

**PROPUESTA PARA UN MÉTODO DE REDUCCIÓN DE CARBONO ORGÁNICO
TOTAL PARA EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE**

**MARÍA DEL PILAR LEGUIZAMÓN ROMERO
LAURA TATIANA SARMIENTO SUÁREZ**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2020**

**PROPUESTA PARA UN MÉTODO DE REDUCCIÓN DE CARBONO ORGÁNICO
TOTAL PARA EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE**

**Proyecto integral de grado para optar el título de:
Ingeniero químico**

**MARÍA DEL PILAR LEGUIZAMÓN ROMERO
LAURA TATIANA SARMIENTO SUÁREZ**

**Director
HARVEY ANDRES MILQUES
Ingeniero químico**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2020**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente de jurados

Jurado

Jurado

Bogotá, agosto de 2020

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Consejero Institucional

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCIA-PEÑA

Vicerrectoría Académica y de Investigaciones

Dra. MARÍA CLAUDIA APONTE GONZÁLEZ

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretaria General

Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN

Decano Facultad de Ingeniería

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa de ingeniería

Ing. IVÁN RAMÍREZ MARÍN

Las directivas de la Fundación Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer primero a Dios por darnos la salud, fuerza y fortalecimiento para continuar con este proyecto en estos tiempos de contingencia.

A nuestras familias un especial agradecimiento por brindarnos todo su apoyo incondicional, amor y recursos durante todos estos años para lograr culminar esta etapa profesional en nuestras vidas.

A nuestro director Ing. Harvey Andrés Milquez, por ofrecernos su apoyo, tiempo y disponibilidad para el desarrollo de este proyecto.

Agradecemos a las Directivas, profesores y personal administrativo de la Universidad América, en especial al personal de biblioteca por brindarnos sus conocimientos y colaboración.

... A TODOS MUCHÍSIMAS GRACIAS

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	13
OBJETIVOS	15
1.GENERALIDADES	16
1.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO	16
1.1.1 Color aparente	16
1.1.2 Olor y sabor	16
1.1.3 Turbiedad	16
1.1.4 Conductividad	17
1.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO	17
1.2.1 Potencial de hidrógeno	17
1.2.2 Sustancias que generan riesgo en la salud humana	17
1.2.3 Aluminio residual	20
1.2.4 Cloro residual	20
1.3 DESINFECCION	20
1.3.1 Cloración	21
1.3.2 Otros procesos de desinfección	22
1.3.3 Subproductos de desinfección (SPD)	22
1.3.3.1 Trihalometanos	23
1.3.3.2 Ácidos acéticos halogenados (HAA)	25
1.3.3.3 Subproductos minoritarios	25
1.4 BIOPELICULAS	25
1.4.1 Sustancias poliméricas extracelulares (EPS)	26
1.4.2 Tipo de desinfectante en el control de biopelículas	26
2. IMPACTO DEL COT EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE	28
2.1 MECANISMO DE FORMACIÓN DE BIOPELICULAS	28
2.2 EFECTO DE LAS BIOPELICULAS EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	30
2.2.1 Efecto en la salud humana	30
2.2.2 Biocorrosión	32
2.3 EFECTO DE LOS SUBPRODUCTOS DE DESINFECCIÓN PRESENTES EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	34
2.3.1 Trihalometanos	37
2.3.2 Ácidos acéticos halogenados	37
2.3.3 Subproductos minoritarios	37
3. MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DE COT	38
3.1 SENSORES EN LÍNEA PARA COAGULACIÓN Y FILTRACIÓN.	38
3.2 COMBUSTIÓN A ALTA TEMPERATURA. (SM 5310 B)	39

3.3 OXIDACIÓN DE PERSULFATO UV A BAJA TEMPERATURA	43
3.4 ANALIZADORES DE ABSORBENCIA ULTRAVIOLETA	47
3.5 MÉTODO DE CORRELACIÓN	49
3.6 EL ANÁLISIS COULOMÉTRICO	52
4. MÉTODOS ESTUDIADOS PARA LA REDUCCIÓN DE COT	54
4.1 CASO 1: MEMBRANAS DE BAJA PRESIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA	54
4.1.1 Pretratamiento por membranas	55
4.1.2 Proceso de tratamiento medio por membranas	56
4.1.3. Tratamiento final mediante membranas de baja presión	56
4.2 CASO 2: FILTROS DE CARBÓN ACTIVADO GRANULAR	57
4.3 CASO 3: ÓXIDO DE GRAFENO EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN PARA ELIMINACIÓN DE COT.	60
4.4 MATRIZ DE DECISIÓN EMPLEADA PARA EVALUAR LOS MÉTODOS UTILIZADOS PARA REDUCCIÓN DE COT	64
5. CONCLUSIONES	68
6. RECOMENDACIONES	69
BIBLIOGRAFÍA	70

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Características físicas evaluadas para la calidad del agua.	17
Tabla 2. Características químicas que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana	18
Tabla 3. Características químicas que tienen implicaciones sobre la salud humana.	19
Tabla 4. Características químicas que tienen mayores consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana.	19
Tabla 5. Porcentaje de inactivación de varios organismos bajo diferentes condiciones de desinfección.	21
Tabla 6. Propiedades de los EPS y su relevancia en la formación y funcionalidad de las biopelículas.	26
Tabla 7. Acción del desinfectante en la biopelícula.	27
Tabla 8. Relación entre concentración de carbono orgánico y la formación de biopelícula.	29
Tabla 9. Hongos patógenos encontrados en biopelículas.	31
Tabla 10. Microorganismos encontrados en biopelículas de agua potable.	32
Tabla 11. Subproductos de desinfección formados a partir de diferentes tipos de desinfectantes.	35
Tabla 12. Información toxicológica para los DBP.	36
Tabla 13. Sistemas de Membrana Integrados y contaminantes a reducir como objetivo.	55
Tabla 14. Características fisicoquímicas GAC-A y GAC-B.	58
Tabla 15. Rango experimental y niveles de las variables independientes	62
Tabla 16. Diseño de RSM y los valores observados y pronosticados para la remoción de Turbidez y COT	63
Tabla 17. Puntuación ítems.	64
Tabla 18. Evaluación ítems	65
Tabla 19. Resultado de la matriz de decisión	66

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ejemplos de analizadores de absorbancia UV de haz único	48

RESUMEN

El interés generado en los últimos años por optimizar la calidad del agua potable ha incentivado la búsqueda de mejoras en los procesos implementados convencionalmente para tratar el agua, lo que lleva a los estudios a indagar en las principales fuentes de contaminación y las variables que afectan el proceso impidiendo que se cumpla con la expectativa de la calidad que debería cumplir; por lo consiguiente una de las principales causas se encuentra a través de las redes de distribución, donde hay una alta probabilidad de contener materia orgánica introducida por razones exógenas al proceso de tratamiento como cambios permanentes o transitorios de presión, incluso mediante la operación de válvulas y bombas en la red. Lo que implica un riesgo y expone la calidad del agua potable a las múltiples reacciones que pueden darse, formando subproductos de desinfección a causa de la oxidación de la materia orgánica por los desinfectantes utilizados. A través de análisis epidemiológicos y de toxicidad, se han encontrado SPD en las fuentes de agua potable lo que ocasiona una alta preocupación para la salud humana, ya que se ha demostrado que estos compuestos pueden afectar la viabilidad celular, así como influenciar en la formación de distintos tipos de tumores en el organismo y enfermedades crónicas. El carbono orgánico total incluye sustancias disueltas y particuladas de la materia orgánica natural, por lo que es el parámetro determinante de medición para controlar el contenido de éste en el agua. A través de este trabajo se busca resaltar la importancia que tiene el seguimiento a este compuesto, el gran impacto que presenta al encontrarse en un producto de consumo diario y directo, del cual no se tiene el suficiente control a pesar de la normatividad establecida. Por lo tanto, es importante entender el alcance que representa química, física y salubrementemente mediante su comportamiento al entrar en contacto con otros compuestos presentes en el agua. Evaluando también los avances que hay en la actualidad para reducir los niveles de COT que se han puesto en práctica y que posibilitan garantizar la calidad del agua potable a un corto plazo.

Para la medición de COT en agua potable se usan diferentes tipos de métodos, entre los más usados esta la combustión altas temperaturas que es utilizado cuando se tienen residuos orgánico muy grandes, mientras que la oxidación de persulfato de sodio a bajas temperaturas es recomendada para un contenido más bajo de MON, también se puede encontrar métodos como UV_{254} , donde la principal función de todos ellos es convertir el carbono inorgánico (CI) en dióxido de carbono (CO_2) para detectar el CO_2 que se encuentra en la muestra se utilizan diferentes tipos de detectores: Infrarrojos, Conductividad, Electrodo de CO_2 , Ionización de llama, Análisis coulométrico y método colorimétrico.

Para realizar una propuesta para la reducción de carbono orgánico total para el sistema de distribución de agua potable se escogieron tres métodos diferentes; Membranas, Filtros de Carbón Activado Granular y Óxido de Grafeno, realizando una matriz de decisión donde se evaluaron diferentes ítems en el proceso de eliminación, como principal variable se determinó el porcentaje de reducción de COT, seguido de Mantenimiento, Costos, Dificultad del proceso y variables externas respectivamente. Donde cada una de estas justifico que el mejor método para reducir COT en agua potable es el Óxido de Grafeno ya que elimina el 97.9% de la materia orgánica mientras que los otros métodos solo logran reducir de un 30 a 40%.

Se plantea utilizar método de óxido de grafeno como un procedimiento de prefiltración antes de la coagulación para una planta de tratamiento de agua potable (PTAP) que trate el agua de la cuenca del río Bogotá, ya que este contiene moderadas y altas cantidades de MON y así lograr controlar el aumento en los niveles de COT para que en caso de que se presente un incremento de COT por formación de biopelículas por afores en las tuberías, aumentos de presión o temperatura, poder garantizar que el agua que se encuentre en el sistema de distribución sigue cumpliendo con los estándares de calidad del agua potable para consumo humano.

Palabras clave: agua potable, red de distribución, COT, combustión altas temperaturas, oxidación de persulfato, método UV₂₅₄, detectores, oxido de grafeno.

INTRODUCCIÓN

El agua potable que llega al sistema de distribución a través de una compleja infraestructura que incluye la captación, producción, almacenamiento, drenaje y la distribución del producto a sus consumidores finales; es sometida a procesos de filtración, floculación, sedimentación y desinfección, con tal fin de garantizar la calidad del agua para consumo directo.

Para el proceso de desinfección, el cloro es la sustancia más utilizada a nivel mundial, debido a su gran efectividad. Una gran ventaja que presenta, es el cloro residual contenido en el agua para que continúe su proceso de desinfección en la red de distribución; cabe resaltar su amplia comercialización frente a otros desinfectantes, lo que favorece la economía del proceso. Sin embargo, la presencia de carbono orgánico total (COT) en las redes de distribución genera un riesgo frente a este método de desinfección. “El cloro reacciona con precursores orgánicos del agua generando una mezcla compleja de subproductos organoclorados y organobromados con propiedades cancerígenas”¹.

Otra importante consecuencia que surge a partir de la presencia del COT en el sistema de distribución de agua potable, se ve reflejada en la formación de biopelículas compuestas por diferentes microorganismos que aprovechan las propicias condiciones del medio (bajas concentraciones de materia orgánica, nitrógeno y fósforo), para la formación de estos micro ecosistemas que pueden perjudicar las características organolépticas del agua y potencialmente la generación de subproductos de desinfección (SPD).²

La vigente resolución 2115 de 2007, exige que la entidad prestadora en la red de distribución debe ejercer un control de la calidad física y química del agua mediante la frecuencia y el número de muestras, dependiente del número de habitantes que se ven abastecidos por la empresa; específicamente para el COT en este caso, se debe realizar el control con mínimo 2 muestras semestralmente.³ Bajo estas condiciones tan laxas exigidas por la autoridad sanitaria, se encontró la necesidad

¹ VILLANUEVA, C.M; KOGEVINAS, M; GRIMALT, J.O. Cloración del agua potable en España y cáncer de vejiga. [en línea].2001, 15(1), pp. 48-53. [Consultado 10 de marzo 2020]. ISSN 0213-9111. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0213911101715178>

² LEMUS PÉREZ, Mildred. F. Reacción del cloro con sustancias exopoliméricas provenientes de biopelículas de agua potable: Subproductos de desinfección, características y toxicidad. Bogotá D.C., Colombia. Universidad de los Andes, 2017.

³ COLOMBIA. MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL, MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 2115. [En línea]. (22, junio, 2007). [Consultado 07 de noviembre 2019]. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Art. 21. Disponible en internet: http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislaci%C3%B3n_del_agua/Resoluci%C3%B3n_2115.pdf

de hacer un seguimiento más riguroso a este componente químico presente en el sistema de distribución; identificando así el impacto que este genera, estableciendo cuales son actualmente los métodos de medición más precisos y finalmente plantear una propuesta para la reducción de COT para el sistema de distribución de agua potable.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Proponer un método de reducción de carbono orgánico total para el sistema de distribución de agua potable.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar el impacto del COT en el sistema de distribución de agua potable.
2. Establecer los diferentes métodos para la determinación de COT.
3. Generar una propuesta para la reducción de COT para el sistema de distribución de agua potable.

1. GENERALIDADES

1.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO

1.1.1 Color aparente. El color presente en el agua se debe principalmente al contenido de partículas que contaminan, provenientes por lo general de los compuestos utilizados en el tratamiento, o por otro tipo de compuestos (húmicos, incluso pigmentos de microorganismos o férricos).⁴

Este parámetro no es una determinante para identificar el tipo de contaminante presente en el agua. El color aparente se mide en Unidades de Platino Cobalto (UPC).⁵

1.1.2 Olor y sabor. Como resultado de algunos compuestos derivados de las biopelículas (tales como fenoles o hidrocarburos) presentes en el agua; pueden afectar estas propiedades organolépticas. También se pueden ser alterados por materia orgánica en estado de descomposición o por el tipo de desinfectantes utilizados; ya que estos suelen poseer un olor muy particular e identificable.⁶

1.1.3 Turbiedad. A través de esta característica se espera obtener la cantidad de sólidos totales que se encuentran suspendidos en el agua. La turbiedad se mide en Unidades Nefelométricas de turbiedad (UNT).⁷

Los valores máximos aceptables para cada una de las características físicas que se expuestas anteriormente son los siguientes:

⁴ GÓMEZ PÁEZ, M. P. Mecanismos de control en la formación de biopelículas en sistemas de distribución de agua potable. Bogotá, Colombia. Universidad de los Andes, 2008.

⁵ COLOMBIA. MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL, MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 2115. [En línea]. (22, junio, 2007). [Consultado 07 de noviembre 2019]. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Art. 21. p, 2. Disponible en internet: http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislaci%C3%B3n_del_agua/Resoluci%C3%B3n_2115.pdf

⁶ GÓMEZ PÁEZ, M. P. Op. cit., p. 14

⁷ COLOMBIA. MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL, MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Op. cit., p, 2

Tabla 1. Características físicas evaluadas para la calidad del agua.

Características físicas	Expresadas como	Valor máximo aceptable
Color aparente	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	15
Olor y Sabor	Aceptable o no aceptable	Aceptable
Turbiedad	Unidades Nefelométricas de turbiedad (UNT)	2

Fuente: COLOMBIA. MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL, MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 2115. [En línea]. (22, junio, 2007). [Consultado 07 de noviembre 2019]. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Art. 21, p.2. Disponible en internet: http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislaci%C3%B3n_del_agua/Resoluci%C3%B3n_2115.pdf

1.1.4 Conductividad. Este parámetro representa la capacidad de conducción eléctrica que tiene el agua. El valor máximo aceptable es hasta 1000 micro siemens/cm. Si la conductividad aumenta considerablemente respecto a la fuente, deberá evaluarse la cantidad de sólidos disueltos; ya que es la probable causa del aumento en su conductividad.⁸

1.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO

1.2.1 Potencial de hidrógeno. Básicamente a través de esta característica se evalúa el estado de acidez o alcalinidad que presenta la muestra de agua. Por lo general para que sea apta para consumo humano, este valor deberá estar entre 6.5 y 9.0.⁹

1.2.2 Sustancias que generan riesgo en la salud humana. Los siguientes elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos, podrían estar presentes en el agua como subproductos de desinfección y tienen un reconocido efecto adverso en la salud humana.¹⁰

Por lo que deben estar bajo un estricto control, en la Tabla 2 se enmarcan los valores máximos aceptables de estos.

⁸ *Ibíd.*, p, 3

⁹ *Ibíd.*, p, 3

¹⁰ *Ibíd.*, p, 3

Tabla 2. Características químicas que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana.

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias	Expresados como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Antimonio	Sb	0.02
Arsénico	As	0.01
Bario	Ba	0.7
Cadmio	Cd	0.003
Cianuro libre y disociable	CN ⁻	0.05
Cobre	Cu	1.0
Cromo total	Cr	0.05
Mercurio	Hg	0.001
Níquel	Ni	0.02
Plomo	Pb	0.01
Selenio	Se	0.01
Trihalometanos Totales	THMs	0.2
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	HAP	0.01

Fuente: COLOMBIA. MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL, MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 2115. [En línea]. (22, junio, 2007). [Consultado 07 de noviembre 2019]. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Art. 21, p, 3. Disponible en internet: http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislaci%C3%B3n_del_agua/Resoluci%C3%B3n_2115.pdf

1.2.2.1 Carbono Orgánico Total. El COT, representa todo el carbono presente en el agua independiente del estado de oxidación de la materia orgánica.

1.2.2.2 Nitritos. Cuando se identifica la presencia de nitritos en el agua por lo general estos, representan procesos biológicos que tienen actividad en el agua. Las concentraciones altas de nitritos en concentraciones en el interior del organismo, llevan a cabo reacciones con aminas y amidas secundarias y terciarias dando lugar a nitrosominas, caracterizadas por su efecto cancerígeno.¹¹

1.2.2.3 Nitratos. Este compuesto inorgánico es identificado como uno de los principales contaminantes en el agua; su origen por lo general, puede deberse a los fertilizantes. Cuando se identifica una muestra de agua con un contenido mayor al

¹¹ INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL - REPÚBLICA DE COLOMBIA. Determinación de nitrito en agua por espectrofotometría. [En línea]. (2009).[Consultado 10 de Marzo 2020]. Disponible: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Nitrito+en+agua+por+Espectrofotometr%C3%A9.pdf/4775634c-c6ba-4c95-8e98-0696ace02c03>

permitido; debe hacerse una exhaustiva regulación y valoración, ya que esta muestra se considera contaminada y es altamente nociva en la salud humana.¹²

1.2.2.4 Fluoruros. Este compuesto en el agua potable puede tener alcances beneficiosos como perjudiciales para la salud, dependiendo de la cantidad que se encuentre expuesta. Sin embargo, la OMS ha clasificado el fluoruro dentro de los elementos potencialmente tóxicos y la ingesta de este compuesto debe estar controlada.¹³

Tabla 3. Características químicas que tienen implicaciones sobre la salud humana.

