



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**SISTEMA DE CAPTACIÓN Y  
APROVECHAMIENTO PLUVIAL PARA UN  
ECOBARRIO DE LA CD. DE MÉXICO**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

AMBIENTAL

PRESENTA:

**JESÚS HIRAM GARCÍA VELÁZQUEZ**

TUTORA:

**DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ**



2012

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Pedro Martínez Pereda

Secretario: Dr. Alejandro Vargas Casillas

Vocal: Dra. Georgina Fernández Villagómez

1er Suplente: Dr. Rodolfo Sosa Echeverría

2do Suplente: Dr. Humberto Bravo Álvarez

Lugares donde se realizó la tesis:

Facultad de Ingeniería de la UNAM

Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM

Facultad de Química de la UNAM

**TUTORA DE TESIS:**

Georgina Fernández Villagómez

---

**FIRMA**

## AGRADECIMIENTOS

- A mi tutora, la Dra. Georgina Fernández Villagómez de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, por su valiosa conducción y siempre incondicional apoyo.
- A la QFB. Rocío Bautista Benítez y a la QA. Ana Luisa Alarcón Jiménez del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM por su valiosa asesoría y por los análisis de cationes, parámetros fisicoquímicos (pH, alcalinidad y conductividad eléctrica) y su validación.
- A la QFB. María del Carmen Torres Barreda y a Verónica Néquiz Castillo del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM por los análisis de aniones.
- Al Prof. Alejandro Camacho Cruz del Cepario de la Facultad de Química por los análisis de coliformes y mesófilos así como por sus asesoría.
- Al Dr. Humberto Bravo del Centro de Ciencias de la Atmósfera por su apoyo y facilidades en el uso del laboratorio de Contaminación Ambiental así como por sus observaciones.
- Al Dr. Rodolfo Sosa Echeverría por su asesoría sobre contaminación atmosférica y sus valiosas observaciones.
- Al Dr. Alejandro Vargas Casillas Instituto de Ingeniería, por su asesoría en estadística y sus valiosas observaciones.
- Al Dr. Pedro Martínez Pereda de la Facultad de Ingeniería por sus valiosas observaciones.
- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada de agosto de 2009 a julio de 2011.

## RESUMEN

La Ciudad de México se está enfrentando a la insustentabilidad de su sistema de abastecimiento de agua. La mayoría de esta agua se extrae de los acuíferos en mayor cantidad de lo que se recarga. Para complementar este modelo se trae agua de otros estados con el Sistema Lerma-Cutzamala, que sólo en bombeo consume tanta electricidad como la Ciudad de Puebla. Por otro lado, la ciudad está asentada en una cuenca cerrada y sufre inundaciones cada año porque la cantidad de lluvia supera a la capacidad del drenaje.

El aumento de la demanda, la presión hídrica sobre los sistemas de abastecimiento, las fugas y la contaminación han hecho que cada vez sea más frecuente el tandeo de agua y el abastecimiento por medio de autotanques. Es el caso de las comunidades de las zonas periféricas de la ciudad, por lo general asentadas en las partes altas de la cuenca donde la precipitación es mayor. Allí el abastecimiento de agua por medio de autotanques es de lo más común y tiene un costo económico y ambiental alto.

El desarrollo de este trabajo es una respuesta para fortalecer la captación y aprovechamiento pluvial no sólo en el sitio de estudio sino en la Ciudad de México, como parte de una solución sustentable e integral al problema hídrico de la cuenca.

Este trabajo comienza introduciendo, justificando, delimitando y describiendo el método para llegar al objetivo del trabajo, que es proponer un sistema de captación pluvial para el sitio de estudio con base en un análisis de calidad de agua, la literatura encontrada y evaluaciones a los dispositivos descritos en ella.

Después se describe el estado del arte de la captación de lluvia y los antecedentes del sitio de estudio, el Ecobarrio de Santa Rosa Xochiac. A partir de lo anterior, se plantea la etapa experimental, donde se desarrolla un estudio de calidad del agua de lluvia y la evaluación hecha al tratamiento.

Finalmente, con los resultados se presenta una propuesta de diseño, dimensionamiento e implementación de un sistema de captación y aprovechamiento pluvial para beneficio de la comunidad bajo estudio, pero replicable en otros sitios con características similares.

## ABSTRACT

Mexico City is facing the unsustainability of its own water management system. Most of this water comes from the Valley of Mexico aquifer, which is heavily overexploited, with the rest coming from neighboring watersheds through the Lerma-Cutzamala system. This system pumps water uphill to Mexico City, consuming as much electricity as the whole city of Puebla. The city is built in a basin where the rains cause yearly floods since the rainfall exceeds the draining capacity of the sewer system.

Increasing demand, pressure on the existing system, leaks, and contamination are making more and more neighborhoods receive only intermittent grid service, and more people depend on water brought by tanker truck. Such is the situation of the peripheral areas of the city, usually built on the hillsides where rainfall also happens to be most abundant. These areas depend heavily on tanker trucks, which is a very expensive and polluting method of delivering water.

This project represents a response to the situation by promoting rainwater harvesting for the whole of Mexico City as part of an integral and sustainable solution to the water problem in the Valley of Mexico.

It begins by introducing, justifying and detailing the methods that lead to the object of the work, proposing a rainwater harvesting system for the study site which develops out of water quality studies, literature reviews, and the evaluation of systems and components described there. Next, it describes the current state of the art in rainwater harvesting and background information on the study site, which is an eco neighborhood in Santa Rosa Xochiac. From this, the experimental stage of the work is described in which rainwater quality is studied and treatment systems are evaluated.

Finally, the results of the studies are used to present a design proposal, as well as the recommendations for scale and implementation, for the installation of a rainwater harvesting system to benefit the community in question, which is also replicable in other areas with similar characteristics.

# CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABLAS.....	10
1 INTRODUCCIÓN.....	12
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	13
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	14
1.2.2 OBJETIVOS PARTICULARES.....	14
1.3 ALCANCE Y LIMITACIONES.....	14
1.4 METODOLOGÍA GENERAL.....	14
2 MARCO TEÓRICO.....	16
2.1 DESARROLLO HISTÓRICO.....	16
2.2 SITUACIÓN ACTUAL.....	18
2.2.1 ÁFRICA.....	18
2.2.2 ASIA.....	19
2.2.3 OCEANÍA E ISLAS.....	20
2.2.4 EUROPA.....	20
2.2.5 SUDAMÉRICA.....	21
2.2.6 NORTE Y CENTROAMÉRICA.....	21
2.2.7 MÉXICO.....	21
2.3 DEFINICIÓN Y CLASIFICACION DE LA CAPTACIÓN PLUVIAL.....	24
2.4 PUNTOS CLAVE.....	25
2.5 COMPONENTES BÁSICOS.....	26
2.5.1 ÁREA DE CAPTACIÓN.....	26
2.5.2 CONDUCCIÓN.....	26
2.5.3 ALMACENAMIENTO.....	26
2.5.4 OTROS COMPONENTES.....	26
3 ANTECEDENTES DEL SITIO DE ESTUDIO.....	29
3.1 SANTA ROSA XOCHIAK.....	29
3.2 SITUACIÓN ACTUAL.....	29
3.3 EL ECOBARRIO DE SANTA ROSA XOCHIAK.....	29
3.3.1 INFRAESTRUCTURA DEL ECOBARRIO.....	30
3.4 GEOGRAFÍA DEL SITIO DE ESTUDIO.....	32
3.4.1 PRECIPITACIÓN.....	34

3.4.2	SITUACIÓN AMBIENTAL DEL ECOBARRIO.....	41
4	ETAPA EXPERIMENTAL .....	43
4.1	EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LLUVIA.....	43
4.1.1	METODOLOGÍA DE LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA DE LLUVIA .....	43
4.1.2	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA DE LLUVIA .....	46
4.2	PROPUESTA DE TRATAMIENTO DEL AGUA DE LLUVIA.....	53
4.2.1	EVALUACIÓN DEL PREFILTRADO .....	54
4.2.2	EVALUACIÓN DE LA FILTRACIÓN .....	62
4.3	TRATAMIENTO CONTRA MICROORGANISMOS PARA EL AGUA DE LLUVIA .....	67
4.3.1	EXPERIMENTO DE CONSERVACIÓN DE LA CALIDAD FÍSICA DEL AGUA DE LA LLUVIA DURANTE SU ALMACENAMIENTO .....	67
4.3.2	EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO PARA DESINFECTAR EL AGUA DE LLUVIA.....	70
5	GUÍA DE DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA .....	74
5.1	USO DEL AGUA DE LLUVIA Y TRATAMIENTO.....	74
5.2	COMPONENTES DEL SISTEMA.....	75
5.2.1	ÁREA DE CAPTACIÓN.....	75
5.2.2	TUBERÍAS Y CANALETAS .....	77
5.2.3	DEPÓSITO DE ALMACENAMIENTO .....	78
5.2.4	COMPONENTES PARA EL TRATAMIENTO PRIMARIO .....	79
5.2.5	COMPONENTES PARA EL TRATAMIENTO SECUNDARIO .....	82
5.2.6	COMPONENTES PARA EL TRATAMIENTO TERCARIO.....	87
5.2.7	COMPLEMENTOS.....	89
5.3	DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA .....	91
5.3.1	CAPACIDAD DE ABASTECIMIENTO DEL SISTEMA .....	91
5.3.2	DIMENSIONAMIENTO DEL VOLUMEN DE ALMACENAMIENTO .....	92
5.3.3	DIMENSIONAMIENTO DE LA TUBERÍA Y CANALETA .....	95
5.3.4	DIMENSIONAMIENTO DEL DESVÍO AL DRENAJE .....	97
5.3.5	DIMENSIONAMIENTO DEL SEPARADOR DE PRIMERA LLUVIA .....	97
5.3.6	DIMENSIONAMIENTO DEL DESARENADOR.....	98
5.4	PROPUESTA DE SISTEMA DE CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO PLUVIAL .....	99
5.4.1	TREN DE TRATAMIENTO.....	99
5.4.2	DISEÑO DE SISTEMA DE CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO PLUVIAL.....	99
5.5	ANÁLISIS COSTO BENEFICIO .....	102
5.5.1	ANÁLISIS PARA 100 M <sup>2</sup> DE SUPERFICIE DE CAPTACIÓN .....	104
5.6	GUÍA RÁPIDA DE MANTENIMIENTO Y BUENAS PRÁCTICAS.....	106

5.7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	107
5.7.1	CONCLUSIONES .....	107
5.7.2	RECOMENDACIONES .....	108
	REFERENCIAS.....	110

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.	Metodología general del trabajo.....	15
Figura 2.1.	Construcción en Yemen diseñada para captar agua de lluvia (Ballén, 2006). .....	16
Figura 2.2.	<i>Chultun</i> maya, depósito subterráneo impermeabilizado con yeso para almacenar agua de lluvia (Gould y Nissen-Petersen, 1999). .....	17
Figura 2.3.	<i>Rojinson</i> , sistema para la utilización de lluvia a nivel comunitario en Tokio, Japón (Ballén, 2006). .....	20
Figura 2.4.	Sistema de captación de lluvia de la casa ecológica del parque Loreto y Peña Pobre, Ciudad de México.....	23
Figura 2.5.	Sistema de captación de lluvia del proyecto Isla Urbana (Isla Urbana, 2011). .....	23
Figura 2.6.	Clasificación general de los sistemas de captación de lluvia (Gould y Nissen-Petersen, 1999). .....	24
Figura 2.7.	Filtro para hojas por caída vertical (a) y centrifugado (b) (Gould y Nissen-Petersen, 1999). .....	27
Figura 2.8.	Separadores de primera lluvia automáticos (Gould y Nissen-Petersen, 1999). .....	28
Figura 2.9.	Desarenador para agua de lluvia (Gould y Nissen-Petersen, 1999).....	28
Figura 3.1.	Consumo bimestral promedio de agua potable por casa en la Delegación Álvaro Obregón, 2005-2009. Las líneas verticales indican los límites de confianza al 95%. Con base en datos del 2010 de SACM.....	31
Figura 3.2.	Estudio del uso del agua potable a nivel domiciliario. ....	32
Figura 3.3.	Ubicación de Santa Rosa Xochiac en la mancha urbana de la Ciudad de México (Google Maps, 2009).....	33
Figura 3.4.	Vista satelital de Santa Rosa Xochiac y del Ecobarrio, indicado en la circunferencia roja (Google Maps, 2009). .....	34
Figura 3.5.	Precipitación anual promedio en el Distrito Federal (CONAGUA, 2009). .....	34
Figura 3.6.	Precipitación promedio anual de 1998 al 2009 con intervalo de confianza al 95 %. Gráficas con base en datos del 2010 de la REDDA.....	35
Figura 3.7.	Precipitación promedio mensual de 1998 al 2009, con intervalos de confianza al 95 %. Gráfica con base en datos del 2010 de la REDDA. ....	36
Figura 3.8.	Porcentaje de semanas lluviosas con respecto al total de mayo a octubre. Gráfica con base en datos del 2010 de SIMAT. ....	36
Figura 3.9.	Intensidad de lluvia, duración de 5 minutos, retorno de 20 años, D.F. (SCT, 2004). .....	37
Figura 3.10.	Intensidad contra duración de las lluvias de la estación Exconvento Desierto de los Leones (SCT, 2004). .....	38
Figura 3.11.	Promedios ponderados de pH anuales de 1998 al 2009 con intervalos de confianza al 95 %. Con base en datos del 2010 de la REDDA.....	39
Figura 3.12.	Promedio ponderado de pH mensual de 1998 al 2009. Incluye límites de confianza al 95% y línea de tendencia. Con base en datos del 2010 de la REDDA. ....	39
Figura 3.13.	Porcentaje de lluvias semanales por pH con respecto al total de mayo a octubre de 1998 al 2009.....	40



Figura 4.1. Metodología de evaluación de la calidad del agua de lluvia .....	43
Figura 4.2. Puntos de muestreo en una casa del Ecobarrio para la evaluación de la calidad de agua de lluvia. ....	45
Figura 4.3. Color verdadero en agua de lluvia captada por dos superficies. ....	46
Figura 4.4. Turbiedad en agua de lluvia captada por dos superficies. ....	47
Figura 4.5. Concentración de sólidos suspendidos totales en agua de lluvia captada por dos superficies. ....	47
Figura 4.6. Concentración de sólidos sedimentables en agua de lluvia captada por dos superficies. ....	48
Figura 4.7. Pluviómetros de fabricación casera y pluviómetro certificado marca <i>Productive Alternatives Inc.</i> .....	48
Figura 4.8. pH de agua de lluvia captada por tres puntos de muestreo. ....	49
Figura 4.9. CE en agua de lluvia captada por tres puntos de muestreo. ....	50
Figura 4.10. Concentración de $SO_4^{2-}$ en agua de lluvia captada por tres superficies.....	50
Figura 4.11. Concentración de $NO_3^-$ en agua de lluvia captada por tres superficies. ....	51
Figura 4.12. Concentración de $Cl^-$ en agua de lluvia captada por tres superficies. ....	51
Figura 4.13. Concentración de $Na^+$ en agua de lluvia captada por tres superficies.....	51
Figura 4.14. Arreglo para evaluación de separador de sólidos grandes. ....	54
Figura 4.15. Separadores de sólidos grandes, (a) y (c) son propuestas de Gould y Nissen-Petersen (1999). ....	55
Figura 4.16. Resultado de evaluación de la eficiencia de aprovechamiento de agua en separadores de sólidos. ....	56
Figura 4.17. Separador de primera agua de lluvia: (d) modelo de UNATSABAR, (e) modelo de Isla urbana y (f) modelo propuesto por este trabajo. ....	58
Figura 4.18. Arreglo de evaluación del clarificador.....	60
Figura 4.19. Dispositivo desarenador y sus variables. ....	61
Figura 4.20. Eficiencia de remoción de sólidos sedimentables con desarenador y sus variables. ...	61
Figura 4.21. Diseño de vasos comunicantes para el ensayo de conductividad hidráulica. ....	63
Figura 4.22. Ensayo de conductividad hidráulica. ....	64
Figura 4.23. Diseño de evaluación de los filtros a presión.....	66
Figura 4.24. Eficiencia de flujo con filtrado a presión.....	67
Figura 4.25. A la izquierda se muestran los recipientes con agua de lluvia sin tratamiento. A la derecha los que recibieron el tratamiento de 0.5 mg/l de $CuSO_4$ . ....	69
Figura 4.26. Resultados de turbiedad del experimento de conservación con 0.5 mg de $CuSO_4$ . ....	70
Figura 4.27. Resultados de color verdadero del experimento de conservación con 0.5 mg de $CuSO_4$ . ....	70
Figura 4.28. % RBMA con 3 tratamientos. ....	72
Figura 4.29. % RBCT con 3 tratamientos.....	72
Figura 5.1. Diferentes tipos de techo como superficies de captación. De izquierda a derecha, cemento impermeabilizado con terminado en gravilla, lámina metálica y policarbonato. ....	77
Figura 5.2. Canaleta de zinc y tubería de PVC.....	78
Figura 5.3. Depósitos de almacenamiento de agua de lluvia. De izquierda a derecha, tanque de ferrocemento, <i>quicktank</i> de geomembrana y de lámina metálica.....	79
Figura 5.4. Separador de sólidos grandes modelo “b”, implementado con una malla metálica en forma cilíndrica dentro de una te de PVC con tapón.....	80
Figura 5.5. Propuesta de mejoramiento al separador de primera lluvia de Isla Urbana. ....	81

Figura 5.6. A la izquierda un desarenador rectangular transparente y a la derecha uno cilíndrico propuesto por Chacón <i>et al.</i> (2011). .....	81
Figura 5.7. $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ . .....	82
Figura 5.8. Dispositivo automático dosificador de iones de plata para tanques de almacenamiento. ....	83
Figura 5.9. Dosificación de solución comercial de $\text{NaClO}$ por litro de agua a tratar .....	85
Figura 5.10. Arreglo de filtrado del proyecto Isla Urbana (Isla Urbana, 2011). .....	87
Figura 5.11. Regadera ahorradora con filtro de carbón activado integrado. ....	87
Figura 5.12. Lámpara de luz UV contra microorganismos para potabilización de agua. ....	88
Figura 5.13. Ejemplo de equipo ozonador para tratamiento terciario del agua antes de su consumo. ....	89
Figura 5.14. Válvulas <i>check</i> para evitar el regreso de agua del drenaje a la cisterna. ....	89
Figura 5.15. Sistema mecánico de flotación para mantener un nivel de reserva en el tanque de almacenamiento de agua. ....	90
Figura 5.16. Pichancha flotante para mejorar la calidad del agua (3PTechnik, 2011). ....	90
Figura 5.17. Ingreso del agua al tanque de almacenamiento para reducir turbulencia (Mechell <i>et al.</i> , 2010). ....	91
Figura 5.18. Reductor de turbulencia de entrada a la cisterna. ....	91
Figura 5.19. Capacidad de abastecimiento del sistema de captación con las lluvias de mayo a octubre para diferentes coeficientes de captación. ....	92
Figura 5.20. Método de la mayor diferencia entre con abastecimiento y consumo. ....	94
Figura 5.21. Gráfica de determinación del volumen de almacenamiento máximo necesario según consumo mensual por casa y área de captación. ....	94
Figura 5.22. Tren de tratamiento para aprovechamiento pluvial por etapas de tratamiento. ....	99
Figura 5.23. Diseño del sistema de captación y aprovechamiento pluvial. ....	100
Figura 5.24. Componentes recomendados en tanque de almacenamiento. ....	101
Figura 5.25. Tratamiento recomendado para baños. ....	101
Figura 5.26. Diseño del sistema en cocina, sólo en caso de beber o cocinar con el agua de lluvia. ....	102
Figura 5.27. Abastecimiento de agua a nivel doméstico con sistema de captación pluvial con $100 \text{ m}^2$ , plan de ahorro y autotanques. ....	105
Figura 5.28. Cobertura de abastecimiento con sistema de aprovechamiento pluvial y plan de ahorro. ....	105

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Clasificación de los sistemas de captación de lluvia por diferentes rubros. ....	25
Tabla 2.2. Clasificación de filtros. ....	27
Tabla 3.1. Promedio de consumo de agua potable en dos sitios vecinos similares a Santa Rosa Xochiac (SACM, 2010). ....	32
Tabla 3.2. Intensidad de lluvia de la estación Desierto de los Leones, periodo de retorno de 20 años. ....	37
Tabla 3.3. Iones en precipitación húmeda de la estación Exconvento Desierto de los Leones de 1998 a 2009. ....	41
Tabla 3.4. Compilación y comparación de estudios de metales pesados en agua de lluvia de Ciudad Universitaria. ....	41
Tabla 4.1. Puntos de muestreo y parámetros. ....	44

Tabla 4.2. Equipo utilizado para la medición de los parámetros .....	46
Tabla 4.3. Comparación de los promedios ponderados de agua de lluvia captada por las tres superficies, agua de autotanque y la NOM-127-SSA1-1994. ....	52
Tabla 4.4. Concentración de microorganismos en agua de lluvia captada por tres superficies y el límite de la NOM-127-SSA1-1994 .....	53
Tabla 4.5. Evaluación cualitativa de los dispositivos para separar sólidos grandes. ....	56
Tabla 4.6. Comparación de equipo de tratamiento primario para aprovechamiento de agua de lluvia. ....	59
Tabla 4.7. Evaluación del desarenador y sus variantes.....	62
Tabla 4.8. Evaluación cualitativa del filtro rápido por gravedad.....	65
Tabla 4.9. Evaluación cualitativa de los tratamientos para desinfectar el agua de lluvia. ....	73
Tabla 5.1. Uso del agua de lluvia y tratamiento.....	75
Tabla 5.2. Unidades del sistema.....	76
Tabla 5.3. Coeficientes de captación de superficies comunes en techos .....	77
Tabla 5.4. Tiempo de contacto para tratar el agua de lluvia por cloración. ....	84
Tabla 5.5. Ejemplo de dosificación semanal de producto en solución comercial de NaClO con 1.1 g/ml y 5 % en masa. ....	86
Tabla 5.6. Método de determinación del volumen de almacenamiento máximo necesario por la diferencia máxima.....	93
Tabla 5.7. Área máxima de captación por intensidad de lluvia y diámetro de tubería de bajada vertical.....	95
Tabla 5.8. Elección del diámetro adecuado de la tubería vertical según el área de captación .....	96
Tabla 5.9. Dimensiones de la de la canaleta según intensidad de lluvia e inclinación. ....	96
Tabla 5.10. Elección del diámetro adecuado de la tubería horizontal según área de captación. ....	97
Tabla 5.11. Determinación del volumen de separación de acuerdo a la turbiedad deseada a la salida. ....	98
Tabla 5.12. Dimensionamiento del clarificador considerando 118 mm/h de intensidad máxima. ..	98
Tabla 5.13. Cálculo del beneficio de un sistema de aprovechamiento pluvial según área de captación y volumen de almacenamiento necesario.....	103
Tabla 5.14. Cálculo de beneficio de un sistema de aprovechamiento pluvial adicional a un plan de ahorro de agua. ....	104

# 1 INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos naturales renovables más importantes para la humanidad y los demás seres vivos del planeta, pues casi ninguna actividad podría realizarse sin ella. Hoy en día la sociedad enfrenta graves y complejos problemas relacionados con el agua. La contaminación, deforestación y la sobreexplotación de acuíferos, ha mermado las reservas abastecedoras de muchas ciudades, como la Ciudad de México.

La Ciudad de México se ubica en una cuenca cerrada, donde la precipitación<sup>i</sup> media anual es de 700 l/m<sup>2</sup> de superficie en promedio, lo que significa una enorme cantidad de agua que no tiene una salida natural. El actual modelo hidráulico se encarga de tratar de sacar toda esa agua de lluvia mezclada con el agua residual para evitar inundaciones, pero muchas veces queda rebasado. En algunas ocasiones se requiere bombear el agua del drenaje porque la Ciudad se ha ido hundiendo por debajo de las salidas hechas tiempo atrás. Además, el drenaje muchas veces sufre de taponamientos por basura que agravan la situación y es frecuente que cada año miles de casas quedan inundadas con aguas negras (UAM, 2009).

Por otro lado, el modelo hidráulico abastece de agua potable a la Ciudad de dos fuentes principales. La primera es el agua que se extrae de fuentes internas, como el acuífero y manantiales, que representan aproximadamente el 63 % del abastecimiento total; la segunda es el agua del sistema Lerma-Cutzamala que complementa al anterior con el 37 % restante. Este modelo además de ser insustentable, no está cumpliendo con la demanda actual ya que en muchas zonas hay reparto de agua de red por tandeo, distribución por autotanques y en los peores casos no hay abastecimiento de agua potable a la población y cada familia debe buscarlo. Las fugas en la red hidráulica de agua potable agudizan el problema (CONAGUA, 2008; INEGI, 2005).

La insustentabilidad del modelo actual está haciendo que la situación tarde o temprano colapse. El agua del acuífero además de que está expuesta a la contaminación, no se recarga a la misma velocidad que se extrae y dicha sobreexplotación trae consigo el constante hundimiento de muchas zonas.

