



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

“TRATAMIENTO DE AGUA PLUVIAL POR EL PROCESO DE
ELECTROCOAGULACIÓN CON ELECTRODOS DE
ALUMINIO”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS AMBIENTALES

P R E S E N T A

ALEJANDRA MORALES FIGUEROA

DIRIGIDA POR

Dra. Gabriela Roa Morales

Dra. Elia Alejandra Teutli Sequeira

Dr. Marco Antonio García Morales

Toluca, Estado de México, 20 de enero de 2021

AGRADECIMIENTOS

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

A CONACYT por la beca otorgada que me permitió estudiar la Maestría en Ciencias Ambientales con No. CVU: **930437** y número de registro de protocolo **MACIAS-0419**.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
INTRODUCCIÓN	8
CAPÍTULO 1: FUNDAMENTO TEÓRICO	10
1.1 ANTECEDENTES	10
1.1.1 DESABASTO DEL AGUA EN MÉXICO	10
1.1.2 AGUA PLUVIAL	10
1.1.3 DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN MÉXICO	13
1.1.4 PRECIPITACIÓN DEL AGUA EN MÉXICO	14
1.1.5 REÚSO Y CONDICIONES DEL AGUA	16
1.1.6 CARACTERÍSTICA DEL AGUA PLUVIAL	17
1.1.7 NORMATIVIDAD	18
1.2. TECNOLOGÍAS EXISTENTES Y LAS ALTERNATIVAS PARA TRATAMIENTO DE AGUA DANDO CUMPLIMIENTO A LA NORMATIVIDAD VIGENTE	21
1.2.1 TRATAMIENTO PRIMARIO	22
1.2.2 TRATAMIENTO SECUNDARIO	22
1.2.3 TRATAMIENTO TERCIARIO	22
1.2.3.1 OZONACIÓN	23
1.2.3.2 LA ELECTROQUÍMICA	23
1.2.3.2.1 ELECTROOXIDACIÓN	24
1.2.3.2.2 ELECTROCOAGULACIÓN	24
1.2.4 ESTADO DEL ARTE PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA DE LLUVIA ..	30
JUSTIFICACIÓN	31

HIPÓTESIS	32
OBJETIVO	32
OBJETIVO GENERAL	32
OBJETIVOS PARTICULARES	32
2 METODOLOGÍA.....	33
2.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA	34
2.1.1 CAPTACIÓN DE AGUA Y TOMA DE MUESTRA	34
2.1.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS.....	34
2.2 OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO Y CARACTERIZACIÓN.....	35
2.2.1 TÉCNICAS ANALÍTICAS.....	36
2.3. MATERIALES Y METODOS.....	37
2.4. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	38
3. RESULTADOS	40
3.1 ARTICULO CIENTÍFICO.....	40
3.2. CORREO DE RECEPCIÓN	41
4 RESULTADOS NO PUBLICADOS.....	42
5. DISCUSIÓN GENERAL	44
6 CONCLUSIONES Y APORTACIONES.....	45
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Valores medios anuales de los componentes del ciclo hidrológico en México, 2015	11
Figura 2. Evolución del volumen concesionado de uso agrupado abastecimiento público por tipo de fuente 2006-2015 (miles de hm ³)	14
Figura 3. Recipitación pluvial anual 2000-2015 (mm)	16
Figura 4. Reactores para la electrocoagulación tipo batch en paralelo y en serie	26
Figura 5. Sistema básico de electrocoagulación	27
Figura 6. Tratamiento electroquímico con electrodos de Cobre.	42
Figura 7. Tratamiento electroquímico con electrodos de Aluminio.	43
Figura 8. Tratamiento electroquímico con electrodos de Hierro.	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Volúmenes concesionados por usos agrupados consuntivos 2015 (hm ³)	11
Tabla 2. Precipitación pluvial normal mensual 1981-2010 (mm)	14
Tabla 3. Límites permisibles de características químicas se expresan en mg/L	18
Tabla 4. Límites permisibles de características físicas y organolépticas, las cuales se detectan sensorialmente.	20
Tabla 5. Resultados comparativos de los análisis físicos y químicos. Agua de lluvia vs agua de la red municipal y su relación con los límites máximos permisibles (LMP) de la NOM-127-SSA-1994.	20
Tabla 6. Estado del arte de los estudios realizados durante los últimos años.	30
Tabla 7. Diagrama de la metodología de la investigación.	33
Tabla 8. Variables de operación y respuesta con la definición.	36
Tabla 9. Esquema de las corridas que se deben realizar para un factor 23 como variable: tiempo de retención (min) y densidad de corriente (A/m ²)	38

RESUMEN

El agua de lluvia procedente de un fenómeno natural, modificada por las actividades antropológicas del ser humano, se ha dejado de utilizar para satisfacer las necesidades del hombre. En México se tiene una precipitación nominal de 740mm de agua de lluvia al año y sólo el 6.3% de esta agua es aprovechada de forma natural, filtrándose al subsuelo y colaborando a la recarga de los mantos acuíferos. En el presente estudio se recolectó agua de lluvia de la región de Toluca durante un período de mayo a octubre del 2019, para mejorar sus características y poder ser utilizada en las actividades humanas, dicha agua cuenta con un pH de 6.25. El agua de lluvia fue tratada con un proceso electroquímico y se comparó la eficiencia de dos electrolitos soportes, uno de grado alimenticio (sal de mar) y otro grado reactivo (sulfato de sodio). En la primera etapa se caracterizó el agua de lluvia detectando presencia de contenido de DQO, turbidez, metales pesados como: zinc, manganeso, hierro, aluminio, plomo. Se realizó el tratamiento de electrocoagulación con una celda electroquímica utilizando un par de electrodos de aluminio para estudiar el efecto del DQO y turbidez, así como la remoción de los metales pesados presentes. Se utilizó un diseño de superficie de respuesta para determinar las variables que influyen en el proceso (intensidad de corriente y electrolitos soporte. Las condiciones óptimas del tratamiento de electrocoagulación fueron, intensidad de corriente de 0.15 A y un tiempo de 15 minutos, utilizando sulfato de sodio el porcentaje de remoción de turbiedad es de 99.27% y DQO de 70.83% y utilizando sal de mar como electrólito soporte bajo esas condiciones permitieron la remoción de DQO al 100% y turbiedad al 100% así como DBO y N-NH₃, se reducen la presencia de metales pesados como Al 100%, Mn 84.29%, Zn 97.97% Pb 46%, Fe 21%. Los costos energéticos son bajos (0.376 \$/m³), demostrado un ahorro al utilizar este sistema y los parámetros cumplen con lo especificado en la NOM-127-SSA1-2017. Esto indica que este tratamiento es otra opción para mejorar las condiciones del agua de lluvia y poder hacer uso de ella de manera segura.

ABSTRACT

Rainwater from a natural phenomenon, modified by human anthropological activities, collected in the Toluca región, from May to October 2019 with a pH of 6.25. The rainwater was treated with an electrochemical process and the efficiency of two supporting electrolytes was compared, one of food grade (sea salt) and the other reagent grade (sodium sulfate). In the first stage, the rainwater was characterized by detecting the presence of COD content, turbidity, heavy metals such as zinc, iron, aluminum, lead. The electrocoagulation treatment was performed with an electrochemical cell using a pair of aluminum electrodes to study the effect of COD and turbidity, as well as the removal of heavy metals present. A response surface design was used to determine the variables that influence the process (current intensity and support electrolytes. The optimal conditions of the electrocoagulation treatment were, current intensity of 0.15 A and a time of 15 minutes, using sulfate of sodium, the percentage of turbidity removal is 99.27% and COD is 70.83% and using sea salt as a support electrolyte under those conditions allowed the removal of 100% COD and 100% turbidity as well as BOD and N-NH₃, they are reduced the presence of heavy metals such as Al 100%, Mn 84.29%, Zn 97.97% Pb 46%, Fe 21%. Energy costs are low 0.376 MXN \$/m³, a saving has been demonstrated when using this system and the parameters comply with what is specified in NOM-0127 - SSA11-2017. This indicates that this treatment is another option to improve rainwater conditions and be able to use it safely.

INTRODUCCIÓN

A pesar de que en el planeta se tiene una gran cantidad de agua no toda se puede usar o consumir de manera directa, por lo cual se debe reconocer su importancia y saber hacer un mejor uso de este recurso, puesto que es necesario para nuestras actividades diarias y asegurar el suministro. (Ilse, 2015)

La demanda de agua dulce y energía continuará creciendo significativamente en las próximas décadas para satisfacer las necesidades de poblaciones y económicas en crecimiento, aumentando la presión existente sobre los recursos naturales no renovables y los ecosistemas (Connor, 2014)

Se prevé que la demanda mundial de agua (en términos de extracción de agua) aumentará cerca de un 55 % para el año 2050. Como resultado, la disponibilidad de agua dulce estará bajo mayor presión durante este período, y las previsiones apuntan a que más de un 40 % de la población mundial vivirá en zonas con severos problemas hídricos para el 2050. En muchos países, particularmente en zonas áridas, las aguas freáticas son de vital importancia para el sustento y la salud de la mayoría de la población, pues proporcionan casi toda el agua necesaria para uso doméstico, agrícola e industrial, (Connor, 2014). El término de calidad de agua es relativo y solo tiene importancia universal si está relacionado con el uso del recurso.