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos que tienen implicaciones sobre la salud humana	Expresados como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Carbono Orgánico Total	COT	5.0
Nitritos	NO ₂ ⁻	0.1
Nitratos	NO ₃ ⁻	10
Fluoruros	F ⁻	1.0

Fuente: COLOMBIA. MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL, MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 2115. [En línea]. (22, junio, 2007). [Consultado 07 de noviembre 2019]. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Art. 21, p. 3. Disponible en internet: <https://n9.cl/st5j>

Tabla 4. Características químicas que tienen mayores consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana.

Elementos y compuestos químicos que tienen implicaciones de tipo económico	Expresadas como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Calcio	Ca	60
Alcalinidad Total	CaCO ₃	200
Cloruros	Cl ⁻	250
Aluminio	Al ³⁺	0.2
Dureza Total	CaCO ₃	300
Hierro Total	Fe	0.3
Magnesio	Mg	36
Manganeso	Mn	0.1
Molibdeno	Mo	0.07
Sulfatos	SO ₄ ²⁻	250
Zinc	Zn	3
Fosfatos	PO ₄ ³⁻	0.5

Fuente: COLOMBIA. MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL, MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 2115. [En línea]. (22, junio, 2007). [Consultado 07 de noviembre 2019]. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Art. 21, p. 4. Disponible en internet: <https://n9.cl/st5j>

¹² VITORIA, Isidro; MARAVER, Francisco; SÁNCHEZ-VALVERDE, Félix; ARMIJO, Francisco. Contenido en nitratos de aguas de consumo público españolas. [en línea]. 2015, 29(3), p. 217-220. [Consultado 9 de junio de 2020]. ISSN 0213-9111. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0213911115000023>

¹³ ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS). FLUORIDES. Environmental Health Criteria 227. [En línea]. (2002). [Consultado 7 de abril 2020]. ISSN 0250-863X. Disponible en: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/42415/WHO_EHC_227.pdf;jsessionid=CEF8C822994C01537A6511CA4E1C9694?sequence=1

1.2.3 Aluminio residual. El aluminio residual presente en el agua (Al^{3+}) es proveniente de su uso durante el proceso de coagulación en el tratamiento de agua y su valor máximo aceptable será de 0.2mg/L. Al utilizarse otro tipo de coagulante como sales de hierro, el valor máximo aceptable para el residual de este compuesto será 0.3mg/L¹⁴.

1.2.4 Cloro residual. El valor aceptable del cloro residual libre en cualquier punto de la red de distribución del agua para consumo humano deberá estar comprendido entre 0.3 y 2.0mg/L¹⁵.

1.3 DESINFECCION

El proceso de desinfección representa una de las operaciones fundamentales durante el tratamiento para la obtención de agua potable. A través de este proceso se busca atacar los microorganismos patógenos que pueden estar presentes, por lo general, se lleva a cabo mediante compuestos químicos reactivos como el cloro. La desinfección funciona eficazmente sobre las bacterias, y es un proceso que debe aplicarse a todo tipo de agua que se esté tratando para posteriormente ser consumida por los seres humanos; sin importar el tipo de fuente. Estos agentes desinfectantes que se utilizan durante el proceso tienen una particular característica, al ser residuales actúan como una parcial protección de microorganismos y la reproducción de estos a lo largo del sistema de distribución.¹⁶

La eficiencia de la desinfección es la relación entre el desinfectante residual y el tiempo de contacto del cloro en el agua; esta eficiencia puede verse influenciada por factores biológicos, fisicoquímicos, por la dosis y la intensidad que se aplique durante el proceso, la naturaleza de los microorganismos, las condiciones del proceso, así como la temperatura y el pH.¹⁷

En la Tabla 5, se puede observar la comparación de tres de los desinfectantes más utilizados en el proceso el tratamiento de agua, y cuál es el porcentaje de inactivación de distintos tipos de microorganismos presentes en el agua teniendo en cuenta condiciones diferentes del proceso, aunque todos son altamente efectivos, claramente el cloro, es el que muestra los mejores resultados frente a una mayor cantidad de microorganismos.

¹⁴ *Ibíd.*, p, 5

¹⁵ *Ibíd.*, p, 5

¹⁶ ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS). Guías para la calidad del agua potable. [En línea]. (2006). [Consultado 7 de abril 2020]. Vol. 1: Recomendaciones. Tercera edición. ISBN 92 4154696 4 Disponible en: https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf?ua=1

¹⁷ SADIQ, Rehan; RODRIGUEZ, Manuel J. Disinfection by-products (DBPs) in drinking water and predictive models for their occurrence: a review. [en línea].2004, 321(1-3), p, 21-46. [Consultado 2 de abril 2020]. ISSN 0048-9697 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969703005138>

Tabla 5. Porcentaje de inactivación de varios organismos bajo diferentes condiciones de desinfección.

Desinfectantes	Concentración (mg/L)	Microorganismos (Grupo)	Tiempo de contacto (min)	pH	Temperatura (°C)	Porcentaje de inactivación	Referencia
Cloro	2	<i>V.chloerae</i> (B)	30	7	20	>99,99	Clark et al. (1994 a,b)
	0,5	<i>Coliform</i> (B)	2	7	5	>99,99	Berman et al. (1988)
	1,1	<i>E.Coli</i> (B)	2	7	5	>99,999	Rice et al. (1999 a)
	0,1	<i>C. jejuni</i> (B)	1	6	4	>99,99	Blaser et al. (1986)
	0,61	<i>A.butzleri</i> (B)	1	7,1	5	>99,999	Rice et al. (1999 b)
	0,6-2,5	<i>Polio virus</i> (V)	0,7-2,4		5	>99	Hoff (1986)
	0,5	<i>Rota virus</i> (V)	0,25	6	5	≈99,99	Berman and Hoff (1984)
	0,5	<i>Rota virus</i> (V)	1,5	10	5	≈99	
	2	<i>MS2 coliphage</i> (V)	1	7	5	≈99,99	Berman et al. (1992)
	1,5	<i>G. lamblia</i> (P)	10	6,7	25	≈99	Clark et al. (1989)
	1,5	<i>G. lamblia</i> (P)	10	6,6	15	≈99	
	2	<i>G. lamblia</i> (P)	60	6,7	5	>99	
	2	<i>E. intestinalis</i> (P)	8 - 16			≈99	Rice et al. (1999 c)
Monocloraminas	1	<i>A.butzleri</i> (B)	15	8	5	>99	Blaser et al. (1986)
	10	<i>Rota virus</i> (V)	>360	8,5	5	≈99	Berman and Hoff (1984)
	2	<i>MS2 coliphage</i> (V)	1	7	5	≈99	Berman et al. (1992)
	80	<i>C. parcum</i> (P)	90		5	≈90	Korich et al. (1990)
Dióxido de Cloro	0,5	<i>Rota virus</i> (V)	<1	6	5	>99	Berman and Hoff (1984)
	0,5	<i>Rota virus</i> (V)	<0,25	10	5	>99	

B: Bacteria V: Virus P: protozoo

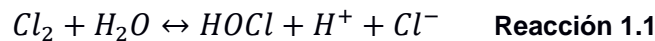
Fuente: SADIQ, Rehan; RODRIGUEZ, Manuel J. Disinfection by-products (DBPs) in drinking water and predictive models for their occurrence: a review. [en línea].2004, 321(1-3), p, 21-46. [Consultado 2 de abril 2020]. ISSN 0048-9697 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969703005138>

1.3.1 Cloración. Existen distintos métodos para aplicar la cloración como proceso de desinfección; dentro de los cuales se encuentra la dosis crítica; la cual consiste, en suministrar una dosis de cloro que oxide todo el nitrógeno amónico y deje una concentración residual que continúe desinfectando el sistema de distribución hasta

llegar al consumidor. Otro método conocido es la supercloración- descloración, que consiste en proporcionar una dosis bastante grande de cloro que logre una reacción química y desinfección de forma rápida, continuando con una reducción del exceso de cloro. La cloración marginal, se caracteriza por añadir una cantidad de cloro que sea suficiente para lograr la desinfección inicial y para dejar un pequeño porcentaje de cloro residual a través del sistema de distribución; para lograr esto, es muy común que se utilice gas licuado de cloro. Otra función secundaria del proceso de desinfección es la oxidación a través del agente desinfectante con algunos compuestos químicos disueltos en el agua.¹⁸

Reacciones químicas del cloro:

Según. LEÓN BARRIOS, Natalia cuando el cloro gaseoso entra en contacto con el agua, se producen dos reacciones: de hidrólisis (Reacción 2.1) y de oxidación-reducción (Reacción 2.2)



1.3.2 Otros procesos de desinfección. Además de la cloración existen otros procesos que utilizan para llevar a cabo la operación de desinfección en los tratamientos de agua, como las cloraminas (monocloramina, dicloramina y tricloramina o tricloruro de nitrógeno), las cuales se dan como producto a través de la reacción entre el cloro y el amoníaco en medio acuoso. A pesar de que la monocloramina comparte la propiedad de residualidad con el cloro, no es igual de eficaz al atacar los microorganismos. El dióxido de cloro, es otro compuesto que también se ha implementado como agente desinfectante, en el agua; a través de su mecanismo de reacción se descompone en clorito y clorato; por lo que no oxidaría el bromuro, y se dejarían de formar subproductos de desinfección de gran importancia y riesgo como el bromoformo o el bromato. Existen otros procesos menos convencionales que podrían utilizarse para inhibir estos organismos como la radiación UV y otro tipo de oxidantes que generen radicales de hidroxilo.¹⁹

1.3.3 Subproductos de desinfección (SPD). Todos los desinfectantes químicos que se utilizan en procesos convencionales para tratamiento de agua, producen SPD inorgánicos u orgánicos, o ambos, que pueden ser perjudiciales.

Durante la cloración los subproductos de desinfección que se forman en mayor proporción son los trihalometanos, los ácidos cloroacéticos, las cloroacetonas y los haloacetónitrilos, estos compuestos generados como el resultado de la reacción entre el cloro y los precursores orgánicos como las sustancias húmicas. A pesar de que las monocloraminas producen una cantidad menor de THMs, que el cloro, estas

¹⁸ *Ibíd.*, p, 147

¹⁹ ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS), *Op. cit.*, p, 148

generan otro tipo de SPD como el cloruro de cianógeno. Otro desinfectante que se ha utilizado es el ozono, sin embargo, este genera ácidos hipo halogenado, que reaccionan con precursores y forman trihalometanos bromados. Pueden formarse muchos otros SPD, como aldehídos y ácidos carboxílicos. Los principales subproductos derivados del uso de dióxido de cloro son el ion clorito, que es un producto inevitable de la descomposición, y el ión clorato.²⁰

La concentración de cloro residual disponible y de COT disponible, es determinante para la formación de trihalometanos; y su relación es directamente proporcional.²¹ Por lo general la contaminación del agua potable dentro del sistema de distribución puede ser generada a partir de varios fenómenos como los cambios abruptos de presiones o velocidades; también por aberturas que generen el intercambio de materia con un medio externo, generando una posible intrusión de materia orgánica al sistema.

Existen distintas estrategias que se han venido estudiando para la eliminación o disminución de SPD, en las redes de distribución de agua potable como cambiar las condiciones operativas del proceso donde se incluya la eliminación de los precursores de THMs, (ácidos fúlvicos y húmicos, productos de degradación de materia orgánica, ácido vinílico, ácido siríngico, pigmentos de las plantas, biomasa de algas, aminoácidos, primidinas, y desechos industriales). Otra alternativa en estudio es emplear otro tipo de desinfectantes o incluso métodos de desinfección no químicos. O finalmente eliminar los SPD antes de entrar en el proceso de distribución hacia el consumidor final.

Entre los DBPs, los THMs tienen especial relevancia debido a las altas concentraciones que se han encontrado en el agua clorada y a sus efectos adversos para la salud humana. Los THMs incluyen: cloroformo, bromodiclorometano, clorodibromometano, y bromoformo. La suma de estos cuatro compuestos es conocida como trihalometanos totales (TTHM, por su nombre en inglés total THMs).²²

1.3.3.1 Trihalometanos. Los THMs poseen una relevante propiedad química, debido a la alta volatilidad, estos compuestos son fácilmente expuestos y a través

²⁰ *Ibíd.*, p, 153

²¹ ABDULLAH, Md. Pauzi; YEW, C.H; RAMLI, Mohamad Salleh. Formation, modeling and validation of trihalomethanes (THM) in Malaysian drinking water: a case study in the districts of Tampin, Negeri Sembilan and Sabak Bernam. Citado por: PRIETO GAMBOA, David. R. Determinación matemática de la intrusión de materia orgánica en la red matriz del acueducto de Bogotá. Bogotá, Colombia. Universidad de los Andes. 2005

²² LEÓN BARRIOS, Natalia. Op. cit, p, 9

de la inhalación o absorción dérmica se pueden poner en contacto con actividades como la ducha, el baño o las piscinas.²³

Durante el proceso de desinfección es necesario determinar el rango de pH óptimo para llevarlo a cabo, ya que al haber un incremento de pH se propagaría la formación de THM, y al reducirse el pH se aumentaría la formación de HAA.²⁴

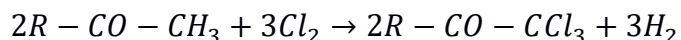
Mediante un mecanismo complejo, se da la formación de los THMs, durante el proceso de desinfección del agua con el cloro libre, donde los compuestos químicos que el halógeno forma con el agua, reaccionan con los precursores orgánicos que habitualmente se encuentran en ese medio.²⁵

Según OLMEDO SÁNCHEZ, María Teresa. Subproductos de la desinfección del agua por el empleo de compuestos de cloro. Efectos sobre la salud los mecanismos de formación de THMs²⁶son:



Reacción 1.3

Este proceso de formación de trihalometanos se puede representar mediante la siguiente reacción:



Reacción 1.4

Y una hidrólisis posterior:



Reacción 1.5

Tanto la concentración de cloro residual como de bromo, influye directamente en la formación y concentración de cloroformo y ácido hipobromoso, respectivamente. La

²³ VILLANUEVA, Cristina M; MANOLIS, Kogevinas; GRIMALT, Joan O. Cloración del agua potable y efectos sobre la salud: revisión de estudios epidemiológicos. [en línea].2001, 117(1), p, 27-35. [Consultado 12 de mayo 2020]. ISSN 0025-7753 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025775301720003>

²⁴ CHOWDHURY, Shakhawat; CHAMPAGNE, Pascale; MCLELLAN, P. James. Models for predicting disinfection byproduct (DBP) formation in drinking waters: A chronological review. [en línea]. 2009, 407 (14), p, 4189-206. [Consultado 12 de mayo 2020]. Disponible en: [https://www.semanticscholar.org/paper/Models-for-predicting-disinfection-byproduct-\(DBP\)-Chowdhury-Champagne/fc5701ec928b4ef0a93044229ec33a25d652a6cb](https://www.semanticscholar.org/paper/Models-for-predicting-disinfection-byproduct-(DBP)-Chowdhury-Champagne/fc5701ec928b4ef0a93044229ec33a25d652a6cb)

²⁵ OLMEDO SÁNCHEZ, María Teresa. Subproductos de la desinfección del agua por el empleo de compuestos de cloro. Efectos sobre la salud. [en línea]. 2008, p, 335-342. [Consultado 2 de abril 2020]. Disponible en: https://saludpublica.ugr.es/sites/departamentos_files/departamentos_saludpublica/public/inline-files/bc51018bc59c356_Hig.Sanid_.Ambient.8.335-342%282008%29.pdf

²⁶ *Ibid.*, p, 335

concentración de materia orgánica también aumenta la probabilidad para que estos compuestos se formen. Y requieren que haya un tiempo mínimo de contacto con el cloro.²⁷

1.3.3.2 Ácidos acéticos halogenados (HAA). Dentro de este grupo se consideran, 9 compuestos con diferente contenido de cloro y bromo: ácidos cloroacético, dicloroacético, tricloroacético, bromoacético, dibromoacético, tribromoacético, bromocloroacético, dibromocloroacético y bromodicloroacético. Son los segundos subproductos de la cloración más abundantes después de los THM. Los HAA que contienen 2 cloros y/o bromos son los más abundantes.²⁸

1.3.3.3 Subproductos minoritarios. Existen tres subproductos fenólicos que se obtienen tras la reacción con el cloro: 2-clorofenol, 2,4-diclorofenol y 2,4,6-triclorofenol. Estos compuestos presentes en el agua pueden alterar las propiedades organolépticas. Este efecto es directamente proporcional al contenido de cloro; es decir a medida, que se concentre el cloro, los sabores y olores aumentaran hasta un punto; luego tienden a desaparecer siempre y cuando exista suficiente cantidad de cloro y el tiempo de contacto con estos precursores fenólicos sea el adecuado para que se finalice la reacción.²⁹

Existe un subproducto de desinfección: 3-cloro-4- diclorometil-5-hidroxi-2(5H)-furanona; también conocido como MX (mutágeno X). Ha sido uno de los subproductos de la cloración que tiene más investigaciones, a pesar de que se ha encontrado en bajas concentraciones presentes en muestras de aguas residuales y potables; tiene una alta actividad mutágena. Otros subproductos de la cloración que se han encontrado en baja concentración son: Acetonitrilos halogenados, hidrato de cloral, haloacetonas, cloropicrina, cloruro y bromuro de cianógeno.³⁰

1.4 BIOPELICULAS

Distintos factores presentes en el medio del sistema de distribución como; la concentración de micro y macro elementos, la caracterización de la materia orgánica, las condiciones hidráulicas, las propiedades del material de la tubería, la concentración y el tipo de desinfectante y el tipo de microorganismos presentes; permiten la formación de pequeños ecosistemas que contienen microorganismos como: bacterias, protozoarios, hongos y algas,³¹ que se adhieren a las paredes de

²⁷ OLMEDO SÁNCHEZ, María Teresa. Op. cit., p, 336-337.

