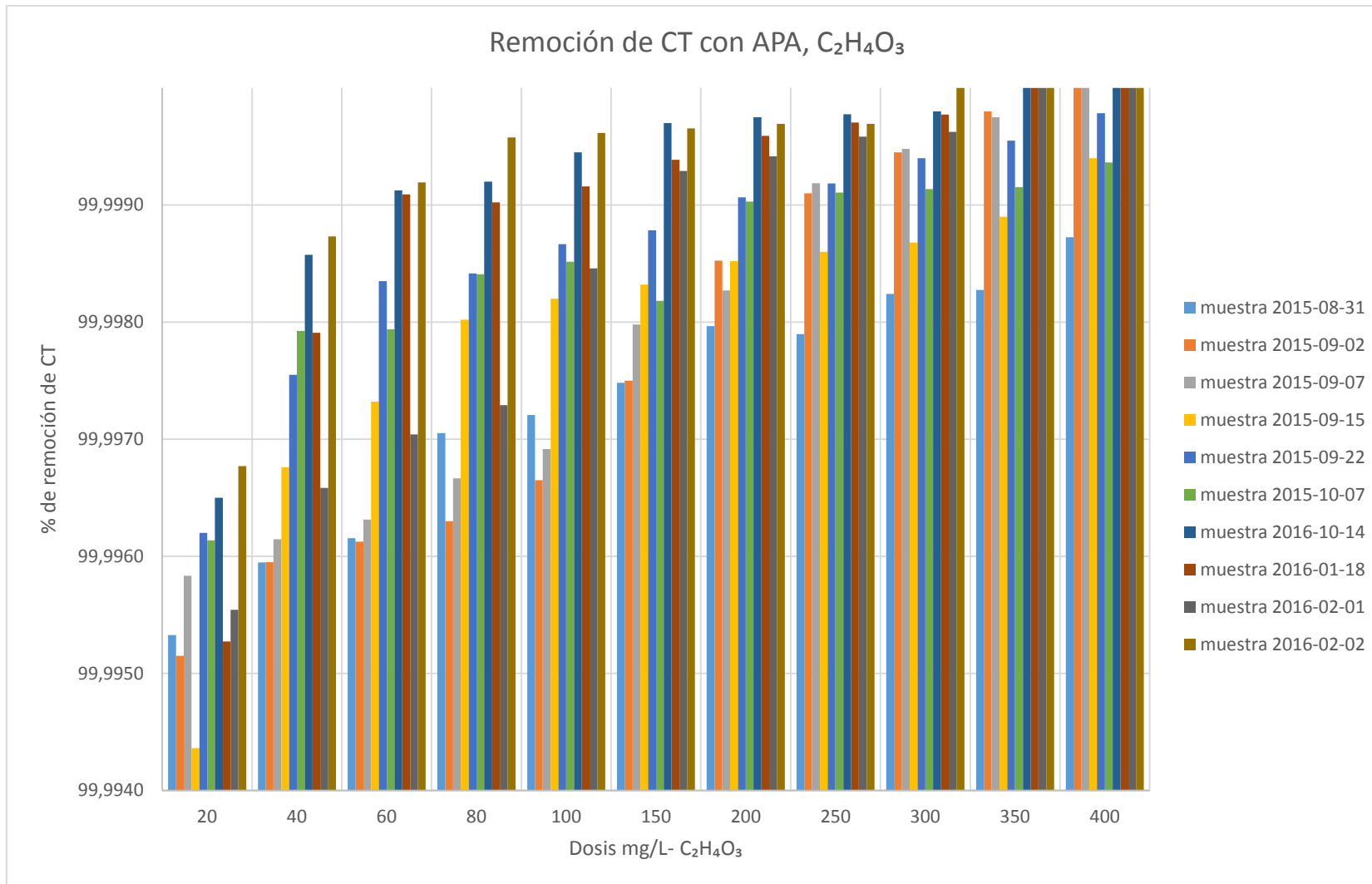


Figura 5.15. Porcentajes de remoción de CF con APA, C₂H₄O₃

5.7.4. Porcentajes de remoción de CT con cloro, Cl₂

En la Tabla 5.16 y en la Figura 5.16 se presentan los porcentajes remoción de CT con cloro. Con una dosis de cloro de 400 mg/L- Cl₂ se logra remoción del 100% de CT para concentraciones de CT en el agua cruda menores de 2,5E+07 UFC/100mL.

