



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO  
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TRATAMIENTO DE AGUA DE LLUVIA PARA USO  
DOMÉSTICO INCORPORANDO EL PROCESO DE  
OXIDACIÓN AVANZADA A UN TRATAMIENTO DE  
POTABILIZACIÓN CONVENCIONAL

TESIS  
PARA OBTENER EL GRADO DE  
INGENIERA AMBIENTAL

PRESENTA  
ANDREA MIRELES ROSALES

DIRECTOR  
DR. JOSÉ ALFONZO CANCHÉ UUH

ASESORES  
M.I.A. JUAN CARLOS ÁVILA REVELE  
I.Q. JOSÉ LUIS GUEVARA FRANCO

M.C. JOSÉ MARTÍN RIVERO RODRÍGUEZ  
DRA. NORMA ANGÉLICA OROPEZA GARCÍA



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO  
DIVISIÓN DE  
CIENCIAS E  
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO  
SERVICIOS ESCOLARES  
TITULACIONES

CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, AGOSTO DE 2015



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO  
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TRABAJO DE TESIS BAJO LA SUPERVISIÓN DEL COMITÉ DEL  
PROGRAMA DE LICENCIATURA Y APROBADA COMO REQUISITO  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERA AMBIENTAL

COMITÉ DE TESIS

DIRECTOR:

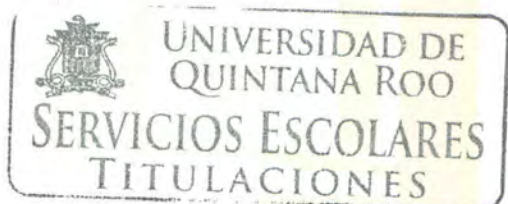
DR. JOSÉ ALFONZO CANCHÉ UUH

ASESOR:

M.I.A. JUAN CARLOS ÁVILA REVELES

ASESOR:

I.Q. JOSÉ LUIS GUEVARA FRANCO



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, AGOSTO DE 2015





Ingeniería  
AMBIENTAL

*A mis padres Gerardo, Claudia y mi  
hermana Amanda.*

## **Agradecimientos**

Mis agradecimientos van para todas personas que han influido en mi vida haciendo posible que llegara hasta esta etapa y la realización de esta tesis.

Al director de esta tesis, el Dr. José Alfonzo Canché Uuh, por su infinita paciencia, amistad, consejos y dirección a lo largo de este trabajo.

A mis asesores y maestros, M.I.A Juan Carlos Ávila Reveles, I. Q José Luis Guevara Franco, M.C José Martín Rivero Rodríguez y Dra. Norma Angélica Oropeza García, por brindarme las herramientas necesarias para formarme en esta licenciatura y continuar mi trabajo fuera de la universidad.

A M.C Jaime Alfredo Castillo Rodríguez y Br. Rosymar Illescas Rivero en el Laboratorio de Química de la Universidad de Quintana Roo por brindarme sus conocimientos, amistad y permitiendo la realización de la etapa experimental de este trabajo en el Laboratorio de Química.

A el Consejo Quintanarroense de Ciencia y Tecnología por permitirme ser beneficiaria de la beca “Apoyo a Asistente de Investigador” en el periodo de Septiembre a Diciembre del 2014.

A mi padres Gerardo y Claudia que sin todo su apoyo y amor incondicional no estaría aquí finalizando esta etapa en la vida.

A mi hermana Amanda que aunque este lejos siempre está allí para apoyarme y hacerme reír.

A mis tíos Miguel Ángel, Bárbara y el resto de la familia Mireles quienes me recibieron con brazos abiertos, ayudándome y brindándome amor incondicionalmente, les estaré por siempre agradecida.

Y a tantas otras personas que aun sin nombrar, no los puedo olvidar, maestros, amigos y compañeros que me acompañaron a lo largo de esta etapa.

# Contenido

- Resumen
- Índice de cuadros
- Índice de figuras

<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>Justificación .....</b>	<b>1</b>
Objetivo General.....	2
Objetivos Particulares .....	2
Introducción .....	3
Agua de lluvia.....	3
El ciclo hidrológico.....	4
La precipitación .....	5
Situación del agua en México .....	7
El agua de lluvia en México .....	8
Historia de la recolección de agua en México .....	9
Situación actual.....	11
Sistemas de Captación. ....	12
Eficiencia de la tecnología.....	13
Tipos de sistemas de recolección.....	13
Componentes de un SCAPT (sistema de captación de agua pluvial en techos). ....	16
Cálculos para el diseño del sistema de captación. ....	19
Potabilización de agua .....	21
Calidad del agua.....	22
Potabilización.....	23
Procesos unitarios involucrados en la potabilización del agua. ....	25
Normatividad .....	31
Procesos de Oxidación Avanzada.....	33
Clasificación de los Procesos de Oxidación Avanzada .....	34

Procesos no fotoquímicos .....	34
Procesos fotoquímicos .....	35
Fotocatálisis .....	37
Método Ultravioleta y agua oxigenada UV-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	37
Parámetros que influyen en el método UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	38
Ventajas y desventajas del método UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	39
Colector solar .....	39
Diseño del Sistema de Captación de agua de lluvia .....	43
<b>Etapa Experimental .....</b>	<b>46</b>
Evaluación de la calidad del agua.....	46
Procesos unitarios en el tratamiento del agua de lluvia .....	51
Descripción del proceso.....	56
<b>Resultados del diseño del sistema de captación.....</b>	<b>57</b>
Resultados de parámetros analíticos de la caracterización del agua de lluvia pretratamiento. ....	60
Resultados de parámetros analíticos posteriores al tratamiento del agua de lluvia. ....	67
Evaluación de la eficiencia del proceso de tratamiento del agua de lluvia. ....	73





## **Resumen**

El agua de lluvia es un recurso hídrico el cual no se aprovecha lo suficiente, su captación y aprovechamiento adecuado puede ser la solución a diversos problemas encontrados actualmente tanto en la calidad como la escases del agua a lo largo de la nación mexicana.

Quintana Roo es un estado privilegiado debido a la red hídrica que posee debajo de su suelo así como la cantidad de los cuerpos de agua en comparación al centro y norte del país. Sin embargo, el aumento de la población así como la demanda y presión hídrica sobre los sistemas de abastecimiento y acuíferos, sin olvidar la contaminación por carencia de un tratamiento adecuado de aguas residuales va generando escases y mala calidad del agua que se le provee a la sociedad.

Las características fisicoquímicas del agua que se obtiene del subsuelo también son un problema en esta región debido a la composición del suelo que genera dureza al agua, el captamiento y aprovechamiento del agua de lluvia puede ofrecer una solución a todos esos casos actuales. Por lo que este trabajo de tesis ofrece una nueva opción de obtención de agua para abastecimiento, siendo el captamiento y tratamiento del agua de lluvia como solución sustentable a los problemas hídricos de la región.

El presente trabajo comienza con la introducción al mismo, ofreciendo una justificación y estableciendo un objetivo general y delimitando los objetivos particulares, lo cual se realiza en base a una investigación bibliográfica posteriormente en un análisis experimental de calidad de agua de lluvia y la evaluación de la eficiencia del tratamiento del agua de lluvia obtenida.

Posteriormente en el segundo capítulo, se describe el estado del arte del agua de lluvia, su situación actual en el país, así como la captación del agua de lluvia, sus componentes y factores de diseño del mismo. De igual manera se describe el proceso de potabilización convencional, los factores relacionados a este, como lo es la calidad del agua, procesos unitarios involucrados y normatividad vigente. Dentro de este capítulo también se explica

la teoría de los procesos de oxidación avanzada haciendo énfasis en el método a utilizar el cual es el método  $UV/H_2O_2$  y teoría sobre los captadores solares.

A partir de lo anterior, en el tercer capítulo, se detalla la metodología a utilizar para cumplir con los objetivos previamente establecidos, se explica el diseño del sistema de captación, construcción del colector solar utilizado para el proceso de oxidación avanzada, el tren de tratamiento propuesto así como los parámetros a analizar antes, después del tratamiento y cálculo de la eficiencia.

Finalmente, se muestran los resultados obtenidos en los análisis de caracterización del agua de lluvia antes del tratamiento así como los resultados después del tratamiento y las conclusiones basadas en dichos resultados.

## **Listado de figuras**

- Figura 1. Ciclo hidrológico.
- Figura 2. Diferencias en la disponibilidad natural media de agua en el territorio mexicano dividido por zonas.
- Figura.3 Proyecciones del agua renovable per cápita en México 2012-2013.
- Figura 4. Precipitación pluvial mensual normal en México (mm).
- Figura 5. Modalidades de captación de agua según el propósito dado al agua.
- Fig.6 Niveles de calidad de agua de la directiva *Directiva 75/440/CEE de la Unión Europea* y los tratamientos correspondientes de cada nivel.
- Figura 7. Rango espectro electromagnético.
- Figura 8. Reflexión solar en un colector cilindro-parabólico compuesto (CPC).
- Figura 9. Diagrama simple de la superficie de aluminio y el tubo foto-reactor en un colector solar estático.
- Figura 10. Metodología utilizada en este trabajo.
- Figura 11. Colector solar para el Proceso de Oxidación Avanzada.
- Figura 12. Tren de tratamiento propuesto para el tratamiento del agua de lluvia.

- Figura 13. Proceso de tratamiento de agua de lluvia, con un reactor de proceso de oxidación avanzada.
- Figura 14. Contenedor del agua de lluvia en el inicio del proceso de tratamiento.
- Figura 15. Filtro standard de papel plisado ROTOPLAS.
- Figura 16. Filtro de resina sintética
- Figura 17. Filtro de papel plisado con carbón activado.
- Figura 18. Reactor del Proceso de Oxidación Avanzada.
- Figura 19. Aireación en el reactor del POA UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>
- Figura 20. Termómetro utilizado para monitorear la temperatura en el reactor del POA

### **Listado de Tablas**

- Tabla 1. Coeficientes de escurrimiento (Ce) de los diferentes materiales en el área de captación.
- Tabla 2. Procesos Unitarios involucrados en el tratamiento preliminar de la potabilización del agua. Procesos de potabilización de agua.
- Tabla 3. Procesos Unitarios involucrados en el tratamiento principal de la potabilización del agua. Procesos de potabilización de agua.
- Tabla 4. Clasificación de dureza de acuerdo a la concentración de carbonato cálcico.
- Tabla 5. Potenciales redox de algunos agentes oxidantes. Tabla 6. Procesos de oxidación avanzada clasificados en procesos no fotoquímicos y procesos fotoquímicos

- Tabla 7. Clasificación de colectores solares.
- Tabla 8. Datos necesarios para la realización de cálculos de diseño del sistema de captación y almacenamiento de agua de lluvia
- Tabla 9. Parámetros analizados y las normas mexicanas donde se indica la metodología utilizada
- Tabla 10. Demanda mensual para número diferente de usuarios.
- Tabla 11. Volumen de almacenamiento mensual con un área de captación de  $86.6712 \text{ m}^2$
- Tabla 12. Diferencias acumuladas de precipitación mensual.
- Tabla 13. Resultados del análisis de los parámetros analíticos para la caracterización.
- Tabla 14. Tabla comparativa entre los resultados del análisis de los parámetros antes y después del tratamiento del agua de lluvia.
- Tabla 15. Comparativa entre la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994 y los resultados obtenidos del tratamiento del agua de lluvia.
- Tabla 16. Resultados de eficiencia de parámetros analizados.
- Tabla 17. Precipitación mensual y anual en los últimos 10 años.

## **Listado de Gráficas**

- Gráfica 1. Parámetros físicos en la caracterización del agua de lluvia.
- Gráfica.2 Parámetros químicos en la caracterización del agua de lluvia.
- Grafica 3. Relación de parámetros de turbiedad y solidos suspendidos totales en la caracterización.
- Grafica 4. Relación entre parámetros de alcalinidad y dureza durante los meses de caracterización
- Gráfica 5. Parámetros microbiológicos en la caracterización del agua de lluvia.
- Gráfica 6. Relación entre parámetros de DBO y SST durante los meses de caracterización del agua de lluvia.
- Grafica 7. Relación entre parámetros de turbiedad y coliformes totales durante los meses de caracterización del agua de lluvia.
- Gráfica 8. Relación de parámetros de temperatura y DBO en la caracterización del agua de lluvia.
- Gráfica 9. Temperatura antes y después del tratamiento
- Gráfica 10. pH antes y después del tratamiento
- Gráfica 11. Sólidos totales antes y después del tratamiento
- Gráfica 12. Turbiedad antes y después del tratamiento
- Gráfica 13. Degradación de la turbiedad en una muestra tratada de agua de lluvia.

- Gráfica 14. Conductividad antes y después del tratamiento
- Gráfica 15. Dureza antes y después del tratamiento
- Gráfica 16. Alcalinidad antes y después del tratamiento
- Gráfica 17. Coliformes totales antes y después del tratamiento.
- Gráfica 18. Coliformes fecales antes y después del tratamiento
- Gráfica 19. Oxígeno disuelto antes y después del tratamiento
- Gráfica 20. Demanda biológica de oxígeno antes y después del tratamiento.





# Capítulo 1.

## Introducción

---

## **Introducción.**

La captación y el aprovechamiento de la lluvia representan solo una de las estrategias en el uso racional del agua. Para lograr éxito en cualquier acción o proyecto, es necesario considerar diversos aspectos, como educación, concientización y capacitación de los usuarios, que permitan desarrollar en la comunidad la cultura del uso eficiente del agua.

La adopción de una práctica aislada, aunque sea eficaz individualmente, no es suficiente. Es necesario desarrollar un proceso educativo para que la población conozca y comprenda el ciclo hidrológico característico de la zona donde vive y establecer estrategias y tecnologías que posibiliten la mejoría de la disponibilidad de agua de manera sistemática y constante para lograr mejoras en su calidad de vida.

## **Justificación**

En la actualidad, la mayoría de los países cuentan con sistemas eficaces de tratamiento de agua, tanto de aguas residuales como también sistemas de potabilización de agua. México no es la excepción, el país cada vez se va enfrentando a una situación aún más difícil respecto a la cantidad de agua potable que se tiene disponible debido a que se van agotando las fuentes de agua dulce a causa de su explotación y contaminación, sumando a esto, el tratamiento de aguas residuales y agua potable no cumplen las expectativas para brindar una mejora a la situación cada vez más carente. Sin embargo cada estado enfrenta una problemática diferente en cuestión del abastecimiento y el mismo tratamiento del agua ya que hay varios factores bióticos y abióticos que van a influir en la calidad del agua y en las fuentes de la misma. En el caso de la península de Yucatán y Quintana Roo, aunque la disponibilidad del agua va disminuyendo, no es un problema principal a comparación con el resto del país donde la escases del agua es un hecho. Específicamente en Quintana Roo, la problemática del agua reside en el mantenimiento de las condiciones y calidad del agua como lo es la dureza del agua debido a la geología del suelo y otros factores involucrados. Por lo que es importante la búsqueda de alternativas para cumplir con la calidad del agua y la demanda de la población.

Existen alternativas y mejoras que se pueden implementar para poder solucionar los problemas que se tienen en cuestión hídrica del país y en Quintana Roo, una de ellas es

buscar otro tipo de fuentes de abastecimiento y con eso un tratamiento diferente de agua como lo es la recolección de agua de lluvia.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

- Diseñar un sistema de tratamiento de agua de lluvia incorporando el proceso de oxidación avanzada a un tren de tratamiento de potabilización convencional para aprovechamiento doméstico.

### **Objetivos Particulares**

- Caracterizar el agua de lluvia recolectada de acuerdo a los siguientes parámetros: coliformes totales y fecales, turbiedad, dureza, alcalinidad, oxígeno disuelto, DBO5, sólidos suspendidos totales, temperatura, pH y conductividad.
- Evaluar la eficiencia del proceso de tratamiento de agua de lluvia incorporando el proceso de oxidación avanzada a un tren de tratamiento de potabilización convencional para aprovechamiento doméstico.

# Capítulo 2.

## Estado del Arte

---

## **Introducción**

En este capítulo se examina el agua de lluvia como tal, tanto sus características, origen y recolección así como también los sistemas de captación. Se presentaran aquellos tratamientos de agua para consumo humano que pueden ser aplicados al agua de lluvia, a través del análisis de sus ventajas y limitaciones se definirá el porqué de su implementación en este proyecto.

## **Agua de lluvia**

La naturaleza tiene varias fuentes de agua de las cuales los seres humanos abastecen sus necesidades, las dos fuentes principales para este trabajo se llaman agua superficial y agua subterránea (Masten, 2005). Las fuentes de agua superficial son aquellos cuerpos de agua como los lagos, ríos y arroyos. Las fuentes de agua subterránea son aquellas en las que el agua se tiene que bombear para su obtención. A parte de estas fuentes principales, se cuenta con el agua de lluvia que es una fuente casi renovable e inagotable de la cual no se saca el provecho que se debería, pese a que el agua de lluvia es temporal no se le ha dado mucha importancia como una fuente principal para abastecimiento de las amplias necesidades que se tiene en tema de recursos hidrológicos.

El agua atmosférica es pura y la contaminación del agua ocurre después del contacto del agua con el techo en el sistema de captación (Gould y Nissen-Petersen, 1999). En áreas rurales el agua de lluvia no está contaminada y es seguro beberla cuando se tiene un sistema de captación en buenas condiciones y limpio. En áreas altamente urbanizadas, con áreas industrializadas, el agua de lluvia no es potable sin embargo con la implementación de un buen sistema de filtración y desinfección en tren de tratamiento, se puede obtener un agua de mejor calidad. (Martínez, 2011).

El agua de lluvia como tal es un recurso renovable, que a su vez es gratis y al alcance de todos. Esta puede ser recolectada a través de sistemas específicos para poder cubrir las necesidades básicas del ser humano. Particularmente en áreas áridas y/ o con poco alcance a agua potable, las condiciones climáticas hace de crucial importancia usar eficientemente como sea posible, la cantidad limitada de agua de lluvia.

El agua de lluvia recolectada es un suplemento muy valioso que de otra forma se perdería debido a las escorrentías o a la evaporación, sin ser aprovechada. La recolección de agua puede ser definida como un método de colección de la escorrentía para el suministro de agua de uso doméstico, agricultura y manejo ambiental (Worm y Hattum, 2006).

La recolección del agua se puede hacer en las viviendas por lo que no se necesita el pago de un servicio para su obtención, la inversión reside en modificaciones a la vivienda para facilitar y mejorar el proceso de recolección y almacenamiento del agua de lluvia. La tecnología de recolección del agua es muy flexible y puede ser adaptada a un rango de variedad de condiciones muy amplio. Se puede implementar en las sociedades con recursos más abundantes y a su vez a las que tienen escasos recursos, así como en las partes más áridas y en las regiones más secas del planeta (Worm y Hattum, 2006)

El uso del agua de lluvia es la mejor opción para lugares donde las fuentes de agua no son de buena calidad debido a los contaminantes y a los minerales que poseen. A pesar de no ser potable al momento de la recolección, el agua de lluvia contiene menor cantidad de contaminantes por lo que posee mejor calidad y su tratamiento es de menor costo y menos complejo en comparación a la recolección y tratamiento de otras fuentes de agua. El tratamiento que se le da depende del uso que se le dará al agua por lo que puede substituir en gran parte el uso del agua potable que se provee regularmente a las viviendas, obtenidas de fuentes de aguas superficiales o subterráneas.

Las ventajas del uso del agua de lluvia: recurso gratuito, menor concentración de sales y contaminantes, bajo impacto ambiental, reducción de demanda a acuíferos, conservación de reservas de agua dulce, poco mantenimiento al sistema.

Desventajas: el suministro de agua captada depende de la precipitación del lugar y del área de captación, riesgo de contaminación en el proceso de recolección y almacenamiento, alto costo inicial que puede impedir su implementación por parte de las familias de bajos recursos económicos (Worm y Hattun, 2006), el suministro de agua es sensible a las sequías.

### **El ciclo hidrológico**

El ciclo hidrológico describe el movimiento y conservación del agua en la tierra, abarca toda el agua presente sobre la superficie del planeta o debajo de ella, es decir el agua de mar y dulce, agua

subterránea y superficial, agua presente en las nubes y atrapada en rocas por debajo de la superficie terrestre. El agua se transfiere a la atmosfera mediante dos procesos distintos; evaporación la cual es la conversión de agua líquida de los cuerpos de agua en vapor y la transpiración, este siendo el proceso por el que las plantas emiten agua por medio de sus estomas, pequeños orificios en el anverso de las hojas que están conectados con el tejido vascular. Un tercer proceso se deriva de ambos y se llama evapotranspiración el cual es un término usado por los hidrólogos para referirse a las pérdidas de agua combinadas por transpiración y evaporación (Masten, 2005).

Los principales factores que afectan al ciclo hidrológico son los factores climáticos; la altura del territorio, el viento, la radiación solar controlando la temperatura y la presión que influyen en la humedad del aire (Bateman, 2007).



Figura 1. Ciclo hidrológico. Recuperado el 2 de Junio de 2015 de: [http://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2002/01march\\_water/](http://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2002/01march_water/)

## La precipitación

La precipitación es el principal mecanismo por el que se libera agua de la atmosfera, esta puede asumir varias formas y de ellas, la más frecuente en regiones de clima templado es la lluvia.

Para que se formen las nubes, el agua que se evapora de la superficie terrestre debe elevarse hasta que la presión y la temperatura sean las necesarias para que exista condensación.

Las gotas de agua se forman cuando la humedad se condensa en pequeños núcleos higroscópicos los cuales son la unión de varias gotitas de agua. En condiciones de supersaturación estos núcleos van aumentando su tamaño, de manera que se forman gotas más grandes con suficiente peso para caer por acción de la fuerza de gravedad, así generando lo que se conoce como precipitado.

La literatura, (Bateman, 2007) clasifica varios tipos de precipitación listados a continuación: precipitaciones conectivas, precipitaciones ortográficas, precipitaciones por convergencia.

Las formas en las que se manifiesta la precipitación, también llamados hidrometeoros, dependiendo de las condiciones atmosféricas son: lluvia, llovizna, chubasco, granizo, nieve, helada, niebla, rocío, escarcha y niebla.

La forma de precipitación importante en este trabajo de tesis es la lluvia, por definición se puede decir que esta es la precipitación de gotas de agua que caen desde una nube con velocidad apreciable de un modo continuo y uniforme. El diámetro y concentración de gotas de agua varía considerablemente de acuerdo a la intensidad de la precipitación. (Instituto Español Nacional de Meteorología, 2002).