²⁸ VILLANUEVA, Cristina M; MANOLIS, Kogevinas; GRIMALT, Joan O. Op. cit., p, 27

²⁹ OLMEDO SÁNCHEZ, María Teresa. Op. cit., p, 337

³⁰ *Ibíd.*, p, 27-28.

³¹ Butterfield PW, Camper AK, Ellis BD, Jones WL. Chlorination of model drinking water biofilm: implications for growth and organic carbon removal. Citado por: LEMUS PÉREZ, Mildred. F. Reacción del cloro con sustancias exopoliméricas provenientes de biopelículas de agua potable: Subproductos de desinfección, características y toxicidad. Bogotá D.C., Colombia. Universidad de los Andes, 2017.

la tubería, generando consecuencias adversas tanto físicas, mecánicas, químicas y biológicas.

1.4.1 Sustancias poliméricas extracelulares (EPS). La formación de sustancias extracelulares promotoras al encontrar las propiedades adecuadas y requeridas para la adhesión a la superficie de las tuberías como velocidades de flujo bajas; empiezan a extenderse y a desarrollar grandes cantidades de sustancias extracelulares poliméricas (EPS) que son indispensables para el desarrollo del ecosistema y para afrontar las condiciones de ambientes estresantes.³²

Las sustancias extracelulares incorporadas constituidas por polisacáridos y proteínas son exopolímeros que cumplen funciones de gran importancia para la formación y constitución de las biopelículas.³³

Tabla 6. Propiedades de los EPS y su relevancia en la formación y funcionalidad de las biopelículas.

Función	Relevancia
Adhesión a superficies	Primeras biopelículas y micro colonias Prerrequisito para su desarrollo posterior
Agregados celulares formación de biopelículas	Inmovilización celular Aumento de la densidad celular
Estructura de las biopelículas	Estabilidad mecánica Desarrollo de micro consorcios Gradientes de concentración Retención de enzimas extracelulares Interacción polisacárido-enzima Prevención de pérdida de componentes celulares en la lisis Transporte convectivo Transferencia de genes Matriz de intercambio de moléculas de señales intercelulares
Barrera protectora	Tolerancia a desinfectantes, fagocitosis, exoenzimas por complexación y especies predadoras
Sorción	Acumulación de nutrientes y retención de agua.

Fuente: LEMUS PÉREZ, Mildred. F. Reacción del cloro con sustancias exopoliméricas provenientes de biopelículas de agua potable: Subproductos de desinfección, características y toxicidad. Bogotá D.C., Colombia. Universidad de los Andes, 2017.

1.4.2 Tipo de desinfectante en el control de biopelículas. La eliminación de microorganismos depende directamente de la efectividad del desinfectante y la concentración del mismo; sin embargo, estos parámetros se encuentran

³² LEMUS PÉREZ, Mildred. F. Reacción del cloro con sustancias exopoliméricas provenientes de biopelículas de agua potable: Subproductos de desinfección, características y toxicidad. Bogotá D.C., Colombia. Universidad de los Andes, 2017.

³³ Allison DG. 2000. Community structure and co-operation in biofilms: Cambridge Univ Pr. Citado por: LEMUS PÉREZ, Mildred. F. Reacción del cloro con sustancias exopoliméricas provenientes de biopelículas de agua potable: Subproductos de desinfección, características y toxicidad. Bogotá D.C., Colombia. Universidad de los Andes, 2017.

estandarizados de acuerdo al proceso de operación empleado para el tratamiento. Algunos desinfectantes facilitan la formación de sustancias orgánicas que constituyen el alimento para los microorganismos, generando la formación de biopelículas.³⁴

El contenido de cloro residual que se encuentra a lo largo de los sistemas de distribución interactúa con estos residuos de biomasa que componen las biopelículas, lo que disminuye la efectividad del desinfectante, al tiempo que su concentración. Para controlar la formación y propagación de biopelículas, resultan ciertos desinfectantes más apropiados como las monocloraminas; que poseen componentes menos reactivos; por lo que no se ve afectada la concentración residual a través del sistema de distribución. Estas monocloraminas penetran la estructura de las biopelículas atacando los microorganismos presentes en esta; dependiendo directamente de la naturaleza de estos microorganismos. Otro desinfectante como el ozono reacciona fácilmente con la materia orgánica, dando lugar a nutrientes que propagan el crecimiento y la formación de nuevas biopelículas. Algunas alternativas de desinfección que se utilizan para optimizar la desinfección y aprovechar las propiedades de los agentes desinfectantes; consisten en implementar el cloro como desinfectante primario y las monocloraminas de forma alterna y secundaria; generando un mayor control sobre las biopelículas.³⁵

Tabla 7. Acción del desinfectante en las biopelículas.

Caracterización de la muestra	Concentración desinfectante residual	Reducción de las biopelículas	Fuente
1.5mg/L, DOC	0.4mg/L cloro; 1.0mg/l monocloramina (CA)	1 - 4 log CFU/cm ² ; 1 log CFU/cm ²	EPA,1999
1.0mg/L, COT	0.1mg/L cloro	4 - 5 log bacterias totales/cm ²	Butterfield <i>et al.</i> 2002 ^a
3.1mg/L, COT	1.9 ± 0.2mg/L cloro	1 - 5 log bacterias totales/cm ²	Lehtola <i>et al.</i> 2005
No mencionado	0.33 - 0.53mg/L cloro	1 - 2 log bacterias totales y CFU/cm ²	Codony <i>et al.</i> 2005
1.46mg/L DOC	0.1mg/L cloro	1 log bacterias totales y CFU/cm ²	Fass <i>et al.</i> 2003
18 - 52µg/L AOC	0.18mg/L cloro-cloramina	0.5 - 5 log CFU/cm ²	Långmark <i>et al.</i> 2007
No mencionado	0.3mg/L cloro; 0.2mg/L dióxido de cloro; 0.1mg/L ozono	>6 log CFU/cm ² - (>4 log;>3 log;>6log) bacterias totales/cm ²	Lenz <i>et al.</i> 2010
3 - 10mg/L COT	0.3 - 0.6mg/L cloro 1.4 - 2.2mg/L CA	3 - 5 log CFU/cm ²	Norton <i>et al.</i> 2004

Fuente: LEMUS PÉREZ, Mildred. F. Reacción del cloro con sustancias exopoliméricas provenientes de biopelículas de agua potable: Subproductos de desinfección, características y toxicidad. Bogotá D.C., Colombia. Universidad de los Andes, 2017.

³⁴ GÓMEZ PÁEZ, M. P. Mecanismos de control en la formación de biopelículas en sistemas de distribución de agua potable. Bogotá, Colombia. Universidad de los Andes, 2008.

³⁵ *Ibíd.*, p, 55-57.

2. IMPACTO DEL COT EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

Para que los microorganismos crezcan necesitan estrictamente de una fuente de carbono y ciertos requerimientos del medio, que son dependientes de las condiciones del sistema; estas pueden ser aerobias o anaerobias. A pesar de que en la planta de tratamiento se emplean operaciones específicas para remover la mayor cantidad de materia orgánica, una parte de esta biomasa queda presente en el agua tratada proporcionando la fuente de carbono que requiere la formación de biopelículas a través del sistema de distribución.³⁶ La reglamentación controla la concentración de carbono orgánico total en el agua y esta influirá en las distintas operaciones donde se busca remover dicho compuesto, como también en la formación de las biopelículas. Ya que existe una compleja interacción entre el desinfectante con las biopelículas y directamente con la materia orgánica; como los productos y subproductos obtenidos de estas reacciones presentes en el sistema.³⁷

2.1 MECANISMO DE FORMACIÓN DE BIOPELICULAS

El contenido de materia orgánica presente en el medio de los sistemas de distribución prepara la superficie donde comienza la adhesión de microorganismos por absorción, en el interior de la capa que limita la tubería. Estos microorganismos precursores desechan sustancias conocidas como poliméricas extracelulares que atraen nuevos microorganismos para que se adhieran a esta superficie. En consecuencia, se desarrollan los microorganismos considerados como “colonizadores secundarios”, quienes se encuentran a cargo de metabolizar sus desechos, como aquellos producidos por los microorganismos pioneros.³⁸

Para que naturalmente se desarrolle la madurez de las biopelículas se requiere entre algunas horas y semanas, dependiendo de las variables que influyen en el sistema, como la concentración y el tipo de desinfectante, el contenido de materia orgánica, las condiciones básicas de operación, la temperatura e incluso la velocidad de flujo del agua. En general el procedimiento puede describirse de la siguiente forma³⁹:

I. Se inicia con la primera formación de capa a través de la transferencia de masa entre las macromoléculas y la superficie donde esta se acondiciona para la absorción de la materia orgánica.

³⁶ LEMUS PÉREZ, Mildred. F. Op. cit, p, 11

³⁷ *Ibíd.*, p, 12

³⁸ GÓMEZ PÁEZ, M. P. Op. cit, p, 10

³⁹ *Ibíd.*, p,11

II. Posteriormente los microorganismos se movilizan desde el medio por el cual fluyen y estos se van adhiriendo de forma parcial a la superficie.

III. Los microorganismos que se han adherido comienzan a desarrollarse y a depender del sustrato contenido en el agua, incrementando la cantidad de microorganismos que componen las biopelículas.

IV. A través de la biopelícula se da la transferencia de nutrientes y una continua interacción con la superficie.

V. La matriz de las biopelículas se compone con la formación de nuevos microorganismos y los polímeros extracelulares desechados por los demás organismos, incrementando esta capa que permite capturar más células y nutrientes.

VI. Finalmente las biopelículas alcanza un punto crítico, donde experimenta desprendimiento parcial o total de su masa a causa de distintos efectos mecánicos por las demás partículas que chocan en contra.

En la Tabla 8, se realizó la comparación de distintos estudios donde se busca relacionar la concentración de carbono orgánico expresado como carbono orgánico asimilable o carbono orgánico total con la formación de biopelículas, teniendo en cuenta distintas variables como el sistema de referencia en el cual se realizó el estudio, la velocidad de flujo y la presencia de desinfectante. Concluyendo que al haber interacción de COT y Cl₂, esta interacción incide directamente en la formación de biopelículas.

Tabla 8. Relación entre concentración de carbono orgánico y la formación de biopelícula.

Sistema de evaluación	Velocidad de flujo (m/s)	Carbono adicionado	Cl ₂ (mg/L)	Relación directa	Referencia
Sistema piloto Tubería de PVC	0.10	10 y 50μ eq C/L (ácido oxálico) como AOC	0	SI	Chu & Lu 2004
Reactor anular	0.35	0.5 m/L C acetato como COT	0.70-1.4	SI	Chandy & Angles 2001
Sistema piloto Tubería de PVC	2.9	1.3 ± 1 mg/L acetato de sodio COT	0.5	SI	Park & Hu, 2010
Sistema piloto Tubería de PVC	0.007	98, 103, 228 ug/eq C/L ácidos húmicos como AOC	0	NO	Norton <i>et al.</i> 2004
Reactor anular	0.6	0.05, 0.5 y 1 mg/L como AOC	0	NO para todos los casos	Tsai <i>et al.</i> 2004

Fuente: LEMUS PÉREZ, Mildred. F. Reacción del cloro con sustancias exopoliméricas provenientes de biopelículas de agua potable: Subproductos de desinfección, características y toxicidad. Bogotá D.C., Colombia. Universidad de los Andes, 2017.

2.2 EFECTO DE LAS BIOPELICULAS EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

2.2.1 Efecto en la salud humana. El contenido de microorganismo (patogénicos y toxicogénicos) en el agua, provenientes de biopelículas, representa un gran riesgo para la salud humana y generando distintos tipos de patologías que incluyen desde dificultades a nivel gastrointestinal, hasta infecciones como la Hepatitis A o la Giardiasis.⁴⁰

En la Tabla 9 y 10, se encuentran distintos tipos de microorganismos que se han encontrado en sistemas de distribución de agua potable y la relación de estos microorganismos a diferentes patologías o enfermedades desarrolladas en los seres humanos. En la Tabla 10, específicamente también se encuentra caracterizado el material de la tubería a la cual se encontraba adherida la biopelícula en estudio.

Existen ciertas condiciones mínimas con las que deben cumplir todas las redes de distribución de agua potable para que puedan llevar a cabo su operación; por lo general son empleados materiales como PVC, hierro, cobre y concreto.⁴¹ Se han establecido algunas relaciones aproximadas entre la capacidad que tienen los materiales de sorción y la formación de biopelículas, teniendo en cuenta distintas propiedades morfológicas y de composición. Donde puede concluirse que algunos materiales que poseen una cantidad mayor de sitios activos, generan una alta afinidad por la materia orgánica; por lo que retienen un gran contenido de materia orgánica y como consecuencia, se generan productos de corrosión que facilitan el crecimiento de microorganismos.⁴²

⁴⁰ *Ibíd.*, p, 12

⁴¹ LEMUS PÉREZ, Mildred. F. Op. cit, p, 32

⁴² *Ibíd.*, p, 35

Tabla 9. Hongos patógenos encontrados en biopelículas.

Microorganismos	Enfermedad/síntoma	Presencia en biopelículas
<i>Aspergillus fumigatus</i>	Alergias, enfermedad pulmonar	Rosenzweig <i>et al.</i> 1983, 1986
<i>Aspergillus flavus</i>	Alergias, enfermedad pulmonar	Doggett, 2000, Rosenzweig <i>et al.</i> 1986
<i>Aspergillus niger</i>	Infección de oído	Rosenzweig <i>et al.</i> 1983, 1986
<i>Cryptococcus neoformans</i>	Meningitis, infección de lengua	Doggett, 2000, Rosenzweig <i>et al.</i> 1986
<i>Candida albicans</i>	Infecciones de tipo vaginal, urinario y del esófago	Rosenzweig & pipes, 1988, 1989; Doggett, 2000; Nagy & Olson, 1986
<i>Mucor</i>	Trombosis, infarto, infección nasal y paranasal	Roesch y Leong, 1983
<i>Petriellidium boydii</i>	Infecciones extracutaneas y en el sistema nervioso central	Roesch y Leong, 1983
<i>Sporothrix schenkii</i>	Infecciones en la piel	Doggett, 2000
<i>Stachybotrys chartarum</i>	Infecciones pulmonares en infantes	Doggett, 2000
<i>Trichophyton</i>	Infecciones en el cuero cabelludo	Frankova y Horecka, 1995

Fuente: DOGGETT, M. Steven. Characterization of fungal biofilms within a municipal water distribution system. Citado por: GELVES GUZMAN, Mario Fernando. Deterioro de la calidad del agua por el posible desprendimiento de las biopelículas en las redes de distribución de agua potable estado del arte. Bogotá, Colombia. Universidad de los Andes, 2005.

Tabla 10. Microorganismos encontrados en biopelículas de agua potable.

Sitio de muestreo	Material	Microorganismo	Fuentes
Sistema de distribución Escocia	Hierro dúctil	Helicobacter pylori	Park et al. 2001
Sistema de distribución Madison (USA)	Hierro galvanizado (piloto)	Sphingomonas	Srinivasan et al. 2008
Sur de Finlandia	Reactor (PVC)	Nitrosomonas	Lipponen et al. 2004
Hamburg, Berlín, Mainz y Estocolmo	Polietileno	Aquabacterium commune	Kalmbach et al 2000
Finlandia (Red de distribución)	Hierro dúctil, polietileno	Penicillium, Phialophora, Cladosporium, Acremonium	Zacheus et al. 2001
Alemania	Acero inoxidable (reactor)	Dechloromona, Azospirillum doebereineriae y Pseudomonas diminuta	Emtiazi et al. 2004
Estocolmo (Suecia), red de distribución	Hierro dúctil y cemento	Pseudomonadaceae spp., Moraxella spp., Hyphomicrobium spp., Ochrobacterium spp., Aeromonas spp., Amoeba, microfragelado, A. hidrofila, B. cerus, Paraconiothyrium	Långmark et al. 2007
Sistema de distribución Colombia	Cemento, PVC, hierro	Penicillium, Paecilomyces, Debaryomyces, Rhodotorula y cryptococcus, Duganella, Herminiimonas, Janthinobacterium, Afipia, Yersinia Pseudomonas	Hurtado, 2011 Rueda, 2011 Viancha 2011
Alemania	Válvulas	C. freundii, E.cloacae	Kilb et al. 2003

Fuente: LEMUS PÉREZ, Mildred. F. Reacción del cloro con sustancias exopoliméricas provenientes de biopelículas de agua potable: Subproductos de desinfección, características y toxicidad. Bogotá D.C., Colombia. Universidad de los Andes, 2017.

2.2.2 Biocorrosión. No obstante, la presencia de estos agentes microbiológicos a través de las biopelículas genera problemas también como corrosión localizada, ensuciamiento en las tuberías y accesorios que comprenden todo el sistema de abastecimiento y biodegradación de las superficies. La interacción de la biopelícula con la superficie promueve la corrosión microbiana. Y se ve afectada la rugosidad de la tubería.

Por lo general la corrosión microbiana se genera a través de bacterias que atacan principalmente piezas con contenido de Hierro, Manganeseo o sulfatos en presencia de agua; al interior o exterior de las tuberías. Debido a la extensa clasificación de estos microorganismos es muy probable que resistan ambientes estresantes y hostiles. A pesar de que las bacterias no son las directas responsables de la corrosión, éstas aceleran el mecanismo de reacción y favorecen la formación de

depósitos capaces de taponar las tuberías y demás accesorios que componen el sistema de distribución.⁴³

Dentro de los factores que influyen la corrosión bacteriana, se pueden encontrar:⁴⁴

- **ESTADO EN QUE SE ENCUENTRA EL MATERIAL:** las imperfecciones que pueden presentar las superficies de los distintos materiales con ayuda del deterioro, son variables que contribuyen a la corrosión generada por distintos microorganismos.

- **COMPOSICIÓN DEL MEDIO:**
 - ✓ **Contenido químico del agua:** la presencia de iones de Nitrógeno, Fósforo, Azufre, Hierro, Manganeso y Calcio contribuyen a la síntesis de la energía requerida para su metabolismo. El contenido de dióxido de carbono y oxígeno promueve la formación de carbonatos y óxidos, sobre todo en las superficies con mayor cantidad de deterioro. La mayoría de fuentes de agua natural se caracterizan por tener abundante contenido de materia orgánica y sales minerales que incrementa el crecimiento metabólico de los microorganismos.

