



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN
Y PURIFICACIÓN DE AGUA DE LLUVIA
MEDIANTE FOTOCATÁLISIS SOLAR**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

MECÁNICA – DISEÑO MECÁNICO

P R E S E N T A :

RESÉNDIZ HERNÁNDEZ RICARDO

DIRECTOR:

DR. GABRIEL ASCANIO GASCA

CO - DIRECTOR:

DR. JOSE OCOTLÁN FLORES FLORES

2012



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. BARBA PINGARRÓN ARTURO.

Secretario: DR. BORJA RAMÍREZ VICENTE.

Vocal: DR. ASCANIO GASCA GABRIEL.

1^{er}. Suplente: DR. FLORES FLORES JOSÉ OCOTLÁN.

2^{do}. Suplente: DR. RAMÍREZ REIVICH ALEJANDRO CUAUHTÉMOC.

Lugar donde se realizó la tesis:

CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO, UNIVERSIDAD
NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, MÉXICO, D. F.

TUTOR DE TESIS:

DR. GABRIEL ASCANIO GASCA.

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, expreso mi agradecimiento a mis directores de Tesis, el Dr. Gabriel Ascanio Gasca y el Dr. José Ocotlán Flores Flores, porque gracias a su incondicional apoyo y amistad, ha sido posible la realización de este trabajo de investigación.

Agradezco a la Dra. Ana Cecilia Espinosa la confianza y el apoyo brindados para la realización de los análisis químicos en el Instituto de Ecología.

Expreso mi agradecimiento a la Dra. Monserrat Bizarro Sordo por permitirme compartirle mis ideas y aclarar mis dudas.

A la Dra. Ma. Esther Sánchez de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del IPN, por asesorarme y permitirme realizar las microscopías.

Al Dr. Esteban Jiménez González por compartirme una parte de sus conocimientos sobre el tema.

Al Dr. Manuel Anaya Garduño por el apoyo y conocimientos brindados durante mi estancia en el Colegio de Posgraduados.

Un especial agradecimiento al excelente, Dr. Alejandro Ramírez Reivich y al Dr. Vicente Borja Ramírez por darme su confianza y amistad, y por todo el invaluable apoyo que hasta la fecha sigo recibiendo.

A la empresa PIRAMIDE porque gracias a ellos fue posible construir una de las partes fundamentales del proyecto.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología la beca proporcionada para la realización de mis estudios de maestría.

Al Arq. José Luis Juárez Anaya e Ing. Jesús Ramírez por apoyarme en el momento requerido.

A mi equipo de amigos del grupo de Ingeniería de procesos: Jonathan, Álvaro, Gustavo, Flor, Gabriela, Jazmín y David, por compartir conmigo ideas, opiniones y buenos momentos.

Un particular agradecimiento al Ing. Eduardo Bernal y al Dr. Asur Guadarrama, por su amistad, enseñanzas y buenas experiencias que tuve la oportunidad de compartir.

A mis amigos del grupo de Materiales y Nanotecnología: Adriana, Marevna, Diana, Néstor, Fermín, Viridiana y Dra. Esther, por su apoyo y hacer tan agradable mi estancia en el laboratorio.

Agradezco también a mis amigos del Posgrado de Ingeniería: Érika, Ramón, Rodrigo y Javier por tomar siempre en cuenta mi opinión y otorgarme su confianza y aprecio.

Finalmente, agradezco infinitamente a mi familia, ya que su apoyo y cariño han sido siempre parte fundamental en mi formación.

CONTENIDO

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
OBJETIVOS	9
1 INTRODUCCIÓN	10
1.1 PROBLEMA MEDIOAMBIENTAL	12
1.2 SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA	26
1.3 MÉTODOS CONVENCIONALES DE TRATAMIENTO DE AGUA	48
1.4 PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA	61
1.5 TECNOLOGÍAS SOLARES PARA TRATAMIENTO DE AGUA	68
2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	77
3 ANÁLISIS DE RESULTADOS	120
CONCLUSIONES	126
ANEXOS	127
ANEXO 1 FILTRO DE CASCADA: DATOS TÉCNICOS	127
ANEXO 2 SIFÓN DE REBOSE Y ADMISIÓN CALMADA: DATOS TÉCNICOS	128
ANEXO 3 FILTRO DE SUCCIÓN FLOTANTE	129
ANEXO 4 REFLECTIVIDAD DEL ALUMINIO.	130
ANEXO 5 TRANSMITANCIA DEL TUBO DE VIDRIO DE BOROSILICATO	131
ANEXO 6 SIMPLE METHOD FOR THE FABRICATION OF TITANIUM	132
REFERENCIAS	137

RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño un sistema de captación y purificación del agua de lluvia mediante fotocátalisis solar utilizando nanopartículas de dióxido de titanio. Partiendo de la captación del agua de lluvia del techo, el procedimiento consiste de la eliminación de sólidos y partículas de tamaño considerable, mediante un filtro, que se conecta al tubo bajante. El agua se almacena en un tanque y posteriormente se hace pasar a través de un filtro de arena; finalmente, el agua se hace circular a través de un fotorreactor que consiste de seis colectores parabólicos compuestos con una superficie de aluminio pulido y seis tubos de vidrio de borosilicato montados sobre dichos colectores. Los tubos de vidrio están cubiertos en su interior con una película delgada de nanopartículas de dióxido de titanio que funciona como fotocatalizador y se activa con la luz UV solar, desinfectando el agua de lluvia captada. A las muestras de agua obtenida se les realizan análisis fisicoquímicos y microbiológicos, encontrando que el agua de lluvia cuenta con las características necesarias para ser consumida. Además, el sistema propuesto no requiere de energía eléctrica, ya que se aprovechan únicamente la gravedad para hacer circular el agua y la radiación UV solar para llevar a cabo el proceso de desinfección. La propuesta de este diseño muestra que, es posible desarrollar sistemas simples, de bajo costo y amigables con el ambiente para la obtención de agua apta para el consumo humano.

ABSTRACT

This work presents the design of a rainwater collection and purification system by solar photocatalysis using titanium dioxide nanoparticles. Rainwater is collected from the roof, then, the procedure involves the removal of solid particles of considerable size through a filter that is connected to the downpipe. Collected water is stored in a tank and then passed through a sand filter. Finally, water is circulated through a photoreactor consisting of six compound parabolic collectors with an aluminum polished surface and six borosilicated glass tubes mounted on the above mentioned collectors. The inside of the glass tubes is covered in a thin film of titanium dioxide nanoparticles that works as a photocatalyst and is activated by solar UV light, disinfecting the collected rainwater. The water samples collected were chemically and microbiologically analyzed, finding that the rain water has the required characteristics to be consumed. In addition, the proposed system requires no electricity because it takes advantage of gravity to circulate the water, and solar UV radiation to carry out the disinfection process. The objective of this design is to show that developing a simple, inexpensive and environmentally friendly system to obtain drinkable water is possible.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un prototipo de sistema de captación y purificación del agua de lluvia mediante fotocátalisis solar.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Diseñar y construir un sistema de captación de agua de lluvia.
- ✓ Diseñar y construir un fotorreactor para la desinfección del agua mediante fotocátalisis solar.
- ✓ Síntesis y caracterización de nanopartículas de dióxido de titanio (TiO₂).
- ✓ Evaluación de la actividad fotocatalítica en el agua captada.
- ✓ Evaluar si el agua cumple con la norma NOM-127-SSA1-1994 límites permisibles de calidad del agua para uso y consumo humano.

1 INTRODUCCIÓN

La creciente necesidad de lograr un equilibrio ecológico que asegure un abasto suficiente de agua a la población se logrará armonizando la disponibilidad natural con un uso eficiente y tratamiento adecuados para su reutilización. Se ha demostrado que los hábitos humanos y sus actividades, impactan de muchas maneras al medio ambiente; una de las cuales, es la contaminación y escasez del agua. Las metodologías tradicionales de tratamiento de aguas son extraordinariamente caras, por lo que se hace necesario el desarrollo de tecnologías simples, eficientes y de bajo costo que sean a la vez amigables con el medio ambiente, para la eliminación in situ de la contaminación química y biológica. Dado que el agua pluvial puede ser utilizada para consumo humano, la presencia de algunos contaminantes tienen un impacto negativo en la calidad de la misma. Así, el presente trabajo tiene como finalidad el desarrollo de tecnología para la producción de un sistema de potabilización de agua pluvial basándose en el método de fotocatalisis utilizando películas delgadas de óxido de titanio y luz solar.

El proceso de tratamiento de agua presentado en este trabajo, consiste de un proceso de filtración inicial, cuya finalidad, es remover las partículas más grandes presentes en el agua pluvial. Se continúa con un tanque de almacenamiento, seguido de un filtro lento de arena para remover partículas en suspensión y microorganismos. Posteriormente, se alimenta a un reactor fotocatalítico, en donde se lleva a cabo el proceso de desinfección. Finalmente, el agua se analiza de acuerdo a las normas aplicables para la calidad del agua para uso y consumo humano.

Con el fin de eliminar del agua algunos elementos contaminantes como agentes biológicos y orgánicos, se utiliza el proceso de fotocatalisis por radiación solar. El término fotocatalisis puede ser definido como “la aceleración de una fotorreacción mediante la presencia de un catalizador” es decir, es necesario utilizar luz y un material fotosensible para iniciar y/o acelerar una reacción química. Los catalizadores son sustancias que modifican la velocidad de las reacciones químicas, sin sufrir una alteración química permanente.

La fotodegradación de contaminantes orgánicos presentes en aguas mediante la utilización de TiO_2 irradiado con luz solar, es uno de los *procesos de oxidación avanzada* (POAs) más prometedores en este campo. Glaze et al. (1987) definieron los POAs como procesos que involucran la generación y uso de especies transitorias poderosas, principalmente el radical

hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) el cual posee alta efectividad para la oxidación de la materia orgánica. Los POAs también permiten realizar transformaciones en contaminantes tóxicos poco susceptibles a la oxidación como iones metálicos o compuestos halogenados (Litter, 2006).

Una de las características más positivas de los POAs es la oxidación de los compuestos orgánicos hasta dióxido de carbono y la mineralización de los contaminantes inorgánicos como los iones cloruros, nitratos, etc. (Cáceres, 2002). Los POAs poseen una mayor velocidad de oxidación por la participación del radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) principalmente, ya que reaccionan 10^6 - 10^{12} veces más rápido que el ozono (O_3) (Litter, 2006).

Por otro lado, el dióxido de titanio, TiO_2 , es un fotocatalizador económico, eficiente, no tóxico y altamente disponible, que ha sido estudiado ampliamente en procesos de tratamiento de aguas residuales (Hermann, 1999), (Fujishima et al., 2000), (Hermann et al., 2002), (Konstantiniou et al., 2003). Algunos de estos estudios, reportan la aplicación de la desinfección de agua con TiO_2 , mediante la utilización de algunas fuentes de luz ultravioleta o lámparas de mercurio (Lee et al., 2004; Lu et al., 2003; Sunada et al., 2003; Salices et al., 2004; Vélez-Colmenares et al., 2011; Acevedo et al., 2012) así como, con dióxido de titanio en suspensión. Sin embargo, la radiación solar es gratuita, natural y utilizable para una gran cantidad de aplicaciones, entre ellas su uso en esta propuesta.

El uso del dióxido de titanio en suspensión, tiene la desventaja de que es necesario utilizar membranas para la recuperación del fotocatalizador, con lo cual, se incrementan los costos del proceso y se dificulta el mantenimiento del sistema. Por lo anterior, la aplicación de películas delgadas de TiO_2 , representa una de las mejores alternativas de un proceso POAs, ya que el fotocatalizador, queda inmovilizado en la superficie de un sustrato, obteniendo una tecnología de bajo costo, fácil operación y mantenimiento (Stathatos et al., 2000; Arabatzis et al., 2003; Kenshmiri et al., 2004; Kemmitt et al., 2004; Martyanov et al., 2004; Litter et al., 2004).

1.1 PROBLEMA MEDIOAMBIENTAL

1.1.1 PROBLEMÁTICA DEL AGUA

El agua ha sido a lo largo de la historia, un recurso indispensable para satisfacer las necesidades de la humanidad, por lo cual, se hace necesaria su regulación en materia de accesibilidad, sanidad, financiamiento y conservación.

Como se sabe, el 70% de la superficie de la tierra es agua pero sólo el 3% de toda el agua del mundo es agua dulce, y no está disponible en su totalidad debido a que el 79% de esa agua está en forma de casquetes de hielo y glaciares. En consecuencia, menos del 1% es agua dulce aprovechable y sólo una centésima parte de dicho porcentaje se considera accesible para el consumo humano (**Figura 1**).

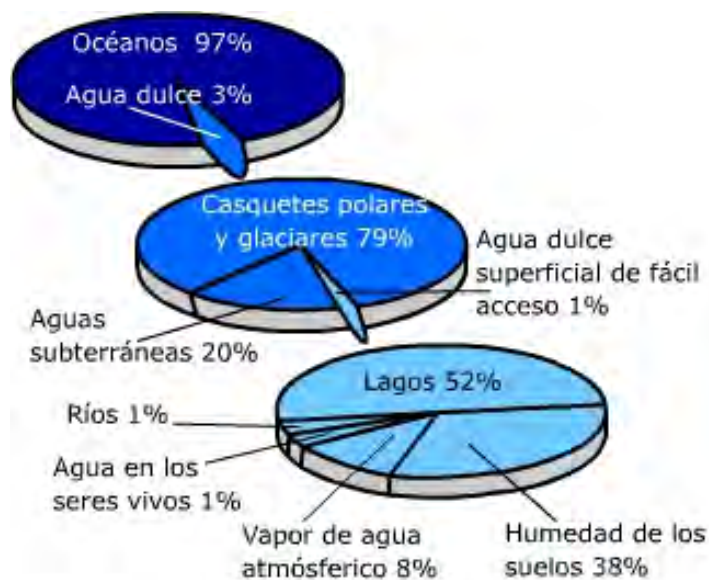


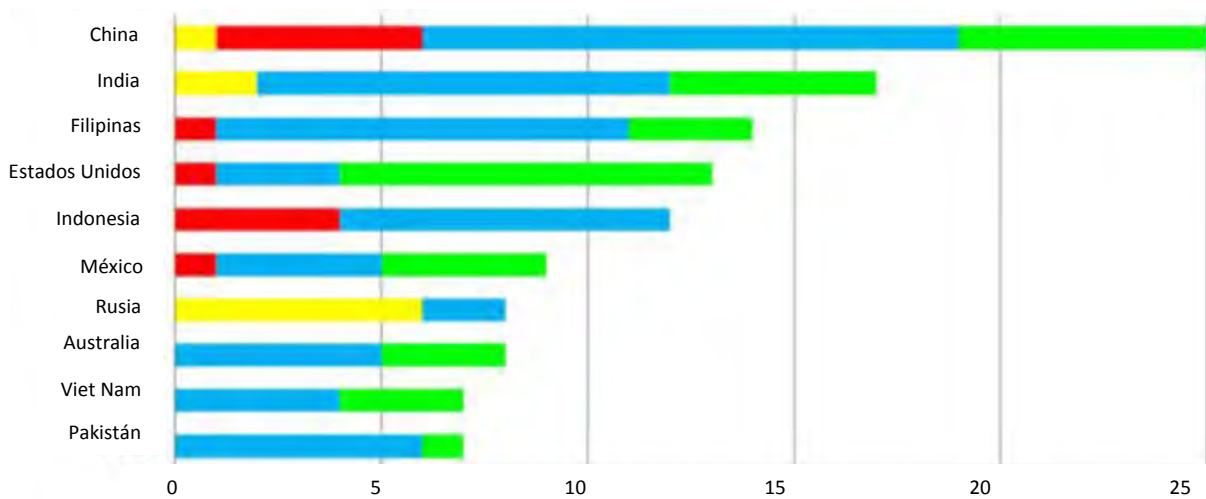
Figura 1. Distribución del agua en el mundo.

Fuente: elhombreysuentorno.wikispaces.com

Norteamérica tiene la mayor cantidad de agua dulce disponible, con más de 19000 metros cúbicos per cápita por año, mientras que en Asia es apenas superior a los 4700 metros cúbicos per cápita (Anaya, 2006). Además, los países ricos consumen 12 veces más agua que los países pobres. Sin embargo, la infraestructura de transmisión y almacenamiento no es en muchos casos la más adecuada. Estudios de la ONU demuestran que algunas ciudades de Europa pierden hasta el 80% del agua debido a fugas en sus cañerías, mientras que ciudades y poblaciones de los países en vías de desarrollo mandan más del 90% de las aguas residuales a los lagos, ríos, y costas sin un tratamiento previo. Adicionalmente, la deforestación, sobrepastoreo, erosión del suelo, compactación, contaminación, etc., inducen a la desertificación e influyen en el ciclo hidrológico del agua y, por lo tanto, en su calidad y distribución afectando de manera directa el abastecimiento para la humanidad.

Las condiciones de irregularidad en la distribución geográfica de las precipitaciones y la variabilidad de las mismas, es decir, temporadas con precipitaciones excesivas y temporadas con precipitaciones escasas son factores que influyen en la escasez de agua a nivel mundial (Cerde, 2010), ya que únicamente dos tercios de la población mundial viven en zonas que reciben una cuarta parte de las precipitaciones anuales del mundo.

En la **Figura 2**, se presentan algunas estadísticas del Centro de Investigaciones sobre Epidemiología de Desastres (CRED) en Bélgica, en donde se observa que cerca del 80% de los desastres naturales tienen un origen meteorológico o hidrológico.



Origen	China	India	Filipinas	Estados Unidos	Indonesia	México	Australia	Rusia	Pakistán	Viet Nam	Total
Climatológico	1	2	0	0	0	0	0	6	0	0	9
Geofísico	5	0	1	1	4	1	0	0	0	0	12
Hidrológico	13	10	10	3	8	4	5	2	6	4	65
Meteoro-lógico	6	5	3	9	0	4	3	0	1	3	34
Total	25	17	14	13	12	9	8	8	7	7	120

Figura 2. Países con mayor número de eventos reportados en 2010.

Fuente: CRED, 2011.

Actualmente, el número de días consecutivos sin lluvia está disminuyendo y el número de lluvias fuertes va en aumento, sin embargo, existe una tendencia hacia una disminución general de las precipitaciones, observándose prolongados períodos de sequía durante las últimas décadas (Cerda, 2008). Los períodos de sequía, tienen un impacto altamente negativo en la disponibilidad de agua, tanto superficial como subterránea, afectando a los ecosistemas y provocando la extinción de especies vegetales y animales, convirtiéndose en uno de los mayores obstáculos para el desarrollo y la calidad de vida. Algunos de los mayores desastres naturales que se han presenciado en la actualidad y que han tenido mayor impacto en la humanidad se encuentran relacionados con sequías, inundaciones y tsunamis.

El cambio climático, es otro de los factores relevantes, ya que ha generado grandes inundaciones y también largos períodos de sequías en casi todas las regiones del mundo. Además, ha ocasionado que la precipitación pluvial tenga un comportamiento errático y escaso, lo cual ha afectado a más de 100 países en el mundo y a más de 1000 millones de personas que empiezan a sufrir hambre y falta de agua; en consecuencia, se observan actualmente problemas de tipo social y económico. Muy probablemente, la escasez de agua siga en aumento debido a estos patrones de precipitación e intensidad tan irregulares.

En años recientes, los problemas ambientales relacionados con el agua han aumentado tanto en zonas urbanas como rurales. El uso de agua contaminada para beber y bañarse ha propagado enfermedades como el cólera, tifoidea y gastroenteritis (ONU, 2006; Organización Panamericana de la Salud / Organización Mundial de la Salud, 2005; Cerda, 2010). En este sentido, las estimaciones de la Organización mundial de la salud, indican que 21 de las 37 enfermedades más

comunes en Latinoamérica están relacionadas con la escasez de agua y con agua contaminada, mientras la disponibilidad de agua en el planeta disminuye constantemente y los riesgos en la salud aumentan (UNHABITAT, 2005). La OMS indica que, anualmente, la contaminación propicia la muerte de 3 millones de niños por agua insalubre y aire impuro. El 86% de las aguas residuales urbanas de América Latina y el Caribe y el 65% de las de Asia se vierten sin tratar en ríos, lagos y mares (Anaya, 2004). A esto se suman el aumento en el precio de los alimentos y los efectos colaterales del cambio climático (Pacheco, 2008).

Por otro lado, el rápido crecimiento poblacional junto con la industrialización, la urbanización, la intensificación agrícola y las formas de vida están dando por resultado una crisis global del agua. Cerca del 20% de la población no tiene acceso a agua potable segura, mientras que el 50% carece de un sistema seguro de saneamiento del agua (Anaya, 2004; Guhl, 2006; Cerda, 2010). La población actual del mundo, se estima en cerca de 7 billones de personas, por lo que, para el 2020, se estima que las zonas urbanas representarán aproximadamente el 60% de la población global.

La capacidad hídrica de un país, se mide por el parámetro de tensión hídrica que experimenta. Se dice que un país experimenta tensión hídrica, cuando el suministro anual de agua está por debajo de los 1700 metros cúbicos por persona. Cuando el nivel es menor a 1000 metros cúbicos por persona, el país enfrenta una situación de escasez. En la **Tabla 1** se muestran los distintos niveles de disponibilidad del agua, y la situación en que se encontraría el país.

Tabla 1. Límites de disponibilidad del recurso de agua renovable.

Disponibilidad m³/ persona/ año	Condición hídrica del país
1,700	A este nivel, muy probablemente los países comienzan a tener estrés hídrico que impide el desarrollo económico y lesiona la salud humana.
1,000	Aparece la escasez crónica del agua.
500	Estrés hídrico absoluto.
100	Mínimo nivel de subsistencia para uso doméstico y comercial.

Fuente: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (Indhri) “Aumento de la Oferta Hídrica” República Dominicana, 2010.

Adicionalmente, como se presenta en la **Figura 3**, para el año 2025, la población habrá aumentado en más de 2600 millones de personas, de las cuales, dos terceras partes estarán viviendo en condiciones de escasez de agua y una tercera parte en escasez total. El panorama es aún más desalentador, pues se vislumbra para el 2050, que sesenta y seis países se enfrentarán a problemas de escasez de agua, lo que traerá consecuencias de tipo social, económico, político y ecológico (Anaya, 2006; Cerda 2010).

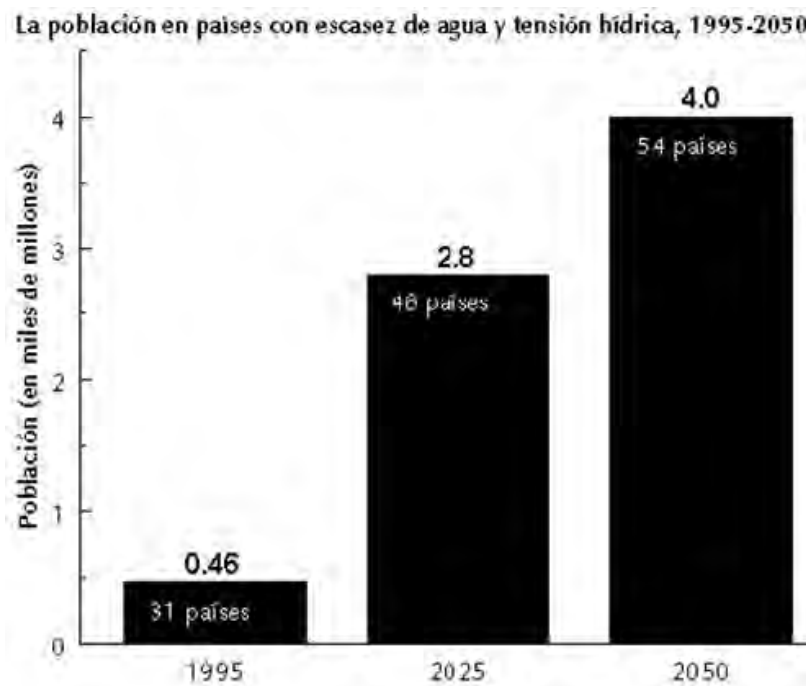


Figura 3. Tensión hídrica y escasez de agua

Fuente: Gardner - Outlaw, T y Engleman, R. 1997
 “Sustaining water, easing scarcity. A second update”
 Washington, D. C. Population Action International, P. 10

Hoy, muchas comunidades alrededor del mundo, han alcanzado los límites de disponibilidad de suministro de agua según la clasificación mostrada anteriormente, en el rango máximo de 1700 m³/ per cápita /año y un mínimo de 100 m³/ per cápita/ año.

1.1.2 SITUACIÓN EN MÉXICO

La superficie del territorio mexicano es de 2 millones de km², y tiene una precipitación anual promedio de 700 mm, lo que representa un volumen de agua de lluvia de 1, 400, 000, 000,000 m³ que divididos entre 100 millones de habitantes da un promedio de 14,000 m³. El problema es que la utilización del agua de lluvia es deficiente y causa más problemas que beneficios al provocar la erosión del suelo e inundaciones.

Así, el abastecimiento de agua abarca el 94 % de la población urbana y sólo el 63% de la población rural (CONAPO, 2005). Por esta razón, millones de personas de las principales ciudades de México reciben el agua para sus necesidades básicas en horarios restringidos, o lo que es peor, se ven en la necesidad de comprarla en garrafones, botellas o pipas, pagando elevados costos por el vital líquido. El agua embotellada, se ha convertido en una de las mercancías que más dinero mueve en el mundo, a un grado tal que un litro de agua llega a costar igual o más que un litro de gasolina o de leche (Campos, 2006).

Actualmente, se han identificado (CONAGUA, INEGI) 1,471 cuencas hidrográficas, que para el cálculo de disponibilidad se han agrupado o subdividido en 728 cuencas hidrológicas. Las cuencas se agrupan en 37 regiones hidrológicas y éstas a su vez, en 13 regiones hidrológico-administrativas. Además, el país tiene 653 acuíferos. Por lo que, México cuenta con una red hidrográfica de 633 mil kilómetros, donde destacan 50 ríos principales por los que fluye el 87% del escurrimiento superficial y cuyas cuencas cubren el 65% de la superficie nacional. De entre éstos, el Grijalva-Usumacinta, Papaloapan, Coatzacoalcos, Balsas, Pánuco, Santiago y Tonalá representan dos terceras partes del escurrimiento superficial y sus cuencas cubren el 22% del territorio nacional.

En México se disponen anualmente de 200 km³ de agua, de los cuales casi el 60% son destinados a la generación de energía eléctrica, 34% al uso agrícola, 4.7% al uso doméstico y el resto al uso industrial (Jiménez, 2007). En la **Tabla 2**, se presenta la variación de la disponibilidad de agua en México en m³ / habitante / año:

Tabla 2. Variación de la disponibilidad del agua en México

Año	Cantidad
1910	31 000
1950	18 000
1970	10 000
2000	4 841
2010	4 180
2020	3 750

Por otro lado, en México llueve una media de 1 489 km³ al año, de los cuales, se evapotranspira el 73.2%, el 22.1% escurre por ríos y arroyos, y el 4.7% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. A nivel nacional, sólo el 88% de la población goza de agua entubada.

En la Ciudad de México, cada hectárea pavimentada provoca que 7.5 millones de litros de agua no puedan ingresar al subsuelo. (Cada milímetro de lluvia anual equivale a 1 litro por m²) y el agua, se clasifica en tres rubros para su uso: Agua para uso doméstico del orden del 67%, industria 17% y servicios 16%. El consumo en la ciudad es de 66,000 litros por segundo y más de la mitad de dicha agua se traslada de zonas tan lejanas como las cuencas de los ríos Lerma, Santiago y Cutzamala.

Tomando en cuenta las exportaciones e importaciones de agua con países vecinos, así como la recarga incidental, anualmente el país cuenta con 459 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable. Dividiendo este valor entre la población se tiene el agua renovable per cápita. Como puede observarse en la **Tabla 3**, en algunas regiones de nuestro país este valor es preocupantemente bajo, destacando la baja disponibilidad en la región de la península de Baja California, Río Bravo, cuencas centrales del norte, Lerma-Santiago-Pacífico y la más acentuada en el Valle de México.

Tabla 3. Agua renovable per cápita por región hidrológico-administrativa, 2008.

No.	Región Hidrológico Administrativa	Agua renovable (hm ³ /año)	Población a dic. de 2008 Mill. Hab.	Agua renovable per cápita 2008 (m ³ /hab./año)	Escorrentamiento natural medio superficial total (hm ³ /año)	Recarga natural de acuíferos (hm ³ /año)
I	Península de Baja California	4 626	3.68	1 257	3 367	1 259
II	Noroeste	8 323	2.59	3 208	5 074	3 250
III	Pacífico Norte	25 627	3.96	6 471	22 364	3 263
IV	Balsas	21 680	10.58	2 049	17 057	4 623
V	Pacífico Sur	32 794	4.12	7 955	30 800	1 994
VI	Río Bravo	11 937	10.84	1 101	6 857	5 080
VII	Cuencas Centrales del Norte	7 884	4.15	1 898	5 506	2 378
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	34 160	20.80	1 642	26 431	7 728
IX	Golfo Norte	25 543	4.96	5 155	24 227	1 316
X	Golfo Centro	95 866	9.62	9 969	91 606	4 260
XI	Frontera Sur	157 754	6.56	24 043	139 739	18 015
XII	Península de Yucatán	29 645	3.98	7 442	4 329	25 316
XIII	Aguas del Valle de México	3 514	21.26	165	1 174	2 340
	Total Nacional	459 351	107.12	4 288	378 530	80 822
FUENTE: CONAGUA. Subdirección General de Programación. Elaborado con base en datos de:						
CONAGUA. Subdirección General Técnica.						
CONAPO. <i>Proyecciones de la Población de México 2005-2050</i> . México, 2008.						

El agua subterránea proporciona el 37% del volumen total concesionado para usos consuntivos¹. Se consideran sobreexplotados los acuíferos cuya extracción es mayor que su recarga total en un

¹ Es el uso del agua que no se devuelve en forma inmediata al ciclo del agua. Por ejemplo, el riego es un uso consuntivo, mientras que la generación de energía eléctrica mediante el turbinado del agua de un río, si la descarga es en el mismo río no es un uso consuntivo. En agricultura, el uso consuntivo es el agua que se evapora del suelo, el agua que transpiran las plantas y el agua que constituye el tejido de las plantas. Es la cantidad de agua que debe aplicarse a un cultivo para que económicamente sea rentable, se expresa en mm/día. (Ingeniería de recursos hídricos. Linsley & Franzini Edición de la Universidad de San Paulo. 1978. Brasil).

periodo determinado. Como se presenta en la **Tabla 4** y de acuerdo con el Diario Oficial de la Federación, en esta condición para el año 2008 se tuvieron 101 acuíferos sobreexplotados, mientras que dieciséis acuíferos en zonas costeras presentan fenómenos de intrusión marina.

Tabla 4. Acuíferos del país, por Región Hidrológico-Administrativa, 2008.

Región Hidrológico-Administrativa	Número de acuíferos				Recarga media (hm ³)
	Total	Sobreexplotados	Con intrusión marina	Bajo el fenómeno de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres.	
I. Península de Baja California	87	8	9	5	1258.9
II. Noroeste	63	13	5	0	3249.5
III. Pacífico Norte	24	2	0	0	3263.0
IV. Balsas	46	2	0	0	4623.2
V. Pacífico Sur	35	0	0	0	1994.1
VI. Río Bravo	100	14	0	7	5079.9
VII. Cuencas Centrales del Norte	68	24	0	19	2377.7
VIII. Lerma-Santiago-Pacífico	127	32	0	0	7728.4
IX. Golfo Norte	40	2	0	0	1316.4
X. Golfo Centro	22	0	2	0	4259.8
XI. Frontera Sur	23	0	0	0	18015.2
XII. Península de Yucatán	4	0	0	1	25315.7
XIII. Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala	14	4	0	0	2339.8
TOTAL	653	101	16	32	80821.6

FUENTE: CONAGUA. Subdirección central técnica. Gerencia de aguas subterráneas.