El agua que se trae a la Ciudad de México con el sistema Lerma-Cutzamala, para tratar de complementar la demanda, tiene que ser bombeada más de 1 km de altura de la presa Colorines, en el Estado de México, por medio de 102 plantas de bombeo y esto tiene un consumo de electricidad similar al de la Ciudad de Puebla (UAM, 2009; Lomnitz, 2011).

Si a todo lo anterior le sumamos los problemas sociales, ambientales y económicos relacionados con el modelo hidráulico actual, no es difícil pensar que la actual crisis de agua en la Ciudad no es un problema de escases sino de mal manejo de agua y que afortunadamente tiene solución.

El aprovechamiento del agua de lluvia es parte de una solución sustentable e integral a la compleja crisis del modelo hidráulico en la Cuenca de la Ciudad de México. Por un lado ayuda al abastecimiento de agua potable, potencialmente disminuye la presión sobre el acuífero, reduce la

---

<sup>i</sup> Precipitación se refiere al agua atmosférica que cae sobre la superficie de la tierra en cualquier forma, ya sea lluvia, escarcha, granizo o nieve (DSENY, 2008).

demanda al sistema Lerma-Cutzamala, ayuda a evitar inundaciones y por si fuera poco la inversión que requiere es menor que cualquier obra hidráulica centralizada.

Las condiciones geográficas, sociales y económicas de la Ciudad de México hacen que la captación y aprovechamiento pluvial sea una propuesta viable en muchos casos (Isla Urbana, 2011).

Este trabajo tiene como objetivo fortalecer la propuesta de la captación y aprovechamiento pluvial desde el campo de la Ingeniería Ambiental. Para ello se desarrolla el caso de estudio en el Ecobarrio<sup>i</sup> de Santa Rosa Xochiac, que es una comunidad al sur poniente de la Ciudad de México, en la zona de amortiguamiento entre la mancha urbana y los suelos de conservación. En el asentamiento la mayor parte habitantes no cuentan con red de agua potable y requieren que autotanques cubran su demanda, método poco eficiente y caro ambiental y económicamente.

## 1.1 JUSTIFICACIÓN

El sitio de interés para el desarrollo de este trabajo es el Ecobarrio de Santa Rosa Xochiac, que se ubica al surponiente de la Ciudad de México, en la Delegación Álvaro Obregón. Gran parte de los habitantes del sitio no cuentan con red de agua potable, por lo que se abastecen por medio autotanques, método poco eficiente que no cubre completamente con la necesidad y tiene costos económicos y ambientales muy altos.

Ninguna de las actividades básicas humanas, como la alimentación, la salud, la educación, la higiene, el trabajo o la vivienda pueden ser satisfechas sin abastecimiento de agua potable de calidad y en cantidad suficiente. Y cada vez es menos rentable traer el agua de otros estados a cientos de kilómetros de distancia o seguir explotando el acuífero. Es decir, la infraestructura no es el único remedio a la escasez que se enfrenta.

Estudios de viabilidad hechos en la zona concluyen que la aplicación de ecotecnias<sup>ii</sup>, como la captación pluvial, para cubrir las necesidades de los habitantes son importantes para mitigar la contaminación ambiental y cumplen con el criterio de sustentabilidad que requiere la zona (De Lorenz, 2009).

Por ello se propone aprovechar que en la zona hay un promedio de lluvia anual de 1000 a 1500 mm<sup>iii</sup> (CONAGUA, 2009) y que las tecnologías para este fin implican inversión baja y ayudan a disminuir el impacto ambiental y económico de un asentamiento humano. Por ejemplo, una vivienda con 50 m<sup>2</sup> de techo puede captar potencialmente más de 50 000 litros de agua durante la temporada de lluvia.

De acuerdo a lo anterior, el reto es el diseño de un sistema de captación y aprovechamiento pluvial para beneficio de los pobladores de la zona.

---

<sup>i</sup> Un ecobarrio es una comunidad de personas, que con una visión común y enfocada a largo plazo, se organiza con el propósito de mejorar su calidad de vida y lograr el bienestar humano en armonía con el ambiente.

<sup>ii</sup> Ecotecnia es aquella tecnología o conocimiento técnico que ayuda a conservar la ecología y/o disminuir impactos por actividades humanas.

<sup>iii</sup> Un milímetro de lluvia equivale a 1 l/m<sup>2</sup> de área de captación.

## **1.2 OBJETIVOS**

A continuación se presenta el objetivo general y los particulares.

### **1.2.1 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar un sistema de captación y aprovechamiento de agua de lluvia a nivel doméstico, para el Ecobarrio de Santa Rosa Xochiac en la Delegación Álvaro Obregón de la Ciudad de México, considerando las características del sitio de interés y los resultados de este trabajo para su propuesta en beneficio de los habitantes interesados.

### **1.2.2 OBJETIVOS PARTICULARES**

1. Comprobar las características de la precipitación húmeda<sup>i</sup> en la zona de estudio.
2. Evaluar la calidad del agua de lluvia captada por una superficie con base en algunos parámetros primordiales de la NOM 127-SSA1-1994, que establece los límites permisibles del agua para uso y consumo humano.
3. Definir los componentes del sistema y evaluar el tratamiento primario para mejorar las características del agua de lluvia que escurre por un techo de captación y el tratamiento para conservarla dentro de la norma.
4. Diseñar un sistema de aprovechamiento pluvial que sea automático, escalable, flexible y accesible, con base en las evaluaciones y el uso que se destinará al agua.
5. Que el actual trabajo sirva como un antecedente y guía de instalación, mantenimiento y buenas prácticas que permita mejorar, implementar y replicar el sistema de captación.

## **1.3 ALCANCE Y LIMITACIONES**

Se diseñará un sistema de captación y aprovechamiento pluvial doméstico para el Ecobarrio de Santa Rosa Xochiac, en la Delegación Álvaro Obregón del Distrito Federal<sup>ii</sup>. El diseño propuesto se ajustará a los resultados del trabajo, calidad del agua según su uso y factibilidad técnica-económica.

El sistema propuesto se recomendará como un proyecto piloto para su replicación en la zona de estudio.

## **1.4 METODOLOGÍA GENERAL**

La siguiente es la metodología general de este trabajo y se ilustra en la Figura 1.1.

1. Revisión del marco teórico. Revisión de literatura relacionada, información oficial, historia, antecedentes, situación actual, estudios relacionados, casos semejantes, etc.

---

<sup>i</sup> Se refiere a la captación de lluvia de forma separada de las partículas sólidas que se depositan por efecto de la gravedad, por medio de colectores automáticos.

<sup>ii</sup> La Ciudad de México es una urbe que se extiende por el Distrito Federal y área conurbada en el Estado de México.

2. Etapa experimental. Incluye el estudio de la calidad del agua de lluvia en una casa del Ecobarrio para la propuesta y evaluación de un tren de tratamiento primario, además de un experimento de conservación del agua de lluvia.
3. Diseño del sistema. Se toma en cuenta la selección de alternativas, materiales, tecnologías, implementación, dimensionamiento y análisis costo-beneficio.
4. Conclusiones y recomendaciones.

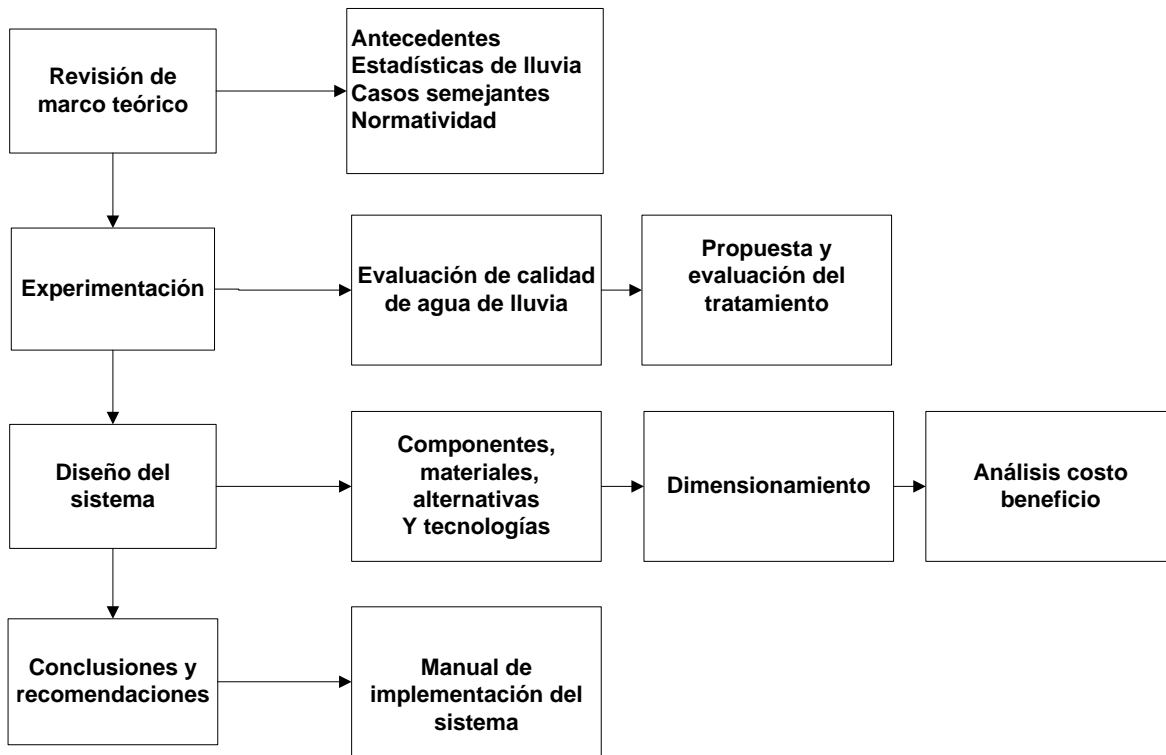


Figura 1.1. Metodología general del trabajo

## 2 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se desarrolla un marco teórico general sobre la captación de lluvia que sirve de referencia para el resto del trabajo.

### 2.1 DESARROLLO HISTÓRICO

Desde sus inicios el ser humano ha aprovechado el agua superficial como primera fuente de abastecimiento, consumo y vía de transporte por ello el valle de los ríos fue el lugar donde se establecieron las primeras civilizaciones. Allí desarrolló la agricultura y con ello la aplicación más natural de la lluvia. Estos primeros humanos no dependieron directamente del agua de lluvia para su supervivencia debido a la presencia permanente del agua superficial.

Cuando las civilizaciones crecieron demográficamente, el agua y el alimento comenzó a ser más demandado, por lo que algunos tuvieron que migrar a zonas más áridas. Entonces comenzó el desarrollo de formas de captación de lluvia como alternativa para el riego de cultivos y el consumo de la población en general (Ballén, 2006).

Aunque no se sabe con precisión el origen de los sistemas de captación de lluvia, autores como Ballén (2006) y Gould y Nissen-Petersen (1999) coinciden que provienen de las primeras civilizaciones del Medio Oriente. A continuación se mencionan algunos ejemplos relevantes de las formas de aprovechamiento de lluvia a través de la historia.

En Baluchistan, en la India, hay evidencia de estructuras de piedra para embalse de agua de lluvia, que datan del tercer milenio a.C. (Gould y Nissen-Petersen, 1999).

En el Desierto de Negev, en Israel y Jordania, se descubrieron sistemas de captación de lluvia que tienen 4000 o más años de antigüedad. Estos sistemas consistían en el desmonte de loma para aumentar la escorrentía superficial, que era entonces dirigida a predios agrícolas en las zonas más bajas. La Figura 2.1 muestra patios y terrazas utilizadas para captar y almacenar agua de lluvia de las zonas altas de Yemen.



Figura 2.1. Construcción en Yemen diseñada para captar agua de lluvia (Ballén, 2006).

Durante los tiempos de la República Romana, en los siglos III y IV a.C., la Ciudad de Roma en su mayoría estaba formada por viviendas unifamiliares denominadas *la Domus* que contaban con un espacio principal a cielo abierto, conocido como *atrium*, en el que se instalaba un estanque central



para recoger el agua de lluvia llamado *impluvium*. La lluvia entraba por un orificio en el techo llamado *compluvium*.

En la meseta de Loess, en la provincia de Gansu en China se han hallado pozos y jarras para la captación de lluvia con más de 2000 años de antigüedad.

En Irán siguen existiendo los *abarbans*, que son los sistemas tradicionales locales para la captación y almacenamiento de la lluvia.

En América se conoce el caso de los mayas en Yucatán que al pie de la montaña Puuc recogían el agua de lluvia y la almacenaban en *chultuns*, que eran cisternas excavadas en el subsuelo e impermeabilizadas con yeso, como se muestra en la Figura 2.2. El agua la utilizaban para riego y abastecimiento de la población.

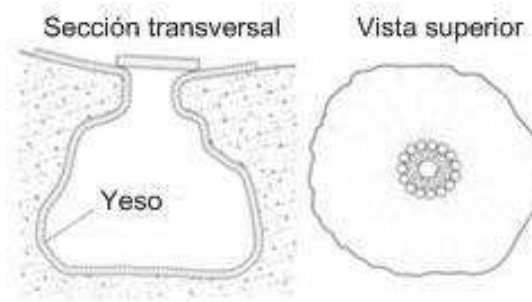


Figura 2.2. *Chultun* maya, depósito subterráneo impermeabilizado con yeso para almacenar agua de lluvia (Gould y Nissen-Petersen, 1999).

En Cerros, una ciudad del actual Belice, en el año 200 d.C. los habitantes cavaron canales y depósitos para administrar el agua de lluvia con lo que permitían que la gente permaneciera en la zona durante la estación seca cuando escaseaba el agua.

En otras zonas de las tierras bajas, como Edzná, Campeche, los pobladores precolombinos de esta ciudad construyeron un canal de casi 50 m de ancho y de 1 m de profundidad para aprovechar el agua de lluvia. El canal proporcionaba agua para beber y regar los cultivos (Ballén, 2006).

Siglos después el uso de los sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia decreció debido a la imposición de métodos y obras para la utilización del agua superficial y subterránea, como presas, acueductos, pozos de extracción y sistemas de irrigación. En la península de Yucatán y otras zonas de América se dejó de lado el aprovechamiento del agua de lluvia cuando los colonizadores introdujeron otros sistemas de agricultura, animales domésticos, plantas y métodos de construcción europeos. Una situación similar sucedió en India con la colonización inglesa, que obligó a los nativos a abandonar sus metodologías tradicionales.

Diversas sociedades humanas, en la actualidad y el pasado, han sobrevivido en ambientes donde hay carencia o escasez de agua superficial y subterránea. Los sistemas de captación y aprovechamiento de la lluvia han ayudado a resolver el problema de abastecimiento de agua para

uso doméstico y agrícola y representan una opción real para incrementar el volumen disponible para uso humano y de otros seres vivos además de ser una opción sustentable (Anaya, 1998).

## **2.2 SITUACIÓN ACTUAL**

En el siglo XIX y XX la mayoría de las ciudades del mundo tuvieron un gran crecimiento. Los ingenieros solucionaron el suministro de agua a la población por medio de la acumulación de agua superficial para luego ser distribuida por una red centralizada de acueducto. En muchas ocasiones se recurrió a la explotación del agua subterránea. En cualquiera de los casos se reduce o anula la posibilidad de sistemas de aprovechamiento de lluvia u otros sistemas alternativos más amigables con el ciclo hidrológico natural (Ballén, 2006).

En épocas recientes, el crecimiento acelerado de la población mundial está ejerciendo presión sobre las fuentes finitas de agua. Por ello, en las últimas dos décadas el interés por la captación del agua de lluvia se ha incrementado. Mientras que en algunas regiones nunca se ha dejado de utilizar el agua de lluvia debido a la escasez de otras fuentes, como el caso de islas volcánicas y zonas áridas, en otros sitios su uso se está expandiendo rápidamente, particularmente por países en vías de desarrollo de África y Asia (Gould y Nissen-Petersen, 1999).

Según Ballén (2006), la mayor parte de los sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia son el resultado de 3 factores principales:

- la necesidad y demanda del recurso hídrico;
- las condiciones disponibles: precipitación pluvial, costo de inversión y las características de los materiales de construcción;
- y las condiciones sociales y ambientales de cada región.

Por lo general, donde no existe red de agua potable, el suministro es deficiente o el agua tiene un costo muy alto, se piensa en buscar sistemas alternativos de abastecimiento. Por ello la documentación sobre sistemas de aprovechamiento de lluvia se limita a las acciones realizadas en las últimas décadas en zonas del planeta con las deficiencias mencionadas anteriormente.

La captación de lluvia se está desarrollando tanto en zonas rurales como urbanas, a nivel doméstico y comunitario, para uso agrícola y humano, en países desarrollados y en vías de desarrollo. Algunos casos concretos son los siguientes.

### **2.2.1 ÁFRICA**

La problemática del abastecimiento de agua potable es de carácter global, pero en el continente africano existe una situación muy crítica debido a la alta concentración de pobreza que imposibilita la obtención de recursos y tecnología necesaria para construcción y operación de un sistema de acueducto adecuado.

En algunas zonas de África se ha producido en años recientes una expansión de los sistemas de aprovechamiento lluvia, pero el proceso de implantación de esta tecnología ha sido lento, debido a la baja precipitación, el reducido número y tamaño de las cubiertas impermeabilizadas y el alto costo en la construcción de los sistemas en relación a los ingresos familiares. Con todo esto la

captación de lluvia es muy difundida con grandes proyectos en Botswana, Togo, Mali, Malawi, Sudáfrica, Namibia, Zimbawe, Mozambique, Sierra Leona y Tanzania.

Uno de los proyectos adelantados es el de “Sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia de muy bajo costo” el cual se desarrolló con la participación de varias organizaciones africanas y el apoyo de *Development Technology Unit* de Inglaterra. Con estas tecnologías se pretende suplir un porcentaje de la demanda total de las casas a partir de una inversión que no supera los 120 dólares y utilizando los materiales disponibles en la zona.

### **2.2.2 ASIA**

La India es el segundo país con mayor población después de China. Por ello el gran problema es suministrar los servicios básicos a más de 1000 millones de personas. Una solución que se ha tomado para enfrentar estos problemas son las técnicas de aprovechamiento de lluvia. En la India, el monzón es un diluvio breve; allí se dan aproximadamente 100 horas de lluvia por año y en éstas se debe captar y almacenar el agua para el mayor tiempo posible.

En Bangladesh, la recolección de lluvia se ve como una alternativa viable para el suministro de agua segura en áreas afectadas por contaminación con arsénico. Desde 1977, cerca de 1000 sistemas de aprovechamiento de lluvia fueron instalados en el país por la ONG *Forum for Drinking Water Supply & Sanitation*. Aquí se utilizan varios tipos de tanques para el almacenamiento de agua de lluvia: de concreto reforzado, de mampostería y subterráneos. El agua de lluvia almacenada es aceptada como segura y se usa para beber y cocinar.

Al noroeste de China, la peor condición de escasez de agua se da en la meseta de Loess de Gansu por ser una de las áreas más pobres y donde el agua superficial es muy escasa. Debido a esto, desde 1988 se han probado eficientes técnicas de captación de lluvia y en 1995 el gobierno local implementó el proyecto “121”, apoyando económicamente a cada familia para construir un campo de recolección de agua, dos sitios de almacenamiento y un terreno adecuado para cultivar. Este proyecto ayuda a suministrar agua a 1.2 millones de personas y 1.18 millones de cabezas de ganado.

Singapur cuenta con recursos naturales limitados y una creciente demanda de agua. Esto ha llevado a la búsqueda de fuentes alternativas y métodos innovadores para el aprovechamiento del agua. Alrededor del 86 % de la población de Singapur vive en edificios de apartamentos, donde los techos de estos edificios son utilizados para la captación de agua de lluvia; esta es almacenada en cisternas separadas del agua potable, para darle usos diferentes al de consumo humano.

En Tokio, Japón, el aprovechamiento de lluvia es promovido para mitigar la escasez de agua, controlar las inundaciones y asegurar agua para emergencias. A nivel comunitario se están implementando instalaciones llamadas *Ronjinson*, que están introduciendo a la población en el aprovechamiento pluvial. Funcionan recibiendo el agua del techo de la casa, luego se almacena en un pozo subterráneo y después se extrae mediante una bomba manual como se ilustra en la Figura 2.3. El agua colectada es aprovechada para el riego de jardines, aseo de fachadas y pisos, combatir incendios y como agua de consumo en situaciones de emergencia.

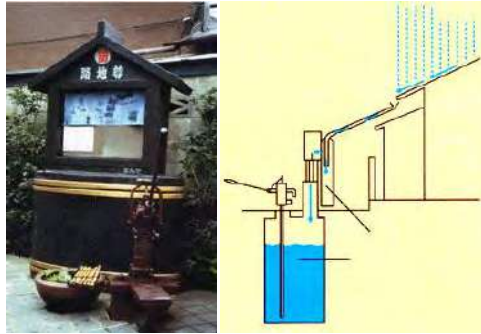


Figura 2.3. *Rojinson*, sistema para la utilización de lluvia a nivel comunitario en Tokio, Japón (Ballén, 2006).

El almacenamiento del agua de lluvia proveniente del escurrimiento de los techos en vasijas de arcilla es un sistema apropiado y económico para obtener agua de alta calidad en Tailandia. Las vasijas se consiguen para diferentes volúmenes, desde 1000 hasta 3000 litros y están equipadas con tapa, grifo y un dispositivo de drenaje. Pueden suministrar agua de lluvia suficiente para una casa con seis personas durante el periodo seco.

### 2.2.3 OCEANÍA E ISLAS

A excepción de los grandes asentamientos, la densidad de población en Australia es muy baja. Debido a esto el agua debe recorrer grandes distancias a través de kilómetros de tubería, haciendo que sea muy costosa o que en algunos lugares remotos no se suministre el servicio. Allí se utiliza el aprovechamiento de lluvia como una solución al problema. En 1994, la Oficina Australiana de Estadística dio a conocer 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 lluvia, de la suma de éstos, el 13 % utiliza el agua para beber y cocinar.

Las poblaciones de algunas islas con escasas corrientes de agua superficial suelen utilizar los sistemas de aprovechamiento pluvial como su forma de suministro. Este es el caso de Micronesia, Rapa-Nui, Bermudas, Islas Vírgenes, Hawái y San Andrés.

### 2.2.4 EUROPA

En 1998 los sistemas de aprovechamiento de pluvial fueron introducidos en Berlín, Alemania, como parte de un desarrollo urbano a gran escala. Además de aprovechar de manera más eficiente el agua superficial, se capta el agua de la lluvia que cae en las cubiertas de algunos edificios y se almacena en un tanque subterráneo. Esta agua es usada para la descarga de inodoros, el riego de zonas verdes y para llenar un estanque artificial.

En otro proyecto de *Belss-Luedecke-Strasse Building State* en Berlín, el agua de lluvia de las cubiertas de algunas casas se descarga en una cisterna con capacidad, junto con el agua de escurrimiento de las calles, espacios de estacionamiento y vías peatonales. El agua es tratada en varios pasos y usada en la descarga de sanitarios y el riego de jardines. El sistema está diseñado para que la mayoría de los contaminantes del flujo inicial sean evacuados al alcantarillado. El sistema retiene aproximadamente el 58 % del agua de lluvia que cae dentro de las instalaciones. A

través de un modelo basado en 10 años de simulación se estimó que el ahorro de agua potable con la utilización de lluvia es de 2 430 m<sup>3</sup> por año. Con este volumen se puede preservar el reservorio de agua subterránea de Berlín.

### **2.2.5 SUDAMÉRICA**

En la década de los noventa en Brasil, muchas organizaciones ambientales se enfocaron en trabajar en el suministro de agua para consumo humano usando sistemas de aprovechamiento de lluvia. En la región noroeste, con promedio anual de lluvia de 200 a 1000 mm, las comunidades nativas tradicionalmente han recolectado agua de lluvia en pozos excavados, pero este sistema no logra satisfacer las necesidades de la población. Por ello una ONG y el gobierno de Brasil iniciaron un proyecto para construir un millón de tanques para la recolección de lluvia para beneficiar a 5 millones de personas.

### **2.2.6 NORTE Y CENTROAMÉRICA**

En barrios de Tegucigalpa, Honduras, se pueden encontrar viviendas acondicionadas con precarios sistemas de aprovechamiento pluvial. Estos sistemas, aún con sus deficiencias, logran mejorar el nivel de vida de los habitantes los usan.

Se estima que los sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia son usados por más de medio millón de personas en al menos 15 estados y territorios de los Estados Unidos. El agua se destina a uso doméstico, agrícola, comerciales e industriales. Existen más de 50 compañías especializadas en el diseño y construcción de sistemas de aprovechamiento pluvial.

En Vancouver, Canadá, se provee de un subsidio para la compra de tanques plásticos para el aprovechamiento del agua de lluvia, como parte de un programa piloto para la conservación del agua. Dicho tanque se utiliza para recolectar el agua proveniente de los techos, siendo utilizada para regar jardines, actividad que demanda más del 40 % del agua total que llega a las viviendas durante el verano. Las proyecciones indican que cada barril podría ahorrar cerca de 4 920 litros de agua durante los meses de verano donde la demanda de agua es más alta.