Para decidir si un agua califica para un propósito particular, su calidad debe especificarse en función del uso que se le da. Bajo estas condiciones, se dice que un agua está contaminada cuando sufre cambios que afectan su uso real o potencial. Los tratamientos de agua para adaptarla a distintos usos con fines específicos juegan un papel muy importante en la actualidad. Son necesarias tecnologías cada vez más confiables, selectivas, eficientes y económicas para que el acceso a la misma sea mayor. Mientras que la cantidad total de agua permanece constante, su demanda es creciente día a día. (Perozo, 2017). Este aumento en la demanda no solo es en cantidad sino también en calidad y la contaminación que las personas producimos en el agua de superficie o subterránea, aumenta en forma alarmante el problema de disponibilidad. La finalidad de

las operaciones de tratamiento y potabilización es obtener aguas con las características adecuadas al uso que se les dé por lo que la combinación y naturaleza exacta de los procesos varía en función tanto de las propiedades de las aguas de partida como de su destino final (Cantera, 2013).

CAPÍTULO 1: FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1 ANTECEDENTES

1.1.1 DESABASTO DEL AGUA EN MÉXICO

El tema de desabasto del agua en México es cada año más preocupante, en la actualidad se cuentan con muchos temas sobre esta problemática en todo el país, desde la península hasta las fronteras con los Estados Unidos, ya que el abastecimiento de este vital recurso es menos alcanzable para cubrir las necesidades básicas de los habitantes. (Fonseca, 2017)

Cada año se ven afectadas más localidades por la frecuente falta del suministro de agua potable y con menor calidad para el uso humano. Como se sabe el agua es utilizada para una diversidad de actividades a nivel mundial; es usado tanto por el ser humano para actividades diarias como en la industria para el proceso o fabricaciones de múltiples productos, la ganadería, además de ser indispensables para el desarrollo económico y social (Ilse, 2015); es por ello que tiene tal importancia el cuidado y uso racional de este líquido vital.

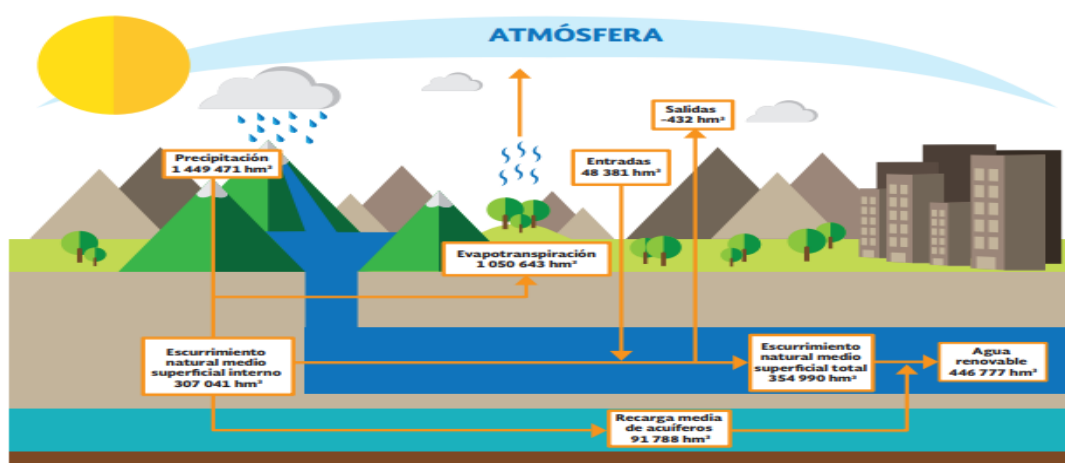
Los estudios realizados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en conjunto del Concejo Nacional de la Población (CONAPO) indican que para el año 2030 la disponibilidad media de agua por habitante se reducirá a 3,705 m³/año.

1.1.2 AGUA PLUVIAL

Sin duda una de las grandes amenazas para el desarrollo económico en los países en vías de desarrollo es la escasez del agua.

Con datos de la Conagua 2016, Actualmente México recibe aproximadamente 1449471 millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, se estima que el 72.5% se evapora y regresa a la atmosfera, el 21.2% escurre por los ríos o arroyos, y el 6.3% restante se filtra al subsuelo de la forma natural y recarga los acuíferos. Tomando en cuenta los flujos de salida y entrada de agua con los países vecinos, el país cuenta anualmente con 446, 777 millones de metros cúbicos de agua dulce renovable. (CONAGUA, 2016)

Como se observa en la siguiente figura 1 donde se describe los componentes y valores que conforman el cálculo del agua renovable.



Fuente: CONAGUA 2016

Figura 1. Valores medios anuales de los componentes del ciclo hidrológico en México, 2015

En la tabla 1 Se muestra la información sobre volúmenes concesionados por entidad federativa.

Tabla 1. Volúmenes concesionados por usos agrupados consuntivos 2015 (hm³)

Clave	Entidad federativa	Volumen concesionado	Agrícola	Abastecimiento público	Industria autoabastecida	Energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad
1	Aguascalientes	622.3	479.5	127.1	15.7	0
2	Baja California	3049.2	2587.5	187.5	82.8	191.5

3	Baja California Sur	422.3	339.3	64.8	13.9	4.3
4	Campeche	1201.9	1030.4	143.9	23.9	3.6
5	Coahuila de Zaragoza	2038.9	1648.4	239.7	75.9	74.9
6	Colima	1792.6	1668.6	97.3	26.7	0
7	Chiapas	1970.7	1541.4	389	40.3	0
8	Chihuahua	5159.8	4588.8	489.8	53.7	27.5
9	Distrito Federal	1122.6	1.2	1089.6	31.8	0
10	Durango	1565.3	1366.5	170.5	16.8	11.5
11	Guanajuato	4094.6	3454.2	547.2	72.6	20.5
12	Guerrero	4428.7	900.5	384.2	21.9	3122.1
13	Hidalgo	2370.8	2093.2	162.9	32.1	82.6
14	Jalisco	4985.2	3712	1061.8	211.3	0.1
15	México	2744.1	1173.3	1358.4	181.8	30.6
16	Michoacán	5436.8	4792.1	373.1	223.6	47.9
17	Morelos	1313.5	986.2	279.3	48	0
18	Nayarit	1332.8	1110.8	115.8	106.2	0
19	Nuevo León	2068.9	1473.3	511.9	83.5	0.2
20	Oaxaca	1322.4	1021.3	266.3	34.9	0
21	Puebla	2122.8	1614.2	428.2	73.9	6.5
22	Querétaro	1010.2	640.4	304.9	59.1	5.7
23	Quintana Roo	1014.9	277.1	212.4	525.3	0
24	San Luis Potosí	2058.8	1337.9	655.1	34.7	31
25	Sinaloa	9542.1	8989.9	509.2	43	0
26	Sonora	7027.1	6130.6	770.3	109.7	16.5
27	Tabasco	496.2	224.6	183.8	87.8	0
28	Tamaulipas	4215.1	3710	334.9	114.9	55.5
29	Tlaxcala	269.5	162.8	89.5	17.1	0
30	Veracruz	5287	3232.8	551.3	1095.2	407.8
31	Yucatán	1983.4	1673.2	255.8	45.3	9.1

32	Zacatecas	1593.6	1397.3	124.3	72	0
Total		85664.2	65359.5	12480	3675.5	4149.3

Fuente: CONAGUA 2016

1.1.3 DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN MÉXICO

El uso agrupado para abastecimiento público consistente en el agua entregada por las redes de agua potable, las cuales abastecen a los usuarios domésticos (domicilios), así como a diversas industrias y servicios.

En el uso agrupado abastecimiento público de la fuente predominante es la subterránea con el 58.6% del volumen, como se muestra en la figura 2. Cabe destacar que del 2006 al 2015 el agua superficial asignada, pero para el uso del agua creció un 32.3%(CONAGUA 2016)

En México, el servicio de agua potable, drenaje, alcantarillado. Tratamiento y disposición de agua residual está a cargo de los municipios, generalmente a través de organismo operadores.



Fuente: CONAGUA 2016

Figura 2. Evolución del volumen concesionado de uso agrupado abastecimiento público por tipo de fuente 2006-2015 (miles de hm³)

En México existe una gran variación de climas, por ello es que en algunas zonas el desabasto de agua es mayor que a las zonas donde hay precipitaciones recurrentes, sin embargo, como bien se sabe, el agua que abastece a la población es principalmente la que se extrae de los mantos acuíferos, los cuales ya se encuentran sobre explotados, este efecto es causado por la gran cantidad de habitantes que viven en México. (Báez, 2007)

1.1.4 PRECIPITACIÓN DEL AGUA EN MÉXICO

La precipitación normal del país en el periodo de 1981-2010 fue de 740 milímetros. Los valores normales, de acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM), corresponden a los promedios calculados para un periodo uniforme y relativamente largo, el cual debe tener como mínimo 30 años de recabar información, lo cual se considera como un periodo climatológico mínimo representativo. (CONAGUA, 2016)

En la tabla 2 se muestra el comportamiento de la precipitación pluvial por mes durante el periodo 1981-2010

Tabla 2. Precipitación pluvial normal mensual 1981-2010 (mm)

Número de RHA	Ene	Feb	Mar	Abr	Ma	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anua l
I	20	19	14	4	1	1	10	26	32	11	10	20	168
II	24	21	12	6	4	19	108	103	58	25	17	31	428
III	31	16	8	6	9	66	194	188	142	52	26	29	765
IV	12	8	6	11	48	179	199	197	194	84	15	6	962
V	8	8	6	15	71	230	200	219	249	113	20	7	1139

VI	19	11	11	17	28	40	63	61	64	32	12	15	372
VII	18	9	6	12	27	56	79	71	67	29	11	13	398
VIII	22	11	4	6	23	131	197	180	153	60	13	10	808
IX	26	20	19	38	67	120	137	119	166	89	30	23	855
X	51	40	30	43	84	222	261	264	293	179	97	64	1626
XI	65	54	36	49	135	276	223	265	331	224	109	76	1842
XII	45	35	31	39	90	167	153	173	208	147	72	49	1207
XIII	11	11	12	28	51	109	126	115	110	57	13	6	649
Nacional	25	17	13	18	42	102	134	134	135	69	27	23	740

En la siguiente figura 3 se observa el comportamiento de la precipitación pluvial de los años 2000 al 2015 donde se representa en el estudio una precipitación nominal de 740 mm, por lo que para estimar la cantidad de agua precipitada en Toluca se multiplica la extensión territorial y la precipitación nominal.