Para planificar obras de Captación de agua de lluvia, puede utilizar como base la precipitación anual o mensual (FAO ,2000).

La frecuencia de las lluvias es la periodicidad media estadística en años en que pueden presentarse eventos de características similares en intensidad y duración (Martínez, 2011).

La intensidad de la lluvia se define como la relación entre la cantidad total de lluvia que cae durante un periodo dado y la duración del periodo. Se expresa generalmente como mm por hora (mm/h) Generalmente se calcula la intensidad de la precipitación para varios intervalos y diferentes periodos utilizando un pluviógrafo (FAO, 2000).



Los criterios más útiles para la determinación de la potencialidad de la captación de lluvia son la frecuencia de los chubascos individuales y la probabilidad de una cierta cantidad e intensidad de lluvia (Reij et al., 1988).

### Situación del agua en México

Anualmente México recibe 1489 mil millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. El agua renovable es la cantidad de agua máxima que es factible explotar anualmente en una región. Es la cantidad de agua que es renovada por la lluvia y el agua proveniente de otras regiones o países (CONAGUA, 2013).

Tomando en cuenta las exportaciones e importaciones de agua con los países vecinos, el país anualmente cuenta con 471.5 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable. Esto quiere decir que esta agua es la que se tiene para abastecer la demanda de la población y cubrir con sus necesidades.

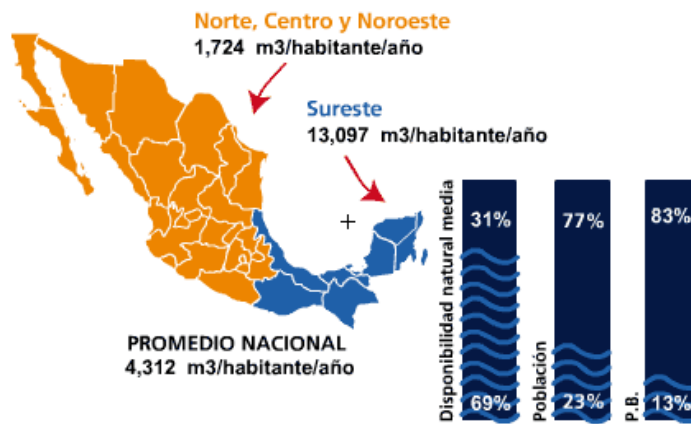


Figura 2. Diferencias en la disponibilidad natural media de agua en el territorio mexicano dividido por zonas (CONAGUA, 2008).

De acuerdo con la clasificación México se encuentra en la categoría de disponibilidad de agua baja. Y las tendencias calculadas para el año 2020 indican que esto puede reducirse. Esto es alarmante ya que hace 49 años, se disponía del doble de agua por persona (CONAGUA, 2008). Esto indica que para el 2020 se espera que la disponibilidad de agua m<sup>3</sup>/habitante/año sea igual a

3,710m<sup>3</sup>. El decremento previsible se muestra en la figura 3, de 4 028 m<sup>3</sup>/hab/año en 2012 a 3 430 en el 2030.

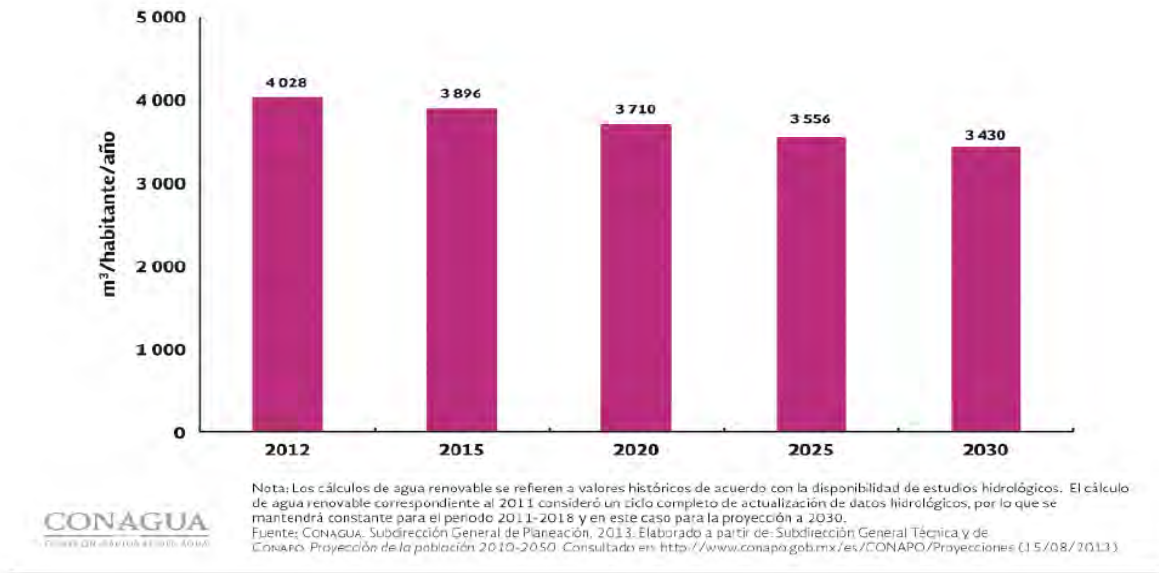


Figura.3 Proyecciones del agua renovable per cápita en México 2012-2030. (CONAGUA, 2013)

### El agua de lluvia en México

En la mayor parte del territorio, la precipitación ocurre predominantemente entre junio y septiembre, con excepción de la península de baja california donde se presenta principalmente en el invierno. La distribución mensual de la precipitación acentúa los problemas relacionados con la disponibilidad del recurso debido a que el 68% de la precipitación normal mensual ocurre entre los meses de junio y septiembre (CONAGUA, 2013). En la siguiente figura se puede observar la precipitación mensual en México:

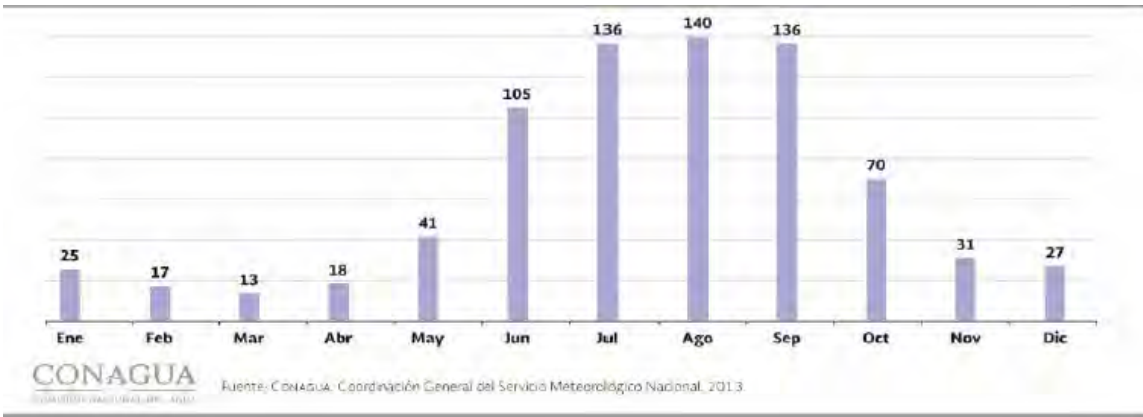


Figura 4. Precipitación pluvial mensual normal en México (mm ) Fuente: Estadísticas del agua en México, Edición 2013. Comisión Nacional del Agua.

La precipitación pluvial juega un papel importante en el ciclo hidrológico ya que, de esta agua, se estima que el 71.6% se evapotranspira y regresa a la atmosfera, el 22.2% escurre por los ríos o arroyos y el 6.2% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos, según estudios de la Comisión Nacional del Agua. Los acuíferos, tienen periodos de renovación, entendidos como la razón de su almacenamiento estimado entre su recarga anual, que son excepcionalmente largos, por lo que se puede considerar a estos acuíferos como aguas no renovables (CONAGUA, 2013).

### Historia de la recolección de agua en México

La captación de agua de lluvia es un medio muy antiguo de abastecimiento de agua, que perdió importancia a partir del rápido crecimiento de las ciudades y cuando los avances tecnológicos permitieron introducir el agua por medio de tuberías en los domicilios (Herrera, 2012) olvidando y por lo tanto desperdiciando una fuente importante de agua dulce.

En la antigüedad, cuando las civilizaciones crecieron demográficamente, el agua y el alimento comenzó a tener mayor demanda, estas se vieron obligadas a migrar a zonas más áridas donde no tenían fuentes de agua tan cercanas. Por lo que comenzó con el desarrollo de formas de captación de lluvia como alternativa para el riego de los cultivos y el consumo de la población en general (Ballén, 2006).

Los antecedentes encontrados en México, yacen en varias partes de la república, entre ellas, se encuentra que, durante la etapa prehispánica en el centro del país en la antigua Tenochtitlán; las chinampas, acequias, calzadas, diques, albarradones y acueductos fueron las obras hidráulicas más representativas. La capital de los aztecas se encontraba sobre un valle caracterizado por ser una cuenca con un complejo de lagos, lagunas y pantanos procedentes de precipitaciones pluviales. Las lluvias de carácter irregular e impredecible en ocasiones, se aprovecharon y canalizaron mediante sistemas naturales como manantiales, arroyos y ríos. O mediante sistemas artificiales que captaban y retenían el agua de lluvia para desviarla a los campos de cultivos (Gutiérrez, 2014).

En la zona sur, donde la civilización maya prevalecía (1000 a.C -1600 d.C) se desarrollaron los “chultunes”, que es un sistema de captación y almacenamiento pluvial compuesto de una cámara subterránea en forma de una botella, con sus entradas con un recubrimiento enyesado dirigían el agua de lluvia hacia su interior durante las temporadas de mayor precipitación pluvial (Osornio, 2012).

En estos sistemas, los mayas, utilizaban recursos para la conducción del agua, como declives poco pronunciados, elevaciones o saltos hidráulicos ubicados a cierta distancia para aminorar la velocidad del agua, ramificaciones y reposaderos (Martín, 2000).

Los “chultunes” fueron vitales en casi todos los asentamientos prehispánicos, la captación era a través de los techos y la conducción mediante canaletas de barro o piedra labrada con un área de captación formada por un piso de aplanado de estuco de alrededor de 5 m de diámetro. La boca y el cuello es la entrada circular por donde escurre el agua al depósito, los cuales estaban armados con piedras y recubiertos de estuco (Martínez, 2004).

En la época colonial, los conquistadores captaban el agua de lluvia en forma directa, de techos de conventos e Iglesias y casas o en forma indirecta, de suelos con pendientes, arroyos, ríos, norias, pozos artesianos, manantiales y jagüeyes (Anaya, 2007).

A principios del siglo XX en el sur de México, en la ciudad de Chetumal- Payo Obispo en el estado de Quintana Roo .Dentro del modelo habitacional que se utilizaba en aquella épocas hacían uso de tejados de plancha de zinc dispuestos a dos y cuatro aguas que permiten una rápida

evacuación de lluvias, así como la articulación de un sistema de captación de agua pluvial a través de las canalizaciones de zinc que conducían a un depósito de tablas de madera a manera de tina, conocido como “curvato”. La capacidad de los “curvatos” podía llegar hasta los 200 litros de almacenamiento y las maderas que se utilizaban podían llegar a ser maderas preciosas (Checa-Artsu)

### **Situación actual**

En épocas recientes, el crecimiento acelerado de la población mundial está ejerciendo presión sobre las fuentes finitas de agua. Por ello, en las últimas dos décadas el interés por la captación del agua de lluvia se ha incrementado.

A través de los siglos, la ciudad de México se sigue viendo afectada por las lluvias irregulares e inundaciones, aun contando con sistemas de drenaje moderno. La sobrepoblación implica escaseo del agua y toda el agua se desperdicia en inundaciones gracias a un sistema de drenaje poco eficiente debido a la basura acumulada y el poco mantenimiento, por lo que las soluciones apuntan a la recuperación de los antiguos sistemas de captación de agua.

El tema de la recolección del agua de lluvia y su tratamiento es un tema que no ha tenido mucha aplicación debido a la inversión inicial y la falta de información hacia la comunidad que se puede beneficiar de la recolección y el tratamiento del agua de lluvia.

El instituto Internacional de Recursos Renovables A.C, con su proyecto Isla Urbana, realizó un manual de Captación de agua de lluvia, uso y mantenimiento para un sistema residencial. Varias investigaciones de tesis provenientes de diferentes instituciones educativas como el Instituto Politécnico Nacional, se han realizado con el tema de la captación y tratamiento de agua de lluvia.

El colegio de posgraduados, en el centro de México, ha establecido el Centro Internacional de Demostración y Captación en Aprovechamiento de Agua de Lluvia (CIDECALLI), el cual promueve la captación, purificación y envasado del agua de lluvia, dando especial atención a las comunidades rurales. Este centro es el más activo en el tema de aprovechamiento de agua de lluvia, organizando reuniones regionales, nacionales e internacionales sobre Sistemas de

Captación de Agua de Lluvia así como publicaciones y manuales para la elaboración de sistemas de captación.

La sociedad Mexicana de la Ciencia del suelo A.C, también ha realizado Reuniones Nacionales sobre Sistemas de Captación de Agua de Lluvia desde 1990, estas reuniones tienen como objetivo principal el aporte de información técnica y científica relacionado con el tema esperando que sea de utilidad a profesionales y a todos los involucrados en la planeación y desarrollo sustentable (Anaya, 2007).

Muchos gobiernos a lo largo del mundo se han dedicado a la inversión, promoción e implementación de la tecnología particularmente apoyo de donantes multilaterales como lo son la gran mayoría de agencias de las naciones unidas así como UNICEF y UNCHS (Gould y Nissen-Petersen, 1999). Estas agencias se han encargado de brindar apoyo a cualquier país con el interés de seguir promoviendo la implementación de las tecnologías de los sistemas de captación para obtener los beneficios previamente mencionados en este trabajo de tesis.

Otra señal de colaboración internacional ha sido la iniciación de una serie de conferencias internacionales de los sistemas de captación de lluvia en una de las cuales fue fundada la Asociación Internacional de sistemas de Captación de Agua de Lluvia. IRCSA por sus siglas en ingles fue fundada en Agosto de 1989 en la cuarta Conferencia Internacional de los Sistemas de Captación de Agua de Lluvia, en Manila y lanzada oficialmente en la siguiente conferencia en Agosto de 1991 en Taiwan. Esta asociación internacional crea conferencias cada dos años desde entonces.

### **Sistemas de Captación.**

Los sistemas de captación de agua de lluvia se consideran aquellos que por los cuales se puede obtener agua de lluvia. Se conoce una amplia variedad de técnicas sobre captación de agua de lluvia de diferentes fuentes (precipitación, niebla, nieve), con diferentes técnicas y para diferentes usos. Existen diferentes opiniones sobre cómo considerar una técnica como de captación de agua de lluvia o no. Especialmente existen diferencias entre lo que consideran captación de agua de lluvia y conservación de agua y entre captación de agua de lluvia y riego. (Anaya, 2007)

La Organización Panamericana de la Salud establece 3 factores (factor técnico, factor económico y factor social) que se deben tener en consideración para el diseño y la implementación de un sistema de captación de agua.

### **Eficiencia de la tecnología**

Los sistemas de captación de agua de lluvia para uso doméstico representan una excelente fuente de agua en casos de emergencia y sustitución de fuentes de agua potable. Sin embargo, debe considerarse una eficiencia de 70 a 90% en el diseño y construcción de las cisternas, esto debido a que las lluvias escasas y de baja intensidad producen un bajo escurrimiento; en otras ocasiones, la alta energía cinética de las gotas de agua de lluvia hace que mucha agua rebote de los techos y caiga fuera del área de captación. También en la canaleta de conducción puede haber pérdidas considerables del agua por rebote, sobre todo cuando ocurre una lluvia de alta intensidad. (Anaya, 1998).

### **Tipos de sistemas de recolección**

A través de la investigación y experiencias de investigadores dedicados al uso eficiente del agua, los sistemas de recolección de agua pluvial han sido objeto de diferentes clasificaciones, pudiéndose categorizar de acuerdo a un gran número de criterios como lo son la fuente de origen del agua, a la forma como el agua escurre por techos o sobre suelos naturales, caminos, patios o áreas de captación especialmente diseñadas, al tipo de almacenamiento y al uso que se le da al agua recolectada. El enfoque más común y usado en este trabajo, es de subdividir los sistemas de acuerdo al tipo de superficie utilizada en el sistema de captación. Otros enfoques categorizando los sistemas de captación se basan en el tipo de almacenamiento, material y otros criterios.

Los sistemas también se pueden categorizar en términos del propósito por el que se colecta el agua, por ejemplo; uso doméstico, riego y producción de plantas (Gould y Nissen-Petersen, 1999).



Figura 5. Modalidades de captación de agua según el propósito dado al agua (FAO, 2013).

Las fuentes para la obtención de agua de lluvia pueden ser subdivididas en sistemas pequeños, medianos y a gran escala (Gould y Nissen-Petersen, 1999). Los sistemas a gran escala incluyen cosecha de agua crecida la cual es aquella que genera inundaciones, en los cuales estructuras de desviación y pequeñas presas son usadas para desviar las aguas crecidas para canales de riego, recarga de agua subterránea y control de inundaciones.

Algunos micros captadores y sistemas pequeños de recolección de agua diseñados para riego con escorrentía, casas con producción subsistente y agua para cosecha de vegetales y arboles individuales, son categorizados como sistemas de escala mediana.

### Micro captaciones

Consisten en captar la escorrentía superficial generada dentro del propio terreno de cultivo, en áreas contiguas al área sembrada o plantada para hacerla infiltrar y ser aprovechada por los cultivos. También es denominada como captación in situ, por tratarse de un proceso de captación y su uso en un lugar cercano o contiguo. Por sus características, las técnicas de micro captación se destinan al suministro de agua para cultivos.



### **Macro-captaciones**

Consisten en captar la escorrentía superficial generada en áreas más grandes, ubicadas contiguas al cultivo o apartadas del área de cultivo para hacerla infiltrar en el área de cultivo y ser aprovechada por las plantas. También se puede considerar como técnica de macro captación la derivación de fuentes de agua externas al área de cultivo así como torrentes avenidas y cuencas mediante bocatomas.

### **Recolección de agua en techos de viviendas y otras estructuras**

Esta es la modalidad más conocida y difundida de captación y aprovechamiento de agua de lluvia. Consiste en captar la escorrentía producida en superficies impermeables o poco permeables, tales como techos de viviendas, patios de tierra barrida, superficies rocosas, hormigón, mampostería o plástico. A continuación se enlista un resumen de las principales ventajas y desventajas que representa la implementación de éste tipo de tecnología.

Ventajas:

- Alta calidad fisicoquímica del agua de lluvia con respecto a fuentes superficiales.
- Sistema es independiente y por lo tanto eficiente para comunidades dispersas.
- Se puede emplear mano de obra y/o materiales locales.
- No requiere energía significativa para la operación del sistema.
- Fácil de construir y mantenimiento.
- La facilidad de operación y ahorro de tiempo en la recolección de lluvia en vez de traerla de lejos

Desventajas:

- Costo inicial, que en caso de cubrir el beneficiario puede impedir su implementación por falta de recursos económicos.
- La cantidad de agua captada depende de la precipitación del lugar, del área de captación, del espacio de almacenamiento y otras condiciones geográficas.
- El costo del proceso de tratamiento depende de la calidad del agua colectada y el uso que se dará a la misma, sustentado por las normas correspondientes.

- Los sistemas de macro-captación requieren áreas muy grandes de captación.

### **Componentes de un SCAPT (sistema de captación de agua pluvial en techos).**

Los sistemas de captación de agua pluvial en techos **SCAPT** (sistema de captación de agua pluvial en techos). Éste modelo tiene un beneficio adicional y es que además de su ubicación minimiza la contaminación del agua (Anaya, 2007). En resumen, el agua de mejor calidad debe ser destinada para el consumo familiar tomando las precauciones sanitarias correspondientes, por lo que el agua obtenida de la captación por medio de techos parece ser la más adecuada para ese fin. (FAO, 2013) De acuerdo al enfoque de este trabajo, se hará énfasis a esa modalidad de la captación de agua de lluvia en techos.

En este estudio, el sistema de captación de lluvia se considera como una tecnología utilizada para habilitar en tal sentido los techos de casas, o bien otras áreas impermeables de las construcciones, para ser almacenada y posteriormente darle un tratamiento para su utilización doméstica. Se tiene que dicho sistema está compuesto por varios elementos los cuales se explicarán a continuación.

### **Área de captación**

Es primer punto de recolección del agua. Es la superficie en la que se recolectará el agua de lluvia pudiendo ser natural o artificial. Las áreas que se utilizan para este fin son los techos de casas habitación, escuelas, bodegas, invernaderos y laderas revestidas o tratadas con materiales que la impermeabilizan, estas proporcionan una superficie adecuada para interceptar el agua de lluvia. El área de captación del agua de lluvia se obtiene con la ecuación (Anaya et al.200):

$$A = a \times b \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde: A= Área de captación (m<sup>2</sup>), a= Ancho de la casa (m), b= Largo de la casa (m).

Es importante que los materiales con que están construidas las superficies donde se capta el agua, no desprendan olores, colores y sustancias que puedan contaminar el agua pluvial o alterar la eficiencia de los sistemas de tratamiento incrementando el costo del tratamiento para obtener el producto con la calidad. La superficie debe ser de tamaño suficiente para cumplir la demanda y tener la pendiente requerida para facilitar el escurrimiento pluvial al sistema de conducción; es

importante mencionar que solo se debe considerar la proyección horizontal del área de captación y expresarla en m<sup>2</sup>. (Herrera, 2010)

Estas superficies pueden ser techos u otro tipo de recolectores de diferentes materiales como lo pueden ser:

- Cemento, láminas metálicas, plásticas, tejas de arcilla, madera o plásticas.