En la **Figura 4**, se presenta un esquema de la distribución de los acuíferos sobreexplotados por región hidrológico administrativa, observándose que las regiones más sobreexplotadas, son las que tienen menor disponibilidad de agua renovable per cápita.

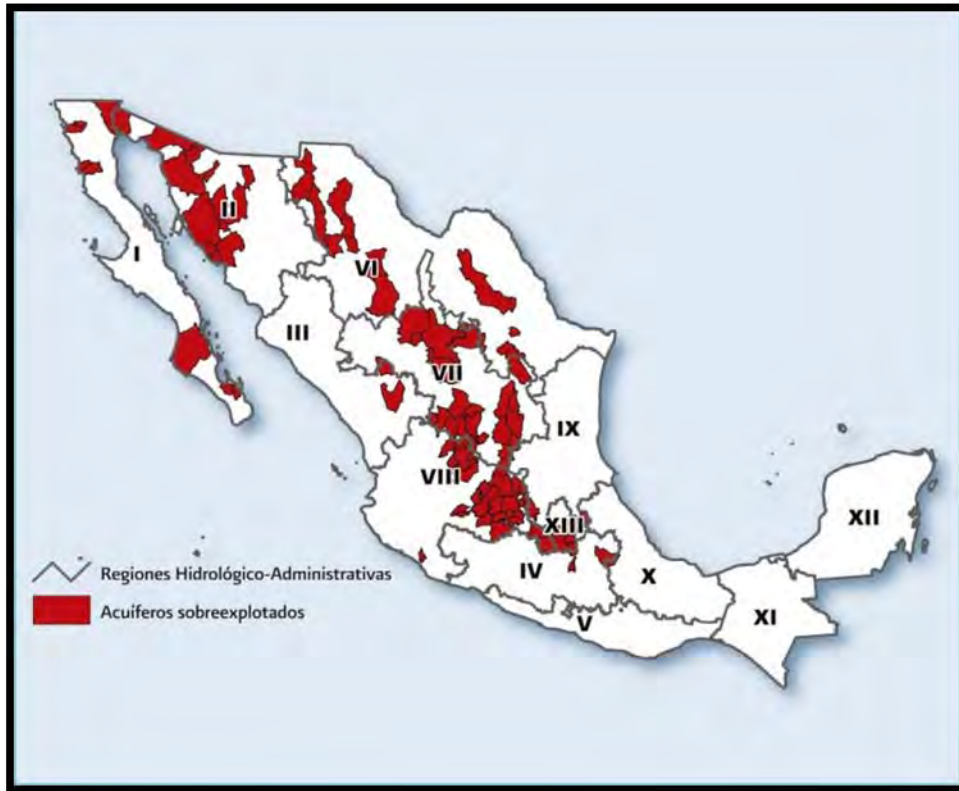


Figura 4. Acuíferos sobreexplotados por región hidrológico-administrativa.

Fuente: CONAGUA

Como se observa en la **Figura 5**, por medio de la precipitación también ingresan 48.9 km^3 de agua proveniente de Guatemala, 1.8 km^3 del Río Colorado y se entregan 0.43 km^3 del Río Bravo a Estados Unidos. De esta manera, la disponibilidad media de agua en México es de 476 km^3 en promedio al año, superior a la mayoría de los países europeos, pero muy inferior comparado con Estados Unidos, Canadá o Brasil, 2460 km^3 , 2740 km^3 , y 5418 km^3 , respectivamente.

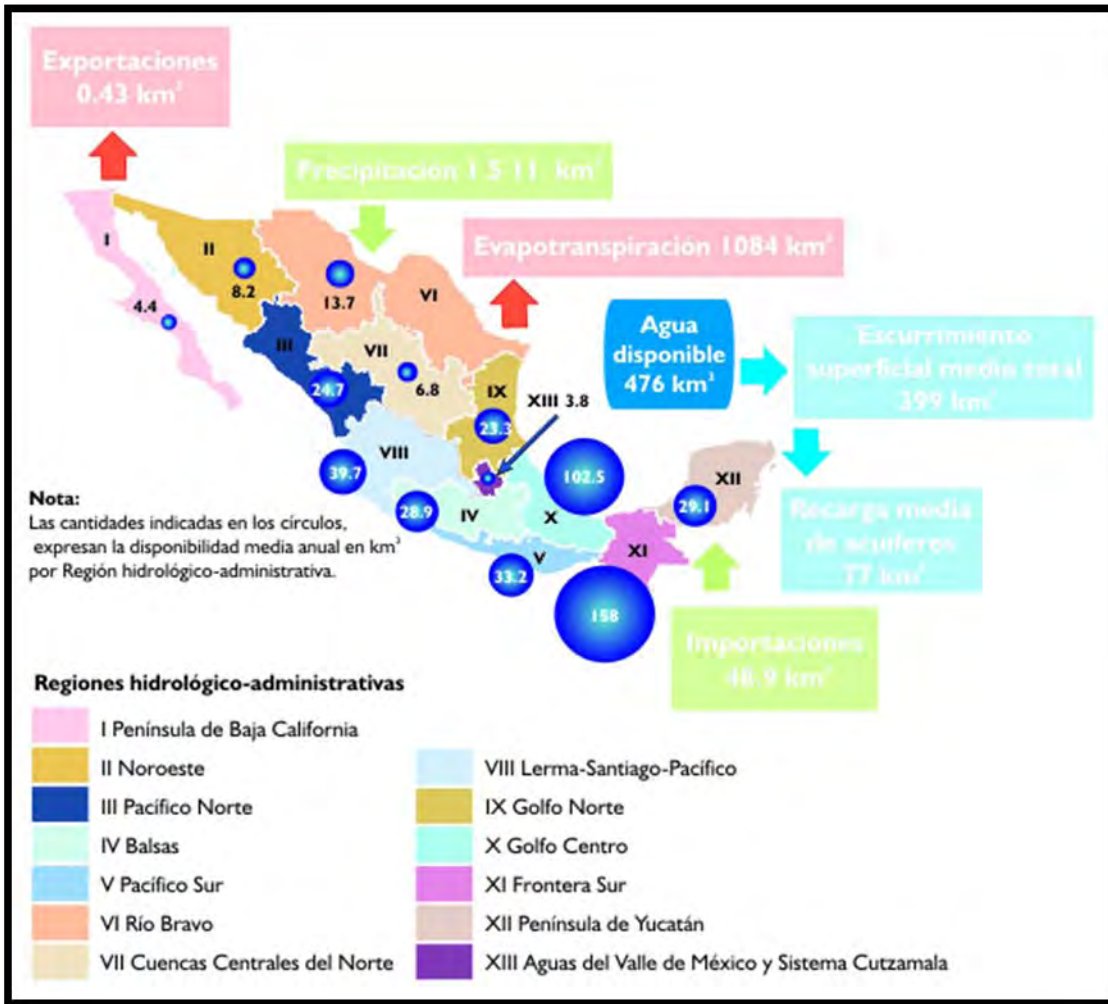


Figura 5. Disponibilidad de agua en México.

Fuente: SEMARNAT

En zonas áridas la situación es crítica, ya que se está disminuyendo el almacenamiento subterráneo para satisfacer la demanda, mientras que en regiones más lluviosas, el agua fluye sin aprovechamiento alguno. La disponibilidad de agua / habitante / año en la zona sureste es siete veces mayor que la del centro-norte.

En la Ciudad de México gran parte del agua consumida diariamente, proviene de sitios muy alejados ubicados en Cutzamala, Gro., a costos muy elevados, y en donde empieza a ser escaso

este recurso, lo que tarde o temprano acarreará problemas sociales con las comunidades poseedoras del agua (Jiménez, 2007; CONAGUA, 2010).

La tendencia futura en México, es el incremento de la población y su posterior concentración en las zonas urbanas. Estimaciones de la CONAPO indican que en el periodo entre 2010 y 2030 la población se incrementará en 12.3 millones de personas, además, el 81% se asentará en zonas urbanas. El incremento de la población ocasionará que el agua per cápita a nivel nacional disminuya. Como se presenta en la **Figura 6**, para el año 2030 se prevé que el agua renovable per cápita alcanzará, en algunas regiones, niveles cercanos o inferiores a los 1000 m³ / hab. / año, y en la región del Valle de México y Cutzamala niveles menores a los 500 m³ / hab. / año, lo que se considera una situación de escasez grave (CONAGUA, 2011).



Figura 6. Agua renovable per cápita año 2030.

Fuente: CONAGUA

En México, existen alrededor de 3.6 millones de viviendas, principalmente en zonas rurales, sin acceso al agua entubada. En la **Figura 7** se observa que los estados más afectados son Chiapas,

Oaxaca, Guerrero y Veracruz, éste último con más de 500,000 viviendas, siendo la mayor causa de decesos en niños y adultos (Anaya, 2007).

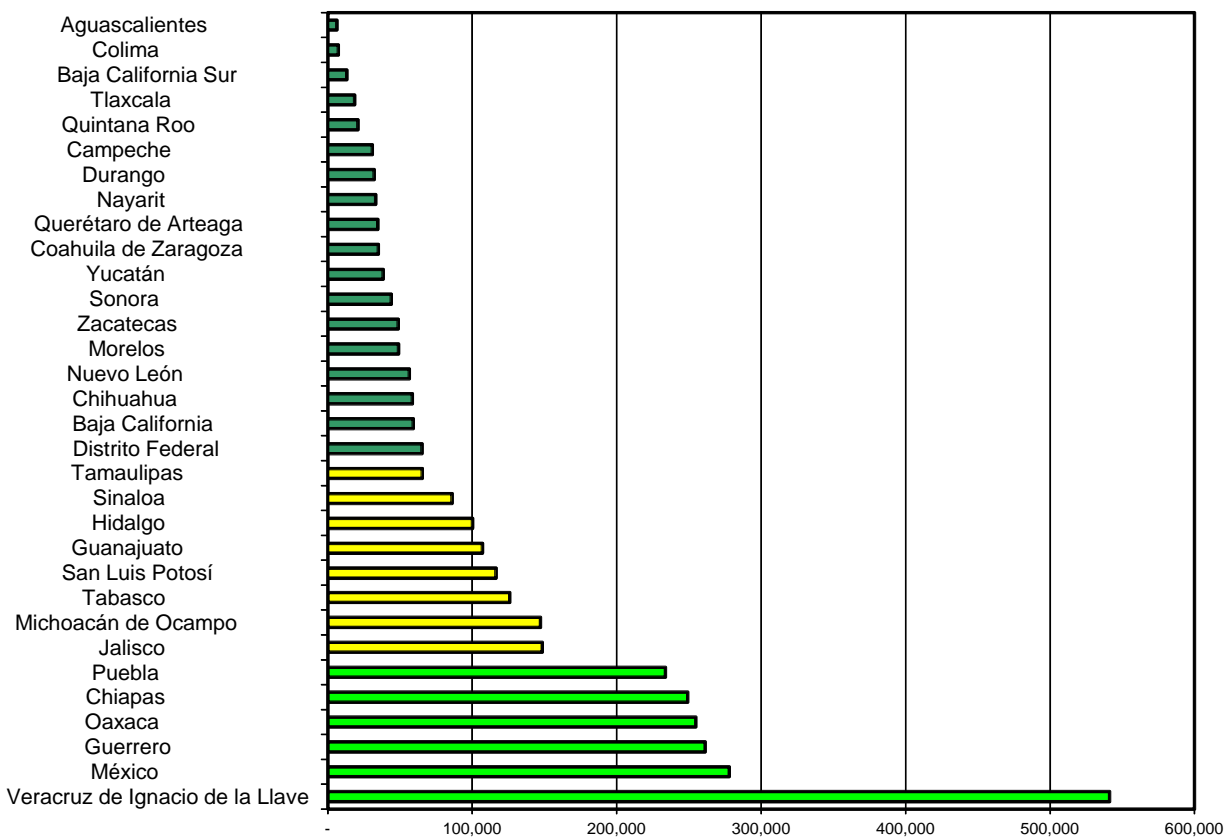


Figura 7. Viviendas sin acceso al agua entubada en los diferentes estados.

Fuente: CIDECALLI – CP.

De acuerdo con la Asociación Internacional del Agua embotellada (IBWA por sus siglas en inglés), el consumo de agua embotellada en el mundo es de 154 mil millones de litros anuales. En México, se consumen cerca de 18 millones de litros de agua purificada al año, lo que representa un gasto de tres mil cuatrocientos millones de dólares. La **Tabla 5** presenta el mercado global del agua embotellada, en donde se observa que el consumo per cápita en México aumentó de 168.5 litros en 2004 a 234.31 litros en 2009, ocupando el primer lugar en consumo de agua embotellada en el mundo.

Tabla 5. Consumo de agua embotellada por persona / año en algunos países.

Fuente: www.bottledwater.org/content/statistics

País	Litros per cápita	
	2004	2009
México	168.5	234.3
Italia	183.6	191.9
Emiratos Árabes Unidos	105.6	151.8
Bélgica – Luxemburgo	148	138.9
Alemania	125	130.6
Francia	141.6	127.9
Líbano	101.4	120.4
España	136.7	118.9
Hungría	76	110.9
Estados Unidos de América	87.82	104.5
Eslovenia	80.25	102.6
Tailandia	76.46	99.9
Arabia Saudita	87.82	99.9
Suiza	99.5	98.4
Croacia	68.51	96.9
Qatar	77.9	96.5
Chipre	92	92.7
Austria	82.14	88.9
República Checa	87	88.2
Hong Kong	58.29	82.9
Promedio Global	24.22	29.9

1.2 SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA

1.2.1 ANTECEDENTES

La captación del agua de lluvia se ha practicado desde hace más de 5000 años. El hombre ha utilizado siempre el agua superficial como su principal fuente de abastecimiento, consumo y vía de transporte. Conforme las civilizaciones fueron creciendo, algunos pueblos se establecieron en zonas áridas, semiáridas y húmedas del planeta y los sistemas de captación del agua de lluvia representaron una de las mejores opciones para el riego de cultivos y uso doméstico.

En el Medio Oriente, actual Jericó, en el período anterior a 8000 a 4000 a. C., en el Valle del Río Jordán, se establecieron comunidades en sitios cuya característica era la baja precipitación pluvial, por lo que sus áreas de cultivo, estuvieron restringidas a la presencia de lluvias y nacimientos de agua natural. Posteriormente, los pueblos asentados en zonas cercanas a los ríos, desviaban el curso del agua para conducirla a los campos de cultivo.

Hace dos mil años, en el desierto del Negev, Israel se construían laderas para coleccionar y conducir la escasa precipitación para posteriormente almacenarla y utilizarla para el ganado y las labores domésticas (Kinkade – Levario, 2007; Anaya, 2007). En zonas áridas, la cosecha de agua de lluvia representa una alternativa de bajo costo para suplir agua en las zonas de cultivo. Los antiguos sistemas de aprovechamiento de los wadis² en el medio oriente han estado en uso desde hace cuatro mil años. En nuevo México y Arizona desde hace por lo menos mil años se practican técnicas de aprovechamiento para la agricultura. (Zauderer y Hutchinson 1988).

Los primeros almacenamientos de agua de lluvia fueron construidos en Europa durante el imperio Romano, utilizando pequeñas presas de tierra y de mampostería para aprovechar el escurrimiento superficial. Ejemplos de éstas estructuras se construyeron en Hungría en la era del emperador Galerio (305 – 311 años d. C.), además de que se utilizaba el agua de lluvia proveniente de los techos y patios de las casas (Kinkade – Levario, 2007).

² Los wadis son pequeños reservorios de captación de agua de lluvia y de escurrimiento, que se construyen en lechos secos de ríos o cauces o cañadas con caudales temporarios de las regiones desérticas.

En Creta, en las ruinas del palacio de Knossos (1710 a. C.) se han encontrado sistemas de captación de agua de lluvia mediante la utilización de techos y la construcción de cisternas. Se construían también piscinas en el interior de las casas, que cumplían la función de un sistema de aire acondicionado. Ejemplos como éstos se pueden encontrar en el palacio de Alambra en Granada, España. Actualmente, en Kenia, se utilizan diversos sistemas de captación de agua de lluvia para uso doméstico, los cuales consisten básicamente en tres componentes que son el área de captación, sistema de conducción y almacenamiento.

La utilización de los sistemas de captación del agua de lluvia (SCALL) se ha hecho extensiva en la República Popular de China, India, Bangladesh, Tailandia, Japón, Alemania, Australia, América Latina y el Caribe y México, entre otros países (Anaya et al., 2003).

En la República Popular de China, en Loess de Gansu, donde el escurrimiento superficial y el agua son muy escasos, desde 1988 el gobierno local ha implementado proyectos para la captación de agua de lluvia, apoyando a las familias para construir un área de recolección de agua, dos almacenamientos y un terreno para cultivar (Anaya, 2007). Con éstas acciones, se ha solucionado el problema de agua potable para 1.2 millones de personas, las cuales cuentan con 10 litros / persona / día. En la **Figura 7**, se observa la superficie destinada para la captación.



Figura 7. El agua es captada en el techo, se almacena bajo el piso y se extrae mediante una bomba de mano. Fuente: www.unep.or.jp

En la India, otro país que actualmente enfrenta problemas de sequía., se ha reportado que para el 2025, pasará a la categoría de país con tensión hídrica, por lo que algunas ciudades ya cuentan con sistemas masivos de captación de agua de lluvia (**Figura 8**). Adicionalmente, en Chennai, India, se han puesto en marcha campañas para implantar los sistemas tradicionales de captación del agua de lluvia (depósitos, estanques, lagos) obligatorios también en Nueva Delhi. Actualmente, existen 400 edificaciones, 216 escuelas y 56 parques que cuentan con su propia instalación de captación del agua de lluvia (Anaya, 2011).



Figura 8. Captación de agua de lluvia para recarga de acuífero y riego en invernadero, India.

Fuente: www.auick.com

En Bangladesh, debido a que el agua subterránea se encuentra contaminada con arsénico, la recolección de agua de lluvia se ha convertido en una alternativa viable para el suministro de agua segura a los pobladores. Desde 1997 se han instalado más de 1000 sistemas de captación de agua de lluvia. Un ejemplo de estos sistemas es el presentado en la **Figura 9**. Sin embargo, se puede observar que dichos sistemas no cuentan con los elementos necesarios para la potabilización y purificación del agua captada.



Figura 9. Sistema de captación de agua de lluvia, Bangladesh. Fuente: www.unep.or.jp

Por otro lado, en Tailandia, la población rural, se ha dado a la tarea de construir más de 10 millones de cisternas para la captación del agua de lluvia utilizando materiales locales, con capacidad de abastecimiento de seis personas durante un periodo de seis meses. En la **Figura 10** se muestran los depósitos de almacenamiento utilizados.



Figura 10. Sistema de captación y almacenamiento del agua de lluvia en Tailandia.

Fuente: www.unep.or.jp.

Japón también presenta problemas en cuanto a la disponibilidad de agua, es por eso que se han implementado técnicas de captación de agua de lluvia llamadas “Ronjinson” (**Figura 11**), los cuales se encuentran en la vía pública en el distrito de Mukojim. El agua es captada en el techo de la casa, se almacena en un pozo subterráneo para ser extraída posteriormente con una bomba manual (Ballén et al., 2006; Anaya et al., 2007).

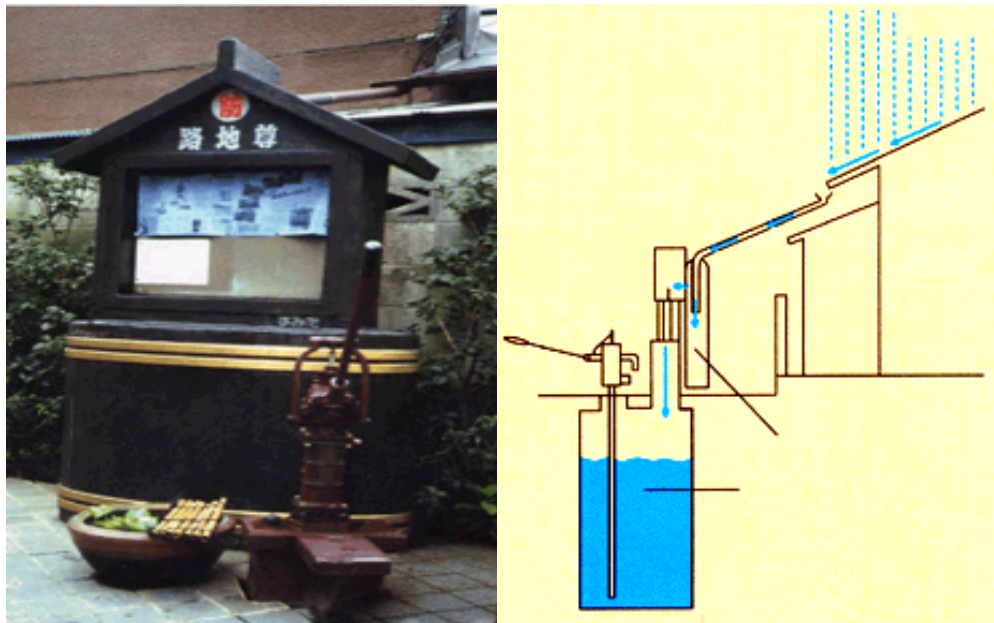


Figura 11. Bomba de mano (izquierda) y sistema de captación de agua de lluvia “Ronjinson”(derecha), Tokio, Japón. Fuente: www.unep.or.jp

Actualmente, en Alemania, existe un gran interés por parte del gobierno en la promoción de la colecta de agua de lluvia en casas para usos no potables, debido a los serios problemas de contaminación del aire por las industrias, ofreciendo incentivos anuales a los pobladores. En la Universidad Técnica de Darmstadt se encuentra uno de los sistemas de captación de agua de lluvia más grandes de Alemania, el cual suministra a toda la Universidad aunque sólo el 20 % es utilizado para consumo humano.

En Australia, la captación de agua de lluvia se practica desde hace varios siglos, debido a lo disperso de sus comunidades y poblaciones, y a que grandes áreas del sur y oriente padecen de

sequía. El poblado de Orange desarrolló el primer programa para la captación de agua de lluvia en este país (Anaya, 2011). En 1994, la Oficina Australiana de Estadística (Australian Bureau of Statistics) realizó un estudio mostrando que el 30.4 % de los hogares australianos ubicados en las zonas rurales y el 6.5% de los hogares en las ciudades utilizan algún sistema de aprovechamiento de agua lluvia; también se indica en el estudio que el 13 % de las casas donde se ha implementado un sistema de aprovechamiento de agua lluvia, el agua se utiliza para beber y cocinar (Ballén et al., 2006).

En Estados Unidos, los sistemas de captación de agua de lluvia, son utilizados en más de 15 estados. Texas es el estado con el mayor aprovechamiento del agua de lluvia. Una casa como la mostrada en la **Figura 12**, con una superficie de 200 m² de techo puede llegar a captar hasta 150000 litros de agua al año, considerando una precipitación anual media de 850 mm (Ballén et al., 2006; Anaya et al, 2007; Krishna, 2005; Kinkade – Levario, 2007).



Figura 12. Sistema de captación de agua de lluvia básico. Dallas, Texas. Fuente: Jan Lewinski.

En Vancouver, Canadá, se destina un subsidio para la compra de barriles para el aprovechamiento del agua de lluvia, como parte de un programa para la conservación del agua. Dicha agua es utilizada para el riego de jardines y césped.

En América Latina y el Caribe se han utilizado los sistemas de captación de agua de lluvia desde hace más de tres siglos para el consumo humano y producción agrícola (Anaya, 1998). En Brasil, en el año de 1983, se inició un programa con el fin de llevar agua a las comunidades rurales, construyendo sistemas de captación y almacenamiento como los mostrados en la **Figura 13**, utilizando materiales locales para reducir los costos. Se han formado también diversas organizaciones tales como la Asociación Brasileña de los Sistemas de la Captación del Agua de Lluvia, sin embargo, no la purifican.



Figura 13. Cisternas de ferrocemento prefabricadas en Brasil. Fuente: foroantiguo.infojardin.com/showthread.php?t=182174

En Honduras, en los barrios Israel Norte y Nueva Tegucigalpa, debido a la escasez, se han construido “cisternas recolectoras” para el almacenamiento del agua de lluvia (**Figura 14**). El agua es captada en los techos de las viviendas para posteriormente ser conducida hacia la cisterna. Algunos de estos sistemas están contruidos con materiales reciclables y, aunque el agua no es purificada, representan un importante incremento en la calidad de vida de los habitantes.



Figura 14. Cisterna recolectora de agua de lluvia en Honduras. Fuente: CIDECALLI - CP

En Nicaragua se han desarrollado cerca de 30 proyectos destinados al incremento en la disponibilidad del agua. Se han construido sistemas dotados de canaletas, trampas de sedimentos y cisternas circulares como los mostrados en la **Figura 15**. El agua almacenada es apta para uso doméstico.



Figura 15. Sistemas de captación de agua de lluvia en techos de lámina, conducción y almacenamiento. Nicaragua.

Fuente: nuevasesperanzas.org/reports/Nicaragua%20anual%20report%202005%20spanish.pdf

En Guatemala, en el municipio de Chiquimula, se estableció una unidad demostrativa experimental que consta de la colocación de canales en tres viviendas y la construcción de un tanque para el almacenamiento del agua (Anaya, 2011).

En la república Dominicana, existen algunos proyectos de captación de agua de lluvia. Algunas ONG's han ayudado a los habitantes a construir sistemas de captación de agua de lluvia, como el mostrado en la **Figura 16**, en más de 5000 hogares.



Figura 16. Captación de agua de lluvia a nivel familiar en República Dominicana.

Fuente: CIDECALLI – CP.

Finalmente, en México, se han utilizado los sistemas de captación de agua de lluvia desde tiempos remotos. En la época precolombina fueron utilizados para regar cultivos. En la península de Yucatán y en Xochicalco, Morelos, desde el año 300 a. C. se emplearon los sistemas conocidos como “chuluts”, con los que se colectaba y conducía el agua por medio de canales a depósitos de piedra para después utilizarla (Garrido, 2006). En la época colonial, los conquistadores captaban el agua directamente de los techos de las casas, o indirectamente de suelos, arroyos, ríos, pozos, manantiales y jagüeyes.

A pesar de que se cuenta con el agua de lluvia necesaria para abastecer a la población, existe una distribución desigual de las precipitaciones, así como la escasez de agua con la calidad necesaria para sus diferentes usos (CNA, 2006).

Actualmente, la escasez de agua para consumo humano es un problema que afecta a 14 millones de mexicanos, principalmente a los habitantes del medio rural en la zona árida – semiárida de México. En dichas zonas comúnmente se utilizan los estanques o presas de tierra, aljibes, las ollas de agua, transporte de agua en camiones cisterna, manantiales canalizados o entubados, trampas de agua de lluvia, etc., pero poco de lo mencionado es adaptable a las necesidades de los pobladores para satisfacer la demanda diaria de agua para su consumo.

El problema es tan serio que, el Centro Internacional de Demostración y Capacitación en Aprovechamiento del Agua de Lluvia (CIDECALLI) del Colegio de Postgraduados en el Estado de México, ha realizado diversos proyectos comunitarios tales como: la “Purificación de Agua de Lluvia Almacenada en una Cisterna Revestida con Geomembrana de PVC para Consumo Humano del Grupo Étnico Mazahua” (**Figura 17**). En la etnia Mazahua, caracterizada por problemas de acceso al agua potable para la comunidad, se construyó un sistema para la captación y purificación del agua de lluvia para abastecer a una población de 2600 personas (Carro, 2002).



Figura 17. Cisterna revestida con geomembrana de PVC en la zona Mazahua. Fuente: CIDECALLI – CP

En Michoacán, con el proyecto “Captación y Purificación de Agua de Lluvia para Consumo Humano en Tres Comunidades de la Meseta Tarasca del Estado de Michoacán” (**Figura 18**), se han beneficiado las comunidades de San Antonio, San Isidro y Santa Rosa del municipio de Los Reyes, abasteciendo con agua en cantidad y calidad a una población de 4000 habitantes.



Figura 18. Sistemas de captación de agua de lluvia en la Meseta Tarasca del Edo. De Michoacán.

Fuente: CIDECALLI – CP.

En el estado de Puebla, se desarrolló el proyecto “Antecedentes y perspectivas del aprovechamiento del agua de lluvia con fines agrícolas y domésticos en la región de Tecamachalco, Puebla, México”, incluyéndose a los municipios de Yehualtepec y Tlacotepec ubicados en la región semiárida del oriente del estado de Puebla. En el estado de Guanajuato, el proyecto “Captación y aprovechamiento del agua de lluvia para la producción de hortalizas en el traspatio de la comunidad de Tirados de Abajo, municipio de Tarimoro, Guanajuato” se propuso un centro que posibilite a pobladores rurales aprender tecnologías que les permitan solucionar problemas para la alimentación familiar. El agua captada es aprovechada para regar hortalizas, darle de beber a animales y usos diversos en la vivienda.

En el estado de Morelos, en los municipios de Ocuituco y Totolapan, se construyeron sistemas de captación y tratamiento del agua de lluvia a nivel domiciliario y colectivo (IMTA, 2003).

El agua de lluvia es un recurso que debe ser aprovechado y se tiene un enorme potencial de este recurso para el desarrollo sostenible. La utilización del agua de lluvia representa tecnologías de bajo costo, no genera contaminación y está al alcance de todos, por lo tanto, es necesaria la concientización de la población mediante programas y proyectos para lograr su completa utilización. El aprovechamiento eficaz del agua de lluvia para consumo humano y otros usos, representa una solución viable, económica y sencilla para resolver el creciente problema de la escasez del agua, es por eso que los SCALL desempeñan un papel importante en satisfacer las necesidades domésticas y en la producción agrícola, tanto en regiones áridas como en regiones con alta precipitación pluvial (Chavarrías, 2006).

1.2.2 COMPONENTES DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA

El aprovechamiento del agua de lluvia, consiste en la captura, conducción y almacenamiento de la misma, para ser utilizada en propósitos tales como, el riego, consumo animal, consumo humano, recarga de acuíferos, etc.

Como lo reportan varios autores (Kinkade – Levario, 2007; Anaya, 2007; Krishna, 2005), los componentes básicos de un sistema de captación de agua de lluvia son los siguientes:

- Área de captación
- Sistema de conducción
- Desviador de las primeras aguas
- Infraestructura de almacenamiento
- Filtración y tratamiento
- Distribución

ÁREA DE CAPTACIÓN

Es la superficie sobre la cual cae la lluvia, pueden ser techos, patios, campos, etc. Es importante que los materiales de dichas superficies no desprendan contaminantes o sustancias que puedan alterar el funcionamiento del sistema. Dicha superficie debe tener el tamaño suficiente para satisfacer la demanda. Es importante mencionar que sólo debe considerarse la proyección horizontal del área de captación en m^2 como se muestra en la **Figura 19**.

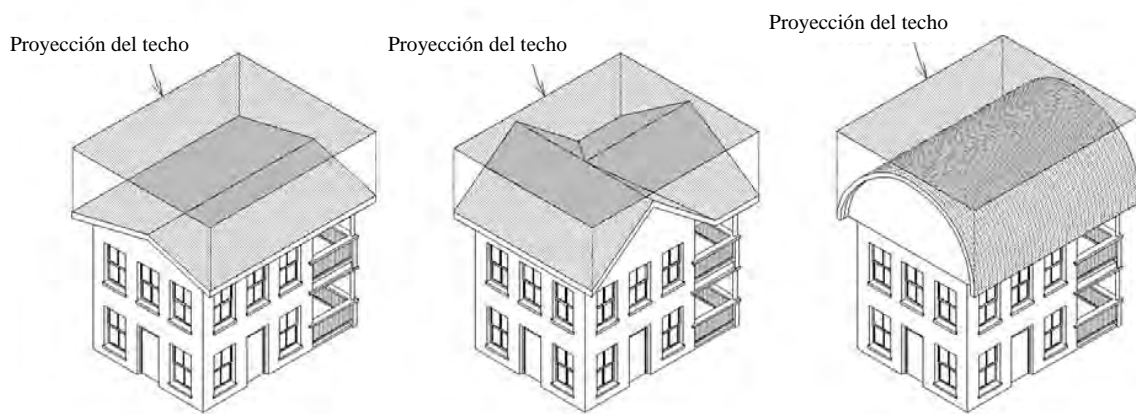


Figura 19. Superficies de captación de tres tipos de techo diferentes. Fuente: The Texas Manual on Rainwater Harvesting.