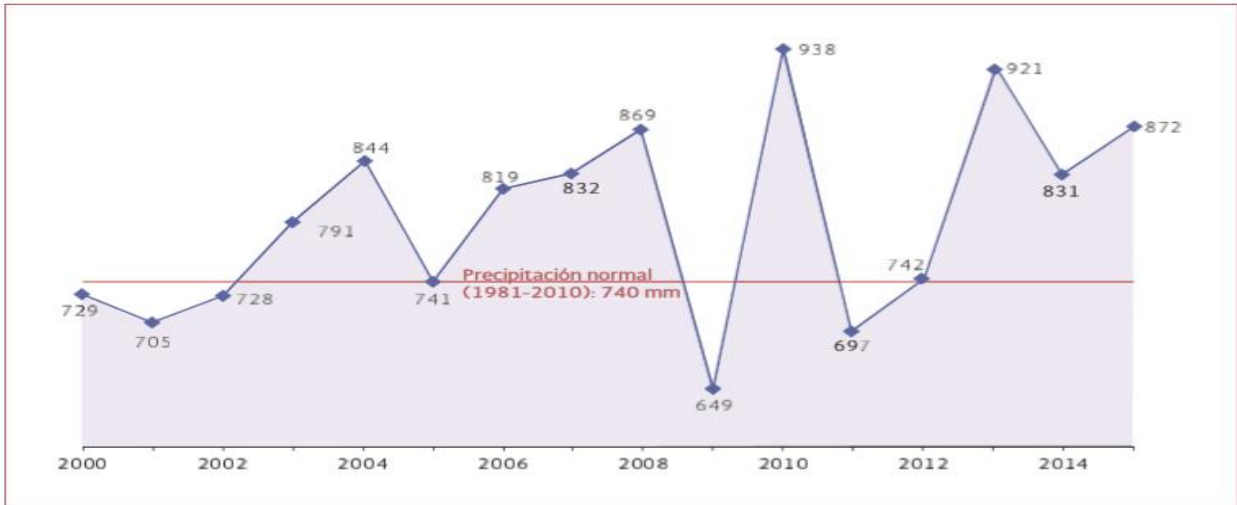
Extensión territorial de Toluca: 452.6 Km

Precipitación nominal: 740mm

$$= 452.6 * 740$$

$$= 334924mm * Km$$

Entonces tenemos que para la ciudad de Toluca se presentó una precipitación al año durante este periodo de 334924 mm*Km.



Fuente: Conagua (2016)

Figura 3. Recipitación pluvial anual 2000-2015 (mm)

1.1.5 REÚSO Y CONDICIONES DEL AGUA

El reúso del agua residual tratada es actualmente un recurso valioso y su demanda aumentará en la medida en que decrezca la disponibilidad y se incremente la necesidad de agua de primer uso. El agua residual tratada para su reúso debe reunir una determinada calidad, la cual está definida según la actividad en la que se va a utilizar o por la normatividad encargada de regular su aprovechamiento y manejo.

En México, principalmente en las grandes ciudades y en las zonas con mayor requerimiento de agua ya se ha presentado la misma situación. Sin embargo, en todo el país tarde o temprano deberán de incrementarse y tomar más peso los programas de uso eficiente y racional del recurso hídrico, los de su conservación y los del reúso. (Connor, 2014)

En algunos sitios de México existen compromisos por el agua, lo que dificulta el reúso, además de manera general las tarifas de agua son bajas lo que en desventaja su tratamiento y reúso. Por estas razones el costo del agua residual tratada se debe comparar con los costos reales de producción de agua potable. (Rea, 2013)

1.1.6 CARACTERÍSTICA DEL AGUA PLUVIAL.

El agua de lluvia en si es el elemento primario del ciclo hidrológico, por lo tanto, es agua que, en teoría, completamente limpia pues es la que recarga los mantos acuíferos y los ríos de donde se extrae el agua.

En el Estado de México, al ser una de las zonas metropolitana más grande y con diversidad de actividades para el desarrollo como es industrial, ganadería entre otras, existe contaminación ambiental que puede afectar la calidad de agua de lluvia. Afortunadamente han implementado medidas contra la contaminación ambiental que han ayudado a reducir las emisiones de contaminantes, y por ende, la calidad del aire en la ciudad.

El Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) de la Ciudad de México muestra una serie de parámetros donde se indica la calidad de aire a lo largo de los años, los parámetros que toman en cuenta para medir la calidad de aire son las concentraciones de ozono, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de azufre, partículas suspendidas totales, plomo en partículas suspendidas totales, partículas menores a 10 mm, partículas menores de 2.5 mm, nitratos y sulfatos. (Rea, 2013)

Por lo tanto, es de suma importancia conocer cuál es la composición química del agua de lluvia que se deriva de los contaminantes antes mencionados, además de su relación con la lluvia acida, por lo que se considera acida cuando los valores disminuyen de 5.0 unidades de pH. (Ilse, 2015)

Los principales componentes de la lluvia según la SMA S. 1999 en la Ciudad de México son: ión nitrato (NO_3^-), ión sulfato (SO_4^{2-}), ión amonio (NH_4^+), ión calcio (Ca^{2+}), ión magnesio (Mg^{2+}), ión sodio (Na^+) y ion potasio (K^+), estos últimos cuatro forman parte de los oligoelementos que son esenciales para la vida, por supuesto en cantidades pequeñas, debido a que en cantidades muy considerables pueden representar un serio problema para la salud. (Rea, 2013)

1.1.7 NORMATIVIDAD

En materia de legislación ambiental para el caso del uso del agua en México existen Normas Oficiales Mexicanas que regulan las características que debe cumplir la calidad del agua para poder ser usada directamente por las personas ya sea en usos secundarios como lo son: limpieza de patios, regar jardines, descargas del retrete, etc. (Ilse, 2015)

La finalidad de estas normas es resguardar el bienestar del medio ambiente y la salud de la comunidad.

En México existen normas que ayudan a identificar las características que debe cumplir el agua para poder ser utilizada por el humano, tal es la NOM-127-SSA1-2017 Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. En las siguientes tablas 3 y 4 se muestran los límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. (García, 2012)

Tabla 3. Límites permisibles de características químicas se expresan en mg/L

CARACTERISTICAS	LIMITES PERMISIBLES
Aluminio	0.2
Arsénico (Nota2)	0.05
Bario	0.7
Cadmio	0.005
Cianuros (como CN ⁻)	0.007
Cloro residual libre	0.2 - 1.5
Cloruros (como Cl ⁻)	250
Cobre	2
Cromo total	0.05
Dureza total (Como CaCO ₃)	500
Fenoles o compuestos fenólicos)	0.3
Hierro	0.3

Fluoruros (como F⁻)	1.5
Benceno	10
Etilbenceno	300
Tolueno	700
Xileno (tres isómeros)	500
Manganeso	0.15
Mercurio	0.001
Nitratos (como N-NO₃⁻)	10
Nitritos (como N-NO₂⁻)	1
Nitrógeno amoniacal (como N-NH₃)	0.5
pH (potencial de hidrógeno)	6.5-8.5
Plaguicidas en microgramos/L Aldrin y dieldrin (separados o combinados)	0.03
Clordano (total de isómeros)	0.2
DDT (total de isómeros)	1
Gamma-HCH (lindano)	2
Hexaclorobenceno	1
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03
Metoxicloro	20
2,4 D	30
Plomo (mg/L)	0.01
Sodio (mg/L)	200
Sólidos disueltos totales (mg/L)	1000
Sulfatos (como SO₄²⁻)	400
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.5
Trihalometanos totales	0.2
Yodo residual libre	0.2 - 0.5
Zinc (mg/L)	5

Fuente: NOM-127-SSA1-2017

Tabla 4. Límites permisibles de características físicas y organolépticas, las cuales se detectan sensorialmente.

CARACTERISTICAS	LIMITE PERMISIBLE
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto.
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultados de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico.
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

Fuente: NOM-127-SSA1-217

Con los parámetros antes mencionados se realizará la caracterización del agua de lluvia antes y después del tratamiento que se propone durante esta investigación, esperando obtener los resultados satisfactorios para que el agua de lluvia sea apta para usos secundarios en el hogar. (Luna, 2015)

Como se menciona en la literatura Luna 2015 como referencia donde se realizó la caracterización del agua bajo la normatividad aplicable como se observa en la siguiente tabla 5 el comparativo de los análisis fisicoquímicos del agua de lluvia vs agua de red municipal obtenidos en el Estado de México (Ilse, 2015)

Tabla 5. Resultados comparativos de los análisis físicos y químicos. Agua de lluvia vs agua de la red municipal y su relación con los límites máximos permisibles (LMP) de la NOM-127-SSA1-2017.