La eficiencia de la captación del agua de lluvia depende del coeficiente de escurrimiento de los materiales del área de captación, el cual varía de 0.0 a 0.9

Tabla 1. Coeficientes de escurrimiento (Ce) de los diferentes materiales en el área de captación Fuente: (Anaya y Martínez, 2007)

<b><u>Tipo de captación</u></b>	<b><u>Ce</u></b>
<b><u>Cubiertas superficiales</u></b>	
Concreto	0.6-0.80
Pavimento	0.5-0.6
Geomembrana de PVC	0.85-0.90
<b><u>Azotea</u></b>	
Azulejos,teja	0.8-0.9
Hojas de metal acanaladas	0.7-0.9
Orgánicos(hojas con barro)	<0.2
<b><u>Captación en tierra</u></b>	
Suelo con pendientes menores al 10%	0.0-0.3
Superficies naturales rocosas	0.2-0.5

### **Sistema de conducción**

Infraestructura que conduce las aguas recolectoras por las estructuras de captación hacia sitios de tratamiento o vertido. Se conforma de conductos cerrados y abiertos conocidos como tubería y canales, respectivamente, los cuales pueden ser de diferentes materiales para los que se tiene el objetivo del transporte del agua desde el área de captación, el almacenamiento y sistema de distribución en caso de haber uno.

Generalmente, son canaletas que se instalan en los bordes más bajos del techo, en donde el agua de lluvia tiende a acumularse antes de caer al suelo; el material debe ser liviano, resistente, fácil de unir entre sí, debe combinar con los acabados de las instalaciones que no contamine con compuestos orgánicos o inorgánicos; por lo que se recomienda se coloque posteriormente un filtro, para evitar la obstrucción del flujo en la tubería de conducción. Un punto importante es realizar en los techos labores de limpieza al inicio de la época de lluvias para incrementar la calidad y facilitar el tratamiento del agua que se va a recolectar.

### **Filtro**

Infraestructura para retener elementos extraños o no deseados en una conducción pluvial como solidos de gran tamaño, arenas, solidos suspendidos totales, grasas y aceites; materiales retirados mediante un tratamiento primario de rejillas , tamices gruesos , trampas de arenas y desnatadoras.

Se utilizan filtros o mallas con aberturas generalmente de tamaño uniforme colocados entre el sistema de conducción y el almacenamiento con el objetivo de filtrar todas las impurezas, retener solidos suspendidos o flotantes en el flujo o captación de agua de lluvia de diferentes tamaños que puedan afectar la calidad del agua posteriormente.

### **Infraestructura de almacenamiento**

Obras o contenedores con el fin de almacenar y conservar toda el agua de lluvia que cae en el área de captación para el consumo diario de las personas que se beneficien del sistema de captación de agua de lluvia. Puede ser muy variado y de las características de este, depende la calidad que mantendrá el líquido almacenado. Algunos de los contenedores superficiales o subterráneos más utilizados son:

- De cemento o ferrocemento: Cisternas o jarras.
- Metálicos: Botes, tinacos o cisternas de lámina de acero
- Plásticos: botes, tinacos o cisternas de HDPE. Existen cisternas flexibles plastificadas para diferentes volúmenes de almacenamiento

### **Cálculos para el diseño del sistema de captación.**

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), son necesarios entre 50 y 100 litros de agua por persona al día para garantizar que se cubren las necesidades básicas y que no surjan grandes amenazas para la salud (PNUD, 2006).

Sin embargo, una persona en México consume alrededor de 365 lt/ persona/ día (PROFECO, 2007), lo que es mucho más de lo que está recomendado por la OMS.

### **Determinación de la precipitación promedio mensual**

Este valor se obtiene para indicar que cantidad de precipitación al mes se tiene en una ciudad y para determinar cuanta cantidad se puede almacenar de precipitación. De acuerdo a Anaya & Martínez, 2007, para obtener valores adecuados se tienen que valuar los meses de 10 o 15 años.

$$Ppi = \frac{\sum_{i=1}^n pi}{n} \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde:

Ppi= precipitación promedio mensual del mes “i” de todos los años evaluados (mm/mes)

N=número de años evaluados

Pi= valor de precipitación mensual del mes “i” (mm)

### **Determinación de la demanda**

La demanda es la cantidad de agua que se consume por persona que utilizará el sistema. Es necesaria para determinar si el sistema de captación de agua de lluvia va a cumplir y abastecer a todos los usuarios que dependen de él. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$Di = \frac{Nu \times Nd \times Dot}{1000} \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde:

Di= demanda mensual ( $m^3$  o lt)

Nu= número de usuarios que se benefician del sistema

Nd= número de días del mes analizado

Dot= dotación (L/persona/día)

1000= factor de conversión a  $m^3$

### Determinación del volumen del tanque de abastecimiento

Teniendo en cuenta los promedios mensuales de precipitaciones de todos los años evaluados, el material del techo y el coeficiente de escorrentía, se procede a determinar la cantidad de agua captada para diferentes áreas de techo y por mes.

$$Vi = \frac{Ppi \times Cr \times Ac}{1000} \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde:

Vi= volumen de captación “i” ( $m^3$ )

Ppi= precipitación promedio mensual (litros/ $m^2$ ) (mm)

Cr=coeficiente de escorrentía

Ac= área de captación ( $m^2$ )

Otra manera de calcular el volumen del tanque de almacenamiento o cisterna de acuerdo al (CIDECALLI,) consiste en considerar la demanda de agua mensual que necesita la población durante los meses de sequía más dos meses (coeficiente de seguridad) con el objeto de asegurar el abastecimiento de agua a la población.

$$V_{cisterna} = Dj * M_{sequía+2} \quad \text{Ecuación 5}$$

Dónde:

V cisterna = volumen mínimo de la cisterna,  $m^3$ ,

D j = demanda mensual,  $m^3$  mes-1,

M sequía + 2 = meses con sequía más 2.

## **Potabilización de agua**

La calidad del agua de lluvia depende mucho del lugar, de los contaminantes que se encuentren en el aire y en las superficies por las que escurre. Por esta razón es necesario que pase por un proceso de limpieza y que sea almacenada de forma correcta, siguiendo un tratamiento adecuado.

Si se quiere utilizar el agua de lluvia para consumo humano, es necesario que pase por un proceso de potabilización para cumplir la normatividad establecida y los límites permisibles dentro de esta, en cuestiones de calidad del agua.

Muchos países desarrollados y organizaciones internacionales han comprometido recursos tecnológicos y financieros para crear un acceso razonable al agua potable en otras naciones en desarrollo, reconociendo el principio de que el agua segura es un derecho fundamental de todas las personas (Masten, 2005) Así también implementando nuevas tecnologías de tratamiento, asegurando un agua de alta calidad para sus propios países.

El agua que se puede consumir sin preocupación de efectos adversos a la salud se le denomina agua potable. Para ser apta para consumo y uso humano el agua requiere de una serie de tratamientos que se establecen acordes a su calidad inicial. La fuente de abastecimiento y las circunstancias en el sitio en particular son lo que definirán la calidad del agua de dicha fuente, las dificultades que tendrán que enfrentarse para hacerla potable y las complejidades de los tratamientos que se deberán aplicar para convertirla en inocua, lo cual es una de las características principales que debe cumplir el agua para ser considerada apta para consumo y uso humano.

Cuando se habla de la utilización de un tren de tratamiento de potabilización del agua, nos estamos refiriendo a una serie de procesos que determinan que el agua sea apta para uso y por lo consiguiente para el consumo de la población.

Existen tratamientos físicos, químicos, biológicos y combinaciones de ellos para la potabilización, todos los tratamientos tienen limitaciones y tanto sus ventajas como desventajas son los que definen sus campos de aplicación. El primer paso para potabilizar agua es determinar la calidad inicial del agua en la fuente de abastecimiento, lo que permitirá diseñar el tratamiento necesario.

## Calidad del agua

La calidad del agua se basa en la medición de diferentes parámetros clasificados de esta forma:

- a) físicos: sabor, color, olor, turbidez, conductividad eléctrica.
- c) químicos: pH, concentración de nitratos, fosfatos, amonio, sulfatos, sólidos en suspensión, DBO5, DQO, etc.
- d) biológicos: microbiológicos, bacterias causantes de enfermedades.

Para hacer una evaluación general de las aguas hay que tener en cuenta la variabilidad temporal a la que está sometido el término “calidad del agua”. Esta variabilidad, dependiente de factores estacionales; climáticos y biológicos, de la presión antrópica que es influencia de la actividad humana, modifica los parámetros que influyen en la calidad de las aguas a escala global.

Por esta razón, el proceso real de evaluación de la calidad del agua debe incluir información sobre la medida de estos parámetros y el uso a la que se piensa destinar; es decir, sirve básicamente para verificar si la calidad observada en el agua es adecuada para el uso que se piensa hacer de ella (Spellman y Drinan, 2000).

Para usos más importantes y comunes del agua existen una serie de requisitos, indicados en la normatividad legal que se basan en la medición de diferentes parámetros.

Por lo que es necesario que en el desarrollo de un sistema de abastecimiento de agua, se examinen con detenimiento todos los factores que pudieran afectar en forma adversa la calidad del agua que se pretende usar.

La cantidad y el tipo de sustancias que se encuentren en el agua determinan su calidad y definen su aptitud para ser aplicada en un uso específico. Los usos fundamentales del agua, regulados mediante una normativa específica de calidad indicados por ejemplo en España, la *Directiva 75/440/CEE* de la Unión Europea indican la calidad dependiendo del uso por lo que el agua para consumo humano se define como el agua que requiere el control más severo y la mayor calidad. La normativa legal establece tres niveles de calidad de las aguas, que se diferencian según el tratamiento que deban recibir para su potabilización. De tal manera que estos tres tipos de agua se muestran en la siguiente figura:



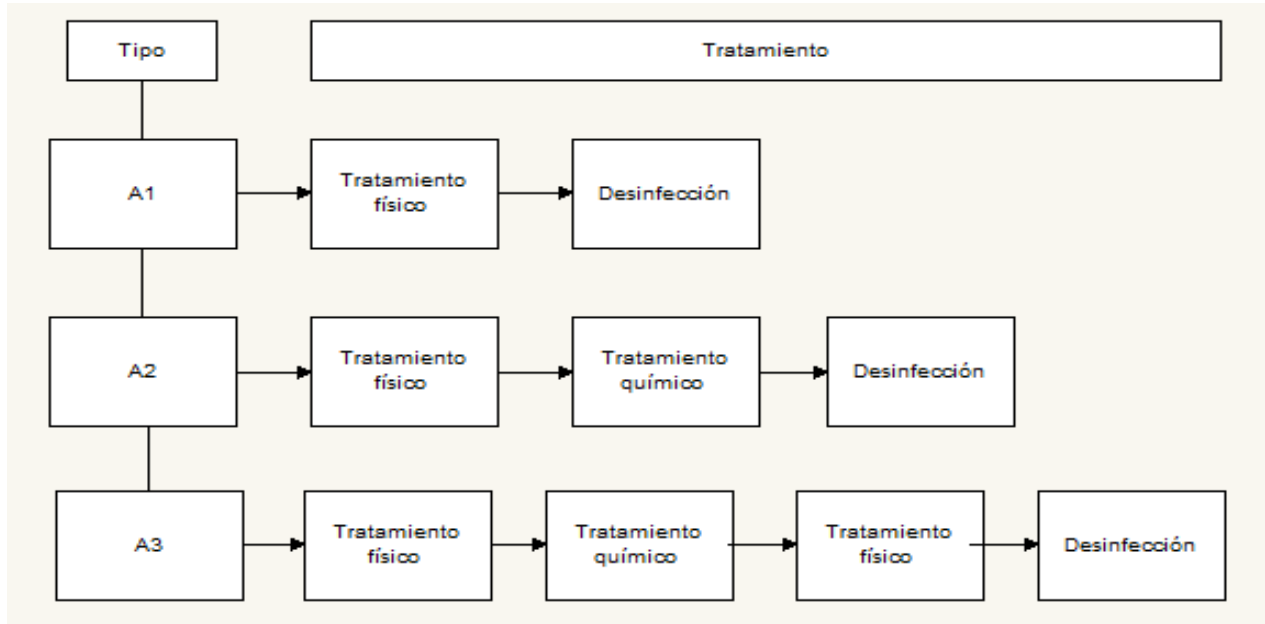


Fig.6 Niveles de calidad de agua de la directiva *Directiva 75/440/CEE de la Unión Europea* y los tratamientos correspondientes de cada nivel.

En México, la calidad del agua se regula mediante normas oficiales mexicanas en las que se indica la concentración o contenido máximo o intervalo de valores de un componente, que garantiza que el agua será agradable a los sentidos y no causará efectos nocivos a la salud del consumidor.

En dichas normas se especificará dependiendo de la fuente de origen y la forma de disposición del agua, los tratamientos a los que serán sometidas dichas aguas, de igual forma, los parámetros para el análisis y tratamiento de las aguas también están regidos por normas mexicanas.

De las normas destacadas se encuentra la Norma Oficial Mexicana **NOM 127-SSA1-1994**, la cual establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional.

### **Potabilización**

De acuerdo a la definición escrita en la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994, potabilización es el conjunto de operaciones unitarias y procesos, físicos y/o químicos que se aplican al agua en los sistemas de abastecimiento públicos o privados, en los cuales se elimina una serie de sustancias y microorganismos que implican riesgo para el consumo, o le comunican un aspecto o cualidad organoléptica no deseables, transformándola con el fin de hacerla apta para

uso y consumo humano, estos pueden ir desde una simple cloración hasta el empleo de procesos muy complejos para tratar el agua de cualquier fuente y convertirla en agua potable.

El tratamiento del agua se lleva a cabo en plantas potabilizadoras, las cuales son establecimientos donde se llevan a cabo dichos procesos, estos procesos generalmente vienen en conjunto en lo que se les llama trenes de tratamiento el cual consiste de procesos unitarios o de varias operaciones en combinación, un solo proceso de tratamiento puede dar el cambio deseado en la composición, pero en la mayoría de los casos, es necesario utilizar una combinación de varios procesos. Estos procesos utilizados en el tratamiento de potabilización del agua, están en función de la calidad del agua en las fuentes de captación, dependiendo de esta, el grado de complejidad del tratamiento es diferente. Pudiendo ser tan sencillo como la desinfección, o involucrar diversas operaciones unitarias como oxidación, coagulación, floculación, sedimentación y filtración, además de la desinfección. En algunos casos, se llega a requerir intercambio iónico, ósmosis inversa o adsorción con carbón activado (CONAGUA, 2007).

Algunos de los métodos más comunes de tratamiento son la sedimentación simple y almacenamiento, coagulación-sedimentación, filtración lenta y rápida en arena, desinfección y si es necesario la suavización. En la tabla número 2 se presenta el propósito de cada proceso de la potabilización.

Tabla 2. Procesos Unitarios involucrados en el tratamiento preliminar de la potabilización del agua. Procesos de potabilización de agua (Romero Rojas, 1999).

<b>PROCESO</b>	<b>PROPÓSITO</b>
<b><i>TRATAMIENTO PRELIMINAR</i></b>	
<b>Cribado</b>	Remoción de desechos grandes que pueden obstruir o dañar los equipos de la planta.
<b>Pre-tratamiento químico</b>	Remoción eventual de algas y otros elementos acuáticos que causan sabor, olor y color.
<b>Aforo</b>	Medida de agua cruda a tratar.

Tabla 3. Procesos Unitarios involucrados en el tratamiento principal de la potabilización del agua. Procesos de potabilización de agua (Romero Rojas, 1999).

PROCESO	PROPÓSITO
<b>TRATAMIENTO PRINCIPAL</b>	
<b>Aireación</b>	Remoción de olores y gases disueltos; adición de oxígeno para mejorar sabor.
<b>Coagulación/floculación</b>	Conversión de sólidos no sedimentables en sólidos sedimentables.
<b>Sedimentación</b>	Remoción de sólidos sedimentables.
<b>Ablandamiento</b>	Remoción de dureza.
<b>Filtración</b>	Remoción de sólidos finos, flóculo en suspensión y la mayoría de los microorganismos.
<b>Adsorción</b>	Remoción de sustancias orgánicas y color.
<b>Estabilización</b>	Prevención de incrustaciones y corrosión.
<b>Fluoruración</b>	Prevención de caries dental
<b>Desinfección</b>	Exterminio de organismos patógenos

### **Procesos unitarios involucrados en la potabilización del agua.**

De manera general, se describirán los principales procesos unitarios involucrados en la potabilización de agua.

#### **Cribas con rejas o malla**

Para proteger las unidades principales del tratamiento y que su operación sea eficiente, es necesario quitar los sólidos flotantes grandes y los sólidos suspendidos que frecuentemente están presentes en el caudal de entrada.

Las cribas o mallas forman parte de un tratamiento preliminar. Se utilizan para eliminar los sólidos grandes retenidos en el sistema de captación.

En las plantas de tratamiento se utilizan rejillas de diversos tamaños para evitar que los objetos grandes y partículas de menor tamaño lleguen a la entrada y posteriormente pasen a los otros procesos de tratamiento. La abertura de las barras en las rejillas se define en función del tipo de basura presente en el agua residual. Para las rejillas gruesas se consideran aberturas entre 75 y 150 mm, mientras que en las rejillas finas los claros son entre 15 y 75 milímetros (CONAGUA, 2007)

Cuando se requiere tratar volúmenes grandes de agua como las plantas de potabilización, este

tratamiento preliminar con cribas requiere alto mantenimiento por lo que hay diferentes tipos de cribas dependiendo el tamaño de instalación, de las cuales se puede requerir un dispositivo de limpieza automática o limpieza manual.

### **Aireación**

Es el proceso mediante el cual el agua es puesta en contacto con el aire con el propósito de modificar las concentraciones de las sustancias volátiles contenidas en ella. En resumen, es el proceso de introducir aire al agua.

La aireación cumple sus objetivos de purificación del agua mediante el arrastre o barrido de las sustancias volátiles causado por la mezcla turbulenta del agua con el aire y por el proceso de oxidación de los metales y gases.

El aumento de oxígeno en el agua mejora el buen sabor y resulta ser más agradable para el paladar. Aportando oxígeno a un agua rica en amoníaco o en sulfatos, se consigue en ciertos casos, combatir la anaerobiosis y evitar la corrosión de tuberías metálicas.

Como las temperaturas altas aumentan la volatilidad de los compuestos y disminuyen su valor de saturación, la aireación para la remoción de sustancias volátiles es más eficiente en aguas cálidas que frías.

De acuerdo con Romero, 1999 las funciones más importantes de la aireación son:

- Transferir oxígeno al agua para aumentar el oxígeno disuelto
- Disminuir la concentración de  $\text{CO}_2$
- Disminuir la concentración de  $\text{H}_2\text{S}$
- Remover gases como metano cloro y amoníaco
- Oxidar hierro y manganeso
- Remover compuestos orgánicos volátiles
- Remover sustancias volátiles productoras de olores y sabores.

### **Coagulación**

Consiste en la sedimentación de los sólidos en suspensión formados por material muy pequeño. Aunque haya habido desbaste y cribado, el agua contiene material en disolución y en suspensión. El termino coagulación de acuerdo con Alegría (2005) consiste en la "desestabilización" de las partículas mediante un producto químico (coagulante) y su agitación brusca. Los coloides suspendidos en el agua no se sedimentan por gravedad sin ayuda por lo que se tienen que utilizar sustancias coagulantes en el proceso, mezclándolos rápidamente con el agua y posteriormente dando una mezcla lenta para producir la sedimentación. Los coagulantes más utilizados son los basados en aluminio como sulfato de aluminio y hierro como sulfato férrico.

### **Floculación**

La floculación es el factor que afecta de manera más importante la eficiencia de eliminación de partículas, siendo así el mecanismo principal en la eliminación de la turbidez del agua.

El termino floculación se refiere a la aglomeración de partículas coaguladas en partículas floculentas, es el proceso por el cual, una vez desestabilizados los coloides, se provee una mezcla suave de las partículas para incrementar la tasa de colisiones entre ellas sin romper o disturbar los agregados preformados en la etapa anterior.

Una vez introducido y mezclado el coagulante, las partículas diminutas coaguladas son puestas en contacto una con otra y con las demás partículas presentes, mediante agitación lenta prolongada, la floculación, durante la cual las partículas se aglomeran, incrementan su tamaño y adquieren mayor densidad.

### **Sedimentación**

La sedimentación es la eliminación de las partículas en suspensión, los floculos químicos, los precipitados y otros solidos sedimentables, por efecto de la gravedad.

La sedimentación ocurre de maneras diferentes, según la naturaleza de los sólidos, su concentración y su grado de floculación. Por lo que hay dos formas de sedimentación utilizadas en el tratamiento de potabilización del agua; sedimentación simple y sedimentación después de coagulación y floculación. La sedimentación simple es generalmente un tratamiento para reducir la carga de solidos sedimentables antes de la coagulación, pudiéndosele llamar pre sedimentación.

La sedimentación después de la adición de coagulantes y de la floculación se usa para remover los sólidos sedimentables que han sido producidos por el tratamiento químico, como en el caso de remoción de color y turbiedad o en el ablandamiento.

La sedimentación en el proceso convencional de tratamiento de agua tiene lugar entre la floculación y la filtración. La falta de sedimentación tiene como consecuencia una operación menos fiable en los filtros cuando la calidad del agua cambia de repente sus características (Romero, 1999).

### **Filtración**

La filtración implica la eliminación de partículas en suspensión haciendo pasar el agua por una capa o cama de material poroso o granular.

La filtración remueve material suspendido -medido, en la práctica, como turbiedad- compuesto de floculo, suelo, metales oxidados y microorganismos. La remoción de microorganismos es de gran importancia, puesto que muchos de ellos son extremadamente resistentes a la desinfección y, sin embargo, son removibles mediante filtración.

En una planta concreta, el espesor y la granulometría dependen de la velocidad de filtración, del tamaño y naturaleza de las partículas que van a ser retenidas, y de la pérdida de carga disponible.

La selección del medio filtrante es determinada por la durabilidad requerida, el grado deseado de purificación, la duración de la carrera del filtro y la facilidad deseable de su lavado (CONAGUA, 2007)

El medio ideal debe ser de un material durable, capaz de retener la máxima cantidad de sólidos y ofrecer facilidad para limpiarse con una cantidad mínima de agua de lavado.

Por ejemplo los filtros de carbón activado son utilizados cuando se desean remover malos olores, sabores o color desagradable del agua, compuestos orgánicos volátiles, plaguicidas e incluso radón. El carbón activado tiene una gran área superficial y por lo tanto alta capacidad de adsorción de compuestos, que quedan adheridos a la superficie del mismo.