Tabla 5.16. Porcentajes de remoción de CT con cloro

Muestra Dosis cloro, mg/L-Cl ₂	2015-08-31	2015-09-02	2015-09-07	2015-09-15	2015-09-22	2015-10-07	2015-10-14	2016-01-18	2016-02-01	2016-02-02	Promedio	Intervalo
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(0 ± 0)	(0 - 0)
20	99,9972	99,9970	99,9974	99,9961	99,9974	99,9974	99,9981	99,9981	99,9978	99,9984	(99,9975 ± 0,0006)	(99,9961 - 99,9984)
40	99,9976	99,9978	99,9976	99,9979	99,9985	99,9986	99,9984	99,9983	99,9978	99,9987	(99,9981 ± 0,0004)	(99,9976 - 99,9987)
60	99,9977	99,9980	99,9974	99,9980	99,9988	99,9987	99,9988	99,9991	99,9981	99,9992	(99,9984 ± 0,0006)	(99,9974 - 99,9992)
80	99,9982	99,9985	99,9980	99,9985	99,9989	99,9989	99,9989	99,9992	99,9982	99,9994	(99,9987 ± 0,0005)	(99,998 - 99,9994)
100	99,9983	99,9987	99,9985	99,9987	99,9992	99,9990	99,9993	99,9995	99,9987	99,9996	(99,9989 ± 0,0004)	(99,9983 - 99,9996)
150	99,9983	99,9991	99,9989	99,9988	99,9993	99,9992	99,9996	99,9996	99,9997	99,9997	(99,9992 ± 0,0005)	(99,9983 - 99,9997)
200	99,9988	99,9991	99,9991	99,9988	99,9995	99,9994	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	(99,9995 ± 0,0005)	(99,9988 - 100)
250	99,9989	99,9994	99,9995	99,9990	99,9996	99,9996	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	(99,9996 ± 0,0004)	(99,9989 - 100)
300	99,9989	99,9998	99,9997	99,9992	99,9998	99,9997	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	(99,9997 ± 0,0004)	(99,9989 - 100)
350	99,9990	100,0000	100,0000	99,9995	99,9999	99,9997	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	(99,9998 ± 0,0003)	(99,999 - 100)
400	99,9992	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	100,0000	(99,9999 ± 0,0002)	(99,9992 - 100)