 - ✓ **Temperatura:** cada tipo de microorganismo se desarrolla óptimamente en ambientes con rangos de temperatura 25°C y 30°C; sin embargo, existen también otros microorganismos que se pueden adaptar a condiciones de temperaturas más extremas.

 - ✓ **pH:** este parámetro es determinante para inhibir o promover el desarrollo bacteriano, incluso la progresividad de la misma corrosión; ya que existen microorganismos capaces de cambiar el pH del medio al tener contacto con otro tipo de compuestos, haciendo que el medio sea altamente corrosivo para algunos metales.

- **TIPO DE MICROORGANISMOS:**
 - ✓ **Hongos:** a causa de su actividad enzimática, estos organismos se caracterizan por ocasionar efectos adversos, que se manifiestan mediante el deterioro biológico, expulsando al medio un contenido alto de ácido orgánico.

 - ✓ **Algas:** estos organismos, por lo general se forman en presencia de luz, suministrando la materia orgánica que facilite el desarrollo de otros

⁴³ CAMPOS ORTEGA, Humberto R.; CAMPOS ORTEGA, Claudio H. CORROSIÓN BACTERIANA EN METALES. [en línea]. 2004, 22(1), p, 29-34. [Consultado 8 de marzo 2020]. Disponible en: http://www.idesia.cl/Vols/Numeros/IDESIA_24/CAP._3_CORROSION_BACTERIANA_EN_METALES_Autores_Humberto_R._Campos_Ortega_Claudio_H._Campos_Ortega.pdf

⁴⁴ *Ibíd.*, p, 30-31

microorganismos como bacterias anaerobias, a través de la transformación de sustancias corrosivas formando sedimentos que promuevan su desarrollo.

- ✓ **Sulfobacterias:** estos microorganismos presentan una característica muy particular metabolizando el azufre derivado de compuestos azufrados y lo almacenan o pasan al medio. Generando una acción corrosiva alterando el pH del medio.

La corrosión inicia cuando se presenta un diferencial de potencial en los lugares donde hay imperfecciones o defectos en el material, promoviendo el paso de corriente mediante el electrólito ubicado entre estos lugares. Primero se genera una leve corrosión al disolverse el hierro en sales ferrosas que posteriormente se oxidaran por efecto del oxígeno contenido en el agua. Cuando se llega al estado de polarización el mecanismo de corrosión se suspende, y se puede observar una pequeña capa que no tiene ninguna afectación en el metal, se puede considerar como una etapa de equilibrio que se acaba cuando el oxígeno movilice al hidrógeno, despolarizando el sistema y dándole un nuevo inicio al proceso corrosivo. Es allí, cuando los distintos tipos de bacterias intervienen sintetizando las sales ferrosas en férricas y promoviendo la formación rápida de la corrosión.⁴⁵

2.3 EFECTO DE LOS SUBPRODUCTOS DE DESINFECCIÓN PRESENTES EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

La aplicación de agentes desinfectantes en el proceso de tratamiento del agua reduce el riesgo microbiano, pero incrementa el riesgo químico debido a la formación de SPD; que se forman cuando el desinfectante reacciona con materia orgánica natural (NOM) e inorgánica, sustancias presentes en el agua.

En la Tabla 11 se enumeran las principales clases de subproductos de desinfección formados a partir de varios desinfectantes, las concentraciones de SPD pueden variar en órdenes de magnitud durante el tipo de desinfección. La mayoría de subproductos de desinfección se generan sobre todo cuando se utiliza el cloro para llevar a cabo la desinfección, ya que es el más susceptible a reaccionar con los precursores.

La formación de trihalometanos y la influencia que tienen estos consecuentemente sobre la salud humana ha despertado el interés de incluir en los procesos desinfectantes alternativos, nuevos tratamientos y tecnologías, que precisamente reduzcan la formación de SPD. Dentro de los desinfectantes alternativos se encuentra el ozono, que a pesar de que permite la formación de menos subproductos de desinfección; incurre en los más importantes y de mayor generación. Tanto las cloraminas como el dióxido de cloro, son los que forman menos SPD; siendo las cloraminas, las que mayor influencia tienen frente a los

⁴⁵ *Ibíd.*, p, 32

THM, HAA y HAN; contrario a lo que sucede con el ClO₂, al que puede atribuirse una mayor generación de subproductos de desinfección inorgánica.

Tabla 11. Subproductos de desinfección formados a partir de diferentes tipos de desinfectantes.

Tipo de SPD	Ejemplo	Cloro	Ozono	Cl ₂	Cloraminas
Trihalometanos (THM)	Cloroformo	✓	✓		✓
Otros haloalcanos		✓			
Haloalcanos		✓			
Ácidos haloacéticos (HAA)	Ácido cloroacético	✓			✓
Ácidos haloaromáticos		✓			
Otros ácidos halocarboxílicos		✓			✓
Ácidos halodicarboxílicos		✓			✓
Ácidos halotricarboxílicos		✓			✓
MX y análogos		✓		✓	
Otros halofuranonas		✓			✓
Halocetonas		✓	✓	✓	
Haloacetoniitrilo (HAN)	Cloroacetoniitrilo	✓	✓		
Otros haloanitrilos	Cloruro de cianógeno	✓			✓
Halo aldehidos	Hidrato de Cloro	✓			✓
Haloalcoholes		✓			✓
Fenoles	2-Clorofenol	✓	✓		
Halonitrometano	Cloropicrina	✓			
Compuestos inorgánicos	Bromato, hipocromito				
	Clorito y Clorato		✓	✓	
Aldehidos alifático	Formaldehido	✓	✓	✓	
Otros aldehidos		✓	✓	✓	
Cetonas (alifáticas y aromáticas)	Acetona	✓	✓	✓	
Ácidos carboxílicos	Ácido acético	✓	✓	✓	
Ácidos aromáticos	Ácido benzoico	✓	✓	✓	
Hidroxiácidos		✓	✓		
Otros		✓	✓	✓	✓

Fuente: SADIQ, Rehan. Rodríguez, Manuel J. Disinfection by products (DBPs) in drinking water and predictive models for their occurrence: review. 2004. 321(1-3). p, 21-46. En línea: <https://www.sciencedirect.com/article/abs/pii/S0048969703005138>

El contacto con estos contaminantes a través del agua, da lugar a efectos adversos para la salud. Dicho contacto puede darse por ingestión, absorción dérmica o

ingestión. En general las patologías más comunes y enfermedades crónicas que se pueden identificar son:⁴⁶

- 1) Afectación en las funciones reproductoras (disminución de la fertilidad, riesgo de aborto espontáneo, etc.).
- 2) Afectación en el desarrollo fetal dentro del útero (bajo peso al nacer, crecimiento intrauterino retardado, etc.).
- 3) Precursor de cáncer, sobre todo en el de vejiga urinaria.

Tabla 12. Información toxicológica para los DBP.

Tipo de SPD	Compuesto	Clasificación	Efectos perjudiciales
Trihalometanos (THM)	Cloroformo	B2	Cáncer; afecciones en el hígado, en los riñones y en el sistema reproductor
	Dibromoclorometano	C	En el sistema nervioso, en el hígado, en los riñones y en el sistema reproductor.
	Bromodichlorometano	B2	Cáncer; afecciones en el hígado, en los riñones y en el sistema reproductor
	Bromoformo	B2	Cáncer, sistema nervioso y efectos en el hígado y en los riñones
Haloacetónitrilo (HAN)	Tricloroacetónitrilo	C	Cáncer y efectos mutagénicos
Aldehídos halogenados y cetonas	Formaldehído	B1	Mutagénico
Halógeno	2-clorofenol	D	Cáncer, promotor de tumores
Ácidos haloacéticos (HAA)	Ácido dicloroacético	B2	Cáncer, efectos reproductores y de desarrollo; afecciones en el hígado, los riñones y el bazo.
	Ácido tricloroacético	C	Cáncer.
Compuestos inorgánicos	Bromato	B2	Cáncer.
	Clorito	D	Efectos en el sistema reproductor y en el desarrollo
A: Carcinógena	B1: Probable carcinógena (con alguna evidencia epidemiológica)	B2: Probable carcinógena (suficiente evidencia de laboratorio)	C: Posible carcinógena D: No clasificable

Fuente: SADIQ, Rehan. Rodríguez, Manuel J. Disinfection by products (DBPs) in drinking water and predictive models for their occurrence: review. 2004. 321(1-3). p, 21-46. En línea: <https://www.sciencedirect.com/article/abs/pii/S0048969703005138>

⁴⁶ OLMEDO SÁNCHEZ, María Teresa. Op. cit., p, 339

2.3.1 Trihalometanos. Desarrollo de varias investigaciones han demostrado que los trihalometanos son precursores de tumores en algunos animales de laboratorio, a excepción del cloroformo, que se caracteriza sobre todo por su actividad mutagénica.⁴⁷

A pesar de que cada trihalometano se desarrolle de una forma diferente por lo general todos actúan genotóxicamente; es decir, que afectan directamente el ADN, durante su replicación generando mutaciones. Estos compuestos suelen ser absorbidos en el tracto gastrointestinal, en algunos tejidos que presenten un nivel elevado de grasa corporal, en el hígado y los riñones.⁴⁸

Otros estudios han buscado evaluar la exposición de los trihalometanos en medios como las piscinas; y después de un contacto en el agua durante 40 minutos, se determinó que las concentraciones de trihalometanos se elevaron hasta siete veces; estos resultados se obtuvieron luego de análisis en la sangre; los principales THM que se encontraron fueron; TBM, DBCM y DCBM.⁴⁹

2.3.2 Ácidos acéticos halogenados. Los ácidos dicloroacético, tricloroacético, y los ácidos acéticos bromados son generadores de tumores en algunos animales de laboratorio. A través de algunos estudios logro establecerse que algunos ácidos como dicloroacético, y dibromoacético generan riesgo en el sistema reproductor causando graves afecciones. Como ocurre en el caso de los trihalometanos, los ácidos acéticos halogenados se metabolizan de formas diferentes al interior del organismo y algunos tejidos absorben de forma más rápida ciertos compuestos a diferencia de otros.⁵⁰

2.3.3 Subproductos minoritarios. Por lo general estos compuestos tienen característicamente actividad mutagénica y cancerígena en los estudios que se han realizado con animales de laboratorios; algunos de estos generan un daño drástico en el sistema reproductor y se absorben con rapidez, un gran contenido de estos compuestos es absorbido por el tracto gastrointestinal y se excreta en un gran porcentaje por la orina.⁵¹

⁴⁷ *Ibíd.*, p, 339

⁴⁸ *Ibíd.*, p, 339

⁴⁹ LEMUS PÉREZ, Mildred. F. Op. cit., p, 88

⁵⁰ OLMEDO SÁNCHEZ, María Teresa. Op. cit., p, 339

⁵¹ *Ibíd.*, p, 340

3. MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DE COT

Para determinar la cantidad de carbono ligado orgánicamente, las moléculas orgánicas se rompen y se convierten a una forma molecular única que puede medirse cuantitativamente. Los métodos para la determinación de COT utilizan alta temperatura, catalizadores, oxígeno, temperaturas más bajas ($\leq 100^{\circ}\text{C}$) con irradiación ultravioleta, oxidantes químicos, o combinaciones de estos oxidantes, para convertir el carbono orgánico en dióxido de carbono (CO_2). El CO_2 se puede purgar de la muestra, se seca, y se transfiere con un gas portador a un analizador de infrarrojos no dispersivo o un titulador coulométrico. Alternativamente, puede ser separado de la fase líquida de la muestra por una membrana selectiva para CO_2 en agua de gran pureza, en el que el aumento de la conductividad se relaciona con el CO_2 que pasa por la membrana.⁵²

3.1 SENSORES EN LÍNEA PARA COAGULACIÓN Y FILTRACIÓN

El procesamiento y análisis de muestras en un analizador típico para determinación de COT se realiza de la siguiente manera, Primero, se agrega ácido a la muestra para reducir el pH y convertir todo el carbono inorgánico en CO_2 , se burbujea un gas no reactivo como nitrógeno, a través de la muestra para purgar todo el CO_2 de la muestra creando un subproducto involuntario, se purgan los compuestos orgánicos volátiles de la matriz de muestra. La muestra se amortigua y la fracción de carbono orgánico restante, se oxida a CO_2 . El CO_2 producido se mide, con un detector infrarrojo no dispersivo (NDIR), y se expresa como una concentración de carbono en mg/L.⁵³

Los analizadores de COT en línea no están diseñados para manejar aguas con alta turbidez; en aguas crudas de alta turbidez. La pre filtración puede eliminar una porción del carbón orgánico en partículas, así como también sedimentos y sedimentos inorgánicos.⁵⁴

Las muestras de COT destinadas a cuantificar los porcentajes de eliminación de COT mediante procesos de coagulación y clarificación se toman primero en agua cruda y luego aguas abajo de la clarificación o filtración. Las mediciones tomadas aguas abajo de la aclaración proporcionarán más rápido los cambios en el

⁵² EDWARD W.D. HUFFMAN (CHAIR), KARL O. BRINKMANN, RICK C. DAGE, PATRICIA SNYDER FAIR, LOUIS A. KAPLAN, P. LAWRENCE MESCHI, JAMES W. O'DELL, MISHA PLAM. Standard Methods Committee. Joint Task Group: 20th Edition. 2000. [Citado 13-Noviembre-2019] Disponible en internet: <https://www.standardmethods.org/doi/10.2105/SMWW.2882.104>

⁵³ Operational Control of Coagulation and Filtration Processes - Manual of Water Supply Practices, M37 (3rd Edition), American Water Works Association (AWWA), 2011, p, 91. <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt008C2JY9/operational-control-coagulation/particle-counters-theory-operation>.

⁵⁴ *Ibíd.* p, 91

rendimiento de la coagulación. Además, las mediciones de COT posteriores a la clarificación pueden ser más altas que las mediciones tomadas aguas abajo de la filtración, ya que incluirán el COT que se ha coagulado y está contenido en las partículas de floculo.⁵⁵

Para la medición de COT se requiere de un aparato instrumental que consta principalmente de dos partes: la primera debe garantizar la mineralización del contenido orgánico en la muestra, mientras que la segunda (el detector) tiene que medir el CO₂ producido⁵⁶.

Los métodos analíticos más utilizados para la oxidación de la materia orgánica y la determinación de COT son:

3.2 COMBUSTIÓN A ALTA TEMPERATURA (SM 5310 B)

En este método utilizan la combustión a temperaturas superiores a 680°C, a menudo en presencia de un catalizador, para convertir compuestos orgánicos en CO. Este proceso es muy eficiente y permitirá la detección de algunos compuestos difíciles de oxidar que no pueden ser detectados por el método de persulfato UV. Sin embargo, el límite de detección para estos instrumentos es de aproximadamente 1 mg/L, lo que limita su utilidad para aguas con bajo contenido orgánico en aplicaciones de tratamiento de agua potable.

Los analizadores de combustión a alta temperatura convierten el carbono inorgánico (carbonatos) en CO₂ disuelto al reducir el pH con ácido. La muestra se purga o se rocía con gas libre de CO₂ para eliminar el CO₂. El carbono orgánico que queda en la muestra se mueve a través del canal líquido del analizador hasta la cámara de combustión, donde se oxida al exponerse a temperaturas de 680 a 1200°C. El CO₂ resultante se transporta a través del circuito de gas del analizador al detector infrarrojo no dispersivo (NDIR). El detector NDIR mide la concentración de CO₂, que es proporcional al COT en la muestra⁵⁷

Algunos factores que pueden interferir con el método pueden ser:

- Si se elimina el carbonato y bicarbonato por la acidificación y purga con gas purificado, da como resultado la pérdida de sustancias orgánicas volátiles.
- Si las partículas de carbono son muy grandes no pueden ingresar a la aguja utilizada para la inyección.

⁵⁵ *Ibíd.*, p, 92.

⁵⁶ G. Visco, L. Campanella, V. Nobili. Organic carbons and TOC in Waters: an overview of the international norm for its measurements. Rome, Italy. EIServier. p, 5.

⁵⁷ Automation of Water Resource Recovery Facilities - WEF Manual of Practice No. 21 (4th Edition) - 9.12.5.1 Total Organic Carbon. 2013. p, 26-33.
<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt010XITG5/automation-water-resource/total-organic-carbon>

- La filtración resulta ser necesaria para eliminar MON particulada cuando se va determinar COD, puede resultar en la pérdida o ganancia de COD, dependiendo de las propiedades físicas de los compuestos que contiene el carbono y de la adsorción o desorción de carbonatos en el material del filtro.
- Se debe tener en cuenta que cualquier contacto con orgánicos puede contaminar una muestra.
- Evitar la cristalería, contenedores de plástico y tubos de goma contaminados.
- Los gases que se desprenden de la combustión, como el agua, los compuestos de haluro y los óxidos de nitrógeno, pueden interferir con el sistema de detección
- La principal limitación de las técnicas de alta temperatura es la magnitud y variabilidad del blanco. Los fabricantes de instrumentos han desarrollado nuevos catalizadores y procedimientos que producen menos blancos, lo que resulta en niveles de detección más bajos.
- Concentración mínima detectable: 1mgC/L o menos, aunque el rendimiento del instrumento varía.
- Conserve las muestras que no puedan examinarse inmediatamente manteniéndolas a 4°C con una exposición mínima a la luz y la atmósfera.
- La acidificación con ácido fosfórico o sulfúrico a un pH 2 en el momento de la recolección es especialmente deseable para muestras inestables y puede usarse en todas las muestras: la conservación ácida, sin embargo, invalida cualquier determinación de carbono inorgánico en las muestras⁵⁸.

Equipos e instrumentos: el analizador de carbono orgánico total, que utilice técnicas de combustión cuenta con accesorios de muestreo, de inyección, y la preparación de muestras, según el fabricante del instrumento. Homogeneizador, Agitador magnético y barras de agitación recubiertas-TFE, aparatos de filtrado y donde sus filtros tengan poros de 0.45µm de diámetro. Preferiblemente usar filtros de jeringa HPLC sin blanco de COT detectable. También se pueden usar filtros de fibra de vidrio o membrana de plata. Se recomienda enjuagar los filtros antes de usar y monitorear los blancos del filtro⁵⁹.