Estos filtros son económicos, fáciles de mantener y operar, por lo que su uso es muy común. Entre las limitaciones que presentan es que deben recibir mantenimiento frecuente y periódico para evitar obstrucción de tuberías. Otras limitaciones están relacionadas a que no remueven bacterias,

metales, nitratos, pero principalmente que generan un residuo el carbón ya saturado- que no es de fácil disposición, especialmente si el agua contiene compuestos orgánicos tóxicos que son retenidos en el filtro de carbón activado (Leal, 2005)

### **Ablandamiento**

El ablandamiento se define como el proceso de remoción de los iones calcio y magnesio, principales causantes de la dureza del agua. Este se puede llevar a cabo a través de una serie de métodos de los cuales los más utilizados son el ablandamiento con cal-carbonato y el intercambio iónico. Este último siendo utilizado en depuradoras de agua pequeñas o con poca dureza. (Spellman y Drinan, 2000)

La dureza del agua se define como la suma de los cationes polivalentes disueltos en el agua. Los cationes más frecuentes son calcio y magnesio, aunque hierro, estroncio y manganeso pueden contribuir también. La dureza se registra normalmente como una cantidad equivalente de carbonato de cálcico.

Las aguas suelen clasificarse de acuerdo con el grado de dureza como lo indica la tabla:

Tabla 4. Clasificación de dureza de acuerdo a la concentración de carbonato cálcico. (Spellman y Drinan, 2000)

<b>Concentración de carbonato cálcico (mg/L)</b>	<b>Clasificación</b>
<75	Agua blanda
De 75 a 150	Agua moderadamente dura
De 150 a 300	Agua dura
>300	Agua muy dura

### **Método de ablandamiento por Cal-Carbonato**

Este método consiste en la reducción de la dureza por la adición de cal hidratada al agua para precipitar calcio, magnesio o ambos. Este proceso consiste en aplicar cal y carbonato de sodio al agua cruda. La cal reacciona con los bicarbonatos solubles de calcio y de magnesio, que son los

que causan dureza por carbonatos y forman carbonato de calcio e hidróxido de magnesio que son insolubles.

### **Método de ablandamiento por Intercambio iónico**

El intercambio iónico se realiza con una resina cargada con iones sodio. La resina intercambia iones sodio por iones calcio o magnesio. Elimina dureza incluyendo hierro y manganeso si se encuentran en su forma iónica reducida (Valenzuela, 2004).

Mediante el intercambio de iones se eliminan las especies solubles por su reemplazo y captura en la resina. El principio consiste en pasar el agua a través de un lecho intercambiador de iones.

El intercambio causa esencialmente 100% de eliminación de la dureza del agua, hasta que se alcanza la capacidad del material de intercambio. Cuando se ha saturado ese material, ya no se eliminará más dureza.

El material de intercambio iónico puede ser de minerales naturales, llamadas zeolitas, o resinas sintéticas. A las resinas o las zeolitas las caracteriza la cantidad de dureza que eliminan por volumen de material. Cuando la capacidad de éste es acabada se procede a regenerar la resina aplicando una solución regeneradora de alta concentración que libera los iones removidos del agua.

### **Desinfección.**

En el tratamiento de agua, la desinfección se usa para matar los patógenos presentes en el agua, que podrían causar enfermedades.

Consiste en la adición de algún agente desinfectante durante un tiempo determinado, con la intención de matar o inactivar los microorganismos patógenos en el agua.

Para tener aplicación práctica, los desinfectantes del agua deben poseer al menos las siguientes propiedades (Romero, 1999):

- Deben destruir las diversas clases y cantidades de patógenos que pudieran estar presentes en el agua.
- Deben ser efectivos en composiciones, concentraciones y condiciones variables de las aguas que vayan a tratarse.
- Deben ser dosificables a un costo razonable, y seguros y fáciles de manejar y aplicar.



- Deben persistir en el agua desinfectada, con una concentración suficiente para proporcionar una protección residual razonable contra su posible contaminación antes de usarse.
- No deben formar subproductos tóxicos debido a sus reacciones con cualquier material natural en el agua.
- Puesto que la desinfección es una parte integrante del proceso de depuración, es necesario hacer antes una filtración para reducir los niveles de microorganismos patógenos y conseguir que la desinfección sea más efectiva al reducir la turbidez y otros constituyentes que pueden interferir.

Uno de los agentes desinfectantes más utilizados es el cloro, el cual ha probado su valía como desinfectante por su efectividad y el bajo costo de su utilización. Otra ventaja que ha llevado al cloro a ser el agente desinfectante más utilizado es que proporciona cloro residual en los sistemas de distribución asegurando que el agua permanezca libre de microorganismos tóxicos después de haber pasado el tren de tratamiento de agua.

La efectividad de la desinfección está directamente relacionada con el tiempo de contacto, pH y la turbidez en el agua. Por lo tanto es importante que antes de llegar a la desinfección, se haya reducido por medio de métodos de coagulación y sedimentación, previamente explicados.

Una de las desventajas de la utilización del cloro es la generación de subproductos halogenados que se producen cuando el cloro reacciona con la materia orgánica contenida en el agua, proveniente aquélla de las sustancias húmicas o fúlvicas del suelo (Alegría, 2005).

### **Normatividad**

Las normas oficiales mexicanas son las regulaciones técnicas de observancia obligatoria que contienen la información, requisitos, especificaciones, procedimientos y metodología que permiten a las distintas dependencias gubernamentales establecer parámetros evaluables para evitar cualquier tipo de riesgos a la población, animales y medio ambiente (PROFECO, 2010).

Cualquier proyecto de recolección y tratamiento de cualquier tipo de agua debe cumplir con la normatividad en materia de contaminación, Normas Técnicas Complementarias locales, estatales y federales; así como las Normas Oficiales Mexicanas y Normas Mexicanas que apliquen.

En el tema del agua pluvial, se tiene en proyecto una norma **PROY-NMX-AA-168-SCFI-2012**, la cual busca regular y establecer los criterios generales que se deben cumplir para el diseño de proyectos ejecutivos de drenaje pluvial urbano, nuevos, ampliación y rehabilitación de existentes. Sin embargo, la captación de agua pluvial no está regularizada por ningún tipo de norma oficial mexicana hasta el momento.

En materia de agua, la norma que rige los parámetros de calidad para este proyecto es la siguiente:

**Norma Oficial Mexicana NOM 127-SSA1-1994.** Esta norma establece límites permisibles de características bacteriológicas (coliformes fecales y coliformes totales); de características físicas y organolépticas (color, olor, sabor y turbiedad); de características químicas (comprende 34 parámetros, tales como aluminio, arsénico, bario, entre otros), así como los métodos de tratamiento que se deben aplicar según los contaminantes encontrados.

### Procesos de Oxidación Avanzada

Procesos de oxidación avanzada (POA) es el nombre común para denominar a varios métodos de oxidación química basados en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes, usados para remediar sustancias que son altamente resistentes a la degradación biológica. Dichos procesos tienen por objeto producir radicales hidroxilo  $\text{OH}^\bullet$ . Estos radicales pueden ser generados por medios fotoquímicos (incluida la luz solar) o por otras formas de energía, Son radicales oxidantes muy reactivos y no selectivos, capaces de descomponer muchos compuestos orgánicos (Masten, 2005).

Para ser eficientes, los procesos de oxidación avanzada deben generar altas concentraciones de radicales hidroxilo ( $\text{OH}^\bullet$ ) en estado estacionario. La tabla 4 indica los niveles de potencial redox de diversos agentes oxidantes.

Tabla 5. Potenciales redox de algunos agentes oxidantes. Fuente: (Anaya y Martínez, 2007).

<i>Especie</i>	<i>E<sup>0</sup> (V, 25°C) I</i>
Flúor	3,03
Radical hidroxilo	2,80
Oxígeno atómico	2,42
Ozono	2,07
Peróxido de hidrógeno	1,78
Radical per hidroxilo	1,70
Permanganato	1,68
Dióxido de cloro	1,57
Ácido hipocloroso	1,49
Cloro	1,36
Bromo	1,09
Yodo	0,54

### Clasificación de los Procesos de Oxidación Avanzada

La clasificación de los POAS puede ser basada en la utilización de ozono en la producción de radicales hidroxilos, también puede ser basada en el uso de irradiación solar o en el número de fases. En la siguiente tabla, de acuerdo con (Blesa et al., 2001); se muestra un listado de los POAs, clasificadas en procesos no fotoquímicos y procesos fotoquímicos.

Tabla 6. Procesos de oxidación avanzada clasificados en procesos no fotoquímicos y procesos fotoquímicos

<b>Procesos de oxidación avanzada</b>	
<b>Procesos no fotoquímicos</b>	<b>Procesos fotoquímicos</b>
• Ozonización en medio alcalino ( $O_3/OH^-$ )	• Oxidación en agua sub/y supercrítica
• Ozonización con peróxido de hidrógeno ( $O_3/H_2O_2$ )	• Procesos fotoquímicos
• Procesos Fenton ( $Fe^{2+}/H_2O_2$ ) y relacionados	• Fotólisis del agua en el ultravioleta de vacío (UVV)
• Oxidación electroquímica	• UV/ $H_2O_2$
• Radiólisis $\gamma$ y tratamiento con haces de electrones	• UV/ $O_3$
• Plasma no térmico	• Foto-Fenton y relacionadas
• Descarga electrohidráulica – Ultrasonido	• Fotocatálisis heterogénea

### Procesos no fotoquímicos

El objetivo de los procesos de oxidación avanzada es la generación de los radicales hidroxilo ( $OH^\bullet$ ), las fuentes de energía necesarias para la formación de estos, es lo que diferencia a los procesos fotoquímicos de los no fotoquímicos. Los procesos de oxidación avanzada fotoquímicos utilizan la radiación solar para la obtención de dichos radicales. Los no fotoquímicos utilizan otras formas de energía como lo es la energía eléctrica sumada a los diferentes catalizadores que se pueden utilizar en los dos tipos de procesos.

Los procesos no fotoquímicos, a través de la reacción de catalizadores más energía, generan los radicales hidroxilos los cuales oxidarán la materia orgánica.

Dependiendo del tipo de proceso, se puede utilizar diferentes tipos de energía y catalizadores, el tipo de energía utilizado en estos procesos es la energía eléctrica, dependiendo de esto y los diferentes catalizadores que se pueden utilizar, varía la eficiencia de reacción para la generación de los radicales hidroxilo ( $\text{OH}^\circ$ ).

### **Procesos fotoquímicos**

La radiación solar la podemos definir como el flujo de energía que recibimos del sol en forma de ondas electromagnéticas que permite la transferencia de energía solar a la superficie terrestre. Estas ondas electromagnéticas son de diferentes frecuencias y aproximadamente la mitad de las que recibimos están entre los rangos de longitud de onda de 0.4  $[\mu\text{m}]$  y 0.7  $[\mu\text{m}]$ , y pueden ser detectadas por el ojo humano, constituyendo lo que conocemos como luz visible. De la otra mitad, la mayoría se sitúa en la parte infrarroja del espectro y una pequeña parte en la ultravioleta (Castells, 2012).

La irradiancia solar ultra violeta (UV), es una radiación que tiene bastante energía para producir daño y perjuicios en sistemas biológicos, aunque, bajo condiciones normales, la protección de la capa de ozono, radiaciones de longitud de onda menores que 290 nm no llegan prácticamente a la superficie terrestre. (Rivas et al, 2008)

Los efectos biológicos de la radiación, dentro del intervalo espectral ultravioleta, presentan una drástica dependencia con la longitud de onda de la radiación. En 1932, el Comité Internationale de Lumiere (CIE) presentó una división para esta zona del espectro distinguiendo tres regiones A, B y C por los distintos efectos biológicos que presentan.

La Radiación Solar Ultravioleta cubre el rango espectral desde los 100 a los 400 nm y se divide en: Ultravioleta “C” de 100 a 280 nm, ultravioleta “B” de 280 a 320 nm y ultravioleta “A” de 320 a 400 nm. Como se puede observar en la siguiente figura:

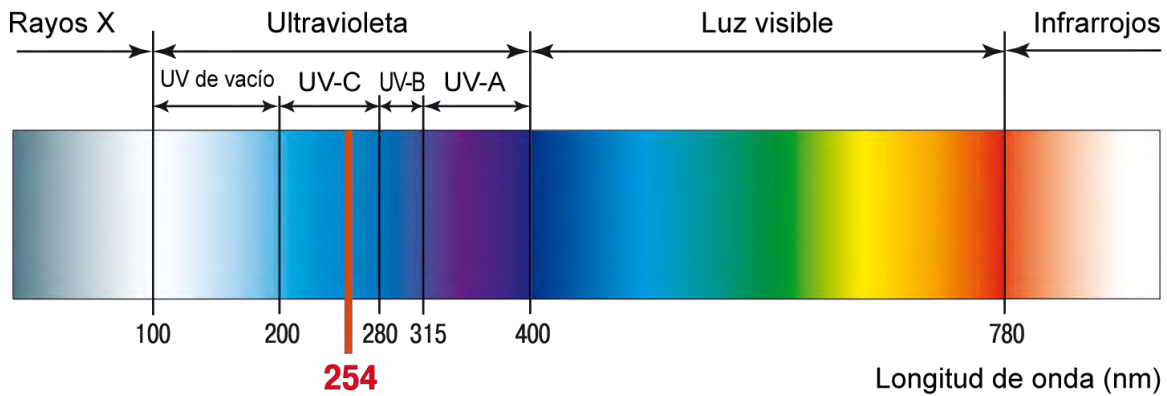
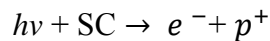


Figura 7. Rango espectro electromagnético. Fuente: <http://www.lit-uv.com/es/technology/>

En los procesos fotoquímicos, los fotones solares son absorbidos por un catalizador, generando una reacción que generalmente consiste en la generación del par electrón-hueco, que conlleva a nuevos procesos, principalmente de oxidación por la excitación de un semiconductor como se muestra a continuación:



Dónde:  $h\nu$  es la energía del fotón, SC es el semiconductor,  $e^{-}$  representa al electrón,  $p^{+}$  representa al par electrón hueco.

Se utilizan sustancias con baja energía y con alto poder oxidable, también porque los procesos pueden ser cíclicos y no hay reacciones alternas que puedan degradar los fotocatalizadores, además las reacciones pueden utilizar un rango amplio de espectro solar tanto como sea posible, y además de esto la reacción inicial puede ser lenta pero cuando alcanza el contenido energético adecuado, esta aumenta su velocidad.

El contaminante por sí mismo no es capaz de capturar fotones, se requiere el sensibilizador como absorbedor de la energía radiante y catalizador de la reacción de oxidación del contaminante. La aplicación de radiación solar para la realización de procesos fotoquímicos, sólo es posible mediante catálisis homogénea o heterogénea, usando cationes hierro o dióxido de titanio respectivamente. Estos catalizadores absorben a longitudes de onda del espectro solar, mientras que el ozono y el peróxido de hidrógeno no absorben por encima de 300 nm (Clemente, 2008).

### **Fotocatálisis**

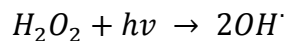
Fotocatálisis es la combinación de fotoquímica y catálisis, un proceso donde la luz y la catálisis son simultáneamente usadas para promover o acelerar la reacción química. Entonces la fotocatalisis puede ser definida como catálisis llevada de aceleración de una reacción inducida por medio de la luz. La fotocatalisis permite aprovechar directamente la energía solar que llega a la superficie terrestre, provocando la aceleración de una reacción fotoquímica mediante un catalizador, que da lugar a la eliminación de la materia orgánica disuelta en las aguas contaminadas.

Se sabe que la fotocatalisis heterogénea es activada por los rayos de sol cerca del espectro solar ultravioleta (longitud de onda bajo 380 nm), pero la fotocatalisis homogénea por foto-fenton usa grande porción del espectro solar (longitud de onda hasta 580). Ambos procesos son eficientes en la foto degradación de los contaminantes orgánicos, son una forma innovativa de utilizar energía renovable (Gogate y Pandit, 2004).

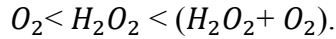
### **Método Ultravioleta y agua oxigenada UV-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**

El proceso combinado H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV tiene la capacidad de acelerar la generación de radicales (OH °) que son capaces de transformar diversos compuestos orgánicos tóxicos/recalcitrantes en productos más biodegradables y menos peligrosos, proporcionando, de esta forma, mejoras para el tratamiento de los efluentes contaminados.

El mecanismo propuesto para la fotólisis del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> es el rompimiento de la molécula por fotones por la acción de la luz UV en el rango 210 - 240 nm capaces de fotolizar las moléculas de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, generando dos radicales (OH °) por cada molécula de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, tal como se observa en la siguiente ecuación:



El H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> es un oxidante versátil, superior al cloro, dióxido de cloro y permanganato de potasio. Tiene la capacidad de producir radicales hidroxilo vía catálisis, bien sea en presencia o ausencia de radiación. El peróxido de hidrógeno es el agente oxidante más extensamente estudiado. En la gran mayoría de los casos, la velocidad del proceso aumenta de acuerdo con la siguiente secuencia:



### **Parámetros que influyen en el método UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**

Un gran número de parámetros influyen tanto cualitativa como cuantitativamente en el proceso de oxidación-reducción fotocatalizado y que, como consecuencia, resultan determinantes en la eficiencia global del proceso. La característica selectiva del peróxido de hidrógeno favorece su uso en diferentes aplicaciones. Simplemente ajustando factores como el pH, temperatura, dosis, tiempo de reacción, adición de catalizadores.

**pH:** Normalmente, el proceso de fotocatálisis es más eficiente en medio ácido ( $3 \leq \text{pH} \leq 5$ ). El pH afecta las propiedades superficiales del catalizador y a la forma química del compuesto a degradar, y ello se manifiesta en alteraciones de la velocidad de degradación y en la tendencia a la floculación del catalizador.

**Temperatura:** La velocidad de las reacciones fotocatalíticas no se modifica apreciablemente con la variación de la temperatura del sistema, aún en ensayos llevados a cabo utilizando radiación solar. Este comportamiento es típico de reacciones iniciadas fotoquímicamente, por absorción de un fotón. A presión atmosférica el rango recomendable de operación es de 25-45 °C, ya que a temperaturas superiores a 45 °C se produce una descomposición del peróxido de hidrógeno en oxígeno y agua (Torrades et al, 2008).

**Dosis:** La dosis de peróxido de hidrógeno influye fundamentalmente sobre la eficacia del proceso (Pignatello et al. 2006). Tanto la eficacia como la velocidad de la reacción tienden a aumentar con la concentración de los reactivos.

Un exceso de peróxido de hidrógeno daría lugar a la degradación del mismo por los radicales hidroxilos (Rodríguez et al. 2008).

**Tiempo de reacción:** Es el tiempo en el cual se va a llevar a cabo la reacción foto lítica del peróxido de hidrogeno en el cual se generaran los radicales hidroxilos.

**Tiempo de exposición a la radiación UV:** el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> absorbe muy poca radiación de longitudes de onda mayores a 254 nm por lo que se debe de aumentar el tiempo de exposición para generar



mayor tiempo de reacción y se puedan generar los radicales hidroxilos suficientes para que se pueda llevar a cabo la oxidación de los componentes orgánicos.

### **Ventajas y desventajas del método UV/ $H_2O_2$**

Las principales ventajas del uso del sistema UV/ $H_2O_2$  para la oxidación de materia orgánica son la disponibilidad del  $H_2O_2$  a nivel comercial, su facilidad de aplicación, estabilidad térmica, solubilidad y que es una fuente efectiva de  $OH^\circ$  produciendo 2  $OH^\circ$  por cada  $H_2O_2$ . La inversión de capital es mínima y la operación es simple. En contraposición, dada la baja sección eficaz de absorción de  $H_2O_2$  a 254 nm, se necesitan altas concentraciones del oxidante. El método no es efectivo para degradar alcanos fluorados o clorados, que no son atacados por  $OH^\circ$ .

Desventaja es que la velocidad de oxidación de contaminantes orgánicos depende de la velocidad de formación de radicales  $OH^\circ$ . Esto viene determinado por el hecho de que el  $H_2O_2$  absorbe muy poca radiación de longitudes de onda mayores a 254 nm (Blesa et al., 2001).

### **Colector solar**

El uso de procesos de oxidación avanzada utilizando radiación solar, requiere el desarrollo de tecnología fotoquímica que incluya el diseño eficiente de tecnologías colectoras de fotones solares y la dirección de esos fotones a un reactor apropiado para poder promover la reacción necesaria de foto degradación.

Para procesos fotoquímicos solares, es necesario la recolección de fotones con alta energía y largo de onda baja, ya que la mayoría de los procesos de fotocátalisis usan radiación ultravioleta (300 - 400 nm). (Oliveira et al., 2012)

El equipo que hace eficiente la recolección de fotones el colector solar; Los colectores solares son dispositivos capaces de captar la radiación solar y la intercambia por calor, transmitiéndole el calor a un fluido que circula por su interior que actúa como fluido portador de la energía térmica.

De forma genérica, los colectores solares están constituidos en esencia por un absorbedor que recoge la energía solar, una superficie reflejante, la estructura soporte y un tubo o tubos por los que circula el fluido termo-portador los cuales deben de ser transparentes a la luz para poder introducir los fotones dentro del fluido que se quiere tratar (Paredes, 2012).

Existen muchos tipos de colectores solares los cuales se pueden clasificar de distintas formas de acuerdo con (Paredes, 2012):

Tabla 7. Clasificación de colectores solares.

<b>Clasificación de colectores solares</b>		
<b>Aprovechamiento solar.</b> Tipo de radiación que utiliza.	Estacionarios: utilizan radiación solar directa y difusa, no tienen sistema de seguimiento, se necesita cierta inclinación del sistema.	
	Seguidores: utilizan radiación solar directa, y que necesitan un sistema de seguimiento del recorrido del Sol a lo largo del día.	
<b>Temperatura del fluido.</b> Dependiendo de la temperatura que alcanza el sistema	Temperatura baja (30°-100°C): Se utilizan para calefacción.	
	Temperatura media (100°-400°C): Se utilizan para procesos industriales	
	Temperatura alta (400°-3000°C): Se utilizan para centrales solares fototérmicas e investigación.	
<b>Grado de concentración.</b> De acuerdo a la concentración solar alcanzada.	No concentradores (C=1): todos los elementos del subsistema solar tienen el mismo emplazamiento físico por lo que la concentración que alcanza es baja.	
	Concentradores (C >1):	Concentración media: 5 a 50 veces la concentración solar (Oliveira et al., 2012).
		Concentración alta: 100 a 1000 veces la concentración solar (Oliveira et al., 2012).