*Healthy House* es una casa familiar de tres habitaciones con un área de 158 m<sup>2</sup> ubicada en Toronto, Canadá. Esta edificación no depende del sistema de agua municipal, ya que el agua para consumo humano se suministra por medio de un sistema de canales que conducen el agua de lluvia hacia un tanque de almacenamiento donde se le adiciona cal, esta es utilizada para reducir la acidez del agua y darle un sabor fresco. Posteriormente el agua pasa a través de un filtro de arena fina y carbón activado para remover todas las impurezas y por último es sometida a un proceso de desinfección mediante luz ultravioleta.

### **2.2.7 MÉXICO**

Aunque en México las condiciones geográficas son favorables y el desarrollo de este tipo de tecnología es de bajo costo, fácil de construir e implementar, implica poco o nulo consumo de energía, bajo impacto ambiental y muchas otras bondades, en la mayoría del país su uso está limitado a un medio de abastecimiento sólo aplicado en casos extremos de escasez. Existe poca información e interés sobre el potencial de este recurso como una solución sustentable al

problema del agua e incluso cierta resistencia a la implementación de estas tecnologías por falta de estudios sobre el tema.

En tiempos recientes, algunas investigaciones orientadas al aprovechamiento pluvial y la misma necesidad del vital líquido trajeron como consecuencia ejemplos particulares de aprovechamiento. A continuación se presentan cuatro ejemplos de la zona centro del país.

#### **2.2.7.1 GUANAJUATO**

En el pueblo de San Felipe se desarrolló el proyecto “Agua y Vida” a partir de 1996, con almacenamiento de agua. El primer desarrollo tecnológico fue un sistema de aprovechamiento de lluvia que cuenta con una cisterna de 500 m<sup>3</sup> y un área de captación cubierta de piedra laja. La siguiente obra fue construida a las afueras del municipio y se llamó “Techo – Cuenca”, que consta de dos cubiertas con pendiente que se unen en un canal conectado a un depósito de 285 m<sup>3</sup> desde donde se distribuye agua potable a las familias que la necesiten. Varias construcciones oficiales, como el jardín de niños y la escuela municipal, están equipados con sistemas de aprovechamiento de lluvia que es utilizada para la descarga de inodoros, el aseo en general y para regar los jardines. En 6 años, la población ha sido transformada y la mayoría de sus necesidades de agua han sido satisfechas por los sistemas de aprovechamiento pluvial (Ballén, 2006).

#### **2.2.7.2 MORELOS**

En el IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua) existe un proyecto que da seguimiento a localidades como Jumiltepec y Villa Nicolás Zapata. Aquí se adecúan y construyen sistemas de captación y tratamiento del agua de lluvia, a nivel domiciliario y colectivo, respectivamente. Este proyecto se enfoca en poblaciones seleccionadas a partir de un diagnóstico poblacional y socioeconómico que considera determinante la escasez de agua para uso y consumo humano (Garrido, 2009).

#### **2.2.7.3 DISTRITO FEDERAL**

Un proyecto innovador dentro del Parque Ecológico de Loreto y Peña Pobre, es la casa ecológica muestra creada por la colaboración de universidades y empresas. Esta casa además de utilizar celdas que captan la energía solar para generar electricidad y calentar agua con el sol, aprovecha los residuos orgánicos en composta y el agua de lluvia. Para esta última se usan tejas y canaletas simples, dirigidas a una batería de filtros de grava, arena y carbón activado en serie (Simón, 2009).

En la Figura 2.4 se muestra el sistema de captación de lluvia de la casa ecológica del parque Loreto y Peña Pobre. El diseño capta el agua a través del tejado del techo, la conduce por canaletas hacia filtros para remover materia insoluble y después da un tratamiento secundario para la potabilización del líquido.

Un proyecto de asociación civil destacado es “Isla Urbana”. Se sitúa en la Delegación Tlalpan y tiene como objetivo asegurar un futuro sustentable para la Ciudad de México a través de la captación y aprovechamiento pluvial a gran escala. Para ello su trabajo se enfoca en instalar sistemas de captación de lluvia en zonas de bajos recursos que sufren escasez de agua o reciben agua de mala calidad, ya que la carencia de un buen suministro de agua obliga a muchas familias a pagar el servicio de autotanques de agua, método insustentable, ineficiente y sobre todo costoso.

Trabajando junto con los vecinos, otras asociaciones y con el gobierno local, el proyecto ha dejado al menos 500 sistemas entre los vecinos y una cultura de cuidado del agua replicable en muchas áreas similares dentro del cinturón verde de la ciudad (Isla Urbana, 2011).



Figura 2.4. Sistema de captación de lluvia de la casa ecológica del parque Loreto y Peña Pobre, Ciudad de México.

En la Figura 2.5 se esquematiza el sistema de Isla Urbana, que consta básicamente de un desvío al drenaje, un dispositivo de prefiltrado conocido como separador de primera lluvia, cloración en la cisterna y dos filtros a presión.

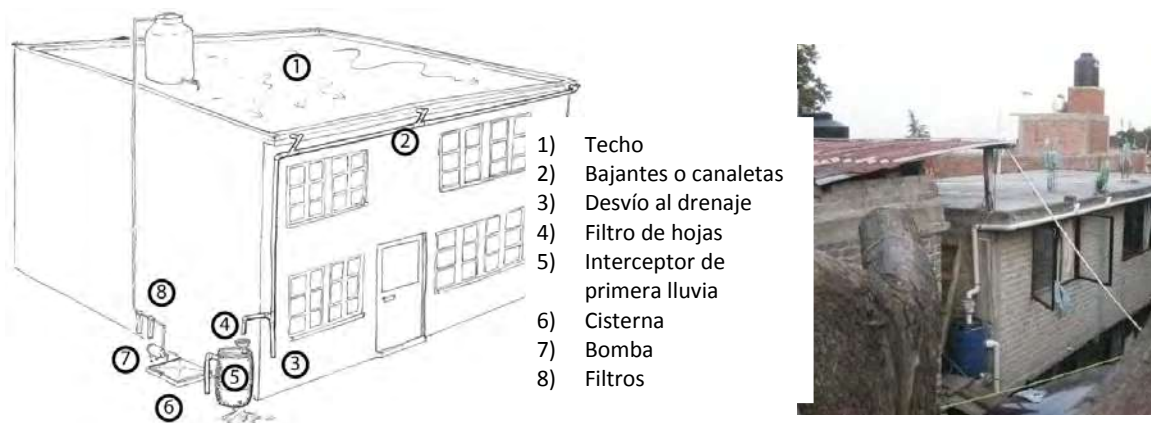


Figura 2.5. Sistema de captación de lluvia del proyecto Isla Urbana (Isla Urbana, 2011).

En general, la captación y aprovechamiento pluvial no es un método masificado en el mundo ni en México, salvo casos específicos, pero la necesidad del recurso agua y las bondades de éste método han desarrollado muchos casos de éxito y un creciente interés en su desarrollo.

## 2.3 DEFINICIÓN Y CLASIFICACION DE LA CAPTACIÓN PLUVIAL

Se puede definir a la captación pluvial como la recolección del escurrimiento de lluvia sobre una superficie para propósitos de aprovechamiento. El concepto hace énfasis en el almacenamiento del agua de lluvia para su utilización posterior. Cuando se enfoca únicamente en el agua que cae en un sitio puntual, se denomina microcaptación o captación de microcuencas.

La captación de lluvia puede ser considerada como una forma rudimentaria de riego, usando surcos, canales, etc. La diferencia es que la idea de la captación está en el control sobre la aplicación del agua colectada y no está sujeta únicamente al momento en el que llueve.

Existe conocimiento sobre una gran variedad de técnicas relacionadas con sistemas de captación y aprovechamiento de agua de lluvia. Dichas técnicas se pueden clasificar con base en sus diferentes fuentes, tipo de esorrentía, técnicas de manipulación, tipo de almacenamiento y a los diferentes usos que se le da al recurso (FAO, 2000).

En la Figura 2.6 se muestra una clasificación general del aprovechamiento de la lluvia propuesta por Gould y Nissen-Pettersen en 1999.

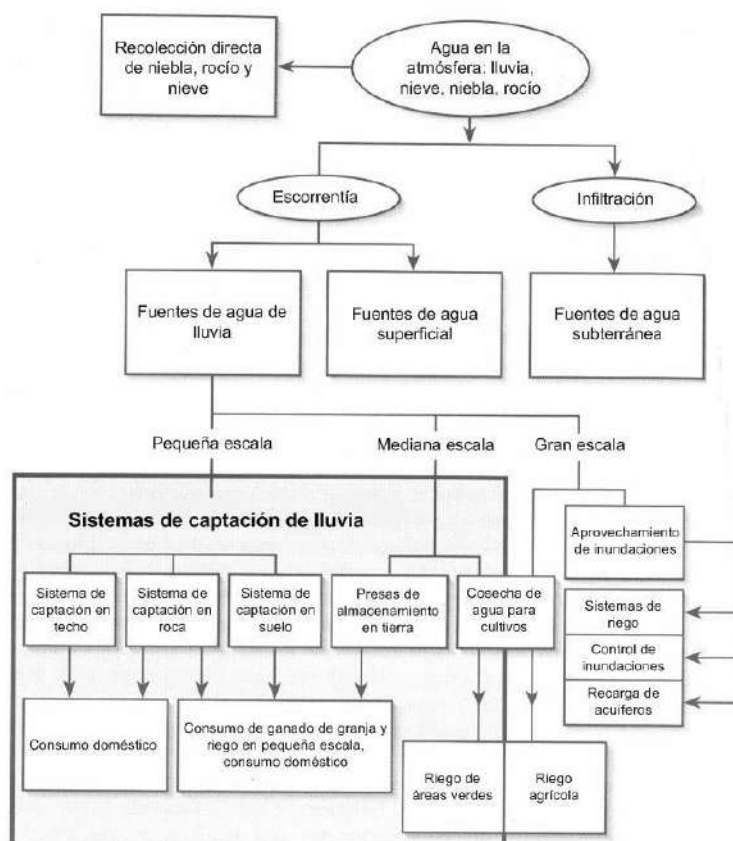


Figura 2.6. Clasificación general de los sistemas de captación de lluvia (Gould y Nissen-Petersen, 1999).



En la Tabla 2.1 se muestra una clasificación sintetizada de la captación de lluvia.

Tabla 2.1. Clasificación de los sistemas de captación de lluvia por diferentes rubros.

Clasificación	Ejemplos
Por fuente	Precipitación Niebla Nieve
Por escurrimiento	En terrazas y patios En techos En tierra y campo En roca
Por área o extensión	Grandes extensiones (comunal) Extensiones medianas Extensiones pequeñas (microcaptación)
Por almacenamiento	Cisterna (cemento, plástico, etc.) Tanque (plástico, metálico, etc.) Suelo (roca, suelo impermeabilizado, etc.)
Por uso o aprovechamiento	Animales Humano Agricultura o riego

Fuente: Modificación a la clasificación de FAO del 2000.

## 2.4 PUNTOS CLAVE

A continuación se enlista un resumen de las principales ventajas y desventajas que representa la implementación de éste tipo de ecotecnia.

Ventajas:

- alta calidad fisicoquímica del agua de lluvia con respecto a fuentes superficiales;
- el sistema es independiente y por lo tanto eficiente para comunidades dispersas;
- se puede emplear mano de obra y/o materiales locales;
- no requiere energía significativa para la operación del sistema;
- fácil de construir y mantener con respecto a sistemas centralizados;
- y la facilidad de operación y ahorro de tiempo en la recolección de lluvia en vez de traerla de lejos.

Desventajas:

- costo inicial, que en caso de cubrir el beneficiario puede impedir su implementación por falta de recursos económicos;
- la cantidad de agua captada depende de la precipitación del lugar, del área de captación, del espacio de almacenamiento y otras condiciones geográficas y técnicas incontrolables;
- y el costo del proceso de tratamiento depende de la calidad del agua colectada y el uso que se dará a la misma, sustentado por las normas correspondientes (UNATSABAR, 2001).

Otros puntos importantes que se deben tomar en cuenta son:

- la importancia de la participación tanto del beneficiario como de la comunidad local en la implementación de proyectos de captación de lluvia;
- la necesidad de evaluar la eficiencia y eficacia de cualquier diseño;

- y el crucial papel de mantener buenas prácticas, control de calidad y gestión.

## **2.5 COMPONENTES BÁSICOS**

Existen muchos elementos que pueden integrarse a un sistema de captación y aprovechamiento de lluvia, pero los básicos están en función de la captación, conducción y almacenamiento del líquido. Cada uno de estos subsistemas puede incluir componentes adicionales que den beneficios adicionales a los usuarios.

### **2.5.1 ÁREA DE CAPTACIÓN**

Se refiere a la superficie que va a recolectar el agua de la lluvia. Puede ser natural, como roca o artificial. En este último caso, las superficies pueden ser de materiales como los siguientes:

- cemento;
- lámina metálica, plástica, fibra de vidrio o vidrio;
- tejas de arcilla, madera o plásticas;
- y palma u hojas de alguna otra planta.

Las superficies mencionadas generalmente se usan como techos; por sus características, algunas ofrecen ventajas sobre otras para la captación y aprovechamiento de la lluvia. Por ejemplo las láminas plásticas de policarbonato ofrecen más cantidad y mejor calidad del agua colectada que las de madera o palma.

### **2.5.2 CONDUCCIÓN**

El sistema requiere elementos para transportar el agua colectada hacia el lugar de aprovechamiento, tratamiento o almacenamiento, para lo cual se usan comúnmente canaletas y tuberías que pueden ser de los siguientes materiales:

- plásticas: policloruro de vinilo (PVC), polietileno de alta densidad (HDPE) o polipropileno (PP); metálicas: lámina de acero galvanizada o zinc;
- y materiales naturales: madera y fibras.

### **2.5.3 ALMACENAMIENTO**

El lugar donde se conservará el agua captada puede ser muy variado y de sus características depende la calidad que mantendrá el líquido previo a su aprovechamiento. Puede ir desde zanjas naturales hasta tanques especiales. Algunos ejemplos de contenedores superficiales o subterráneos son:

- Cemento o ferrocemento: cisternas, jarras o jollas
- Metálicos: botes, tinacos o cisternas de lámina de acero
- Plásticos: botes, tinacos o cisternas de HDPE.

### **2.5.4 OTROS COMPONENTES**

Según Gould y Nissen Petersen (1999) y Mechell *et al.* (2010), respectivamente, algunos componentes complementarios que repercuten directamente en la calidad del agua son los siguientes:

- Filtros para hojas y otros sólidos de gran tamaño. Se encargan de retirar elementos de gran tamaño que puede arrastrar la lluvia. En la Figura 2.7 se aprecian dos ejemplos de este tipo de dispositivo.

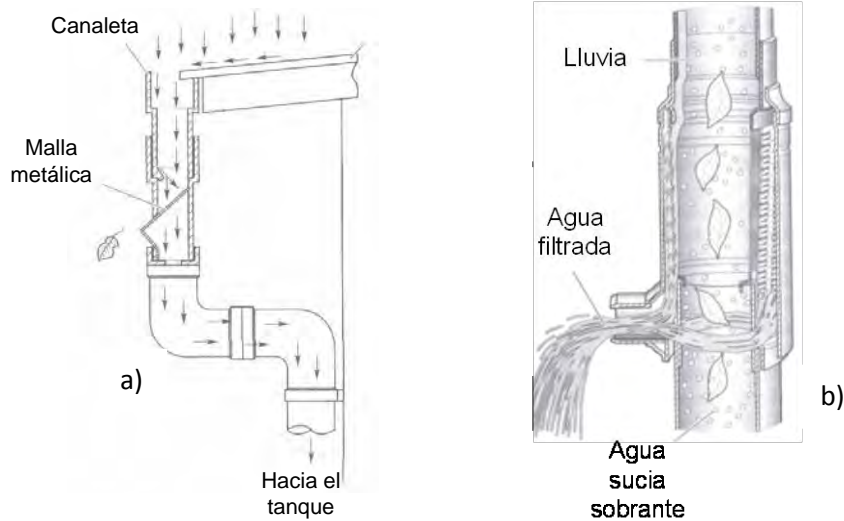


Figura 2.7. Filtro para hojas por caída vertical (a) y centrífugo (b) (Gould y Nissen-Petersen, 1999).

- Interceptores o separadores de primera lluvia. Su objetivo es apartar la primera agua que escurre y arrastra una mayor concentración de contaminantes de la atmósfera y partículas de la superficie de captación. Hay separadores de lluvia manuales y automáticos. En la Figura 2.8 se observan dos ejemplos de dispositivos del segundo tipo.
- Sedimentadores, desarenadores y clarificadores. Su objetivo es retirar sólidos que pueden sedimentar antes del almacenamiento. Este tratamiento ayuda a hacer más eficiente el filtrado y reducir el mantenimiento general de los tratamientos posteriores. La Figura 2.9 muestra un ejemplo de desarenador colocado antes del ingreso a la cisterna.
- Filtros. Ayudan a retener sólidos suspendidos y otros que no fueron retenidos en las etapas anteriores. También pueden reducir la contaminación microbiológica. Por ejemplo, existen filtros rápidos, lentos, por gravedad y por presión. En la Tabla 2.2 se presenta una modificación a la clasificación de filtros de Pürschel (1976).

Tabla 2.2. Clasificación de filtros.

Por velocidad de filtrado	Según el medio filtrante	Según el flujo	Según la carga
Rápidos (240-360 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /día)	Arenas: cuarzo, sílice, zeolita, antracita, etc.	Ascendente	Gravedad
Lentos (0.1-2.5 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /día)	Gravas: cuarzo, tezontle, etc.	Descendente	Presión
	Gravillas: cuarzo, tezontle, carbón activado, etc.	Flujo mixto	

Fuente: Modificación a Pürschel (1976).

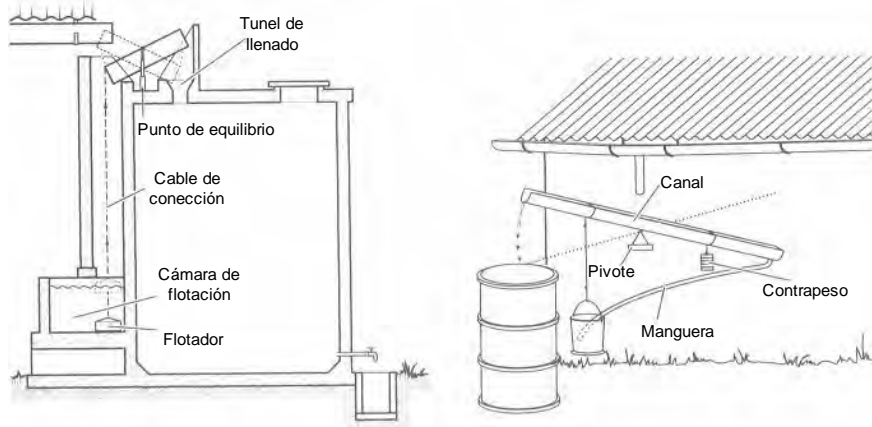


Figura 2.8. Separadores de primera lluvia automáticos (Gould y Nissen-Petersen, 1999).

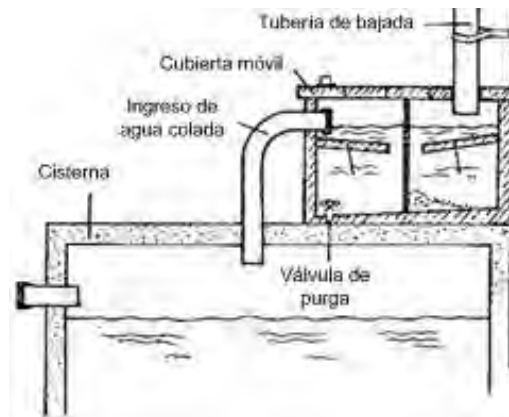


Figura 2.9. Desarenador para agua de lluvia (Gould y Nissen-Petersen, 1999).

- Dispositivos para desinfección. Ayudan a eliminar microorganismos y potabilizan el agua colectada. Algunos ejemplos son: cloradores, lámparas de luz ultravioleta y dosificadores de plata coloidal.
- Dispositivos de automatización. Se trata de equipo que ayuda a complementar el sistema en la parte operativa. Se incluyen la bomba o equipo para trasladar el líquido por presión, el controlador y los sensores de nivel que automatizan esta labor, sensores de temperatura, pH, etc.

En este capítulo se han establecido antecedentes generales de la captación y aprovechamiento de lluvia que la resumen como una técnica natural, milenaria, sencilla, productiva, sustentable, entre otras ventajas. Con esta información teórica se procede a estudiar el sitio de estudio para la propuesta de diseño del sistema.

### **3 ANTECEDENTES DEL SITIO DE ESTUDIO**

En este capítulo se describen las características del sitio de estudio, principalmente geográficas y antecedentes relevantes para el desarrollo del trabajo.

#### **3.1 SANTA ROSA XOCHIAC**

Santa Rosa Xochiac es un pueblo con origen prehispánico. Según las crónicas locales, muchos años antes de la llegada de los españoles salió gente del señorío de Azcapotzalco en busca de un lugar donde asentarse. Entonces se establecieron en lo que actualmente es San Bartolo Ameyalco, convencidos por la abundancia de recursos que encontraron.

Años después la gente se extendió hacia los montes y fundó Cuauhtenco. Con la colonización española, el nombre se completó como Santa María Cuauhtenco para luego ser rebautizado por visitantes extranjeros como Santa Rosa Xochiac, en honor a la virgen de Santa Rosa de Lima y Xochiac de xóchitl, palabra náhuatl que significa flor.

Hasta hace algunas décadas, muy poca gente del pueblo se comunicaba con el centro de la Ciudad de México. La Calzada Desierto de los Leones, construida en los años treinta, sigue siendo la principal vía de transporte.

Hasta hace algunos años, gran parte de la población se dedicaba al campo y/o al oficio de leñador (DAO, 2009).

#### **3.2 SITUACIÓN ACTUAL**

Actualmente Santa Rosa Xochiac pertenece a la Delegación Álvaro Obregón, muy cerca de Santa Fe, en una zona semiurbana con partes rurales al surponiente de la Ciudad de México. El poblado se considera dentro de una zona de amortiguamiento entre la ciudad y el suelo de conservación conocido como “cinturón verde”.

Las calles y casas se han ido modificando, como en muchos poblados similares. La urbanización trajo otro tipo de fuentes de empleo, pero también deterioro ecológico. Muchos terrenos de siembra se han urbanizado sin control.

La población actual supera los 19 mil habitantes. Muchas casas no cuentan con uno o más de los servicios básicos, como drenaje o agua potable e incluso suministro eléctrico (DAO, 2009).

Las actividades económicas de la cuenca donde se ubica Santa Rosa, son principalmente la agricultura, desarrollada pobremente, la ganadería extensiva y el comercio (De Lorenz, 2009).

#### **3.3 EL ECOBARRIO DE SANTA ROSA XOCHIAC**

Con el tiempo muchos terrenos se regularizaron y adquirieron títulos de propiedad, entre ellos surgió una asociación civil, llamada “Vecinos Organizados por un Futuro Verde AC”. Este grupo se organizó y con la participación de algunas universidades comenzaron a concretar cambios en la comunidad orientadas al desarrollo sustentable. Es el caso del proyecto “Ecobarrio” que sostiene la aplicación de ecotecnias en la zona para reducir el impacto ambiental.

El Ecobarrio de Santa Rosa Xochiac está formado por la Asociación Civil de Vecinos Organizados por un Futuro Verde y conforman un área de 296 679 m<sup>2</sup>, ubicada al suroeste del poblado de Santa Rosa Xochiac. Por su forma irregular, alargada de norte a sur alcanzando 8.2 km por 3.5 km de anchura, el área es también conocida como “Poligonal de Santa Rosa Xochiac”.

Los terrenos del Ecobarrio tienen de forma general dos usos, en primer lugar es habitacional y en segundo es agrícola.

Las casas en la zona habitacional son muy variadas, dependiendo del ingreso de los dueños. Por ejemplo, la mayoría de las casas son de concreto y varilla, de uno a tres niveles, pero también se pueden encontrar construcciones de ladrillo, de piedra con concreto, de madera, adobe y en menor proporción hay casas de cartón y lámina (De Lorenz, 2009).

### **3.3.1 INFRAESTRUCTURA DEL ECOBARRIO**

Se describe brevemente la infraestructura básica con la que cuenta el Ecobarrio de Santa Rosa Xochiac y se extiende la parte de agua potable importante para este trabajo.

#### **3.3.1.1 INFRAESTRUCTURA BÁSICA**

En general, el lugar no cuenta con una red de drenaje y sólo una calle tiene alcantarillas. Algunas casas cuentan con fosas sépticas, biodigestores o algún sistema de tratamiento de agua residual, pero la mayoría usan el suelo para sus descargas.

No hay registros oficiales de industrias en la zona y existen muchos terrenos sin modificar que conservan la flora silvestre.

Existen terrenos designados para uso exclusivo agrícola. Esta área corresponde a aproximadamente 20 % del área de estudio. Los principales productos que se cosechan son avena, maíz y cebada.

El servicio eléctrico se encuentra regulado en la mayoría de las zonas de la poligonal pero también existe de manera irregular.

El servicio de teléfono se puede observar en prácticamente todas las casas de las calles principales (De Lorenz, 2009).