Parámetro	Resultado de agua de lluvia	Dentro de los LMP	Resultado Agua de la Red Mpal.	Dentro de los LMP	Límites permisibles NOM-127-SSA1-1994	Unidades
Cloro libre residual	0.025	X	0.025	X	0.2-1.50	mg/L
Turbiedad	27	X	<0.5	X	5	UTN

pH 22°C	7.3	X	7.15	X	6.5-8.5	Unidades de pH
Conductividad a 22°C	43	X	250	X	NA	µS/ cm
Sólidos disueltos totales	19	X	194	X	1000	mg/L
Nitrógeno Amoniacal	0.7		0.3	X	0.5	mg/L
Nitrógeno de Nitritos	<0.01	X	0.03	X	0.05	mg/L
Nitrógeno de Nitratos	0.4	X	0.46	X	10	mg/L
Cloruros	1.5	X	13.3	X	250	mg/L
Dureza Total	16.5	X	91.25	X	500	mg/L CaCO ₃
Fluoruros	0.2	X	<0.1	X	1.5	mg/L
Sulfuros	7	X	21.83	X	400	mg/L
Hierro	<0.1	X	<0.1	X	0.3	mg/L
Manganeso	<0.1	X	<0.1	X	0.15	mg/L
Zinc	<0.1	X	<0.1	X	5	mg/L

Fuente: (Luna, 2015)

Como se observa en la tabla 5 y por recomendaciones en la literatura es necesario realizar la comparativa o análisis del agua antes y después del tratamiento que se le realiza a las diferentes muestras para poder cumplir con la normatividad NOM-127-SSA1-2017 vigente.

1.2. TECNOLOGÍAS EXISTENTES Y LAS ALTERNATIVAS PARA TRATAMIENTO DE AGUA DANDO CUMPLIMIENTO A LA NORMATIVIDAD VIGENTE.

Existen una gran variedad y tipos de tratamientos para el agua, la principal función de estos tratamientos es el cumplimiento de la normatividad para poder descargar el agua en bienes nacionales. Actualmente ya se emplean los tratamientos como un tren de tratamiento el cual considera que la operación unitaria que se le dé al agua sea para un

reusó en diferentes aplicaciones, a continuación, se describen los procesos a los cuales puede ser sometida el agua para su tratamiento y remoción de diferentes contaminantes. (BONILLA, 2012)

1.2.1 TRATAMIENTO PRIMARIO

Este tipo de tratamiento del agua, llevar a cabo la eliminación o remoción de partículas de tamaño grande o sustancias que no deseamos y que pueden complicar el proceso de tratamiento en las futuras etapas del proceso, esta tiene como caracterización la preparación del agua para su tratamiento. consiste en la eliminación de la materia insoluble como arena, grasas y espumas del agua. Uno de los primeros pasos es la tamización o cribado donde se pretende eliminar los sólidos grandes que entran en el sistema. (GARCÍA, 2016)

1.2.2 TRATAMIENTO SECUNDARIO

Otro de los tipos de tratamiento que se emplea para el proceso del agua es el secundario el cual es diseñado para eliminar esa materia orgánica medida como DBO, que se refiere a todos los procesos existentes biológicos tanto aerobios y anaerobio. Los cuales están diseñados para degradar sustancialmente el contenido biológico del agua residual, el cual deriva de los desechos orgánicos provenientes de residuos humanos, alimentos, jabones y detergentes (Manahan S. , 2006.)

1.2.3 TRATAMIENTO TERCIARIO

También llamado tratamiento avanzado, es un término que se usa para describir una variedad de procesos que se realizan posteriormente al proceso secundario con la finalidad de remover materiales en suspensión, material inorgánico disuelto y

compuestos orgánicos disueltos los cuales requieren de procesos más específicos para ser removidos.

Los procesos químicos en el tratamiento de aguas son empleados principalmente para lograr una mejor calidad del agua y remoción de materiales que contaminan o alteran la composición del agua y que requieren de un proceso más específico para la remoción de los mismos (Rea, 2013).

Estos tratamientos son empleados para mejorar la calidad del agua, removiendo los contaminantes que pueden generar una alteración en el medio ambiente o daño en la salud del ser humano (Manahan S. E., 2007)

1.2.3.1 OZONACIÓN

El ozono es usado en ocasiones como desinfectante en lugar del cloro. Básicamente, el aire se filtra, se enfría, se seca y se eleva la presión, para luego someterlo a una descarga eléctrica. El ozono producido se bombea entonces a una cámara de contacto donde el agua este en contacto con el ozono durante un tiempo, el ozono es más destructivo frente a los virus que el cloro.

El ozono oxida los contaminantes del agua directamente a través de la reacción con O_3 e indirectamente generando el radical hidroxilo ($\cdot OH$), que es un reactivo oxidante fuerte (Manahan S. E., 2007)

1. 2.3.2 LA ELECTROQUÍMICA

La electroquímica es un disciplina científica y tecnológica que tiene como objeto de estudio el diseño y la operación de los equipos y procesos en los que se produce interconversión entre energía química y eléctrica.

Hoy en día es considerada como la principal ciencia para el desarrollo sustentable, porque a través de este método se están creando alternativas tanto para la generación de electricidad (la cual ayuda evitando la quema de combustibles fósiles y reducir el calentamiento global del planeta), también se están desarrollando baterías para autos eléctricos y evitar la creciente contaminación del aire por CO₂ (Cantera, 2013), otra aplicación de esta técnica es para el reciclaje de metales con el proceso de electrorrefinado evitando así la extracción y disminuir el daño a los ecosistemas, la fabricación de medicamentos y polímeros. (Díaz, 2014)

Otra aplicación de la electroquímica es aplicada para el tratando agua residual y purificado del agua, promoviendo su reutilización, la técnica consiste en introducir en el agua contaminada dos electrodos, entre los que se aplica una adecuada diferencia de potencia o una densidad de corriente. (Orozco, 2016)

1.2.3.2.1 ELECTROOXIDACIÓN

La electrooxidación (EO) se puede definir como un proceso electroquímico, mediante el cual es posible oxidar fuertemente los contaminantes refractarios en el agua residuales. En la EO se puede producir una oxidación directa de los productos químicos tratados u oxidación indirecta o mediada.

En la oxidación anódica indirecta, es posible la formación de oxidantes fuertes, tales como el ozono, cloro, hipoclorito y radicales hidroxilos. (GARCÍA, 2016)

1.2.3.2.2 ELECTROCOAGULACIÓN.

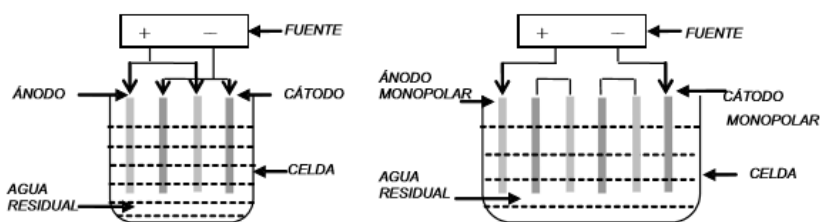
La electrocoagulación es un proceso que utiliza la electricidad para eliminar contaminantes en el agua que se encuentran suspendidos, disueltos o emulsificados, consiste en inducir corriente eléctrica en el agua residual a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales. La corriente eléctrica proporciona la fuerza

electromotriz que provoca las reacciones químicas que desestabilizan las formas en las que los contaminantes se encuentran presentes. Los contaminantes presentes en el medio acuoso forman agregados, produciendo partículas sólidas que son menos coloidales y menos emulsificadas (o solubles). Cuando esto ocurre, los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan y/o flotan y se pueden remover fácilmente por algún método de separación de tipo secundario (Rosales, 2018).

En el proceso de electrocoagulación hay generación de coagulantes in situ por la disolución de iones de aluminio o de hierro de los electrodos. Las generaciones de iones metálicos tienen lugar en el ánodo y en el cátodo hay liberación de burbujas de hidrógeno gaseoso las cuales ayudan a la flotación de las partículas floculadas, las mismas que serán retiradas posteriormente (Perozo, 2017).

El reactor utilizado para realizar la electrocoagulación en una operación por batch, en su forma más simple, está formado por una celda electroquímica con un ánodo y un cátodo dispuestos en forma vertical y conectados a una fuente de energía externa. El material anódico se corroe eléctricamente debido a la oxidación, mientras que el cátodo permanece pasivo. El diseño formado por un par de electrodos, no es el más adecuado a la hora del proceso ya que para obtener una adecuada disolución del metal se requiere de electrodos de gran área superficial, es por esta razón que se utilizan celdas con electrodos monopolares en paralelo o conectados en serie.