En zonas urbanas se pueden utilizar los techos contruidos de concreto o lámina galvanizada, mientras que, en las zonas rurales, pueden ser de concreto, lámina galvanizada, lámina de asbesto, madera y paja. Es posible utilizar también las superficies de canchas, patios o estacionamientos que no desprendan contaminantes que incrementen el costo del tratamiento del agua captada.

Otro tipo de techos de captación, son los llamados techos cuenca (Anaya, 2007), los cuales son estructuras diseñadas para la recolección directa del agua de lluvia. El techo está formado por dos superficies que convergen en un canal central lo que permite que el agua se conduzca por gravedad a la cisterna (**Figura 20**).



Figura 20. Techo cuenca en la comunidad de Tecongo, Aguascalientes (Anaya, 2007).

Cuando el techo es insuficiente para realizar la captación, una opción es construir laderas que no requieran de gran movimiento de tierras, recubriéndolas con materiales impermeables como pueden ser plástico de invernadero, geomembrana o concreto como se presenta en la **Figura 21**.



Figura 21. Ladera cubierta de concreto y ladera recubierta con geomembrana de PVC, para captación de agua de lluvia. Fuente: CIDECALLI – CP

SISTEMA DE CONDUCCIÓN

El sistema de conducción, se compone por el conjunto de canaletas o tuberías de diversas formas y materiales, que conducen el agua del área de captación hacia el sistema de almacenamiento. Dichas canaletas se instalan en los bordes bajos del techo en donde el agua tiende a escurrir antes

de caer al suelo. Deben ser livianas, resistentes y no contaminantes. Es recomendable colocar mallas que detengan basura, sólidos y hojas para evitar que el sistema se obstruya y realizar la limpieza del techo una vez que inicie la temporada de lluvias. Los materiales comúnmente utilizados son lámina galvanizada, aluminio, PVC y materiales tales como madera o bambú. En la **Figura 22** se muestra un ejemplo.

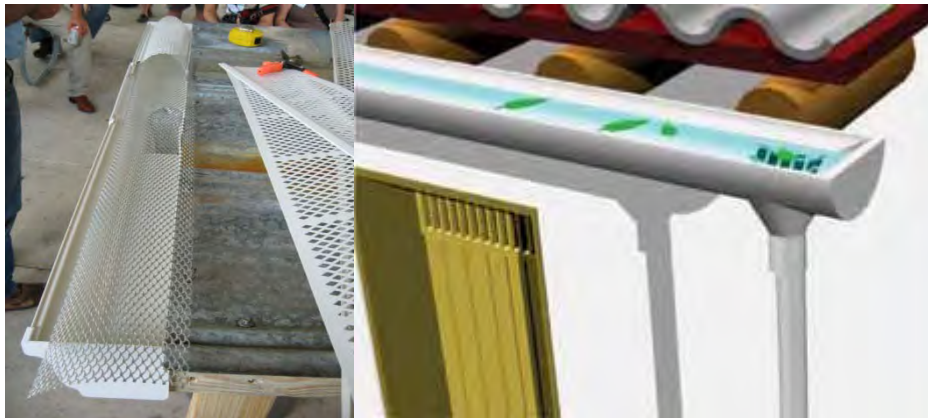


Figura 22. Canaletas con trampa de sólidos para evitar la contaminación del agua captada.

Fuente: www.conafor.gob.mx/biblioteca-forestal

DESVIADOR DE LAS PRIMERAS AGUAS

El desviador de las primeras aguas es importante cuando, las canaletas no cuentan con una trampa de sólidos o el agua será utilizada para consumo humano. Estos dispositivos son de gran ayuda para eliminar contaminantes como polvo, hojas, insectos, etc., que puedan contener las lluvias iniciales antes de su almacenamiento definitivo. Las ventajas de utilizar estos desviadores son la reducción en la frecuencia de limpieza del tanque y la reducción de la entrada de bacterias. El desviador más simple consiste en colocar un tubo que contenga la lluvia inicial y al llegar el agua a cierto nivel, desviarla hacia el tanque de almacenamiento. Dicho tubo debe estar dotado de una válvula para drenarlo constantemente. Existen otros tipos de desviadores tales como el de válvula de bola, que consiste de una bola flotante que sella la parte superior del tubo y una vez lleno, desvía el agua restante hacia el tanque de almacenamiento (**Figura 23**). También se

pueden encontrar tecnologías alemanas como el filtro de tubo bajante “WISY” (**Figura 24**) o el filtro de “cascada” de la empresa 3P Technik (**Figura 25**), los cuales son llamados filtros auto – limpiables.

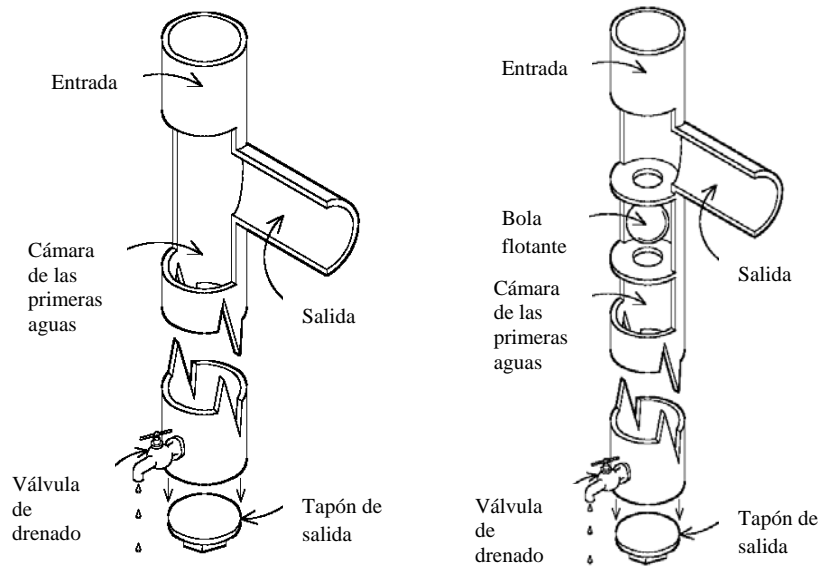


Figura 23. Tubo desviador de las primeras aguas y tubo con válvula flotante.
Fuente: The Texas Manual on Rainwater Harvesting.

En el diseño del dispositivo se debe tener en cuenta el volumen de agua requerido para lavar el techo y que se estima en 1 litro por m² de techo (UNATSABAR, 2001).

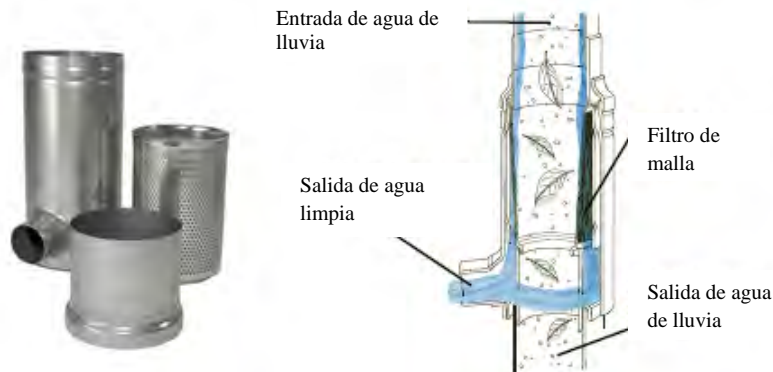


Figura 24. Filtro de tubo bajante WISY. Fuente: raincyclesystems.com

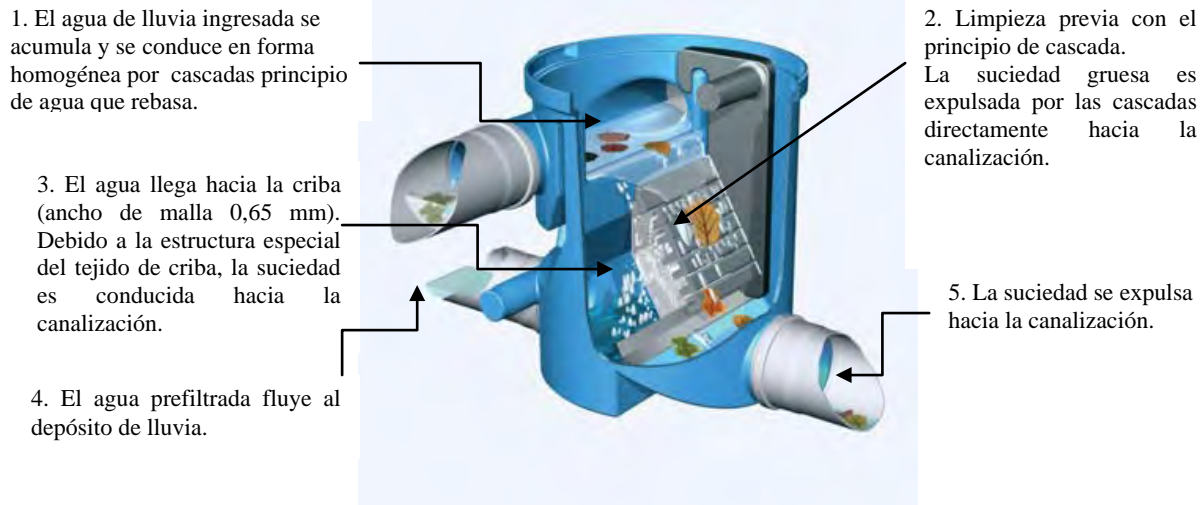


Figura 25. Filtro de cascada de 3P Technik. Fuente: www.3ptechnik.de

Filtros como los presentados en las **Figuras 24** y **25** son recomendables cuando no ha llovido por largo tiempo y el volumen de agua requerido para remover los contaminantes del techo sobrepasa un desviador de las primeras aguas común.

ALMACENAMIENTO

Los sistemas de almacenamiento, están compuestos por cisternas o tanques en donde se almacena el agua de lluvia captada. Es el componente que representa la mayor inversión en el sistema de captación de agua de lluvia, ya que la mayoría de las viviendas no están adecuadas inicialmente con una cisterna para estos fines. Un tanque de almacenamiento debe ser durable, atractivo, limpio, no tóxico, de fácil mantenimiento y resistente a la presión ejercida por el agua.

Los materiales más utilizados para la construcción de dichos tanques son:

Plásticos: fibra de vidrio, polietileno y PVC. Los tanques de polietileno son ampliamente utilizados, pueden colocarse en la superficie o enterrados, son fáciles de transportar e instalar, durables, flexibles y con acabados sanitarios para el agua potable (**Figura 26**).



Figura 26. Tanques de polipropileno. Fuente: The Texas Manual on Rainwater Harvesting.

Metales: acero inoxidable o galvanizado. En los tanques de acero galvanizado podría existir un exceso de zinc, el cual puede afectar el sabor del agua de lluvia almacenada (**Figura 27**).



Figura 27. Tanque de acero galvanizado con revestimiento plástico de grado alimenticio.
Fuente: The Texas Manual on Rainwater Harvesting.

Concreto: ferrocemento, piedra y bloque de concreto (**Figura 28**). Ventajas: bajo costo, uso reducido de materiales, no se necesita molde, puede ser fabricada por personas de la localidad en poco tiempo, fácil de reparar. Desventajas: el agua se calienta con facilidad y no resisten movimientos sísmicos ya que son de baja flexibilidad.



Figura 28. Tanque fabricado con anillos de concreto apilados.

Fuente: The Texas Manual on Rainwater Harvesting.

Madera: madera roja, abeto, ciprés. Tienen gran presentación estética. Usualmente son contruidos con pino, cedro o ciprés y envueltos con cables de acero (**Figura 29**). Se pueden ensamblar y desensamblar para ser movidos de lugar. Es costoso.



Figura 29. Tanque de madera en Texas. Fuente: The Texas Manual on Rainwater Harvesting.

Las cisternas tienen comúnmente tres componentes principales que son: la base, los lados y la cubierta. A su vez, deben contar con elementos secundarios tales como, la entrada y salida de agua, cubierta de acceso para mantenimiento y válvula de drenado. Es necesario contar con un dispositivo de admisión calmada a la entrada para eliminar la turbulencia (**Figura 30**), y un tubo de sobre flujo o rebose para cuando el nivel del agua sobrepase el límite de la cisterna (**Figura 31**).

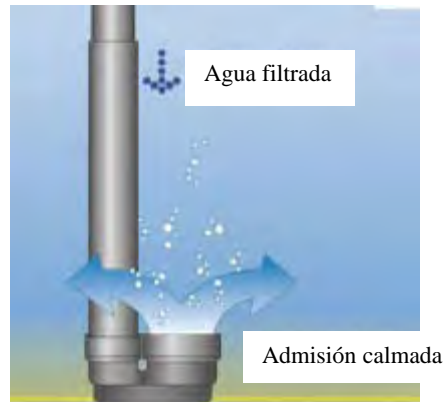


Figura 30. Dispositivo de admisión calmada. Fuente: 3ptechnik.com

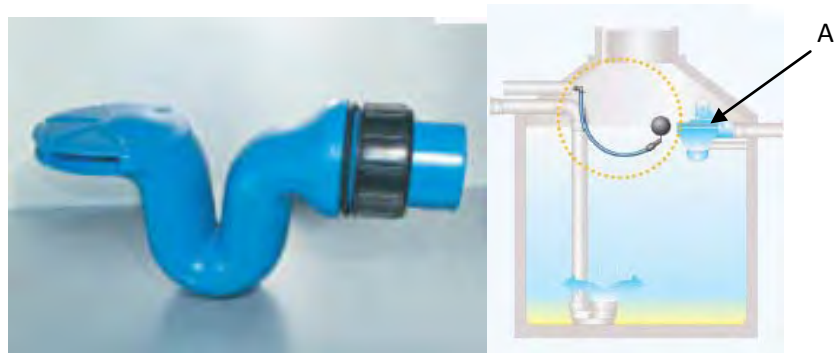


Figura 31. Tubo de rebose para eliminar el sobre flujo (A). Fuente: 3ptechnik.com

FILTRACIÓN

La filtración es un proceso que consiste básicamente en separar un sólido del líquido en el que está suspendido, haciéndolo pasar a través de un medio poroso.

Este proceso comienza cuando el agua de lluvia es captada y conducida hacia el dispositivo desviador de las primeras aguas o los filtros de tubo bajante presentados anteriormente. También es posible reducir la turbidez mediante la construcción de un sedimentador o bien la instalación de un filtro de sedimentos, como el mostrado en la **Figura 32**.

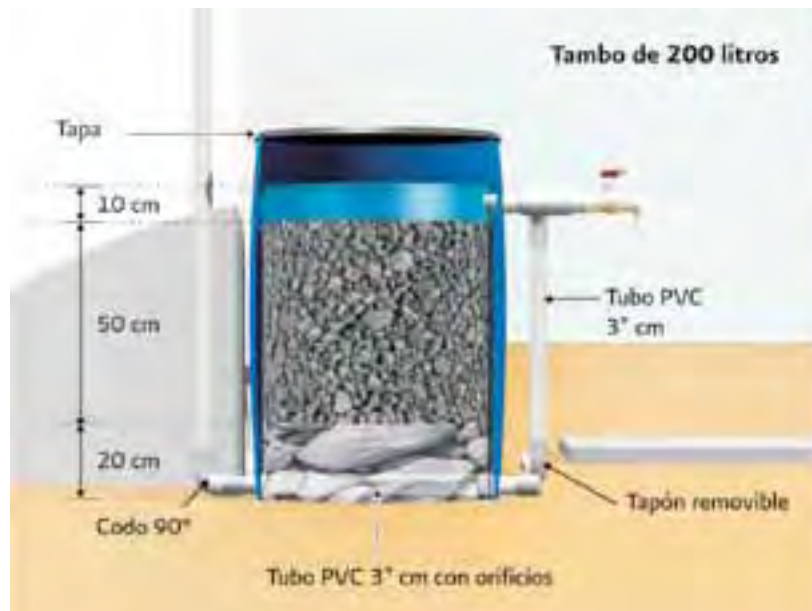


Figura 32. Filtro de grava para sedimentos. Fuente: CONAFOR.

Un dispositivo más sencillo se presenta en la **Figura 33**, y consiste en colocar una malla a la mitad de un bote de 19 litros y en la parte inferior se adapta a la tubería de la línea de conducción (Anaya, 2007).



Figura 33. Trampa de basura para las primeras lluvias. Fuente CIDECALLI – CP.

El material filtrante debe estar siempre limpio y sus capas deben ser removidas y lavadas durante la época de lluvias. El uso de algún tipo de filtro de tubo bajante como los presentados anteriormente (WISY o 3P TECHNIK) nos da la oportunidad de suprimir el uso de un dispositivo para las primeras aguas, sedimentador o filtro de gravas.

El agua en una cisterna de almacenamiento se compone típicamente de tres capas: a) la capa superior, zona aeróbica, en donde residen las partículas que pueden flotar y el agua que ha pasado más tiempo en el tanque, b) la capa media y c) la capa del fondo en donde se concentran la mayoría de los sólidos. Si el agua va a ser utilizada para consumo humano, es necesario instalar en el tanque de almacenamiento un “filtro de succión flotante” (**Figura 34**). El propósito de este filtro es el extraer el agua con mayor calidad que se encuentra en la parte media del tanque (de 25 a 40 centímetros por debajo de la superficie). Éste se conecta en el tubo de salida que se encuentra normalmente al fondo de la cisterna.

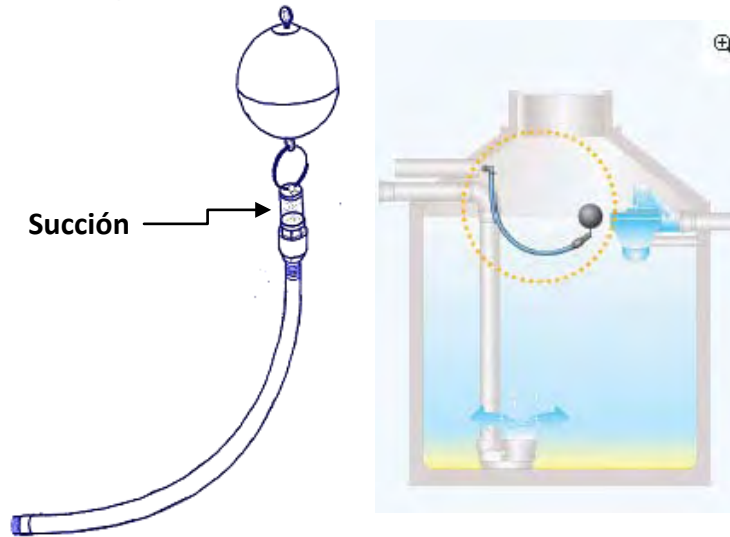


Figura 34. Filtro de succión flotante. Fuentes: 3ptechnik.com; harvesth2o.com

DISTRIBUCIÓN

El sistema de distribución del agua captada dependerá del uso que el usuario final le dé al recurso; puede ser consumo humano, uso doméstico, agricultura, ganadería o uso industrial. El agua almacenada puede ser distribuida por gravedad o por bombeo.

1.3 MÉTODOS CONVENCIONALES DE TRATAMIENTO DE AGUA

Para el consumo humano, el agua debe someterse a ciertos tratamientos acordes a su calidad inicial, así como, cumplir con las normas vigentes establecidas. En México, el agua debe cumplir con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 que establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano.

En el ámbito doméstico, el agua debe ser potable, es decir, apta para el consumo humano, sin embargo, se puede utilizar para el riego, lavado de ropa, hortalizas, agricultura o consumo animal (Anaya, 2007).

1.3.1 FILTRACIÓN

1.3.1.1 FILTRACIÓN CONVENCIONAL

Cuando la fuente de abastecimiento es una fuente de agua subterránea, el agua pasa a través del suelo y éste actúa como un filtro natural que remueve la mayor parte de los sedimentos acarreados por la lluvia. Para el caso de las aguas superficiales, los métodos de filtración pueden clasificarse en: filtros de arena rápidos o lentos, filtros de tierras diatomeas, filtración directa o filtración empacada, filtros de membrana y filtros de cartucho.

1.3.1.2 FILTROS DE ARENA

Este tipo de filtros consisten en el arreglo de varias capas de arena de diferentes grosores (**Figura 35**). En el caso de los filtros lentos de arena, son de gran importancia también los procesos biológicos, ya que se forma, en el interior del filtro, una película delgada de microorganismos que atrapa y destruye algas, bacterias y materia orgánica. Sus ventajas residen en que son de bajo costo, confiables, pueden remover hasta el 99.9 % de los microorganismos y su operación y mantenimiento son sencillos. Por otro lado, sus limitaciones son que no pueden remover turbiedades elevadas y requieren grandes superficies ya que operan a baja velocidad (Leal, 2005).

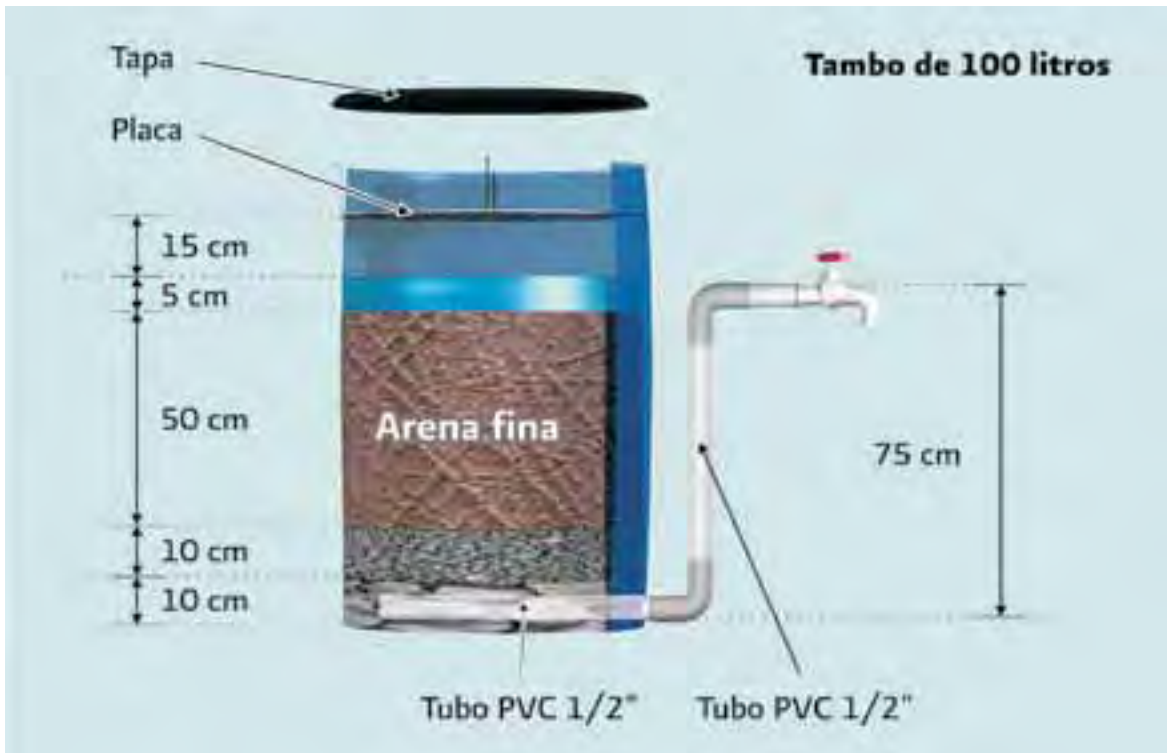


Figura 35. Biofiltro de arena. Fuente: SEMARNAT

1.3.1.3 FILTROS DE TIERRAS DIATOMEAS

Los filtros de tierras diatomeas³, consisten generalmente de una capa de tierra diatomea de medio centímetro de espesor en el interior de un filtro puesto a presión o al vacío, o bien, se fabrica un cartucho de tierra compactada. Este filtro es muy adecuado cuando el agua presenta poca turbidez (menor a 10 Unidades Nefelométricas de Turbidez) y bajo conteo de bacterias, lo que representa una de sus principales limitantes, siendo también difícil conservar el grosor de la capa de tierra en el interior del filtro (**Figura 36**).

³ La diatomita o tierra de diatomeas es una roca sedimentaria silícea formada por micro-fósiles de diatomeas, algas marinas unicelulares que secretan un esqueleto silíceo llamado frústula. Este material sirve de medio de filtración; su granulometría es ideal para la filtración del vino. También se utilizan para las filtraciones en química y en la fabricación de la cerveza.



Figura 36. Filtro de tierras diatomeas compactadas. Fuente: Pasteur del Este C. A.

1.3.1.4 FILTROS EMPACADOS

Estos filtros, contienen todas las etapas de filtración en una unidad, como son, la adición de reactivos, floculación, sedimentación y filtración (**Figura 37**). Se utilizan comúnmente para tratar agua superficial, remover turbiedad, color y algunos organismos coliformes. Entre sus ventajas están que son compactos y de fácil operación, mientras que, su principal desventaja es que no retienen sustancias orgánicas o metales disueltos. Si las características del agua cambian, el operador deberá modificar las condiciones de operación, por lo que, se requieren operadores capacitados.



Figura 37. Filtros empacados. Fuente: CIDECALLI – CP

1.3.1.5 FILTROS DE CARBÓN ACTIVADO

Los filtros de carbón activado están basados en que este material tiene una gran área superficial y una gran capacidad de adsorción de compuestos (**Figura 38**). Se utilizan principalmente cuando se desea remover olor, sabor, color o compuestos orgánicos volátiles del agua. Son económicos y fáciles de mantener y operar. Entre sus desventajas destaca que requieren mantenimiento frecuente y no se sabe cuándo han dejado de funcionar, no remueven bacterias, metales ni nitratos y, al saturarse, generan residuos que no son de fácil disposición.



Figura 38. Carbón activado (Izquierda), filtro de carbón activado (derecha). Fuente: www.acsmedioambiente.com

1.3.2 DESINFECCIÓN

Es la etapa en donde se inactivan bacterias, microorganismos y virus que pudiesen provocar enfermedades al ser humano, y es medida por la capacidad de controlar a los coliformes totales y fecales, los cuales sirven como indicador. Entre los métodos viables para la desinfección se encuentran el cloro, el ozono y la luz UV.

1.3.2.1 CLORO

El cloro, ha sido utilizado para desinfectar agua desde 1908 y se sigue utilizando para desinfectar agua de lluvia en Hawái, las Islas Vírgenes, Kentucky y Ohio (Krishna, 2005). El agua puede ser clorada por medio de hipoclorito de sodio o de calcio, los cuales, se pueden encontrar en forma líquida o sólida. Estos materiales son muy corrosivos, por lo que el almacenamiento debe ser adecuado para evitar daños por corrosión. En el caso del hipoclorito de sodio, este reacciona de manera espontánea con el medio ambiente y pierde su efectividad al cabo de un mes, en cambio, el hipoclorito de calcio puede permanecer almacenado hasta por un año. Otra de las limitantes del cloro, es la formación de subproductos halogenados producidos al reaccionar el cloro con la materia orgánica presente en el agua, proveniente de las sustancias húmicas del suelo. Entre los más importantes se encuentran los trihalometanos⁴. Finalmente, para lograr la desinfección, el cloro debe estar presente en una concentración de 1 ppm.

1.3.2.2 CLORAMINA

La cloramina se forma al adicionarse cloro al agua que contiene amoníaco o amoníaco al agua que contiene cloro, es un bactericida efectivo y genera menos subproductos que el cloro. Sus limitaciones principales radican en que tiene un poder desinfectante menor que el cloro y puede generarse tricloruro de nitrógeno que tiene olor y sabor desagradables.

1.3.2.3 OZONO

El ozono es un oxidante poderoso, por lo que se utiliza ampliamente como agente desinfectante. Se forma al hacer pasar el oxígeno del aire a través de un sistema de electrodos de alto voltaje

⁴ Los **trihalometanos** (THMs) son compuestos químicos volátiles que se generan durante el proceso de potabilización del agua por la reacción de la materia orgánica, aún no tratada, con el cloro utilizado para desinfectar. En esta reacción se reemplazan tres de los cuatro átomos de hidrógeno del metano (CH₄) por átomos halógenos. Muchos trihalometanos son considerados peligrosos para la salud y el medio ambiente e incluso carcinógenos. <http://es.wikipedia.org/wiki/Trihalometano>

(Figura 39). Sus ventajas principales son: que requiere dosis y tiempos de contacto menores que el cloro, no genera trihalometanos a menos que haya bromo en el agua. Es generado *in situ* debido a su inestabilidad y se utiliza de inmediato. Mientras que, dentro de sus desventajas se puede mencionar que son costosos y complejos en su operación, además de no mantener un efecto desinfectante residual una vez terminado el proceso.



Figura 39. Ozonificador de agua CASHIDO. Fuente: cashido-auaozonizada.blogspot.com

1.3.2.4 LUZ ULTRAVIOLETA

El uso de la radiación ultravioleta se basa en su poder de penetración de la pared celular de un organismo, cuando esto ocurre, la célula es incapaz de reproducirse, por lo que la luz ultravioleta destruye bacterias y virus. Por otro lado, es de fácil operación y mantenimiento y no genera residuos tóxicos ni subproductos. Entre sus limitaciones están su incapacidad de inactivar protozoarios y su ineficiencia para tratar aguas turbias o con sólidos suspendidos, por lo que puede haber recrecimiento bacteriano si no hay destrucción del material genético. En la **Figura 40** se presentan las partes principales del sistema.

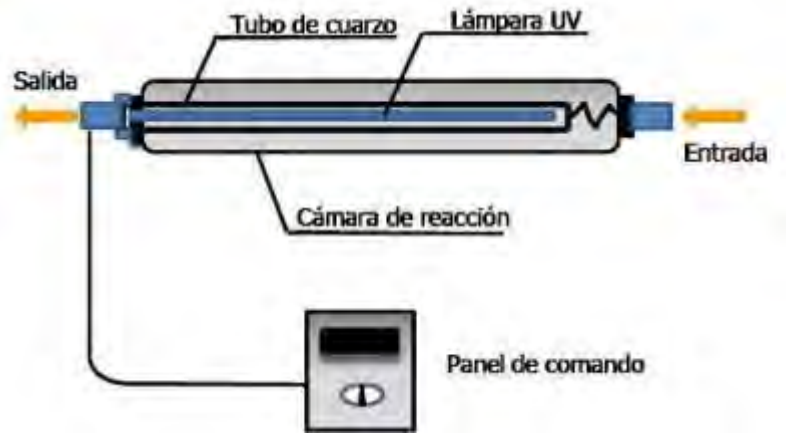


Figura 40. Partes de un sistema de desinfección por luz ultravioleta. Fuente: interpure-water.110mb.com

1.3.3 FILTRACIÓN POR MEMBRANAS

Este tipo de filtros consisten en materiales finos capaces de separar sustancias cuando se aplica una presión a través de ellos. Los métodos de filtración por membranas más utilizados son: la microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa, y se describen a continuación:

1.3.3.1 MICROFILTRACIÓN

La microfiltración, es un método que consiste del uso de una membrana micrométrica, con poros de 0.03 a 10 μm , que trabaja a presiones relativamente bajas, de 100 a 400 kPa (**Figura 41**). Son muy efectivos en la remoción de arena, arcilla, *Giardia*, *Cryptosporidium*, algas y algunas especies bacterianas. Entre los tipos de membranas existentes se pueden mencionar a las membranas en espiral, tubular y de fibra capilar hueca. Las dos últimas, permiten un lavado automático de la membrana. El lavado se realiza haciendo pasar agua o aire a contra flujo a través de la membrana para remover los sólidos acumulados. Su principal desventaja es el desperdicio de agua por retrolavados.