#### **3.3.1.2 SUMINISTRO DE AGUA POTABLE**

La mayoría de los propietarios no cuentan con este servicio; el agua se distribuye a través de autotanques de 10 m<sup>3</sup> proporcionados por la Delegación Álvaro Obregón que van de subsidio total a un costo de \$450 MN por unidad de 10 m<sup>3</sup>. En la zona la demanda es superior a la cobertura de la Delegación por lo que muchas casas requieren que servicios privados les surtan agua a un costo que oscila los \$1 000 MN por unidad de 10 m<sup>3</sup>.

Para tener una estimación representativa del sitio de estudio se plantea un cálculo de consumo basado en datos del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM).

### 3.3.1.2.1 CÁLCULO DE CONSUMO DE AGUA POTABLE

Para estimar un consumo promedio general por casa del sitio, se toma en cuenta el consumo de agua potable de toda la Delegación Álvaro Obregón y de dos sitios vecinos con características similares.

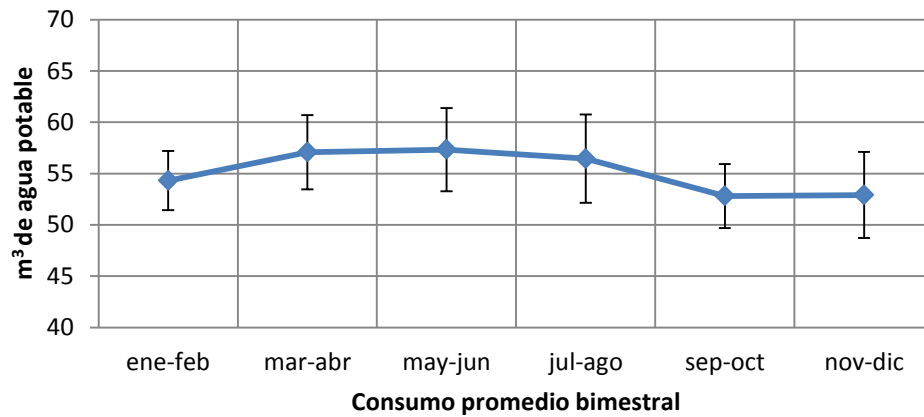


Figura 3.1. Consumo bimestral promedio de agua potable por casa en la Delegación Álvaro Obregón, 2005-2009. Las líneas verticales indican los límites de confianza al 95%. Con base en datos del 2010 de SACM.

La Figura 3.1 es una gráfica realizada con datos del SACM que muestra el consumo promedio bimestral de agua potable del 2005 al 2009 en la Delegación Álvaro Obregón. Realizando una prueba de Tukey<sup>i</sup> con 95 % de confianza se determinó que no hay diferencia significativa entre los bimestres por lo que el promedio bimestral para estos años es de  $55.13 \pm 3.42 \text{ m}^3$  por casa, lo que es igual a  $27.56 \text{ m}^3$  mensuales,  $6.36 \text{ m}^3$  semanales o un aproximado de 900 litros diarios por casa.

El INEGI en 2010 reporta un promedio de 5 habitantes por casa para la zona, por lo que se obtiene un promedio aproximado de 180 litros por persona al día.

La Delegación Álvaro Obregón es muy variable en cuanto al consumo de agua potable ya que esta situación va de la mano con el estatus económico de su población. Para confirmar que los cálculos anteriores sean lo más cercanos posible a la realidad del Ecobarrio se realizó el estudio anterior con dos poblados vecinos similares y los resultados se muestran en la Tabla 3.1. Se obtiene un consumo aproximado de 770 litros diarios por casa. Para 5 habitantes se obtiene un promedio aproximado de 154 litros por persona al día. Este dato calculado coincide con los 159 litros/habitantes/día para un estrato social medio reportados por la UAM en el documento Repensar la cuenca de 2009.

<sup>i</sup> Los datos analizados cumplieron con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza.

Tabla 3.1. Promedio de consumo de agua potable en dos sitios vecinos similares a Santa Rosa Xochiac (SACM, 2010).

Sitio	Consumo promedio de agua potable en m <sup>3</sup> por casa				
	Anual	Bimestral	Mensual	Semanal	Diario
Lomas de la Era	280.94	46.82	23.41	5.40	0.77
San Bartolo Ameyalco	281.17	46.86	23.43	5.41	0.77

### 3.3.1.2.2 USO DOMICILIARIO DEL AGUA POTABLE

Este trabajo permitió un breve estudio<sup>i</sup> en un domicilio del sitio de estudio para tener un panorama del uso que se le da al agua potable a nivel doméstico. La Figura 3.2 muestra los resultados como porcentajes de consumo personal con respecto al total semanal promedio que fue de 1104 litros equivalentes a 157 litros promedio diario.

El consumo de agua potable en uso sanitario, lavado de ropa y otros (limpieza de auto, pisos, riego, etc.), que suman casi 50 % del total, se podría sustituir por agua de lluvia con un tratamiento primario o agua de menor calidad que la potable. Es mínima la cantidad de agua que se usa para beber y cocinar, aproximadamente es el 2 % del total.

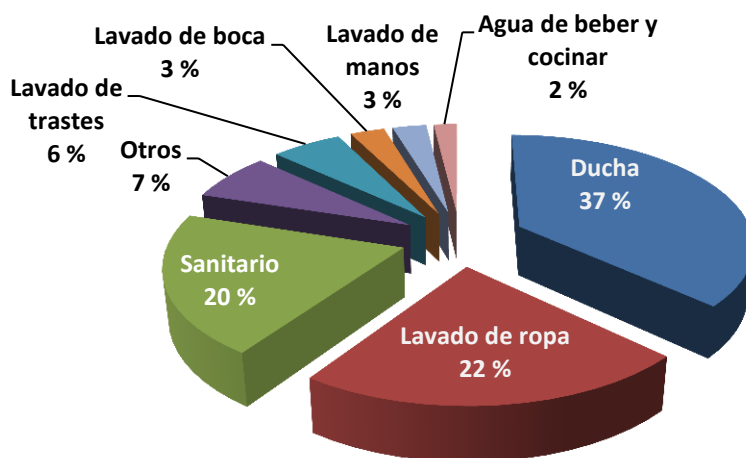


Figura 3.2. Estudio del uso del agua potable a nivel domiciliario.

## 3.4 GEOGRAFÍA DEL SITIO DE ESTUDIO

Santa Rosa Xochiac se localiza en la cuenca del río Magdalena, al límite sur poniente del Distrito Federal. La cuenca abarca parte de las delegaciones políticas Magdalena Contreras, Álvaro

<sup>i</sup> El estudio se realizó sobre un individuo masculino adulto soltero durante dos semanas y consistió en un breve cuestionario sobre el consumo diario de agua tomando en cuenta para los cálculos datos como el flujo medido (regadera de 6 litros por minuto y lavamanos de 8 litros por minuto), el tiempo de uso y especificaciones de los dispositivos (sanitario de 8 litros por descarga y ciclo de lavado de 250 litros).



Obregón y Cuajimalpa (Rea, 2009). En la Figura 3.3 se aprecia una imagen satelital de la Ciudad México, ubicando en el recuadro rojo a Santa Rosa Xochiac.



Figura 3.3. Ubicación de Santa Rosa Xochiac en la mancha urbana de la Ciudad de México (Google Maps, 2009).

El Ecobarrio está rodeado por tres áreas importantes: el monte comunal o propiedad comunal, el pueblo de Santa Rosa Xochiac y la antigua carretera llamada Camino al Desierto de los Leones. Además colinda con los pueblos de San Bartolo Ameyalco y San Mateo Tlaltenango. En la Figura 3.4 se observa un acercamiento a esta zona, donde se aprecia la zona de transición entre lo urbano y el bosque. La circunferencia roja indica la ubicación del Ecobarrio.

Santa Rosa Xochiac se sitúa entre una altitud de 2570 y 3850 msnm. El Ecobarrio forma parte del Eje Neovolcánico Transversal y se encuentra en la vertiente oriental de la Sierra de las Cruces.

La zona presenta dos tipos de clima, el clima templado subhúmedo y semifrío, que equivalen a:

- templado con lluvias en verano;
- precipitación invernal menor de 5% con respecto al total;
- forma parte del grupo más húmedo de los sub-húmedos;
- y es isotermal<sup>i</sup> con temperatura normal promedio anual de 10.6 °C<sup>ii</sup> (De Lorenz, 2009).

<sup>i</sup> Isotermal significa que la diferencia entre la temperatura del promedio del mes más frío y más caluroso es menor a 5° C (De Lorenz, 2009).

<sup>ii</sup> Dato del 2010 del SMN con base en registros de 1971 al 2000 de la estación meteorológica Exconvento Desierto de los Leones.



Figura 3.4. Vista satelital de Santa Rosa Xochiac y del Ecobarrio, indicado en la circunferencia roja (Google Maps, 2009).

### 3.4.1 PRECIPITACIÓN

La precipitación anual de la zona sur poniente está entre las más altas del Distrito Federal. En las zonas bajas de la Delegación Álvaro Obregón se reciben de 800 a 1000 mm anuales, en la zona central de 1200 a 1500 mm anuales y en las partes más altas cercanas a los cerros hasta 1500 mm anuales (CONAGUA, 2009). La Figura 3.5 presenta la precipitación promedio anual por zonas para las delegaciones del Distrito Federal.



Figura 3.5. Precipitación anual promedio en el Distrito Federal (CONAGUA, 2009).

El Sistema de Monitoreo Atmosférico del Distrito Federal (SIMAT) reporta en la base de datos del subsistema Red de Depósito Atmosférico (REDDA) registros semanales de precipitación de la estación de monitoreo Exconvento Desierto de los Leones, ubicada a menos de 2 km de distancia y a una altitud similar al sitio de estudio, por lo que son datos más precisos.

En la Figura 3.6 se observa la gráfica de variación de la precipitación promedio anual desde 1998 hasta el 2009 con datos de la REDDA. Por medio de una prueba de Tukey<sup>i</sup> con 95 % de confianza, se determina que no existe diferencia significativa por año, determinando un promedio de lluvia anual de  $1274 \pm 67$  mm y de la temporada de lluvia de mayo a octubre de  $1251 \pm 65$  mm.

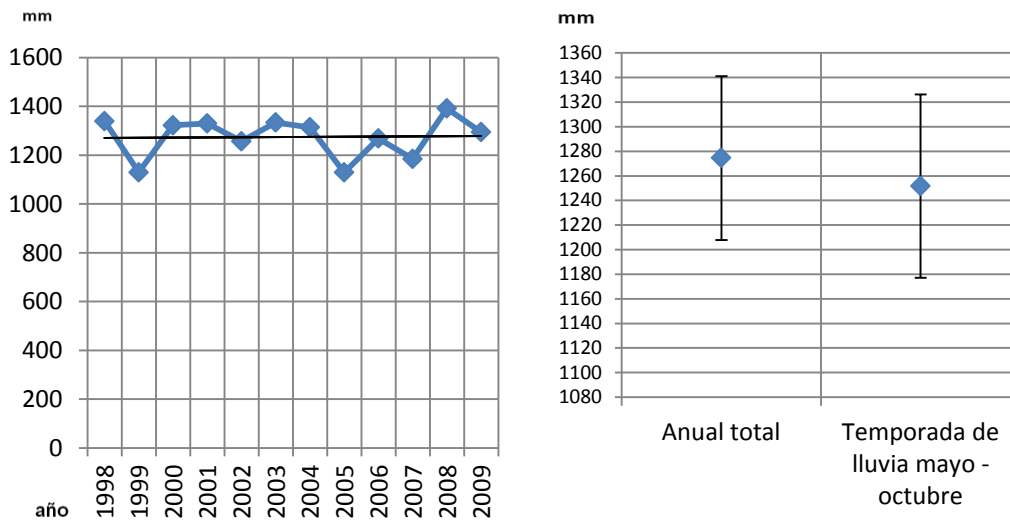


Figura 3.6. Precipitación promedio anual de 1998 al 2009 con intervalo de confianza al 95 %. Gráficas con base en datos del 2010 de la REDDA.

En la gráfica de la Figura 3.7 se muestra la precipitación mensual promedio con intervalos de confianza al 95 %, donde se observa que las lluvias más altas comienzan en mayo, terminan en octubre y representan del 94 al 98 % del total anual. Con base en una prueba de Tukey<sup>i</sup> con 95 % de confianza, entre los meses menos lluviosos que son enero, febrero, marzo, abril, noviembre y diciembre no hay diferencia significativa. Entre los meses medianamente lluviosos que son octubre y mayo tampoco hay diferencia significativa. De manera análoga, los meses de la temporada de lluvia que son junio, julio, agosto y septiembre son estadísticamente iguales.

<sup>i</sup> Los datos analizados cumplieron con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza.

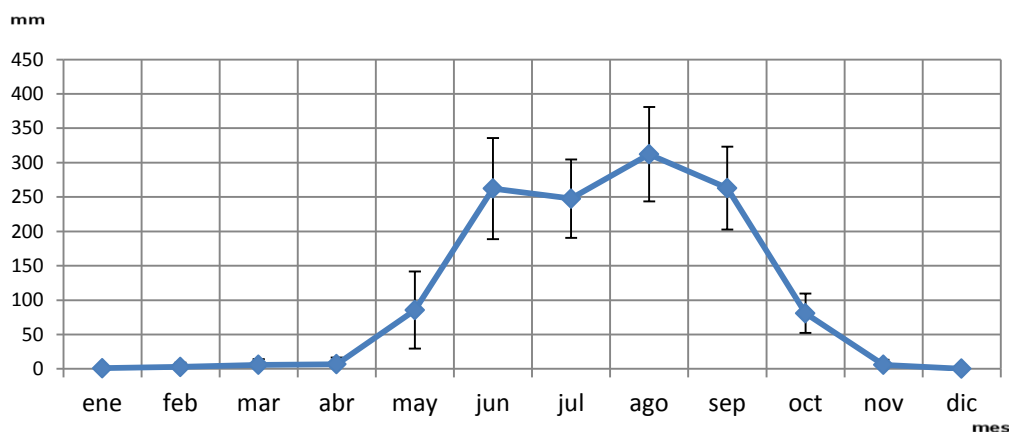


Figura 3.7. Precipitación promedio mensual de 1998 al 2009, con intervalos de confianza al 95 %. Gráfica con base en datos del 2010 de la REDDA.

Con los datos anteriores se construyó la Figura 3.8 para describir el comportamiento de la temporada de lluvia de acuerdo al porcentaje de semanas con lluvia débil (<14 mm), moderada ( $\leq 14$  mm y <105 mm) y fuerte (>105 mm) con respecto al total de mayo a octubre de 1998 al 2009. De 284 semanas lluviosas el 17 % se trata de lluvia débil, el 75 % de lluvia moderada y el 8 % de lluvia fuerte. Estas dos últimas, que suman un 83 % del total, son las que tienen potencial de aprovechamiento.

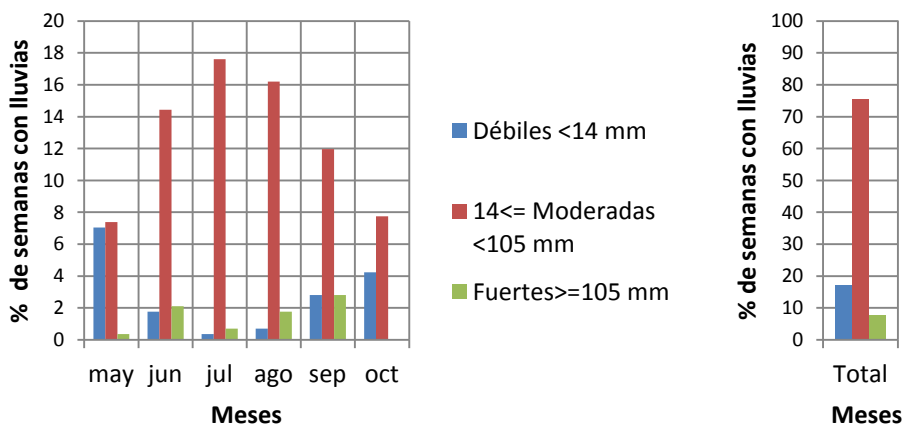


Figura 3.8. Porcentaje de semanas lluviosas con respecto al total de mayo a octubre. Gráfica con base en datos del 2010 de SIMAT.

Según el SMN el promedio de días lluviosos del sitio es de 137 anuales y 112 para la temporada de lluvias<sup>i</sup>. La precipitación promedio es de 1324.2 mm<sup>i</sup> y es similar a la obtenida en la Figura 3.6.

<sup>i</sup> Con base en datos de 1971 al 2000 de la estación meteorológica Exconvento Desierto de los Leones.

### 3.4.1.1 INTENSIDAD DE LA PRECIPITACIÓN

Para complementar la información de precipitación se presenta la Figura 3.9 con la intensidad<sup>i</sup> de la lluvia para la Ciudad de México según la Secretaría de comunicaciones y Transportes (SCT). En el caso de la estación Exconvento Desierto de los Leones la intensidad máxima es de 118 mm/h durante 5 minutos para un periodo de retorno<sup>ii</sup> de 20 años.

Tabla 3.2. Intensidad de lluvia de la estación Desierto de los Leones, periodo de retorno de 20 años.

Intensidad mm/h	Duración min	Precipitación mm
118	5	9.83
95	10	15.83
77	20	25.66
64	30	32
41	60	41
25	120	50
25	240	100

Fuente: SCT (2004).

En la Tabla 3.2 se registran diferentes intensidades asociadas a su duración en minutos. La lluvia más intensa deposita hasta 1.97 mm/min de agua, pero sólo dura 5 minutos, mientras que una lluvia que dura 240 minutos tiene una intensidad muy baja de 0.42 mm/min.

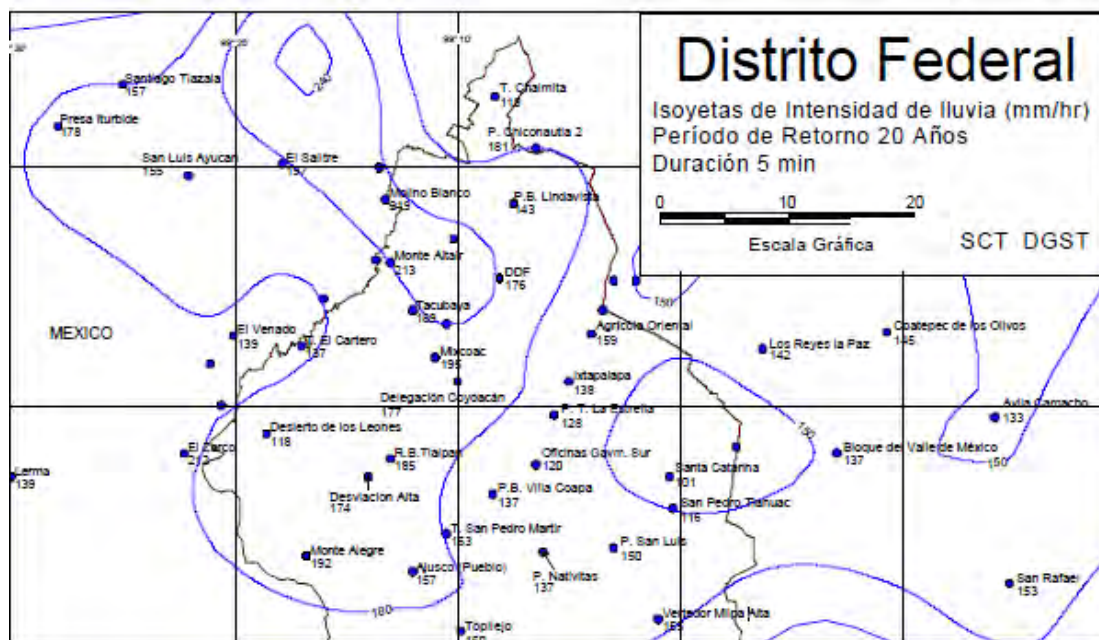


Figura 3.9. Intensidad de lluvia, duración de 5 minutos, retorno de 20 años, D.F. (SCT, 2004).

<sup>i</sup> Intensidad es la relación del volumen de lluvia en mm entre la unidad de tiempo en horas o minutos. Al aumentar la duración de la lluvia disminuye su intensidad media (SCT, 2004).

<sup>ii</sup> El periodo de retorno es el tiempo en el cual se igualará o superará estadísticamente en una ocasión el dato de intensidad de lluvia.

Con los datos de la Tabla 3.2 se construyó la Figura 3.10 que ilustra el efecto de la intensidad de lluvia con respecto a la duración. A mayor intensidad es menor la duración.

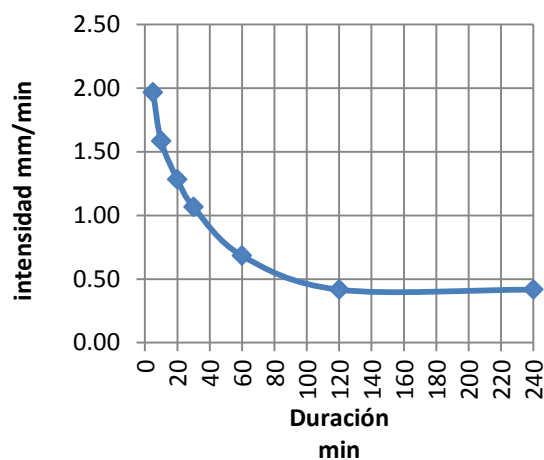


Figura 3.10. Intensidad contra duración de las lluvias de la estación Exconvento Desierto de los Leones (SCT, 2004).

### 3.4.1.2 ACIDEZ DE LA LLUVIA

Para determinar la presencia de lluvia ácida<sup>i</sup> en la zona, se construyeron las Figura 3.11 a Figura 3.13 con datos de pH de la REDDA en precipitación húmeda de la estación Exconvento Desierto de los Leones con promedios ponderados<sup>ii</sup> anuales y mensuales de 1998 a 2009.

En la Figura 3.11 se puede destacar que el pH promedio ponderado anual de 1998 al 2009 está entre de 4.69 y 5.63 con promedio ponderado general de 4.96. Aunque parece haber un incremento en el pH conforme transcurren los años, una prueba de Tukey<sup>iii</sup> indica que los promedios anuales son estadísticamente iguales.

<sup>i</sup> Lluvia ácida es aquella con un pH menor a 5.6 (escala de 0 a 14), ya que este valor corresponde al pH del agua en equilibrio con el CO<sub>2</sub> de la atmósfera, que tiene una concentración aproximada de 360 ppm (Masters *et al*, 2008).

<sup>ii</sup> Promedio ponderado es una medida de tendencia central que se usa para promediar y comparar cantidades que no tienen la misma significancia o peso. Es el caso del pH de la lluvia que es un valor logarítmico que depende de la concentración de iones H<sup>+</sup> en el volumen de agua captado. Se obtuvo con la ecuación  $PP = -\log\left(\frac{mm * H^+}{mm}\right)$ .

<sup>iii</sup> Los datos analizados cumplieron con el supuesto de normalidad.

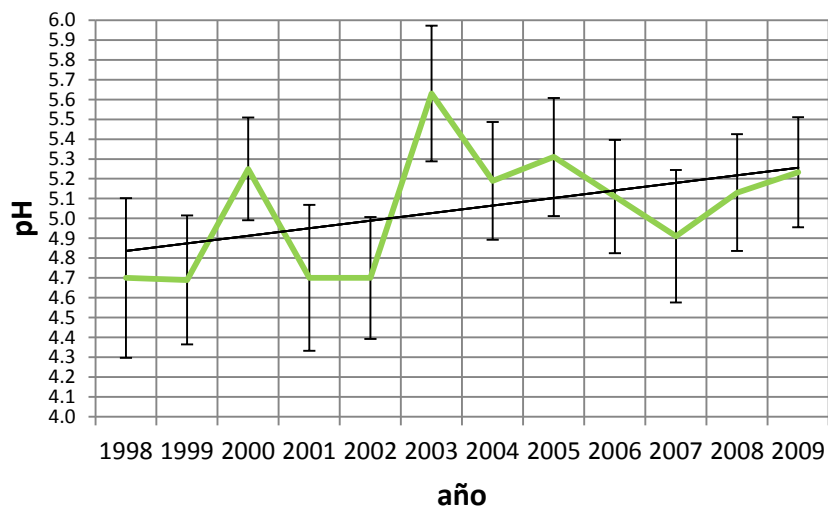


Figura 3.11. Promedios ponderados de pH anuales de 1998 al 2009 con intervalos de confianza al 95 %. Con base en datos del 2010 de la REDDA.

La Figura 3.12 muestra el pH promedio ponderado<sup>ii</sup> mensual de 1998 a 2009, con un aparente decremento conforme transcurre la temporada de lluvias. Esta tendencia del pH se puede deber a que conforme transcurre la temporada hay menor concentración de partículas en la atmósfera que neutralizan la acidez por efecto del arrastre pluvial. Una prueba de Tukey<sup>i</sup> indica que los sólo hay diferencia significativa entre los meses de octubre y mayo.