Las clasificaciones de los colectores solares también se encuentran relacionadas entre sí, como la concentración está directamente relacionada a la temperatura por lo que un colector solar de concentración alta va a tener mayor temperatura y tendrá que tener un sistema de seguimiento del sol para poder alcanzar tal concentración y temperatura.

Ya que la temperatura no juega un rol importante en las reacciones fotoquímicas, en las aplicaciones tecnológicas típicamente se usan colectores estáticos no concentradores, al no concentrar la radiación su eficiencia no se ve reducida por factores asociados a la reflexión, concentración y seguimiento solar. Pueden utilizar ambas radiaciones directa y difusa cuando no concentran la luz solar (grado de concentración = 1), su rendimiento puede ser apreciablemente más alto para la aplicación fotocatalítica, ya que la componente difusa llega a representar el 50% de la radiación UV total que llega a la superficie terrestre (Blesa et al., 2001).

Los costes de construcción pueden ser menores al ser sus componentes más simples, lo que también se puede traducir en un mantenimiento más sencillo y reducido.

Además, los sistemas sin concentración requieren estructuras más económicas y de instalación sencilla y, finalmente, la superficie requerida para su instalación es más reducida porque al ser estáticos las sombras que proyectan son menores que las que proyectan los sistemas con seguimiento solar para la misma superficie de colector.

### **Colectores Cilindro-Parabólico- Compuestos (CPC)**

Dentro de los colectores no estáticos, los colectores Cilindro-Parabólico- Compuestos (CPC) han resultado ser una de las mejores opciones tecnológicas para aplicaciones solares de fotocatalisis. Estos colectores solares estáticos, están constituidos por una superficie reflectante que sigue una forma involuta alrededor de un reactor cilíndrico y han demostrado aportar una de las mejores ópticas para sistemas de baja concentración (Blesa et al., 2001).

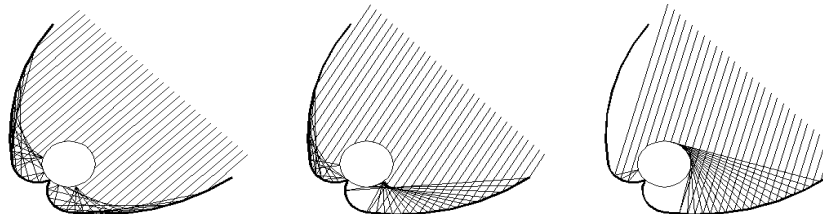


Figura 8. Reflexión solar en un colector cilindro-parabólico compuesto (CPC).

Para aplicaciones de fotocátalisis pueden ser diseñados con factor de concentración 1, con lo que, gracias al diseño particular del reflector, prácticamente la totalidad de la radiación UV que llega al área de apertura del colector CPC (tanto la directa como la difusa, independientemente ésta última de la dirección con que llega) es reflejada hacia el reactor, iluminando la parte interior del reactor tubular. Además, la forma tubular del reactor permite una fácil impulsión y distribución del agua a tratar, simplificando la parte hidráulica de la instalación.

Los reflectores CPC están generalmente hechos de aluminio pulido y la estructura puede ser un simple marco soporte del foto-reactor con tubos conectados.

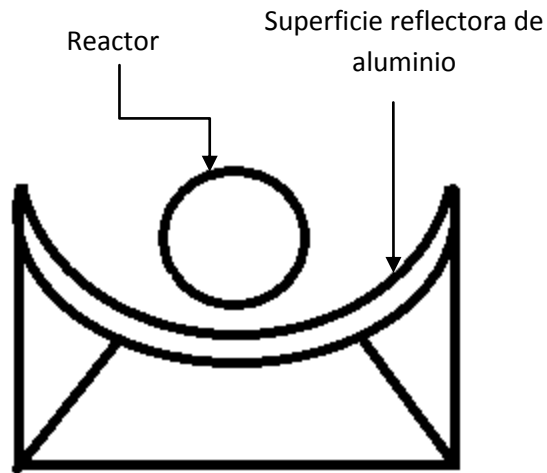


Figura 9. Diagrama simple de la superficie de aluminio y el tubo foto-reactor en un colector solar estático (Oliveira et al., 2012)

# Capítulo 3

## Metodología

---

## Introducción

En este capítulo se incluyen las propuestas de diseño del sistema de captación y aprovechamiento pluvial, así como los materiales, complementos y especificaciones para su implementación.

La metodología utilizada para la evaluación de la calidad del agua antes y después del proceso.

También se describen los reactores y fuentes de radiación utilizados en los experimentos de fotólisis. De los cuales, el diseño se desarrolla con sustento en los datos de la literatura consultada.

La metodología utilizada en este trabajo se dividió en 2 etapas, diseño del sistema de captación del agua de lluvia y la etapa experimental. A su vez la segunda etapa experimental se dividió en 3 etapas.

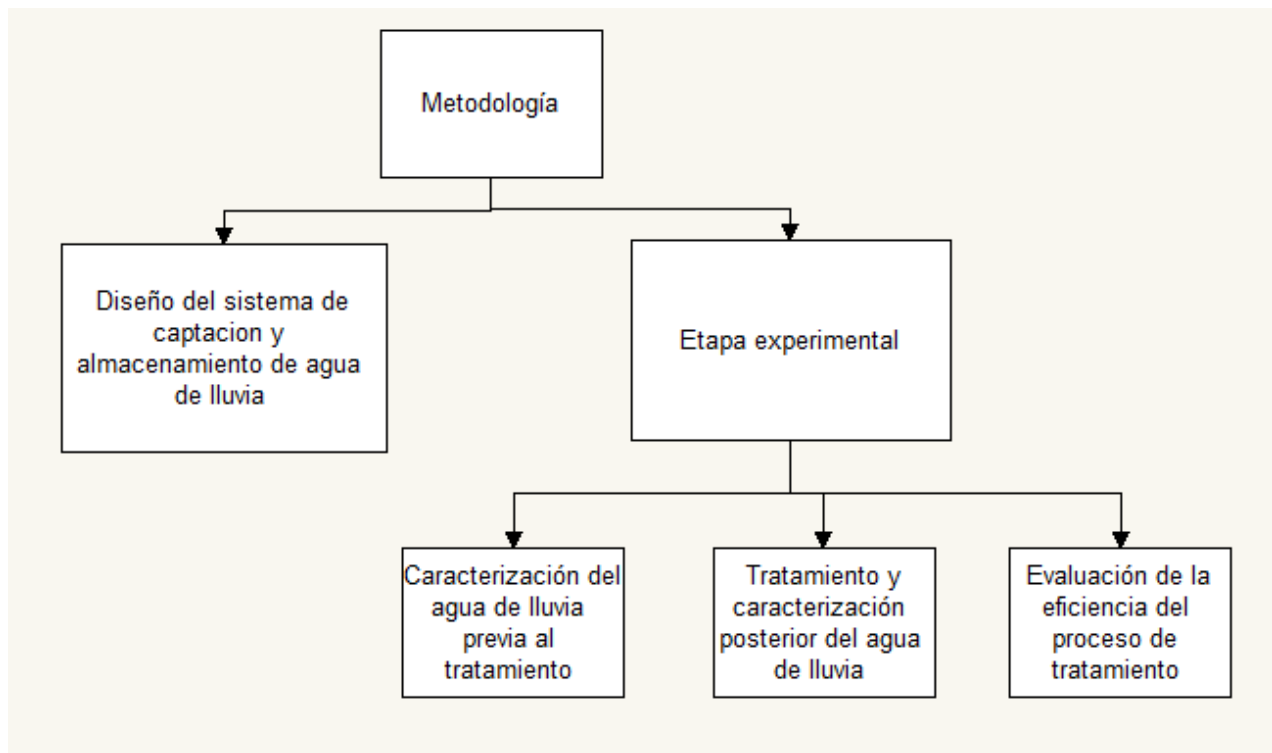


Figura 10. Metodología utilizada en este trabajo.

### Diseño del Sistema de Captación de agua de lluvia

Para el diseño del sistema de captación del agua de lluvia, se procedió a tomar medidas de altura, largo y ancho, área de captación de un edificio escolar ubicado en la Universidad de Quintana Roo, campus Chetumal en la ciudad de Chetumal, Quintana Roo.

El diseño del sistema de captación se hizo con base a la estructura del edificio escolar ya que la construcción el edificio tiene un tubo de PVC de 3 pulgadas que conecta el techo desde el hasta una salida de agua en la parte baja del edificio a 1 metro del suelo.

Se utilizó más tubo PVC de 3 pulgadas con unos codos de 3 pulgadas para conectar de la salida de agua a donde se almacenaría el agua.

Los pasos a seguir para la metodología del diseño del sistema de captación de agua de lluvia son una serie de cálculos para los cuales es necesario tener ciertos datos relacionados con el lugar en el cual se implementará el sistema los cuales están especificados en la siguiente tabla junto con los datos reales obtenidos del lugar de muestreo.

Tabla 8. Datos necesarios para la realización de cálculos de diseño del sistema de captación y almacenamiento de agua de lluvia (Anaya y Martínez, 2007) (CONAGUA, 2000).

<b>Datos necesarios</b>	<b>Datos reales</b>
Precipitación en la zona de los últimos 10 años	La precipitación media en la zona de los últimos años se puede consultar en la tabla tal ubicada en los anexos de esta tesis.
Precipitación promedio por año	1356.74 mm/año
Tipo de material de la captación	Concreto impermeabilizado
Coefficiente de escurrimiento	0.8
Área de captación	86.6712m <sup>2</sup>
Número de usuarios	Por persona*

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), son necesarios entre 50 y 100 litros de agua por persona al día para garantizar que se cubren las necesidades básicas y que no surjan grandes amenazas para la salud (PNUD, 2006).

Sin embargo, una persona en México consume alrededor de 365 lt/ persona/ día (PROFECO, 2007), lo que es mucho más de lo que está recomendado por la OMS, para la finalidad de este

trabajo se utilizará 365 lt/persona/día como base de cálculos para el diseño del sistema de captación y almacenamiento de agua de lluvia.

Después de la obtención de esos datos se procedió a realizar los siguientes cálculos:

### **Determinación de la precipitación promedio mensual**

A partir de los datos promedio mensuales de la precipitación de los últimos 10 o 15 años se obtiene el valor promedio mensual del total de años evaluados. Este valor puede ser expresado en mm/mes, litros/m<sup>2</sup>/mes, capaz de ser recolectado en la superficie horizontal del techo. (Anaya y Martínez, 2007)

$$P_{pi} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} p_i}{n} \quad \text{Ecuación 6}$$

### **Determinación de la demanda**

A partir de la dotación asumida por persona se calcula la cantidad de agua necesaria para atender las necesidades de la familia o familias a ser beneficiadas en cada uno de los meses (Anaya y Martínez, 2007).

$$D_i = \frac{Nu \times Nd \times Dot}{1000} \quad \text{Ecuación 7}$$

### **Determinación del volumen del tanque de abastecimiento**

Teniendo en cuenta los promedios mensuales de precipitaciones de todos los años evaluados, el material del techo y el coeficiente de escurrimiento, se procede a determinar la cantidad de agua captada para diferentes áreas de techo y por mes (Anaya y Martínez, 2007).



Ecuación 8

$$Vi = \frac{Ppi \times Cr \times Ac}{1000}$$

Otra manera de calcular el volumen del tanque de almacenamiento o cisterna de acuerdo al (CIDECALLI ,2007) consiste en considerar la demanda de agua mensual que necesita la población durante los meses de sequía más dos meses (coeficiente de seguridad) con el objeto de asegurar el abastecimiento de agua a la población.

$$Vcisterna = Dj * Msequía+2$$

Ecuación 9

### **Etapa Experimental**

La etapa experimental se dividió en 3 fases importantes para el trabajo de tesis, estas consistieron en: 1). La evaluación de la calidad del agua de lluvia previa al tratamiento, 2). El diseño y proceso del tren de tratamiento implementando el proceso de oxidación avanzada seguido de la evaluación de la calidad del agua de lluvia después del proceso de tratamiento y posteriormente, 3). La evaluación de la eficiencia del tratamiento comparando los resultados a los límites máximos permisibles señalados en la norma oficial mexicana NOM- 127-SSA1-1994. Las cuales se explican a continuación:

#### **Evaluación de la calidad del agua**

La evaluación consistió en analizar diversos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de una muestra de agua de lluvia obtenida de un sistema de captación en un edificio escolar en el campus Chetumal de la Universidad de Quintana Roo.

Para ello se requirió de un muestreo y análisis de los parámetros como se indica a continuación.

Para la finalidad de este trabajo de tesis se tomó un volumen de muestra de acuerdo al tanque de almacenamiento utilizado que es de 20 lt. Este volumen de muestra sirvió para la evaluación de la calidad de agua previa al tratamiento durante 4 meses para determinar si los parámetros fisicoquímicos del agua eran consistentes durante un tiempo determinado.

### ***Metodología de parámetros analíticos del agua***

Para el análisis microbiológico y fisicoquímico del agua previa al tratamiento, se adaptó un contenedor previamente desinfectado con una capacidad aproximada de 20 L de donde se tomaron directamente muestras, las cuales se analizaron en el laboratorio de Química de la División de Ciencias e Ingenierías en la Universidad de Quintana Roo (UQROO).

Antes de la obtención de las muestras, se dejaron pasar 2 lluvias anteriores para que se pudiera limpiar el techo y el sistema de captación de cualquier material orgánico como hojas que por acción del viento pudieran llegar al techo utilizado como punto de muestreo.

Se acondiciono un tanque para almacenamiento, el cual se podía remover en caso de la necesidad de disponer de las muestras.

Los parámetros físicos se eligieron debido a que son indicadores inmediatos de contaminación visible. Los fisicoquímicos se eligieron para analizar el grado de contaminantes disueltos y el grado de corrosión o alcalinidad. Los parámetros microbiológicos se eligieron por las consecuencias que se tienen a la salud.

Los análisis de los parámetros se realizaron con forme lo especificado en las metodologías estándar de las normas mexicanas respectivas de cada parámetro. En la siguiente tabla se muestran los parámetros utilizados para el análisis del agua de lluvia junto con las normas mexicanas que los rigen.

Tabla 9. Parámetros analizados y las normas mexicanas donde se indica la metodología utilizada

Parámetros	Normas	
Temperatura	NMX-AA-007-SCFI-2000	Análisis de agua – Determinación de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-007-1980)
pH	NMX-AA-008-SCFI-2000	Análisis de agua – Determinación del pH – Método de prueba (Cancelación a la NMX-AA-008-1980)
Conductividad	NMX-AA-093-SCFI-2000	Análisis de agua – determinación de la conductividad electrolítica – método de prueba (cancela a la nmx-aa-093-1984)
Turbiedad	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)
OD	NMX-AA-012-SCFI-2001	Análisis de agua – Determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-012-1980)
DBO	NMX-AA-028-SCFI-2001	Análisis de agua – Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales(DBO5) y residuales tratadas – Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-028-1981)
Coliformes fecales y totales	NMX-AA-042-1987	Calidad del agua determinación del número más probable (nmp) de coliformes totales, coliformes fecales (termotolerantes) y escherichia coli presuntiva.
SST	NMX-AA-034-SCFI-2001	Análisis de agua – Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba (cancela a LAS NMX-AA-020-1980 Y NMX-AA-034-1981)
Alcalinidad	NMX-AA-036-SCFI-2001	Análisis de agua – Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales tratadas – Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-036-1980)
Dureza	NMX-AA-072-SCFI-2001	Análisis de agua – determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba (cancela a la nmx-aa-072-1981)

Posterior a la caracterización, en el análisis de los parámetros antes y después del tratamiento con motivo de evaluar la eficiencia del proceso de tratamiento se agregó el análisis de Cloro residual, siguiendo la metodología mencionada en la norma listada a continuación:

Cloro total, residual y libre	NMX-AA-073-SCFI-2001	Calidad del agua - determinación de cloro libre y Cloro total - método de prueba (cancela a la nmxaa-108-1992)
-------------------------------	----------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Este parámetros se analizó en el agua posterior del tratamiento debido a que es la etapa final del proceso y por la definición del mismo, en un agua ya tratada por lo que debe de quedar un remanente de cloro que es el que acompañara el agua a lo largo de su almacenamiento posterior para evitar la proliferación de microorganismos.

#### ***Evaluación de la eficiencia del tratamiento del agua de lluvia.***

Para la evaluación de la eficiencia se utilizó la siguiente formula tomada y adaptada de (Wereinigung, 1988):

Eficiencia de Remoción (%)

Ecuación 10

$$= \frac{[\text{parámetro de entrada} - \text{parámetro de salida}] * 100}{[\text{parámetro de entrada}]}$$

#### ***Diseño y construcción del Colector Solar.***

Se construyó un colector solar de PVC de 1.07 m de largo y 4 pulgadas de diámetro, este cilindro fue cortado por la mitad quedando dos partes semicirculares, las cuales fueron polarizadas con un material reflejante, los semicírculos fueron pegados a una base de madera pintada de negro, con el objeto de aprovechar lo más posible la radiación solar.

En el centro del dispositivo se colocó un tubo cortado proveniente de tubos evacuados de 1.20 m de largo y 0.065 m de diámetro, con capacidad de 1 L, a dicho tubo se le hicieron adecuaciones

diferentes en ambos extremos, En los extremos del tubo fueron colocados unos “codos” de PVC para sellar y evitar que se derrame el líquido, así mismo a este “codo” se le dejó un orificio por donde se introdujo la manguera de aireación. En el segundo extremo se pudo colocar un termómetro para analizar la temperatura durante el proceso.

El CPC se colocó en el centro del edificio de la División de Ciencias e Ingeniería ubicado en la Universidad de Quintana Roo.

### ***Sistema de aireación***

A través del tubo de cristal se hizo pasar una manguera de 3m de largo a la cual se le realizaron orificios de 3cm de separación entre uno y otro, y en cada extremo de la manguera se conectó a dos bombas de aireación.



Figura 11. Colector solar para el Proceso de Oxidación Avanzada.

### ***Diseño del tren de tratamiento de agua de lluvia***

De acuerdo con los resultados de la evaluación de los parámetros para la determinación de la calidad del agua de lluvia previo al tratamiento. Se propuso un tren de tratamiento usando como base a un tratamiento de potabilización convencional, descrito en el capítulo anterior de esta tesis.

El objetivo de este trabajo de tesis es determinar la eficiencia del tratamiento de agua de lluvia con un proceso de oxidación avanzada por lo que al tren de tratamiento se le agregó en una proceso unitario, un reactor en donde se llevaría a cabo el proceso de oxidación avanzada.

El tren propuesto se muestra en la siguiente figura:

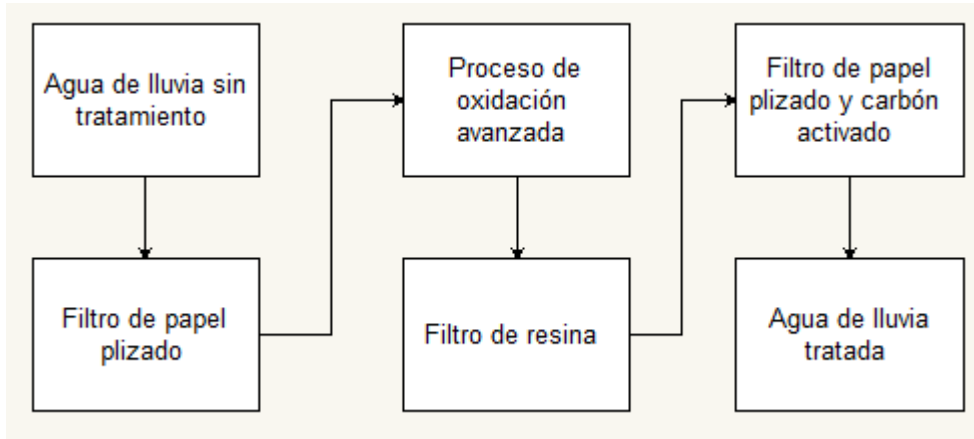


Figura 12. Tren de tratamiento propuesto para el tratamiento del agua de lluvia.



Figura 13. Proceso de tratamiento de agua de lluvia, con un reactor de proceso de oxidación avanzada.

### Procesos unitarios en el tratamiento del agua de lluvia

Se colocó la muestra de agua de lluvia en una pecera conectada por medio de una manguera de látex al filtro de papel plisado para iniciar con el proceso de tratamiento del agua de lluvia como se muestra en la siguiente figura:



Figura 14. Contenedor del agua de lluvia en el inicio del proceso de tratamiento.

## Filtración

Para este proceso unitario previamente estudiado en el Estado del Arte de esta tesis, se utilizaron 3 filtros diferentes en etapas distintas del proceso de tratamiento del agua de lluvia, los cuales se indican a continuación:

- Se utilizó en la etapa 1 como primer contacto con el agua, un filtro standard de papel plisado marca ROTOPLAS con una granulometría de  $\geq 50$  micras y una capacidad de filtración de 24 litros por minuto. Del cual posteriormente el agua pasaría al reactor del proceso de oxidación avanzada a través de una manguera de látex.
- Un Filtro de Resina en el cual, dentro de un filtro se adicionó 150 gr. de resina sintética. El agua que pasó por este filtro se fue por medio de manguera de látex al último filtro de papel plisado con carbón activado.
- Como penúltimo proceso unitario del tratamiento, se utilizó otro filtro standard de papel plisado marca ROTOPLAS con una granulometría de  $\geq 50$  micras y una capacidad de filtración de 24 litros por minuto, en el cual se agregó carbón activado convencional de granulometría tipo lenteja hasta llegar al tope, posteriormente se adicionó algodón y gasa como tapón para sellar y no permitir que el carbón activado pudiera salir junto con el agua.



Figura 15. Filtro standard de papel plisado ROTOPLAS.



Figura 16. Filtro de resina sintética





Figura 17. Filtro de papel plisado con carbón activado.

### **Proceso de oxidación avanzada.**

Después de que el agua tuvo el primer contacto con el primer filtro de papel plisado, pasó al reactor de proceso de oxidación avanzada el cual se ha mencionado previamente su construcción. Dentro del cual, se retuvo alrededor de 1 litro del agua de lluvia, se le agregó 1.02 ml de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y se dejó bajo el sol por medio de 2 hr para propiciar la reacción fotoquímica mientras se aireaba por medio de unas bombas de pecera marca “ECOPET” de dos salidas. Dentro de ese lapso se colocó un termómetro al final del reactor para monitorear la temperatura en todo momento.



Figura 18. Reactor del Proceso de Oxidación Avanzada.