El sistema para la electrocoagulación requiere de una fuente de corriente directa, un regulador de densidad de corriente y de un multímetro para leer los valores de corriente. En la Figura 4 se muestran dos reactores para electrocoagulación con electrodos en paralelo. (Arango, 2015)



Fuente: (Arango, 2015)

Figura 4. Reactores para la electrocoagulación tipo batch en paralelo y en serie

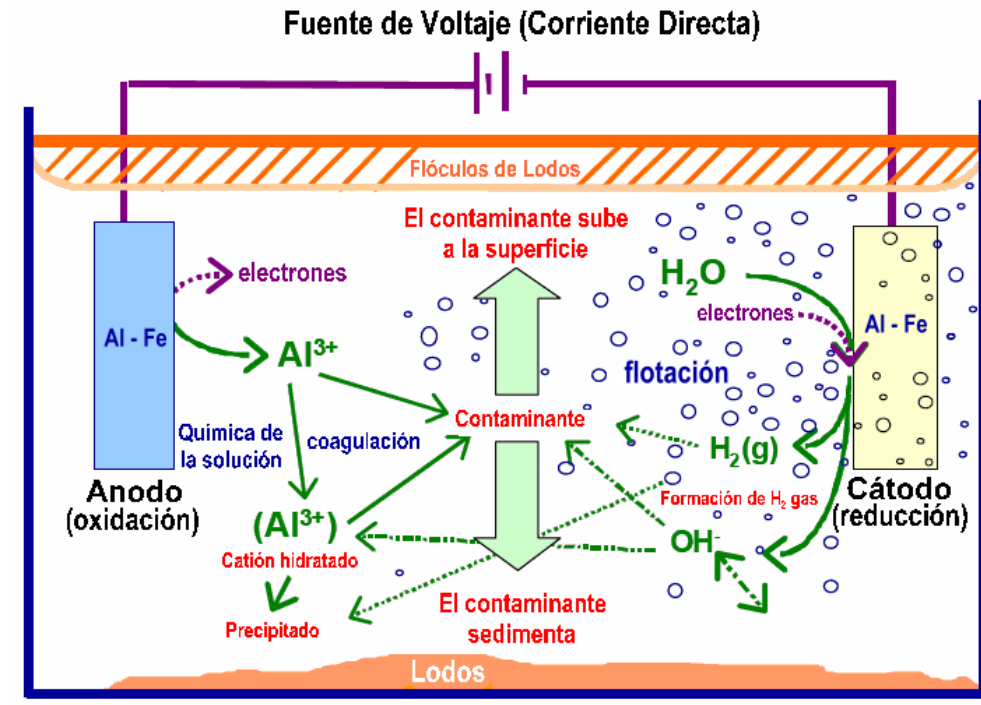
La coagulación asistida electroquímicamente es llamada electrocoagulación (EC), es un proceso electroquímico en el que, a partir de compuestos procedentes de la disolución de un ánodo, se agrupa la materia coloidal existente en un agua residual, lo que posibilita su conversión en partículas suspendidas y su separación del agua mediante técnicas convencionales de separación sólido/líquido. (Díaz, 2014)

Durante la electrólisis ocurren una serie de procesos físicos y químicos que se pueden describir de la siguiente manera:

El polo positivo sufre reacciones anódicas

El polo negativo sufre reacciones catódicas.

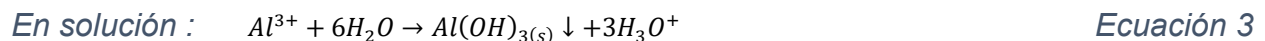
Las placas de metal, como se observa en la figura 5 donde se muestra un sistema básico de proceso de electrocoagulación. Algunos de los metales tales como hierro o aluminio son utilizadas como electrodo de sacrificio o placa consumible que aporta iones al sistema. Estos iones liberados neutralizan las cargas de las partículas desestabilizando los sistemas de suspensión de los contaminantes dando inicio a la coagulación. (Yousuf, 2001)



Fuente: (Cantera, 2013)

Figura 5. Sistema básico de electrocoagulación

Los iones liberados remueven cualquier contaminante, bien sea por reacción química y precipitación o agregando materiales coloidales que bien pueden flotar o precipitarse. Además, como el agua contiene partículas coloidales, aceites u otros contaminantes, éstos se mueven a través del campo eléctrico aplicado y pueden ionizarse, sufrir reacciones de electrólisis o de hidrólisis o formar radicales libres que alteran las propiedades físicas y químicas del agua y de los contaminantes, resultando en un estado reactivo y excitado lo cual es causa de la liberación, destrucción o insolubilidad de los contaminantes. El mecanismo propuesto para la producción de coagulante utilizando Al como ánodo se presenta a continuación.



La oxidación electroquímica en el ánodo (ecuación 1) y la reducción del agua en el cátodo (ecuación 2), provocan un cambio significativo en el pH del medio y sobre todo sobre las superficies de los electrodos. Esto se hace especialmente importante en el cátodo donde el pH puede resultar fuertemente alcalino (> 9.5). Para confirmar el papel que juega la disolución química, se ha propuesto un modelo que considera los procesos de disolución anódica, tanto química como electroquímicamente. (Beril, 217)

También para el Al disuelto (química o electroquímicamente) es posible describir la formación de algunas especies monoméricas en dependencia del pH que alcance la disolución; algunas de estas especies se indican en las reacciones siguientes.



Para aumentar la eficiencia de remoción de los iones indeseables, se puede hacer pasar el agua residual a través de una serie de celdas que tienen electrodos compuestos de varios metales. Los parámetros como pH, conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción deben ser ajustados de acuerdo con el tipo de contaminantes (Kobya, 2015).

1.2.3.4.3 FACTORES QUE AFECTAN LA ELECTROCOAGULACIÓN

Las variables que afectan las reacciones electroquímicas en la EC, han sido investigadas mediante experimentos, los cuales han consistido en mantener constante ciertas variables y observar la variación de otras (Cantera, 2013).

Densidad de corriente: El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de aluminio Al^{3+} o hierro Fe^{2+} liberados por los respectivos electrodos. Cuando se usa una corriente demasiado grande, hay una transformación de energía eléctrica en energía calórica que calienta el agua. Una densidad de corriente demasiado grande produciría una disminución significativa en la eficacia. La selección de la densidad de corriente podría realizarse teniendo en cuenta otros parámetros de operación como pH y temperatura. (Taeyeon, 2020)

El NaCl: Aumenta la conductividad eléctrica del agua residual. Se ha encontrado que los iones de cloruro pueden reducir los efectos adversos de iones como HCO_3^- y SO_4^{2-} pues la presencia de iones carbonatos o sulfatos pueden conducir a la precipitación de Ca^{2+} y Mg^{2+} produciendo una capa insoluble depositada sobre los electrodos, que aumentaría el potencial entre los electrodos decreciendo así la eficiencia de la corriente. Se recomienda, sin embargo, que para un proceso de electrocoagulación normal se mantengan cantidades de Cl^- del 20%. (Ramazan, 2019)

pH: El efecto del pH en la electrocoagulación se refleja en la eficiencia de la corriente y se relaciona con la disolución del hidróxido del metal, se ha encontrado que el rendimiento del proceso depende de la naturaleza del contaminante y la mejor remoción se ha observado para valores de pH cercanos a 7 (Taeyeon, 2020). No obstante a pH neutral el consumo de energía es alto, debido a que hay variación de la conductividad eléctrica. Cuando la conductividad eléctrica es alta, el efecto del pH no es significativo. El pH después de la electrocoagulación podría incrementarse para aguas residuales ácidas, pero decrecer para aguas alcalinas. El incremento de pH a condiciones acidas ha sido atribuido a la reacción del hidrógeno en el cátodo (Cantera, 2013).

Temperatura: Los efectos de la temperatura sobre la electrocoagulación no han sido muy investigados, pero se ha encontrado que la eficiencia en la corriente incrementa inicialmente hasta llegar a 60°C punto donde se hace máxima, para luego decrecer. El incremento de la eficiencia con la temperatura es atribuido al incremento en la actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio de la superficie del electrodo. (Díaz, 2014)

1.2.4 ESTADO DEL ARTE PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA DE LLUVIA

En la tabla 6 se describe algunos de los principales estudios que se han realizado y que nos ayudan como antecedentes para el presente estudio.

Tabla 6. Estado del arte de los estudios realizados durante los últimos años.

Autor/Año	Proceso	Condiciones de operación.	Resultados
(Khayan, 2019)	Dispositivos para el tratamiento de agua de lluvia, reducir el contenido de plomo, turbidez y aumentar el pH.	Concha de pescado filtrante Carbón activado Tiempo de tratamiento: 12 meses Muestras de agua rural y urbana.	95% de eficiencia en la remoción de metales. 40% de remoción de turbiedad. pH aumentó de 5.4 a 7.01
(An Ding, 2018)	Filtración por membrana accionada por gravedad (GDM)	Capa de arena de sílice en el rendimiento de baja presión. Proceso de filtración por membrana accionada por gravedad (GDM) Se trató 1L de agua con 1.13g de partícula en la membrana, mezclado a 120rpm durante 72 h a 20°C para eliminación de aromáticos proteínas, proteínas de triptófano y eliminación de humics.	La presencia de una capa de carbón activado en polvo (PAC) mejoró la eliminación de compuestos orgánicos en casi un 20%,. DOC se eliminó 3.5mg/L. La concentración disminuye 2 mg/L los primeros 30 días y al final de la filtración fue de 1.5mg/L
(Aljerf, 2018)	Un nuevo filtro de PVC lleno de vidrio reciclado y vidrio de espuma triturada en la eliminación de los principales contaminantes en el agua de lluvia.	Aseguraron que el agua de lluvia de las muestras recogidas al mismo tiempo no tiene la misma matriz y las matrices difieren según la ubicación de las lluvias, orográficas, sitios topográficos, condiciones meteorológicas, macrocondiciones climáticas (es decir, altitud, ocurrencia nutricional ambiental, temperatura, humedad y luz	Mostró cationes alcalinos dominantes en el siguiente orden descendente: Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ . Las especies aniónicas también fueron reconocidas en esta secuencia: HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , Cl ⁻ . Estas distribuciones suelen atribuirse a los entornos urbanos áridos y semiáridos
(Elazzouzi, 2018)	Un novedoso proceso de electrocoagulación que utiliza bordes aislados de electrodos de Al para mejorar el tratamiento de aguas residuales urbanas	RD (EC) Densidad de 20mA/cm ² , tiempo de operación de 6 min y temperatura inicial de 45 ° C para fósforo (P) y 55 ° C para DQO.	Las eficiencias de eliminación de DQO y P aumentaron a 87% y 99%, respectivamente. el consumo de energía se redujo

JUSTIFICACIÓN

El agua es sin duda uno de los más preciados bienes que la naturaleza otorga a todos los habitantes de este planeta, toda vez que la vida depende de su disponibilidad en cantidades adecuadas no solo para la supervivencia de las especies sino también para el bienestar y confort.