Figura 41. Microfiltros pulidores de 20, 10 y 5 micras respectivamente.

Fuente: CIDECALLI - CP

1.3.3.2 ULTRAFILTRACIÓN

El método de ultrafiltración utiliza membranas con tamaño de poro entre 0.002 y $0.1 \mu\text{m}$ por donde se hace pasar el agua a una presión de 200 a 700 kPa . Dicha membrana impide el paso de bacterias y la mayoría de los virus (**Figura 42**). Son fabricados en forma tubular o de hojas planas, y es recomendable la desinfección con cloro posterior a la filtración. No requiere de compuestos químicos y es de manejo sencillo. Las desventajas que presentan este tipo de filtros son que requieren un costo de inversión elevado, ya que es necesario cambiar constantemente la membrana debido a la descomposición.

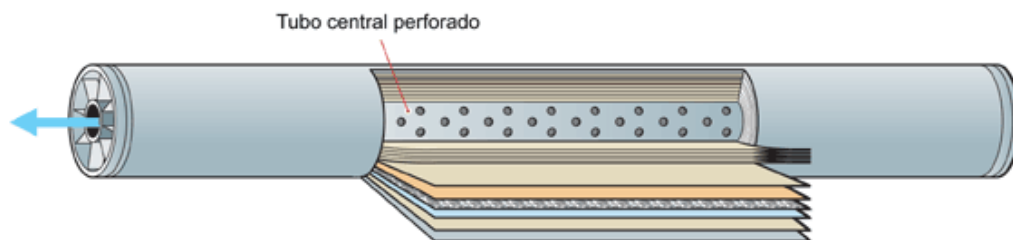


Figura 42. Ultrafiltración por membrana en espiral sumergida. Fuente: www.dracemedioambiente.com

1.3.3.3 NANOFILTRACIÓN

En este método se utilizan membranas de poro de $0.001\ \mu\text{m}$, con presiones de trabajo de mayores, de entre 600 a 1000 kPa. Pueden virtualmente remover todo tipo de bacterias, virus y material húmico (**Figura 43**). Si se añade cloro como proceso adicional de desinfección, no se generan subproductos dado el bajo contenido de materia orgánica después del proceso de filtrado. Sus desventajas son: a) los altos costos de energía debidos a las altas presiones manejadas, b) que el agua se vuelve corrosiva ya que el filtrado le quita la alcalinidad (carbonatos y bicarbonatos), por lo que se vuelve necesaria la adición de algún álcali⁵, y c) el desperdicio de agua por retrolavados.



Figura 43. Membranas para nanofiltración. Fuente: PROSAG

⁵ Los **álcalis** son óxidos, hidróxidos y carbonatos (los carbonatos no son bases fuertes, ya que son la base conjugada de un ácido débil y no de un ácido neutro como el agua) de los metales alcalinos. Actúan como bases fuertes y son muy hidrosolubles. Ejemplos son el amoníaco, hidróxido de amonio, hidróxido y óxido cálcico, hidróxido de potasio, hidróxido y carbonato potásico, hidróxido de sodio, carbonato, hidróxido, peróxido y silicatos sódicos y fosfato trisódico. <http://es.wikipedia.org>

1.3.3.4 ÓSMOSIS INVERSA

Finalmente, este proceso también conocido como hiperfiltración, consiste de una membrana semipermeable que permite el paso del agua, más no el de los sólidos disueltos. Dicha membrana tiene una porosidad menor a 10 \AA (1 nm). Durante el proceso, el agua se hace pasar a alta presión a través de una membrana; se forma una disolución de sales conocida como salmuera, agua de rechazo o retrolavado (**Figura 44**). Con este proceso se puede remover prácticamente cualquier contaminante orgánico o inorgánico del agua. Sus desventajas son los altos costos de inversión y de operación, son indispensables los pretratamientos, las membranas tienden a descomponerse y el manejo del agua de rechazo, el agua de rechazo llega a ser del 25 al 50 % del caudal de alimentación, lo que significa un gran desperdicio.



Figura 44. Equipo para ósmosis inversa. Fuente: CIDECALLI - CP

En la **Tabla 6** se presentan las especificaciones sanitarias para el agua potable, de acuerdo con la NOM-127 y la OMS.

Tabla 6. Especificaciones sanitarias para el agua potable.

ORGANOLÉPTICAS Y FÍSICAS	LÍMITE MÁXIMO NOM-127-SSA1-1994
Olor	Agradable
Sabor	Agradable
Color	20 unidades de color verdadero
Turbiedad	5 UNT
FISICOQUÍMICAS	
pH	6.5 – 8.5
Alcalinidad total	300 ppm
Aluminio	0.20 ppm
Cloro libre residual (tiempo de contacto 30 min)	0.2 – 1.5 ppm
Cloruros	250 ppm
Cobre	2 ppm
Dureza total CaCO₃	500 ppm
Fierro	0.30 ppm

Sólidos disueltos totales	1000 ppm
Sulfatos como SO₄	400 ppm
Nitrógeno amoniacal (como N)	0.50 ppm
MICROBIOLÓGICAS	
Coliformes totales	Ausencia o no detectable
Coliformes fecales	Ausencia o no detectable

En la **Tabla 7** se presentan los tratamientos específicos de acuerdo al problema presente en el agua.

Tabla 7. Problemas y tratamientos del agua potable.

PROBLEMA	TRATAMIENTO
Turbiedad y color	Coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección.
	Coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección.
Olor por materia orgánica	Oxidación (cloro o permanganato). Oxidación especial (Dióxido de cloro). Adsorción (Carbón activado). Secuestración (polifosfato). Intercambio iónico.

Hierro y/o manganeso	Filtración con zeolita. Oxidación por aireación. Oxidación con cloro. Oxidación con permanganato.
Dureza excesiva	Intercambio iónico de ablandamiento. Ablandamiento con cal.
Minerales disueltos en exceso	Intercambio iónico. Ósmosis inversa.
Corrosividad (pH bajo)	Ajuste de pH con químicos. Adición de un inhibidor (fosfato de cinc, silicatos).
Tratamiento preventivo	No adicionar químicos con fluoruro.
Fluorización	No preclorar.
Trihalometanos	Desinfectar con un compuesto que no sea el cloro. Remover precursores de trihalometanos. Remover los trihalometanos después de ser formados.
Contaminación por microorganismos	Desinfección (cloración). Desinfección (otros oxidantes: ozono, dióxido de cloro). Precloración, coagulación, floculación, sedimentación, filtración y poscloración.

1.4 PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA

1.4.1 CONCEPTOS BÁSICOS.

Para la aplicación de cualquier método de tratamiento de purificación de agua, se deben tener en cuenta fundamentalmente las propiedades fisicoquímicas del agua a tratar. Las aguas contaminadas se pueden tratar por métodos como la adsorción en carbón activado, o por tratamientos de oxidación con permanganato, cloración, y ozonización, entre otros, aunque no siempre, se logra alcanzar la calidad adecuada para su utilización después del tratamiento.

Debido a lo anterior, en algunos países industrializados, se está recurriendo de manera creciente al uso de los llamados procesos de oxidación avanzada (POAs). Dichos procesos pueden combinarse con los métodos convencionales y aplicarse en la destoxificación de agua, aire y suelos, incluyendo la desinfección por inactivación de bacterias y virus. Por otro lado, estos métodos son muy poco aplicados y difundidos en países de América latina.

Glaze et al. (1987) definieron los POAs como procesos que involucran la generación y uso de especies transitorias poderosas, principalmente el radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) el cual, posee alta efectividad para la oxidación de materia orgánica (Reacción 1), ya que cuenta con un potencial de oxidación $E^\circ = 2.8\text{V}$, mucho mayor que el de algunos oxidantes tradicionales como el ozono 2.07 V , agua oxigenada 1.78V , cloro 1.36 V , etc. (Maldonado, 2000). Los POAs, también permiten realizar transformaciones en contaminantes tóxicos poco susceptibles a la oxidación como iones metálicos o compuestos halogenados (Litter, 2006).



Una de las características más positivas de los POAs es la oxidación de los compuestos orgánicos hasta dióxido de carbono y la mineralización de los contaminantes inorgánicos de iones como cloruros, nitratos, etc. (Cáceres, 2002). Los POAs poseen una mayor velocidad de oxidación por la participación del radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) principalmente, ya que reacciona 10^6 - 10^{12} veces más rápido que el ozono (O_3) (Litter, 2006).

Los POAs, se clasifican en procesos fotoquímicos y no fotoquímicos. Los procesos fotoquímicos se basan en proporcionar energía a los compuestos químicos en forma de radiación (incluida la luz solar). Dicha energía, es absorbida por las moléculas en forma de fotones, los cuales, contienen la energía necesaria para excitar electrones y formar radicales libres, dando lugar a una serie de reacciones en cadena. Los procesos fotocatalíticos que actualmente son de particular interés son aquellos en los que se aprovecha la luz solar. Se puede definir a la fotocatalisis solar como la aceleración de una fotorreacción química mediante la presencia de un catalizador (Mills et al., 1997). Entre los procesos fotoquímicos se encuentra la fotocatalisis heterogénea, de la cual se hablará más adelante.

Algunas de las principales ventajas de las tecnologías fotoquímicas son:

- que se evita el uso de O_3 lo que reduce costos
- aumenta la velocidad de reacción
- destruye compuestos orgánicos tales como trihalometanos (THM)
- evita cambios de pH drásticos
- y reduce costos operativos debido al bajo consumo de energía.

En éste trabajo, únicamente se tratarán los procesos fotoquímicos, en particular, el de fotocatalisis heterogénea con TiO_2 .

1.4.2 PROCESO DE FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA CON TiO_2

La fotocatalisis heterogénea, es un proceso fotoquímico que consiste en la utilización de algunos sólidos semiconductores tales como el TiO_2 , ZnO , etc., los cuales, al estar bajo irradiación, estimulan una reacción en la interfaz sólido / líquido o sólido / gas, con el fin de degradar los contaminantes orgánicos y provocar que las especies químicas se transformen en agua, dióxido de carbono y ácidos minerales inocuos para el medio ambiente. El catalizador se puede reutilizar después de actuar en el sistema sin sufrir cambios significativos.

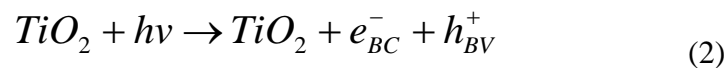
Un semiconductor, es un material en donde los electrones de la banda de valencia (BV) y los de la banda de conducción (BC) se encuentran separados por una brecha prohibida de energía. Esta separación de energía es conocida como band gap, y no es más que una diferencia de energía entre ambas bandas. Cuando la superficie del semiconductor se ilumina con luz de una energía equivalente o mayor a la de su banda prohibida, generalmente luz ultravioleta, se promueven electrones a partir de la banda de valencia a la banda de conducción, provocando así, la conductividad eléctrica en el semiconductor. Cuando la banda de valencia ha perdido un electrón (e^-) ésta queda con una deficiencia electrónica conocida como hueco (h^+) que se comporta en ocasiones como una partícula cargada positivamente. De ésta manera, se generan dos partículas cargadas eléctricamente conocidas como par electrón-hueco (e^- , h^+).

El TiO_2 , es un semiconductor activo en la región ultravioleta cercano y presenta un band gap entre 3.02 y 3.23 eV, para las fases cristalinas rutilo y anatasa respectivamente. Este semiconductor sólo puede aprovechar alrededor de un 5% de la intensidad del espectro de la luz solar, que es la parte que corresponde a la región ultravioleta ($\lambda < 388 \text{ nm}$) (Sung-Suh et al., 2004). La energía de esta radiación, puede calcularse a partir de longitud de onda mediante la ecuación de Planck (Ecuación 1):

$$E_\lambda = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

donde E_λ es la energía de salto de banda del semiconductor, h es la constante de Planck ($6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$) y c la velocidad de la luz.

La actividad fotocatalítica del TiO_2 se ve altamente influenciada por su estructura cristalina, tamaño de partícula y área superficial principalmente. Cuando el tamaño de partícula decrece a escala nanométrica, la actividad catalítica se incrementa debido a que hay una mayor área superficial y la relación de átomos de superficie a volumen aumenta. Así, el proceso fotocatalítico para el TiO_2 comienza cuando el semiconductor se ilumina con fotones cuya energía es mayor o igual a su band gap, formando pares electrón- hueco como se muestra en la reacción (2).



donde hv es la irradiación ultravioleta, h_{BV}^+ son los huecos de la banda de valencia y e_{BC}^- son los electrones en la banda de conducción. En la **Figura 45** se muestra esquemáticamente dicho proceso:



Figura 45. Fotoexcitación de un semiconductor.

Fuente: <http://www.interempresas.net/Agua/Articulos/31828-Conversion-fotoquimica-del-CO2-en-productos-combustibles.html>

Estos pares se recombinan, ya sea en el interior de la partícula del semiconductor, o en la superficie. Simultáneamente, dichos pares (e^- , h^+) migran a la superficie del semiconductor y se involucran con las especies químicas adsorbidas (Maldonado, 2000). Así, los electrones reducen a un aceptor de electrones “A” adsorbido en la superficie del semiconductor y, al mismo tiempo, los huecos aceptan un electrón de una especie “D” dadora de electrones, de manera que ésta especie se oxida. Dando lugar a las reacciones (3) y (4) respectivamente:



Una vez que éstas especies se encuentran en la superficie del fotocatalizador, se llevan a cabo los procesos *redox* mencionados que conducen a la oxidación de compuestos orgánicos para el tratamiento de aguas y a la reducción de iones metálicos por parte de los electrones, si es que las aguas contienen metales nobles o pesados. En la **Figura 46** se muestra un ejemplo.

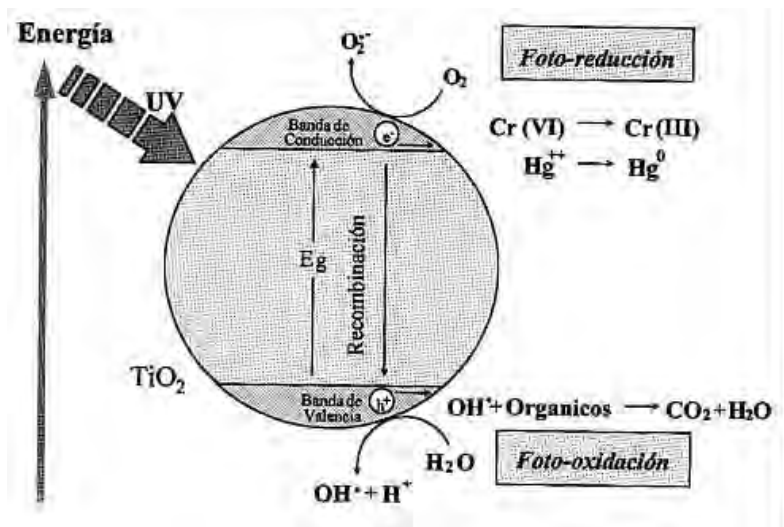
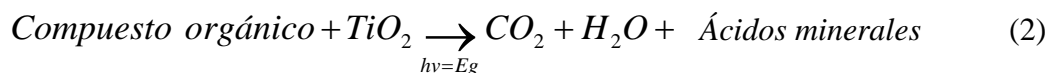


Figura 46. Representación del proceso fotocatalítico en una partícula de TiO_2

Cabe recordar que en los sistemas acuosos los constituyentes más importantes, además de los contaminantes a remover, son el agua y el oxígeno molecular. En fase acuosa y en presencia de oxígeno disuelto, los huecos fotogenerados de la BV reaccionan con el agua adsorbida sobre la superficie del TiO_2 , para dar lugar a radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) enlazados a la superficie, los cuales, son altamente reactivos frente a la mayoría de las moléculas orgánicas y muchas especies inorgánicas, y éstos a su vez reaccionan con sustratos preabsorbidos dándose así el primer paso a la oxidación de sustancias orgánicas.

Un electrón puede reaccionar con especiesceptoras de electrones como el oxígeno presente en el ambiente evitando la recombinación y propiciando así la posibilidad de reacción de los huecos con especies capaces de ceder electrones. Los huecos también pueden reaccionar directamente con moléculas orgánicas iniciando así su descomposición que puede terminar, en el menor de los casos, en la oxidación total de éstas moléculas, en donde los productos finales son CO_2 , H_2O y en su caso ácidos minerales diluidos (Ecuación 2).



Se ha demostrado que los radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) son los principales causantes de las reacciones de oxidación de contaminantes orgánicos, mediante la ruptura progresiva de sus enlaces. De manera simultánea, es posible reducir metales, por ejemplo de Cr^{VI} a Cr^{III} , donde el Cr^{III} , es mucho menos dañino al ser humano que el Cr^{VI} .

Una gran cantidad de estudios demuestran que es posible la inactivación de microorganismos en aguas contaminadas (Blanco et al., 2006). Dichos microorganismos, al estar en contacto con la superficie de TiO_2 , pueden verse como especiesceptoras de electrones o interactuar con los huecos, es decir, es posible transferir electrones o huecos directamente al microorganismo o alguno de sus componentes (Fernández, 2006). Si las partículas de TiO_2 son lo suficientemente pequeñas, éstas penetran la célula y el proceso fotocatalítico se lleva a cabo en su interior (Figura 47).

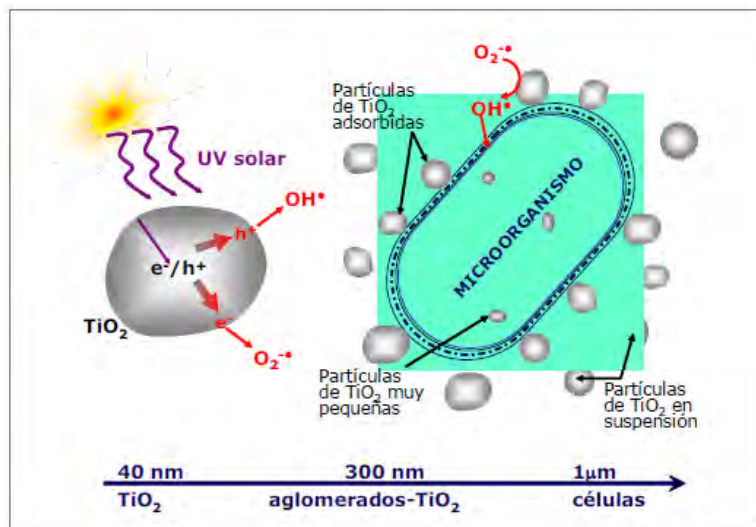


Figura 47. Proceso de fotocatalisis en microorganismos.

El primer trabajo de desinfección por fotocatalisis, fue realizado por Matsunaga et al. en 1985. Ellos demostraron que las partículas de TiO_2 irradiadas con luz UV destruían bacterias tales como el *Lactobacillus acidophilus* y la *Escherichia coli*, éste último ha sido el microorganismo más estudiado por ser una bacteria representativa de contaminación fecal (Chapelon et al., 2004; Mills et al., 1997; Mc. Guigan et al., 1996; Berney et al., 2006). En trabajos más recientes, se han

analizado los distintos parámetros experimentales que afectan la desinfección, tales como: la intensidad de la radiación, la comparación con la desinfección de aguas reales y el uso de catalizadores de TiO₂ soportados (Rincón et al., 2004). Actualmente, los estudios apuntan hacia la desinfección de bacterias, protozoos y algas más resistentes con TiO₂, siendo el catalizador más utilizado el P25 de Degussa, Alemania, que es una mezcla de fases de 25 % de TiO₂ fase rutilo y 75 % de fase anatasa.

De esta manera, la fotocatalisis, es una tecnología que podría aportar una solución innovadora al problema de desinfección del agua, al aplicarlo después de un tratamiento físico como la filtración. El proceso involucra el uso de nuevas tecnologías, más limpias, mediante diversos métodos de oxidación que pueden utilizar un catalizador en estado sólido. Es por eso que, la fotocatalisis heterogénea es un buen ejemplo de la aplicación de la catálisis como tratamiento para la destrucción de contaminantes y microorganismos.

Finalmente, diversos estudios realizados en diferentes países, han demostrado que es posible obtener agua apta para consumo humano, mediante la aplicación de ésta tecnología (Reed et al., 2006; Gill et al., 2009; Meichtryl, 2005). En el presente trabajo se aplica la fotocatalisis con TiO₂ para el tratamiento del agua de lluvia, con la finalidad de obtener agua apta para el consumo humano, demostrando que es una tecnología adecuada y con un gran potencial para este fin.

1.5 TECNOLOGÍAS SOLARES PARA TRATAMIENTO DE AGUA

1.5.1 COLECTORES SOLARES PARA PROCESOS FOTOQUÍMICOS

Los colectores solares, se han clasificado de acuerdo al grado de concentración solar, lo cual, está directamente relacionado con la temperatura que puede alcanzar el sistema. De acuerdo con este criterio, se clasifican en tres tipos (Maldonado, 2000; PSA-CIEMAT, 2001; Cáceres, 2002):

1. Sin concentración o baja temperatura, hasta 150 °C.
2. Media concentración o media temperatura, desde 150 °C hasta 400 °C.
3. Alta concentración o alta temperatura, superior a 400 °C.

Los colectores sin concentración, se caracterizan por ser estáticos y no contar con un sistema de seguimiento solar y consisten en una placa plana que se orienta hacia el sol con una inclinación determinada, la que normalmente depende de la latitud del sitio geográfico en donde se ubique. Entre sus ventajas principales se encuentran su simplicidad y bajo costo. Un ejemplo son los calentadores solares domésticos.

Los colectores de media concentración, por otro lado, logran concentrar la radiación entre 5 y 50 veces, entre ellos se encuentran los colectores cilindro-parabólicos (Parabolic Trough Collectors PTC), que concentran la radiación sobre un receptor tubular situado en el foco de la parábola, pueden ser de seguimiento en un eje (acimutal o altura) o en dos ejes (acimutal + altura), tal como se muestra en la **Figura 48**.



Figura 48. Colector solar de media concentración PTC. (Plataforma Solar de Almería)

Finalmente, los colectores de alta concentración tienen un foco puntual en lugar de uno lineal como el presentado en la **Figura 48**, y consisten en un paraboloide con seguimiento solar, concentrando la radiación entre 100 y 1000 veces (**Figura 49**). Ejemplos de estos son los discos parabólicos y los hornos solares.



Figura 49. Colector solar de alta concentración. (PSA, España).

Puesto que la temperatura no desempeña un papel relevante en los procesos fotoquímicos solares, la tecnología desarrollada para fines de fotocátalisis, se basa en colectores solares sin concentración y de media concentración. Dichos sistemas pueden aprovechar tanto la radiación directa como la difusa, mientras que, los sistemas con concentración únicamente aprovechan la radiación directa. La mayoría de los procesos fotocatalíticos con TiO_2 como catalizador, utilizan sólo la fracción del UV-cercano (300 – 400 nm) y, al aprovechar también la radiación difusa, su eficiencia puede llegar a ser muy alta (Maldonado, 2000). Las longitudes de onda mayores a 600 nm generalmente no se utilizan en procesos fotoquímicos (PSA-CIEMAT).

Las primeras plantas con reactores solares para descontaminar agua, fueron desarrolladas en los Laboratorios Nacionales de Sandía, Estados Unidos en 1989, utilizando colectores cilíndrico-parabólicos PTCs (por sus siglas en inglés) de un eje y reemplazando el tubo receptor por un tubo de Pyrex, a lo largo del cual fluía el agua contaminada (Anderson et al., 1991). En la Plataforma Solar de Almería, en España, se desarrollaron en 1990, reactores similares pero con seguimiento en dos ejes como los mostrados en la **Figura 50** (PSA - CIEMAT, 2004).



Figura 50. PTC con seguimiento en un eje (izquierda) y PTC con seguimiento en dos ejes (derecha), para aplicaciones en fotocátalisis. (PSA, España).

Los componentes básicos de un PTC, son la superficie reflectante concentradora, el tubo absorbedor, el sistema de seguimiento solar y la estructura de soporte. Su eficiencia óptica está entre el 50 y 75 %. Dichos colectores aprovechan eficazmente la radiación solar directa y la energía térmica procedente de la radiación (Blanco, 2006), pero dentro de sus principales desventajas, podemos mencionar que no aprovechan la radiación difusa, su alto costo, bajo rendimiento óptico y menor eficiencia cuántica, por lo que es preciso el uso de colectores solares sin concentración para fines de descontaminación fotocatalítica solar.

1.5.2 COLECTORES SOLARES SIN CONCENTRACIÓN

Los Colectores Solares sin Concentración, *llamados también colectores de un Sol*, tienen la ventaja de ser más baratos en comparación con los PTCs, ya que sus componentes son más simples, sus estructuras de soporte son más fáciles y baratas de instalar. Además, es menor la superficie requerida para su instalación, lo que se traduce en un mantenimiento más fácil y de bajo costo (Blanco, 2002). Para aplicaciones en fotocátalisis, los colectores sin concentración se dividen en dos grupos: los reactores planos y los colectores parabólicos compuestos.

1.5.2.1 LOS REACTORES PLANOS

Los reactores planos, consisten en una placa inclinada sobre la cual cae lentamente el agua y el catalizador está fijo sobre dicha superficie, o tubulares, que consisten en una serie de tubos conectados en paralelo para hacer circular al flujo más rápido que en los planos. En la **Figura 51** se muestran los dos tipos de colectores mencionados.



Figura 51. Izquierda: captador solar estático de placa inclinada (PSA). Derecha: prototipo de captador tubular (National Renewable Energy Laboratory, USA)

1.5.2.2 COLECTORES PARABÓLICOS COMPUESTOS (CPCs)

Los colectores parabólicos compuestos, son una combinación entre concentradores parabólicos y sistemas planos estáticos, constituyendo una de las mejores opciones en aplicaciones de fotocátalisis solar. Los primeros fueron desarrollados en los años 70 para lograr concentración solar mediante dispositivos estáticos, ya que reflejan toda la radiación que llega dentro del denominado “ángulo de aceptación”, esto se logra utilizando dos secciones parabólicas encontradas, de este modo, el CPC puede aceptar la radiación incidente prácticamente desde cualquier ángulo. El ángulo de aceptación, se define como el ángulo a través del cual, una fuente de luz puede ser movida y seguir cubriendo la superficie del tubo absorbedor. Los CPCs, son

colectores estáticos, con una superficie reflejante enfocada hacia un tubo absorbedor cilíndrico, y han demostrado contar con una de las mejores ópticas para sistemas de baja concentración, ya que el diseño de la superficie reflejante, permite que casi toda la radiación, tanto directa como difusa, pueda ser colectada y estar disponible para llevar a cabo los procesos fotocatalíticos, pudiendo ser diseñados para un factor de concentración $FC = 1$. *Un $FC=1$ es un punto del tubo que no recibe mucho más de 1 Sol de radiación UV.*

La manera en que se colecta la luz se muestra en la **Figura 52**, donde la luz que no incide directamente sobre el tubo, es reflejada y distribuida en su parte trasera, logrando de este modo, que la mayor parte del área del tubo sea iluminada.

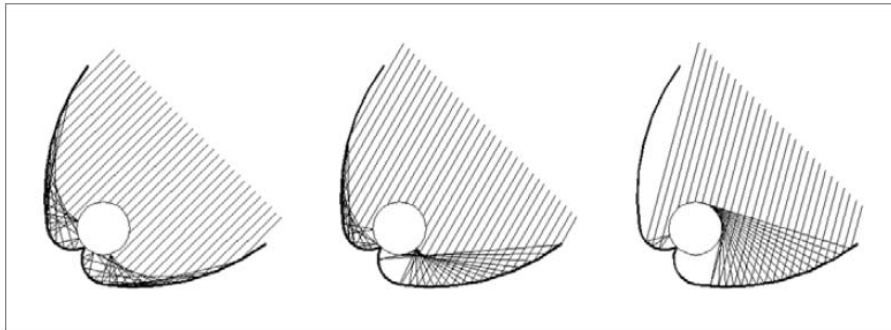


Figura 52. Reflexión en un CPC. (Blanco, 2006)

Debido a la relación física existente entre la superficie del tubo y el colector (superficie reflejante), ningún punto del tubo recibe mucho más de 1 Sol de radiación UV ($FC = 1$). Así, la máxima eficiencia anual obtenida, se consigue con un ángulo de inclinación del colector sobre la horizontal, aproximado a la latitud del lugar en donde es ubicado (Blanco, 2002).

El diseño del colector consiste, como se muestra en la **Figura 53**, en dos partes, la porción más baja del reflector, que corresponde a las secciones AB y AC, es circular, mientras que las porciones más altas, las secciones BD y CE, son parabólicas (Soteris, 2004).

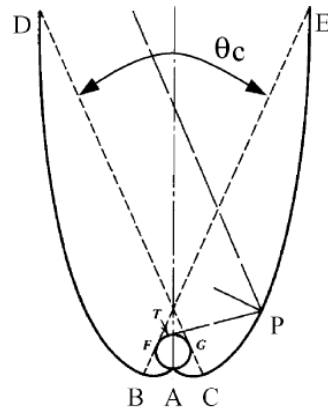


Figura 53. Diagrama esquemático de un CPC (Soteris, 2004)

Ya que la parte más alta contribuye muy poco en el aprovechamiento de la radiación, usualmente se trunca el desarrollo, haciendo un colector más corto, simple, y, por lo tanto, más barato (**Figura 54**).

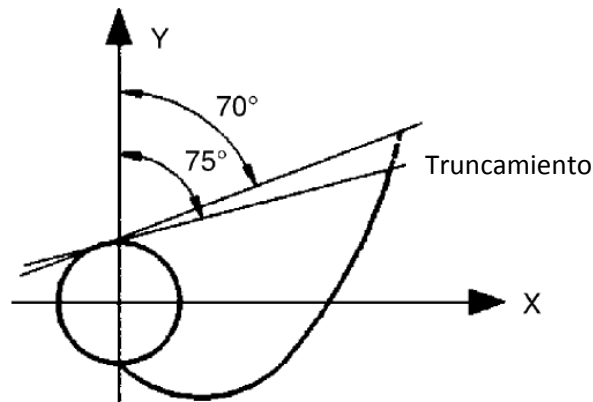


Figura 54. Truncamiento de la parte más alta del CPC (Soteris, 2004).

A partir de la **Figura 55** se obtienen las ecuaciones correspondientes para el diseño del CPC, en donde primeramente, se determina un punto genérico S, que está en función de dos parámetros que son: el ángulo θ (igual al ángulo de aceptación) comprendido entre los segmentos OA y OR, y la distancia ρ , que está dada por el segmento RS (tangente al tubo en el punto R).