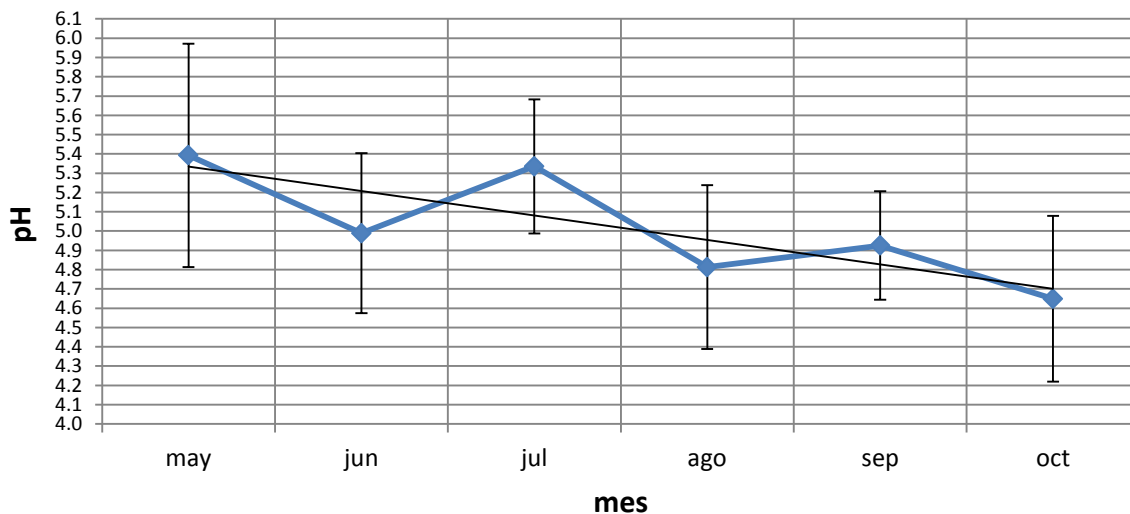


Figura 3.12. Promedio ponderado de pH mensual de 1998 al 2009. Incluye límites de confianza al 95% y línea de tendencia. Con base en datos del 2010 de la REDDA.

<sup>i</sup> Los datos cumplieron con el supuesto de normalidad.

Para entender más ampliamente el comportamiento del pH de la lluvia se construye la siguiente figura 3.13 basada en un total de 280 datos semanales durante las temporadas de lluvias entre 1998 y 2009. El 53 % del total son datos que tienen un pH entre 5.6 y 7, el 43 % entre 4 y 5.6, el 3 % mayor que 7 y sólo el 1 % menor a 4. Es decir, el 44 % se trata de semanas que presentan lluvia ácida.

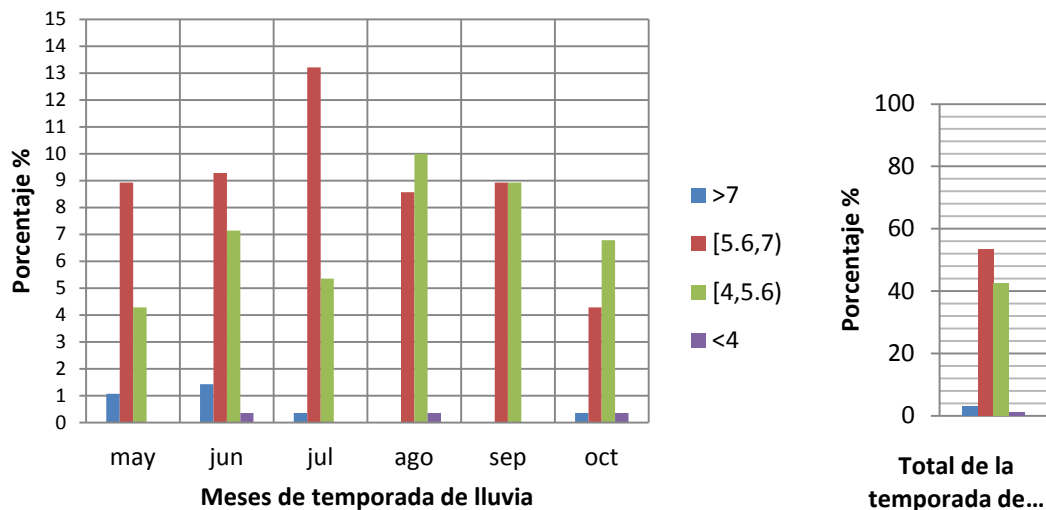


Figura 3.13. Porcentaje de lluvias semanales por pH con respecto al total de mayo a octubre de 1998 al 2009.

Como se aprecia en la Figura 3.13, durante los meses de mayo, junio y julio el porcentaje de lluvias semanales con pH mayor que 5.6 es notablemente mayor que el resto y esto cambia durante los meses de agosto, septiembre y octubre, donde el porcentaje mayor lo ocupa el intervalo menor a 5.6.

### 3.4.1.3 IONES DISUELTOS EN LA LLUVIA

La precipitación húmeda en su recorrido de la atmósfera al suelo disuelve gases y partículas que forman iones que en exceso son indeseables para el uso doméstico y consumo humano.

La Tabla 3.3 contiene datos de iones en precipitación húmeda para el periodo de 1998 al 2009 de la estación Exconvento Desierto de los Leones del SIMAT y una comparación con la NOM-127-SSA1-1994, que establece límites permisibles de calidad del agua potable en México, como una referencia de la calidad química del agua pluvial.

En todos los casos la calidad del agua de lluvia es alta, pues está muy por debajo de los niveles permisibles.



Tabla 3.3. Iones en precipitación húmeda de la estación Exconvento Desierto de los Leones de 1998 a 2009.

Ion	Promedio ponderado mg/l	Máximo mg/l	Máximo de la norma mg/l	Comparación
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	3.15	13.36	<b>400</b>	Muy por debajo
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	0.58	3.16	<b>10</b>	Debajo
Cloruro (Cl <sup>-</sup> )	3.84	11.62	<b>250</b>	Muy por debajo
Sodio (Na <sup>+</sup> )	0.17	5.78	<b>200</b>	Muy por debajo

#### 3.4.1.4 METALES PESADOS EN LA LLUVIA

El sitio de estudio puede recibir influencia de la contaminación atmosférica proveniente de las zonas industriales del norte y noroeste de la Ciudad de México, así como de fuentes móviles, debido a la dirección de los vientos dominantes. Al no contar con información sobre metales pesados analizados en el sitio ni en estaciones cercanas, la referencia citada a continuación es de estudios realizados en una zona relativamente cercana al Ecobarrio, en este caso Ciudad Universitaria (CU) de la UNAM al sur de la Ciudad de México. La Tabla 3.4 muestra dichos estudios.

Ningún dato rebasa el límite de la NOM-127-SSA1-1994 que determina los niveles máximos permisible para agua de uso y contacto humano.

Tabla 3.4. Compilación y comparación de estudios de metales pesados en agua de lluvia de Ciudad Universitaria.

Metal	Máximo obtenido en CU año 2003 y 2004 <sup>1</sup>	Máximo obtenido en CU año 2007 <sup>2</sup>	Límite de la NOM-127-SSA1-1994	Comparación
Al	51.74	---	200	Por debajo
As	---	7.21	50	Muy por debajo
Ba	---	40.77	700	Muy por debajo
Cd	0.92	0.82	5	Por debajo
Cu	---	17.72	2000	Muy por debajo
Cr	1.68	2.17	50	Muy por debajo
Fe	39.62	---	300	Muy por debajo
Mn	16.02	---	150	Muy por debajo
Pb	9.95	21.3	25	Por debajo
Zn	---	565.91	5000	Muy por debajo

<sup>1</sup> García R *et al.*, 2009

<sup>2</sup> Quiñones G *et al.*, 2008

#### 3.4.2 SITUACIÓN AMBIENTAL DEL ECOBARRIO

El Ecobarrio en estudio presenta un leve deterioro de sus recursos naturales, debido a factores relacionados con la proximidad con el crecimiento urbano descontrolado y la necesidad de más

políticas claras y sustentables de protección, restauración y uso de suelo. Algunos factores que favorecen la contaminación de la zona son:

- contaminación proveniente de la zona urbana de la Ciudad de México,
- asentamientos urbanos irregulares y cambio de uso de suelo,
- falta de manejo de la vegetación forestal,
- ocurrencia de incendios forestales y deforestación,
- falta de atención a erosión,
- recreación y explotación desordenada en áreas frágiles,
- introducción de especies animales y vegetales no adecuadas,
- indefinición de procesos legales sobre la tenencia de la tierra
- e inoportuna resolución de trámites legales para la atención de contingencias.

Como respuesta de mitigación a algunos factores, existen programas que integran directrices ambientales para uso y conservación de la poligonal, como el proyecto Ecobarrio, implementado por los Vecinos por un Futuro Verde AC. Este programa contempla actividades de protección, medidas de control, administrativas y legales para el manejo sustentable de áreas específicas (Rea, 2009).

El proyecto Ecobarrio está sustentado y validado por estudios y contempla entre otras cosas:

- manejo y disposición final de residuos sólidos municipales,
- tratamiento de aguas residuales,
- preservación de flora y fauna
- y manejo de agua potable.

#### **3.4.2.1 MANEJO DE AGUA**

Dentro del manejo de agua potable se consideran una serie de recomendaciones propuestas en el proyecto Ecobarrio, como:

- El agua potable se utilizará solamente para los servicios primarios, como alimentación, consumo humano y regaderas, considerando como base los lineamientos de la Ley de Aguas del DF.
- Los habitantes del sitio de estudio no explotarán el recurso hídrico del subsuelo y no se permite que otros lo hagan tomando en cuenta los lineamientos de la Ley de Aguas del DF.
- Las aguas pluviales captadas que cumplan con la normatividad correspondiente en materia de calidad del agua se deberán manejar como lo especifica el artículo 36 de la Ley de Aguas del DF.
- Los inquilinos se comprometen a respetar las zonas asignadas donde existan cauces o cuerpos de agua (De Lorenz, 2009).

Con estos antecedentes del sitio de estudio se cuentan con las bases para continuar con el siguiente capítulo sobre el trabajo experimental.

## 4 ETAPA EXPERIMENTAL

En este capítulo se desarrolla la evaluación de la calidad del agua de lluvia captada por una superficie con base en algunos parámetros destacados de la NOM-127-SSA1-1994, que indica los niveles máximos de algunos contaminantes comunes en agua para abastecimiento humano a nivel domiciliario.

Además se desarrolla la propuesta de evaluación de los tratamientos para mejorar la calidad del agua de lluvia captada que servirá para el diseño del sistema de captación y aprovechamiento pluvial del capítulo 5.

### 4.1 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LLUVIA

La evaluación consistió en comparar la calidad del agua de lluvia captada en la azotea y patio de una casa en el Ecobarrio, con respecto a los límites máximos permisibles señalados en la NOM-127-SSA1-1994 y agua que reciben en autotanques. Para ello se requirió de un muestreo y análisis de los resultados como se indica a continuación. Con los resultados se propuso el uso y tratamiento del agua de lluvia.

#### 4.1.1 METODOLOGÍA DE LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA DE LLUVIA

El muestreo del agua de lluvia se realizó en una casa habitación ubicada en el Ecobarrio de Santa Rosa Xochiac, Delegación Álvaro Obregón en México D.F.

El muestreo se realizó entre el 16 de junio y el 12 de octubre de 2009. Las fechas obedecieron a factores técnicos y de operación, como la disponibilidad del sitio, los problemas de transportación y la representatividad de los resultados.

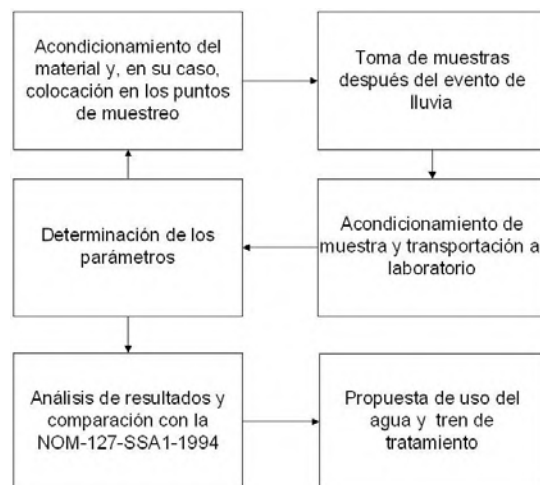


Figura 4.1. Metodología de evaluación de la calidad del agua de lluvia .

Los muestreos fueron por evento de lluvia y se hicieron con base en las metodologías estándar (*American Public Health Association*, 2005) y de la USEPA para lluvia ácida (1994). La Figura 4.1 esquematiza la metodología de esta evaluación.

Los parámetros a determinados fueron:

- físicos: color verdadero, turbiedad, sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos sedimentables;
- fisicoquímicos: iones ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ ), conductividad eléctrica (CE) y pH;
- microbiológicos: mesófilos aerobios, coliformes totales y coliformes fecales.

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

Los puntos de muestreo seleccionados fueron:

- Techo. Una cubeta en la bajada del agua de lluvia captada por una sección de aprox. 6 m<sup>2</sup> de techo de cemento con impermeabilizante plástico y terminado en gravilla.
- Patio. Una cubeta en la bajada de agua de una sección de aprox. 10 m<sup>2</sup> de patio de loseta cerámica.
- Base. Es el muestreo de la precipitación húmeda, se trata de una cubeta para el agua de lluvia que precipitó sin tocar otra superficie que no sea la propia cubeta.
- Autotanque. Muestreo de agua procedente de autotanques, pero tomada en tambos de almacenamiento de plástico con tapa. En la Figura 4.2 se ilustran los puntos de muestreo.

Tabla 4.1. Puntos de muestreo y parámetros.

Parámetros	Fondo	Azotea	Patios	Auto tanque	Técnica	Unidad
Color verdadero		X	X	X	Comparación visual con la escala cobalto-platino	Unidades de color verdadero en la escala cobalto-platino (UC)
Turbiedad		X	X	X	Nefelometría	Unidades de turbiedad nefelométrica (UTN)
SST		X	X	X	Gravimetría	mg/l
Sólidos sedimentables		X	X	X	Volumetría	ml/l
pH	X	X	X	X	Potenciometría, medición directa	Escala logarítmica de pH
CE	X	X	X	X	Potenciometría, medición directa	μS/cm
Iones: $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{NO}_3^-$ , $\text{Cl}^-$ y $\text{Na}^+$	X	X	X	X	Cromatografía iónica*	mg/l
Coliformes: totales y fecales	X	X	X	X	Número más probable (NMP con 4 tubos)	NMP/100 ml
Mesófilos aerobios	X	X	X	X	Unidades formadoras de colonias (UFC, cuenta en placa)	UFC/100 ml

\*La técnica consiste en inyectar en un cromatógrafo de líquidos la sustancia a analizar (previamente filtrada a 5 μm) en donde por medio de adsorción en una columna los iones son cuantificados por el tiempo de retención que tardar en ser arrastrados por un medio de transporte.

El techo y patio son lugares con potencial para captar agua de lluvia y se pueden comparar los datos para elegir el que ofrezca mejor calidad de agua.

El punto de Techo y Patio no tuvieron acceso a animales, ni árboles justo encima, y se permitió que se limpiara por las lluvias de mayo y las dos primeras semanas de junio. En general, se buscó que ambas superficies estuvieran limpias.

Las cubetas y material de muestreo fueron acondicionados según las metodologías de cada caso.

Las muestras agua fueron colectadas, acondicionadas y trasladadas al laboratorio para su análisis dentro de las especificaciones de cada metodología particular. En la Tabla 4.1 se detallan los parámetros que se determinaron en cada punto de muestreo y la técnica usada.



Figura 4.2. Puntos de muestreo en una casa del Ecobarrio para la evaluación de la calidad de agua de lluvia.

El equipo utilizado para la medición de los parámetros se enlista en la Tabla 4.2. Los citados como “extras” son parámetros necesarios para el cálculo del resto.

Tabla 4.2. Equipo utilizado para la medición de los parámetros

Parámetros	Equipo	Precisión
Color verdadero	Hellige Tester	---
Turbiedad	Hatch 2100 <sup>a</sup>	---
SST	Ohaus Analytical Plus	---
Sólidos sedimentables	Cono Imhoff	---
pH	Conductronic PC18	± 0.02 pH relativo
CE	Conductronic PC18	± 1.5 %
Iones: SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Cl <sup>-</sup> y Na <sup>+</sup>	Metrohm 883 Basic IC plus	+/- 0.05, +/- 0.06, +/- 0.04 y +/- 0.021, respectivamente
<b>Extras</b>		
Temperatura	Conductronic PC18	± 0.5 °C
Precipitación pluvial	Pluviómetro casero	± 5.76 %

#### 4.1.2 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA DE LLUVIA

A continuación se presentan los resultados obtenidos a partir de la metodología anterior para la evaluación de la calidad del agua de lluvia.

##### 4.1.2.1 PARÁMETROS FÍSICOS<sup>i</sup>

Las determinaciones de sólidos disueltos totales, sólidos sedimentables, color verdadero y turbiedad se muestran a continuación.

La Figura 4.3 muestra los resultados de color verdadero en dos puntos de muestreo, donde se aprecia que la mayoría de las mediciones del Techo están marginalmente dentro del límite de la NOM-127-SSA1-1994 (en color rojo), mientras que en el caso de patio la mitad está fuera.

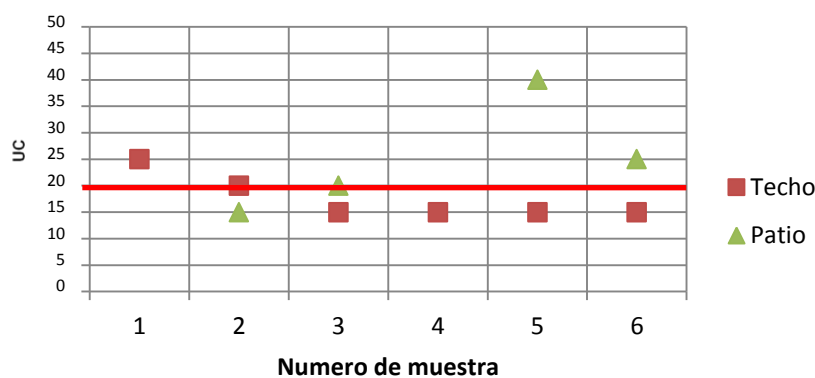


Figura 4.3. Color verdadero en agua de lluvia captada por dos superficies.

<sup>i</sup> Estos parámetros se determinaron en el laboratorio de Ingeniería Ambiental del Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

En la Figura 4.4 se muestra la turbiedad medida en las muestras de agua de lluvia captada por el Techo y el Patio de la casa, donde se aprecia que todos los puntos del techo están dentro del límite de la norma (en color rojo) mientras que dos del patio están fuera.

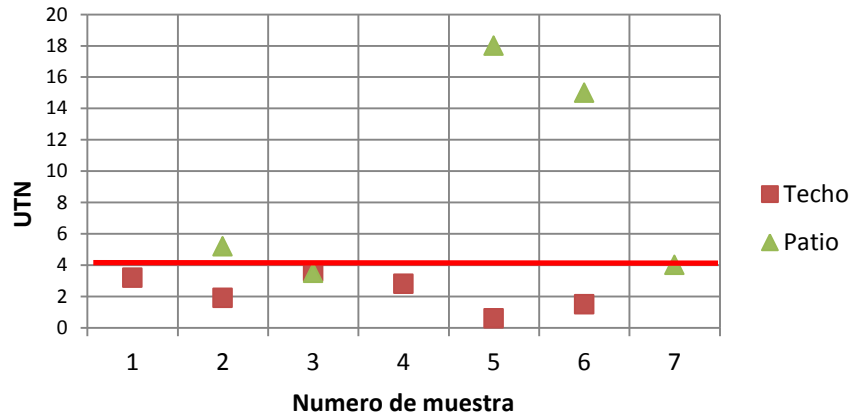


Figura 4.4. Turbiedad en agua de lluvia captada por dos superficies.

Los resultados de SST se presentan en la Figura 4.5, donde se aprecia que el agua captada por el Techo está por debajo de 5 mg/l en todos los casos, mientras en el caso de Patio hay dos valores que se elevan a 15 y 35 mg/l.

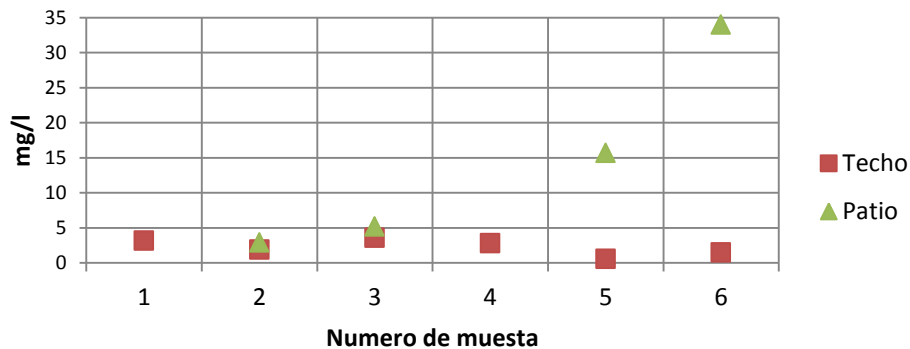


Figura 4.5. Concentración de sólidos suspendidos totales en agua de lluvia captada por dos superficies.

Los resultados de sólidos sedimentables de la Figura 4.6 muestran que todos los casos del muestreo de Techo se encuentran por debajo 0.2 ml/l y en patio hay un máximo de 0.4 ml/l.

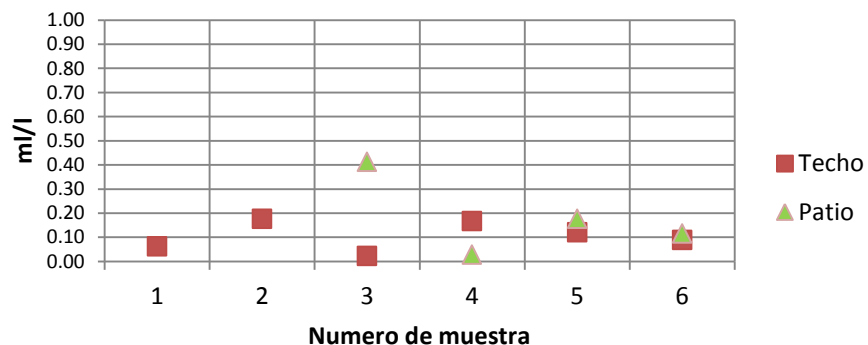


Figura 4.6. Concentración de sólidos sedimentables en agua de lluvia captada por dos superficies.

El agua de lluvia captada por el punto Techo en general tuvo mejores características físicas que en Patio y también menor variabilidad. Los valores altos del Patio se pueden explicar porque es un sitio con acceso a las personas y donde el aire puede arrastrar sólidos de las partes aledañas, pero en general porque es un sitio más difícil de aislar y controlar en comparación del techo.

Se propone usar un dispositivo para disminuir los sólidos sedimentables y evitar que lleguen a la cisterna, este dispositivo puede ser un separador de primera lluvia y/o un desarenador.

#### 4.1.2.2 PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS<sup>i</sup>

Los parámetros fisicoquímicos incluyen los iones  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ , CE y pH. Los parámetros anteriores requirieron además de mediciones de temperatura y mm de precipitación tanto para las correcciones como para las ponderaciones.

Para medir los mm de precipitación se construyeron tres pluviómetros caseros que se muestran en la Figura 4.7 junto con uno certificado.



Figura 4.7. Pluviómetros de fabricación casera y pluviómetro certificado marca *Productive Alternatives Inc.*

<sup>i</sup> Los parámetros fisicoquímicos, que incluyen pH, CE y iones, se determinaron en el laboratorio de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM con la supervisión de la QA. Ana Luisa Alarcón Jiménez.



El pluviómetro P1 es una probeta graduada de vidrio de 100 ml con un embudo de 5 cm de diámetro. El pluviómetro P2 es una probeta de plástico de 250 ml fijada a una base de madera, con un embudo en la boca sujetado por un tapón de corcho. El pluviómetro P3 es un recipiente de vidrio con forma cilíndrica, con un embudo de aproximadamente 8 cm y una cinta pegada perpendicularmente a la base, que marca los cm y mm que alcanza el agua.

Se tomaron 7 eventos de lluvia dentro del 12 de agosto y el 2 de septiembre para la conocer el error absoluto y relativo de los pluviómetros caseros con respecto a un pluviómetro certificado marca *Productive Alternatives Inc.* Y se determinó que el pluviómetro P3 tiene un error relativo promedio considerablemente alto de  $\pm 46.33\%$ , mientras que el P1 y P2 de  $\pm 5.76\%$  y  $\pm 10.90\%$  respectivamente. Por medio de una prueba de Tukey<sup>i</sup> se comprobó que entre P1 y P2 no hay diferencia estadística significativa, por lo cual, para este estudio se utilizó el pluviómetro P2. El volumen de precipitación durante el muestreo fue desde 2 hasta 28 mm y este parámetro se utilizó para ponderar los promedios de iones y pH.

La siguiente Figura 4.8 muestra los resultados obtenidos de pH, medidos en laboratorio a 25° C, dónde se aprecia que todas muestras de agua de lluvia captada por Techo y Patio están dentro de los límites de pH que indica la NOM-127-SSA1-1994. En el caso del agua de Base se observa que todas las muestras están por debajo de pH 6.5 y por lo tanto fuera de la norma pero alrededor del valor natural de 5.6. Sólo la muestra 3 y 5 del punto Base se pueden considerar lluvia ácida.