En ninguna de las ciudades de la república mexicana existe una cultura generalizada de cuidar el agua y su empleo es irracional, con niveles altos de desperdicio cotidiano, de manera que sin importar el costo del agua que se distribuye en la red municipal, la mayoría de las familias malgasta el agua.

Actualmente las concesiones de agua serán privatizadas y como efecto inmediato traerá con ello el aumento del costo de agua extraída, sabiendo que el tratamiento de agua pluvial tiene como beneficio que no requiere ningún sistema de distribución ya que llega de manera gratuita a todos los hogares, considerando ambas cuestiones es por lo que se propone el tratamiento del agua pluvial para el hogar.

Con base en lo anterior se propone realizar un proyecto para el tratamiento del agua pluvial para poder usarla en las actividades secundarias en el hogar y lograr que beneficie a la sociedad.

HIPÓTESIS

El tratamiento electroquímico permitirá que el agua de lluvia cuente con la calidad suficiente para servicios secundarios domésticos.

OBJETIVO

OBJETIVO GENERAL

Evaluar un sistema de captación y aprovechamiento de agua de lluvia mediante su tratamiento por métodos electroquímicos, uso en actividades secundarias en el hogar.

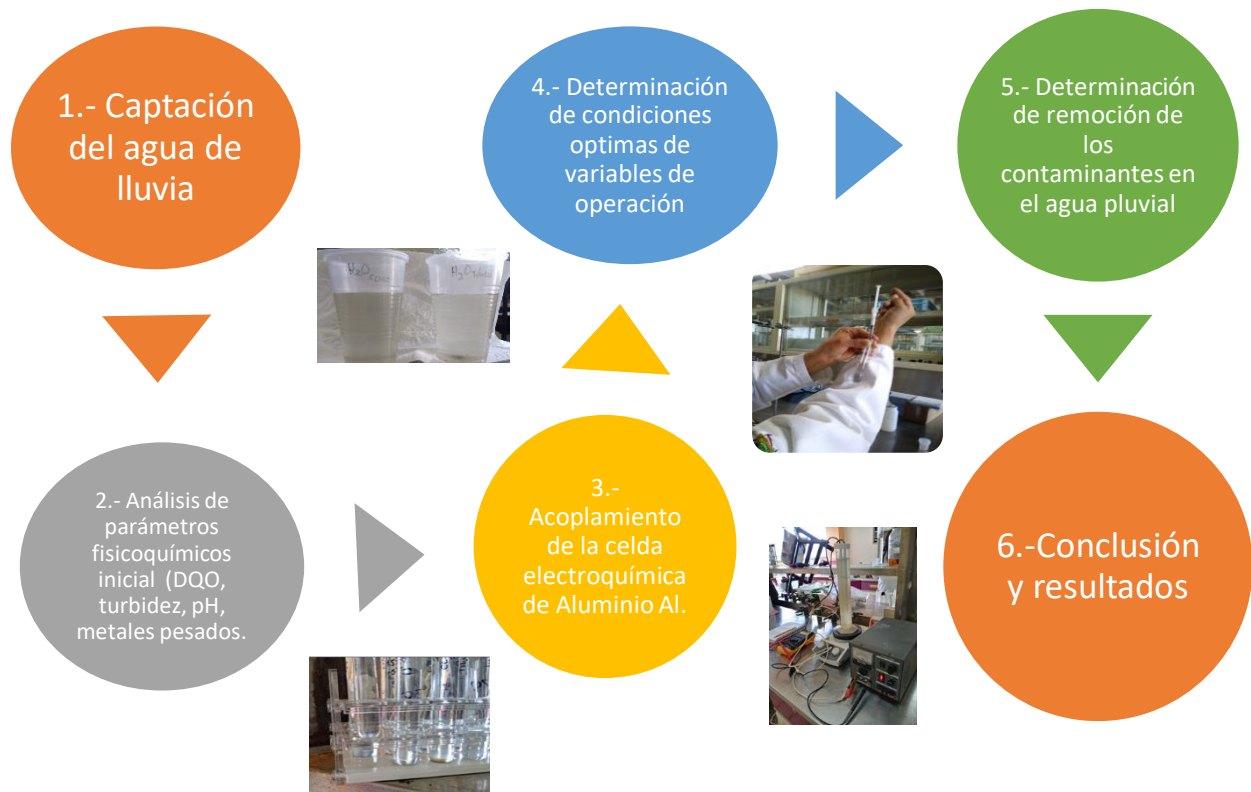
OBJETIVOS PARTICULARES

1. Analizar las características de la precipitación: datos pluviométricos, determinación de agua por precipitación promedio mensual.
2. Evaluar la calidad del agua de lluvia captada antes y después del tratamiento, con base en algunos parámetros primordiales de la DQO, Turbidez, Color, pH, conductividad, alcalinidad en referencia a los límites permisibles del agua para uso y consumo humano que se establece.
3. Determinar las condiciones óptimas de operación del tratamiento electroquímico: pH, densidad de corriente, electrolito soporte, relación área/volumen de los electrodos.

2 METODOLOGÍA.

En este apartado se describe por medio de un esquema en la figura 7 la parte experimental donde se realizarán una serie de pruebas y análisis.

En el siguiente diagrama se muestra la metodología general de la investigación a seguir para el tratamiento del agua de lluvia mediante un proceso electroquímico de electrocoagulación con Al.



Creación propia

Tabla 7. Diagrama de la metodología de la investigación.

2.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

2.1.1 CAPTACIÓN DE AGUA Y TOMA DE MUESTRA

El muestreo es un aspecto importante a considerar, ya que, dependiendo del área o de la ubicación, se espera entonces la diferencia entre las muestras tomadas, dado que las características del aire serán diferentes por las actividades que son realizadas por el hombre, es por ello que se propone realizar el muestreo en dos zonas; una rural y la otra urbana.

La rural está ubicada en:

Coordenadas 19°40'04.93''N y 99°71'56.69''E

La urbana está ubicada en:

Coordenadas 19°22'43.7''N y 99°33'56.2''O

La captación de la muestra se realizará a cielo abierto, en recipiente de polipropileno de alta densidad, con capacidad de 20L, la captación del agua pluvial estará formado por la recolecta de agua de tres días diferentes, logrando así tener una muestra de mezcla compuesta.

2.1.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS

Después de haber realizado la captación del agua y obtener una muestra de mezcla completa formada por la precipitación pluvial de 3 días diferentes se procederá a la caracterización de la muestra y los parámetros fisicoquímicos del agua se realizaron según métodos de análisis estándar (APHA, 2019) de la cual se pretende obtener.

Los parámetros analizados fueron Demanda Química de Oxígeno (DQO mg/L), pH, Conductividad eléctrica (μS), Turbidez y presencia de metales incluidos Aluminio (Al), Sodio (Na), Hierro (Fe), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Plomo (Pb), Zinc (Zn). Los cuales

se realizarán bajo la norma NOM-127-SSA1-2017. Estos parámetros físico - químicos se evaluarán también después del tratamiento.

2.2 OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO Y CARACTERIZACIÓN

Para llevar a cabo el proceso electroquímico se usará un prototipo ya existente de forma circular tipo BATCH en el cual se usarán electrodos de Al, de la parte del experimento se pretende determinar:

- ✓ El tiempo necesario para la reacción.
- ✓ La densidad de corriente.
- ✓ El electrolito soporte

La densidad de corriente, es la intensidad de corriente por unidad de área de los electrodos. Este parámetro es importante ya que se determina la cantidad de corriente que se debe aplicar para hacer pasar por los electrodos y estimar la cantidad, en este caso será la cantidad de Aluminio (Al), pero este factor también depende de las dimensiones de los electrodos y la distancia que debe existir entre cada uno de ellos, para poder estimar tanto cantidad de corriente como la cantidad de material desprendido en la muestra.

Para conocer el tiempo en el cual se pretende tener la reacción en la muestra, se realizó a diferentes tiempos encontrando el tiempo óptimo de reacción, pero poder determinarlo, las muestras serán sometida a diferentes tiempos desde 0 minutos hasta 15 minutos esperando que la reacción se dé dentro de este rango de tiempo.

Y las características que se evalúan para comprobar el adecuado proceso son: DQO, Turbiedad y pH. En la tabla 8 se describen las variables de operación

Tabla 8. Variables de operación y respuesta con la definición.

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	TIPO DE VARIABLE	ESCALA DE MEDICIÓN/ UNIDADES	ANÁLISIS DE RESULTADOS
Intensidad de corriente	Una magnitud vectorial que tiene unidades de corriente eléctrica por unidad de superficie, es decir, a la intensidad por unidad de área.	Determina la proporción de corriente optima que al pasar por electrodos y en contacto con el medio acuoso remueve la mayor cantidad de contaminantes.	Cuantitativa	A	Cantidad de corriente. Superficie de respuesta; Media, máximos y mínimos
Tiempo de tratamiento	Periodo de tiempo en lo que se logra la mejor remoción de contaminantes	Intervalo de tiempo optimo determinado durante el que entra en contacto con el electrodo de aluminio se hace la remoción de los contaminantes del agua	Cuantitativa	min	Superficie de respuesta. Media, máximos y mínimos.
Electrolito soporte	Tipo de compuesto o reactivo que mejora la conductividad en el circuito	Tipo de reactivo que favorece la conductividad en el medio para la mejor remoción	Cuantitativa	Tipo	Superficie de respuesta. Media, máximos y mínimos.