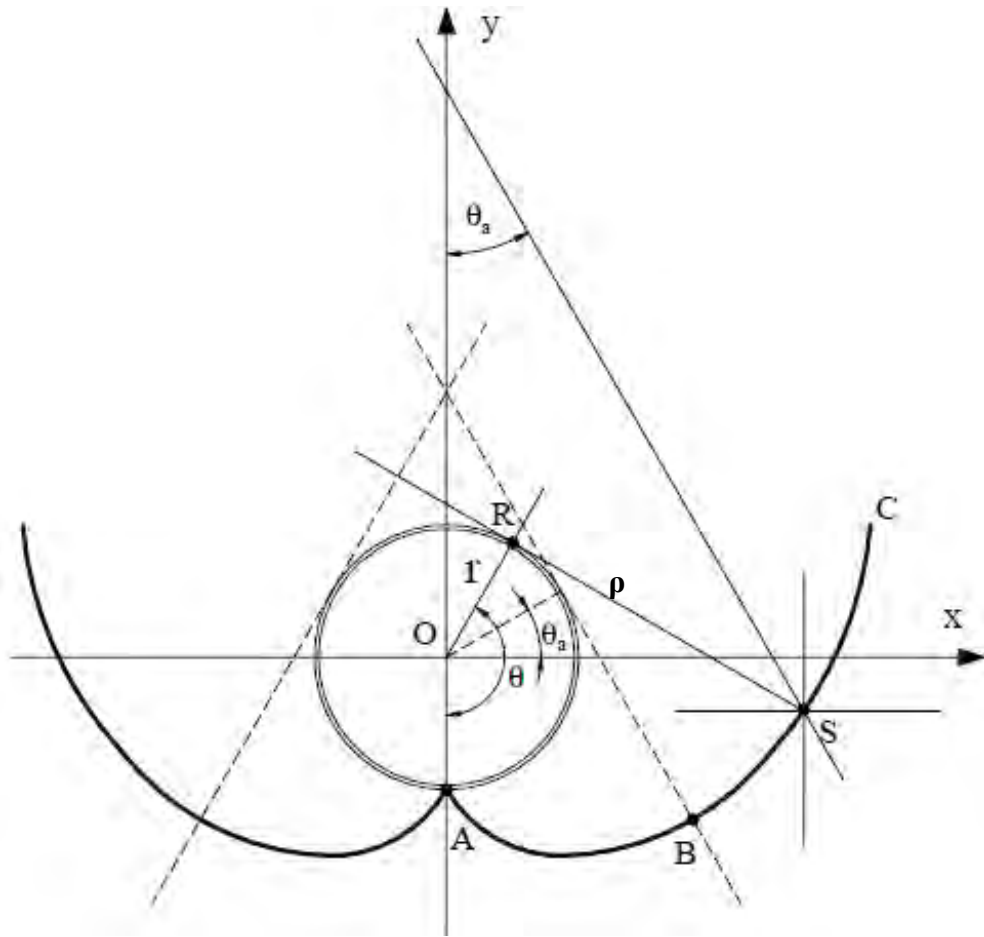


Figura 55. Obtención de los sectores circular y parabólico (PSA - CIEMAT)

La solución está dada por las ecuaciones (3) y (4), una para el sector circular de “A” a “B”, y la otra para el sector parabólico de “B” a “C” respectivamente (Soteris 2004):

$$\rho = r\theta \quad (3)$$

para $|\theta| \leq \theta_\alpha + \frac{\pi}{2}$ *Parte AB de la curva*

$$\rho = r \frac{\theta + \theta_\alpha + \frac{\pi}{2} - \cos(\theta - \theta_\alpha)}{1 + \sin(\theta - \theta_\alpha)} \quad (4)$$

$$\text{para } \theta_{\alpha} + \frac{\pi}{2} \leq |\theta| \leq \frac{3\pi}{2} - \theta_{\alpha} \quad \text{Parte BC de la curva}$$

donde el factor de concentración está dado por la ecuación (5):

$$FC = \frac{1}{\sin \theta_{\alpha}} \quad (5)$$

Los ángulos óptimos de aceptación medios (θ_{α}) para aplicaciones fotoquímicas, están entre los 60 y 90 grados, lo que nos permite reducir errores de la superficie reflejante o de alineamiento del tubo receptor (Blanco, 2006).

Los colectores CPC para aplicaciones fotoquímicas se fabrican generalmente de lámina de aluminio pulida, y la estructura se constituye básicamente de un marco que sirve como soporte para interconectar los tubos, que normalmente son de vidrio (**Figura 56**).



Figura 56. Captador CPC. (SOLARSAFEWATER, 2004).

Más adelante se explica detalladamente el sistema propuesto en este trabajo y la selección de los materiales utilizados.

2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS DE TiO₂

Desde los años 60, el dióxido de titanio, TiO₂ ha sido objeto de estudio debido a sus múltiples propiedades físico-químicas, lo que conduce a un amplio campo de aplicaciones como: control de la contaminación ambiental, celdas solares, sensores químicos y fotocátalisis, entre otras aplicaciones (Fujishima et al., 2004; Liming et al., 2008; Jiménez et al., 2007; Cao – Thang et al., 2009; Lee et al., 2010). El TiO₂ tiene tres fases alotrópicas que son: anatasa, rutilo y broquita. Las aplicaciones mencionadas anteriormente, utilizan alguna fase cristalina del TiO₂, siendo las fases más investigadas la anatasa y el rutilo.

El TiO₂ se compone de un átomo de titanio rodeado por seis átomos de oxígeno en una configuración octaédrica (Di Paola et al., 2007; Diebold, 2003). En cuanto a las estructuras cristalinas, la anatasa tiene cuatro bordes compartidos y el rutilo solo dos, mientras que en la broquita, hay tres bordes compartidos, como se muestra en la **Figura 57**.

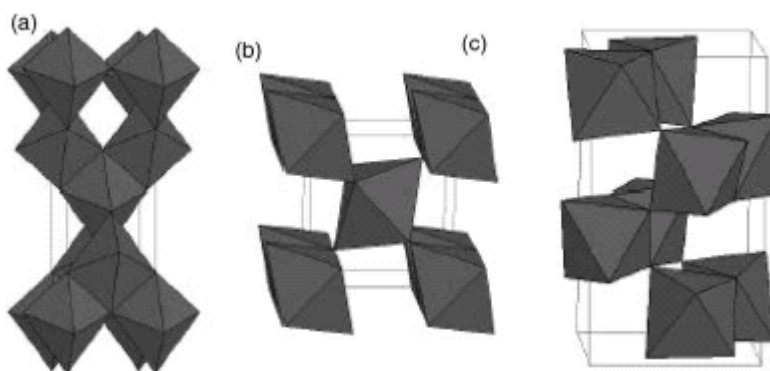


Figura 57. Estructura cristalina de a) anatasa, b) rutilo, c) broquita. (Liming et al., 2008).

Termodinámicamente, la fase rutilo es más estable que la anatasa, sin embargo, la fase anatasa es más utilizada en aplicaciones de fotocatalisis y conversión de energía solar (Liming et al., 2008). En este trabajo, se hace especial énfasis en la obtención de anatasa, ya que se utiliza como fase activa en esta aplicación fotocatalítica.

Inicialmente, las partículas de TiO_2 se obtienen en forma de microesferas amorfas, estas microesferas posteriormente se transforman a anatasa a aproximadamente $500\text{ }^\circ\text{C}$, mientras que la transición anatasa-rutilo ocurre a partir de $650\text{ }^\circ\text{C}$ (Yang et al., 2006). Aunque se ha reportado que dicha transformación también puede ocurrir de $600\text{ }^\circ\text{C}$ y hasta $1000\text{ }^\circ\text{C}$ dependiendo de diversos factores (Mendoza et al., 2007).

Entre las propiedades más relevantes del dióxido de titanio están: su estabilidad química, su transparencia a la luz visible, su bajo coeficiente de absorción y su alto índice de refracción (Kwon et al., 2004). Además, posee la capacidad de degradar diferentes compuestos orgánicos presentes en el agua cuando, se activa por irradiación con luz ultravioleta (UV) (Alfano et al., 2000), y es considerado como el pigmento inorgánico más importante en términos de la producción mundial, es el color blanco por naturaleza. El TiO_2 es un semiconductor, por lo que la energía necesaria para excitar un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción es de 3.2 eV , cuando se encuentra como fase anatasa y sólo 3.1 eV cuando es fase rutilo, por lo que, esta energía puede ser proporcionada por fotones de longitud de onda menores que 390 nm , que corresponden a los fotones de la luz ultravioleta.

El dióxido de titanio se puede preparar como polvo, cristales o películas y el tamaño de la partícula puede ir desde micrómetros a nanómetros. Dependiendo del método de preparación empleado, éstos pueden ser: procesos en disolución o métodos en fase vapor. Los procesos en disolución tienen la ventaja del control sobre la estequiometría, produciendo materiales homogéneos con formas complejas, mientras que sus desventajas son los precursores costosos, los procedimientos largos y la presencia de impurezas como carbono (Carp et al., 2004).

Generalmente se emplean alcóxidos de titanio para preparar soles precursores de películas de TiO_2 depositadas sobre distintos sustratos. Los procesos en disolución más empleados son:

- a) Métodos de precipitación

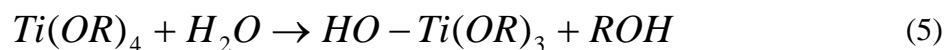
- b) Métodos solvotérmicos
- c) Métodos de micro emulsión
- d) Método sol-gel
- e) Síntesis electroquímica

En el presente trabajo únicamente se tratarán los procesos en disolución, en particular el método sol-gel, ya que fue la ruta que se utilizó para la aplicación de películas sobre diferentes sustratos.

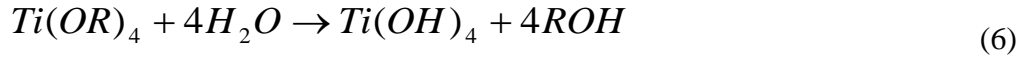
2.1.1 EL MÉTODO SOL-GEL

En éste trabajo se empleó el método sol-gel, aplicando agitación mecánica y/o ultrasonido, como medios de mezclado para favorecer la reacción de hidrólisis y condensación durante la síntesis del TiO₂. El procedimiento de síntesis se describe con más detalle a continuación.

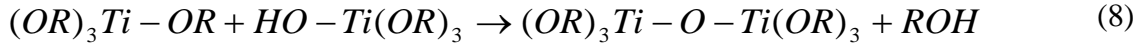
El sol-gel, es una ruta química que inicia con la síntesis de una suspensión coloidal de partículas sólidas o cúmulos en un líquido (sol). Las reacciones de hidrólisis y condensación pueden dar lugar a la formación en una red inorgánica. Cuando las partículas se atraen entre sí, existen dos posibilidades, la primera es que los aglomerados formados alcancen tamaños micrométricos que las hacen separarse de la fase líquida por precipitación; mientras que en la segunda, las partículas se unen y forman una red tridimensional llamada gel. En algunos casos, la reacción de hidrólisis no se completa y quedan grupos remanentes de los precursores en el producto atrapados entre la red tridimensional (Chiu et al., 2007). Finalmente, la reacción de condensación que sucede a la hidrólisis, resulta en la obtención del óxido metálico correspondiente, el TiO₂. En el método sol-gel, empleado para la síntesis de TiO₂, se utilizan alcóxidos de titanio como precursores del óxido de titanio, debido a que reaccionan fácilmente con el agua. Esta reacción, se conoce como hidrólisis, porque un ion hidroxilo se une a un átomo metálico. En el caso de la síntesis del óxido de titanio, objeto del presente estudio, tenemos la siguiente secuencia de reacciones (Brinker et al., 1990):



donde R representa un radical orgánico (si R es un alquilo, OR es un grupo alcóxido) y ROH es un alcohol. Dependiendo de la cantidad de agua y tipo de catalizador, la hidrólisis puede ser parcial o completa (todos los grupos OR son reemplazados por OH), (reacción 6).



A continuación dos moléculas parcialmente hidrolizadas pueden llevar a cabo la reacción de condensación, la cual, por definición, libera una pequeña molécula como agua (reacción 7) o alcohol (reacción 8) formando entre sí un puente de oxígeno.



Ambas reacciones (hidrólisis y condensación) ocurren casi simultáneamente y generalmente quedan algunos grupos epóxido atrapados en el óxido formado. En general, la reacción global se puede expresar como:



Con el avance de la reacción de policondensación del alcóxido de titanio, se producen partículas coloidales generalmente amorfas que con el paso del tiempo pueden enlazarse dando lugar a partículas más grandes hasta que sedimentan. Las partículas de TiO₂ sintetizadas con alcóxidos u otros precursores de titanio requieren temperaturas mayores a 300 °C para su cristalización,

transformándose en broquita, anatasa o rutilo (Kwon et al., 2004; Vorotilov et al., 1992; Mosaddeq et al., 2000). En la **Figura 57**, se presenta un esquema general de la preparación del TiO_2 que se ensayó en este trabajo.

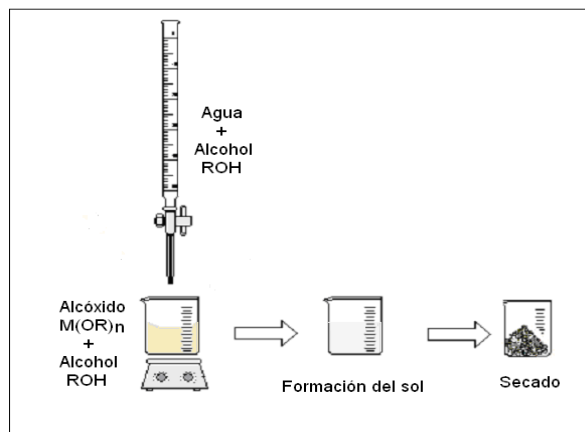


Figura 57. Método sol-gel

El proceso sol-gel no es nuevo y todavía se encuentran en discusión los mecanismos involucrados que influyen en la estructura y las propiedades de los materiales. Una de las ventajas de éste método se encuentra en la simplicidad del proceso, mientras que la pureza depende de los precursores. Otra de las ventajas importantes reside en la posibilidad de controlar la microestructura y la homogeneidad. Las características y naturaleza del producto son moduladas mediante los precursores utilizados durante la etapa de síntesis, la presencia de aditivos ácidos o básicos, el disolvente y varias otras condiciones del procesado como la temperatura de secado y calcinado.

Por otro lado, dentro de las desventajas se puede mencionar lo difícil del control de propiedades finas como diámetro de poro homogéneo mediante esta sola ruta (Ortíz, 2006). Sin embargo, se han realizado importantes avances en las aplicaciones de los fotocatalizadores de TiO_2 sintetizados por éste método, un ejemplo importante es precisamente la síntesis de nanopartículas de TiO_2 utilizadas en la degradación de colorantes orgánicos (Yang et al., 2006; Kwon et al., 2004; Vázquez, 2007) como método de tratamiento para aguas residuales. Adicionalmente, se ha trabajado recientemente en la combinación del método sol-gel con otras técnicas, tales como el

ultrasonido, que es una variable importante que influye en las propiedades de tamaño de partícula y textura del TiO_2 sintetizado.

2.1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Para la síntesis del óxido de titanio por el método sol-gel, inicialmente, se adicionaron 2 ml de hidróxido de amonio a 20 ml de alcohol etílico absoluto anhidro. Dicha disolución tiene dos objetivos principales: uno es que el alcohol actúe como una barrera física y permita que la hidrólisis no sea tan violenta entre el alcóxido y el hidróxido de amonio, ya que el precursor utilizado (butóxido de titanio es extremadamente higroscópico). Los alcóxidos de titanio en general son muy higroscópicos, es decir, que reaccionan fácilmente con el agua, en este caso se utilizó butóxido de titanio de la marca Sigma Aldrich. La otra razón es que, el hidróxido de amonio, genere un medio básico, ya que a pH básico (entre 10 y 12) se favorece la formación de partículas esféricas. A la disolución anterior, se agregaron 10 gotas de 1 μl de butóxido de titanio hasta completar 10 μl , y se mantuvo en agitación continua durante 24 horas en una cámara de guantes seca para evitar la hidrólisis (**Figura 58**).



Figura 58. Exterior de la cámara de guantes (izquierda), e interior (Derecha). CCADET.

Al final de este tiempo, se obtuvo una disolución de color azulado, lo que indica que se tienen partículas nanométricas de TiO_2 en disolución (**Figura 59**).



Figura 59. Partículas de TiO_2 en disolución.

El tamaño de las partículas resultantes fue medido por la técnica de dispersión de luz conocida como Zeta – Sizer, obteniendo promedios entre los 40 y 200 nm. Por último, con la disolución obtenida, se realizaron los depósitos de partículas en tubos de vidrio, los cuales, se explican a continuación.

2.1.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE TiO_2

La caracterización de las partículas obtenidas y depositadas sobre los tubos de vidrio, se realizó utilizando un equipo Zeta-Sizer para evaluar el tamaño promedio de las partículas de TiO_2 , se tomaron las muestras correspondientes y se observó su forma y tamaño mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM); la verificación de la obtención de una fase cristalina se realizó mediante espectroscopía RAMAN. Finalmente, se comprobó su actividad fotocatalítica por medio de espectrofotometría UV – Vis. En la sección 3 (Análisis de Resultados) se presentan a detalle los puntos mencionados anteriormente.

2.1.4 DEPÓSITO DE PARTÍCULAS DE TiO_2 SOBRE SUSTRATOS DE VIDRIO.

El proceso de depósito de partículas de TiO_2 consiste en la activación de soportes de vidrio (tubo, placas de vidrio, etc.) con una disolución de NaOH , 1M (40 g de NaOH /litro de agua destilada). El soporte se cubre con esta disolución y se deja en proceso de remojo durante 24 horas. Al cabo de este tiempo se retira la disolución de NaOH , se lava cada tubo cuatro veces con agua tridestilada, y se seca a $100\text{ }^\circ\text{C}$ durante 10 minutos. Para realizar el depósito de partículas de TiO_2 , en tubos, se llena cada uno aproximadamente con 1000 ml de una disolución que contiene las partículas de TiO_2 y se escurren lentamente tratando de cubrir toda la superficie del tubo. El soporte se deja secar a temperatura ambiente y se observa que las partículas se pegan de manera uniforme. El proceso de depósito se repite las veces que sean necesarias, dependiendo del espesor de película requerido. Finalmente, el tubo seco se somete a un tratamiento térmico a $100\text{ }^\circ\text{C}$ durante 3 h. En esta etapa del proceso, se observa que el pegado de las partículas ha sido eficiente. Por lo que, el espesor del depósito es función del tamaño de la partícula. Así, se obtienen depósitos muy claros y con un color transparente azulado con partículas de tamaño nanométrico (**Figura 60 a**). Contrariamente, si las partículas son de mayor tamaño, los depósitos obtenidos, presentan una coloración blanca y aparecen como aglomerados de partículas de color blanco (**Figura 60 b** y **Figura 60 c**).

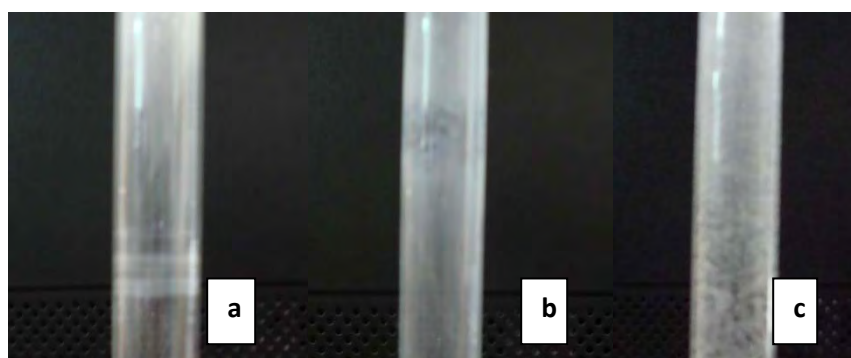


Figura 60. a) Partículas nanométricas, b) y c) partículas micrométricas.

Una vez aplicada la película sobre el tubo de vidrio, se le da un tratamiento térmico a 500 °C durante 6 horas, para que la película de TiO₂ se transforme de amorfo a cristalino, en fase anatasa.

2.1.5 EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD FOTOCATALÍTICA

Para evaluar la actividad fotocatalítica, se preparó una disolución de azul de metileno, que tiene una concentración inicial de 5×10^{-5} M (0.001 g de azul de metileno disueltos en 50 ml de disolución) y condiciones de pH \approx 5. Se obtuvo una curva de calibración a diferentes concentraciones, midiendo la absorbancia de las mismas. Posteriormente, se llenaron tres tubos de vidrio con el azul de metileno a concentración inicial, uno sin partículas de TiO₂, uno con partículas de TiO₂ de 200nm y uno más con partículas de TiO₂ de 60 nm, como se muestran en la **Figura 61**.



Figura 61. Tubos con disolución de azul de metileno para evaluar la actividad fotocatalítica.

Se observa que las longitudes de onda de las bandas máximas de absorción, se encuentran centradas en 612 y 660 nm, (González, J., 2008) máximos etiquetados como P1 y P2 respectivamente, que se muestran en la **Figura 62**.

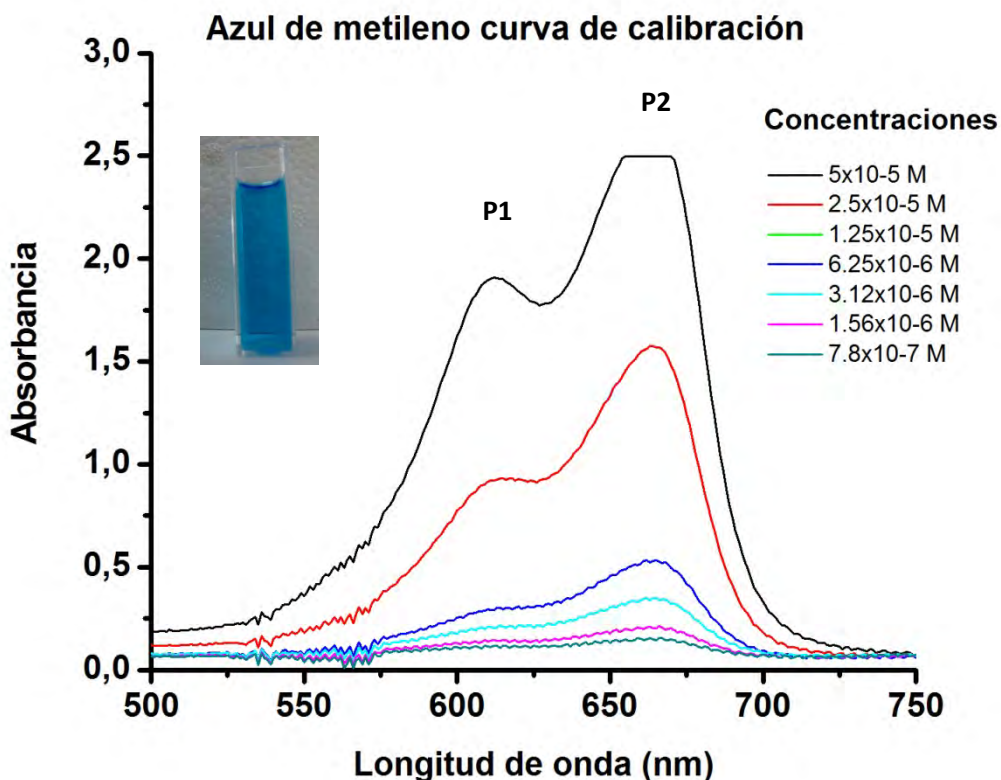


Figura 62. Espectro de absorción de UV-Vis de una disolución de azul de metileno a diferentes concentraciones.

Para medir el cambio de concentración, se utilizó la banda de absorción P1, dado que esta banda siguió adecuadamente la ley de Lambert-Beer, que menciona que “la absorbancia es proporcional a la concentración de las especies absorbentes” y la cual, se expresa mediante la ecuación (6):

$$A = \epsilon bc \tag{6}$$

donde **A** es la absorbancia a 612 nm, ϵ es la constante de absorptividad molar, **b** es el tamaño de la celda y **c** es la concentración de la disolución de azul de metileno. La gráfica teórica esperada para esta ecuación, es una línea recta. En la **Figura 63** se presentan los datos experimentales, de

diluciones sucesivas de la concentración inicial de azul de metileno, donde se observa este comportamiento lineal.

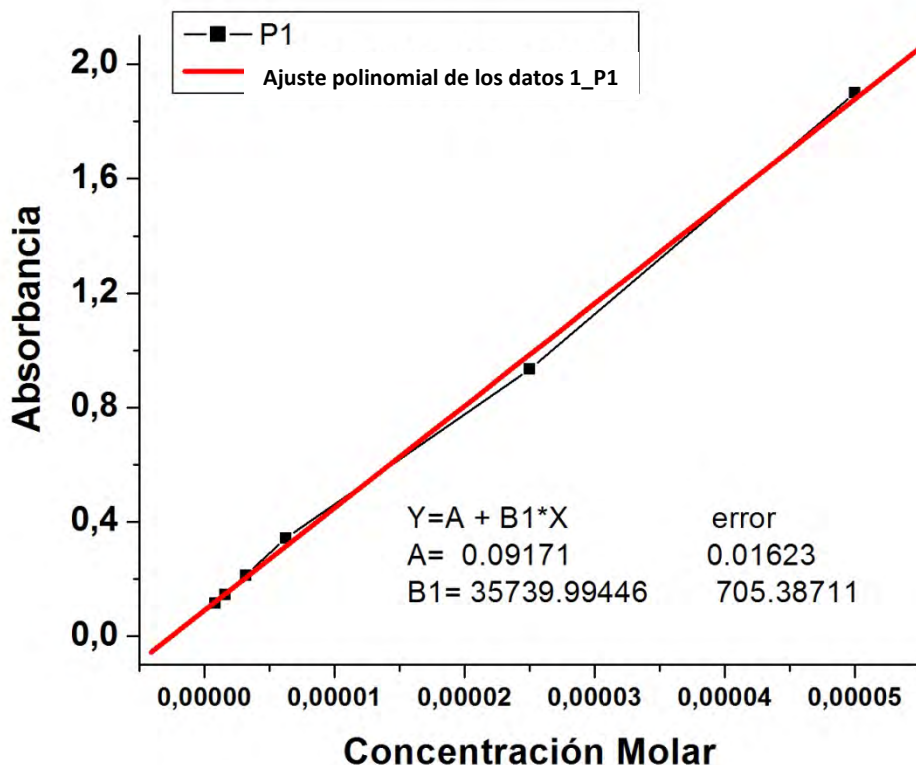


Figura 63. Curva de calibración del azul de metileno para el pico P1.

Los tubos mencionados anteriormente fueron colocados bajo una lámpara de luz UV-A durante 10, 20, 30 y 60 minutos respectivamente, y se tomaron muestras a las que se les midió la absorbancia en un espectrofotómetro UV – Vis Shimadzu UV 1600.

En la **Figura 64** se muestra el espectro de absorción para la disolución del azul metileno después de ser sometido a la irradiación de luz UV-A durante 10, 20, 30 y 60 minutos, en un tubo de vidrio, sin depósito de partículas de TiO_2 , con la finalidad de tener una referencia para comparar los resultados obtenidos en los tubos que contienen depósito de partículas de TiO_2 . Las imágenes de la celda que se

muestran dentro de la gráfica, corresponden al colorante inicial y final (en la parte baja) después de la irradiación UV-A.

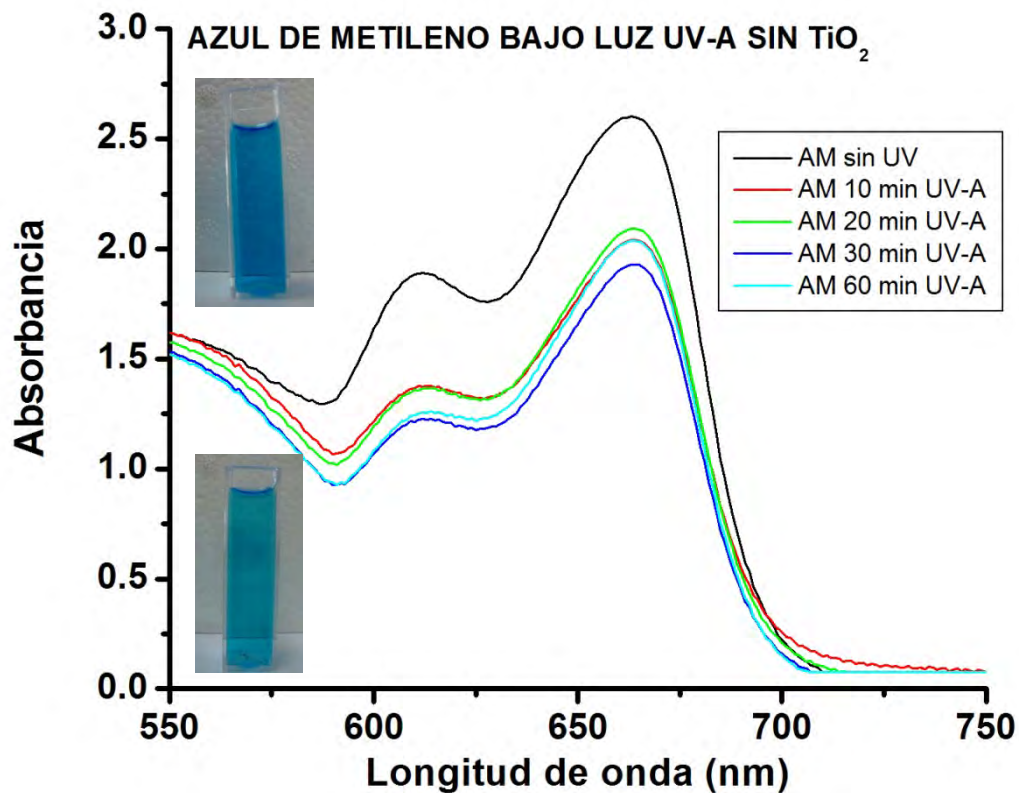


Figura 64. Espectro de la disolución de azul de metileno bajo luz UV en un tubo de vidrio sin TiO_2 depositado.

Como se puede apreciar, los espectros de las muestra bajo luz UV a diferentes tiempos no presentan una disminución considerable de la banda de absorción centrada a 612 nm, lo cual indica que la irradiación UV-A no tiene un efecto considerable en la degradación del colorante. Por otro lado, en la **Figura 65**, se presentan los espectros de absorción para la misma disolución del azul metileno, después de ser sometido a luz UV durante 10, 20, 30 y 60 minutos, en un tubo de la misma composición de vidrio con un depósito de partículas de TiO_2 de 60 nm.

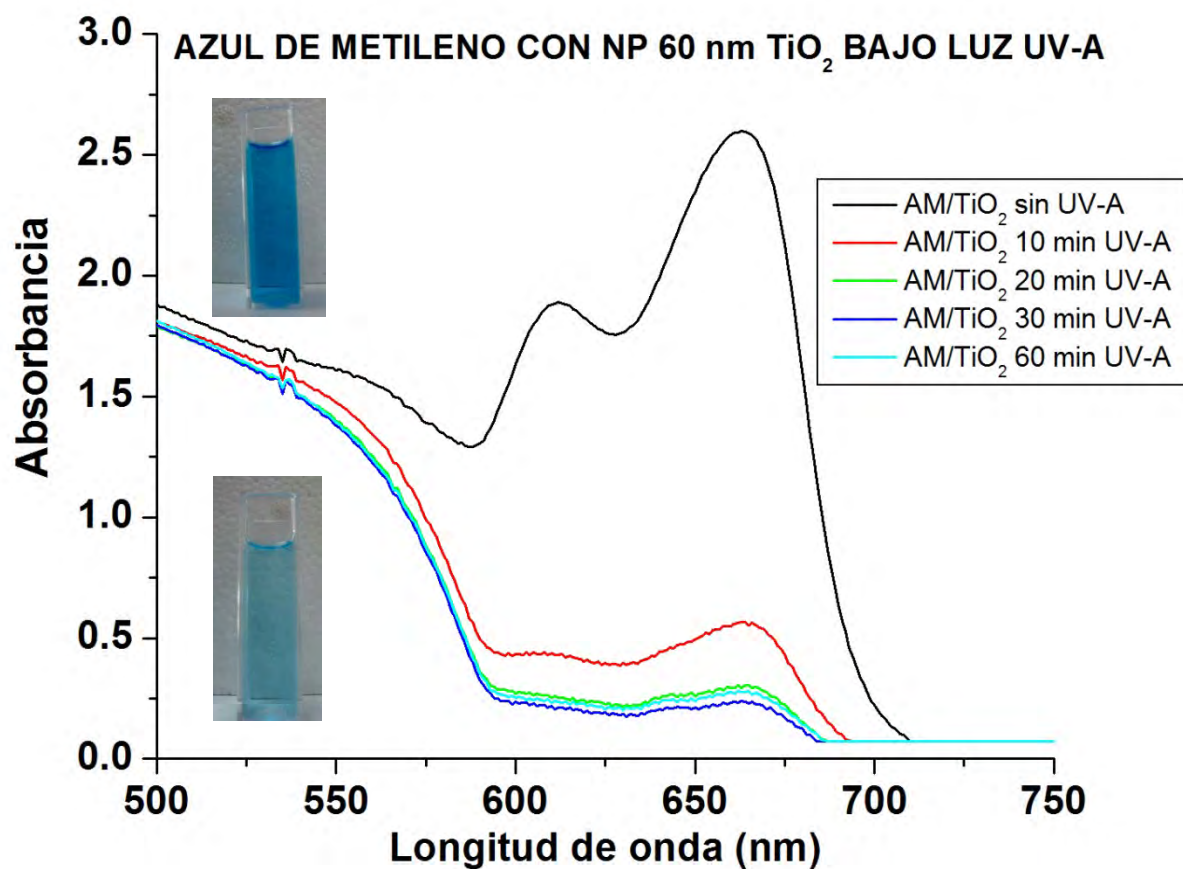


Figura 65. Espectro de la disolución de azul de metileno bajo luz UV en un tubo de vidrio con una película delgada de partículas de TiO₂ de 60 nm depositada en la pared interior del tubo.