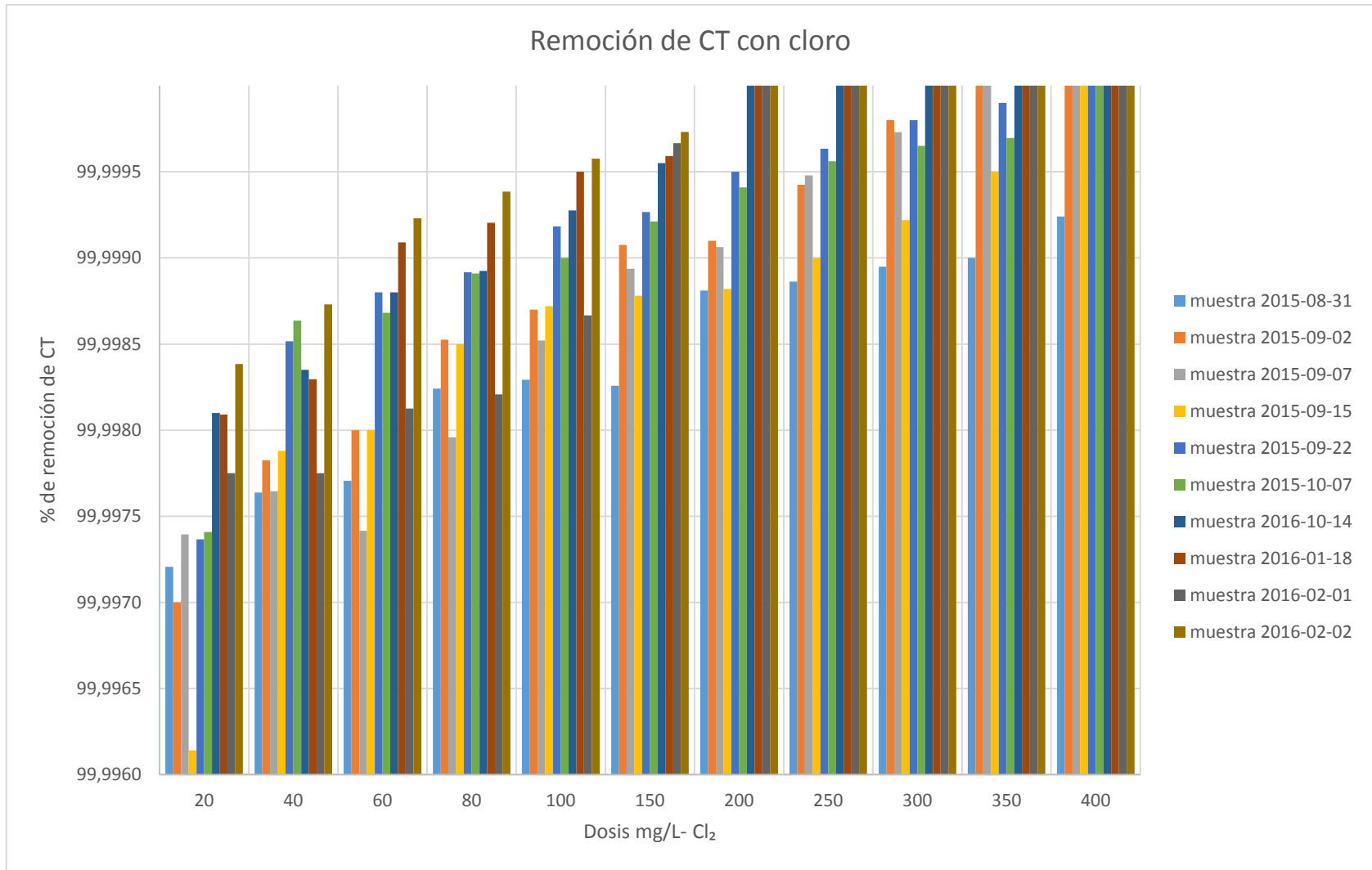


Figura 5.16. Porcentajes de remoción de CT con cloro

5.7.5. Remoción en unidades log de CT con APA, C₂H₄O₃

Los resultados de remoción de CT con APA, C₂H₄O₃ se presentan en la Tabla 5.17 y en la Figura 5.17. Se observa de la misma manera que con los coliformes fecales, que para una dosis de APA de 400 mg/L se obtienen, en todos los ensayos, remociones de CT mayores de 4,9 unidades log, es decir mayores de 99,9987%.

Tabla 5.17. Remoción en unidades log de CT con APA, C₂H₄O₃

Muestra Dosis APA, mg/L-C ₂ H ₄ O ₃	2015-08-31	2015-09-02	2015-09-07	2015-09-15	2015-09-22	2015-10-07	2015-10-14	2016-01-18	2016-02-01	2016-02-02	Promedio	Intervalo
20	4,3	4,3	4,4	4,2	4,4	4,4	4,5	4,3	4,4	4,5	(4,4 ± 0,1)	(4,2 - 4,5)
40	4,4	4,4	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,7	4,5	4,9	(4,6 ± 0,2)	(4,4 - 4,9)
60	4,4	4,4	4,4	4,6	4,8	4,7	5,1	5,0	4,5	5,1	(4,7 ± 0,3)	(4,4 - 5,1)
80	4,5	4,4	4,5	4,7	4,8	4,8	5,1	5,0	4,6	5,4	(4,8 ± 0,3)	(4,4 - 5,4)
100	4,6	4,5	4,5	4,7	4,9	4,8	5,3	5,1	4,8	5,4	(4,9 ± 0,3)	(4,5 - 5,4)
150	4,6	4,6	4,7	4,8	4,9	4,7	5,5	5,2	5,1	5,5	(5 ± 0,3)	(4,6 - 5,5)
200	4,7	4,8	4,8	4,8	5,0	5,0	5,6	5,4	5,2	5,5	(5,1 ± 0,3)	(4,7 - 5,6)
250	4,7	5,0	5,1	4,9	5,1	5,0	5,6	5,5	5,4	5,5	(5,2 ± 0,3)	(4,7 - 5,6)
300	4,8	5,3	5,3	4,9	5,2	5,1	5,7	5,6	5,4	*	(5,2 ± 0,3)	(4,8 - 5,7)
350	4,8	5,7	5,6	5,0	5,3	5,1	*	*	*	*	(5,2 ± 0,4)	(4,8 - 5,7)
400	4,9	*	*	5,2	5,7	5,2	*	*	*	*	(5,2 ± 0,3)	(4,9 - 5,7)