2.2.1 TÉCNICAS ANALÍTICAS

Se llevó a cabo el análisis fisicoquímico de las muestras de agua de lluvia antes de someterla al tratamiento, en el Laboratorio Calidad del Agua del Instituto Interamericano y Tecnológico de Ciencias del Agua (IITCA), para conocer sus propiedades físicas y químicas, antes del tratamiento optimizado.

DQO

Este parámetro ayuda a medir los compuestos orgánicos presentes en el agua y se define como el número de equivalentes de oxígeno requerido para oxidar químicamente la materia orgánica presente en el agua. Esta determinación se realiza por la norma NMX-AA-030-SCFI-2001.

El pH

Este indica la cantidad de iones hidrogeno presentes en determinadas disoluciones, y es determinado por la norma NMX-AA-008-SCFI-2000.

Alcalinidad

La alcalinidad es la capacidad cuantitativa del agua para reaccionar con los iones hidrógenos y es determinada bajo la NMX-AA-036-SCFI-2001.

Turbiedad

La turbiedad en agua se debe a la presencia de partículas suspendidas y disueltas. Materia en suspensión como arcilla, cieno o materia orgánica e inorgánica finamente dividida, así como compuestos solubles coloridos, plancton y diversos microorganismos y se determina bajo la NMX-AA-038-SCFI-2001.

2.3. MATERIALES Y METODOS.

Reactivos.

El reactivo utilizado como electrolito soporte es:

Sal de mar grado alimenticio (electrolito A)

J.T. Baker Sulfato de sodio Anhidro polvo (Na_2SO_4 PM= 149.04) grado analítico (electrolito B)

Equipos

Los equipos empleados para los análisis físico químicos del agua de lluvia los cuales fueron realizados antes y después del tratamiento, son los siguientes:

Espectrofotometro UV-VIS 1 Modelo: DR 6000 Marca: HACH

Espectrofotometro UV-VIS Modelo: Cary 1E Marca: Varian

Conductímetro CG/EM Modelo: Orion Star A212

Turbidímetro Modelo: micro 100 turbidimeter Marca: Itfscientific.inc

Potenciometro Modelo: ION 7000 Marca: OAKTON

Valanza analítica BEL engineering.

2.4. DISEÑO EXPERIMENTAL

La Tabla 9 muestra el estudio de respuesta que se presenta en el tratamiento de agua pluvial con electrodos de aluminio a la variación de la densidad de corriente y tiempo de respuesta las cuales tuvieron efecto sobre las características y parámetros analizados en la caracterización de las muestras, por tal razón se propone trabajar con un diseño experimental de 2 factores continuo (tiempo y corriente) y factor categórico (tipo de electrolito A y B), con dos bloques de 13 tratamientos cada uno, que permitió encontrar las condiciones óptimas en el tratamiento de electrocoagulación. Cada experimento se realizó bajo los criterios del programa Minitab por superficie de respuesta y el método de diseño compuesto central, las variables de estudio fueron: DQO, Turbiedad, pH.

Tabla 9. Esquema de las corridas que se deben realizar para un factor 2^3 como variable: tiempo de retención (min) y densidad de corriente (A/m^2)

Diseño central compuesto Resumen del diseño

Factores:	2	Réplicas:	1
Corridas base:	13	Total de corridas:	13
Bloques base:	1	Total de bloques:	1

$$\alpha = 1.41421$$

Factorial de dos niveles: Factorial completo

Resumen del diseño			
Factores:	2	Réplicas:	1
Corridas base:	13	Total de corridas:	13
Bloques base:	1	Total de bloques:	1

TABLA DE DISEÑO

Corrida	A	B	C
1	-1	-1	1
2	1	-1	1
3	-1	1	1
4	1	1	1
5	-1.41421	0	1
6	1.41421	0	1
7	0	-1.41421	1
8	0	1.41421	1
9	0	0	1
10	0	0	1
11	0	0	1
12	0	0	1
13	0	0	1
14	-1	-1	2
15	1	-1	2
16	-1	1	2
17	1	1	2
18	-1.41421	0	2
19	1.41421	0	2
20	0	-1.41421	2
21	0	1.41421	2
22	0	0	2
23	0	0	2
24	0	0	2
25	0	0	2
26	0	0	2

El diseño central compuesto nos ayuda a determinar las condiciones óptimas de operación,

En la tabla 9 se visualiza el número de corridas y las posibles combinaciones de las variables de operación que mejor resulten de todo el diseño de experimentos.

3. RESULTADOS.

3.1 ARTICULO CIENTÍFICO

Optimization of the electrocoagulation process with aluminum electrodes for rainwater treatment

Alejandra Morales-Figueroa¹, Ivonne Linares-Hernández², Verónica Martínez-Miranda², Gabriela Roa-Morales^{1*}, Elia Alejandra Teutli-Sequeira^{3*}, A. García-Morales¹

¹Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Química. Paseo Colón S/N, Residencial Colón y Col Ciprés, 50120 Toluca de Lerdo, Méx.

² Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias de Agua (IITCA), Universidad Autónoma del Estado de México, Unidad San Cayetano, Km.14.5, carretera Toluca-Atlacomulco, C.P 50200 Toluca, Estado de México, México

³Cátedras CONACYT-IITCA

Ivonne Linares Hernández <https://orcid.org/0000-0001-7302-8491>

Verónica Martínez Miranda <https://orcid.org/0000-0003-4977-9249>

Gabriela Roa Morales <https://orcid.org/0000-0001-7355-2568>

Elia Alejandra Teutli-Sequeira <https://orcid.org/0000-0002-0633-8892>

Corresponding authors:

Elia Alejandra Teutli-Sequeira * aleteutlis@gmail.com

Gabriela Roa Morales * groam@uaemex.mx

*Both authors contributed equals.

3.2. CORREO DE RECEPCIÓN

De: **WATE** <em@editorialmanager.com>
Date: jue, 14 de ene. de 2021 a la(s) 02:39
Subject: WATE-D-21-00075 - Submission Confirmation
To: ELIA ALEJANDRA TEUTLI-SEQUEIRA <aleteutlis@gmail.com>

Dear Dr TEUTLI-SEQUEIRA,

Thank you for submitting your manuscript,
"Optimization of the electrocoagulation process with aluminum electrodes for rainwater treatment", to
Water, Air, & Soil Pollution

The submission id is: WATE-D-21-00075
Please refer to this number in any future correspondence.

During the review process, you can keep track of the status of your manuscript.

Your username is: aleteutlis@gmail.com
If you forgot your password, you can click the 'Send Login Details' link on the EM Login page at
<https://www.editorialmanager.com/wate/>.

If your manuscript is accepted for publication in Water, Air, & Soil Pollution, you may elect to submit it
to the Open Choice program. For information about the Open Choice program, please access the
following URL: <http://www.springer.com/openchoice>

Alternatively, please call us at 001-630-468-7784 (outside the US)/(630)-468-7784 (within the US)
anytime from Monday to Friday.
Thank you very much.

With kind regards,
Journals Editorial Office WATE
Springer
P.O. Box 990
3300 AZ DORDRECHT
The Netherlands
Fax: +31 78 657 6555

4 RESULTADOS NO PUBLICADOS

Como parte fundamental del presente estudio se realizaron diferentes pruebas las cuales nos ayudaron a determinar y conocer las condiciones de trabajo, así como los materiales que se necesitaban y que favorecían al proceso.

Durante estas primeras pruebas se realizaron pruebas piloto a pequeña escala trabajando con pares de electros de cobre, hierro y aluminio, los electrodos tenían las siguientes medidas: de $2\text{cm} * 3\text{cm} * 1\text{mm}$; cada uno de los pares de electrodos se encontraba a 1cm de distancia, en utilizó recipientes de 150 mL colocando 100mL de cada una de las muestras, las variables de operación fueron intensidad de corriente de 0.05 A y tiempo de 7min. Se obtuvieron los siguientes resultados.

Con los electrodos de Cobre se noto un ligero cambio en la apariencia teniendo un valor de pH de 6.9 y una turbiedad de 6 NTU en la figura 6.

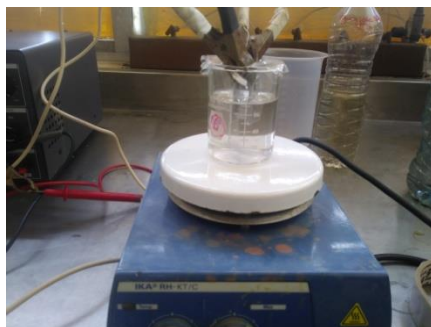


Figura 6. Tratamiento electroquímico con electrodos de Cobre.

Con los electrodos de aluminio se observó un mayor cambio en la apariencia, teniendo un valor de pH de 7.3 y una turbiedad de 3 NTU. Como se muestra en la figura 7.

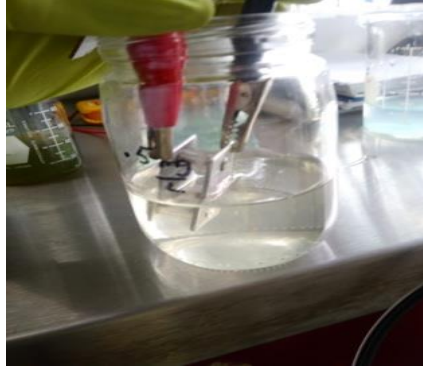


Figura 7. Tratamiento electroquímico con electrodos de Aluminio.