Como se puede apreciar, los espectros de las muestra bajo luz UV a diferentes tiempos presentan una disminución considerable de la banda de absorción centrada a 612 nm, lo cual, indica que la irradiación UV-A, tiene un efecto significativo en la degradación del colorante.

De la misma manera, en la **Figura 66**, se aprecia el mismo efecto de degradación del colorante, pero en este caso, se utilizó un depósito de nanopartículas de TiO₂ de 200nm.

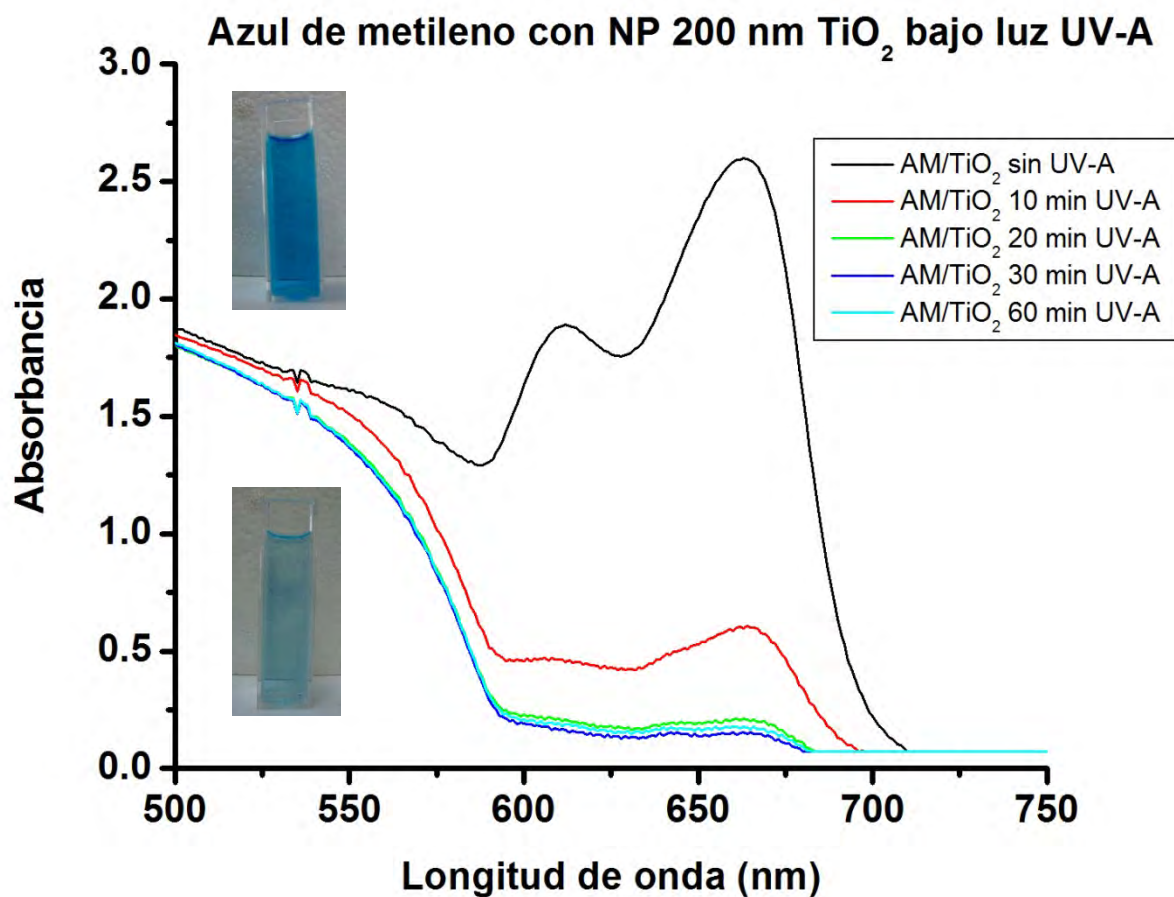


Figura 66. Espectro de la disolución de azul de metileno bajo luz UV en un tubo de vidrio con una película delgada de partículas de TiO₂ de 200 nm depositada en la pared interior del tubo.

Con los datos obtenidos de éstas curvas, se calcula la concentración final de las diferentes muestras, la cual se presenta en la sección de resultados.

2.2 DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

El sistema propuesto se compone de dos partes principales que son: a) el sistema de captación de agua de lluvia, y b) el sistema de purificación. El primero consiste de una superficie de captación, en el techo del edificio principal del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) con una superficie de 224.91 m² (**Figura 67**).



Figura 67. Techo utilizado del CCADET

Para la conducción del agua captada, se utiliza uno de los tubos bajantes, el cual está conectado a un filtro de cascada VF-1 de la empresa 3pTechnik, el cual retira los sólidos y partículas de tamaño mayor a 0.65 mm (**Figura 68** izquierda). El agua prefiltrada es almacenada en un tinaco Rotoplas de 450 litros (**Figura 68** derecha).



Figura 68. Filtro de cascada VF-1 (izquierda). Tinaco Rotoplas (derecha).

En el interior del tanque de almacenamiento se encuentra un dispositivo de admisión calmada, para evitar que los sedimentos se revuelvan con la demás agua (**Figura 69** izquierda), y un tubo de rebose, para cuando el agua sobrepase el límite del tanque (**Figura 69** derecha).



Figura 69. Dispositivo de admisión calmada (izquierda). Tubo de rebose (derecha) (3P technik).

El proceso de purificación, comienza a partir del filtro de succión flotante, el cual está compuesto por una esfera flotante y una cesta que funge como filtro. Con este dispositivo, se extrae el agua con mayor calidad, que se encuentra en la parte media del tanque, y se conecta mediante una manguera al tubo de salida que se encuentra al fondo (**Figura 70**).

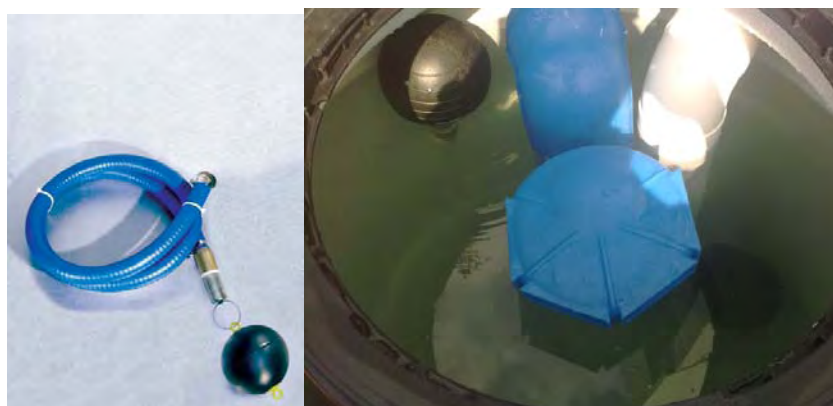


Figura 70. Filtro de succión flotante.

El tubo conectado a la salida del tanque, conduce el agua extraída por el filtro de succión flotante, hacia el filtro de arena, en donde quedan atrapados algunos sólidos disueltos, materia orgánica y bacterias (**Figura 71**).



Figura 71. Conexión del tanque de almacenamiento hacia el filtro de arena.

El filtro de arena se compone de los siguientes materiales, de acuerdo con la SEMARNAT:

- Un tambo de plástico de 100 litros.
- Diez centímetros de grava con tamaños de 16 a 25 mm.
- Diez centímetros de gravilla con tamaños de 9 a 12 mm.
- Cincuenta centímetros de arena sílica con tamaños de 0.3 a 0.8 mm.
- Una placa de plástico con barrenos de 3.17 mm (1/8 de pulgada), siguiendo un patrón de 2 cm entre cada agujero.
- Tubo de PVC de 12.7 mm (1/2 pulgada).
- Una válvula de 12.7 mm (1/2 pulgada).

En el esquema se muestra el interior del filtro y sus componentes (**Figura 72** izquierda), así como la distribución de los barrenos en la placa difusora (**Figura 72** derecha).

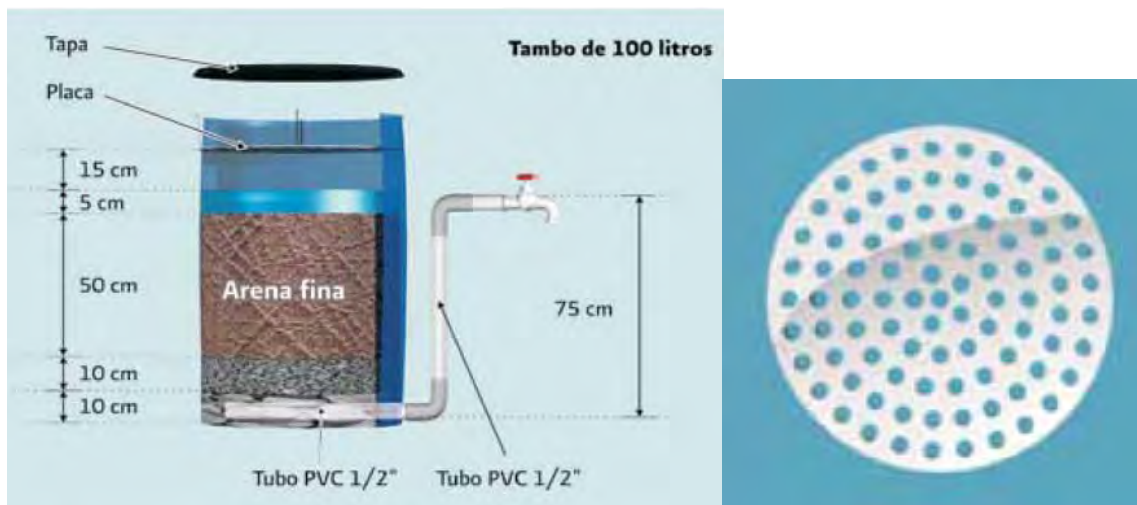


Figura 72. Componentes del filtro (izquierda). Placa difusora (derecha).

Previo a su construcción, fueron lavados perfectamente, tanto el tambo de cien litros, como la grava, gravilla y arena sílica respectivamente. En la siguiente imagen, se muestra la conformación del filtro (**Figura 73**).



Figura 73. Construcción del filtro de arena.

Por último, el agua que sale del filtro de arena, es conducida hacia el fotorreactor, en donde se lleva a cabo el proceso fotocatalítico, con el que se purificará el agua de lluvia captada (**Figura**

74 izquierda y derecha). El fotorreactor se compone principalmente de seis tubos de vidrio borosilicatado de 32 milímetros de diámetro por 1500 milímetros de longitud y 1.4 mm de pared, con una película de TiO_2 en su interior (**Figura 74** izquierda), montados sobre seis superficies reflejantes de lámina de aluminio pulido y anodizado, que realizan la función de un Colector Parabólico Compuesto (CPC) (**Figura 74** derecha).



Figura 74. Tubos de vidrio montados sobre CPCs (izquierda). Superficie de aluminio reflejante (derecha).

Dichos materiales se eligieron, debido a que el vidrio borosilicatado tiene un bajo contenido de hierro y prácticamente no absorbe el UV, además de tener buenas propiedades de transmisividad y resistencia a los cambios de temperatura. Por otro lado, el aluminio anodizado y pulido, se considera la superficie más adecuada para procesos fotocatalíticos, debido a su elevada reflectividad en el intervalo de longitudes de onda entre 300 y 400 nm (Anexo 5) (Blanco et al., 2006). El fotorreactor se encuentra inclinado aproximadamente a 19° sobre la horizontal, ya que es la latitud de Ciudad Universitaria, lugar en el que se ubica el dispositivo (**Figura 75** derecha).



Figura 75. El agua se conduce del filtro al fotorreactor (izquierda y derecha). El fotorreactor (derecha).

Como se muestra en la **Figura 76**, una vez terminado el proceso, se obtienen las muestras de agua, que posteriormente son analizadas para determinar su calidad. Es importante mencionar que para llevar a cabo el proceso, no es necesario utilizar ningún dispositivo electrónico, únicamente se utiliza la gravedad.

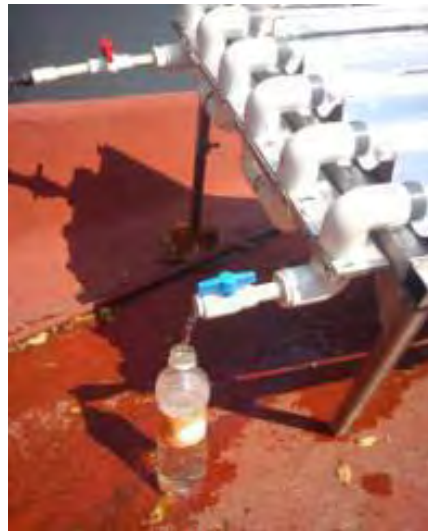


Figura 76. Obtención de la muestra.

En la **Figura 77** se muestra el diagrama básico de funcionamiento del sistema propuesto

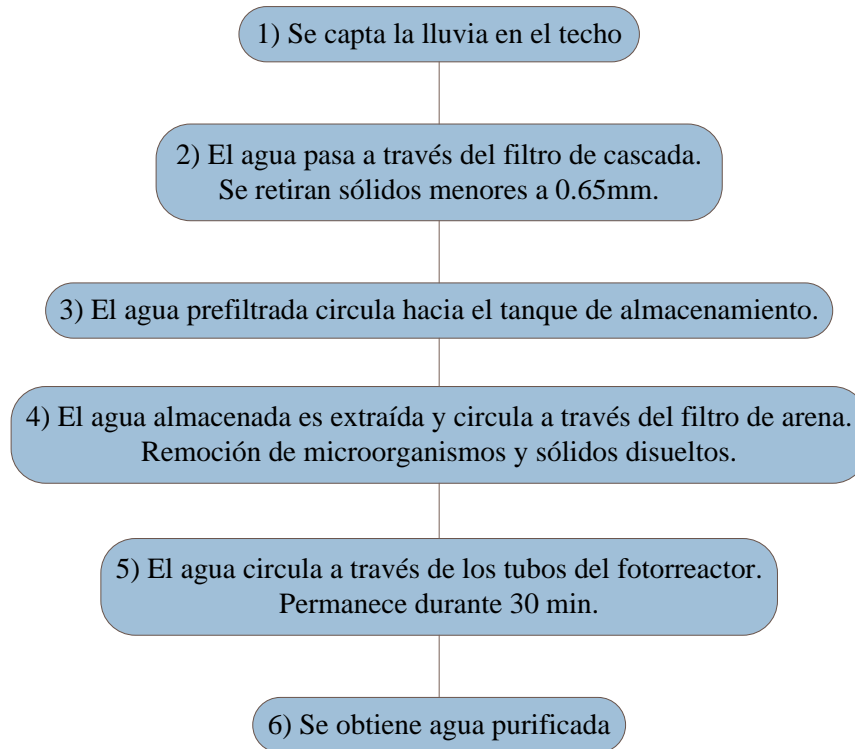


Figura 77. Diagrama de funcionamiento del sistema.

2.2.1. DISEÑO DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA, SCALL

Para el diseño del sistema de captación de agua de lluvia, es importante que se identifiquen los componentes principales, su función, los criterios de diseño, las características de los materiales para su construcción, su operación y mantenimiento, por lo que, en este trabajo se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones y se describen más adelante:

- Localización del sitio para establecer el sistema.
- Determinación de la demanda.

- Cálculo de la precipitación pluvial neta.
- Área de captación del agua de lluvia.
- Diseño del sistema de conducción del agua captada.
- Cálculo del tanque de almacenamiento.
- Diseño del sistema de purificación.

2.2.1.1 LOCALIZACIÓN DEL SITIO PARA ESTABLECER EL SCALL

El sistema se localiza en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (lugar donde se realizó el presente trabajo) de la Universidad Nacional Autónoma de México. La UNAM se ubica en el Pedregal de San Ángel al sur de la Ciudad de México, a 19° latitud norte, y 99° longitud oeste.

Sobre el circuito exterior de dicha institución, se localiza el CCADET. En la **Figura 78** se observan las superficies potenciales de captación con las que cuenta el Centro, y de las cuales, para los fines demostrativos del prototipo diseñado, únicamente se utilizaron 224.91 m², como se mencionó al principio.



Figura 78. Superficies potenciales de captación el CCADET.

2.2.1.2 DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA

Para éste caso particularmente, ya que es un prototipo demostrativo, se propone satisfacer el consumo diario de agua de 5 personas del Grupo de Ingeniería de Proceso. La cantidad de agua para satisfacer dicho consumo diario se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

$$D = \frac{Nb * Do * Nd}{1000} \quad (7)$$

$$D_{\text{anual}} = \sum_{j=1}^{12} D_j \quad (8)$$

donde:

D = demanda de agua (m^3).

Nb = número de beneficiarios del sistema.

Do = dotación (l / persona / día).

Nd = número de días del mes (se utiliza 1, para obtener la demanda diaria).

D_{anual} = demanda anual para la población, j = número del mes ($j = 1, 2, 3, \dots, 12$)

1000 = factor de conversión de litros a m^3 .

Ya que el uso del agua captada será únicamente para consumo humano, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, se recomiendan 2.7 litros por persona por día, de esta manera, sustituyendo en la ecuación 7, se obtiene la demanda mensual:

$$D = \frac{(5)(2.7)(30)}{1000} = 0.405 \text{ m}^3/\text{mes}$$

Como se presenta en la **Tabla 8**, para satisfacer la demanda anual de agua para el consumo de 5 personas, se requieren 4.9275 m³ (4927.5 litros).

Tabla 8. Demanda diaria, mensual y anual de agua para 5 personas.

Usuarios	Demanda diaria (m ³)	Demanda mensual (m ³)	Demanda anual (m ³)
5	0.0135	0.405	4.9275

2.2.1.3 CÁLCULO DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL NETA

La precipitación pluvial neta (PN), es la cantidad de agua de lluvia que el sistema tiene a su disposición, y se determina a partir de los datos disponibles en las diferentes estaciones meteorológicas, una vez descontando pérdidas por factores tales como salpicado de las gotas, velocidad del viento, evaporación, fricción, etc., y se toma como valor planteado el 85% (0.85), de acuerdo con Anaya et al. (2011).

La eficiencia de la captación depende del coeficiente de escurrimiento (Ce) de los materiales del área de captación, el cual varía de 0.0 a 0.9. En la **Tabla 9** se presentan los diferentes coeficientes de escurrimiento, asociados al material utilizado en la superficie de captación.

Tabla 9. Diferentes coeficientes de escurrimiento, C_e

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

Ya que la superficie del techo del edificio es de láminas acanaladas, para este caso se utiliza un coeficiente de escurrimiento de 0.9 correspondiente a hojas de metal. La precipitación pluvial neta se determina a partir de la ecuación (9) como sigue:

$$PN = P * \eta_{\text{captación}} \quad (9)$$

donde:

$$\eta_{\text{captación}} = C_e * 0.85$$

PN = precipitación neta (mm).

P = precipitación (mm).

$\eta_{\text{captación}}$ = eficiencia de captación de agua de lluvia.

C_e = coeficientes de escurrimiento.

Para el cálculo únicamente se consideran las precipitaciones medias mensuales mayores o iguales a 40 mm. A continuación, se presenta el cuadro con los registros de la precipitación media mensual reportada para las estaciones meteorológicas núm. 009024 Hacienda Peña Pobre, Tlalpan, D. F., y núm. 009037 Presa Ansaldo, Contreras, D. F. respectivamente, por ser las más cercanas a la zona de Ciudad Universitaria y, de las cuales, se obtuvo un promedio que se utilizó para calcular la precipitación neta (PN) para cada uno de los meses. En el **Tabla 10** se presenta la precipitación media mensual y la precipitación neta.

Tabla 10. Precipitación media mensual y neta.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Precipitación estación 009024	8	4	11	22.5	60.3	123	177	168.3	128	54.9	9.4	5.1
Precipitación estación 009037	11.3	4.8	10.1	24.6	65.6	153.8	197.1	195.1	168	66.5	11.2	5.9
Promedio	9.65	4.4	10.55	23.55	62.95	138.4	187.05	181.7	148	60.7	10.3	5.5
Precipitación Neta	7.4	3.4	8.1	18	48.12	105.9	143.1	139	113.22	46.4	7.9	4.2

En la **Figura 79** se presenta la gráfica de la precipitación neta, en donde se visualizan los meses en que dicha precipitación fue mayor a 40 mm.

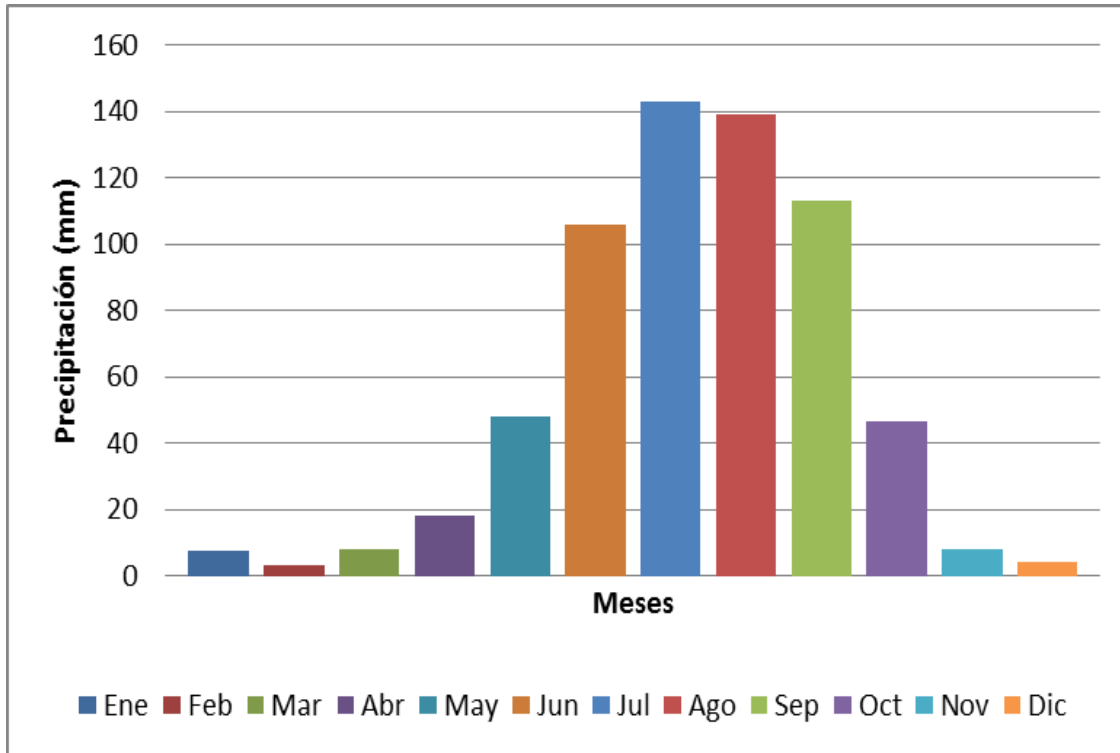


Figura 79. Precipitación Neta.

2.2.1.4 ÁREA DE CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA

El área de captación se define como la superficie sobre la cual cae la lluvia, que en este caso, corresponde a una fracción del techo de uno de los edificios del CCADET como se muestra en la **Figura 80**.



Figura 80. Área de captación de agua de lluvia en el CCADET.

La ecuación para calcular el área de captación, en función de la demanda, es la siguiente:

$$A_{ec} = \frac{D_{anual}}{\sum_j^n PN} \quad (10)$$

donde:

A_{ec} = Área efectiva de captación (m^2).

D_{anual} = Demanda anual (m^3).

PN = Precipitación Neta (m).

$j...n$ = meses cuya precipitación media es mayor o igual a 40 mm.

En este caso, como ya se dispone de una superficie fija destinada para la captación, entonces se calcula el volumen de agua que puede ser captado en esta superficie y se define la capacidad para cubrir la demanda. Dicho volumen será equivalente a la demanda anual, calculada en función del área efectiva de captación, aplicando la ecuación siguiente:

$$D_{\text{anual}} = A_{\text{ec}} \left(\sum_{j=1}^n PN \right) \quad (11)$$

Así, para este ejemplo, tenemos una superficie destinada para la captación de 224.91 m², una demanda mensual de 0.405 m³ y una demanda anual de 4.9275 m³ para 5 habitantes, con una dotación diaria de 2.7 litros por persona y una precipitación neta anual de 0.596 m. Sustituyendo los datos del área efectiva de captación y la precipitación neta en la ecuación 11, se tiene:

$$D_{\text{anual}} = 224.91 \text{ m}^2 (0.596 \text{ m}) = 134.046 \text{ m}^3$$

El resultado anterior nos indica que, del área de captación seleccionada, se obtienen 134.046 m³ al año. Como se presentó en la **Tabla 8**, únicamente se requiere cubrir una demanda anual de 4.9275 m³. De este modo, se observa que, con dicha superficie se dispone de un excedente de 129.1185 m³, que se pueden utilizar o almacenar para cubrir alguna otra necesidad.

2.2.1.5 SISTEMA DE CONDUCCIÓN DEL AGUA DE LLUVIA CAPTADA

Para la conducción del agua captada, se aprovecha uno de los tubos bajantes de 15 cm (6 pulgadas) y se realizan las conexiones subsecuentes mediante tubería de PVC de 10 cm (4 pulgadas). Se calcula entonces la cantidad de agua que pasará por la sección (caudal de conducción), para esto, se aplica la ecuación (12):

$$Q_c = \frac{5}{8}(A_{ec} * I_{lluvia}) \quad (12)$$

donde:

Q_c = Caudal de conducción, en litros por segundo (l / s).

A_{ec} = Área efectiva de captación de agua de lluvia (m^2).

I_{lluvia} = Intensidad máxima de lluvia en la zona.

$5 / 18$ = factor de conversión de $m^3 / hora$ a litros / segundo.

Para realizar dicho cálculo, se toma la superficie de $224.91 m^2$ como área efectiva de captación, y de las curvas isoyetas⁶ se considera una intensidad máxima de lluvia de 40 mm/hr, como se muestra en la **Figura 81**, en donde se presentan las isoyetas de la intensidad máxima de lluvia en 60 min.

⁶ Las isoyetas son líneas dibujadas en un mapa que unen los puntos de igual precipitación, de acuerdo con las estaciones meteorológicas correspondientes. A partir de estas curvas, es posible calcular la precipitación media.

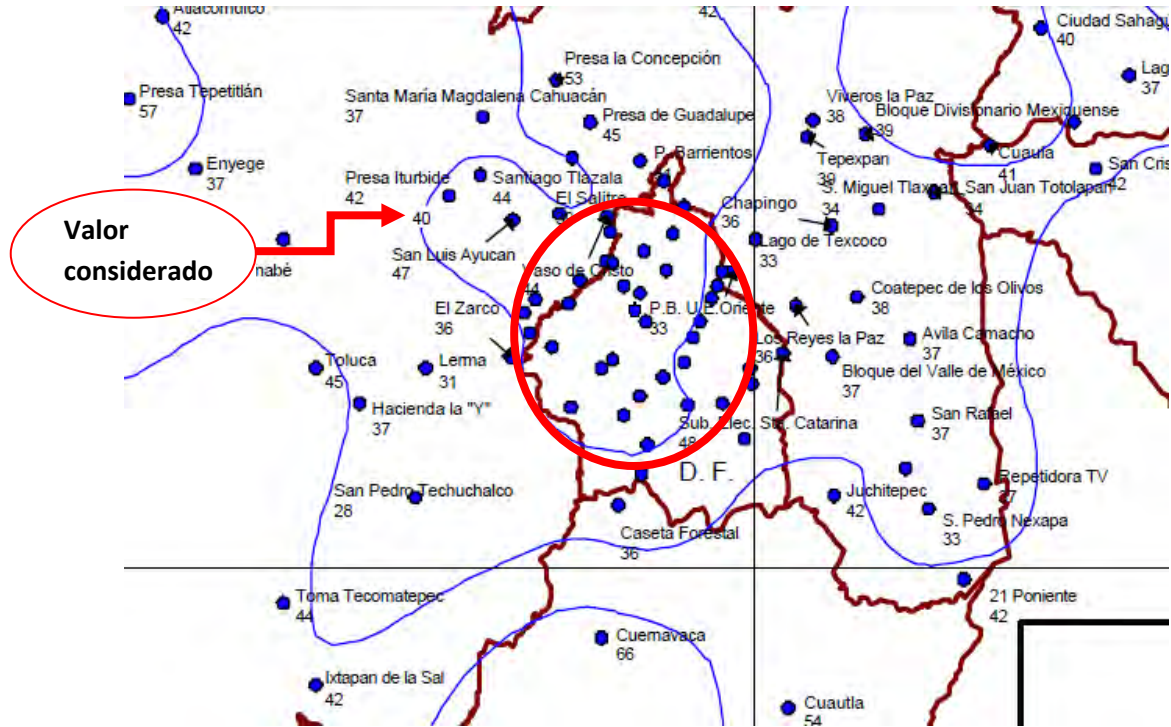


Figura 81. Isoyetas de intensidad máxima de lluvia en 60 min (mm / hr).

Sustituyendo los valores en la ecuación (12) se tiene que:

$$Q_c = \frac{5}{8} (224.91 \text{ m}^2 * 0.04 \text{ m/hr}) = 5.623 \text{ l/s}$$

El caudal de conducción máximo que pasará a través de la tubería será de 5.623 litros por segundo, se determina entonces si el tamaño de la sección de la tubería utilizada en el sistema es el indicado para desalojar el caudal determinado, para esto, es necesario determinar el caudal máximo que puede manejar la tubería elegida mediante la siguiente ecuación (ec. 13):

$$Q = A * v \quad (13)$$

donde:

Q = gasto (m³ / seg)

A = área hidráulica (m²) (Ver Tabla 11)

v = velocidad (m/s)

Para la realización del cálculo, se considera una tubería de sección circular de 101.6 mm de diámetro, para obtener el valor de Q, y una vez obtenido, se compara con el valor de Qc.

Se pueden presentar dos condiciones:

- 1) Si $Q \geq Q_c$ el valor de la tubería se acepta.
- 2) Si $Q < Q_c$ el tamaño no es suficiente y tendrá que repetirse el cálculo con otro tamaño de sección.