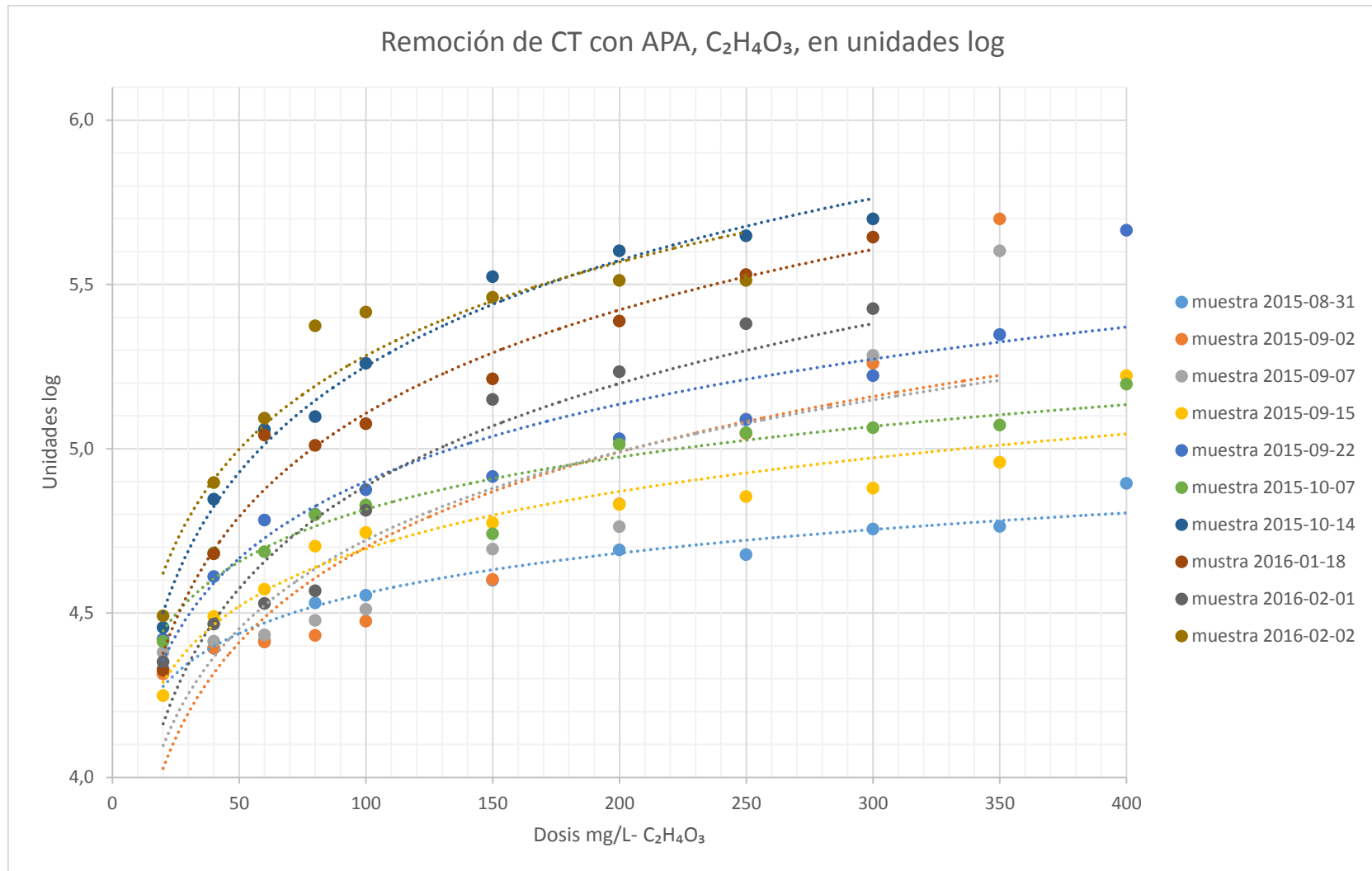


Figura 5.17. Remoción de CT con APA, C₂H₄O₃, en unidades log.

5.7.6. Remoción en unidades log de CT con cloro, Cl₂

Los resultados se presentan en la Tabla 5.18 y en la Figura 5.18. Se observa que con dosis de 400 mg/L- Cl₂ se obtienen remociones mayores de 5,1 unidades log, es decir mayores de 99,9992%.