Con los electrodos de Hierro como se muestra en la figura 8 se obtuvieron los siguientes resultados; la apariencia cambio y el pH aumento a 6.7 y una turbiedad de 7 NTU. El hierro tras la oxidación en un sistema electrolítico produce hidróxido de hierro, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ como se observa en las eq.



Figura 8. Tratamiento electroquímico con electrodos de Hierro.

Después de la realización de pruebas preliminares y del análisis de las reacciones respectivas de los diferentes metales en el medio acuoso, se decide trabajar con electrodos de Aluminio escalándolos para el tratamiento de 500ml, tomando como referencia las dimensiones de los electrodos de prueba.

5. DISCUSIÓN GENERAL

El reactor utilizado para realizar la electrocoagulación en una operación por batch, en su forma más simple, está conformado por una celda electroquímica con un ánodo y un cátodo de aluminio puestos en forma vertical y conectados a una fuente de energía externa.

Los valores para la operación; densidad de corriente 0.15 A tiempo del tratamiento de 15min y variables de respuesta DQO, Turbiedad del sistema se determinaron con pruebas previas y se concluye que son las siguientes:

Las variables de respuesta ayudan a conocer el buen funcionamiento de la celda electroquímica y a optimizar los recursos y materiales empleados en el desarrollo del diseño de experimentos en este proyecto empleando el diseño central compuesto con 2 factores categóricos.

La remoción de los contaminantes presentes en el agua pluvial fue eficiente en 100 % para Turbiedad y DQO, por el coagulante insitu que se genera en el sistema electroquímico; otorgando al agua características muy aceptables por debajo de lo permitido en la normatividad aplicada en México para el uso humano.

La utilización del electrólito soporte como sal de mar que complementa la calidad del agua, se considera más natural y es el que más favorece la eficiencia de la celda electroquímica.

El consumo energético requerido durante el proceso electroquímico fue de 0.18 kW/m³ y el costo energético para tratar cada metro cubico de agua de lluvia es de \$0.376 MXN.

La remoción del Al y metales pesados que se describen en la caracterización inicial del agua de lluvia, tienen un porcentaje de remoción como lo son: Al (100%), Mn (84.3%), Zn (98%), Fe (21.9%), Pb (46.7%)

6 CONCLUSIONES Y APORTACIONES

El sistema electroquímico como alternativa para el tratamiento de agua de lluvia logró hacerla apta para las actividades secundarias en el hogar o en sistemas de riego.

Los tiempos de tratamiento del agua de lluvia son cortos (15 min) y con un excelente porcentaje de remoción de 100% de turbiedad, DQO, Al, y otros metales pesados como Mn (84.3%), Zn (98%), Fe (21.9%), Pb (46.7%) entre otros contaminantes.

Cabe mencionar que la cantidad de energía suministrada a los electrodos de aluminio fue de 0.18 kW/m^3 , considerando que es un consumo bajo para el tratamiento del agua de lluvia. También existe la alternativa de hacer uso de una fuente, la cual proviene de un panel de celdas solares, ésta carga la batería para hacer pasar posteriormente la energía a los electrodos.

Lo lodos corresponde tan sólo 5 mg/L generados del total del volumen tratado.

Este tratamiento es una alternativa en comparación a las que actualmente se realizan con filtros de arena y carbón, para el tratamiento de agua pluvial.

Con la caracterización del agua al final de tratamiento el pH se incrementa a 8.26 ± 0.5 . la presencia de metales fue removida favorablemente, y la DQO fue removida al 100% al igual que la turbiedad, y al usar sal de mar como electrolito soporte y por la formación de cloro gas, puede generarse la desinfección del agua; por lo que se sugiere que antes de emplearla para consumo humano se debe realizar una etapa final de filtración y una última etapa de análisis bacteriológicos.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aljerf, L. (2018). ADVANCED HIGHLY POLLUTED RAINWATER TREATMENT. Journal of Urban and Environmental Engineering, 50-58.
- An Ding, J. W. (2018). Effect of PAC particle layer on the performance of. Environ. Sci.: Water Res., 4,48.
- Arango, R. Á. (2015). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento del aguas residueuales,. Lasallista de investigación.
- Báez, R. B. (2007). Chemical composition of rainwater collected at a. ELSEVIER, 61-75.
- Beril, G. Z. (217). Electrochemical tratament of carwash wastewater using Fe and Al electrode. Techno-economic analysis and studge characterization. Elsevier.
- BONILLA, G. L. (ENERO de 2012). PROPUESTA DE INSTALACION HIDRÁULICA SANITARIA PARA LA REUTILIZACION DE AGUAS GRISES Y APROVECHAMIENTO DE AGUA PLUVIAL EN UNIDADES HABITACIONALES UBICADAS EN LA CIUDAD DE MÉXICO . UNIVERSIDAD NACIOAL AUTÓNOMA DE MÉXICO .
- Cantera, C. L. (2013). AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS PLUVIALES. UAM.
- CONAGUA, C. N. (2016). Estadísticas del Agua en México . México .
- Connor, R. K. (2014). Programa Mundial de la Unesco de la evaluación de los recursos hidricos. Obtenido de www.unesco.org/water/wwap: www.unesco.org/water/wwap
- Díaz, C. E. (2014). Aplicaciones electroquímicas. México : Reverté Ediciones.
- Elazzouzi, M. A. (2018). A novel electrocoagulation process using insulated edges of Al electrodes for enhancement of urban wastewater treatment: Techno-economic study. Process Safety and Environment Protection.
- Fonseca, C. R.-D.-F. (2017). Design of optimal tank size for rainwater harvesting systems through. ELSEVIER, 323-335.
- GARCÍA, O. V. (octubre de 2016). TRATAMIENTO SINÉRGICO ELECTROQUÍMICO-OZONO DE RESIDUOS DE LABORATORIO QUE CONTIENEN FENOLFTALEÍNA. Universidad Autonoma del Estadado de México.

- García, V. J. (2012). SISTEMA DE CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO PLUVIAL PARA UN ECOBARRIO DE LA CD. DE MÉXICO. Universidad Nacional autónoma de México. México.
- Ilse, G. O. (2015). Diagnóstico de la calidad del agua pluvial y de la red de abastecimiento municipal. Diseño de un sistema de captación de agua de lluvia y su aceptación en la comunidad de la Facultad de Planeación Urbana y Regional de la UAEMex. Tesis.
- Koby, E. M. (2015). Operating parameters and costs assessments of a real dyehouse wastewater effluent treated by a continuous electrocoagulation process. Chemical Engineering and Processing.
- Luna, E. K. (Mayo de 2015). Diseño de un sistema de captación de agua de lluvia y su aceptación en la comunidad de la facultad de Planeación Humana y Región de la UAEMex. Universidad Autónoma del estado de México.
- Manahan, S. (2006.). Introducción a la química ambiental . Reverte., Primera Ed., México: .
- Manahan, S. E. (2007). Introducción a la ingeniería ambiental. Reverte, Ed. Mexico.
- México, G. F. (2000). NMX-AA-008-SCFI-2000 ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DEL pH - MÉTODO DE PRUEBA (CANCELA A LA NMX-AA-008-1980). Ciudad de México: Diario Oficial .
- México, G. F. (2001). NMX-AA-036-SCFI-2001 ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE ACIDEZ Y ALCALINIDAD EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA (CANCELA A LA NMX-AA-036-1980) . Ciudad de México : Diario Oficial .
- México, G. F. (2001). NMX-AA-036-SCFI-2001. ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE ACIDEZ Y ALCALINIDAD EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA (CANCELA A LA NMX-AA-036-1980). Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.
- México, G. F. (2001). NMX-AA-038-SCFI-2001 ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE TURBIEDAD EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA (CANCELA A LA NMX-AA-038-1981) . Ciudad de México : Diario Oficial .
- México, G. F. (2017). NOM-127-SSA1-2017, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. Ciudad de México.: Diario Oficial de la Federación.
- Mollah, M. Y. (2001). Electrocoagulation (EC)— science and applications. ELSEVIER.
- Orozco, V. M. (21 de Octubre de 2016). TRATAMIENTO SINÉRGICO ELECTROQUÍMICO-OZONO DE. Toluca .

- Perozo, C. R. (2017). Evaluación de la electrocoagulación en el tratamiento de agua potable. *Química Viva*, 56-69.
- Ramazan, K. O. (2019). Comparison of the effects of various supporting electrolytes on the treatment of a dye solution by electrocoagulation process. ELSEVIER.
- Rea, Z. I. (JUNIO de 2013). SISTEMA DE CAPTACIÓN Y APROVECHAMINETO DE AGUA PLUVIAL EN LA UNIDAD TERRITORIAL PARAJE SAN JUAN, DELEGACIÓN IZTAPALAPA. INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL. MÉXICO.
- Rosales, L. C. (2018). Evaluación fisicoquímica y toxicológica de un sistema acoplado de electrooxidación-ozonación para la remoción de Thiodan en agua . Tesis.
- Taeyeon, K.-K. K.-D. (2020). Removal mechanism of heavy metal (Cu, Ni, Zn, and Cr) in the presence of cyanide during electrocoagulation using Fe and Al electrodes. ELSEVIER .
- Yousuf, M. A. (June de 2001). Electrocoagulation (EC) — science and applications. ELSEVIER, 29-41.