Figura 19. Aireación en el reactor del POA UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>



Figura 20. Termómetro utilizado para monitorear la temperatura en el reactor del POA.

### **Descripción del proceso.**

Las pruebas para la evaluación del proceso del tratamiento del agua se realizaron como se describe a continuación:

1. Se colocó el tren de tratamiento en medio de la División de Ciencias e Ingeniería, donde tuviera acceso a gran cantidad de luz solar a cierta hora del día.
2. Obtenida una muestra de agua de lluvia, se utilizó alrededor de 2Lt inicialmente para pasar por el proceso de tratamiento.
3. Antes de iniciar el proceso a la muestra de agua se le midieron los parámetros analíticos antes del tratamiento.
4. Se colocó la manguera de aireación, cual fue insertada dentro del tubo de cristal que se colocó en el CPC.
5. El agua de lluvia por medio de la gravedad se hizo pasar por un filtro de papel plizado.
6. Posteriormente pasó al Tubo de cristal en el colector solar en el cual se quedó 1 Lt de la muestra.
7. De la medición de volumen del  $H_2O_2$ , se adicionó la cantidad establecida de 1.02 ml directamente al tubo de cristal colocado en el colector solar.
8. Una vez agregado el reactivo a la muestra de agua depositada en el tubo de cristal del reactor, se dio comienzo al proceso de oxidación avanzada.
9. Ya con la muestra en el colector, se encendió el sistema de aireación.
10. Se dejó el reactor funcionando alrededor de 2 horas propuestas.
11. Pasado el tiempo de reacción, el agua por medio de gravedad pasó a un filtro de resina sintética
12. El agua paso a un filtro de carbón activado para después ser analizada.

La cantidad de agua utilizada inicialmente, fue propuesta en caso de que hubiera pérdidas. Ya obtenida el agua que pasó por el proceso, se llevó al laboratorio para analizar sus parámetros fisicoquímicos y microbiológicos para así poder hacer una comparación y evaluar la eficiencia del proceso. En todo momento se vigiló la temperatura del reactor para evitar que sobrepasara la temperatura aceptable dentro de la reacción del proceso de oxidación avanzada.

# Capítulo 4.

## Resultados y Discusión

---

## Resultados del diseño del sistema de captación.

### Determinación de la precipitación promedio mensual

De la ecuación 2:

$$Ppi = \frac{\sum_{i=1}^n pi}{n}$$

Con los datos reales obtenidos, la precipitación promedio mensual de todos los años evaluados es:

$$Ppi = \frac{1356.769}{10} = 135.6769 \text{ mm/mes}$$

### Determinación de la demanda

De la ecuación 3 se obtuvo que:

$$Di = \frac{Nu \times Nd \times Dot}{1000}$$

$$\text{Demanda mensual (Di)} = \frac{1 \times 30 \times 365}{1000} = 10.95 \frac{m^3}{mes}$$

Tabla 10. Demanda mensual para número diferente de usuarios.

Número de usuarios	Di= demanda mensual (m <sup>3</sup> )
1	10.95
2	21.9
3	32.85
4	43.8
5	54.75
6	65.7

### Determinación del volumen del tanque de abastecimiento

De acuerdo con la ecuación 4 especificada en la metodología de esta tesis el volumen de captación sería:

$$Vi = \frac{Ppi \times Cr \times Ac}{1000}$$

$$Vi = \frac{1356.769 \times 0.8 \times 86.6712}{1000} = 94.69m^3$$

Tabla 11. Volumen de almacenamiento mensual con un área de captación de 86.6712 m<sup>2</sup>.

Mes	Precipitación (mm)	Demanda (m3/mes)	Coefficiente de escorrentía	Almacenamiento(m3/mes)
Enero	59.82	10.95	0.8	4.14
Febrero	46.79	10.95	0.8	3.24
Marzo	34.27	10.95	0.8	2.37
Abril	44.87	10.95	0.8	3.11
Mayo	119.249	10.95	0.8	8.26
Junio	171.37	10.95	0.8	11.88
Julio	137.48	10.95	0.8	9.53
Agosto	140.03	10.95	0.8	9.7
Septiembre	161.47	10.95	0.8	11.19
Octubre	271.33	10.95	0.8	18.81
Noviembre	113.04	10.95	0.8	7.83
Diciembre	57.05	10.95	0.8	3.95
Promedio anual	113.0640833	10.95	0.8	7.83416667

Al ver que el almacenamiento del agua no cumple con la demanda de agua, se optó por calcular el área de captación óptima para cumplir con la demanda a partir de los datos ya obtenidos previamente.

Área de captación (m<sup>2</sup>) x 1.356769 m<sup>3</sup> x 0.80 = 131.4 m<sup>3</sup>, despejando el área se obtiene:

$$\frac{131.4 \text{ m}^3}{1.356769 \text{ m}^3 \times 0.80} = 121.05 \text{ m}^2$$

Al realizar un nuevo cálculo con el área requerida y al tener la diferencia entre los valores mensuales de la columna de almacenamiento y demanda, la suma total debe ser igual o mayor a cero. Los valores obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 12. Diferencias acumuladas de precipitación mensual.

Mes	Precipitación (mm)	Demanda (m3/mes)	Coefficiente de escorrentía	Almacenamiento (m3/mes)	Diferencia (m3/mes)	Diferencia acumulada (m3/mes)
Enero	59.82	10.95	0.8	5.79	-5.16	-5.96
Febrero	46.79	10.95	0.8	4.53	-6.42	-12.38
Marzo	34.27	10.95	0.8	3.31	-7.64	-20.02
Abril	44.87	10.95	0.8	4.34	-6.61	-26.63
Mayo	119.249	10.95	0.8	11.54	0.59	-26.04
Junio	171.37	10.95	0.8	16.59	5.64	-20.4
Julio	137.48	10.95	0.8	13.31	2.36	-18.04
Agosto	140.03	10.95	0.8	13.56	2.61	-15.43
Septiembre	161.47	10.95	0.8	15.63	4.68	-10.75
Octubre	271.33	10.95	0.8	26.27	15.32	4.57
Noviembre	113.04	10.95	0.8	10.94	-0.01	4.56
Diciembre	57.05	10.95	0.8	5.52	-5.43	-0.87
Promedio anual	113.064083	10.95	0.8	10.9441667		

En la columna de la diferencia acumulada, se anotan los valores de consumos acumulados, en el caso de los valores negativos son por falta de lluvia. Se observa en estos valores un consumo máximo acumulado en el mes de Abril época de sequía de 26.63 m<sup>3</sup> y otro volumen máximo que debe de almacenarse por los excedentes en la temporada de lluvia en el mes de Julio de 18.04 m<sup>3</sup>.

Al sumar ambos valores, se obtiene el volumen del tanque de almacenamiento requerido:

$$26.63+18.04= 44.67 \text{ m}^3$$

El volumen se calculó de nuevo con otra fórmula (Página #) especificada en la metodología, para corroborar los datos obtenidos.

Con los valores reales de este trabajo se obtuvo el siguiente valor:

$$V_{cisterna} = Dj * M_{sequía} + 2 = 10.95 \frac{m^3}{mes} * 4 \text{ meses} + 2 = 45.8 m^3$$

El cual es un valor un poco más alto al obtenido anteriormente sin embargo está aproximado por lo que se puede utilizar el valor más alto para garantizar mayor abastecimiento de agua.

### Resultados de parámetros analíticos de la caracterización del agua de lluvia pretratamiento.

Antes de darle un tratamiento al agua de lluvia, se hizo una caracterización previa durante los meses que se muestran en la siguiente tabla, donde también se observan los resultados de los análisis de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos en los meses correspondientes:

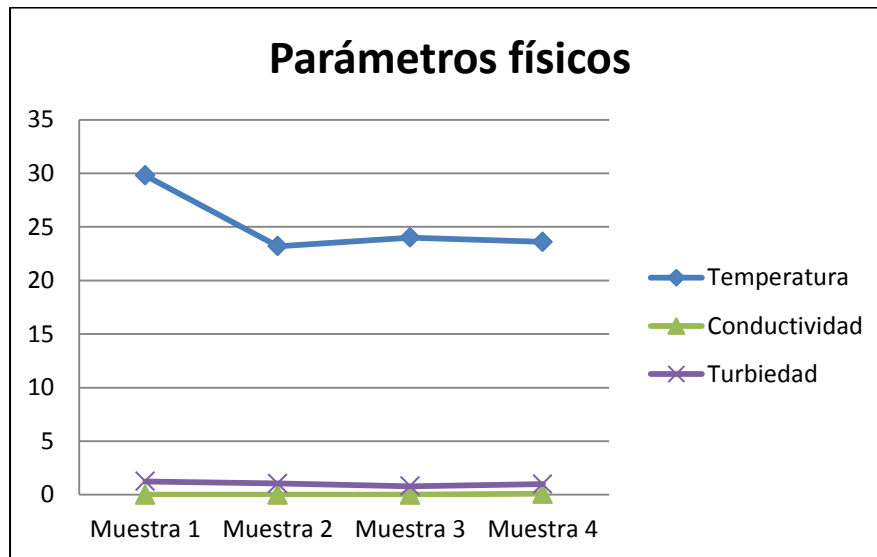
Tabla 13. Resultados del análisis de los parámetros analíticos para la caracterización.

Parámetros	Unidades	Muestra 1. Septiembre	Muestra 2. Octubre	Muestra 3. Noviembre	Muestra 4. Diciembre
Temperatura	°C	29.8	23.2	24	23.6
pH		8.6	8.1	8.5	7.71
Conductividad	$\mu s/cm$	0.01	0.01	0.01	0.1
Turbiedad	UNT	1.25	1.05	0.8	1
OD	mg/L	6.46	5.07	5.07	5.77
DBO mg/L	mg/L	5.99	6.106	0.12	0.12
Coliformes totales	NMP	26	17	17	21
Coliformes fecales	NMP	170	49	33	140
ST	mg/L	2	1.5	0.5	0.7
Alcalinidad	mg/l como CaCO <sub>3</sub>	7	5.666	9.333	11.333
Dureza	mg/l de CaCO <sub>3</sub>	4.16	12.48	18.373	36.4



### ***Parámetros físicos en la caracterización del agua de lluvia antes del tratamiento.***

Dentro de los parámetros físicos en los meses de caracterización, cada muestra analizada corresponde a un mes diferente a lo largo del tiempo del análisis el cual fue de 4 meses desde Septiembre hasta Diciembre. La grafica siguiente indica que la temperatura va disminuyendo de acuerdo a los cambios de temporada, cambia de otoño a invierno por lo que la temperatura decae. Sin embargo se puede notar que permanece relativamente alta por lo que puede influir en la aceleración de la actividad biológica de microorganismos de acuerdo con (El CEPIS, 2004). En los demás parámetros se puede notar cierta estabilidad a lo largo del análisis, lo cual demuestra que no hay procedencia de partículas en suspensión que puedan provocar mayor turbiedad al agua a lo largo de la temporada.



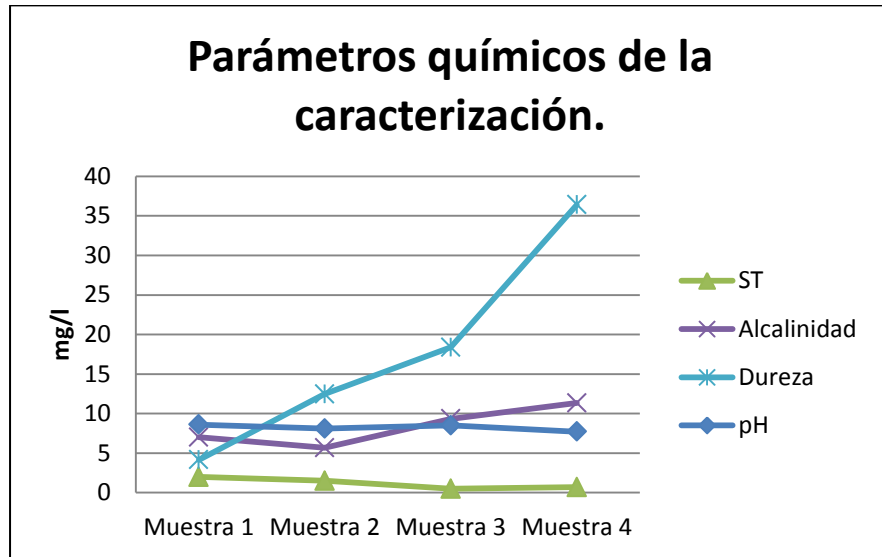
Gráfica 1. Parámetros físicos en la caracterización del agua de lluvia.

### ***Parámetros químicos en la caracterización del agua de lluvia antes del tratamiento.***

De los parámetros químicos, se puede observar que el agua de lluvia sin tratamiento, contiene una dureza mayor en comparación a los demás parámetros, de los cuales la alcalinidad que se encuentra relacionada con la dureza también es de los más altos. La variación del pH se puede

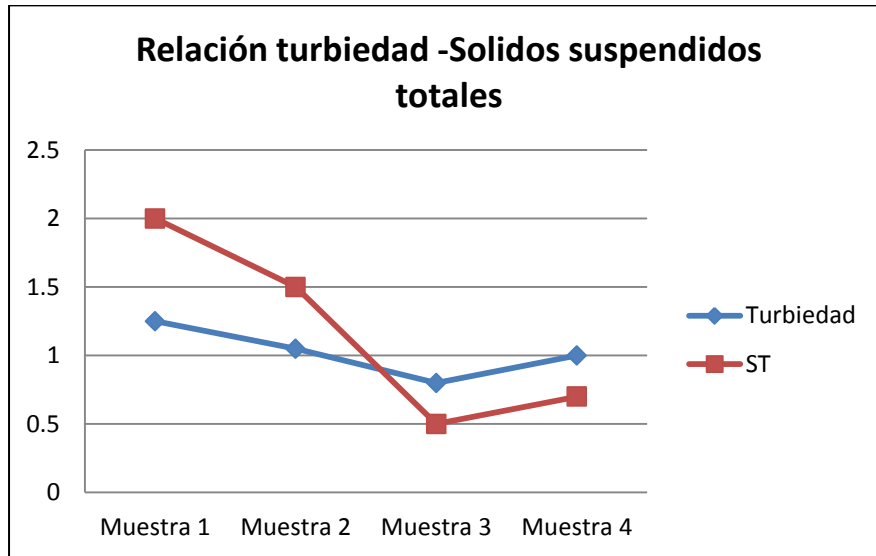
deber a que conforme transcurre la temporada hay menor concentración de partículas en la atmósfera que neutralizan la acidez por efecto del arrastre pluvial (García, 2012).

El valor de los sólidos totales se encontró en todos los casos por debajo 5 mg / l, esto se puede deber a el sitio de recolección dificulta el transporte de solidos por aire y con ayuda de un pre-filtrado se puede mantener un valor bajo de sólidos.



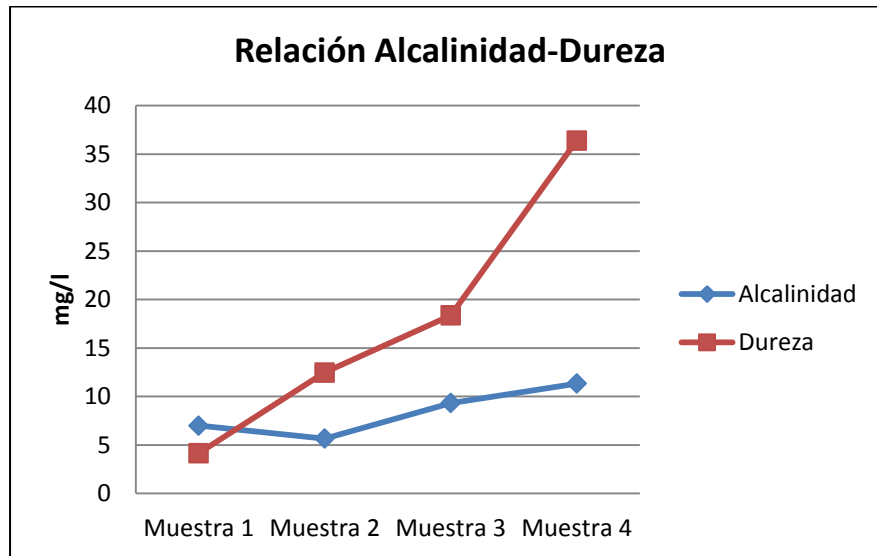
Gráfica.2 Parámetros químicos en la caracterización del agua de lluvia.

De la gráfica 3, se puede decir que la lluvia poco a poco arrastra los contaminantes del suelo y este valor se ve reflejado en la manera que descienden los ST por lo que la turbiedad mostrada en la gráfica 1 se encuentra baja. Esto muestra que con el filtrado adecuado, la calidad del agua respecto a los sólidos y turbiedad puede aumentar considerablemente.



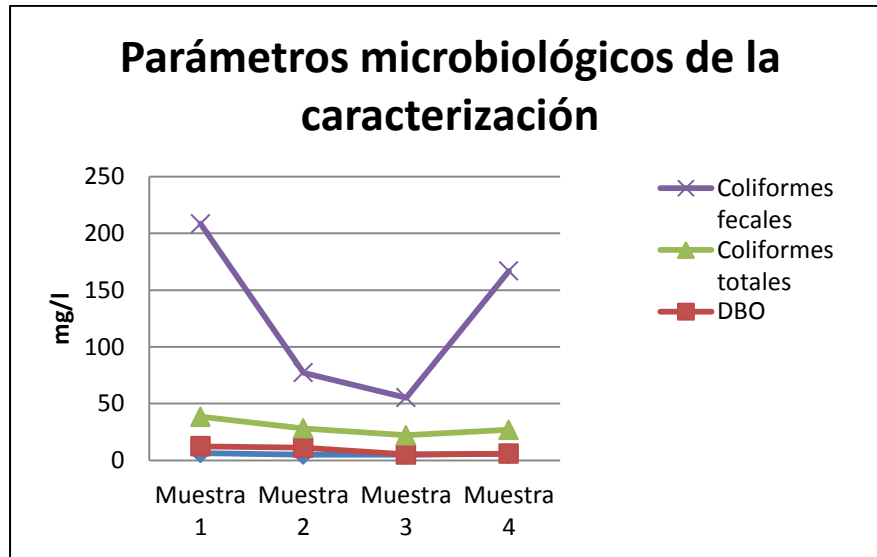
Grafica 3. Relación de parámetros de turbiedad y sólidos suspendidos totales en la caracterización.

Se puede observar en la gráfica 4 que la alcalinidad va aumentando conforme va aumentando la dureza, a lo largo de la temporada de lluvias, sin embargo no se encontró otra relación de la dureza con algún otro parámetro que sea causante de su aumento.



Grafica 4. Relación entre parámetros de alcalinidad y dureza durante los meses de caracterización.

**Parámetros químicos en la caracterización del agua de lluvia antes del tratamiento.**

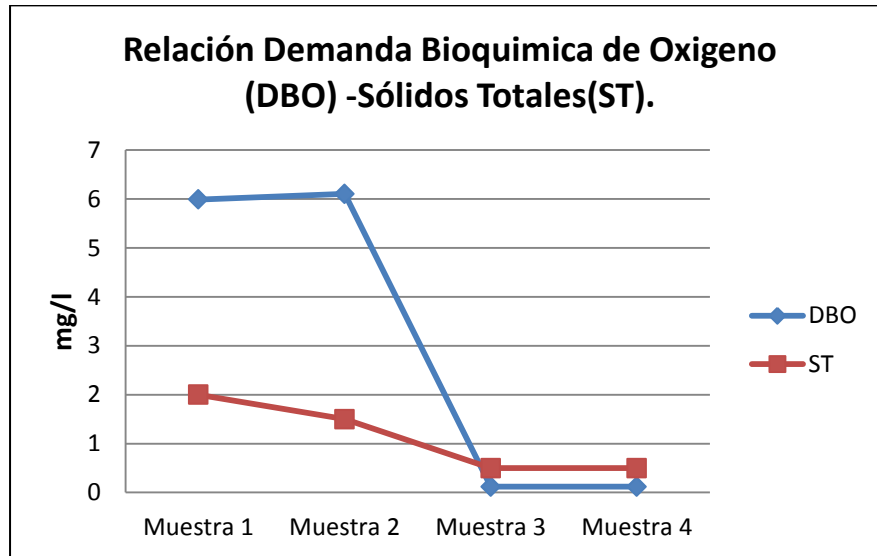


Gráfica 5. Parámetros microbiológicos en la caracterización del agua de lluvia.

La gráfica 5 indica alto contenido de coliformes totales y fecales, a partir del análisis de los datos obtenidos, se verifica que los valores de coliformes totales y fecales presentaron variaciones, indicando desde el valor mínimo de 33 NMP en 100 mg/l como el valor máximo encontrado en la primera muestra 170 NMP en 100 mg/l en los coliformes fecales.

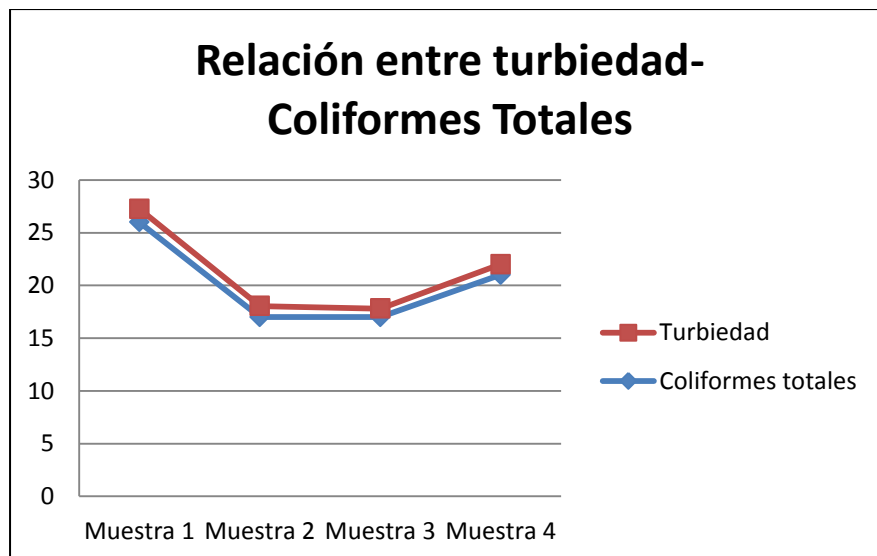
Estos valores altos son la indicación de la existencia de contaminación por heces de animales de sangre caliente como aves, lo que muestra que los microorganismos encontrados podrían afectar la salud humana, como lo son las bacterias *E. coli*. por lo cual es necesario que el sistema tenga un tratamiento antes del reúso.