Tabla 5.18. Remoción en unidades log de CT con cloro

Muestra Dosis cloro, mg/L-Cl ₂	2015-08-31	2015-09-02	2015-09-07	2015-09-15	2015-09-22	2015-10-07	2015-10-14	2016-01-18	2016-02-01	2016-02-02	Promedio	Intervalo
20	4,6	4,5	4,6	4,4	4,6	4,6	4,7	4,7	4,6	4,8	(4,6 ± 0,1)	(4,4 - 4,8)
40	4,6	4,7	4,6	4,7	4,8	4,9	4,8	4,8	4,6	4,9	(4,7 ± 0,1)	(4,6 - 4,9)
60	4,6	4,7	4,6	4,7	4,9	4,9	4,9	5,0	4,7	5,1	(4,8 ± 0,2)	(4,6 - 5,1)
80	4,8	4,8	4,7	4,8	5,0	5,0	5,0	5,1	4,7	5,2	(4,9 ± 0,2)	(4,7 - 5,2)
100	4,8	4,9	4,8	4,9	5,1	5,0	5,1	5,3	4,9	5,4	(5 ± 0,2)	(4,8 - 5,4)
150	4,8	5,0	5,0	4,9	5,1	5,1	5,3	5,4	5,5	5,6	(5,2 ± 0,3)	(4,8 - 5,6)
200	4,9	5,0	5,0	4,9	5,3	5,2	*	*	*	*	(5,1 ± 0,2)	(4,9 - 5,3)
250	4,9	5,2	5,3	5,0	5,4	5,4	*	*	*	*	(5,2 ± 0,2)	(4,9 - 5,4)
300	5,0	5,7	5,6	5,1	5,7	5,5	*	*	*	*	(5,4 ± 0,3)	(5 - 5,7)
350	5,0	*	*	5,3	6,0	5,5	*	*	*	*	(5,5 ± 0,4)	(5 - 6)
400	5,1	*	*	*	*	*	*	*	*	*	5,1	(5,1 - 5,1)