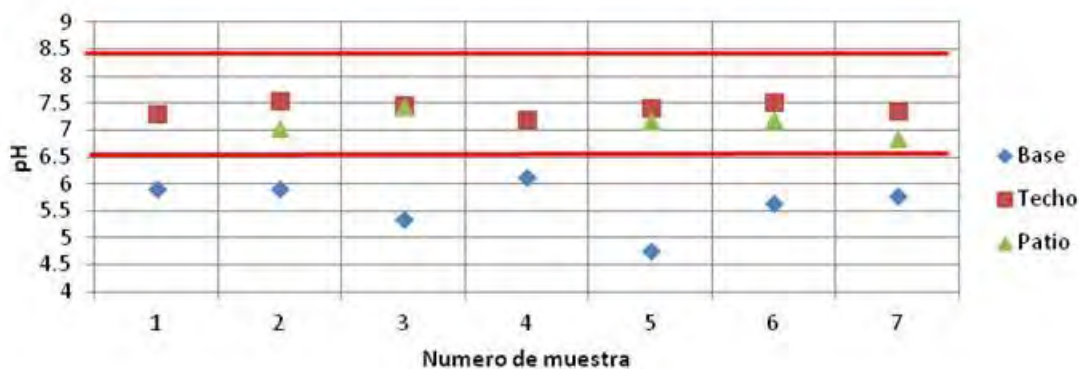


Figura 4.8. pH de agua de lluvia captada por tres puntos de muestreo.

La CE se comportó de manera similar al pH como se observa en la Figura 4.9. En el caso de Base la CE fue muy constante y más baja que en los otros dos puntos de muestreo. El Techo se comportó relativamente constante y el Patio tuvo la muestra 3 y 5 más altas que el resto.

Tanto los resultados de conductividad como los de pH se manifestaron de manera acorde a la cantidad de sólidos que puede disolver el agua según la superficie dónde es captada.

<sup>i</sup> Los datos cumplieron con el supuesto de normalidad.

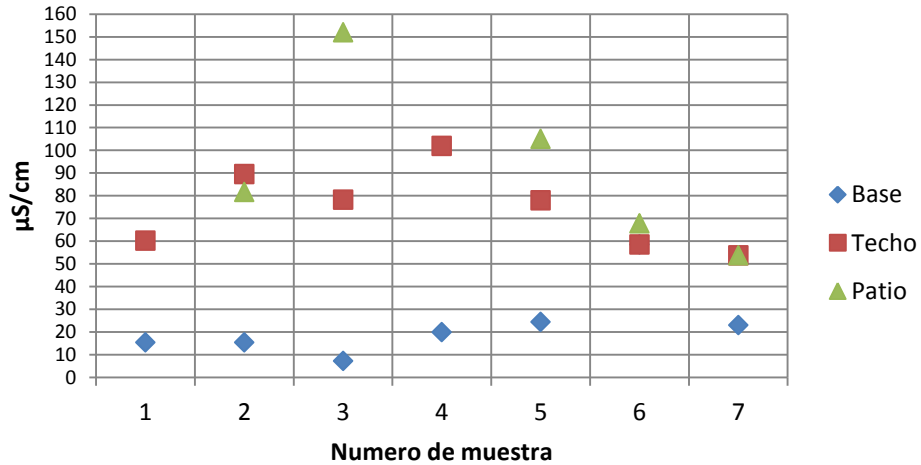


Figura 4.9. CE en agua de lluvia captada por tres puntos de muestreo.

A continuación se presentan los iones disueltos en agua de lluvia captada por las tres superficies.

La Figura 4.10 muestra la concentración en mg/l del ion  $\text{SO}_4^{2-}$  donde se aprecia que en Base fue menor y más constante que en los otros puntos de muestreo. El Patio tuvo las muestras 3 y 5 con concentración notablemente más alta que las demás.

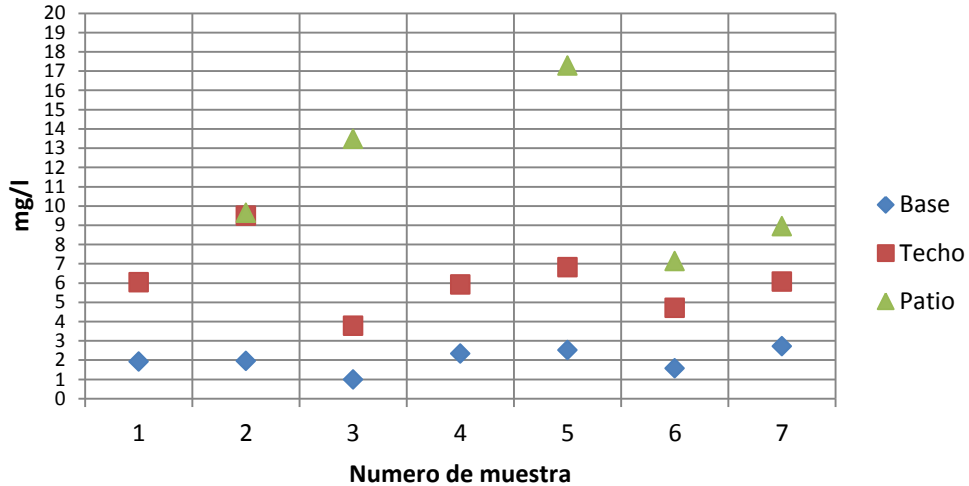


Figura 4.10. Concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  en agua de lluvia captada por tres superficies.

La Figura 4.11 muestra que la concentración en mg/l del ion  $\text{NO}_3^-$  como nitrógeno (N) se comportó de forma muy similar y constante en Techo y Base y a la vez menor que en Patio.

Figura 4.12 se presenta la concentración del ion  $\text{Cl}^-$  en mg/l donde Base y Patio se comportan de forma muy similar y a la vez menor que Patio.

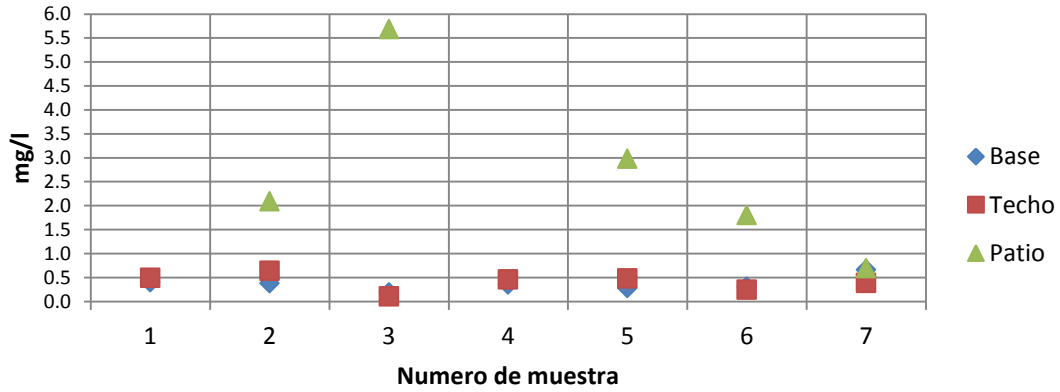


Figura 4.11. Concentración de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en agua de lluvia captada por tres superficies.

En la Figura 4.13 se muestran los resultados de Na<sup>+</sup> dónde la mayor de concentración corresponde a Patio y en el caso de Base y Techo se comportan de forma muy similar.

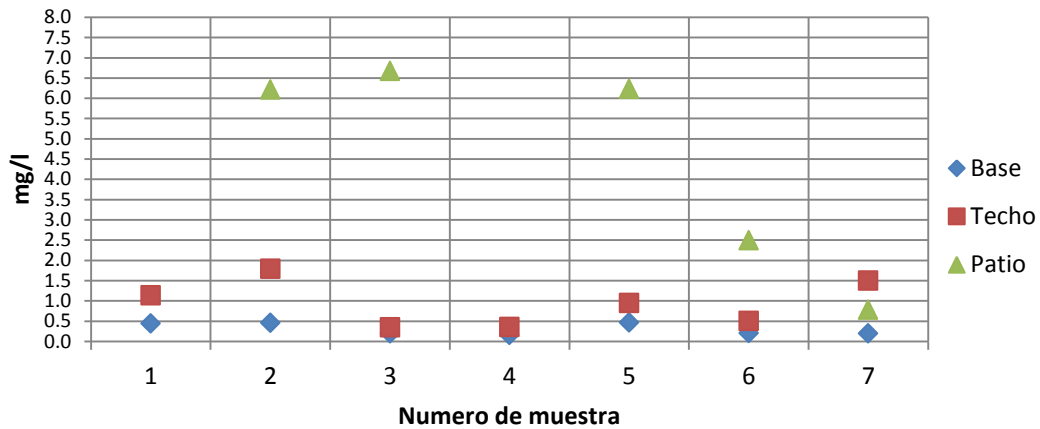


Figura 4.12. Concentración de Cl<sup>-</sup> en agua de lluvia captada por tres superficies.

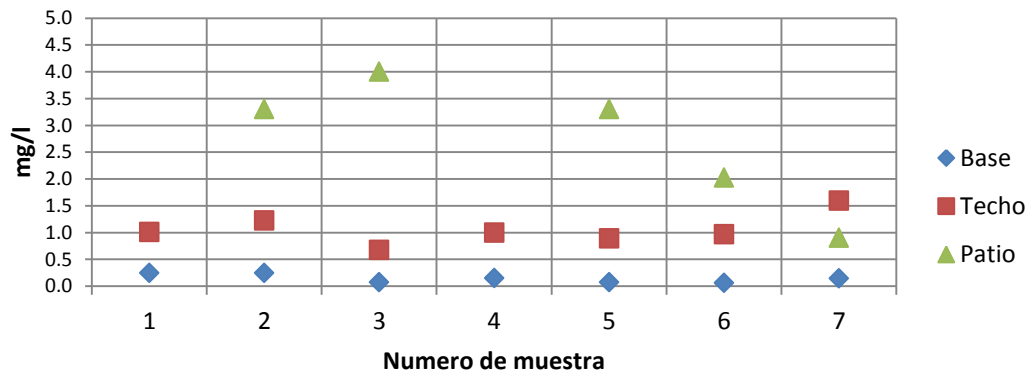


Figura 4.13. Concentración de Na<sup>+</sup> en agua de lluvia captada por tres superficies.

El control de calidad de iones se llevó a cabo con un balance iónico, que es la relación que existe entre la suma de cationes y la suma de aniones. La calidad del análisis es aceptable si la relación es cercana a 1 y sólo uno de los balances no superó el 0.8.

Tabla 4.3. Comparación de los promedios ponderados de agua de lluvia captada por las tres superficies, agua de autotanque y la NOM-127-SSA1-1994.

Descripción	CE μS/cm	SDT* mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/l	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ** mg/l	Cl <sup>-</sup> mg/l	Na <sup>+</sup> mg/l
Lluvia de Base ( 7 muestras)	23.47	14.78	2.71	0.66	0.25	0.25
Lluvia en Techo (7 muestras)	74.33	47.57	9.49	0.63	0.69	1.59
Lluvia en Patio (7 muestras)	92.06	58.92	17.28	5.60	4.13	4.00
Agua de autotanque (6 muestras)	164.14	105.05	18.03	0.86	8.03	10.84
<b>NOM-127-SSA1-1994</b>	---	<b>1000</b>	<b>400</b>	<b>10 (como N)</b>	<b>250</b>	<b>200</b>

\* SDT (Sólidos Disueltos Totales) se calcularon de forma indirecta por medio de la CE y la ecuación:

SDT = (CE[dS/m])(640) (*Salinity Management Guide*, 2010) para la comparación con la NOM-127-SSA1-1994.

\*\* Las concentraciones de nitrato están expresadas como nitrógeno (N) para compararse con la norma.

En la Tabla 4.3 se comparan los promedios ponderados de la Figura 4.8 a Figura 4.13 con el promedio ponderado de seis muestras de agua de Autotanque tomadas los mismos días de las muestras de lluvia. Ninguno de los casos rebasa la norma para agua potable NOM-127-SSA1-1994, pero se muestran por orden creciente de sólidos disueltos. El agua de lluvia de Base es la que presenta menores concentraciones, seguida por la de Techo, Patio y la mayor concentración corresponde al agua de Autotanque.

El punto de muestreo de Patio tuvo mayor variabilidad y mayor concentración promedio que los demás puntos de muestreo en todos los parámetros fisicoquímicos y se puede deber a que es un punto difícil de controlar a diferencia de los otros. Como era de esperarse, el punto de Base fue el de menor variabilidad y menor concentración en todos los parámetros fisicoquímicos.

En términos generales, el agua de los puntos de muestreo cumple con los límites de la NOM-127-SSA1-1994 en los parámetros analizados de pH, Iones y Sólidos Disueltos Totales.

#### 4.1.2.3 PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS<sup>i</sup>

Los análisis de los parámetros microbiológicos se hicieron con base en las metodologías de Camacho *et al.* (2007). Se tomaron cuatro muestras de agua del punto de muestreo Techo, una de Base, una de Patio y una de Autotanque.

En la Tabla 4.4 se observa que el agua de lluvia captada por el Techo y Patio arrastró microorganismos coliformes que son indeseables para su uso como agua potable y una cantidad alta de mesófilos aerobios<sup>ii</sup>, lo cual indica una mayor concentración microbiana. En el caso de

<sup>i</sup> Los análisis microbiológicos se realizaron en el Cepario de la Facultad de Química con la supervisión del QFB. Alejandro Camacho Cruz.

<sup>ii</sup> Los mesófilos aerobios son todas las bacterias, mohos y levaduras capaces de desarrollarse a 30° C. Se usan como un estimador de microorganismos totales no específicos.

agua de lluvia del punto de muestreo Base no presentó coliformes y la concentración de mesófilos fue muy baja.

Tabla 4.4. Concentración de microorganismos en agua de lluvia captada por tres superficies y el límite de la NOM-127-SSA1-1994

Numero de muestra	Fecha	Descripción	Mesófilos aerobios UFC/ml	Coliformes totales		Coliformes fecales UFC/100 ml
				NMP/100 ml	UFC/100 ml	
1	130810	Base	4	<1.1 / ND	---	ND
2	130810	Autotanque	350	<1.1 / ND	---	ND
3	130810	Patio	12240	>8	---	1
4	130810	Techo	3960	>8	---	ND
5	100910	Techo	---	<1.1 / ND	---	ND
6	170910	Techo	2700	>8	---	ND
7	121010	Techo	24150	---	3	ND
<b>NOM-127-SSA1-1994</b>			---	<b>Ausencia o no detectable</b>	<b>Ausencia o no detectable</b>	<b>Ausencia o no detectable</b>

Los microorganismos coliformes indican presencia de contaminación de origen fecal que pudo proceder de las heces de la calle que se secan, pulverizan, son arrastradas por el viento y se depositan en las superficies de captación. Otra fuente de contaminación de este tipo pudo ser alguna ave que depositó sus heces en Techo. El agua de lluvia captada requiere un tratamiento que elimine los microorganismos en caso de uso potable como indica la norma.

En caso que el agua de lluvia se use para fines no potables como limpieza, riego y uso sanitario se puede evitar el tratamiento microbiológico pero se sugiere mantener el agua en ausencia de luz y temperatura baja para evitar el desarrollo de algas y otros microorganismos.

La calidad del agua de lluvia antes de tocar una superficie de captación cumplió con los parámetros analizados de la NOM-127-SSA1-1994 a excepción del pH. Para aprovechar el agua a nivel doméstico se requiere captar en una superficie. En la evaluación de la calidad de agua se pudo comprobar que es en la superficie donde adquiere características indeseables, principalmente turbiedad, color y microorganismos. Aún con este grado de contaminación, el agua de lluvia que se captó en un techo de cemento impermeabilizado en el Ecobarrio de Santa Rosa Xochiac cumplió con los límites máximos de los parámetros de sólidos disueltos totales, todos los iones, coliformes fecales y pH mientras que marginalmente cumplió con color y turbiedad. Sin embargo no cumplió con coliformes totales. Por ello se propone que para su aprovechamiento el agua de lluvia captada requiere tratamiento. El trabajo no desarrolla el aprovechamiento con un patio debido a que se comprobó que la variabilidad es mucho mayor y es un sitio con dificultad para mantenerlo limpio.

## 4.2 PROPUESTA DE TRATAMIENTO DEL AGUA DE LLUVIA

Tomando en cuenta que el agua de lluvia adquiere la mayor contaminación cuando es captada en una superficie como el techo de una casa, se propone un tratamiento con las siguientes etapas para su potencial aprovechamiento como fuente de abastecimiento a nivel doméstico:

- prefiltrado,
- desinfección,
- y filtrado

#### 4.2.1 EVALUACIÓN DEL PREFILTRADO

El prefiltrado tiene como objetivo mejorar la calidad del agua de lluvia captada por el techo de una casa con la premisa de prevención, ya que es más fácil y económico evitar que se contamine en vez de descontaminarla. La siguiente es la propuesta:

- separación de hojas y sólidos grandes, para retirar la materia más grande que puede generar carbono orgánico disuelto, sólidos disueltos, color y olor;
- separación de primera lluvia, para aislar la primera agua que a su paso limpia la atmósfera y la superficie de captación y por tanto tiene mayor concentración de contaminantes;
- y desarenación para reducir la cantidad de sólidos sedimentables en la cisterna (Gould y Nissen-Petersen, 1999; Mechell *et al.*, 2010).

A continuación se desarrolla una propuesta de evaluación individual de los componentes del prefiltrado para elegir los incluidos en la implementación del sistema.

##### 4.2.1.1 SEPARADOR SÓLIDOS GRANDES

El separador de sólidos grandes es un dispositivo para cribar hojas, ramas, piedras, insectos u otros sólidos de tamaño grande fáciles de retirar. Se observó que al realizar esta tarea todos los sólidos grandes quedaban atrapados por lo que se optó por evaluar la eficiencia de aprovechamiento de agua de forma cuantitativa en vez de la eficiencia de retención.

En un barril se conectó una tubería de PVC de 2" de diámetro y una válvula de esfera para controlar el flujo. Dentro se agregaron aproximadamente 30 litros de agua de la red junto con 10 hojas de árbol y 5 piedras similares para todos los casos. El dispositivo separador se colocó al final del tubo.



Figura 4.14. Arreglo para evaluación de separador de sólidos grandes.

Se abrió la válvula esfera permitiendo tener un flujo inicial aproximado a 350 ml/s<sup>i</sup>. Se colocaron recipientes para medir el volumen de agua que desperdició cada dispositivo en su objetivo de retirar sólidos grandes y a la vez arrojarlos fuera de la malla y del camino del agua. Los tres dispositivos a evaluar tuvieron esta característica que se describe como “autolimpieza”. El más eficiente fue el que menor cantidad de agua desperdició.

En la Figura 4.14 se observa un diagrama del arreglo utilizado para esta evaluación. La altura entre el fondo del tambo y el dispositivo a evaluar fue de 45 cm aproximadamente.

Para calcular el porcentaje de eficiencia de aprovechamiento se utilizó la ecuación:

$$\xi = \frac{Ai - Ad}{Ai} * 100$$

donde *Ai* son litros de agua inicial y *Ad* son litros de agua desperdiciada.

Se construyeron tres dispositivos separadores de sólidos grandes. El modelo “a”, mostrado en la Figura 4.15(a), está basado en la propuesta de Gould y Nissen-Petersen (1999) mostrada en la Figura 2.7(a). Consiste en una malla metálica, que evita el paso de los sólidos, montada diagonalmente en un tubo de PVC de 4”. Al pasar el agua por gravedad, los sólidos son retenidos y algunos expulsados fuera del dispositivo.

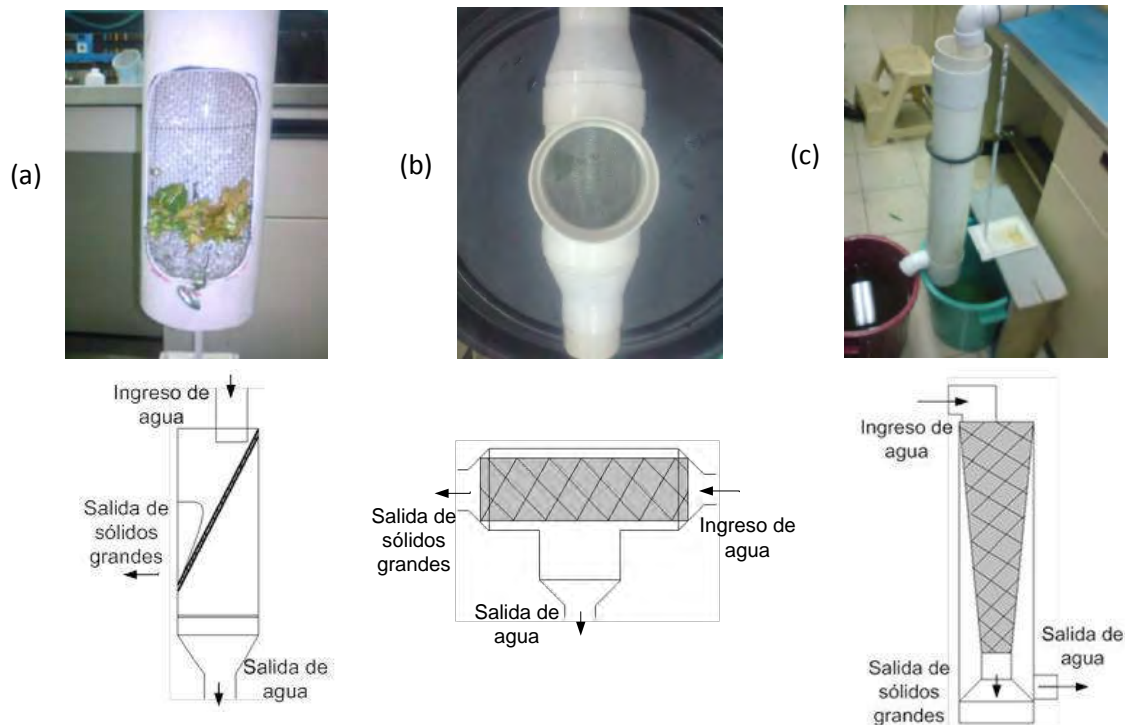


Figura 4.15. Separadores de sólidos grandes, (a) y (c) son propuestas de Gould y Nissen-Petersen (1999).

<sup>i</sup> El valor de 350 ml/s se obtuvo con la intensidad de precipitación más común en la zona, que es de 25 mm/h y una superficie de 50 m<sup>2</sup>.

El modelo “b” que se observa en la Figura 4.15 (b) consiste en una “T” comercial de PVC de 4” con una malla en forma cilíndrica por dentro. El agua de lluvia atraviesa la rejilla por gravedad pero los sólidos son retenidos y desplazados fuera del dispositivo por la fuerza de chorro de agua, lo que propicia una limpieza automática. Del lado de la entrada de agua se colocó una pieza de reducción a 2” y de la salida a 3”.

El modelo “c” es más complejo que los anteriores y está basado en la propuesta de Gould y Nissen-Petersen (1999) de la Figura 2.7(b). Consiste en un cilindro de PVC con una malla interna en forma de cono truncado. El agua se ingresa en la parte superior con un codo para darle efecto de centrifugado, haciendo que el agua caiga por un tubo para ser aprovechada y los sólidos se retengan en la malla y caigan automáticamente por gravedad.

Se realizaron 5 repeticiones para probar cada dispositivo con la misma metodología obteniendo los resultados de eficiencia de aprovechamiento de agua mostrados en la Figura 4.16. El modelo a tuvo la mejor eficiencia con un promedio de 99 % mientras que los modelos “b” y “c” obtuvieron 90 % y 78 % respectivamente.

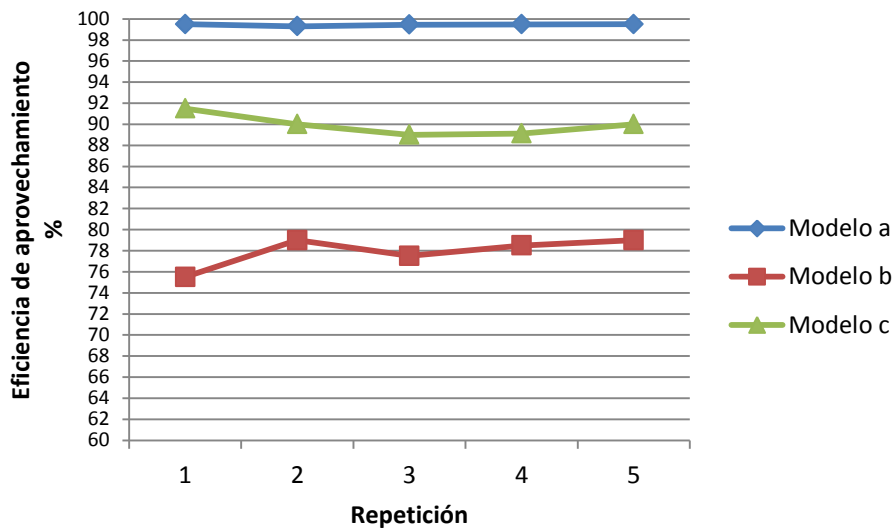


Figura 4.16. Resultado de evaluación de la eficiencia de aprovechamiento de agua en separadores de sólidos.