En la siguiente gráfica, se puede observar la relación entre la DBO y los Solidos suspendidos totales contenidos en el agua, se puede decir que conforme avanza la temporada de lluvias y se arrastran los contaminantes, parte de estos es materia orgánica por lo que la demanda de oxígeno de la materia que es la oxidación de la materia orgánica va a disminuir de igual manera.

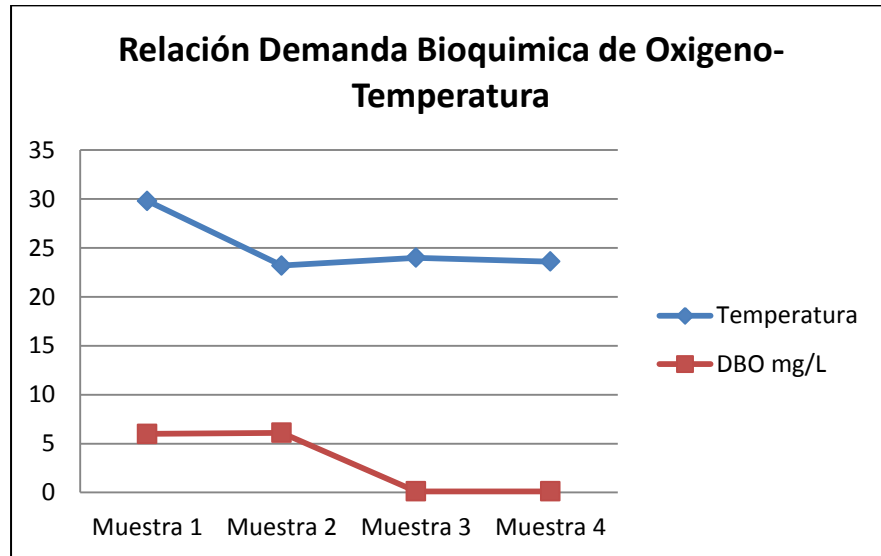


Gráfica 6. Relación entre parámetros de DBO y SST durante los meses de caracterización del agua de lluvia.

La siguiente gráfica nos muestra la relación cercana entre la turbiedad y los coliformes totales los cuales son microorganismos que proliferan en el agua, comparando los datos es posible observar que las muestras que corresponden a los mayores valores de coliformes, también, presentaron turbidez elevada, indicando que los causantes de la turbiedad son los microorganismos.



Grafica 7. Relación entre parámetros de turbiedad y coliformes totales durante los meses de caracterización del agua de lluvia.



Gráfica 8. Relación de parámetros de temperatura y DBO en la caracterización del agua de lluvia.

Mientras que el oxígeno disuelto se mantiene estable lo que indicaría que más la temperatura es un ambiente adecuado para la proliferación de microorganismos, sin embargo el decremento de la DBO indica que la demanda de oxígenos por parte de los microorganismos va a depender en parte de la temperatura como se puede mostrar en la gráfica 8.

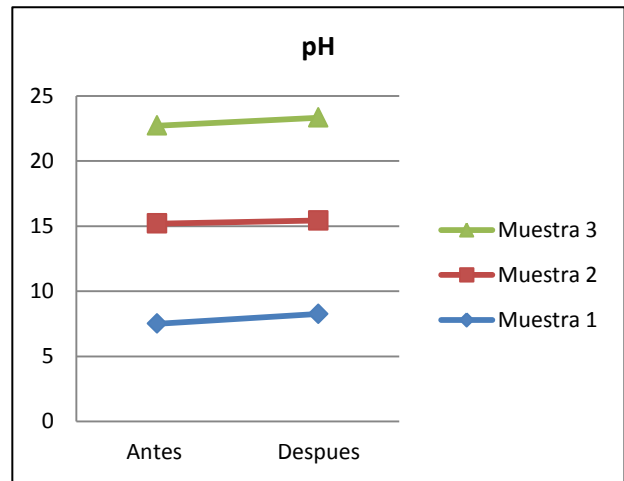
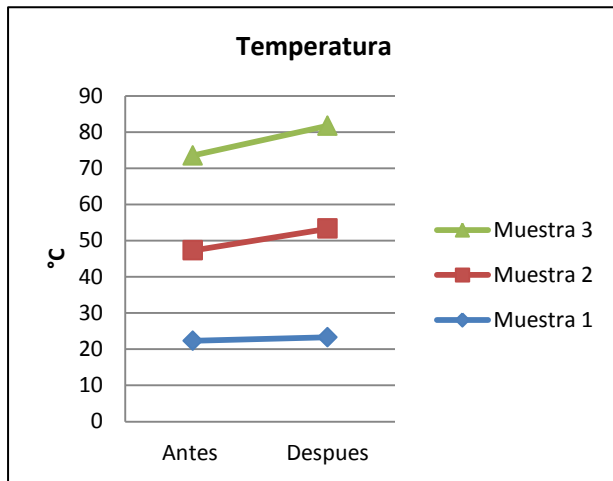
### Resultados de parámetros analíticos posteriores al tratamiento del agua de lluvia.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos antes y después del tratamiento del análisis de los parámetros establecidos para los cuales se hicieron muestras por triplicado como se indica a continuación:

Tabla 14. Tabla comparativa entre los resultados del análisis de los parámetros antes y después del tratamiento del agua de lluvia.

Antes del tratamiento				Después del tratamiento			
Parámetros	M1	M2	M3	Parámetros	M1	M2	M3
Temperatura °C	22.3	25	26.2	Temperatura °C	23.3	30	28.4
pH	7.5	7.69	7.52	pH	8.25	7.18	7.9
Conductividad $\mu\text{s/cm}$	0.3	0.02	0.05	Conductividad $\mu\text{s/cm}$	0.3	0.13	1.51
Turbiedad UNT	1.34	1.17	1.51	Turbiedad UNT	3.88	2.28	4.91
OD mg/L	0.38	5	0.12	OD mg/L	7.18	7.68	6.82
DBO mg/L	6.106	4.31	0.04	DBO mg/L	6.106	1.65	0
Coliformes totales NMP	21	6	5	Coliformes totales NMP	0	0	0
Coliformes fecales NMP	180	4	2	Coliformes fecales NMP	0	0	0
Sólidos totales mg/L	0.000014	0.00002	0.0000136	Sólidos totales mg/L	0.000537	0.000639	0.000394
Alcalinidad mg/l como CaCO <sub>3</sub>	9.333	13.3333	7	Alcalinidad mg/l como CaCO <sub>3</sub>	9	60.3333	78.3
Dureza mg/l de CaCO <sub>3</sub>	28.42	26.34	9.36	Dureza mg/l de CaCO <sub>3</sub>	13.52	19.066	7.97

A continuación se describe de manera más detallada el análisis de cada uno de los parámetros antes y después del tratamiento del agua de lluvia:



Gráfica 9. Temperatura antes y después del tratamiento

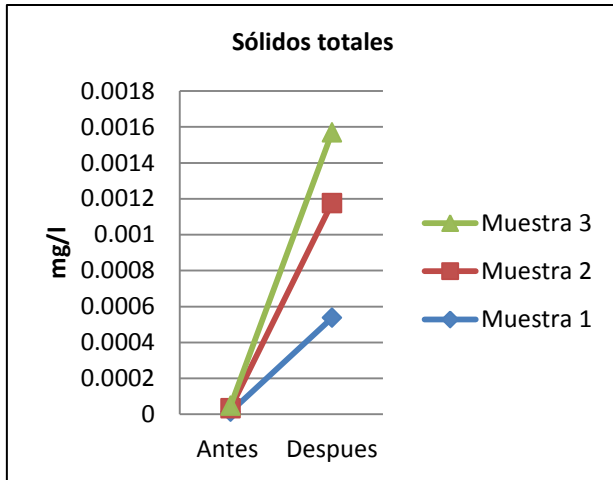
Gráfica 10. pH antes y después del tratamiento

De acuerdo a la gráfica 9, la temperatura después del proceso aumentó, como se tenía previsto debido a que el proceso involucra la radiación del sol, sin embargo la temperatura siempre se mantuvo dentro del rango adecuado de operación del proceso de oxidación avanzada sin superar los 45 °C en donde ocurre una descomposición del peróxido de hidrogeno (Torrades et al, 2008).

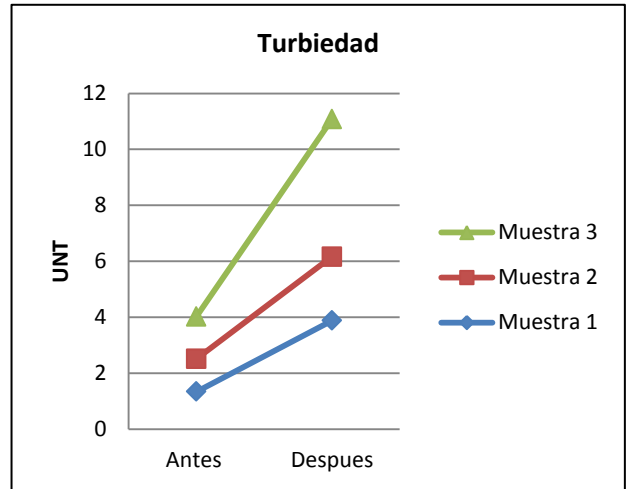
De acuerdo con el trabajo de investigación de ( ) donde el autor analizo el pH con forme la dosis del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, concluyó que el pH disminuye ligeramente con la dosis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> añadida. Esto es debido a que el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> tiene un pH en torno a 6 o menor, y por ello el pH disminuye con mayor cantidad de dosis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Esto nos indica que debido a que la cantidad añadida en esta tesis fue pequeña, el pH aunque constante, tuvo cierto aumento.

El aumento del pH después del tratamiento mostrado en la gráfica 10, no conlleva ninguna afectación en el proceso de acuerdo con los resultados de la investigación de (Castro y Durán, 2014) en el proceso de UV / H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.



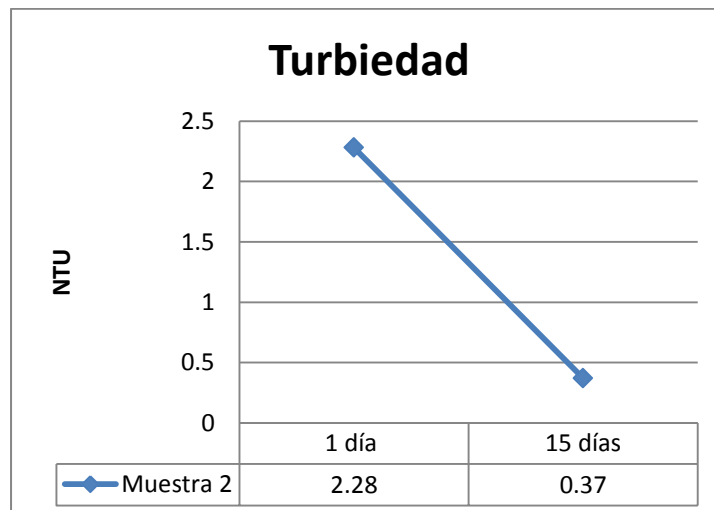


Gráfica 11. Sólidos totales antes y después del tratamiento

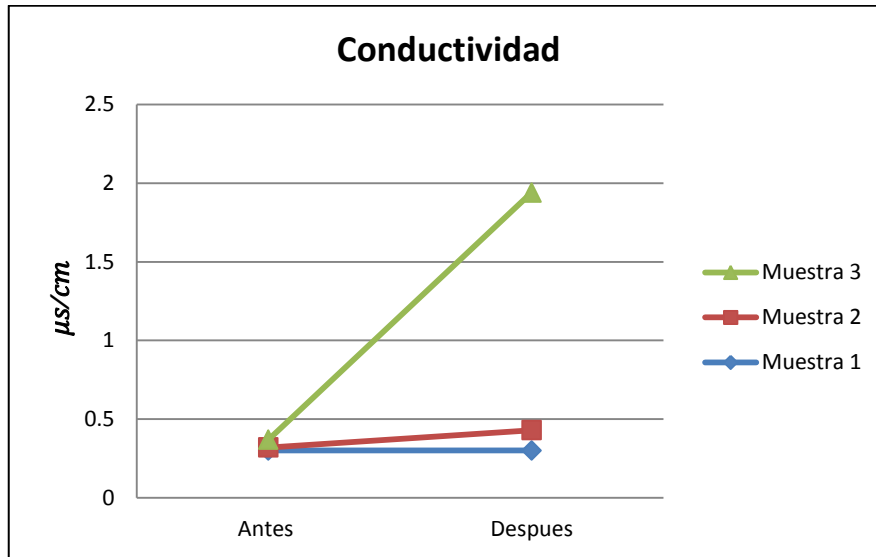


Gráfica 12. Turbiedad antes y después del tratamiento

El aumento de los parámetros de sólidos totales así como la turbiedad se debe a que la reacción del peróxido de hidrógeno se sigue realizando en el agua por lo que el aumento de dichos parámetros es debido a la cantidad adicional del catalizador para que se lleve a cabo el proceso de oxidación avanzada. Para sustentar dicho argumento, se realizó un subexperimento donde se almacenó el agua tratada de la muestra 2 y se analizó la turbiedad a los 15 días los resultados se muestran en la siguiente gráfica:

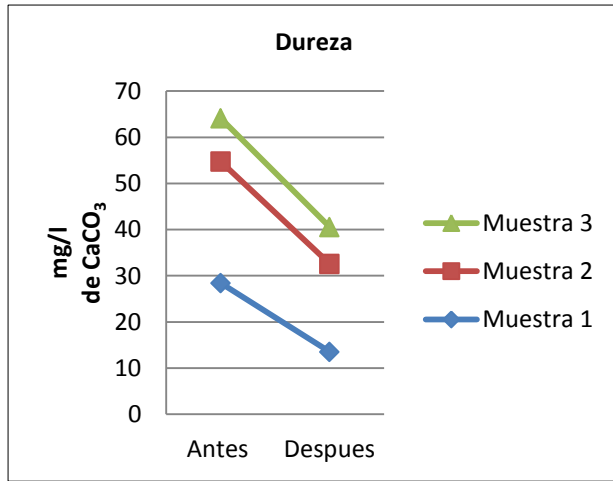


Gráfica 13. Degradación de la turbiedad en una muestra tratada de agua de lluvia.

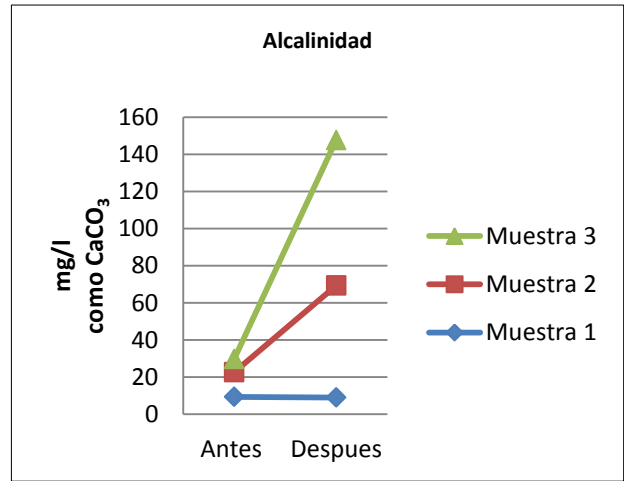


Gráfica 14. Conductividad antes y después del tratamiento

Respecto a la conductividad, se puede observar como hay un salto de la conductividad inicial a la de después del proceso. En las diferentes dosis de  $\text{H}_2\text{O}_2$  se pueden observar valores similares de conductividad, por lo que la conductividad sufre únicamente un cambio al producirse el proceso.

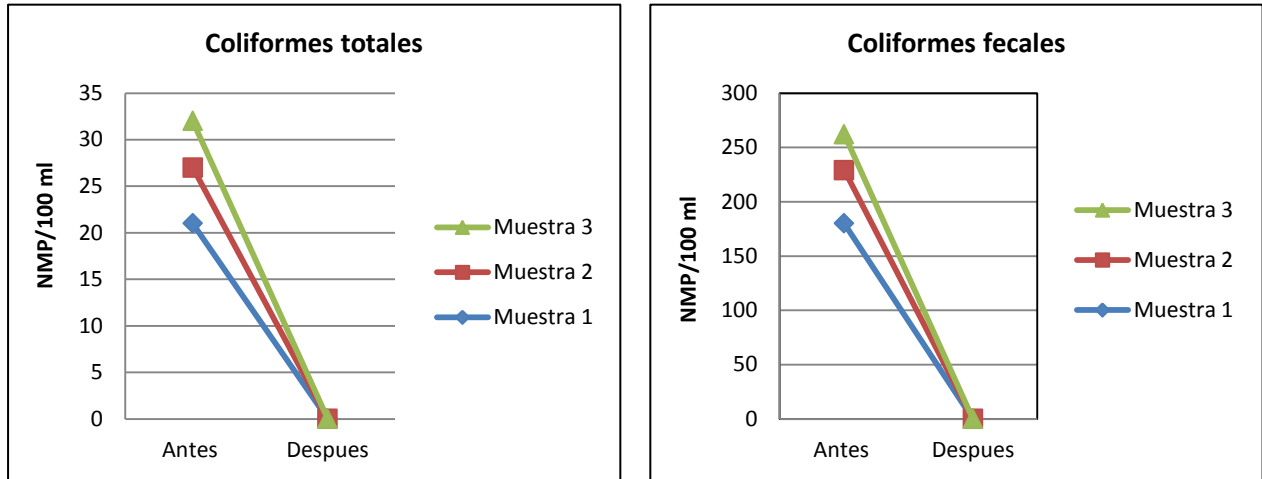


Gráfica 15. Dureza antes y después del tratamiento



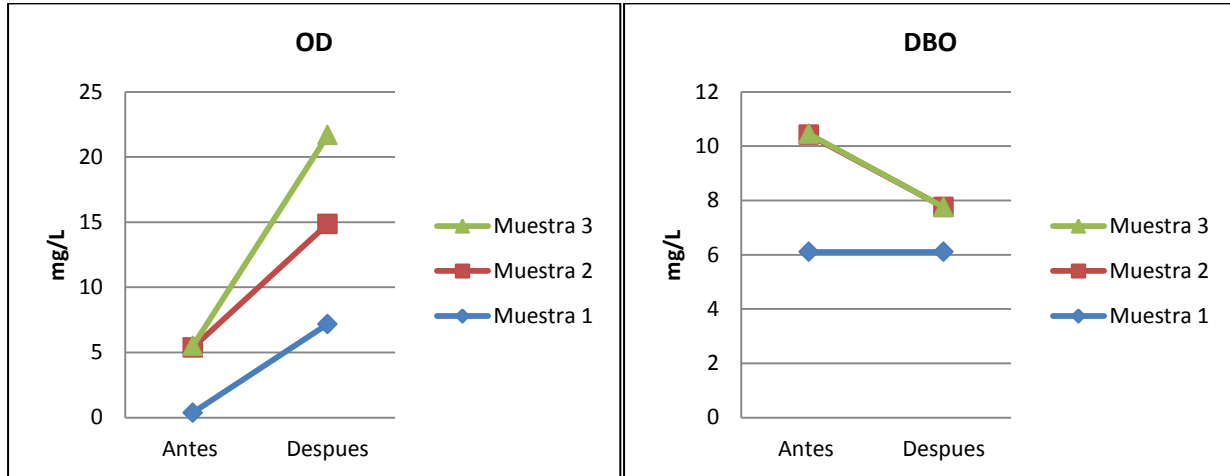
Gráfica 16. Alcalinidad antes y después del tratamiento

Como se muestra en la gráfica 14, la dureza posterior al tratamiento tuvo un decremento significativo pasando de 28.42 en la primera muestra mg/l de CaCO<sub>3</sub> a 13.52 mg/l de CaCO<sub>3</sub>, 26.34 mg/l de CaCO<sub>3</sub> a 19.066 de la segunda muestra y de 9.36 mg/l de CaCO<sub>3</sub> a 7.97 mg/l de CaCO<sub>3</sub> de la tercera muestra respectivamente. Por otra parte, la alcalinidad disminuyó en la primera muestra después del tratamiento lo que concuerda con la disminución de la dureza, sin embargo en la muestra 2 y muestra 3 tuvo un incremento drástico relacionado a el incremento de pH y la conductividad.



Gráfica 17. Coliformes totales antes y después del tratamiento. Gráfica 18. Coliformes fecales antes y después del tratamiento

En las gráficas 16 y 17 respectivamente, se puede observar que hubo un decremento total en ambos parámetros, tanto coliformes totales como fecales, De los resultados del análisis posterior del tratamiento del agua, los resultados posteriores de los coliformes totales y fecales fueron los más significativos ya que hubo una remoción total de estos en el agua tratada, esto indica que la reacción llevada a cabo en el proceso de oxidación avanzada UV / H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> utilizado, logra oxidar la materia orgánica completamente.



Gráfica 19. Oxígeno disuelto antes y después del tratamiento

Gráfica 20. Demanda biológica de oxígeno antes y después del tratamiento.

El oxígeno disuelto tiende ser un indicador claro de la calidad del agua, los valores pequeños de oxígeno disuelto indican contaminación de sustancias orgánicas por lo que a mayor valor de oxígeno disuelto, mejor la calidad del agua, sin embargo el aumento de la cantidad de oxígeno disuelto en el agua después del tratamiento con un método de UV / H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> de un proceso de oxidación avanzada, es debido a la naturaleza del mismo proceso de tratamiento en el cual uno de los requisitos es mantener aerada el agua para que se lleve a cabo la reacción necesaria.

En cambio, en los valores de la Demanda Bioquímica de Oxígeno después del tratamiento disminuyeron considerablemente, debido a la oxidación de la materia orgánica, este es un indicador de la ausencia de materia y de microorganismos en el agua de lluvia tratada.

### **Evaluación de la eficiencia del proceso de tratamiento del agua de lluvia.**

De la comparación entre los resultados obtenidos posteriores al tratamiento del agua de lluvia y los límites permisibles en la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994, se pudo determinar que el método UV / H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> utilizado en el tratamiento del agua de lluvia fue eficaz en reducir los parámetros para que respetaran los límites establecidos en la legislación vigente, pudiendo

remover totalmente los coliformes totales y fecales, siendo estos los parámetros unos de los más importantes en el tratamiento de potabilización de agua.