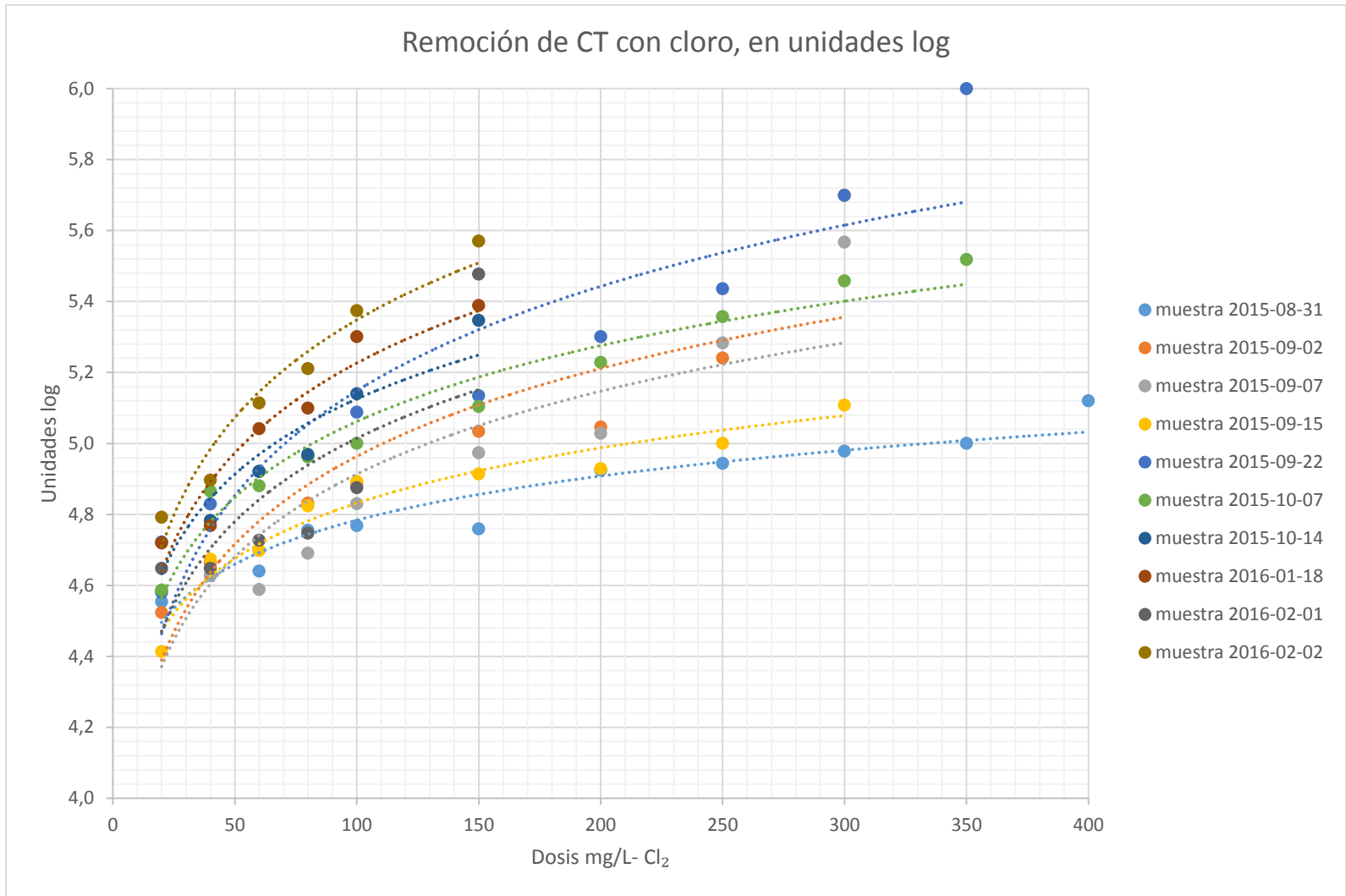


Figura 5.18. Remoción de CT con cloro, en unidades log.

Capítulo VI

Costos

Hipoclorito de calcio, HTH: es un blanqueador seco disponible comercialmente con 65 a 74% de cloro, soluble en agua; se encuentra granular en paquetes de 16 a 45 kg. Dado su potencial oxidante debe guardarse en un lugar seco y frío, apartado de otros productos químicos y en recipientes anticorrosivos. Un kilogramo de HTH tiene un valor comercial de \$7.800.

Hipoclorito de sodio: se encuentra en presentaciones líquidas, del 12 al 15% de cloro, todas las soluciones de éste son inestables y se dañan más rápidamente que el hipoclorito de calcio. Se ve afectado por la exposición a la luz y calor. Un litro de hipoclorito de sodio al 15% tiene un valor comercial de \$2.000.

Cloro gaseoso: (Romero, 2002) plantas pequeñas usan cilindros de cloro de 45 a 68 kg y extraen hasta 19 kg/d de cloro gaseoso por cilindro. Las plantas grandes suelen usar cilindro de 907 kg, extraen cloro líquido y lo vaporizan en evaporadores cuando se requiere más de 680 kg/d de cloro. El material de aplicación debe ser inoxidable. Un kg de Cl_2 tiene un valor comercial de \$5.950

APA: es un desinfectante líquido comercialmente disponible en concentraciones del 12 al 15% de ácido peracético con un valor comercial de \$25.000 el litro para la concentración más alta.

Es evidente que el costo del APA limita su aplicación, \$25.000/L- APA, en comparación con el costo del cloro \$7.800/kg- Cl_2 como HTH; \$2.000/L- Cl_2 como hipoclorito de sodio; y \$5.950/kg- Cl_2 como cloro gaseoso.

Teniendo en cuenta que para CF del agua cruda entre $7,0E+06$ y $1,5E+07$ UFC/100mL, se logró desinfección con APA con dosis de 350 mg/L- $C_2H_4O_3$ y con cloro con dosis de 200 mg/L- Cl_2 . Se puede afirmar que se empleó un 43% más de APA que de cloro.

Los contenidos usuales de cloro en los desinfectantes se muestran en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Contenido de cloro de los desinfectantes

Compuesto	% de cloro	Cantidad requerida para 1 kg de cloro
Cloro gaseoso, Cl_2	100	1 kg
Hipoclorito de sodio	15	6,7 L
Hipoclorito de calcio, HTH	65	1,54 kg

(Romero, 2002)

Los resultados indican que se requiere para desinfección 350 g/m^3 - $C_2H_4O_3$ o 200 g/m^3 - Cl_2 equivalentes a:

- 200 mg/L- Cl₂.
- 350 mg/L-C₂H₄O₃.
- 2,03 L/m³ de APA al 15% de densidad 1.150 g/L.
- 308 g/m³ de HTH al 65% de cloro.
- 1,36 L/m³ de NaOCl al 13% de densidad 1.130 g/L.

La Tabla 6.2 muestra los costos para desinfección de 1 m³ de agua.

Tabla 6.2. Costos para desinfección de 1 m³ de agua.