Por medio de una prueba de Tukey<sup>i</sup> se comprobó que los tres modelos son estadísticamente diferentes y el que tiene mejor eficiencia de aprovechamiento es el modelo “a”, seguido por el “b” y “c”.

Para complementar la evaluación de estos dispositivos en la Tabla 4.5 se muestran las ventajas y desventajas observadas durante las repeticiones.

Tabla 4.5. Evaluación cualitativa de los dispositivos para separar sólidos grandes.

<sup>i</sup> Los datos analizados cumplieron con el supuesto de normalidad.



Modelo	Ventajas	Desventajas
Modelo "a"	Principio de funcionamiento simple. El principio de limpieza automática no se cumple por completo.	Los sólidos pueden quedar atrapados en la malla y obstruir el paso del agua y con la fuerza del chorro las hojas se pueden romper y pasar al agua de aprovechamiento.  La construcción es complicada, especialmente mantener la malla en el ángulo deseado.
Modelo "b"	Principio de funcionamiento y construcción simple. El principio de limpieza automática no se cumple por completo.	Los sólidos pueden quedar atrapados en la malla y obstruir el paso del agua, lo que deriva en desperdicio del líquido.
Modelo "c"	Excelente eficiencia de autolimpieza.	Funcionamiento y construcción más complejo que los anteriores.  Un porcentaje de agua mayor que los anteriores se desperdicia.

Se recomienda el uso del separador de sólidos modelo "b" porque aunque no obtuvo la mejor eficiencia de aprovechamiento fue el más simple de construir.

#### 4.2.1.2 SEPARADOR DE PRIMERA LLUVIA

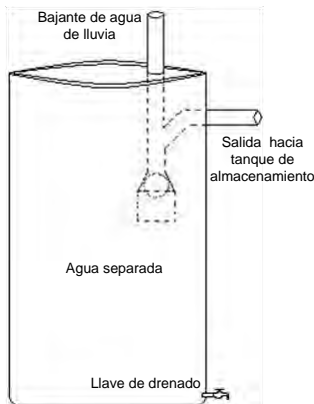
El separador de primera lluvia es un dispositivo que se basa en el hecho que es mayor la cantidad de lluvia que cae que la que podemos almacenar y aprovechar. Por lo tanto, favorece una mejor calidad de agua al aislar los primeros mm de lluvia que tienen mayor concentración de contaminantes ya que esta agua limpia la atmósfera y la superficie de captación. La evaluación de tres de estos dispositivos fue cualitativa con base en su construcción y la observación de su funcionamiento con lluvia sobre un techo de cemento. Este dispositivo tiene la filosofía de prevención al mantener la calidad del agua de lluvia antes de contaminarse en vez de descontaminarla.

Se construyeron tres dispositivos separadores de primera lluvia. El modelo "d" mostrado en la Figura 4.17(d) está basado en la propuesta de la UNATSABAR en 2001. El modelo "e" es un dispositivo modificado y registrado por el proyecto Isla Urbana del Instituto Internacional de Recursos Renovables, que se observa en la Figura 4.17(e). Y el modelo "f" es una propuesta de este trabajo y se observa en Figura 4.17(f).

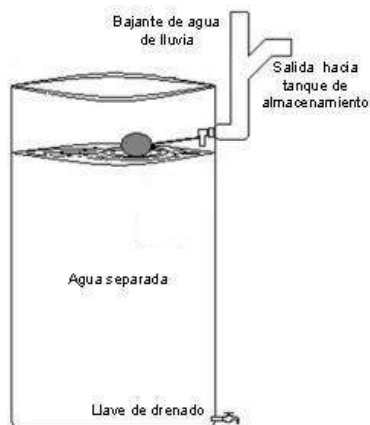
Para la fabricación de estos dispositivos se utilizaron tambos o barriles de HDPE, por sus características de duración, accesibilidad y facilidad para trabajar, así como tubos y piezas comerciales.



(d)



(e)



(f)

Figura 4.17. Separador de primera agua de lluvia: (d) modelo de UNATSABAR, (e) modelo de Isla urbana y (f) modelo propuesto por este trabajo.

El modelo “d” está compuesto por un barril con tubería de PVC fijada a la parte lateral con una pelota dentro que flota que al llegar a cierto nivel obstruyendo el tubo bajante de lluvia. Los primeros mm de lluvia quedan atrapados en el barril y los siguientes continúan hacia la cisterna o volumen de almacenamiento.

El modelo “e” del proyecto Isla Urbana es una modificación del modelo “d” y la diferencia primordial es la reducción de la cantidad de material y simplificación del funcionamiento aunque usa el mismo principio de la pelota flotante.

El modelo descrito como “f”, se plantea para mejorar la característica de aislar por completo el agua de primera lluvia y evitar mezcla, aumentado la calidad del agua de lluvia. Se compone de una tubería de PVC fijada a un barril de plástico con un dispositivo de cerrado por flotación comercial tipo tinaco.

En la Tabla 4.6 se resumen los resultados de la evaluación cualitativa de los dispositivos de separación de primera lluvia.

Tabla 4.6. Comparación de equipo de tratamiento primario para aprovechamiento de agua de lluvia.

Modelo	Ventajas	Desventajas
Modelo “d” (UNATSABAR, 2001)	Es un modelo propuesto por un manual de captación de lluvia de la UNATSABAR en 2001 y existe documentación para su implementación.	El agua puede derramarse del barril sin una tapa hermética. Fue complicado sellar la tubería de PVC al tambor manteniendo el mismo diámetro. Requiere una mayor cantidad de material de PVC que los otros.
Modelo “e” (Isla Urbana, 2010)	Reduce el número de piezas y material, por lo que es menos costoso y más simple de implementar que el anterior. El diseño disminuye el problema de derrame de agua del barril aún sin tapa hermética.	Se observa que el agua de primera lluvia no queda totalmente aislada por la pelota y puede mezclarse en pequeña proporción con el agua que se va a aprovechar. Esto se debe a que el chorro de agua del bajante cae de forma agresiva sobre la pelota.
Modelo “f”	El cierre hermético que se logra con el flotador tipo tinaco aparta perfectamente la primera agua de lavado de la que se va a aprovechar. El diseño evita completamente el derrame de agua del barril aún sin tapa hermética. Además se puede ajustar la altura de cerrado.	El flotador comercial es más costoso que los anteriores. Se reduce la tubería hasta 1”, lo que disminuye la capacidad de desagüe de la azotea y además podría taparse con sólidos grandes

En todos los modelos es necesario drenar el agua retenida para que en el siguiente evento de lluvia vuelvan a cumplir su tarea. El drenado puede hacerse manual o dejar la llave abierta para que sea automático.

Se recomienda en general el modelo “e” por ser económico, fácil de implementar y reducir los problemas del modelo “d”. Aunque el modelo “f” tiene un sellado perfecto, sólo se recomienda para la captación de superficies menores a 50 m<sup>2</sup> debido a la reducción del diámetro que genera el flotador.

#### 4.2.1.3 DESARENADOR

Uno de los problemas de la captación pluvial son los sólidos sedimentables que pueden ser arrastrados de la superficie de captación por el agua.

Este dispositivo desarenador consiste en un recipiente donde se reduce el flujo del agua para permitir la sedimentación de los sólidos antes de pasar al medio de almacenamiento, generalmente una cisterna, mejorando la calidad del agua y facilitando el mantenimiento. Se evaluó el desarenador descrito por Gould y Nissen-Petersen (1999) (Ver Figura 2.9) con algunas modificaciones.

En un barril se conectó una tubería de PVC de 2" de diámetro y una válvula de esfera para controlar el flujo. Dentro se agregaron aproximadamente 40 litros de agua de la red y una cantidad conocida de sólidos sedimentables, en este caso 1 mg/l<sup>i</sup>. En este caso se utilizó arena tamizada de tamaño 0.075 mm (malla 200) porque aproximadamente el 80 % sedimenta en 1 minuto en condiciones de estancamiento, característica que la hace adecuada para observar diferencias entre las variantes a evaluar.

Con ayuda de un mezclador se mantuvieron los sólidos sedimentables en suspensión dentro del barril y mediante la válvula esfera y la tubería se hizo pasar la mezcla homogénea hacia el desarenador a un flujo inicial aproximado a 350 ml/s<sup>ii</sup>. Se midió la concentración de sólidos sedimentables a la salida del desarenador para evaluar su eficiencia de remoción. El diagrama del arreglo para la evaluación se muestra en la Figura 4.18.

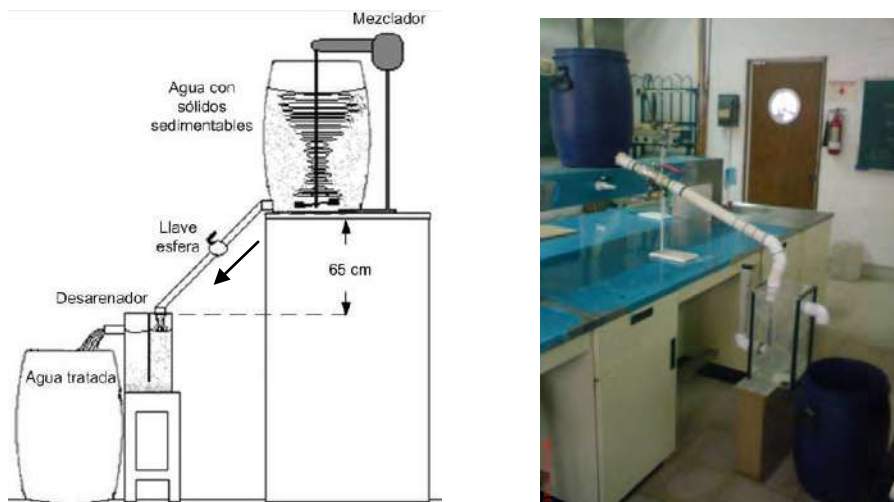


Figura 4.18. Arreglo de evaluación del clarificador.

<sup>i</sup> Aunque en la evaluación de la calidad de agua se determinaron concentraciones menores (Figura 4.6). se propuso este valor de 1 mg/l porque al hacer algunas repeticiones con menor cantidad fue muy complicado medir diferencias entre las variables.

<sup>ii</sup> Este valor de 350 ml/s se calculó, al igual que en el caso del separador de sólidos grandes, por medio de la intensidad de lluvia de la zona de 25mm/h y una superficie de 50 m<sup>2</sup>.

Se construyó un desarenador de 0.25 x 0.25 x 0.40 m<sup>3</sup> en acrílico de 3 mm de espesor para observar el funcionamiento interno. Se agregó una entrada lateral, una entrada superior, una salida de drenado en el fondo y una salida de agua desarenada.

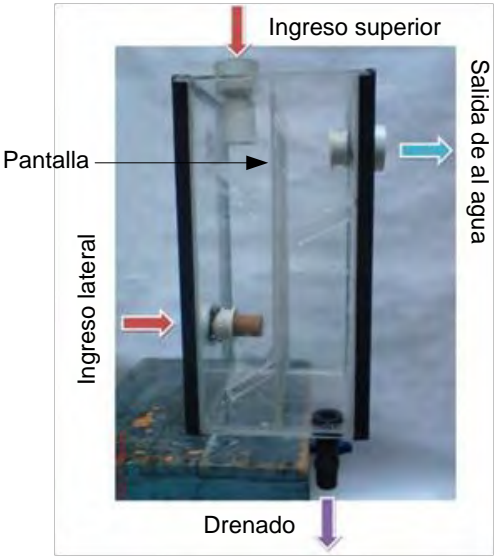


Figura 4.19. Dispositivo desarenador y sus variables.

Las variantes a evaluar fueron las combinaciones entre las dos formas de entrada del agua, que son lateral y superior y dos tipos de pantalla interna del dispositivo, una de malla de 1 mm de abertura y la otra de acrílico. El desarenador y sus variables se muestran en la Figura 4.19 y Tabla 4.7.

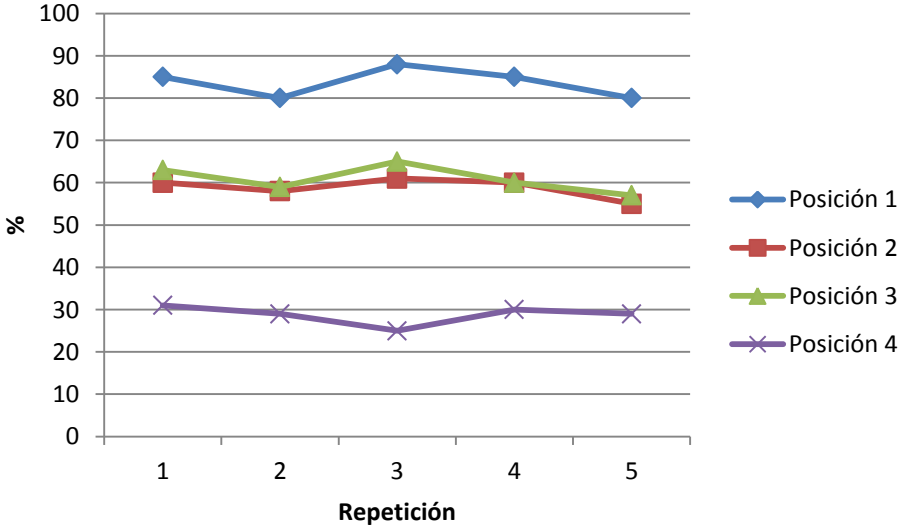
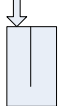





Figura 4.20. Eficiencia de remoción de sólidos sedimentables con desarenador y sus variables.

Tabla 4.7. Evaluación del desarenador y sus variantes.

Variante del dispositivo	Ingreso de agua	Pantalla	Remoción promedio de sólidos sedimentables %
 Arreglo 1	Superior	Acrílico macizo	84
 Arreglo 2	Lateral		59
 Arreglo 3	Superior	Malla con abertura de 1 mm	60
 Arreglo 4	Lateral		29

Los resultados de la evaluación se muestran resumidos en la Tabla 4.7 y extendidos en la Figura 4.20.

Una prueba estadística de Tukey<sup>i</sup> permitió determinar que la Arreglo 1 del desarenador tuvo mejor eficiencia de remoción de sólidos sedimentables con un promedio de 84 %, mientras que la Arreglo 2 y 3 son estadísticamente iguales con un 60 % y la Arreglo 4 es la menos eficiente con 29 %. Estos resultados son válidos con menos del 5 % de probabilidad de error.

Se recomienda utilizar un desarenador con ingreso superior y pantalla de acrílico que obliga al agua a bajar para continuar su camino sedimentando un porcentaje alto de sólidos.

## 4.2.2 EVALUACIÓN DE LA FILTRACIÓN

Una vez superado el separador de sólidos grandes, el separador de primera lluvia y el desarenador, el agua de lluvia arrastra sólidos suspendidos que pueden eliminarse con un filtro.

### 4.2.2.1 FILTRO RÁPIDO POR GRAVEDAD

La primera propuesta fue filtro rápido por gravedad. Antes de evaluar este dispositivo se requiere calcular las dimensiones para su construcción, por lo que se realizaron pruebas de conductividad hidráulica.

<sup>i</sup> Los datos analizados cumplieron con el supuesto de normalidad.

Se propuso usar arena de cuarzo y zeolita natural como medio filtrante. El primer material tiene muchos antecedentes y actualmente es muy utilizado en todo tipo de filtros. El segundo es un mineral de la familia de los aluminosilicatos cristalinos de origen natural que es ligero, elimina olores, regula el pH y retiene metales pesados por su capacidad de intercambio iónico (Bosch, 2010).

Se usó material con granulometría de 0.59 a 1 mm, según una propuesta de Garrido de 2009. El cálculo se realizó con base en el método estándar de la ASTM, utilizando el modelo de vasos comunicantes de la Figura 4.21 y la ecuación de Darcy:

$$k = \frac{VL}{HAt}$$

donde  $k$  = carga hidráulica [ $\text{m}^3/\text{cm}^2 \text{ min}$ ],  $V$  = volumen =  $0.001 \text{ m}^3$ ,  $L$  = altura de la muestra =  $25 \text{ cm}$ ,  $H$  = altura de columna de agua =  $35 \text{ cm}$ ,  $A$  = área transversal del tubo =  $15.20 \text{ cm}^2$  y  $t$  = tiempo del ensayo [min].

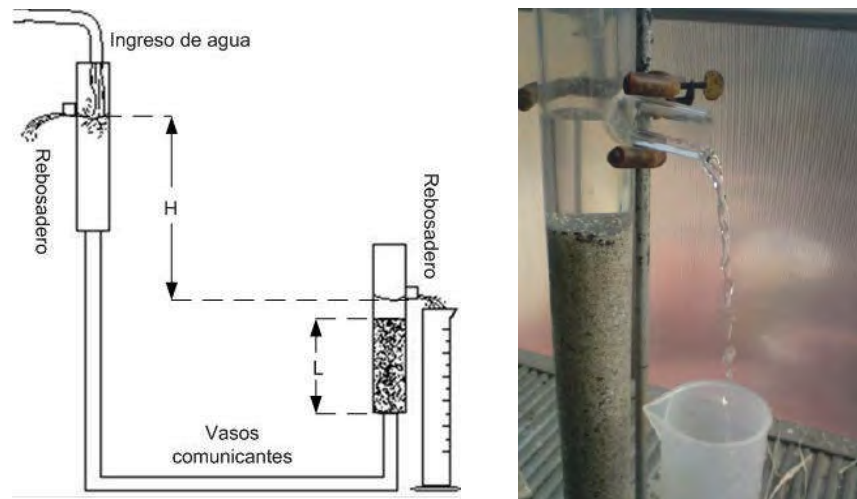


Figura 4.21. Diseño de vasos comunicantes para el ensayo de conductividad hidráulica.

La Figura 4.22 muestra la conductividad hidráulica calculada a partir de las determinaciones consecutivas del tiempo que tarda en pasar un volumen de  $0.001 \text{ m}^3$  por el medio filtrante según el modelo anterior.

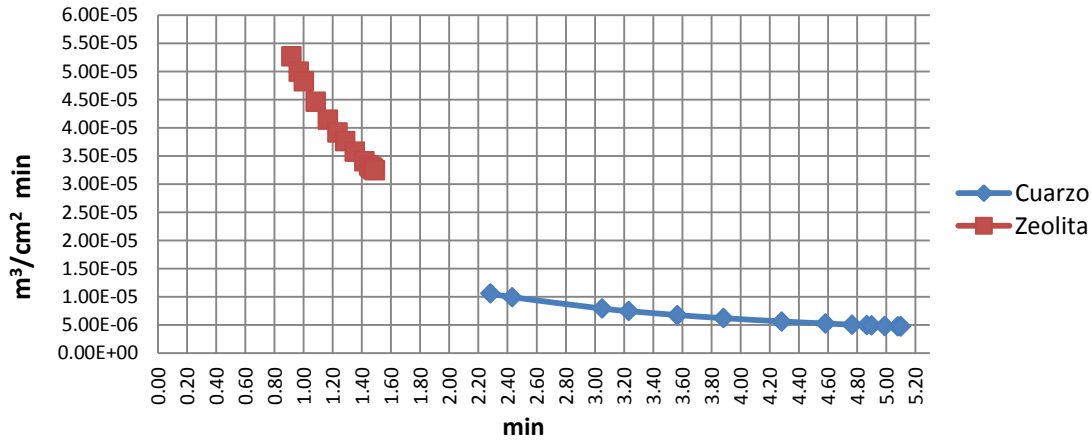


Figura 4.22. Ensayo de conductividad hidráulica.

La conductividad hidráulica de la arena de cuarzo y de la zeolita se estabilizó en  $4.74 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{cm}^2 \text{ min}$  y  $3.24 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{cm}^2 \text{ min}$ , respectivamente. La zeolita tuvo conductividad hidráulica más alta, lo cual indica que permite un mayor flujo a través de ella. Además su rango de variación fue más grande y se estabilizó en menor tiempo con respecto a la arena de cuarzo.

Con un techo de captación de  $50 \text{ m}^2$  y una lluvia de  $25 \text{ mm/h}$  de intensidad, que es lo más frecuente en la zona de estudio, se necesitarían filtrar aproximadamente  $20 \text{ l/min}$ . Usando arena de cuarzo de  $0.59$  a  $1 \text{ mm}$ , se requeriría un área transversal mínima de  $4\,218 \text{ cm}^2$ . Si se propusiera un filtro cilíndrico, éste debería tener un radio aproximado de  $37 \text{ cm}$ .

Para el caso de la zeolita el área transversal mínima requerida para las mismas condiciones anteriores es de  $616 \text{ cm}^2$  y un filtro cilíndrico debería tener un radio aproximado de  $14 \text{ cm}$ .

Otro aspecto a tomar en cuenta es que el proceso de preparación de ambos materiales implica tamizado y lavado. Tanto la arena de cuarzo como la zeolita se lavaron con agua corriente y sólo la arena con ácido clorhídrico al  $10 \%$  para eliminar materia orgánica, lo cual le agrega un costo extra. En la Tabla 4.8 se concentra la evaluación cualitativa.

La zeolita es un material que libera sólidos muy finos que aportan turbiedad al agua, por lo que requiere agregar un filtro pulidor posterior.

Ambos filtros requieren mantenimiento con mucha agua de retrolavado para evitar formación de biopelícula<sup>i</sup> en su interior.

Por haber más desventajas que ventajas, en lugar del filtro a gravedad se propone a continuación el uso de filtrado a presión.

<sup>i</sup> Ecosistema microbiano adherido a una superficie.



Tabla 4.8. Evaluación cualitativa del filtro rápido por gravedad.

Medio filtrante	Ventajas	Desventajas
Arena de cuarzo	<p>Es accesible en costo y disponibilidad.</p> <p>Permite filtrar sólidos suspendidos.</p>	<p>El tamaño de un filtro por gravedad para la intensidad de lluvia y el área de captación estándar resultó muy grande (37 cm de radio).</p> <p>La preparación de la arena fue complicada por el tamizado y se requieren grandes cantidades de agua y ácido para limpiarla.</p> <p>El filtro tiene un peso elevado y para su mantenimiento requiere grandes cantidades de agua para retrolavado.</p>
Zeolita	<p>Se reduce el tamaño del filtro con respecto a la arena de cuarzo.</p> <p>La zeolita es mucho más ligera que la arena. Además reduce olores, regula el pH y puede retener metales pesados.</p>	<p>El tamaño del filtro sigue siendo grande (14 cm de radio) para una casa de 50 m<sup>2</sup> de techo de captación.</p> <p>Al pasar agua por la zeolita natural desprende sólidos suspendidos que agregan turbiedad.</p> <p>Es aproximadamente el doble de costosa que la arena de cuarzo.</p> <p>Su preparación fue complicada por tamizado y lavado.</p> <p>Requiere grandes cantidades de agua para retrolavado.</p>

#### 4.2.2.2 FILTRADO A PRESIÓN

Comercialmente existe una gama de filtros a presión que funcionan con ayuda de una bomba hidráulica. Los filtros se pueden elegir según las características del tratamiento deseado y se pueden colocar en serie.

Estos filtros a presión se pueden seleccionar según el material filtrante, tamaño del filtro y el diámetro del poro. Dos filtros de igual tamaño y poro pero diferente material teóricamente tienen la misma eficiencia de filtrado, pero la caída de presión que generan es distinta.

La evaluación consistió en medir el volumen de agua que desplazó una bomba hidráulica de  $\frac{3}{4}$  HP<sup>i</sup> sobre una tubería de  $\frac{3}{4}$ " con el arreglo de filtración en 60 s. Con esta prueba se determinó el filtro que generó la menor caída de presión en un punto de medición a 5 m como se muestra en la Figura 4.23. Con cada filtro se repitió el ensayo 3 veces.

<sup>i</sup> HP *horse power* o caballo de fuerza

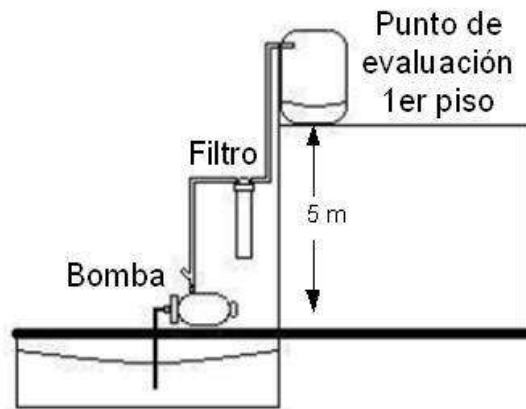


Figura 4.23. Diseño de evaluación de los filtros a presión.

Para comenzar se midió en el volumen de agua que hizo circular la bomba en 60 segundos sin filtrado sobre la tubería y se tomó como 100 % eficiencia de flujo.