Reactivos:

Agua reactiva: preparar reactivos, blancos y soluciones estándar del agua reactivo con un valor de COT inferior a 2 MDL.

Ácido: ácido fosfórico (H₃PO₄). Alternativamente, use ácido sulfúrico (H₂SO₄).

Solución reserva de carbono orgánico: Disolver 2.1254g Hidrogenoftalato de potasio de grado estándar primario (C₈H₅KO₄), en agua libre de carbono y diluir a 1000mL; por cada 1mg de carbón se diluye 1mL.

⁵⁸ EDWARD W.D. et.al. Op. cit., p, 3

⁵⁹ Ibíd., p, 3.

Preparar estándares de control de laboratorio utilizando cualquier otro compuesto apropiado que contenga carbono orgánico de adecuada pureza, estabilidad y solubilidad en agua.

Preservar: acidificando con H_3PO_4 o H_2SO_4 a $\text{pH} \leq 2$, y almacenar a 4°C .

Solución reserva de carbono inorgánico: disuelva 4.4122g carbonato de sodio anhidro (Na_2CO_3) en agua, agregue 3.497g bicarbonato de sodio anhidro (NaHCO_3), y diluir a 1000mL; por cada 1mg de carbón se diluye 1mL. Alternativamente, use cualquier otro compuesto de carbonato inorgánico de pureza, estabilidad y solubilidad en agua adecuado. Mantener bien tapado. No acidificar.

Gas portador: oxígeno purificado o aire, libre de CO_2 y que contiene menos de 1ppm de hidrocarburo (como metano). Gas de purga: Cualquier gas libre de CO_2 e hidrocarburos⁶⁰.

Procedimiento:

Tratamiento de muestra:

- Homogenizar la muestra si contiene sólidos gruesos o materia insoluble.
- Analizar un blanco compuesto por agua de reactivo transportada a través del tratamiento de homogeneización.
- Si se debe eliminar el carbono inorgánico antes del análisis, transfiera una porción representativa (10 a 15mL) a un vaso precipitado de 30mL, agregue ácido y reduzca el pH a 2 o menos y purgue con gas durante 10 min. El carbono Inorgánico también puede eliminarse agitando la muestra acidificada en un vaso de precipitados mientras dirige una corriente de gas purificado en el vaso de precipitados debido a que el carbono orgánico volátil se perderá durante la purga de la solución acidificada, Se debe reportar el carbono orgánico como orgánico total no purificable.
- Verificar la eficiencia de la eliminación de carbono inorgánico para cada matriz de muestra dividiendo una muestra en dos porciones y agregando a una porción un nivel de carbono inorgánico similar al de la muestra. Los valores de COT deben estar iguales; si no lo hacen, ajustar la muestra recipiente, volumen de muestra, pH, flujo de gas de purga y tiempo de purga para obtener la eliminación completa de carbono inorgánico.
- Si el instrumento disponible proporciona una determinación por separado de carbono inorgánico (carbonato, bicarbonato, CO_2 libre) y carbono total, se omite la descarbonización y se determina el COT por diferencia entre CT y CI. Si se va a determinar el COD, se filtra la muestra a través de un filtro con poros de $0.45\mu\text{m}$ de diámetro; y analizar un blanco filtrado⁶¹.

⁶⁰ Ibid. p, 3-4.

⁶¹ Ibid. p, 4.

Inyección de muestra:

- Inicialmente se retira una porción de muestra preparada usando una jeringa equipada con una aguja de punta roma. Se selecciona el volumen de muestra según la dirección del fabricante.
- Agitar muestras que contengan partículas con un agitador magnético.
- Seleccionar el tamaño de la aguja de acuerdo con el tamaño de partículas de muestra. Existen otras técnicas de inyección de muestra, usando bucles de muestra. Posteriormente se inyectan las muestras y estándares en el analizador de acuerdo con las instrucciones del fabricante y se registra la respuesta. Repetir la inyección hasta obtener mediciones consecutivas que son reproducibles dentro del $\pm 10\%$ ⁶².

Preparación de curva estándar:

- Preparar las soluciones estándar de carbono orgánico e inorgánico para cubrir el rango esperado en muestras dentro del rango lineal del instrumento.
- Diluir muestras más altas que el rango lineal de instrumento en agua de reactivo.
- Inyectar y registrar la altura o el área del pico estándar y una dilución del blanco en agua.
- Trazar la concentración de carbono en miligramos por litro contra la altura pico corregida o en papel de coordenadas rectangulares. Esto es innecesario para instrumentos de lectura digital de concentración.
- Con la mayoría de los analizadores de COT, no es posible determinar por separado los blancos para agua de reactivo, reactivos y todo el sistema. Adicionalmente, algunos analizadores de COT producen un blanco variable y errático que no se puede corregir de manera confiable. En muchos laboratorios, el agua de reactivo es el principal contribuyente al valor del blanco. Se minimizan los errores mediante el uso de agua de reactivo y reactivos bajos en carbono. Inyectar muestras y procesar blancos (que consiste en agua de reactivo tomada a través de cualquier paso de pre análisis; los valores suelen ser más alto que los del agua de reactivo) y determinar las concentraciones de carbono orgánico de la muestra directamente de la lectura o al comparar mediciones, la respuesta corregida del instrumento corresponde a la curva de calibración.
- Los instrumentos con detectores coulométricos no requieren curvas de calibración. Se recomienda analizar regularmente el control de las muestras en el laboratorio para confirmar el rendimiento del instrumento⁶³.

Cálculos: calcular la respuesta corregida del instrumento, de los estándares y las muestras restando Los resultados del instrumento en el blanco (reactivo-agua) de la del estándar y la muestra.

⁶² Ibid. p, 4.

⁶³ Ibid. p, 4.

Se prepara una curva estándar de “Resultados corregidos del instrumento” vs. “concentración de COT”.

Sustraer procedimentalmente la respuesta del blanco en cada muestra del instrumento y comparar con la curva estándar para determinar el contenido de carbono.

Aplicar factor de dilución apropiado cuando sea necesario. Restar el carbono inorgánico del carbono total cuando el COT está determinado por la diferencia⁶⁴.

La dificultad de tomar muestras de partículas en muestras sin filtrar limita la precisión del método a aproximadamente 5 a 10%. Estudios entre laboratorios de métodos de combustión a alta temperatura, se han realizado en el rango superior a 2mg/L.

Según. EDWARD W.D. et.al. Standard Methods Committee. Joint Task Group: 20th Edition. 2000. La ecuación resultante para la precisión de un solo operador en el agua de matriz es:

$$S_0 = 0.027x + 0.29 \quad (\text{Ecuación 1})$$

La precisión general es:

$$S_t = 0.044x + 1,49 \quad (\text{Ecuación 2}).$$

$S_0 =$ precisión de un solo operador

$S_t =$ Precisión general

$x =$ concentración COT ($\frac{mg}{L}$)

3.3 OXIDACIÓN DE PERSULFATO UV A BAJA TEMPERATURA

Este método de oxidación UV de persulfato utiliza una temperatura baja ($\leq 80^\circ\text{C}$). Donde se elimina primero el carbono inorgánico total (CIT). La muestra acidificada se mezcla con persulfato de sodio y se transporta a través de un reactor UV, donde se oxida a CO_2 . La muestra de CO_2 del gas elimina el rastro de humedad restante y el CO_2 se puede medir con un detector NDIR o de conductividad⁶⁵. El microprocesador del instrumento calcula el área de los picos producidos por el analizador, los compara con el área del pico del estándar de calibración almacenado

⁶⁴ Ibid., p, 4.

⁶⁵ Automation of Water Resource Recovery Facilities. Op. cit., p, 28

en su memoria e imprime un valor de carbono orgánico calculado en miligramos por litro⁶⁶. Generalmente, se puede lograr un límite de detección de aproximadamente 0.1mg/L con estos instrumentos.⁶⁷

Otros instrumentos de persulfato UV utilizan la inyección de flujo continuo. La eliminación de carbono inorgánico mediante desgasificación al vacío se proporciona opcionalmente. La muestra se acidifica y se agrega persulfato. El flujo de la muestra se divide; un canal pasa a una bobina de retardo mientras que el otro pasa a través del reactor UV. El CO₂ de cada corriente se separa de la corriente de muestra mediante membranas selectivamente permeables al CO₂ que permiten que el CO₂ pase al agua de alta pureza donde se mide el cambio de conductividad. El CO₂ de la corriente no irradiada con UV representa carbono inorgánico. El CO₂ de la corriente irradiada representa CT. El instrumento convierte automáticamente las señales del detector en unidades de concentración (mg/L o g/L). El COT se calcula como la diferencia entre el CT y los canales de carbono inorgánico⁶⁸.

Algunos factores que pueden interferir con el método pueden ser:

- Una acidificación insuficiente resultará en una liberación incompleta de CO₂.
- Las partículas orgánicas grandes o moléculas orgánicas muy grandes o complejas, como taninos, ligninas y ácido húmico, pueden oxidarse lentamente porque la oxidación del persulfato tiene una velocidad limitada; sin embargo, la oxidación de muchas moléculas biológicas grandes, como proteínas y anticuerpos monoclonales, se produce con rapidez.
- La contaminación durante la manipulación y el tratamiento de la muestra. Tenga mucho cuidado al tomar muestras, manipular y analizar muestras por debajo de 1mg de COT/L.
- Utilice el método de combustión a alta temperatura para altas concentraciones de COT o diluya la muestra.⁶⁹

EQUIPOS E INSTRUMENTOS: un analizador de carbono orgánico total que utiliza el principio de oxidación de persulfato requiere accesorios de muestreo e inyección, según el fabricante del instrumento.⁷⁰

REACTIVOS: los fabricantes de instrumentos recomiendan diferentes formas y concentraciones de peroxidisulfato como las siguientes:

Peroxidisulfato de sodio al 10%: disolver 100g de reactivo en agua y llevar a volumen de 1L.

⁶⁶ EDWARD W.D. et.al. Op. cit., p, 5

⁶⁷ Operational Control of Coagulation and Filtration Processes. Op. Cit., p, 92

⁶⁸ EDWARD W.D. et.al. Op. cit., p, 5

⁶⁹ Ibid., p, 5

⁷⁰ Ibid., p, 6

Peroxidisulfato de amonio al 15%: disolver 150g de reactivo en agua y llevar a volumen de 1L.

Peroxidisulfato de potasio al 2%: disolver 20g de reactivo en agua y llevar a volumen de 1L.

compruebe los valores en blanco de los reactivos, si estos valores son altos debe purificar el reactivo o utilizar una fuente con mayor pureza.

Se utilizan los mismos los reactivos mencionados anteriormente en el método de combustión a alta temperatura.⁷¹

PROCEDIMIENTO:

Tratamiento de muestra:

- Homogenizar la muestra si contiene sólidos gruesos o materia insoluble hasta extraer la muestra a través la aguja de la jeringa el tubo del inyector automático o el sistema de entrada de muestras del monitor continuo en línea.
- Si se debe determina el COD, filtre la muestra y un blanco reactivo a través de un filtro de 0.45µm. Los filtros de jeringa HPLC dejan pasar el agua son contaminarla, también se pueden utilizar filtros de membrana de plata o vidrio.
- Determinar el carbono orgánico no purgable transfiriendo de 15 a 30mL de muestra a un tubo de ensayo y acidificar a un pH de 2, Purgar según especificaciones del fabricante.
- Para verificar la eficiencia de la eliminación de carbono inorgánico e inyección de la muestra realice el mismo procedimiento del método de combustión a altas temperaturas.⁷²

Preparación de curva estándar:

- Preparar las soluciones estándar de carbono orgánico en el rango de concentraciones de las muestras.
- Realice estándares y blancos y registre en el analizador.
- Determine la respuesta del analizador para cada estándar y blanco.
- Si se presenta alturas de pico consistentes pues ser por el dióxido de carbono que queda atrapado y desorbido, las determinaciones basadas en la lectura de la altura del pico pueden ser inadecuadas debido a las diferentes velocidades de oxidación de los estándares y las muestras.
- Corregir la respuesta del instrumento restando el blanco de agua del reactivo.
- Graficar la concentración de CO vs la respuesta corregida por el instrumento en miligramos por litro. Nota: Esto no es necesario para los instrumentos que dan el resultado digital de concentración.

⁷¹ Ibíd., p, 6

⁷² Ibíd., p, 6

- Tenga en cuenta analizar los patrones con concentraciones superiores e inferiores a las determinaciones de las muestras, para confirmar el correcto funcionamiento del instrumento⁷³.

CALCULOS: se realizan como el método de combustión a alta temperatura con la excepción de la precisión y sesgo se realizan de la siguiente manera:

Para el persulfato y/o UV con métodos de detección NDIR en el rango de 0.1mg/L a 4000mg/L de carbono. La ecuación resultante para el carbono orgánico, la precisión de un solo operador es:⁷⁴

$$S_0 = 00.4X + 1 \text{ (Ecuación 3)}$$

La precisión general se expresa como:

$$S_t = 00.8X + 0.1 \text{ (Ecuación 4)}$$

Dónde:

$S_0 =$ *precisión de un solo operador*

$S_t =$ *Precisión general*

$x =$ *concentracion COT* ($\frac{mg}{L}$)

para el método de conductividad de membrana, cubriendo muestras con concentraciones de carbono orgánico de 1 a 25 mg/L. La ecuación resultante para la precisión de un solo operador es:⁷⁵

$$S_0 = 0.012X - 0.022 \text{ (Ecuación 5)}$$

La precisión general se expresa como:

$$S_t = 0.027X + 0.09 \text{ (Ecuación 6)}$$

⁷³ *Ibíd.*, p, 6

⁷⁴ *Ibíd.*, p, 6

⁷⁵ *Ibíd.*, p, 7

3.4 ANALIZADORES DE ABSORBENCIA ULTRAVIOLETA

La medición de la absorbancia ultravioleta es una alternativa útil para la determinación de COT y poder cuantificar las concentraciones de MON en el tratamiento del agua potable. Ya que la mayoría de los compuestos orgánicos que se encuentran en el agua natural absorben la radiación UV, debido a sus dobles enlaces carbono + carbono y estructuras anulares que absorben fuertemente la luz a 254 nm. Por lo que esta medida es útil en la cantidad de materia orgánica presente en el agua para el control del proceso de coagulación.

La relación exacta entre la absorbancia de UV y la concentración de carbono orgánico total es única para cada fuente de agua cruda. Sin embargo, para una fuente de agua cruda dada, los aumentos de esta indican concentraciones altas de MON y aumento de coagulante.⁷⁶

Las mediciones de la absorbancia UV no tienen en cuenta toda la materia orgánica presente, ya que la materia orgánica sin anillos o enlaces dobles no se medirá, y el procedimiento analítico requiere la filtración de la muestra, por lo que los resultados están relacionados con la concentración de COD en lugar de la concentración de COT. Sin embargo, la fracción absorbente UV representa la fracción de MON que se elimina más fácilmente por coagulación. Los analizadores de absorbancia UV generalmente son menos costosos y requieren menos mantenimiento que otros analizadores de COT. En estos se debe tener en cuenta que debido a los dobles enlaces de carbono + carbono y las estructuras de anillo en la absorbancia UV los oxidantes como el cloro, el ozono, entre otros, pueden romper estos enlaces y estructuras del anillo.⁷⁷

dependerá de la naturaleza de la MON y la concentración del oxidante.

Teoría de operación: la medición de la absorbancia UV se realiza por medio de un espectrofotómetro de haz simple o doble, donde la intensidad de luz que pasa tiene una longitud de onda de 254 nm y esta pasa a través de una celda que muestra la ruta de la longitud de onda conocida. De un lado más alejado de la celda un fotodetector mide la cantidad de luz atenuado por la muestra⁷⁸.

Según. Operational Control of Coagulation and Filtration Processes. Op. Cit. La absorbancia UV y transmitancia UV (UVT) se pueden determinar mediante la ecuación de la ley de Beer:

$$A = -\log_{10}(T) \text{ (Ecuación 7)}$$

⁷⁶ Operational Control of Coagulation and Filtration Processes. Op. Cit., p, 93

⁷⁷ *Ibíd.*, p, 94

⁷⁸ *Ibíd.*, p, 94

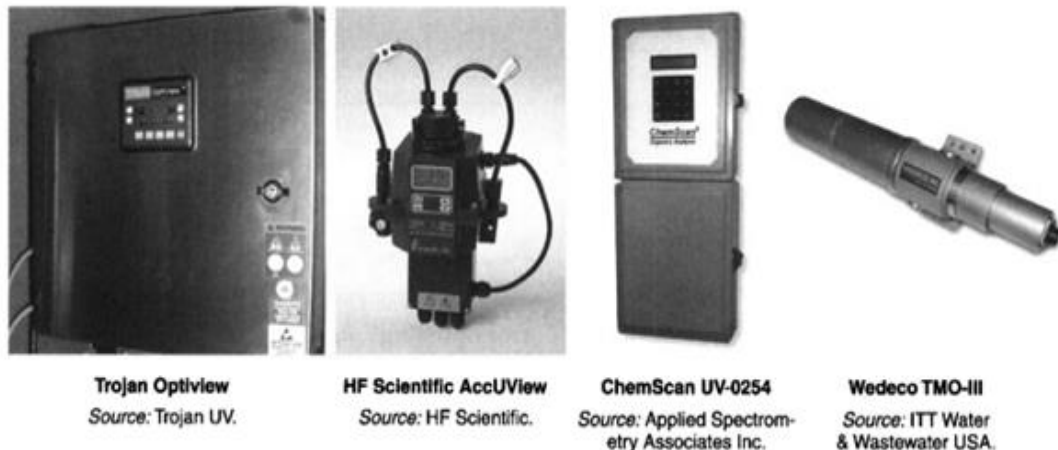
Dónde:

$A = \text{absorbancia en cm}^{-1}$

$T = \text{Trasmitancia expresada como un decimal}$

Muchos analizadores modernos utilizan una configuración de doble haz donde se utilizan ópticas para dividir la fuente de luz, una se dirige a través de la muestra y el otro haz se utiliza como referencia. La cantidad de luz absorbida depende de la longitud del camino por medio de la celda, las células más grandes tendrán una longitud más larga y absorberán más luz. Para productos con bajo contenido orgánico se necesitarán intervalos con mayor longitud⁷⁹.