Producto	Costo comercial	Costo / m ³ de agua tratada
Cloro gaseoso	\$ 5.950 /kg	\$ 1.190
Hipoclorito de calcio	\$ 7.800 /kg	\$ 2.402
Hipoclorito de sodio	\$ 2.000 /L	\$ 2.720
APA	\$ 25.000 /L	\$ 50.750

Capítulo VII

Conclusiones

1. El agua cruda analizada presenta una DBO mínima de 350 mg/L- O₂, máxima de 649 mg/L- O₂ y un valor promedio de 489 ±90 mg/L- O₂. Con una dosis de 400 mg/L de APA se obtiene agua con DBO de 46 a 299 mg/L- O₂, en promedio 149 ± 84 mg/L- O₂.
 2. Con una dosis de 400 mg/L- Cl₂ se obtiene agua con DBO de 160 a 524 mg/L- O₂ en promedio 328 ± 110 mg/L- O₂.
 3. Para una dosis de 400 mg/L de APA se obtienen residuales de APA entre 3 y 4,7 mg/L con un promedio de 3,8 ± 0,5 mg/L- APA.
 4. Para una dosis de 400 mg/L- Cl₂ se obtienen residuales de cloro entre 3,4 y 5,9 mg/L con un promedio de 5 ± 0,9mg/L- Cl₂.
 5. Los CT del agua residual cruda oscilan entre 1,2E+07 y 3,3E+07 UFC/100mL con un valor promedio de 22,8E+06 ± 6,9E+06 UFC/100mL.
 6. Dosis de 400mg/L- Cl₂, con tiempo de contacto de 30 minutos permite obtener remoción de coliformes totales, CT, mayor de 99,9992% (5,1 unidades log).
 7. Dosis de 400 mg/L- APA, con tiempo de contacto de 30 minutos permite obtener remoción de coliformes totales, CT, mayores de 99,9987% (4,9 unidades log).
 8. El APA es mejor oxidante que el cloro, permite, en dosis iguales de 400 mg/L, una remoción de DBO de 53,9 a 86,9%, en promedio 71,4 ± 11,1%, mientras que con cloro se obtienen remociones de 19,3 a 54,3 % en promedio 34,8 ± 10,6%.
 9. El cloro es mejor desinfectante que el APA, permite, en dosis iguales de 400 mg/L, una remoción de CT de 99,9992 - 100% en promedio 99,9999 ± 0,0002%, mientras que con APA se obtiene una remoción de CT de 99,9987 - 100% en promedio 99,9997 ± 0,0004%.
 10. El uso de APA como desinfectante es más costoso, \$50.750/m³, contra \$2.720/m³ de hipoclorito de sodio, debido posiblemente al alto consumo de APA como oxidante en aguas residuales crudas.
- Se recomienda evaluar la eficiencia y costo del APA, comparativamente con la del cloro, en efluentes de aguas residuales con tratamiento secundario para determinar la influencia de la concentración orgánica en el proceso.

Referencias

Atasi K, Rabbaig M, Chen C. 2001. *Alternative disinfectants evaluation for combined sewage overflow (CSO): Detroit Baby Creek CSO case study*. Proceedings of the 74th Annual conference, Water Environment Conference, Water Environment Federation Atlanta, GA.

Bach R, Ayala P, Schlegel H. 1996. *A reassessment of the bond dissociation energies of peroxides: an ignition study*. Journal American Chemical Society. 118 (50), pp. 12758-12765.

Bradly MGC, French MS, Slater D. 1991. *The activity of peracetic acid on sewage indicator bacteria and viruses*. Water Science and Technology, 24(2), pp.353-357.

Caretti C, Lubello C. *Wastewater disinfection with PAA and UV combined treatment: a pilot plant study*. Water Research 2003; 37: 2365-2371.

Chhetri R, Thornberg D, Berner J, et al. 2004. *Chemical disinfection of combined sewer overflow waters using performic acid or peracetic acids*. Science of the Total Environment. 490, pp. 1065-1072.

Crebelli R, Conti L, Monarca S, et al. 2005. *Genotoxicity of the disinfection by-products resulting from peracetic acid- or hypochlorite-disinfected sewage wastewater*. Water Research. 39, pp. 1105-1113.

Dell'Erba A, Falsanisi D, Liberti L, et al. 2007. *Disinfection by-products formation during wastewater disinfection with peracetic acid*. Desalination. 215, pp. 177-186.

Denyer S, Maillard J. 2002. *Cellular impermeability and uptake of biocides and antibiotics in gram-negative bacteria*. Journal Applied Microbiology Symposium Supplement. 92 (1), pp. 35-45.

Emerging Technologies. 2013. *Alternative Disinfection(Peracetic Acid (PAA) and BCDMH)*.