Tabla 15. Comparativa entre la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994 y los resultados obtenidos del tratamiento del agua de lluvia.

Parámetros	NOM-127-SSA1-1994	Resultados anteriores al tratamiento del agua de lluvia.	Resultados posteriores al tratamiento del agua de lluvia.
Temperatura	no se menciona	24.5	27.2
pH	6.5-8.5	7.57	7.7
Conductividad	no se menciona	0.123333333	0.646
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN)	1.34	3.69
OD	no se menciona	1.833333333	7.22
DBO	no se menciona	3.485333333	2.58
Coliformes totales	2 NMP/100 ml	10.66666667	0
Coliformes fecales	No detectable NMP/100 ml	87.3333333	0
ST	1000	1.58667	0.00052
Alcalinidad	300 mg/ l	9.888766667	49.2
Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	500 mg/l	21.37333333	13.51
cloro residual	0.2-1.50 mg/l de Hipoclorito de sodio	-	0.3

A continuación se muestra una tabla de los resultados de la eficiencia calculados para los parámetros más sobresalientes de acuerdo a la importancia para la salud humana:

Tabla 16. Resultados de eficiencia de parámetros analizados.

Parámetro	Eficiencia
Coliformes totales	100%
Coliformes fecales	100%

# Capítulo 6. Conclusiones

---

Con el desarrollo de esta investigación, en la etapa experimental se pudo encontrar que el agua de lluvia sin un tratamiento previo goza de una calidad aceptable, esto basado en la comparación de los límites permisibles de la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994 y resultados obtenidos en la caracterización de ciertos parámetros específicos del agua de lluvia. Se pudo demostrar que de los parámetros analizados, los cuales fueron un conjunto de parámetros físicos, químicos y microbiológicos utilizados para definir la calidad de agua de lluvia; el agua de lluvia obtenida del sistema de captación realizado para este trabajo de tesis, permanecen por debajo de los límites permisibles indicados en la legislación para los parámetros físicos y químicos. De tal forma, para los parámetros microbiológicos, específicamente Coliformes Totales y Coliformes Fecales, el análisis indicó que estos rebasan la norma establecida indicando una contaminación por microorganismos. Esta contaminación se pudo haber obtenido en el sistema de captación ya que se utilizó un techo como primer punto de contacto para el captamiento del agua de lluvia, siendo así que por medio de la acción del viento, se arrastran contaminantes hacia el techo, como lo es materia orgánica como hojas así como materia fecal a causa de aves y otros animales de sangre caliente. La importancia de los parámetros microbiológicos reside en la salud humana ya que los microorganismos encontrados en la materia orgánica y fecal pueden causar generación de diversas enfermedades en el cuerpo humano.

Esto indica que para fines de uso doméstico en contacto con humanos, es necesario que el agua de lluvia captada lleve un tratamiento para la eliminación de los microorganismos como indica la norma.

Uno de los objetivos de este trabajo de tesis era determinar la eficiencia del tratamiento del agua de lluvia implementando un proceso de oxidación avanzada método UV/ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a un tren de tratamiento de potabilización convencional por lo cual el agua de lluvia captada se analizó antes y después del proceso de tratamiento, los resultados arrojados después del tratamiento indicaron que aunque en comparación a la caracterización del agua de lluvia de los parámetros físicos y químicos, aumentaron debido a las reacciones que se llevan a cabo en el proceso de oxidación



avanzada método UV/ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> , aun así permaneciendo significativamente por debajo a los límites permisibles establecidos en la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994.

En comparación del agua antes y después del tratamiento del agua de lluvia, se demostró que el proceso de oxidación avanzada método UV/ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> tuvo 100% de eficiencia en la remoción de los coliformes totales y fecales, eso indica que las reacciones fotoquímicas llevadas a cabo en el método UV/ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidaron totalmente la materia orgánica contenida en el agua de lluvia, por lo que se concluye que sale con una buena calidad en la cual solo sería necesaria la adición 0.3 ml de cloro para cumplir con la norma en cuestión de uso doméstico. La eficiencia en la remoción de los contaminantes microbiológicos con dicho proceso, indica que al no tener que adicionar gran cantidad de cloro al agua tratada no va a haber generación de subproductos los cuales son una amenaza para la salud humana.

Por lo tanto se concluye que el proceso de oxidación avanzada método UV/ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> es eficiente en remoción de contaminantes microbiológicos, su implementación a un tren de tratamiento de potabilización convencional, incrementa la calidad del agua de lluvia tratada por lo que se considera viable en el sentido técnico para el tratamiento de agua de lluvia. La calidad del agua tratada con este proceso, permanece por debajo de los límites permisibles en la norma NOM-127-SSA1-1994, lo cual indica que es posible darle un aprovechamiento y uso doméstico sin tener riesgo ni amenaza contra la salud humana. También se puede concluir con este trabajo que el aprovechamiento del agua de lluvia es una posibilidad viable para contrarrestar las problemáticas actuales en cuestión de calidad del agua en Quintana Roo.

Es necesaria la continuidad de la investigación sobre los sistemas de captación de agua de lluvia y el aprovechamiento de esta, así como su tratamiento para su mejoramiento técnico y económico para que de esa forma sea una opción adecuada para su implementación en residencias tanto rurales como en ciudades.

# Anexos

Tabla 17. Precipitación mensual y anual en los últimos 10 años. (CONAGUA, 2014)

Promedio	2014	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	Año
59.82	112.1	51.3	54.8	40.1	76.8	66.4	62.5	64.4	53	16.8	Ene
46.79	34.9	40.7	58.1	91.2	35.5	26.6	28	102.8	31	19.1	Feb
34.27	41	39.1	25	100.9	10.9	22.3	46.1	24.1	20.6	12.7	Mar
44.87	39.9	18.6	97.1	3.2	221.9	12	17.4	13.7	6.2	18.7	Abr
119.249	209.9	77.9	202.6	14.9	187.9	86.5	91.9	117.09	82.5	121.3	May
171.37	97.7	254.7	215.8	277.4	120.9	172.2	193.7	94.8	62.8	223.7	Jun
137.48	73.1	208.7	108.1	180.1	292.1	65.3	123.1	39.1	157.5	127.7	Jul
140.03	127.2	220.7	202.8	112.9	130.2	81.2	44.9	198.9	178	103.5	Ago
161.47	234.4	377.4	105.2	125.5	217.9	117.8	128.4	107	88	113.1	Sep
271.33	271.7	235.8	179.1	382.5	63.8	152.4	431.4	189.5	157.9	649.2	Oct
113.04	73.9	246	43.9	93.8	130.7	243.3	10.2	99.3	153.4	35.9	Nov
57.05	42.7	127.6	45.6	53.8	15.2	54.8	32.3	42.7	141	14.8	Dic
1356.74	1358.3	1898.5	1,338.1	1476.3	1503.8	1100.8	1209.9	1093.3	1131.9	1456.5	Annual

# Bibliografía

---

1. Adler I., Carmona G., Bojalil J.A. 2008. Manual de captación de aguas de lluvia para centros urbanos.PNUMA.
2. Aguirre M. 2010.Degradacion catalítica de contaminantes organicos mediante procesos foto-fenton UV-A/C/Solar asistidos con ferrioxalata.Tesis de posgrado. Universidad de Castilla-La Mancha.
3. Alegría, M.2005.Planta potabilizadora / Mónica Alegría; coordinado por Juan Manuel Kirschenbaum. 1a ed. - Buenos Aires: Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología de la Nación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica, 2005.116 p.; 22x17 cm. (Recursos didácticos; 6)
4. Aliaga S. 2010.Aplicacion del proceso fenton y coagulación-floculación para la regeneración de aguas depuradas. Tesis de licenciatura. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica industrial de Zaragoza.
5. Anabela Oliveira, Enrico Mendes Saggiaro, Thelma Pavesi, Josino Costa Moreira and Luis Filipe Vieira Ferreira (2012). Solar Photochemistry for Environmental Remediation-Advanced Oxidation Processes for Industrial Wastewater Treatment, Molecular Photochemistry- Various Aspects, Dr. Satyen Saha (Ed.),InTech.
6. Anaya M., y Martinez J.J. (2007). Manual sobre Sistemas de Captación y Aprovechamiento del Agua de Lluvia para Uso Doméstico y Consumo Humano. CIDECALLI-CP.México.
7. Anaya, M. (1998). Sistemas de captación de agua de lluvia para uso doméstico en América latina y el caribe. IICA.

8. Andrea Gutierrez Sastrias(2014) Captación de agua pluvial, una solución ancestral. Impluvium. Recuperado de : <http://www.agua.unam.mx/assets/pdfs/impluvium/numero01.pdf>
9. Balado,E. (2011). Prototipo de campo de colectores solares cilindro-parabólicos para generación de calor a alta temperatura. Tesis de licenciatura. Escuela politécnica Superior.
10. Ballén J., 2006. Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia. Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua. João Pessoa, Brasil. 5 a 7 de junio. Recuperado en Septiembre del 2014 de <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/6serea/TRABALHOS/trabalhoH.pdf>
11. Balmaseda Espinosa, Carlos; García Hidalgo, Yoandris. (2013). CALIDAD DE LAS AGUAS DE LA CUENCA DEL RÍO NARANJO, MUNICIPIO MAJIBACOA, PROVINCIA LAS TUNAS PARA EL RIEGO. Cultivos Tropicales, Octubre-Diciembre, 68-73.
12. Bateman, A. *Hidrología básica y aplicada*. [En línea] (2007). Disponible en: <<http://www.gits.ws.html>> Recuperado el 2 de Junio de 2015 de: [http://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2002/01march\\_water/](http://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2002/01march_water/)
13. Blanco J.; Malato S.; Estrada C.A.; Bandala E.R.; Gelover S.; Leal T. (2001). Eliminación de contaminantes por Fotocatálisis heterogenea. Ed.Miguel A. Blesa.CYTED. La Plata. Argentina. Capítulo 3 pp.51-76.
14. Blesa et al., 2001). Blesa M.A 2001. Eliminacion de contaminantes por fotocatalisis heterogenea. CYTED. ISBN: 987-43-3809-1
15. Caballero, Aquino Tertuliano (2006). Captación de agua de lluvia y almacenamiento en tanques de ferro cemento, Manual Técnico, México.
16. Canché J.A.2007. Estudio de la aplicación de tecnologías de oxidación avanzada basadas en el dióxido de titanio, peróxido de hidrogeno y luz ultravioleta como complemento a la cloración en tratamientos de potabilización de aguas naturales. Tesis de doctorado. Universidad de Zaragoza.
17. Chacón-Nava J., López-Mejía E. y S. Mendoza-Herrera S., 2011. CAP Dispositivo Cosechador de aguas pluviales. Tesis (Licenciatura en Diseño Industrial). UNAM, Facultad de Arquitectura, México.

18. Checa-Artasu M.M. (2006). Entre la casa maya y el bungalow, arquitectura de la frontera México-Belice. Revista UNAM.
19. Chritchley W. y Siegert K. 1991. A manual for the design and construction of water harvesting schemes for plant production. Source: <http://www.fao.org/docrep/U3160E/u3160e00.HTM>
20. Clemente J.P. 2008. Aplicación de proceso de oxidación avanzada (Fotocatálisis solar) para tratamiento y reutilización de efluentes textiles. Tesis de Licenciatura. Universidad de Valencia.
21. Comisión Nacional del Agua. (2013). Estadísticas del agua en México. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/SGP-2-14Web.pdf>
22. Comisión Nacional del Agua. (2008). Estadísticas del agua en México. Recuperado de [http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM\\_2008.pdf](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM_2008.pdf)
23. CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), (2008). Estadísticas del agua en México.
24. CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2013. Estadísticas del agua en México.
25. Davis, M. L., y Masten, S. J. (2005). Ingeniería y ciencias ambientales. (3 ed.) México, DF. McGraw Hill.
26. Díaz-Solano B. H, M. V. Esteller y S. E. Garrido-Hoyos. 2011. Calidad físico-química y microbiológica del agua en parques acuáticos. *Hidrobiológica* 21(1): 49-62.  
Disponible en: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43228285002>> ISSN 1405-888X
27. Effect of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> on UV Photolytic remediation of aqueous solutions of methylene blue. *IOSR Journal of applied chemistry*. pp.69-72. ISSN: 2278-5736. Disponible en: <http://www.iosrjournals.org>
28. Environmental Protection Agency, Small systems compliance technology list for the surface water treatment rule and total Coliform, EPA/815/R/98/001, 82, (1998).
29. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación), 2000. Manual de captación y aprovechamiento del agua de lluvia. *Serie: Zonas Áridas y Semiáridas No. 13*. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile.
30. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) (2013). Captación y almacenamiento de agua de lluvia; Opciones técnicas para la agricultura

- familiar en América Latina y el Caribe. Recuperado en Agosto del 2024 de <http://www.fao.org/3/a-i3247s.pdf>
31. García F.S. 2001. Fotodegradación de Compuestos Nitroaromáticos mediante la técnica UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Tesis de posgrado. Universidad Nacional De La Plata.
  32. García, J., H. (2012). Sistema de captación y aprovechamiento pluvial para un ecobarrio de la Cd. de México. Tesis de Postgrado. Universidad autónoma de México.
  33. García-Gómez, C., P. Gortáres-Moroyoqui y P. Drogui. (2011). Tratamientos biológicos y de oxidación avanzada combinados para una solución a la biotecnología ambiental. *Ide@s CONCYTEG*, 6(71), pp. 585-605.
  34. Gogate, P.R and Pandit, A.B (2004). A review of imperative technologies for wastewater treatment I: Oxidation technologies at ambient conditions. *Advances in Environmental Research*.
  35. Gould, J. y Nissen-Petersen, E. (1999). *Rainwater Catchment Systems for Domestic Supply*. ITDG Publishing.
  36. Hajani E., Rahman A.S., Al-Amin M., Rahman A. 2013. Reliability analysis for rainwater harvesting system in peri-urban regions of greater sydney, Australia. 20th International Congress on Modelling and Simulation, Adelaide, Australia, 1–6 December 2013 source: [www.mssanz.org.au/modsim2013](http://www.mssanz.org.au/modsim2013)
  37. Herrera Monroy, L., A. (2012). Estudio de alternativas, para el uso sustentable del agua de lluvia. Tesis de postgrado. Instituto Politécnico Nacional
  38. Índice UV solar mundial: guía práctica. 2013. *Organización Mundial de la Salud*. ISBN 92-4-359007-3. Disponible en: <http://www.who.int/uv>.
  39. Instituto nacional de meteorología. (2002) Clasificación de los meteoros. [En línea] Recuperado en Agosto del 2014 de <http://www.aemet.es/documentos/es/noticias/2002/Meteoros-folleto.pdf>
  40. Jaramillo C.A y Tabora G. 2006. La fotocatalisis: Aspectos fundamentales para una buena remoción de contaminantes. *Revista Universidad de Caldas*. (págs.71-88)
  41. Lancaster, B. (2009). *Rainwater Harvesting for Drylands and Beyond Vol.1* (5ta Ed.) Tucson, AZ, E.U.A.

42. Lanuza. A. 2012. Formación de subproductos en procesos de oxidación avanzada aplicados en la regeneración de aguas de salida de depuradora. Universidad Zaragoza.
43. Leal M.T., E.R. Bandala, S. Gelover y S. Pérez, Trihalometanos en agua para consumo humano, Ingeniería Hidráulica en México, XIV(3), 29-35, (1999)
44. Leoni N. y Rojas I. Estudio de la preoxidación por el cloro, dióxido de cloro o peróxido de hidrógeno como mejoramiento de los procesos convencionales utilizados para la potabilización del agua. Revista Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Disponible en <http://revistaing.uniandes.edu.co/pdf/rev9art5.pdf>
45. Lombraña, J.I. 2013. Aplicación de la tecnología UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para la remediación de contaminantes persistentes en la CAPV. Potenciales de uso y viabilidad de operación en EDAR y en origen. Universidad del País Vasco.
46. López, G., García, R., & Orduña, J. (2012). Estudio de la oxidación fotocatalítica de soluciones fenólicas, aplicando un proceso avanzado de oxidación (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> / UV). *Ingenium*, 6(12), 61-67
47. María Teresa Leal Ascencio, Walter Estrada y Miguel Blesa, Tecnologías convencionales de tratamiento de agua y sus limitaciones, Cap. 4. Libro Solar Safe Water, Tecnologías Solares para la desinfección y descontaminación del agua, Editado. Julian Blanco y Miguel Blesa, 2005.
48. Marín R. 2003. Fisicoquímica y microbiología de los medios acuáticos. Tratamiento y control de calidad de aguas. Ediciones Diaz de Santos. 336 páginas.
49. Martín C. 2000. Los viajes del agua en el Mayab: pozos, ríos subterráneos y cenotes. Clara martin ramos, INAH
50. Martín, C.(1989). Los viajes del agua en el Mayab: pozos, ríos subterráneos y cenotes. Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH).
51. Martínez J. 2004. Estudio antropológico sobre sistemas de riego y captación de agua prehispánica. IMTA.
52. Martínez, J., L. (2004). Estudio antropológico sobre sistemas de riego y captación de agua prehispánica. Coordinación de comunicación e información. Ed. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

53. Martínez, J.J., (2011). Estrategias para el abastecimiento de agua a comunidades marginadas y urbanas. Tesis de Postgrado. Institución de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas.
54. Morales P.A, Crinó E, Valladares D.L. 2005. Medición del espectro de radiación UV de efectividad biológica en la ciudad de San Luis, LAT: 33.263° S LONG: 66.35° O, 730 msnm. *ANALES AFA Vol.17*. ISSN : 1850-1158.
55. NOM-127-SSA1-1994, "Salud Ambiental, Agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse e agua para su potabilización". Secretaria de Salud.
56. Organización de las naciones unidas para la Agricultura y la alimentación. (2000). Manual de captación y aprovechamiento del agua de lluvia experiencias en américa latina.[En línea] Recuperado en Agosto del 2014 de <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/ai128s/ai128s00.pdf>
57. Organización Mundial de la Salud, Guías para la calidad del agua potable, Ginebra, 1, 195,(1995).
58. Organización Mundial de la Salud.2001.Guía de diseño para la captación del agua de l
59. Osornio, L., J. (2012). Captación y tratamiento de agua de lluvia. II ENCUENTRO "EL POSGRADO EN LA INGENIERÍA CIVIL" Instituto Politécnico Nacional.
60. Paredes C. (2012).Diseño de captador solar cilíndrico parabólico para aplicaciones rurales en Paraguay. Tesis de Licenciatura. Escuela Técnica superior de ingenieros de minas.
61. Pérez Petitón, Jeny; López Seijas, Teresa; Hernández Cuello, Geisy; González Robaina, Felicita. (2009). Modelo matemático para determinar la calidad del agua en dos puntos del arroyo Guachinango. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* vol. 18, núm. 3., Sin mes,pp. 19-23.
62. Pignatello J. J., Oliveros E., Mackay A. (2006). Advanced Oxidation Processes for organic contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry. *Environmental Science and Technology*, 35, 1-84.
63. PNUD. Informe sobre Desarrollo Humano 2006. Más allá de la escasez: Poder, pobreza y la crisis mundial del agua.



64. Prinz D. y Singh A. 1999. Technological Potential for improvements of wáter harvesting. *World Commission on Dams, Cape Town, South Africa.*
65. Procuraduria Federal del Consumidor. 2010. Normas oficiales mexicanas.
66. Reij C., Mulder P. y Begemann L. 1988. Water harvesting for plant production. World Bank , Papel técnico, N° 91.
67. Rivas M. E., y otros seis autores, *Structural features and performance of LaNi<sub>1-x</sub>Rh<sub>x</sub>O<sub>3</sub> system for the dry reforming of methane*, Applied Catalysis A: General, 344, 10-19 (2008).
68. Rodriguez Carmen, S.D., Madeira Luis, M., Boaventura Rui , A.R. (2008) Optimization of the azo dye Porcion Red H-EXL degradation by Fenton's reagent using experimental design. Journal of Hazardous Materials.
69. Rodriguez T., Botelho D., Cleto E. Tratamiento de efluentes industriales de naturaleza recalcitrante usando ozono, peróxido de hidrogeno y radiación ultravioleta. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.º 46 pp. 24-38. Diciembre, 2008.*
70. Rojas-Valencia, María Neftalí, Gallardo-Bolaños, José Roberto, Martínez-Coto, Alberto. IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE AGUA DE LLUVIA Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas [en línea] 2012, 15
71. Romero J.A. (1999). Potabilización del agua. 3ra Edición. Alfaomega. DF, México.
72. Said. S.. Assesment of Roof-top Rain Water Harvesting Potential in South Delhi, India. International Journal of Environmental Research and Development. ISSN 2249-3131 Volume 4, Number 2 (2014), pp. 141-146.
73. SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). México.
74. Sistemas de captación de agua de lluvia para uso domestico en america latina y el caribe. Bib. Orton IICA /CATIE. 1998.
75. Sistemas de captación de agua de lluvia para uso doméstico en america latina y el caribe. Agencia de cooperación técnica IICA-Mexico (Instituto Interamericano de cooperación para la Agricultura).
76. Spellman F., Drinan J.E. 2000. Manual del agua potable. CRC Press, Boca Raton Florida, USA.

77. Texas Commission on Environmental Quality.2007.Harvesting, Storing, and Treating Rainwater for Domestic Indoor Use.
78. Torrades F., García-Montaña J., Doménech X., García-Hortal J. A., Peral J. (2004a). Decolorization and mineralization of comercial reactive dyes under solar Light assisted photo-Fenton conditions. *Solar Energy*, 77, 573-581.
79. Valenzuela T.2004.Exploración de posibilidades para proponer un tren de tratamiento para remoción de dureza que logre la optimización técnica y económica del proceso. Tesis de licenciatura. Universidad de las Américas Puebla.
80. Wereinigung,A. 1988. Determinacion del grado de eficiencia de plantas de tratamiento de aguas residuales. CAPRE/ ANDESAPA
81. WHO (1993). Guidelines for Drinking-Water Quality. The 2nd Edition, vol. 1 – Recommendations. WHO, Geneva, 1993, ISBN 92 4 154460.
82. Worm,J y Van Hattum, T. (2006).Rainwater harvesting for domestic use. Digigrafi,Wageningen,The Netherlands.
83. Xavier Elías Castells (2012). Energías Renovables. Ediciones Díaz Santos. Madrid.



Ingeniería  
AMBIENTAL