Figura 1. Ejemplos de analizadores de absorbancia UV de haz único.



Fuente: Operational Control of Coagulation and Filtration Processes - Manual of Water Supply Practices, M37 (3rd Edition), American Water Works Association (AWWA), 2011, p, 94. <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt008C2JY9/operational-control-coagulation/particle-counters-theory-operation>.

Para escanear las múltiples longitudes de onda en el espectro de luz visible UV de hasta 256 longitudes de onda se utilizan los analizadores avanzados de absorbancia UV que utilizan tecnología de diodos, estos están permitiendo la medición de otros parámetros para proporcionar una caracterización más detallada de MON, así como para medir nitrato de nitrato, fosfatos, cloro libre y total, algunos metales, turbidez y subproductos de desinfección⁸⁰.

Los analizadores UV son económicos, robustos y fáciles de operar. A diferencia de los analizadores de COT, los analizadores UV no dependen de reactivos químicos. Debido a que estos instrumentos utilizan métodos ópticos, los resultados son

⁷⁹ *Ibíd.*, p, 94

⁸⁰ *Ibíd.*, p, 95

instantáneos y el flujo del instrumento puede reintroducirse en el flujo principal o desecharse. Es necesaria una pre filtración agua arriba de los analizadores UV si las partículas suspendidas pueden dispersar la luz e interferir con las mediciones de absorbancia⁸¹.

3.5 MÉTODO DE CORRELACIÓN UV₂₅₄

Este método proporciona determinación de carbono orgánico total (COT), de carbono orgánico disuelto (COD), y la absorción de UV a 254nm (UVA) en las aguas de origen y aguas potables.

Las determinaciones COD y UVA se utilizan en el cálculo de la absorbancia UV específica (SUVA). Para COT y análisis COD, la muestra se acidifica y el carbono inorgánico (CI) se retira antes del análisis para el contenido de carbono orgánico (CO) usando un sistema de instrumentos COT; Las mediciones de COT y COD se basan en calibración con patrones de biftalato ácido de potasio (KHP). Este método no es para uso en el análisis de descargas de aguas residuales industriales tratadas o no tratadas como las muestras de aguas residuales puedan dañar o contaminar el sistema de instrumentos.

El límite de detección de carbono orgánico (LDCO) de tres días se basa en el cálculo del límite de detección (DL). Es una determinación estadística de precisión, y puede estar por debajo del nivel de cuantificación. La determinación de OCDL depende de la precisión del sistema de instrumentos analíticos, la pureza del agua de reactivos de laboratorio (LRW), y la habilidad del analista.

Tanto en las determinaciones de COT como de COD, el carbono orgánico en la muestra de agua se oxida para producir dióxido de carbono (CO₂), que luego se mide mediante un sistema de detección.

Existen dos enfoques diferentes para la oxidación del carbono orgánico en el agua. Muestras de dióxido de carbono gaseoso: (a) combustión en un gas oxidante y (b) UV promovió o catalizó por calor la oxidación química con una solución de persulfato. El dióxido de carbono, que se libera de la muestra oxidada, es detectado por un detector de conductividad o por un detector infrarrojo no dispersivo (NDIR)⁸².

Los sólidos sedimentables y la materia flotante pueden causar el taponamiento de válvulas, tubos y aguja de inyección y / o puerto de inyección. El procedimiento COT permite la eliminación de sólidos sedimentables y materia flotante.

⁸¹ *Ibíd.*, p, 95

⁸² EPA Document #: EPA/600/R-05/055. Determination of total organic carbon and specific UV absorbance at 254 nm in source water and drinking water. B. B. Potter, USEPA, Office of Research and Development, National Exposure Research Laboratory J. C. Wimsatt, The National Council on The Aging, Senior Environmental Employment Program. [En línea]. February, 2005. [Citado 16-noviembre-2019].

La materia suspendida se considera parte de la muestra. La muestra de agua resultante se considera una aproximación cercana de la muestra original de agua entera para la medición de COT. El procedimiento UVA requiere que la muestra pase a través de un filtro de 0.45µm y se transfiera a una celda de cuarzo, luego se coloca en un espectrofotómetro para medir absorbancia UV a 254nm y se informa en cm-1.

Según. Determination of total organic carbon and specific UV absorbance at 254 nm in source water and drinking water. B. B. Potter. El cálculo de SUVA requiere la medición COD y UVA. El SUVA es calculado dividiendo la absorbancia UV de la muestra (en cm-1) por el COD de la muestra (en mg/L) y luego multiplicar por 100cm/M. SUVA se informa en unidades de L/mg-M.

$$SUVA \left(\frac{L}{mgM} \right) = \frac{UVA (cm^{-1})}{DOC \left(\frac{mg}{L} \right)} * 100 \frac{cm}{M} \text{ (Ecuación 8)}$$

$$UVA = \frac{A}{d} \text{ (Ecuación 9)}$$

Dónde:

UVA = La absorbancia UV calculada de la muestra en (cm⁻¹).

A = La absorbancia UV de la muestra que se filtra a través de un filtro 0,45 µm

d = La longitud de la celda de cuarzo en cm

Los métodos analíticos más utilizados para detectar dióxido de carbono (CO₂) son:

DETECTOR DE INFRARROJOS: la absorción infrarroja (IR) es una técnica espectroscópica ampliamente utilizada para determinación de COT en aguas, cuenta con una longitud de onda IR que oscila cercano a (800–2500nm) o en el IR medio de (2500–15.384nm) comercialmente.

El detector más utilizado en los analizadores de COT, es el analizador IR no dispersivo (NDIR), que funciona en el IR medio donde estas longitudes de onda altas minimizan los gases que interfieren y absorben IR (CO, NO, SO₂ y NH₃).

En los detectores IR de rayos dobles se llenan diferentes gases de referencia en una celda de referencia sellada o fluyen a través de una abertura célula. Para evitar dicha interferencia de los gases, se ubica una membrana selectiva permeable al gas entre la degradación y las cámaras del detector. Para eliminar la mayor cantidad de

agua posible antes de introducir la corriente de gas en el analizador de IR, generalmente se usan condensadores enfriados por aire.

El dióxido de carbono producido por la degradación de la muestra fluye a través de la celda de muestra y absorbe la luz IR.⁸³

DETECTORES DE CONDUCTIVIDAD: estos detectores son simples y bastantes sensibles, son utilizados como acople para el método de oxidación ultravioleta. En el análisis en línea de aguas de alta pureza donde el contenido de las especies iónicas interferentes es muy bajo.

La conductividad en el agua es una medida de flujo de electrones facilitado por iones a través de él; depende en gran medida del pH y la temperatura que influyen en todo el equilibrio de la solución.

En algunos gases como el CO₂, se disuelve fácilmente en el agua e interactúan para formar iones, lo que previsiblemente afecta la conductividad y el pH.

La conductividad debe medirse con un instrumento de precisión calibrado que tenga una resolución mínima de 0.1mS cm⁻¹ en el rango más bajo, para la que está por debajo de ese rango, puede funcionar mejor con una celda de "flujo a través". También es conveniente utilizar, como solución de referencia agua de alta pureza con un nivel de COT no superior a 0.25 mgL⁻¹.⁸⁴

DETECTOR DE ELECTRODOS DE CO₂: el uso de suspensiones de TiO₂ en el tratamiento foto catalítico de la muestra de agua se puede acoplar a una determinación de COT por un electrodo de CO₂. La muestra se acidifica para purgar la forma disponible de carbono inorgánico (bicarbonato y carbonato) que podría interferir generando CO₂, y eventualmente medido como CIT. La acidificación debe realizarse durante el flujo de la muestra y en ausencia de irradiación. La muestra, que fluye hacia la celda bajo agitación (para mantener el TiO₂ en suspensión), se irradia con luz ultravioleta para oxidarse de carbono orgánico a CO₂. esta medida se realiza en la celda que contiene un electrodo de membrana de gas como detector, la cual se basa en la medición del pH, por un electrodo interno de vidrio, de la solución interna; El dióxido de carbono, que pasa de la muestra a la solución interna a través de la membrana selectiva, debido a su naturaleza ácida, produce un cambio de pH que puede estar relacionado con el CO₂ concentración⁸⁵.

La reproducibilidad de las mediciones por electrodo de CO₂ es igual al ±2%. La interferencia potencial de los electrodos puede surgir de la presencia en la matriz de ácidos débiles volátiles (HCOOH, CH₃COOH, SO₂ y NO₂). Los cambios de temperatura afectan el electrodo de CO₂; pueden producir vapor de agua que puede

⁸³ G. Visco, L. Campanella, V. Nobili. Op. cit., p, 5.

⁸⁴ *Ibíd.*, p, 5

⁸⁵ *Ibíd.*, p, 5-6

pasar a través de la membrana y cambiar la concentración de la solución interna; también cambian la solubilidad del CO₂ y cambian el equilibrio de las reacciones ácido-base involucradas.

DETECTOR DE IONIZACIÓN DE LLAMA (FID): fue uno de los primeros detectores utilizados para medir COT y, como tal, se utilizó para medir niveles bastante altos de COT. En este analizador la muestra acuosa se descompone en CO₂ mediante el uso de ácidos y un catalizador calentado, luego la cámara previa FID reduce la muestra de CO₂ a metano (CH₄).⁸⁶

3.6 EL ANÁLISIS COULOMÉTRICO

Es una técnica en la cual la cantidad de una sustancia se determina cuantitativamente midiendo la cantidad total de electricidad necesaria para agotar una solución de la sustancia. Es útil para la determinación de CT, CIT y COT en muestras en las que el nivel de carbono medible excede los 10mgL⁻¹.⁸⁷

Los análisis de muestras de CT y COT se realizan pesando con precisión una porción de la muestra, aproximadamente 10 a 20mg en un pequeño bote de platino. El bote se coloca en una cuchara de cuarzo y se introduce en el tubo de combustión de cuarzo. La cuchara se encuentra en una zona fría del tubo de combustión mientras se realiza la purga del sistema. El gas portador en este sistema es 99.99% de oxígeno puro. La muestra se introduce en la parte calentada del tubo de combustión, que se calienta a 950°C. Aquí la atmósfera rica en oxígeno reacciona con el carbono de la muestra para formar CO₂. El tubo de combustión contiene cromato de bario para asegurar la conversión completa de CO a CO₂ y plata metálica, que elimina los haluros interferentes. El gas se pasa a través de una trampa de agua y un depurador de perclorato de magnesio para eliminar el vapor de agua restante. El gas portador fluye a la celda del detector donde el CO₂ se adsorbe y se analiza coulométricamente.⁸⁸

EL MÉTODO COLORIMÉTRICO: se utiliza un espectrofotómetro que mide la absorbancia de la muestra de agua después del proceso de oxidación. Se añade un ácido a la muestra para eliminar el carbono inorgánico, luego se añade persulfato en presencia de radiación UV para oxidar la materia orgánica. El CO₂ producido pasa a través de una membrana semipermeable y luego se disuelve en una solución amortiguada de fenolftaleína; El cambio de color de este indicador ácido-base,

⁸⁶ *Ibíd.*, p, 6

⁸⁷ *Ibíd.*, p, 6

⁸⁸ *Ibíd.*, p, 6

medido por el espectrofotómetro, puede estar relacionado con la variación de pH causada por la creciente concentración de dióxido de carbono.⁸⁹

⁸⁹ G. Visco, L. Campanella, V. Nobili. Organic carbons and TOC in Waters: an overview of the international norm for its, measurements. Rome, Italy. EIServier. p, 4

4. MÉTODOS ESTUDIADOS PARA LA REDUCCIÓN DE COT

4.1 CASO 1: MEMBRANAS DE BAJA PRESIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA

En los últimos años, se ha empezado a incorporar el concepto de sistema de membrana integrado (SMI) que consiste en el acoplamiento de las membranas con los otros tipos de procesos convencionales para el tratamiento de agua, sobre todo en el norte de América.⁹⁰

Existen distintos tipos de SMI utilizados para el tratamiento de agua superficial y subterránea; estos se clasifican dependiendo de la ubicación de la membrana de baja presión en el proceso de tratamiento general⁹¹:

1. Pre tratamiento por membranas: La filtración por membrana se utiliza como paso de tratamiento preliminar para la eliminación de partículas y materia microbiana que se produce de forma natural, seguido de la eliminación de contaminantes disueltos mediante otros procesos.

2. Proceso de tratamiento medio por membranas: La filtración por membranas ocurre como un paso de tratamiento intermedio para la eliminación de material particulado y microbiano de origen natural, así como contaminantes disueltos que se han convertido en particulados o adsorbidos por particulados añadidos durante el tratamiento.

3. Tratamiento final por membranas: La filtración por membrana se realiza como paso final del tratamiento, sin incluir la desinfección, para remover todo el material particulado como contaminante disuelto proveniente del tratamiento y la materia microbiana acumulada hasta este punto.

En la Tabla 13 se describen los sistemas de membrana integrados utilizados en cada una de las distintas etapas de tratamiento relacionándolos con los contaminantes para los cuales están diseñados eliminar o reducir.

⁹⁰ AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. Microfiltration and Ultrafiltration Membranes for Drinking Water. Manual of Water Supply Practices M53. Second Edition. USA. American Water Works Association. 2016. p, 133

⁹¹ Ibid., p, 133

Tabla 13. Sistemas de Membrana Integrados y contaminantes a reducir como objetivo.

Sistemas con integración de membranas	Contaminantes a reducir
<i>Pretratamiento</i>	
Filtración por membrana-ozono-filtración biológica	Compuestos que alteran olor y sabor, materia orgánica natural (MON)
Filtración por membrana-carbón activado granular	Compuestos que alteran olor y sabor, (MON)
Filtración por membrana-nano filtración (NF)	MON, sólidos totales disueltos (STD)
<i>Tratamiento medio</i>	
Coagulación, filtración por membranas-osmosis inversa (OI)	MON, STD, dureza
Pretratamiento convencional-filtración por membrana- OI	Turbiedad, MON, dureza, STD
Ablandamiento-filtración por membrana-OI	Turbiedad, MON, dureza, STD
<i>Tratamiento final</i>	
Pre oxidación-filtración por membrana	Compuestos que alteran olor y sabor
Adsorción-Filtración por membrana	MON
Coagulación-filtración por membranas	MON, arsénico
Coagulación mejorada-filtración por membrana	MON, color, COT
Filtración directa por membrana	Turbiedad, MON
Pretratamiento convencional-filtración por membrana	MON, Turbiedad
Ablandamiento-GAC-Filtración por membrana	Dureza, turbiedad, compuestos que alteran olor y saber
Ablandamiento-pretratamiento convencional-filtración por membrana	Dureza, turbiedad, MON
Tratamiento convencional- filtración por membrana	Remover material particulado

Fuente: American Water Works Association. Microfiltration and Ultrafiltration Membranes for Drinking Water. Manual of Water Supply Practices M53. Second Edition. USA. American Water Works Association. 2016. p. 134.

4.1.1 Pretratamiento por membranas.

- Filtración por membrana-ozonización-filtración biológica: la filtración por membrana antes de la ozonización y de la filtración biológica es aplicable cuando la demanda de ozono en el agua cruda causada por el contenido de material particulado es significativa y donde la remoción de este material por tratamiento de membrana reduce los costos de tratamiento con ozono.⁹²
- Filtración por membrana-carbón activada granular (GAC): la colocación de GAC después del tratamiento de la membrana elimina la carga de partículas en el medio GAC y reduce la frecuencia del retro lavado del adsorbedor.⁹³
- Filtración por membrana- nano filtración (NF) / Osmosis inversa: la previa filtración por membrana de baja presión reduce el potencial de contaminación coloidal y de partículas de estas fuentes de agua, para que los procesos

⁹² Ibid., p, 134

⁹³ Ibid., p, 135.

posteriores de nano filtración y ósmosis inversa pueden operar con una contaminación de partículas reducida. Estos sistemas de membrana integrados son popularmente utilizados para el pre tratamiento de aguas salobres, incluidas las de alta dureza, y al agua de mar.⁹⁴

4.1.2 Proceso de tratamiento medio por membranas. Coagulación-Floculación/Coagulación-Floculación-Sedimentación/Ablandamiento de cal-Filtración de membrana-Ósmosis inversa: la membrana está precedida por coagulación-floculación, coagulación-floculación-sedimentación o ablandamiento con cal. Los dos primeros procesos de tratamiento preliminares se utilizan para reducir los niveles de NOM, lo que reduce las tasas de ensuciamiento en las membranas MF/UF y reduce los precursores de subproductos de desinfección (DBP). El ablandamiento de cal se utiliza como tratamiento preliminar, para reducir la dureza y los niveles de bario en la fuente de agua salobre para aumentar la recuperación del sistema de ósmosis inversa y reducir la carga de sólidos en el sistema de ultra filtración presurizado intermedio.⁹⁵

4.1.3. Tratamiento final mediante membranas de baja presión. Pre oxidación-Filtración por membrana: Las aguas subterráneas se caracterizan por tener concentraciones elevadas de hierro y manganeso disueltos que deben eliminarse, antes de la distribución para evitar problemas en la coloración del agua, debido a la oxidación de estos metales cuando se exponen al cloro o al aire. La eliminación de hierro y manganeso se ha logra mediante un proceso de dos fases: La adición de un oxidante u oxidantes (aireación o cloro para la oxidación del hierro; permanganato para la oxidación del manganeso) seguido de filtración en medio granular para eliminar las partículas de metal oxidado. La filtración por membrana de baja presión se puede utilizar en lugar de la filtración de medios granulares para la separación sólido / líquido. Las reacciones de oxidación de Fe / Mn deben completarse antes de que el agua subterránea se filtre por membrana. Este proceso es necesario para evitar la formación de precipitados dentro de la superficie de la membrana que podrían dañar la estructura de la membrana.⁹⁶

- Coagulación-Filtración por membrana: Este sistema se emplea esencialmente con la finalidad de disminuir los niveles de arsénico presentes en aguas subterráneas y en algunos casos de aguas superficiales.⁹⁷
- Coagulación mejorada-Filtración por membrana: este es el sistema de membrana integrado de más relevancia para el caso de estudio ya que la coagulación mejorada es un proceso de coagulación en el que el coagulante se inyecta en dosis más altas que las requeridas para la eliminación regular de turbidez y partículas. El coagulante inyectado durante el proceso forma un floculo que adsorbe parte de la materia orgánica del agua, proporcionando color y

⁹⁴ Ibid., p, 135

⁹⁵ Ibid., p, 135

⁹⁶ Ibid., p, 136

⁹⁷ Ibid., p, 137

eliminación de COT más allá de las eficiencias logradas durante la coagulación regular cuando es necesario eliminar la turbidez y las partículas. Las principales variables que afectan la eficiencia de la eliminación de COT son la alcalinidad del agua de origen y la concentración de COT. Cuanto mayor sea la concentración de COT en el agua, más COT se requiere reducir. Cuanto mayor sea la concentración de alcalinidad en el agua, se requiere menor reducción de COT ya que la alcalinidad proporciona capacidad de amortiguación al agua.⁹⁸

En el estudio piloto de membranas de Canyon WTP⁹⁹, las membranas superaron al tratamiento convencional al eliminar el COT de dos fuentes de agua con diferentes concentraciones de coagulantes. Cuando se usa agua de río y agregar cloruro de polialuminio (PACl) en concentraciones de 10 a 20mg / L con un promedio de 15mg/L, las membranas eliminaron hasta el 25% del COT del agua de alimentación, mientras que los procesos convencionales proporcionaron un 19% de eliminación de TOC. Cuando se utiliza agua de conducto como fuente y agregando concentraciones de PACl 10 - 20mg/L con un promedio de 15mg/L, las membranas removieron hasta un 22% del COT del agua de alimentación, mientras que los procesos convencionales proporcionaron el 11% de COT eliminación. Al aumentar la dosis de PACl a 25mg/L, las membranas registraron la eliminación de COT al 36%, mientras que los procesos convencionales no proporcionaron mejoras significativas en la reducción de COT.¹⁰⁰

4.2 CASO 2: FILTROS DE CARBÓN ACTIVADO GRANULAR

En la planta de tratamiento de agua potable (DWTP) de San Juan Despí Barcelona, España), trata el agua del río Llobregat. Se realizó un estudio durante un año, comparando dos filtros de carbón activado granular (CAG-A y CAG-B), donde la etapa de filtración consta de 20 filtros con una superficie de filtración de 100m² y una altura de lecho de 1.5m cada uno, que operan en paralelo bajo las mismas condiciones de filtración (en relación con las características del agua de alimentación, el tiempo de contacto con el lecho vacío, temperatura ambiente entre otras). Son microporosos para favorecer la sorción de compuestos orgánicos más pequeños¹⁰¹.