El cálculo de la velocidad del caudal se realiza aplicando la ecuación de Manning (ec. 14):

$$v = \frac{1}{n} r^{\frac{2}{3}} s^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

donde:

v = velocidad del caudal (m/s)

n = coeficiente de rugosidad, se considera para PVC de 0.009

r = radio hidráulico (m)

s = pendiente en % con respecto a uno

El radio hidráulico se obtiene de las expresiones matemáticas presentadas en la **Tabla 11** que se muestra a continuación:

Tabla 11. Expresiones matemáticas para determinar dimensiones de secciones.

Forma	Altura tirante	Área hidráulica	Perímetro mojado	Radio hidráulico	Observaciones
Circular	0.5 D	$1.57 r^2$	$3.14 r$	$0.5 r$	d = diámetro r = radio
Rectangular	y	by	b+2y	$\frac{by}{b+2y}$	b = base y = tirante
Triángulo 90°	y	y^2	2.83y	$\frac{y}{2.83}$	y = tirante
Trapezoidal talud 60° con la horizontal				$y \left(\frac{b + \frac{y}{\sqrt{3}}}{b + \frac{4y}{\sqrt{3}}} \right)$	b = ancho y = tirante

El radio hidráulico para la forma circular es entonces:

$$r = 0.5(0.0508 \text{ m}) = 0.0254 \text{ m}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación de Manning se obtiene:

$$v = \frac{1}{0.009} (0.0254)^{\frac{2}{3}} (1)^{\frac{1}{2}} = 9.6 \text{ m/s}$$

Con la velocidad obtenida, se calcula el caudal en la tubería y se compara con el caudal de conducción Q_c .

Sustituyendo los valores obtenidos en la ecuación (13) se tiene que:

$$Q = 1.57(0.0508 \text{ m})^2 * 9.6 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0.0388 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 38.8 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

Al comparar el resultado obtenido, con el caudal de conducción se observa que $Q > Q_c$, lo que indica que el caudal que puede desalojar la tubería es muy superior al estimado en Q_c , y por lo tanto la tubería se acepta.

2.2.1.6 ALMACENAMIENTO DEL AGUA DE LLUVIA

A continuación se determina el volumen de la cisterna o tanque de almacenamiento (ec. 15), para esto, se considera la demanda de agua mensual durante la sequía más dos meses que servirán como coeficiente de seguridad. Así:

$$V_{\text{cisterna}} = D_j * M_{\text{sequía}} + 2 \quad (15)$$

donde:

V_{cisterna} = Volumen de la cisterna en m^3

D_j = demanda mensual en m^3/mes (de la **Tabla 8**)

$M_{\text{sequía}}$ = Meses con sequía + 2

Los meses con sequía, son los meses con precipitaciones menores a los 40 mm. De la **Figura 79**, se observa que son seis los meses que no alcanzan los 40 mm, más los dos meses de seguridad, consideramos 8 meses.

Sustituyendo en la ecuación (15), se tiene que:

$$V_{cisterna} = 0.405 \text{ m}^3 * 8 = 3.24 \text{ m}^3$$

El resultado obtenido, significa que, para satisfacer la demanda anual de agua para el consumo de 5 personas, se requiere una cisterna o tanque de almacenamiento con una capacidad de 3240 litros. Como el prototipo construido es demostrativo, únicamente se utiliza un tanque de 450 litros para realizar pruebas.

2.2.2 EL FOTORREACTOR: DISEÑO Y FABRICACIÓN

Los 6 Colectores Parabólicos Compuestos están montados sobre 5 perfiles de aluminio con la forma del colector, a su vez, estos perfiles se encuentran soportados en un marco de 826 mm de ancho, por 1500 mm de longitud, como se muestra en la **Figura 82**.

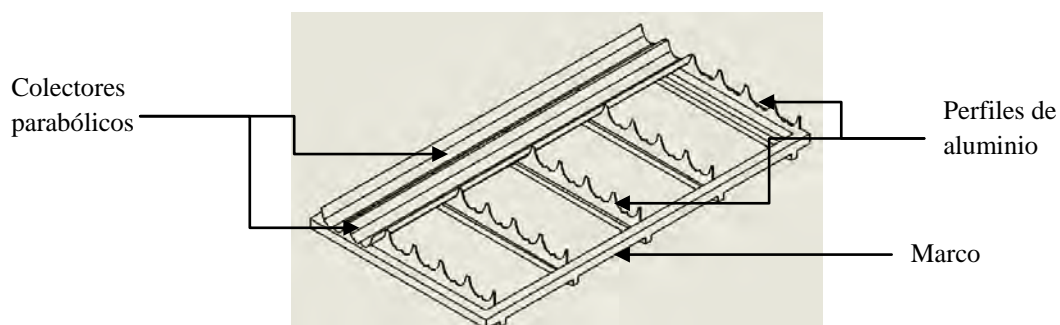


Figura 82. Montaje de los Colectores Parabólicos Compuestos.

Los colectores parabólicos fueron diseñados para un ángulo de aceptación de 90° ($FC = 1$) y un ángulo de truncamiento de 75° , como se muestra en la **Figura 83 a**. De esta manera, aplicando la ecuación (15) se obtiene la distancia ρ , y de las ecuaciones (16) y (17), se obtienen los puntos necesarios para el trazo de los sectores parabólicos con respecto al tubo de vidrio de 32mm de diámetro exterior como se presenta en la **Figura 83 b**.

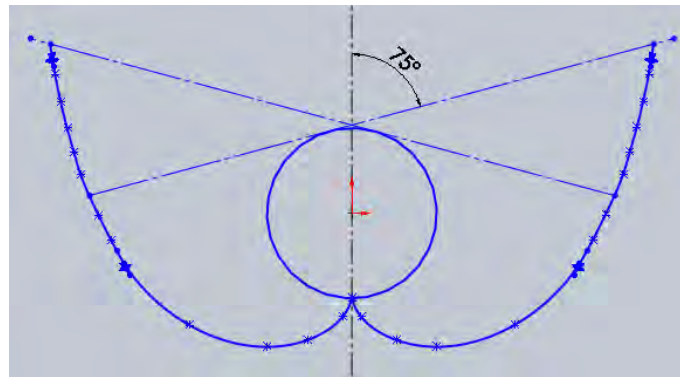


Figura 83 a. Truncamiento del CPC.

$$\rho = r\theta \quad (15)$$

$$\text{para } |\theta| \leq \theta_\alpha + \frac{\pi}{2} \quad \text{Parte AB de la curva}$$

$$\rho = r \frac{\theta + \theta_\alpha + \frac{\pi}{2} - \cos(\theta - \theta_\alpha)}{1 + \sin(\theta - \theta_\alpha)} \quad (16)$$

$$\text{para } \theta_\alpha + \frac{\pi}{2} \leq |\theta| \leq \frac{3\pi}{2} - \theta_\alpha \quad \text{Parte BC de la curva}$$

Aplicando las ecuaciones anteriores y basándose en la **Figura 55** de la sección 1.5.1, se obtienen los trazos para al realizar las variaciones de los correspondientes ángulos en radianes como se presenta en la siguiente figura (**Figura 83 b**).

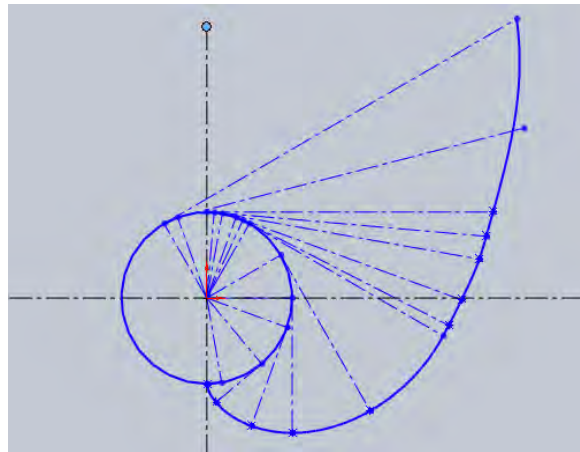


Figura 83 b. Puntos para el trazado del sector parabólico.

Una vez calculados los sectores parabólicos, se modelaron en CAD las diferentes partes del colector para su posterior fabricación. En las **Figuras 84 a** y **84 b** se muestran el plano del CPC y el modelo sólido respectivamente.

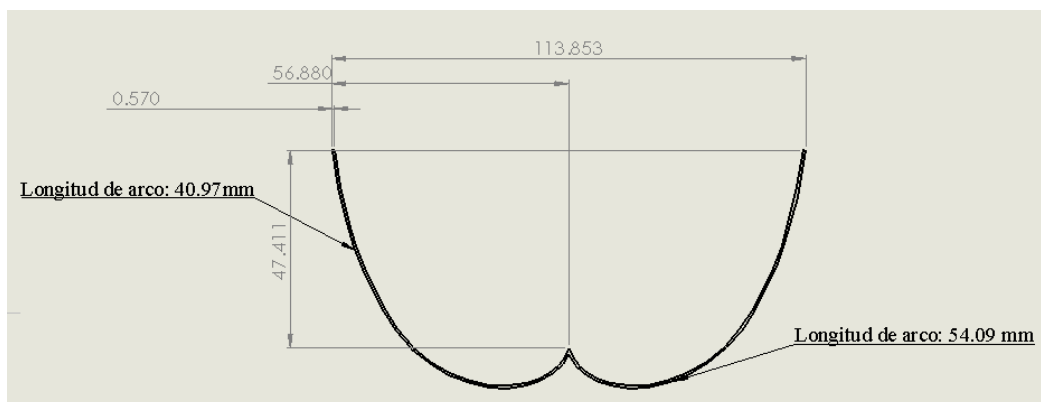


Figura 84 a. Plano del CPC con sus respectivas dimensiones.

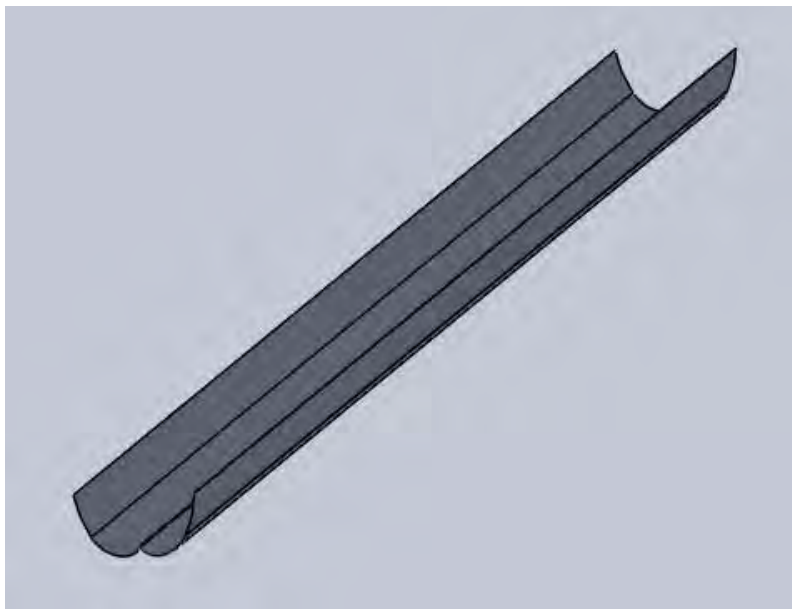


Figura 84 b. Modelo sólido del CPC.

Para estimar de manera sencilla la magnitud de la radiación que llega al óxido de titanio, Blesa et al., 2006, proponen el modelo que se presenta a continuación.

Se utiliza la siguiente nomenclatura:

TVB = Transmitancia del vidrio en el UV-B.

TVA = Transmitancia del vidrio en el UV-A.

S = Apertura del CPC.

DT = Diámetro del tubo de vidrio.

DS = Diámetro del soporte del semiconductor.

R = Reflectividad de los espejos.

Ae (UV-A) = Área equivalente en el rango UV-A.

Ae (UV-B) = Área equivalente en el rango UV-B.

$A_t = \text{Área total.}$

El área total está dada por la ecuación (17):

$$A_t = n(\pi DT)(LT) \quad (17)$$

donde:

$n = \text{número total de tubos.}$

$DT = \text{Diámetro del tubo.}$

$LT = \text{Longitud total del tubo.}$

El área equivalente (A_e), se define como el conjunto de factores que afectan la radiación solar antes de llegar al semiconductor, y está dada por la ecuación (18):

$$A_e = \left(n * LT * TVA \left[\pi \frac{DT}{2} + (S - DT)R \right] \right) \quad (18)$$

De modo que, la relación entre la radiación que llega al reactor y la que llega al óxido de titanio, puede expresarse como la relación entre el área equivalente y el área total, cabe mencionar que para el cálculo del área equivalente, LT es la longitud del tubo que se encuentra expuesta a la radiación.

Para este caso, se tienen los siguientes datos:

$$S = 0.114 \text{ m}$$

$$DT = 0.032 \text{ m}$$

$$LT = 1.44 \text{ m}$$

De las curvas del anexo 5, se obtienen las transmitancias globales en las regiones UV-B y UV-A respectivamente que son:

$$TVB = 0.45$$

$$TVA = 0.86$$

La reflectividad del aluminio utilizado es del 86 % (Anexo 4), por lo que:

$$R = 0.86$$

$$n = 6 \text{ tubos}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación (18), se obtienen las áreas equivalentes para el UV-A y UV-B respectivamente:

$$Ae(UV - A) = \left(6 * 1.44 * 0.86 \left[\pi \frac{0.032}{2} + (0.114 - 0.032)0.86 \right] \right) = 0.897 \text{ m}^2$$

$$Ae(UV - B) = \left(6 * 1.44 * 0.45 \left[\pi \frac{0.032}{2} + (0.114 - 0.032)0.86 \right] \right) = 0.469 \text{ m}^2$$

Se determina el área total sustituyendo en la ecuación (17):

$$At = 6(\pi 0.032)(1.5) = 0.904 \text{ m}^2$$

Haciendo la relación entre el área equivalente y el área total queda:

$$\frac{Ae(UV - A)}{At} = \frac{0.897}{0.904} = 0.99$$

$$\frac{Ae(UV - B)}{At} = \frac{0.469}{0.904} = 0.52$$

De manera que, el 99 % de la radiación UV-A, y el 52 % de la radiación UV-B, llegan a la superficie del semiconductor, siempre que no se obstruya el paso de dicha radiación, o que partículas en disolución absorban en esas longitudes.

Una vez determinados los parámetros de diseño, se comienza con la construcción del prototipo. En la **Figura 85** se presentan los perfiles de aluminio montados en el marco y una prueba del conformado de la lámina.



Figura 85. Perfiles montados en el marco y lámina de prueba.

Ya que se realizaron las pruebas de conformado de la lámina, se le da la forma final. Para este paso, se diseñó y se fabricó un dispositivo que permitiera doblar las láminas sin dañar su superficie, dicho dispositivo se presenta en la **Figura 86**.



Figura 86. Dispositivo para doblado de las láminas reflejantes.

Las láminas reflejantes definitivas, fueron montadas sobre los perfiles de aluminio, una vez que se les dio la forma indicada, como se muestra en la **Figura 87**, posteriormente se les retiró la película protectora con la que estaba cubierta la superficie reflejante. En la figura se pueden apreciar las láminas con la película plástica colocada, antes de ser instalados los tubos de vidrio sobre los CPCs.

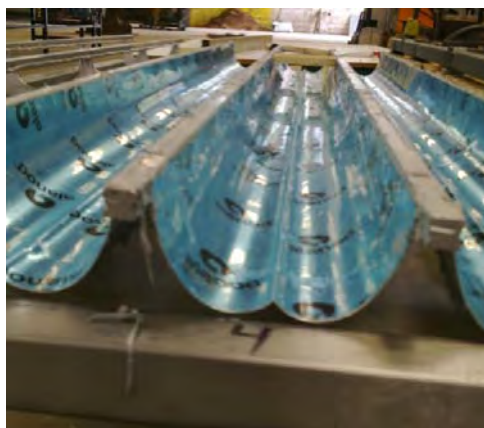


Figura 87. Láminas dobladas y montadas sobre los perfiles de aluminio.

Finalmente, se instalaron los tubos con película interior de TiO_2 , y se conectaron por medio de tubos de PVC (**Figura 88**).

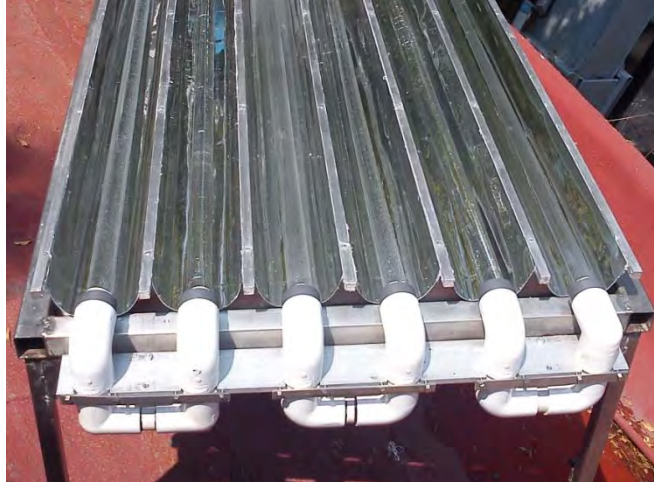


Figura 88. Conexión de los tubos instalados en el CPC.

El prototipo armado se instaló en el techo junto con el SCALL, y se realizaron las conexiones correspondientes como se muestra en la **Figura 89**.



Figura 89. Instalación y conexión del prototipo.

3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS NANOPARTÍCULAS DE TiO₂

Se obtuvieron partículas de TiO₂ de 60 nm y de 200 nm, medidas con un equipo Zeta Sizer como se muestra en la **Figura 90 a**. De las muestras tomadas y analizadas por TEM, se observa que se logró controlar la forma esférica de las partículas como se presenta en la **Figura 90 b**.

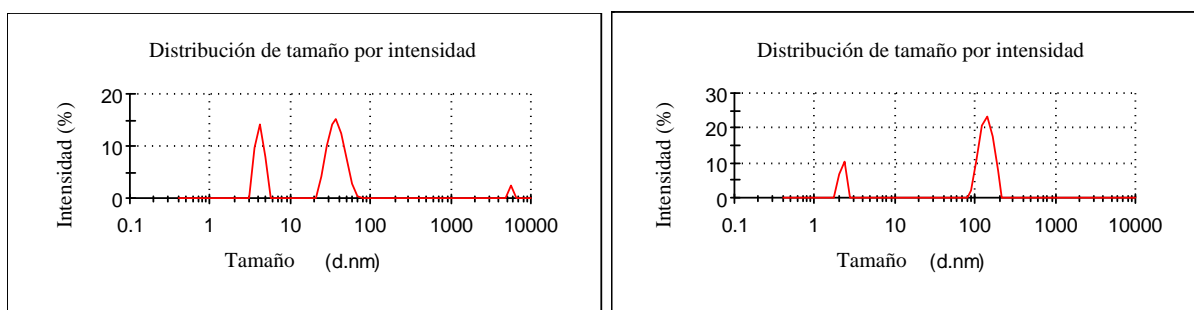


Figura 90 a. Tamaños de partícula con promedios de 60 y 200 nm respectivamente, medidos en el Zeta Sizer.

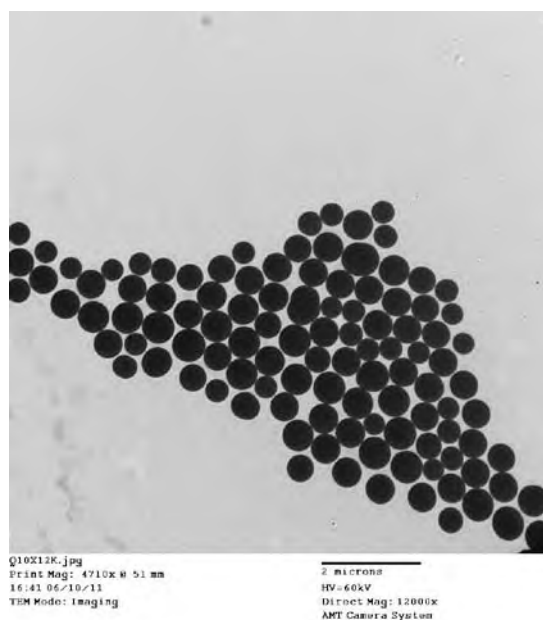


Figura 90 b. Partículas esféricas de TiO₂

Los espectros RAMAN obtenidos, demuestran el cambio de fase del TiO_2 de amorfo a cristalino a medida que se incrementa la temperatura hasta 500°C . En las **Figuras 91** y **92**, se presentan los espectros del TiO_2 amorfo, y el que corresponde a la fase cristalina anatasa respectivamente.

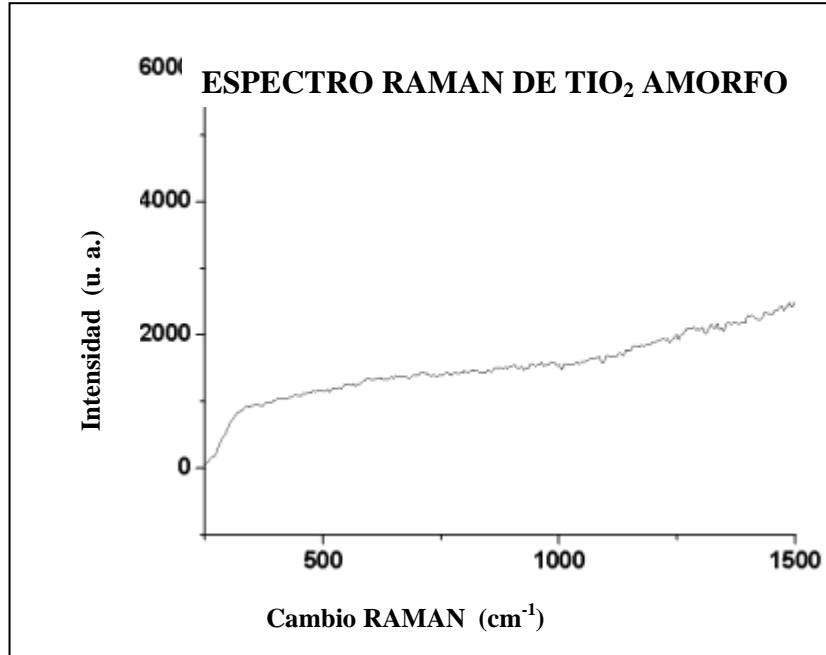


Figura 91. Raman TiO_2 amorfo.

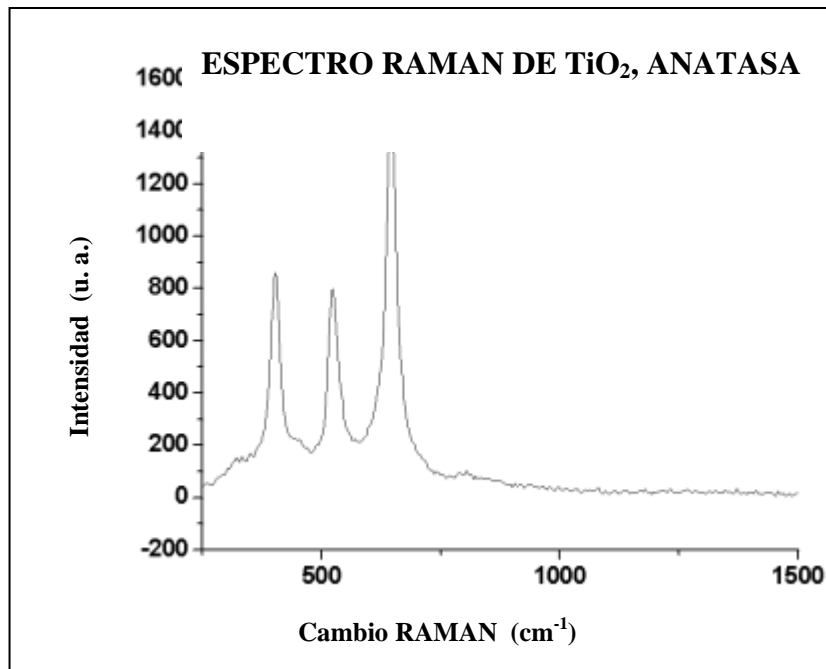


Figura 92. RAMAN TiO_2 cristalino, fase anatasa.

De las pruebas realizadas para medir la actividad fotocatalítica, en la **Figura 93** se presenta la concentración del azul de metileno en función del tiempo. Se puede observar una disminución considerable de la concentración en las disoluciones de azul de metileno bajo irradiación UV-A y nanopartículas de TiO_2 de 60 y 200 nm, respectivamente. Por el contrario, en la muestra bajo irradiación UV-A sin TiO_2 la concentración disminuye muy poco. Se observa también que la actividad fotocatalítica es muy parecida tanto en los depósitos de partículas de 60 nm como en los de 200 nm, por lo cual, para este caso en particular, es posible utilizar cualquiera de los dos tamaños de partícula.

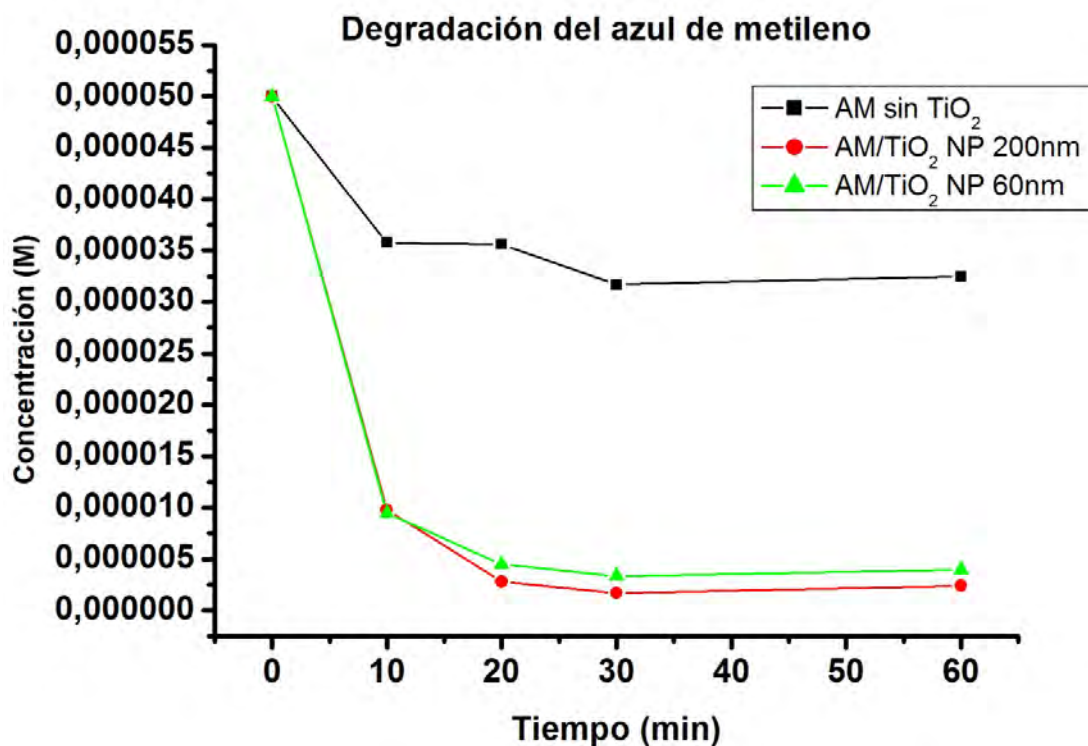


Figura 93. Degradación del azul de metileno mediante fotocátalisis sin TiO_2 y con depósitos de partículas de 200 y 60 nm, respectivamente.

3.2 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DEL AGUA

Se tomaron cuatro muestras del agua de lluvia como la mostrada en la **Figura 94**, de la siguiente manera:

- Dos muestras del agua almacenada en el tinaco (extraída del filtro de succión flotante).
- Dos muestras a la salida del fotorreactor, después de haber pasado por el filtro de arena y haber permanecido 30 min en el reactor bajo irradiación UV, de las 11:00 a. m. a las 11:30 a.m.

Dichas muestras fueron analizadas en el Instituto de ecología de la UNAM y en los laboratorios de la empresa REMA Water Solutions,



Figura 94. Muestra de agua de lluvia sin tratar

A las muestras tomadas se les realizaron las siguientes importantes pruebas:

1) Organolépticas y físicas:

- Olor
- Sabor
- Color

2) Fisicoquímicas:

- Dureza total
- Sólidos disueltos totales
- pH

3) Microbiológicas:

- Coliformes totales y fecales

Los resultados obtenidos, se presentan en la **Tabla 12**:

Tabla 12. Resultados de las pruebas.

ORGANOLÉPTICAS Y FÍSICAS	AGUA DE LLUVIA (CRUDA)	AGUA DE LLUVIA TRATADA	LÍMITE MÁXIMO NOM-127-SSA1-1994
Olor	Agradable	Agradable	Agradable
Sabor	Agradable	Agradable	Agradable
Color	5 unidades de color verdadero	2 unidades de color verdadero	20 unidades de color verdadero
FISICOQUÍMICAS			
Dureza total	17.1 ppm	102.6 ppm	500 ppm

Calcio / Magnesio			
Sólidos disueltos totales	32 ppm	116 ppm	1000 ppm
pH	7	7	6.5 – 8.5
MICROBIOLÓGICAS			
Coliformes fecales	4 UFC / 100 ml	No detectable	Ausencia o no detectable

Aunque faltan pruebas por realizarse, los resultados presentados en el cuadro anterior, muestran que incluso antes del tratamiento, el agua de lluvia tiene bastante calidad. La dureza y los sólidos disueltos totales aumentan debido al paso del agua por el filtro de arena, aun así, están muy por debajo de los límites permisibles en la norma.

CONCLUSIONES

Como se planteó en los objetivos, se construyó un sistema de captación y purificación de agua de lluvia mediante fotocátalisis solar, el cual no utiliza ninguna fuente de energía eléctrica para bombeo, ya que se aprovecha la gravedad (diferencia de alturas) para hacer circular el agua en el sistema.

Se realizó la síntesis y caracterización de las partículas de TiO_2 logrando controlar su forma y tamaño, posteriormente, mediante la degradación del azul de metileno, se comprobó su buen funcionamiento.

Como medio de desinfección únicamente se utiliza la radiación UV solar reflejada por medio de un CPC, sobre un tubo con una película interior de TiO_2 .

Al comparar los resultados obtenidos en los análisis del agua de lluvia con los límites permisibles marcados en la norma, se verifica que ésta se encuentra muy por debajo de dichos límites, demostrando que se puede obtener agua con la calidad suficiente para su consumo, mediante el desarrollo de dispositivos que funcionen de manera simple, y sin el desperdicio de energía y la generación de contaminantes dañinos para el medio ambiente.