EPA. 1999. *Combined sewer overflow technology fact sheet. Alternative disinfection methods*. EPA 832-F-99-033.

Flores M, Lescano M, Brandi M, et al. 2014. *A novel approach to explain the inactivation mechanism of Escherichai coli employing a commercially available peracetic acid*. Water Science and Technology. 69 (2), pp.358-363.

Gehr R, Cochrane D, French M. 2002. *Peracetic acid (PAA) as a disinfectant for municipal wastewaters: encouraging performance results from physicochemical as well as biological effluents*. Proeeding of the Disinfection 2002 Conference, Water Environment Federation, St. Petersburg, FL, February 17-20.

Gehr R, Wagner M, Veerasubramanian P, et al. 2003. *Disinfection efficiency of peracetic acid, UV and ozone after enhanced primary treatment of municipal wastewater*. Water Research. 37, pp. 4573-4586.

González, R. (2012). *Microbiología del Agua. Conceptos y aplicaciones*. Bogotá, D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Grantham R. 1991. *Research by the National Rivers Authority (NRA) in the England and Wales in the efficacy and side effects of a variety of techniques for the disinfection of sewage effluents*. Proceedings of the conference "Disinfecting Wastewater for Discharge and Reuse". Waste Environment Federation, Portland, OR, March 17-20, pp. 6.1 - 6.12.

Imlay A, Linn S. 1988. *Toxic DNA damage by hydrogen peroxide through the Fenton reaction in vivo and in vitro*. Science. 240 (4852), pp. 640-642.

Kitis M. 2004. *Disinfection of wastewater with peracetic acid: a review*. Environment International. 30, pp. 47-55.

Koivunen J, Heinonen H. 2005. *Peracetic acid (PAA) disinfection of primary, secondary and tertiary treated municipal wastewaters*. Water Research. 39, pp. 4445-4453.

Lazarova V, Janex ML, Fiksdal L, et al. 1998. *Advanced wastewater disinfection technologies: short and long term efficiency*. Water Science and Technology. 38 (12), pp. 109-117.

Lefevre F, Audic JM, Ferrand F. 1992. *Peracetic acid disinfection of secondary effluents discharge off coastal seawater*. Water Science and Technology. 25 (12), pp. 155-164.

Li B, Gutierrez P, Blought N. 1997. *Trace determination of hydroxyl radical and biological systems*. Analytical Chemistry. 69 (21), pp. 4295-4302.

Liberti L, Lopez A, Notarnicola M. 1992. *Disinfection with peracetic acid for domestic sewage reuse in agriculture*. CIWEM J. 13, pp. 262-269.

Lubello C, Caretti C, Gori R. 2002. *Comparison between PAA/UV and H₂O₂/UV disinfection for wastewater reuse*. Water Science and Technology: Water Suppl. 2 (1), pp. 205-212.

McDonell G, Russell D. 1999. *Antiseptics and disinfectants: activity, action and resistance*. Clinical Microbiological Review. 12 (1), pp. 147-179.

Ministerio del Medio Ambiente. 2007. Resolución 2115 del 22 de julio de 2007. Colombia.

Nieto J, Pierzchala K, Sienkiewicz A, et al. 2010. *Inactivation of MS2 coliphage in Fenton and Fenton like systems: role of transition metals, hydrogen peroxide and sunlight*. Environmental Science and Technology. 44 (9), pp. 3351-3356.

Standard Methods. 1999. Examination of Water and Wastewater. 20th Edition. Editorial. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.

Rokhina E, Makarova K, Golovina E, et al. 2010. *Free radical reaction pathway thermochemistry of peracetic acid homolysis, and its application for phenol degradation: spectroscopic study and quantum chemistry calculation*. Environmental Science and Technology. 44 (17), pp. 6815-6821.

Romero, J. (1999). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. Bogotá, D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Romero, J. (2002). *Calidad del Agua*. Bogotá, D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Romero, J. (2006). *Purificación del agua. Teoría y principios de diseño*. Bogotá, D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Rossi S, Antonelli M, Mezzanotte V, et al. Peracetic Acid Disinfection: A Feasible Alternative to Wastewater Chlorination. *Water Environment Research* 2007; 79:341-355.

Veschetti E, Cutilli D, Bonadonna L, et al. 2003. *Pilot-plant comparative study of peracetic acid and sodium hypochlorite wastewater disinfection*. *Water Research*. 37, pp. 78-94.

<http://www.chemetrics.com/Peracetic+Acid>

<http://www.epa.gov/nrmrl/watercluster>