Los filtros CAG que se utilizaron presentes en la tabla 14 para las características de GAC-A y CAG-B:

⁹⁸ Ibid., p, 138

⁹⁹ Canyon WTP: Planta de tratamiento de agua de Jamieson Canyon en Ciudad de Napa, California

¹⁰⁰ AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. Op. cit., p, 139.

¹⁰¹ GIBERT, Oriol. LEFÈVRE, Benoît. FERNÁNDEZ, Marc. BERNAT, Xavier. PARAIRA, Miguel. PONS, Marc. Fractionation and removal of dissolved organic carbon in a full-scale granular activated carbon filter used for drinking water production. Barcelona, Spain. Elsevier Ltd. 2013. p, 2. En línea: <https://ezproxy.uamerica.edu.co:2052/science/article/abs/pii/S0043135413001322>

Tabla 14. Características fisicoquímicas GAC-A y GAC-B.

	CAG-A	CAG-B
Proveedor	Chemviron	Norit
Tipo	Carbón F400	Row 0,8 Extrusión cilíndrica
Forma de gránulo	Grano Carbón	
Materia prima	bituminoso	Turba
Diámetro medio de las partículas (mm)	1	>0.6
Densidad aparente (Kg/m ³)		No disponible
Coefficiente de uniformidad	1.7	
Número de yodo (IN)(mg/g) virgen (según fabricante)	1050	1100
Al recibirlo después de la regeneración	736	698
Superficie aparente BET (SBET)(m ² /g)	1050	1300
Al recibirlo después de la regeneración	900	890
Microporo total (<2nm) volumen (cm ³ /g)	0.41	0.42
Microporo estrecho (<0,7nm) volumen (cm ³ /g)	0.24	0.25
Supermicropore	0.17	0.17

Fuente: GIBERT, Oriol. LEFÈVRE, Benoît. FERNÁNDEZ, Marc. BERNAT. Xavier. PARAIRA, Miguel. PONS, Marc. Fractionation and removal of dissolved organic carbon in a full-scale granular activated carbon filter used for drinking water production. Barcelona, Spain. Elsevier Ltd. 2013. p, 3. En línea: <https://n9.cl/cvqmq>

Se retrolavan periódicamente con aire a un caudal de 0.5 m³/s durante 5 min y luego con agua filtrada con arena a un caudal de 0.3m³/s durante 14 min. Los filtros se lavan a contracorriente en un horario rotativo, para que la planta pueda operar continuamente¹⁰².

El estudio presenta que la efectividad de filtros CAG para eliminar MON cuando el tamaño de los poros es igual al de la materia orgánica.¹⁰³

¹⁰² *Ibíd.*, p, 2

¹⁰³ *Ibíd.*, p, 2

La eliminación de MON en los filtros CAG se evalúa mediante la medición de sustitutos de MON, carbono orgánico total (COT), carbono orgánico disuelto (COD) o absorbancia ultravioleta (UV).¹⁰⁴

Para la medición del COT se utilizó el método de combustión infrarroja usando un analizador de COT (TOC Shimadzu Modelo V CPH) donde el límite de detección del sistema para cada fracción es de 1mg/L.¹⁰⁵

Los resultados arrojaron que el COT se eliminó progresivamente respecto al tiempo de 3 a 3.5mg/L, se redujeron inicialmente a 1mg/L, y luego a concentraciones crecientes de hasta 2.8mg/L para CAG-A y 3mg/L CAG-B al final del estudio¹⁰⁶

La mayor pérdida inicial de COT se debió a la absorción de MON en los sitios de absorción de CAG. Mientras estos se saturaron, se generó un aumento de COT y la concentración del efluente se acercó gradualmente a los niveles de influencia¹⁰⁷.

La eliminación de COT que continua más allá de la saturación de CAG probablemente se debió a la biodegradación por biopelícula cultivada en la superficie de CAG¹⁰⁸.

La disminución progresiva del tamaño de grano puede ayudar a explicar la mayor eliminación de COT para CAG-A¹⁰⁹.

Al comparar de CAG-A contra CAG-B se mostró que GAC-A adsorbía más COT, pero también sufría más de abrasión. Debido a la disminución progresiva del tamaño del grano CAG-A. Mostrando al final del estudio un 40% para CAG-A y del 20% para CAG-B¹¹⁰.

¹⁰⁴ *Ibíd.*, p, 2

¹⁰⁵ *Ibíd.*, p, 2

¹⁰⁶ *Ibíd.*, p, 4

¹⁰⁷ *Ibíd.*, p, 4

¹⁰⁸ *Ibíd.*, p, 8

¹⁰⁹ *Ibíd.*, p, 8

¹¹⁰ *Ibíd.*, p, 8

4.3 CASO 3: ÓXIDO DE GRAFENO EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN PARA ELIMINACIÓN DE COT

El proceso de coagulación-floculación es un método sencillo para eliminar MON. Los coagulantes más comunes en este proceso son sulfato de alumbre, cloruro de polialuminio (PAC) y cloruro férrico (FeCl_3). Varias investigaciones se han enfocado en la aplicación de nanomateriales en el proceso de purificación de agua; debido a que su principal ventaja son sus grupos funcionales y una gran superficie.¹¹¹

El óxido de grafito (GO) es la forma oxidada del grafito, que se obtiene fácilmente por la oxidación del grafito. Contiene varios grupos funcionales a base de oxígeno como hidroxilo, carboxilo, grupos carbonilo y epoxi, que mejoran la dispersabilidad de GO y son importantes para la eliminación de contaminantes en el agua.¹¹²

Las nanopartículas magnéticas de óxido de hierro (Fe_3O_4) son buenas para el desarrollo de altos adsorbentes para eliminar iones químicos y microbios presentes en el agua, de acuerdo con el modelo de superficie para aumentar su selectividad/afinidad¹¹³.

Este estudio utilizó óxido de grafito (GO) y nano partículas de óxido de hierro (Fe_3O_4) para la eliminación de COT y turbidez a través de método de absorción en el proceso de coagulación-floculación de las aguas superficiales. Las nanopartículas GO y Fe_3O_4 se caracterizaron mediante espectroscopia de difracción de rayos X (XRD), espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier y microscopia electrónica de barrido de emisiones de campo. Para evaluar los efectos de coagulante ($(\text{FeCl}_3 \cdot 6(\text{H}_2\text{O}))$), solución de pH y GO, se aplicó BoxBehnken Design (BBD) en combinación con la metodología de superficie de respuesta. El proceso de equilibrio de adsorción se investigó a fondo utilizando varios modelos¹¹⁴.

Utilizando como materiales e instrumentos: cloruro de hierro (II) ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), cloruro de hierro (III) ($\text{FeCl}_3 \cdot 6(\text{H}_2\text{O})$) e hidróxido de sodio (NaOH). Para la preparación de GO: grafito en polvo, NaHCO_3 , KMnO_4 , ácido clorhídrico (5%) y ácido sulfúrico (97%). Se realizó un stock de TDS (1000 mg/L) de KNO_3 , CaCl_2 , MgSO_4 y NaHCO_3 , para evaluar el efecto de la TDS en la eliminación de COT. Para ajustar la solución de pH se utilizó ácido clorhídrico e hidróxido de sodio. Para obtener 1000mg/L de COT, se disolvió en agua una cierta cantidad de ácido húmico.

¹¹¹ MOHAMMADI, P, Mohammad. POURFAKHAR, Hossein. BAGHDADI, Majid. Application of graphene oxide nanosheets in the coagulation-flocculation process for removal of Total Organic Carbon (TOC) from surface water. University of Tehran, Tehran, Iran. Elsevier Ltd. Mayo. 2020. p, 1. En línea: <https://ezproxy.uamerica.edu.co:2052/science/article/abs/pii/S2214714420302452>

¹¹² *Ibid.*, p, 2

¹¹³ *Ibid.*, p, 2

¹¹⁴ *Ibid.*, p, 2

Para la evaluación de la concentración residual de COT, se aplicó el analizador de COT (modelo-VCSH, Shimadzu, Japón).¹¹⁵

Preparación del GO: se utilizó el método Hummer para preparar el GO. Se añadieron 5g de grafito en polvo a 230mL de ácido sulfúrico a temperatura ambiente agitando durante 24h con un agitador magnético. Luego la solución se colocó en el baño de hielo. Después, se añadieron 5g de nitrato de sodio a la mezcla y se removieron durante 1h. Durante el tiempo que la temperatura alcanzó menos de 10°C, se añadieron 30g de KMnO_4 de forma constante a la mezcla en 3h. Luego se revolvió durante 12h cuando estaba en un baño de aceite a 50°C. Posteriormente, mientras se enfriaba en un baño de hielo se añadieron 500mL de agua desionizada en 1h. Luego, se añadieron otros 500mL de agua destilada a la mezcla. Después de 10h, se separaron los precipitados y lavaron con ácido clorhídrico (5%) para eliminar impurezas e iones. Los sólidos obtenidos se lavaron con agua desionizada y se centrifugaron a 20.000rpm durante 5 minutos. Además, se examinó con una solución de nitrato de plata para asegurarse de que no había ácido clorhídrico en la solución. La suspensión concentrada se sonó durante 2h y luego se secó a temperatura ambiente.¹¹⁶

Preparación de Fe_3O_4 : se utilizó un método de precipitación para preparar nanopartículas de Fe_3O_4 . Primero, se desoxidó 1L de agua destilada durante 30 minutos con gas nitrógeno. Luego, se añadieron 600mL de agua desoxigenada al matraz de reacción y se calentaron hasta 80°C en una porción de parafina. El proceso de desoxigenación se llevó a cabo continuamente hasta el final. Para la síntesis de 2.5g de Fe_3O_4 , 5.88g de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y 2.1g de $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ se añadieron a 600mL de agua desoxigenada. La solución se removió durante media hora con un agitador mecánico y se añadió al tiempo 160mL de solución de NH_3 (25 %), lo que dio como resultado partículas coloidales negras de Fe_3O_4 .¹¹⁷

Caracterización del adsorbente: se aplicó el método de dispersión dinámica de la luz para medir el tamaño de las nanopartículas. Utilizando espectroscopia de rayos X de dispersión de energía estudiaron la composición superficial. El espectrómetro de difractogramas de rayos X, se realizó para determinar la estructura cristalina de los materiales. Utilizando el espectrómetro Bruker, se recogieron los espectros infrarrojos de transformada de Fourier. El microscopio electrónico de barrido por emisión de campo se realizó en composición elemental y estudios morfológicos. Además, para evaluar las propiedades magnéticas de Fe_3O_4 , el análisis de VSM se llevó a cabo bajo un campo magnético a temperatura ambiente.¹¹⁸

Diseño experimental y análisis de datos para la eliminación de COT y turbidez: se realizó un diseño factorial fraccionario de tres niveles que consta de tres diseños factoriales entrelazados de 22 y un punto central, lo que podría reducir el número

¹¹⁵ *Ibíd.*, p, 2

¹¹⁶ *Ibíd.*, p, 2

¹¹⁷ *Ibíd.*, p, 2

¹¹⁸ *Ibíd.*, p, 2

de experimentos requeridos. Se aplicó la técnica BBD bajo RSM para determinar los valores de los parámetros para optimizar la tasa de eliminación de COT y turbidez. Para evaluar los efectos de los parámetros sobre la adsorción, se seleccionaron tres factores principales: pH (A), GO (B) y FeCl₃.6H₂O (C).¹¹⁹

Los niveles de los parámetros elegidos se observan en la Tabla 16. Los valores reales y los niveles codificados de las variables independientes.¹²⁰

Tabla 15. Rango experimental y niveles de las variables independientes

Variables	Unidades	Niveles		
		-1	0	1
A: pH	-	4.5	7	9.5
B: GO	mg/L	2	11	20
C: FeCl ₃ .6H ₂ O	mg/L	10	35	60

Fuente: MOHAMMADI. P, Mohammad. POURFAKHAR, Hossein. BAGHDADI, Majid. Application of graphene oxide nanosheets in the coagulation-flocculation process for removal of Total Organic Carbon (TOC) from surface water. University of Tehran, Tehran, Irán. Elsevier Ltd. Mayo. 2020. p, 2. En línea: <https://n9.cl/j8g4r>

Los resultados previstos y la matriz de diseño se muestran en la Tabla 16 Se utilizó software Design-Expert (Versión 10, Minneapolis, EE.UU.) para diseñar y analizar los datos registrados.¹²¹

¹¹⁹ *Ibíd.*, p, 2

¹²⁰ *Ibíd.*, p, 2

¹²¹ *Ibíd.*, p, 3-4

Tabla 16. Diseño de RSM y los valores observados y pronosticados para la remoción de Turbidez y COT

Carreras	Factores			Turbiedad (FTU)		% Eliminación COT	
	A: pH	B: GO	C: FeCl ₃ .6H ₂ O	Actual	Predecir	Actual	Predecir
		mg/L	mg/L				
1	7	2	10	108.9	109.1	0	-0.4
2	7	11	35	3.9	7.6	91.6	92.4
3	9.8	2	35	20.2	19.6	81.6	81
4	7	11	35	8.2	7.6	91.2	92.4
5	7	11	35	6.7	7.6	94.4	92.4
6	4.5	11	10	108.5	107.2	0	0.3
7	7	20	10	108.5	107.6	0	-0.1
8	9.5	20	35	2.1	1.6	97.6	98.2
9	4.5	20	35	2.9	3.8	96.8	95.8
10	7	20	60	22.4	20.8	78.3	78.7
11	7	11	35	6.8	7.6	93.6	92.4
12	7	11	35	9.5	7.6	91.6	92.4
13	4.5	2	35	23	21.8	77.9	78.7
14	9.5	11	10	108.2	108	0	0.3
15	9.5	11	60	34.4	34.7	65.2	64.8
16	7	2	60	55	55.3	44.6	44.7
17	4.5	11	60	10.1	40	60.4	60.1

Fuente: MOHAMMADI, P, Mohammad. POURFAKHAR, Hossein. BAGHDADI, Majid. Application of graphene oxide nanosheets in the coagulation-flocculation process for removal of Total Organic Carbon (TOC) from surface water. University of Tehran, Tehran, Irán. Elsevier Ltd. Mayo. 2020. p, 3. En línea: <https://n9.cl/j8g4r>

Resultados: la tasa de eliminación de COT fue profundamente afectada por la dosis de FeCl₃.6H₂O y se mantuvo constante con los cambios de pH, al aumentar la concentración de GO y FeCl₃.6H₂O la tasa de eliminación de COT aumentó. Sin embargo, el impacto de la concentración de FeCl₃.6H₂O fue más significativo que el de la concentración de GO. El FeCl₃ tuvo mayor efecto en la eliminación de la turbidez y la concentración de GO y pH tuvo el menor efecto. El impacto de la concentración de FeCl₃.6H₂O. La tasa máxima de eliminación de COT está dentro del rango de 30mg/L a 53mg/L, mientras que el efecto del pH es insignificante. Obteniendo una tasa máxima de eliminación de 97.6 % a pH de 7, concentración de GO de 11mg/L y concentración de FeCl₃.6H₂O de 35mg/L. Además, los efectos de la concentración de FeCl₃.6H₂O y GO, y el pH de la solución en la tasa de eliminación de turbidez muestra la concentración de FeCl₃.6H₂O entre 35mg/L a 47mg/L y 11mg/L de GO, la mejor tasa de eliminación de turbidez es de (95.3%).