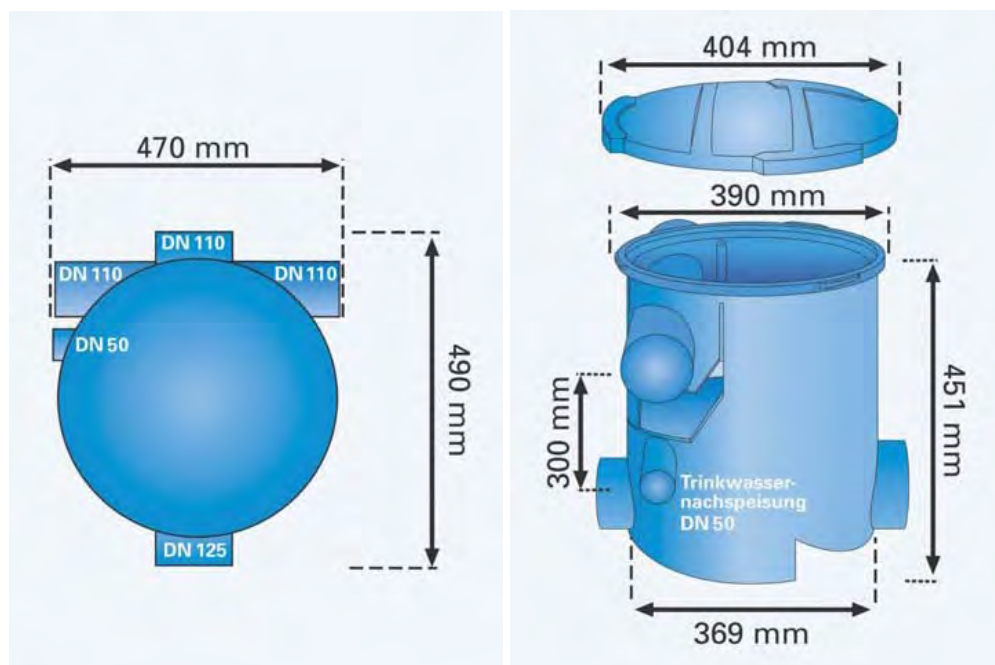
Cabe destacar el potencial que tiene el agua de la lluvia y las tecnologías solares para satisfacer las necesidades actuales, ya que son recursos que literalmente nos caen del cielo, y como se observó, la calidad del agua de lluvia captada es bastante alta y el tratamiento necesario para su desinfección es mucho más simple que el que se le tiene que dar al agua de la red para que pueda ser consumida, además de no desperdiciar el agua en retrolavados como en los sistemas convencionales, ya que el mantenimiento requerido es sencillo y no es necesario que sea tan frecuente.

La desinfección del agua de lluvia por fotocátalisis solar, es solamente una aplicación potencial que resolvería un gran problema, pero el desarrollo de proyectos de este tipo, da pie a crear una conciencia ambiental para el aprovechamiento eficiente de los recursos.

ANEXOS

ANEXO 1 FILTRO DE CASCADA: DATOS TÉCNICOS

Proveedor: 3P Technik



Conexión de entrada:	2 x DN 110
Salida al depósito:	DN 110
Salida al canal:	DN 125
Diferencia de altura entre entrada y salida:	300 mm
Material de caja:	Polietileno
Material de criba de filtro:	Acero inoxidable 1.4301
Ancho de malla:	0,65 mm.
Material de inserto de cascada:	Polietileno
Peso:	6,2 kg

ANEXO 2 SIFÓN DE REBOSE Y ADMISIÓN CALMADA: DATOS TÉCNICOS

Proveedor: 3P technik



Dimensiones:

540 x 160 x 270 mm

Material: Polietileno

Tuerca de racor: DN1 10 con junta

Peso: 1,1 kg



Datos técnicos:

De polietileno con posibilidad de conexión para tubos DNB110 y DN125.

Peso: 0,5 kg

ANEXO 3 FILTRO DE SUCCIÓN FLOTANTE

Proveedor: 3P technik



Datos técnicos:

Bola flotante con diámetro de 14 cm

Material: Polietileno

Manguera de aspiración: 1,5 m

Material de piezas de conexión:

Latón

Material de abrazaderas de

manguera: Acero inoxidable

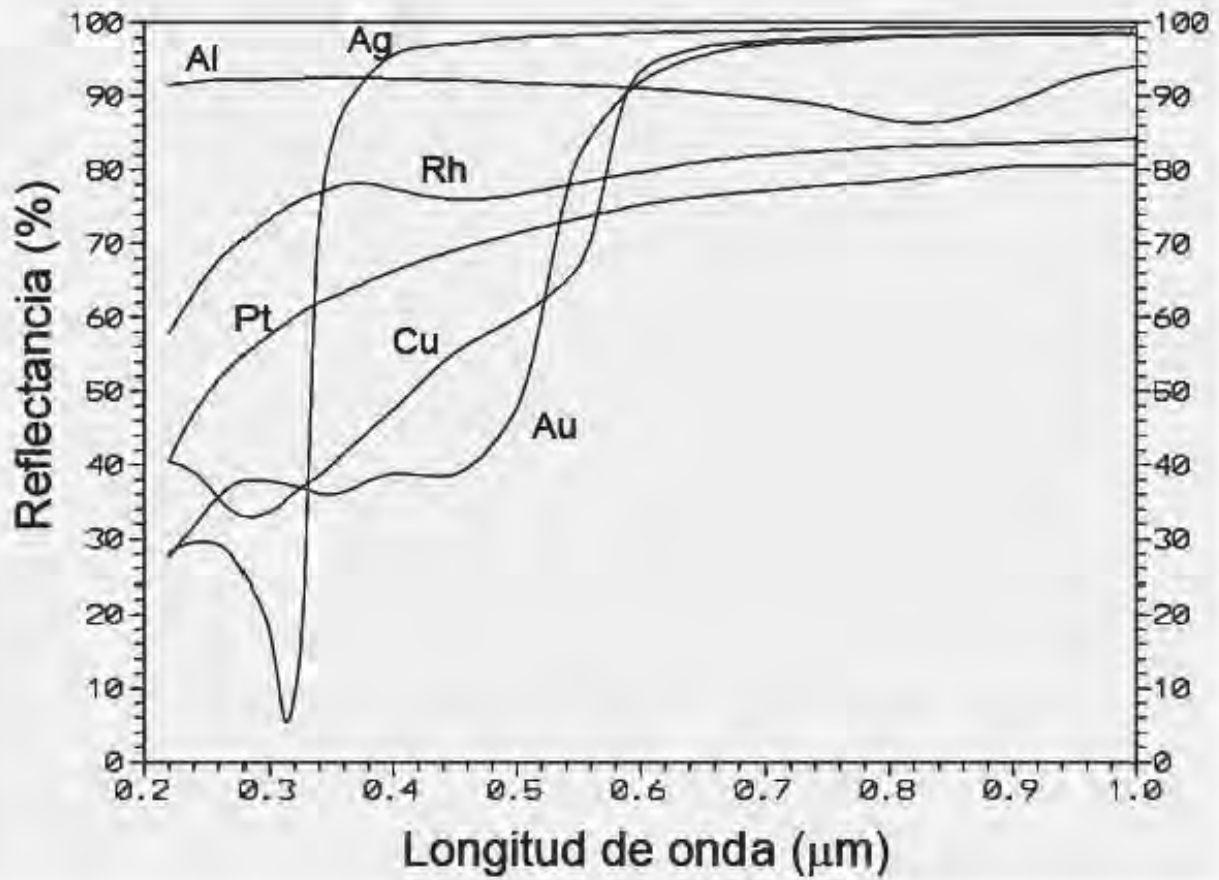
Peso: 1,3 kg

Caudales en litros por segundo

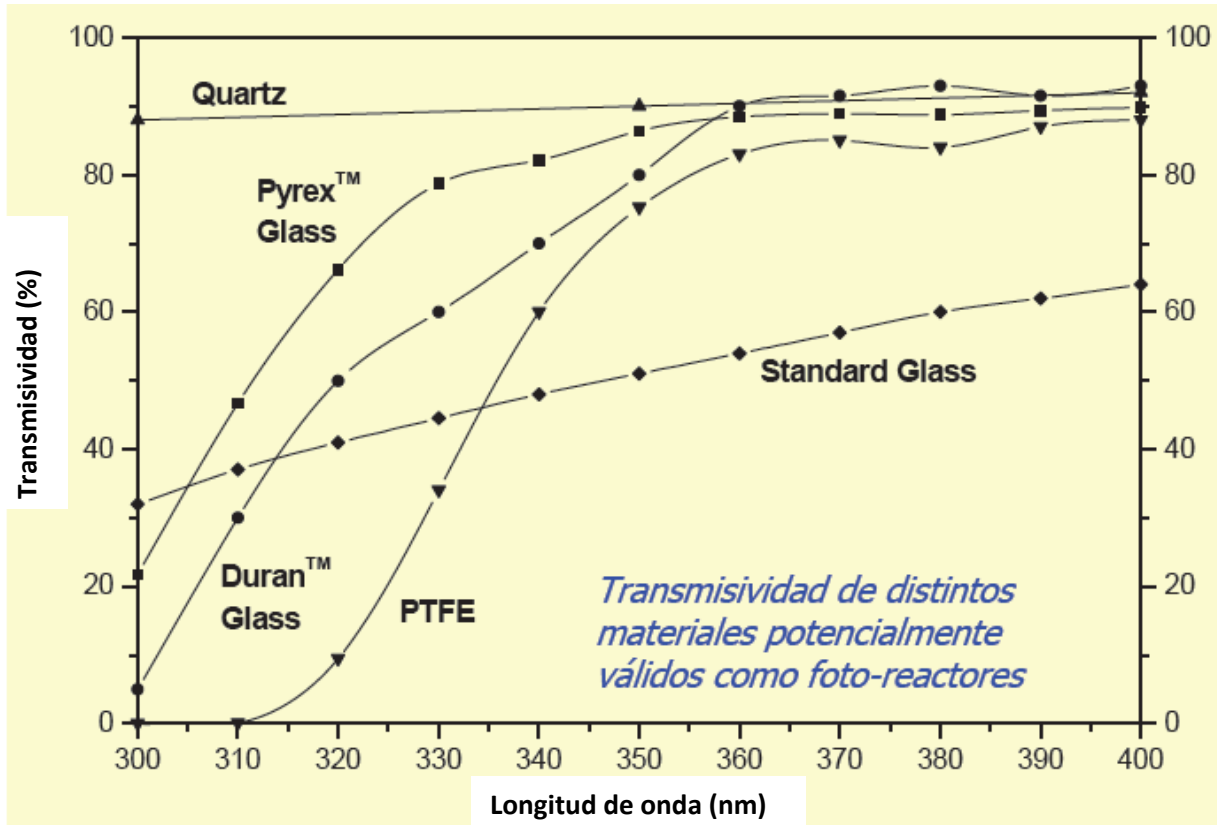
Q (l/s): 0,05/ 0,1/ 0,15/ 0,27/

0,30/0,35/0,55/0,20

ANEXO 4 REFLECTIVIDAD DEL ALUMINIO.



ANEXO 5 TRANSMITANCIA DEL TUBO DE VIDRIO DE BOROSILICATO



ANEXO 6 SIMPLE METHOD FOR THE FABRICATION OF TITANIUM

DIOXIDE THIN FILMS

Simple method for the fabrication of titanium dioxide thin films

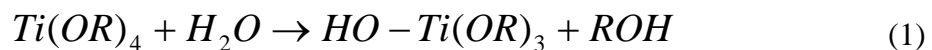
José Ocotlán Flores Flores, Ricardo Resendiz , Roberto Sato, *Ma.Esther Sánchez Espíndola, José Manuel Saniger Blesa.
Centro de Ciencias aplicadas y Desarrollo Tecnológico, CCADET-UNAM
*Central de Instrumentación de Microscopia, de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, ENCB-IPN
Circuito exterior Ciudad Universitaria, CP 04510, Coyoacán, México, D.F.
ocotlan.flores@ccadet.unam.mx

Abstract

This paper presents a simple method for producing titanium dioxide thin films from 50 to 600 nm. The thickness of the films depends on the nanospheres used. Furthermore, the films showed different allotropic TiO₂ phases ranging from amorphous to crystalline. The dominant crystalline phase in these films is controlled by the heat treatment temperature of the substrate. The processing activity was tested by Raman spectroscopy and observed by a transmission electron microscope.

Experimental procedure

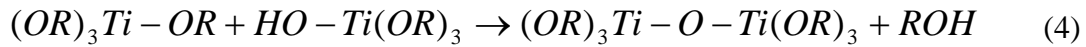
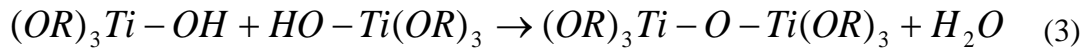
The manufacturing process of the nanoparticles of TiO₂ was realized by the sol-gel method, using as precursor titanium butoxide in basic dissolution. The titanium butoxide follows the next hydrolysis and condensation reactions in order to obtain the oxide.



Where R represents an organic radical (if R is alkyl, OR is an alkoxide group), and ROH is an alcohol. In the complete hydrolysis (if all the groups OR are replaced by OH), we have Equation 2.



Later, two molecules, partially hydrolyzed, can carry out the condensation reaction in which a small molecule is liberated as water (Equation 3) or alcohol (Equation 4).



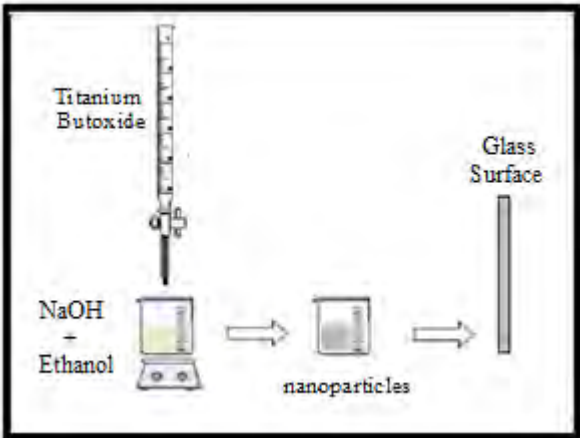
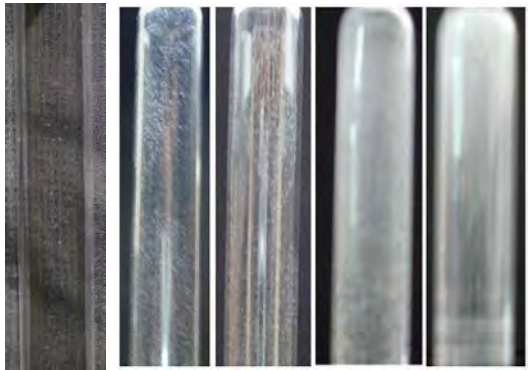
Both reactions (hidrolisis and condensation) occur almost simultaneously and generally some epoxyde groups can get caught in the formed oxide. In general, the global reaction can be expressed as.



With the advance of the polycondensation reaction of the titanium alkoxide, colloidal particles are produced that bind to each other resulting in larger particles until settling occurs.

The reaction scheme consists of homogeneously mixing the reactants in a basic medium. The alkoxide is added dropwise to a beaker with ethanol basified with ammonium hydroxide, to pH = 12, as shown in Figure 1. With the particles obtained, deposits are made on glass tubes, previously treated in basic medium with sodium hydroxide.

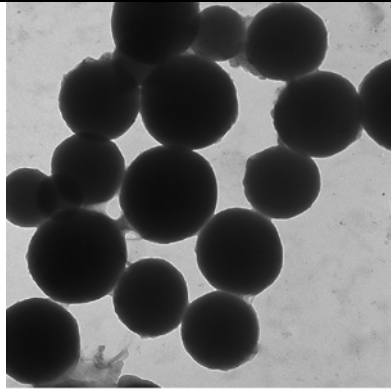
Figure 2 shows the deposits of thin films of titanium dioxide nanoparticles obtained by this method, with different coating steps.

	
<p>Figure 1. Experimental set up for the synthesis of titanium dioxide nano and micro particles.</p>	<p>Figure 2. (a) reference (b) 2 coatings, (c) 4 coatings, (d) and (e) 8 coatings.</p>

The TiO₂ materials synthesized with alkoxide or other predecessors of titanium, need high temperatures for the crystallization of the particles deposited; therefore, a thermal treatment at 500 °C [2-4] was performed.

Characterization

The synthesized particles were observed by scanning electron microscopy, SEM, presenting a spherical shape of average size 200 nm, as shown in Figure 3. After heat treatment, it was observed that the spherical amorphous titanium dioxide is transformed to a crystalline phase, Figure 4. This phase was analyzed by Raman spectroscopy, before and after heat treatment, and analysis showed the characteristic Raman peak shift of the amorphous and anatase phases, Figures 5 and 6.



S 340 K1000_511
Print Mag: 31200x # 51 nm
15:58 04/23/11
TKM Mode: Imaging

100 nm
10KV x50
Direct Mag: 100000x
AMT Camera System

Figure 2. SEM of spherical nanoparticles of titanium dioxide, obtained by sol-gel method.

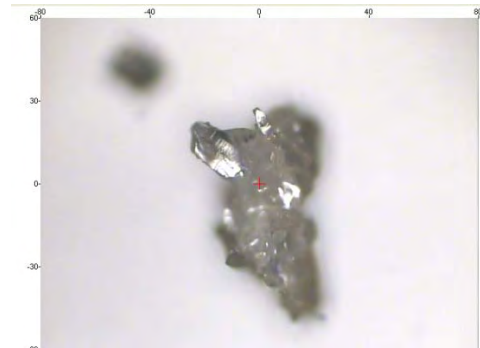


Figure 3. Optical microscopy of an anatase crystal.

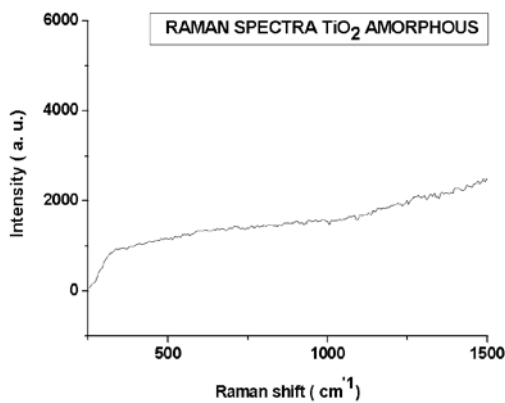


Figure 4. Raman spectra of TiO₂ amorphous

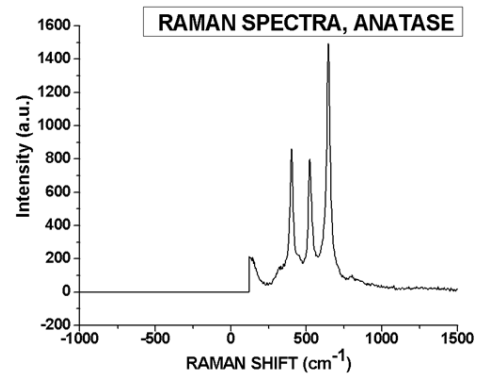


Figure 5. Raman spectra of anatase phase

Conclusion

By this method it is possible to fabricate micro and nano particles of titanium oxide with an average size of 200 nm.

The particles adhere firmly to the glass surface activated in basic medium.

The heat treatment at 500 ° C is sufficient to transform the amorphous phase of spherical particles into the anatase crystalline phase.

Bibliography

1. C. J.; Scherer G.W. *The physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*. Academic Press, INC. USA 1990.
2. C. H. Kwon, H. Shin, J. H. Kim et. al. *Mater. Chem. and Phys.* 86 (2004) 78.
3. K. A. Vorotilov, et. al. *Thin Solid Films* 207 (1992)180.
4. M. Mosaddeq-ur-Rahman, et.al. *J. Appl. Phys.* 88 (2000) 634.

Acknowledgment

We gratefully acknowledge support of this work by CONACYT 133316 and ICyT DDF.

REFERENCIAS

- Acevedo, A., Carpio, E. A., Rodríguez, J., Manzano, M. A. (2012). Disinfection of Natural Water by Solar Photocatalysis Using immobilized TiO₂ Devices: Efficiency in Eliminating Indicator Bacteria and Operating Life of the System. *Journal of Solar Energy Engineering*, 134 (1-10).
- A. DiPaola, G. Cufalo, M. Addamo et.al., (2007). *Coll. Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects*
- A.G. Rincón y C. Pulgarin, (2004). *Applied Catalysis B: Environmental*, 51, 283.
- A. Mills y S: Le Hunte, (1997). *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, 108, 1.
- Anaya Garduño, M., (1998). *Sistemas de Captación de Agua de Lluvia para uso doméstico en América Latina y el Caribe. Manual técnico*, México: IICA
- Anaya, G. M. y Rivera O. D. (2003). Editores de la memoria electrónica de la XI th International Conference on Rainwater Catchment Systems, México.
- Anaya Garduño, M., (2004). *Presentación del CIDECALLI*. Foro Mundial del Agua, México: COLPOS.
- Anaya Garduño, M., (2006 – 2007). *Sistemas de captación y aprovechamiento del agua de lluvia para consumo humano*. Diplomado internacional, Texcoco, México: CIDECALLI-CP.
- Anaya, G. M. y Martínez, J. J. (2007). *Sistemas de captación y aprovechamiento del agua de lluvia para uso doméstico y consumo humano en América Latina y el Caribe*. México: Colegio de Postgraduados.
- Anaya, G. M., (2011). *Sistemas de captación y aprovechamiento del agua de lluvia para consumo humano y animal, producción en traspatio, ambientes controlados, agricultura de temporal y recarga de acuíferos*. XV Diplomado Internacional, Texcoco, México: CIDECALLI – CP.
- Anderson, J., Link, H., Bohn, M., Gupta, B., (1991). Development of U. S. Solar Detoxification Technology: An Introduction. *Solar En. Mat.*
- Ballén, J. A., Galarza, M. A., Ortíz, O. R. (2006). *Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia*, VI SEREA – Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua. Joao Pessoa, Brasil.
- Blanco, J., (2002). *Desarrollo de Colectores Solares sin Concentración para Aplicaciones Fotoquímicas de Degradación de Contaminantes Persistentes en el Agua*, Tesis doctoral, Universidad de Almería, España.

Blanco-Galvez, J., Fernández-Ibáñez, P., Malato-Rodríguez, S. (2006). Solar Photocatalytic Detoxification and Disinfection of Water: Recent Overview. *Journal of Solar Energy Engineering*.

Blanco, J., (2006). *El Reactor Fotocatalítico: Estado del Arte*. SOLARSAFEWATER, España: PSA.

Blesa, M. A., Navntoft, C., Dawidowski, L. (2006). *Modelado de la radiación solar U. V. para aplicaciones en tratamiento de aguas*. SOLARSAFEWATER, España: PSA.

Brinker C. J.; Scherer G.W. (1990). *The physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*. USA: Academic Press, INC.

Cáceres, J., (2002). *Evaluación analítica y optimización de procesos de oxidación avanzada en planta piloto solar*, Tesis doctoral. Departamento de Hidrología y Química Analítica, Universidad de Almería, España.

Cao-Thang Dinh, Thanh-Dinh Nguyen, Freddy Kleitz, and Trong-On Do, (2009). Shape-Controlled Synthesis of Highly Crystalline Titania Nanocrystals. *American Chemical Society*.

Campos, R., Carlos, P., (2006). Consumo de agua. *Consulta Mitofsky*. México D. F.

Carro, X. M., (2002). *Pueblos indígenas de México, Mazahuas*, serie Monografías, México: Instituto Nacional Indigenista.

Centro de investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, (2001). *Solar Photochemistry Technology*. Plataforma Solar de Almería, España.

Cerda Gaete, M., (2010). *Aumento de la Oferta Hídrica: Reúso del agua*, (cap. III), República Dominicana: Instituto Nacional de recursos Hidráulicos.

Chapelon, A. y Herrman, J.M. (2004). *Applied Catalysis B: Environmental. News Brief*, 50.

Comisión Nacional del Agua. (2006). *El Agua en México*. (págs. 9 -12), México: Subdirección General de Programación

C. H. Kwon, H. Shin, J. H. Kim et. al. (2004). *Mater. Chem. and Phys.* 86 78-82.

Comisión Nacional del Agua (2011). *Estadísticas del Agua En México: Situación de los recursos hídricos*. (Cap. 2). México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Comisión Nacional del Agua, (2011). *Estadísticas del Agua En México: Escenarios futuros*, (Cap. 7). México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONAPO, Boletín No. 03/2010. Obtenido el 22 de marzo de 2010, de http://www.conapo.gob.mx/prensa/2010/bol004_2010.pdf

Chavarrías, M., (2006). *Los retos del acceso al agua potable*. Foro Mundial del Agua. México, D. F.

D. Mendoza, P. Salas. (2007). *Rev. Mex. Fis.* 50 S1 12-16.

Fujishima, A., Zhanj, X., (2006). Titanium dioxide photocatalysis: present situation and future approaches. *Elsevier, C. R. Chimie* 9 (750 - 760).

Gardner-Outlaw, T. and Engleman, R. (1997). *Sustaining water, easing scarcity: A second update*. Washington, D.C.: Population Action International,.

Garrido, H. S., (2006). *Sistemas para la captación y tratamiento de aguas pluviales para uso y consumo humano en comunidades rurales*. México: IMTA.

Gleason, A. (2005). *Manual de aprovechamiento de aguas pluviales en centros urbanos*. Universidad de Guadalajara. México: Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño.

Guha – Sapir, Femke. Vos, R., (2010). *Annual Disaster Statistical Review 2010. The numbers and trends*, Université catholique de Louvain – Brussels, Belgium: WHO collaborating Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED).

Guhl Nanneti, G., (2006, abril). Peligros y soluciones a la escasez y contaminación creciente del agua, *El Tiempo*, Bogotá, Colombia.

Gould, J. and Nissen-Petersen, E. (1999). *Rainwater Catchment Systems for Domestic Supply*. London: IT Publications.

H. M. Sung-Suh, J. R. Choi, H. J. Hah and et.al. (2004). *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 163 37-44.

H. Ortiz Moreno. (2006). *Síntesis y caracterización de TiO₂ mesoporoso. Efecto de las condiciones de síntesis en las propiedades fisicoquímicas*. Tesis de Maestría. UNAM, México.

H. Yang, K. Zhang, R. Shi et. al. (2006). *J. of Alloys and Compounds*. 413 302-306.

Ibáñez, P., (2006). *Desinfección con reactores solares: experiencia operativa*. España: PSA-CIEMAT.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2003). *Rescatando el agua del cielo para el uso doméstico en la tierra. Captación y tratamiento del agua de lluvia en Morelos*. Morelos, México: IMTA

Jiménez, A., Gelover, S. (2007). Structural and optoelectronic characterization of TiO₂ films prepared using the sol-gel technique, *Semiconductor Science and Technology*.

Jiménez Merino, A., (2007). *Agua para el Desarrollo. Más agua siempre para todos*, Puebla: Gráfico Editores.

- K. A. Vorotilov, et. al. (1992). *Thin Solid Films* 207 180.
- Kinkade – Levario, H. (2007). *Design for Water: Rainwater Harvesting, Stormwater Catchment, and Alternate Water Reuse*. Canada: New Society Publishers.
- Krishna, H. J., (2007). *The Texas Manual on Rainwater Harvesting* (Third Edition), Austin, Texas: Texas Water Development Board.
- Leal, A. M., (2005). *Tecnologías convencionales de tratamiento de agua y sus limitaciones*, SOLARSAFE WATER, España: PSA.
- Lean, G. y Hinrichsen, D. (1994). *Atlas del Medio Ambiente*. Sevilla: Algaida Editores.
- Liming, S., Ningzhong, B., Zheng, Y., Gupta, A., An, T., Yanagisawa, K., (2008). Hydrothermal Splitting of Titanate Fibers to Single-Crystalline TiO₂ Nanostructures with Controllable Crystalline Phase, Morphology, Microstructure, and Photocatalytic Activity, *J. Phys. Chem. C*.
- Litter, M., Jiménez, A., (2004). *Avances en tecnologías económicas solares para desinfección, descontaminación y remoción de arsénico en aguas de comunidades rurales de América Latina (métodos FH y RAOS) - Proyecto OEA AE 14*.
- L. Gill, C. Price, (2009). *Continuous flow solar disinfection system for a rural community in Kenya WATER, sanitation and hygiene: sustainable development and multisectoral approaches*. 34th WEDC International Conference. Addis Ababa, Ethiopia.
- Litter, M., (2006). *Solar Safe Water*, España: Plataforma Solar de Almería.
- Maldonado, M., (2000). *Descontaminación de aguas de lavado de envases de plaguicidas mediante fotocatalisis solar*. Tesis doctoral. Universidad de Almería. España.
- M. Berney, H.-U. Weilenmann, A. Simonetti and T. Egli, (2006). Efficacy of solar disinfection of Escherichia coli, Shigella flexneri, Salmonella Typhimurium and Vibrio cholera. *Journal of Applied Microbiology*.
- Meichtryl, M., Hurng J. Lin, De la Fuente, L., Ivana K. Levy, Gautier, A., Blesa, Miguel A. and Litter, Marta I., (2005). *Low-cost TiO₂ photocatalytic technology for water potabilization in plastic bottles for isolated regions. Photocatalyst fixation*.
- M. Mosaddeq-ur-Rahman, et.al. (2000). *J. Appl. Phys.* 88 634.
- O. Carp, C. L. Huisman and A. Reller, (2004). *Progress in Solid State Chemistry*, 32 33-177.
- O. M. Alfano, D. Bahnemann, A. E. Cassano et. al. (2000). *Catal. Today*, 58 199-230.

Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guías para la calidad del agua potable. Vol. 1: Recomendacione.* (Tercera edición). OMS.

Pacheco Montes, M. (2003). *Rainwater Harvesting, a conflict prevention strategy.* Water for Cities.

Pacheco Montes M., (2008). Avances en la Gestión Integral del Agua de Lluvia (GIALL): contribuciones al consumo sostenible de agua, el caso de “Lluviatl” en México. *Revista Internacional de Sostenibilidad núm. 3, Tecnología y Humanismo*, 39-57.

Pacheco Montes, M. (2009). La gestión del agua de lluvia y la reducción de riesgos humanos. La gestión del riesgo humano en América Latina, recopilación de artículos, Panamá, de <http://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/7060/1/pacheco.pdf>

Pushard, D. The Secret to Successful Rainwater Harvesting: Floating Filter Intakes. Obtenida el 21 de agosto de 2010, de <http://www.harvesth2o.com/floatingfilter.shtml>

R.H. Reed, S.K. Mani and V. Meyer, (2006). Solar photo-oxidative disinfection of drinking water: preliminary field observations, *Letters in Applied Microbiology*.

Sangwook Lee, In-Sun Cho, Ji Hae Lee, Dong Hoe Kim, Dong Wook Kim, Jin Young Kim, Hyunho Shin, Jung-Kun Lee, O Hyun Suk Jung, Nam-Gyu Park, Kyungkon Kim, Min Jae Ko, and Kug Sun Hong. (2010). Two-Step Sol-Gel Method-Based TiO₂ Nanoparticles with Uniform Morphology and Size for Efficient Photo-Energy Conversion Devices. *Chem. Mater.*

Soteris, A. (2004) Solar Thermal Collectors and applications. *Elsevier, Progress in Energy and combustion science.*

T. M. Joyce, K. G. McGuigan, M. Elmore-Meegan, and R. M. Conroy, (1996). Inactivation of Fecal Bacteria in Drinking Water by Solar Heating. *Applied and environmental microbiology.*

T. Matsunaga, R. Tomoda, T. Nakajima y H. Wake, (1985). *FEMS Microbiol. Lett.*, 29(1-2), 211.

UNHABITAT, (2005). Rainwater Harvesting and Utilization. *Blue Drop Series.* Nairobi

U. Diebold, (2003). *Surf. Sci. Rep.* 48 53-229.

Unidad de Apoyo Técnico en Saneamiento Básico Rural (2001). *Guía de diseño para captación del agua de lluvia*, Lima, Perú: UNATSABAR.

Vélez-Colmenares, J. J., Acevedo, A., Nebot, E. (2011). Effect of recirculation and initial concentration of microorganisms on the disinfection kinetics of *Escherichia coli*. *Desalination*, 280 (20-26).

Vázquez, A. (2007). *Síntesis de dióxido de titanio por el método sol-gel para la degradación de azul de metileno.* Tesis de Licenciatura, FESC, UNAM, Cuautitlán Izcalli, México.

W.H. Glaze, (1987). *Environ. Sci. Technol.*, 21,224.

W.H. Glaze, J.W. Kang y D.H. Chapin. (1987) *Ozone Sci. & Technol.*, 9, 335.

W. M. Chiu, C. F. Yang and Y. H. Chao, (2007). *J. Appl. Polym. Sci.* 103 2271-2280.

ZAUNDERER, J. and HUTCHINSON C.F., (1988) *A review of water harvesting techniques of the Arid Southwestern US and North Mexico.* (Draft) Working paper for the World Bank's Sub-Saharan Water Harvesting Study.