De acuerdo con la tasa de eliminación prevista, en los intervalos de predicción a un valor p de 0.05 (94.0-100.2 %), se aprueba la validación del modelo.¹²²

Los coeficientes de correlación para la isoterma Radke-Prausnitz, UT y Redlich-Peterson son 0.9996. Además, los valores numéricos de las pruebas de RL están dentro del rango de cero a 1, lo que muestra una adsorción óptima. Utilizando el modelo Langmuir, se calculó la capacidad de adsorción máxima 1608 mg/g.¹²³

Debido a las tasas de eliminación significativas, el uso de GO y FeCl₃.6H₂O es una forma práctica en unidades de tratamiento de agua.¹²⁴

Entre los parámetros, FeCl₃.6H₂O y GO han tenido el impacto más significativo en la eliminación COT y turbidez, el pH tuvo el menor efecto.¹²⁵

La concentración de Fe₃O₄ tuvo efectos notables en la velocidad y el tiempo de sedimentación de partículas. Como resultado, en la concentración más alta hasta 60mg/L, se observó una disminución significativa de la turbidez.¹²⁶

4.4 MATRIZ DE DECISIÓN EMPLEADA PARA EVALUAR LOS MÉTODOS UTILIZADOS PARA REDUCCIÓN DE COT

Se realizó una comparación de tres casos de estudio entre Membranas, Filtros de Carbón Activado y Oxido de Grafeno para escoger cual es el método más adecuado para la eliminación de COT en agua potable.

Escogiendo cinco parámetros importantes para evaluar entre los casos: el porcentaje de reducción de COT, Mantenimiento, Costos, Dificultad del proceso y Variables externas que influyen en el proceso, dando una puntuación de 1 a 5, siendo 1 la menor puntuación y 5 la mayor, Tabla 17 a cada variable se le asignó un valor de acuerdo a la importancia para la eliminación del COT

Tabla 17. Puntuación ítems.

Variables	Puntuación ítem
% de reducción	5
Mantenimiento	4
Costos	3
Dificultad del proceso	2
Variables externas	1

Fuente: elaboración propia.

¹²² *Ibíd.*, p, 6

¹²³ *Ibíd.*, p, 6

¹²⁴ *Ibíd.*, p, 7

¹²⁵ *Ibíd.*, p, 8

¹²⁶ *Ibíd.*, p, 8

Los parámetros de evaluación que se tuvieron en cuenta para analizar las alternativas planteadas para la reducción de COT en los sistemas de distribución de agua potable bajo un criterio y una finalidad específica, se les asignó una puntuación dependiente de la relevancia que representa. Claramente el porcentaje de reducción de COT abarca la mayor valoración, siendo el objetivo contundente a la cuestión generada, ya que la reducción de este compuesto se relaciona directamente proporcional a la formación de los SPD que finalmente ponen en riesgo la salud de los consumidores finales. Los demás parámetros se tuvieron en consideración teniendo presente que estas alternativas buscan una implementación en procesos productivamente convencionales y estandarizados; por lo que no se puede aislar la complejidad que con lleva reformar todo un proceso; estos cuatro parámetros restantes se encuentran estrechamente relacionados. Las variables externas son aquellas que limitan la efectividad de cada proceso y a pesar de que son controlables, el resultado depende estrechamente de estas, entre más variables se deban controlar, la incorporación del proceso se hace más compleja y menos flexible. Para absolutamente todos los procesos es importante tener en cuenta un análisis económico y financiero que evalúe la viabilidad de hacer modificaciones y sea sustentablemente rentable cumpliendo con el objetivo de mejorar la calidad del agua potable; el mantenimiento definitivamente es algo que impacta tanto a nivel económico como operativo, es fundamental que éste no genere mayores costos de los que representa el proceso convencional y que al momento de realizarlo tampoco se altere la productividad ni la operatividad del proceso.

Tabla 18. Evaluación ítems

Casos de estudio	% reducción	Mantenimient o	Costos	Variables externas	Dificultad del proceso
Membranas	2	2	3	3	5
Filtros de Carbón Activado Granular	3	3	2	5	3
Oxido de Grafeno	5	5	5	3	1

Fuente: elaboración propia.

Para establecer la valoración total en cada uno de los casos se le asignó un puntaje entre 1 a 5, para cada parámetro y este valor se multiplicó por la puntuación determinada inicialmente de cada ítem. Finalmente se suma el total de puntos obtenidos para cada caso como se muestra en la Tabla 18 y 19; y el puntaje mayor será la alternativa más completa y apta, para nuestro objetivo.

Tabla 19. Resultado de la matriz de decisión

Casos de estudio	Total
Membranas	38
Filtros de Carbón Activado Granular	46
Oxido de Grafeno	67

Fuente: elaboración Propia

La metodología empleada a través de la matriz de decisión para seleccionar una propuesta viable frente a otras dos alternativas que igualmente responden a la problemática en cuestión, reduciendo un cierto porcentaje de COT, finalmente nos permite establecer que mediante el óxido de grafeno es posible optimizar la calidad del agua potable en las redes de distribución con un porcentaje realmente alto de reducción de COT, adaptándolo a los procesos de tratamiento convencionales.

El método de Óxido de Grafeno al tener una muy buena reducción de COT del 97.6%, se propone utilizar en una planta de tratamiento de agua potable donde el agua cruda que ingresa de la cuenca del río Bogotá a la planta contiene altos niveles de MON, la planta podrá utilizar este método realizando una verificación a nivel experimental por medio de un ensayo de jarra que le permitirá determinar las condiciones de operación óptimas para el proceso midiendo variables físicas y químicas antes, durante y después del experimento como pH, turbidez, COT, SST y conductividad.

La muestra de agua cruda al ser de la cuenca del río Bogotá y tener un alto contenido de COT, da la ventaja operativa de comparar diferentes concentraciones del producto a dosificar y así poder verificar el costo del insumo, para encontrar el punto de equilibrio entre caudal vs dosis óptima, posteriormente agregar el coagulante y floculante, para encontrar la clarificación del agua.

Si se obtienen buenos resultados en la reducción de COT como es lo esperado al utilizar el óxido de grafeno y una clarificación total del agua, se puede realizar un pretratamiento del agua cruda donde inicialmente se reduzcan los niveles de COT y después pase al proceso de clarificación convencional, donde esta reducción debe realizarse antes de la coagulación ya que es el proceso de desestabilización electrónica y donde puede ocurrir la mayor reducción de COT.

La selección del equipo para este pretratamiento puede variar dependiendo del caudal, tiempo de residencia para que actúe el óxido de grafeno, si es un proceso continuo o en Batch y el presupuesto que puedan establecer para el sistema de tratamiento de agua.

Es importante tener en cuenta las variables que realmente afectan la efectividad del método para la reducción del COT directamente, como el aumentar la concentración de la solución madre en el método experimental (compuesta por Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , c , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , HCO_3^-)¹²⁷; el porcentaje de COT eliminado se ve enfáticamente reducido. Y la concentración de Fe_3O_4 tuvo efectos notables sobre el tiempo de sedimentación de partículas. Provocando a mayor concentración, una disminución significativa de la turbidez. A partir de estos parámetros es posible tener un control más riguroso sobre la aplicabilidad del método en un proceso ya establecido y garantizar su efectividad.

Además, el utilizar este pretratamiento de óxido de grafeno garantiza que los estándares de calidad del agua en reducción de COT sean muy bajos a los niveles permitidos y así poder asegurar que el agua que se encuentra en el sistema de no logre formar subproductos de desinfección que puedan ser perjudiciales para salud humana.

¹²⁷ MOHAMMADI, P, Mohammad. POURFAKHAR, Hossein. BAGHDADI, Majid. Application of graphene oxide nanosheets in the coagulation-flocculation process for removal of Total Organic Carbon (TOC) from surface water. University of Tehran, Tehran, Iran. Elsevier Ltd. Mayo. 2020. p, 3. En línea: <https://n9.cl/j8g4r>

5. CONCLUSIONES

- El contenido de carbono orgánico total presente en los sistemas de distribución representa el contenido de materia orgánica natural disuelta y particulada, que impacta consecuentemente en la formación tanto de biopelículas como de subproductos de desinfección. El COT al entrar en contacto con el cloro residual presente en el agua previamente tratada, reacciona potencialmente formando compuestos considerados como precursores de los subproductos de desinfección; estos precursores reaccionan con el cloro dando paso a los SPD.
- Las biopelículas presentes en los sistemas de distribución generan una contaminación biológica al agua previamente tratada, por medio de microorganismos que incrementan el contenido de materia orgánica posibilitando la formación de SPD. Los microorganismos son transportados a lo largo del sistema luego de la etapa de desprendimiento por parte de la biopelícula, generando un potencial riesgo biológico al consumidor final, atentando contra la salud en problemas como alergias, infecciones extra cutáneas, pulmonares, en el sistema tracto digestivo, en el sistema nervioso, entre otras.
- Los subproductos de desinfección formados a partir de la oxidación de materia orgánica por el desinfectante contenido residualmente en el sistema de distribución y posteriormente transportados hasta el consumidor, representan un riesgo químico. Se ha demostrado que estos compuestos como los trihalometanos, ácidos acéticos halogenados tienen un impacto negativo sobre la salud humana, siendo altamente cancerígenos, precursores de enfermedades en el sistema nervioso, reproductor; incluso tienen actividad mutagénica.
- Los métodos para determinación de COT en agua potable constan de dos partes: la primera debe garantizar la mineralización del contenido orgánico en la muestra, como lo hacen los métodos de oxidación a altas temperaturas, oxidación de persulfato UV a baja temperatura, analizadores UV. Mientras que la segunda requiere métodos analíticos para detectar dióxido de carbono (CO₂) producido como los detectores Infrarrojos, Conductividad, Electrodo de CO₂, Ionización de llama, Análisis coulométrico y método colorimétrico.
- El método de Óxido de Grafeno en el proceso de coagulación-floculación para eliminación de COT es uno de los estudios más recientes que demuestra una reducción de COT del 97.6%, mientras que al ser comparado con los métodos como el de Membranas y Filtros de Carbón Activado Granular representan un 30% y 40% respectivamente.

6. RECOMENDACIONES

- Realizar la trazabilidad del COT en un sistema de distribución de agua potable determinado, para identificar los principales factores de intrusión de este compuesto.
- Implementar el óxido de grafeno en la operación de coagulación-floculación durante el tratamiento, a escala piloto evaluando el rendimiento de la reducción de COT y los costos generados al aplicar esta propuesta.
- Generar alternativas de reducción de COT, que se puedan aplicar durante el transporte del agua desde la salida de la planta hasta el consumidor final; teniendo en cuenta los factores inevitables que promueven la intrusión de materia orgánica.

BIBLIOGRAFÍA

ABDULLAH, Md.Pauzi; YEW, C.H; RAMLI, Mohamad Salleh. Formation, modeling and validation of trihalomethanes (THM) in Malaysian drinking water: a case study in the districts of Tampin, Negeri Sembilan and Sabak Bernam, Selangor, Malaysia, [en línea]. 2003, 37(19), pp. 4637-4644. [Consultado 12 de abril 2020]. ISSN 0043-1354 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135403004585?via%3Dihub>

Automation of Water Resource Recovery Facilities - WEF Manual of Practice No. 21 (4th Edition) - 9.12.5.1 Total Organic Carbon. 2013. p. 26-33. <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt010XITG5/automation-water-resource/total-organic-carbon>.

Butterfield PW, Camper AK, Ellis BD, Jones WL. Chlorination of model drinking water biofilm: implications for growth and organic carbon removal, [en línea]. Water Res. 2002; 36(17):4391-4405. doi:10.1016/s0043-1354(02)00148-3. [Consultado 9 de marzo 2020]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12420943/>

CAMPOS ORTEGA, Humberto R.; CAMPOS ORTEGA, Claudio H. CORROSIÓN BACTERIANA EN METALES. [en línea]. 2004, 22(1), pp. 29-34. [Consultado 8 de marzo 2020]. Disponible en: http://www.idesia.cl/Vols/Numeros/IDESIA_24/CAP._3_CORROSIN_BACTERIAN_A_EN_METALES_Autores_Humberto_R._Campos_Ortega_Claudio_H._Campos_Ortega.pdf

CHOWDHURY, Shakhawat; CHAMPAGNE, Pascale; MCLELLAN, P. James. Models for predicting disinfection byproduct (DBP) formation in drinking waters: A chronological review. [en línea]. 2009, 407 (14), pp. 4189-206. [Consultado 12 de mayo 2020]. Disponible en: [https://www.semanticscholar.org/paper/Models-for-predicting-disinfection-byproduct-\(DBP\)-Chowdhury-Champagne/fc5701ec928b4ef0a93044229ec33a25d652aecb](https://www.semanticscholar.org/paper/Models-for-predicting-disinfection-byproduct-(DBP)-Chowdhury-Champagne/fc5701ec928b4ef0a93044229ec33a25d652aecb)

COLOMBIA. MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL, MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 2115. [En línea]. (22, junio, 2007). [Consultado 07 de noviembre 2019]. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Art. 21. Disponible en internet: http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislaci%C3%B3n_del_agua/Resoluci%C3%B3n_2115.pdf

Determination of total organic carbon and specific UV absorbance at 254 nm in source water and drinking water. B. B. Potter, USEPA, Office of Research and Development, National Exposure Research Laboratory J. C. Wimsatt, The National

Council on The Aging, Senior Environmental Employment Program. [En línea]. February, 2005. [Citado 16-Noviembre-2019].

EDWARD W.D. HUFFMAN (CHAIR), KARL O. BRINKMANN, RICK C. DAGE, PATRICIA SNYDER FAIR, LOUIS A. KAPLAN, P. LAWRENCE MESCHI, JAMES W. O'DELL, MISHA PLAM. Standard Methods Committee. Joint Task Group: 20th Edition. 2000. p, 8. [Citado 13-Noviembre-2019]. En línea: <https://www.standardmethods.org/doi/10.2105/SMWW.2882.104>

GELVES GUZMAN, Mario Fernando. Deterioro de la calidad del agua por el posible desprendimiento de las biopelículas en las redes de distribución de agua potable estado del arte. Bogotá, Colombia. Universidad de los Andes, 2005.

GIBERT, Oriol. LEFÈVRE, Benoît. FERNÁNDEZ, Marc. BERNAT. Xavier. PARAIRA, Miguel. PONS, Marc. Fractionation and removal of dissolved organic carbon in a full-scale granular activated carbon filter used for drinking water production. Barcelona, Spain. Elsevier Ltd. 2013. p, 9. En línea: <https://ezproxy.uamerica.edu.co:2052/science/article/abs/pii/S0043135413001322>.

GÓMEZ PÁEZ, M. P. Mecanismos de control en la formación de biopelículas en sistemas de distribución de agua potable. Bogotá, Colombia. Universidad de los Andes, 2008.

G. Visco, L. Campanella, V. Nobili. Organic carbons and COT in Waters: an overview of the international norm for its, measurements. Rome, Italy. Elsevier. p. 7. En línea: <https://ezproxy.uamerica.edu.co:2052/science/article/abs/pii/S0026265X04002097>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C. El instituto, 2018 ISBN 9789588585673 153 p

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL - REPÚBLICA DE COLOMBIA. Determinación de nitrito en agua por espectrofotometría. [En línea]. (2009). [Consultado 10 de marzo 2020]. Disponible: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Nitrito+en+agua+por+Espectrofotometr%C3%ADa.pdf/4775634c-c6ba-4c95-8e98-0696ace02c03>

LEMUS PÉREZ, Mildred. F. Reacción del cloro con sustancias exopoliméricas provenientes de biopelículas de agua potable: Subproductos de desinfección, características y toxicidad. Bogotá D.C., Colombia. Universidad de los Andes, 2017.

LEÓN BARRIOS, Natalia. Evaluación de la importancia de la correcta modelación de subproductos de la desinfección (DBPs). Bogotá, Colombia. Universidad de los Andes. 2013

MOHAMMADI. P, Mohammad. POURFAKHAR, Hossein. BAGHDADI, Majid. Application of graphene oxide nanosheets in the coagulation-flocculation process for

removal of Total Organic Carbon (COT) from surface water. University of Tehran, Tehran, Iran. Elsevier Ltd. Mayo. 2020. p, 8. En línea: <https://ezproxy.uamerica.edu.co:2052/science/article/abs/pii/S2214714420302452>

OLMEDO SÁNCHEZ, María Teresa. Subproductos de la desinfección del agua por el empleo de compuestos de cloro. Efectos sobre la salud. [en línea]. 2008, pp. 335-342. [Consultado 2 de abril 2020]. Disponible en: https://saludpublica.ugr.es/sites/departamentos_files/departamentos_saludpublica/public/inline-files/bc51018bc59c356_Hig.Sanid_.Ambient.8.335-342%282008%29.pdf

Operational Control of Coagulation and Filtration Processes - Manual of Water Supply Practices, M37 (3rd Edition), American Water Works Association (AWWA), 2011. p, 21. En línea: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt008C2JY9/operational-control-coagulation/particle-counters-theory-operation>.

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS). FLUORIDES. Environmental Health Criteria 227. [En línea]. (2002). [Consultado 7 de abril 2020]. ISSN 0250-863X. Disponible en: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/42415/WHO_EHC_227.pdf;jsessionid=CEF8C822994C01537A6511CA4E1C9694?sequence=1

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS). Guías para la calidad del agua potable. [En línea]. (2006). [Consultado 7 de abril 2020]. Vol. 1: Recomendaciones. Tercera edición. ISBN 92 4 154696 4 Disponible en: https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowsres.pdf?ua=1

PRIETO GAMBOA, David. R. Determinación matemática de la intrusión de materia orgánica en la red matriz del acueducto de Bogotá. Bogotá, Colombia. Universidad de los Andes. 2005

SADIQ, Rehan; RODRIGUEZ, Manuel J. Disinfection by-products (DBPs) in drinking water and predictive models for their occurrence: a review. [en línea]. 2004, 321(1-3), pp. 21-46. [Consultado 2 de abril 2020]. ISSN 0048-9697 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969703005138>

VILLANUEVA, C.M; KOGEVINAS, M; GRIMALT, J.O. Cloración del agua potable en España y cáncer de vejiga. [en línea]. 2001, 15(1), pp. 48-53. [Consultado 10 de marzo 2020]. ISSN 0213-9111. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0213911101715178>

VITORIA, Isidro; MARAVER, Francisco; SÁNCHEZ-VALVERDE, Félix; ARMIJO, Francisco. Contenido en nitratos de aguas de consumo público españolas. [en línea]. 2015, 29(3), pp. 217-220. [Consultado 9 de junio de 2020]. ISSN 0213-9111.

Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0213911115000023>

VILLANUEVA, Cristina M; MANOLIS, Kogevinas; GRIMALT, Joan O. Cloración del agua potable y efectos sobre la salud: revisión de estudios epidemiológicos. [en línea].2001, 117(1), pp. 27-35. [Consultado 12 de mayo 2020]. ISSN 0025-7753
Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025775301720003>