Después se colocó en la línea de agua a presión cada arreglo de filtrado a evaluar y se midió el volumen de agua que hizo circular la bomba en 60 s. La eficiencia de flujo se calculó con la siguiente ecuación:

$$\xi = (\text{flujo sin filtrado} / \text{flujo con filtrado}) * 100$$

Primero se evaluó la diferencia entre un filtro plisado de 20" y uno de 10", obteniendo que el primero tuvo 75 % de promedio de eficiencia en flujo contra 62 % del segundo. Después se determinó que un filtro *polyspun* de 20" obtuvo una eficiencia en flujo de 72 % promedio. Con una prueba de Tukey<sup>i</sup> se determinó que entre el filtro *polyspun* y el plisado, ambos de 20", no hay diferencia significativa, pero se eligió el segundo como el adecuado para filtrar sólidos suspendidos debido a su tiempo de vida. Estos tres primeros filtros evaluados fueron de 50 µm de poro.

En seguida se evaluaron tres arreglos distintos formados por la combinación de un filtro plisado de 20" con un filtro de carbón activado granular, luego carbón activado en block de 10 µm de poro y finalmente zeolita de 1 mm de diámetro en cartucho.

El arreglo con carbón activado granular obtuvo 22 % de promedio de eficiencia, el de carbón activado en block obtuvo 71 % y el de zeolita sólo 18 %. El segundo arreglo fue estadísticamente diferente a los demás con menos del 5 % de probabilidad a error.

Los resultados de promedio de eficiencia de flujo se muestran en la Figura 4.24. Se propone el uso del filtro plisado para retener sólidos y el de carbón activado en block para retener color, olor, cloro y contaminantes orgánicos con base en la evaluación de la eficiencia en flujo. Estos filtros pueden usarse juntos o en diferentes etapas de tratamiento pero el filtro de sólidos debe anteceder al de carbón activado.

<sup>i</sup> Los datos cumplieron con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza.

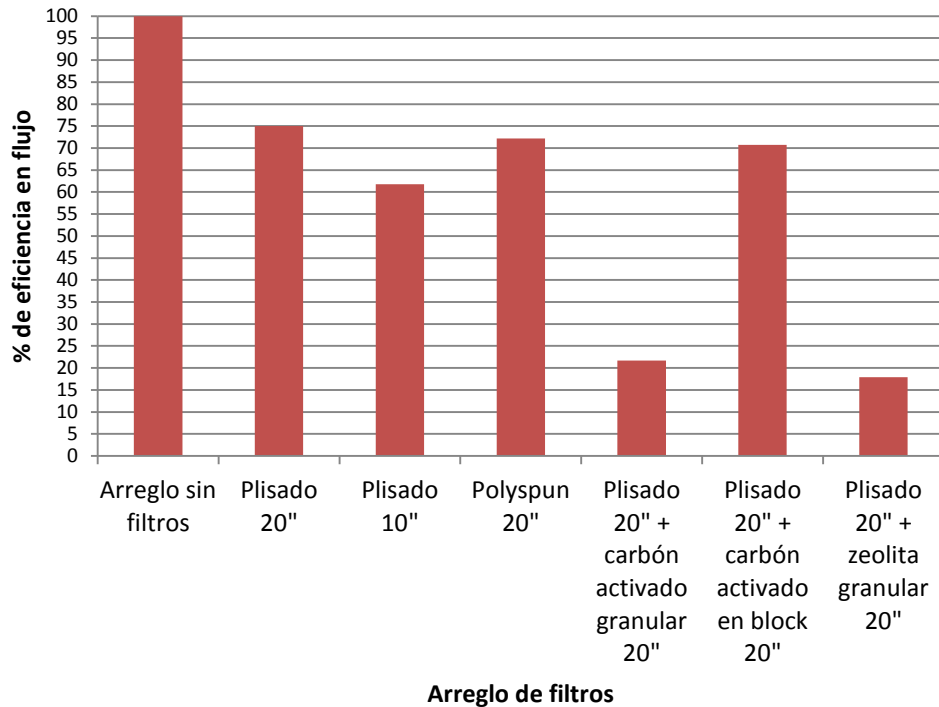


Figura 4.24. Eficiencia de flujo con filtrado a presión.

### 4.3 TRATAMIENTO CONTRA MICROORGANISMOS PARA EL AGUA DE LLUVIA

Uno de los principales problemas para aprovechar el agua de lluvia es que se puede contaminar con microorganismos presentes en el ambiente, mismos que en condiciones de almacenamiento tienden a proliferar y provocan color, olor y turbiedad, disminuyendo la alta calidad del agua, además que algunos son patógenos.

#### 4.3.1 EXPERIMENTO DE CONSERVACIÓN DE LA CALIDAD FÍSICA DEL AGUA DE LA LLUVIA DURANTE SU ALMACENAMIENTO

Un tratamiento que prevenga la contaminación del agua resulta mucho más económico y simple que uno correctivo. Por ello, se propone determinar si el  $\text{CuSO}_4$  tiene efecto para conservar las características físicas del agua de lluvia, como son color y turbiedad, en condiciones de almacenamiento. Se recomienda usar dosis de 0.5 mg/l por ser un veneno para los microorganismos en el agua y no provocar efectos adversos comprobados en la salud y el ambiente (DSENY, 2008).

##### 4.3.1.1 HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

Un tratamiento preventivo utilizando  $\text{CuSO}_4$  a una concentración segura para la salud y el ambiente de 0.5 mg/l, además de condiciones de almacenamiento favorables (recipiente cerrado a la sombra) es suficiente para conservar la calidad del agua de lluvia previniendo coloración y turbiedad durante su almacenamiento a 14 días.

La hipótesis nula ( $H_0$ ) es que no hay efecto del tratamiento y la hipótesis alternativa es que el tratamiento modifica la respuesta.

#### **4.3.1.2 ARREGLO DE TRATAMIENTOS**

El tratamiento que se estudió fue: agua de lluvia con  $\text{CuSO}_4$  a dosis de 0.5 mg/l y agua de lluvia sin tratamiento como blanco del experimento.

Las respuestas medidas fueron el color y turbiedad después de 14 días de arrancado el experimento. Para el análisis de resultados se propuso el modelo de experimento simple con un criterio de clasificación llamado tratamiento:  $\text{CuSO}_4$  en concentración 0.5 mg/l. El experimento además considera una covariable que es la respuesta inicial de color y turbiedad antes de comenzar con los tratamientos.

#### **4.3.1.3 DISEÑO DEL EXPERIMENTO**

Se colectó agua de lluvia del punto del techo de la casa estudiada en el punto 4.1.1. El agua se colectó después que el techo fue limpiado por las primeras lluvias de la temporada.

El experimento se diseñó usando un evento de lluvia como bloque para que los factores como el pH, CE, tipo y cantidad de microorganismos sean comunes a las unidades experimentales. El orden de llenado de los recipientes y la medición de la respuesta generada por cada tratamiento se hizo de forma aleatoria. Se propusieron mismas condiciones para todas las unidades experimentales, sin incidencia directa de la luz solar y temperatura ambiente dentro de un laboratorio.

#### **4.3.1.4 METODOLOGÍA DEL EXPERIMENTO**

Se colectó agua de lluvia del techo de la casa. La superficie se mantuvo limpia en lo posible.

Se repartió el agua en 2 recipientes de polietileno de alta densidad de 1 litro previamente desinfectados y con las mismas condiciones. Cada recipiente con agua y su tratamiento es una unidad experimental. El orden de llenado, el tratamiento que recibieron y el lugar donde se colocaron se decidió aleatoriamente por rifa.

Se determinó color verdadero y turbiedad después de 14 días con métodos estándar (American Public Health Association, 2005).

Se repitió la metodología para 4 eventos de lluvia diferentes.

Se analizaron los resultados.

#### **4.3.1.5 RESULTADOS DEL EXPERIMENTO**

Para dar tratamiento al agua de lluvia se utilizó sulfato de cobre II pentahidratado ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) que es una sustancia con la apariencia de cristales azules translúcidos (en estado sólido) que al disolverse en el agua libera iones  $\text{Cu}^{2+}$ . Para obtener la concentración de 0.5 mg/l de  $\text{CuSO}_4$  se realizaron cálculos estequiométricos que resultaron en 0.8 g de  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  disueltos en 1 litro de

agua destilada para obtener una solución concentrada de la cual fue necesaria 1 ml por cada litro de agua a tratar.

La Figura 4.25 muestra las diferencias en el agua de lluvia de tres eventos con y sin  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , después de 14 días en las mismas condiciones de almacenamiento.

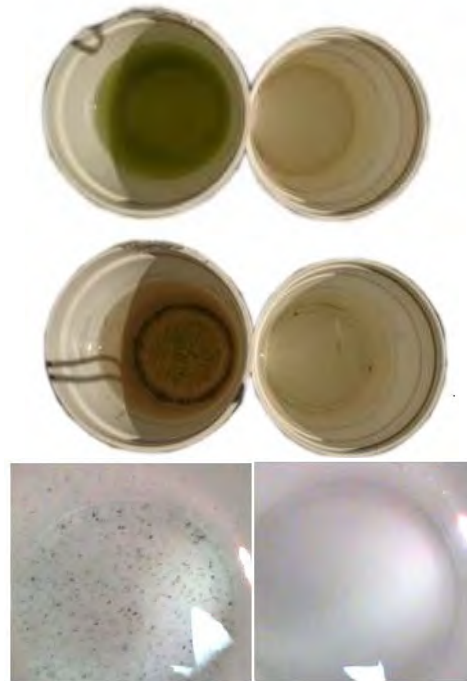


Figura 4.25. A la izquierda se muestran los recipientes con agua de lluvia sin tratamiento. A la derecha los que recibieron el tratamiento de 0.5 mg/l de  $\text{CuSO}_4$ .

A nivel cualitativo se aprecia que existe diferencia entre el agua que no recibió tratamiento y la que recibió  $\text{CuSO}_4$ . En la primera proliferaron algas aun sin incidencia solar directa y la segunda por el contrario presentó buenas condiciones organolépticas.

Para cuantificar el efecto del tratamiento, los resultados se muestran en la Figura 4.26 para color verdadero y Figura 4.27 para turbiedad.

Se realizó una prueba de análisis de varianza<sup>i</sup> que determinó que tanto para la respuesta color verdadero como para turbiedad hay diferencia significativa debida al tratamiento con riesgo menor al 5 % de equivocarse. Además la prueba permitió observar que la covariable no afectó el experimento.

---

<sup>i</sup> Análisis de varianza (ANOVA) es la prueba estadística que permitió determinar si hay diferencia significativa entre los factores bajo estudio. Los datos analizados cumplieron con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza

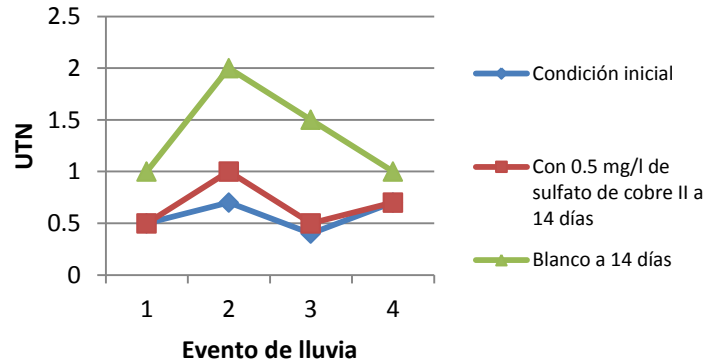


Figura 4.26. Resultados de turbiedad del experimento de conservación con 0.5 mg de  $\text{CuSO}_4$ .

Para comprobar dicha diferencia significativa entre los tratamientos se realizó un contraste ortogonal<sup>i</sup> para cada respuesta. Ambos contrastes resultaron significativos, lo cual indica que el tratamiento de no agregar 0.5 mg/l de  $\text{CuSO}_4$  respondió con más coloración y turbiedad a los 14 días, con un porcentaje menor al 5 % de error. Como la respuesta buscada es la que genere menor coloración y turbiedad, se concluye que el tratamiento de agregar 0.5 mg/L de  $\text{CuSO}_4$  tiene un efecto directo para conservar el agua en cuanto a color verdadero y turbiedad se refiere.

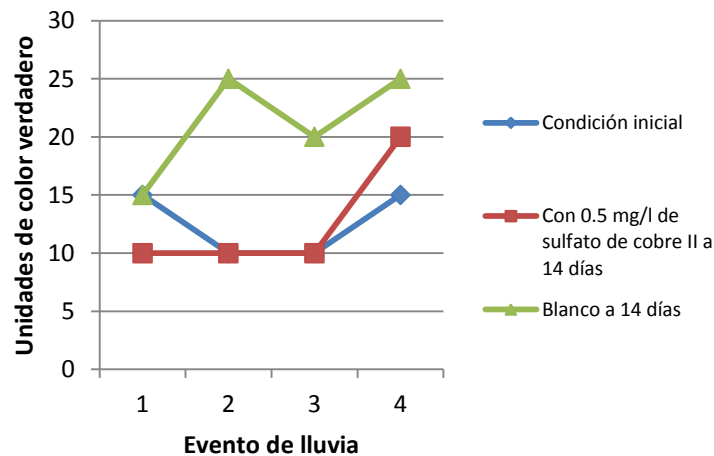


Figura 4.27. Resultados de color verdadero del experimento de conservación con 0.5 mg de  $\text{CuSO}_4$ .

### 4.3.2 EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO PARA DESINFECTAR EL AGUA DE LLUVIA

Además de conservar la calidad física del agua se evaluó, a nivel de laboratorio, el tratamiento para eliminar del agua de lluvia los coliformes señalados en la NOM-127-SSA1-1994. Para esto se propusieron y evaluaron 3 tratamientos:

<sup>i</sup> El contraste ortogonal es una prueba estadística que permitió determinar si hay diferencia significativa entre los dos factores bajo estudio. Los datos analizados cumplieron con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza.

- $\text{CuSO}_4$ , dosis de 0.5 mg/l ;
- sanitizante comercial a base de semillas cítricas marca “Xipauayotl”, dosis de 1 ml/l;
- y filtración con carbón activado granular mezclado con KDF 85<sup>i</sup> en cartucho de 20”.

Se utilizó como referencia la NOM-181-SSA1-1994 que establece los requisitos que deben cumplir las sustancias germicidas para tratamiento doméstico.

Para evaluar la eficiencia de los tratamientos se realizaron 3 repeticiones y en cada una se midió la cantidad de Unidades Formadoras de Colonias (UFC) de coliformes *Escherichia coli* y de mesófilos aerobios. Además se midió el pH en cada prueba para complementar la información de la evaluación.

#### 4.3.2.1 METODOLOGÍA DE LA EVALUACIÓN

Se preparó agua de lluvia artificial con pH de 7.3 y concentraciones de iones promedio obtenidas en la evaluación de la calidad de agua de lluvia del punto 4.1.2.2.

Se repartió el agua de lluvia artificial en recipientes de 1 litro, 3 para cada tratamiento y 3 sin tratamiento como blanco del experimento.

Se inoculó cada recipiente con una suspensión de *Escherichia coli* que permitió una carga inicial total de bacterias de 5000 a 10 000 UFC/ml y una concentración de organismos coliformes totales mayor a 240 UFC/100 ml.

Se permitió el tiempo de contacto para cada sustancia según el fabricante. Para el KDF 85 y el sanitizante fue de 20 minutos, para el  $\text{CuSO}_4$  fue de 3 horas.

Se tomó una muestra de cada recipiente y se midió la concentración de coliformes y mesófilos en UFC/100 ml con la técnica de vaciado en placa (Camacho, 2007).

Con las siguientes ecuaciones indicadas en la NOM-181-SSA1-1994, se calculó el porcentaje de remoción bacteriana para evaluar su efecto.

$$\% \text{RBMA} = \frac{(\text{mesófilos aerobios})_{APST} - (\text{mesófilos aerobios})_{APT}}{(\text{mesófilos aerobios})_{APST}} \times 100$$

$$\% \text{RBCT} = \frac{(\text{coliformes totales})_{APST} - (\text{coliformes totales})_{APT}}{(\text{coliformes totales})_{APST}} \times 100$$

En donde: % RBMA es el porcentaje de reducción bacteriana de mesófilos aerobios, % RBCT es el porcentaje de reducción bacteriana de organismos coliformes totales, APST es la cuenta de microorganismos en agua de prueba sin tratar y APT es la cuenta de microorganismos en agua de prueba tratada. Se analizaron los resultados de promedio de porcentaje de eficiencia de remoción microbiológica.

<sup>i</sup> EL KDF 85 es un material filtrante hecho de una aleación cobre zinc que ayuda a remover metales pesados y otros contaminantes del agua, además que es germicida (Aquor, 2009).

#### 4.3.2.2 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN<sup>i</sup>

Los resultados de porcentaje de reducción bacteriana de mesófilos aerobios y coliformes totales debido a los tratamientos se muestran en la Figura 4.28 y Figura 4.29 respectivamente.

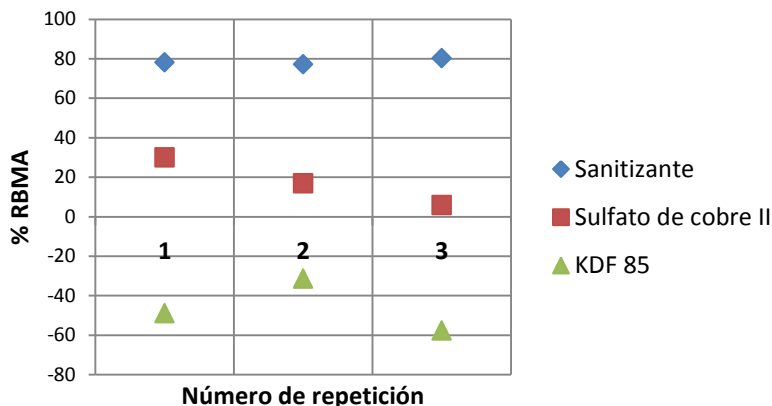


Figura 4.28. % RBMA con 3 tratamientos.

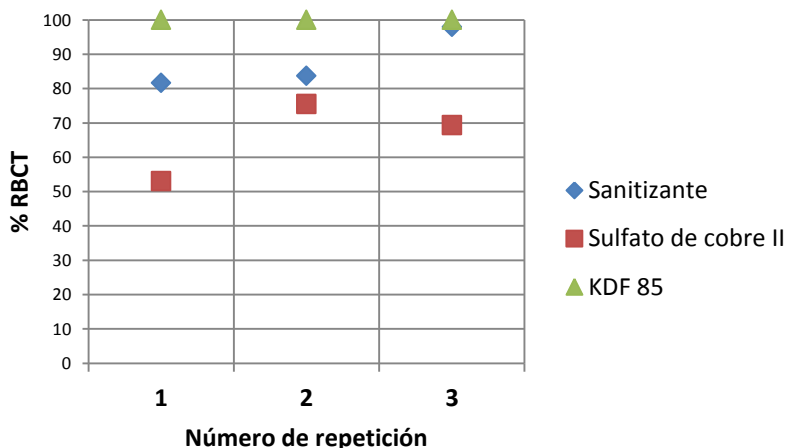


Figura 4.29. % RBCT con 3 tratamientos.

Por medio de una prueba de Tukey<sup>ii</sup> se determinó que estadísticamente los 3 tratamientos fueron diferentes al incidir sobre la respuesta % RBMA con menos del 5 % de probabilidad de error. El tratamiento con mayor efecto positivo sobre esta respuesta fue el sanitizante marca “Xipauayotl” con un promedio de 79 % seguido por el sulfato de cobre II con 18 %. El tratamiento con carbón activado mezclado con KDF 85 tuvo un efecto negativo en la respuesta de -46 % promedio, que indica un crecimiento bacteriano en vez de reducción.

<sup>i</sup> Los análisis microbiológicos se realizaron en el Cepario de la Facultad de Química con la supervisión del QFB. Alejandro Camacho Cruz.

<sup>ii</sup> Los datos analizados cumplieron con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza.



Para el caso de la respuesta % RBCT, la prueba de Tukey<sup>1</sup> determinó que el sanitizante “Xipauayotl” y la filtración con carbón activado y KDF 85 son estadísticamente iguales con un porcentaje de reducción bacteriana de coliformes totales promedio de 90 %. La respuesta promedio del CuSO<sub>4</sub> fue de 66 %, menor que las anteriores.

La Tabla 4.9 complementa la evaluación con un análisis cualitativo de los tratamientos.

Tabla 4.9. Evaluación cualitativa de los tratamientos para desinfectar el agua de lluvia.

Medio filtrante	Ventajas	Desventajas
Sanitizante “Xipauayotl”	<p>Obtuvo 79 % en reducción de mesófilos aerobios y 90 % en reducción de coliformes. Los promedios más altos de la evaluación.</p> <p>Es un producto novedoso, biodegradable y no es tóxico para el ser humano ni el ambiente.</p> <p>En caso de que el agua se destine a limpieza, uso sanitario o riego, el olor cítrico puede ser una ventaja.</p>	<p>Su precio es alto con respecto a otros tratamientos. El costo del tratamiento es aproximado a \$0.10 MN por litro de agua.</p> <p>Agrega olor y sabor cítrico al agua y lo hace no apta para ser potable.</p>
CuSO <sub>4</sub>	<p>El costo del tratamiento es 10 veces más económico que los otros dos.</p> <p>No agrega color, olor ni sabor al agua y en dosis seguras no es tóxico para el ser humano y el ambiente.</p>	<p>Es una sustancia que se ha usado en el tratamiento de agua, aunque cada vez menos debido a la potencial toxicidad del Cu<sup>2+</sup> en concentraciones superiores a 12 mg/l.</p> <p>La aplicación a nivel casero es complicada por la exactitud, equipo que se requiere y la accesibilidad al producto.</p>
Carbón activado granular mezclado con KDF 85	<p>No requiere aplicación periódica como los anteriores, sólo se instala y comienza a trabajar.</p> <p>Eliminó los coliformes totales al 100 %.</p> <p>Es efectivo contra metales pesados, cloro y otros contaminantes mediante procesos fisicoquímicos.</p>	<p>El costo de una carga para 20” es aproximado a \$1 000 MN y su duración depende de la calidad y cantidad del agua a filtrar.</p> <p>No es un producto accesible y requiere de una instalación hidráulica que agrega costo.</p> <p>Favoreció la proliferación de mesófilos aerobios.</p>

El sanitizante obtuvo la mejor respuesta de reducción microbiana de ambos parámetros analizados pero tiene la desventaja de agregar un olor cítrico al agua y tener un costo de \$100 MN por 1 litro de producto, considerándolo caro por la relación de 1 ml por cada litro a tratar. Una cisterna promedio de 5 m<sup>3</sup> se llevaría 5 litros de sanitizante y costaría \$500 MN.

En caso de uso no potable se recomienda usar el CuSO<sub>4</sub>, de lo contrario la filtración con KDF 85 resulta una buena opción. La concentración de iones SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y Na<sup>+</sup> así como el pH en el agua en todos los casos de tratamiento estuvieron dentro de los límites de la norma de agua potable.

En este capítulo queda concluida la etapa experimental con la cual se define el diseño del sistema desarrollado en el capítulo 5.

## 5 GUÍA DE DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

En este capítulo se incluyen las propuestas de diseño del sistema de captación y aprovechamiento pluvial a nivel domiciliario, así como los materiales, complementos y especificaciones para su implementación. El diseño se desarrolla con sustento en los datos y resultados de los capítulos anteriores.

Se incluye el dimensionamiento de los componentes del sistema, un análisis de costo – beneficio y un manual de buenas prácticas para el mantenimiento del sistema.

### 5.1 USO DEL AGUA DE LLUVIA Y TRATAMIENTO

A nivel domiciliario el agua potable tiene diversos usos, como se describió en el punto 3.3.1.2.2. En este capítulo se describen tres niveles de tratamiento que requiere el agua de lluvia según su uso y los resultados de la caracterización del capítulo 4. El tratamiento primario es aquel que requiere un tratamiento físico para lograr la calidad de agua para lavado de ropa, sanitario, limpieza del hogar, del auto y riego, usos que en su conjunto representan aproximadamente el 49 % del consumo total. El segundo nivel de tratamiento, además del tratamiento anterior, requiere calidad para bañarse, higiene personal y lavar trastes, que juntos representan cerca del 49 %. Y el tercer nivel es aquel que después de los tratamientos anteriores requiere un tratamiento terciario para llegar a calidad de agua purificada que sirve para beber y cocinar que representa el restante 2 % del consumo total domiciliario.

El nivel de tratamiento primario propone mediante mecanismos físicos relativamente sencillos retirar materia sólida de gran tamaño, separar la primera lluvia que arrastrará la mayor concentración de contaminantes y agregar una sustancia conservadora al agua, para mantener la alta calidad que tiene el agua de lluvia antes de contaminarse con la superficie de captación. Con este nivel de tratamiento se plantea que el agua no rebasará los máximos de turbiedad de 5 UTN, de color de 20 unidades de color verdadero y tendrá características organolépticas adecuadas. Es aceptable que esta agua tenga pH ligeramente inferior a 6.5 sobre todo por el beneficio asociado al ahorro de jabón.

El nivel de tratamiento secundario además de la calidad alcanzada por el anterior, requiere de un tratamiento para eliminar microorganismos coliformes como lo indica la NOM-127-SSA1-1994. También un filtrado específico para partículas de hasta 50  $\mu\text{m}$  y remoción de materia orgánica que puede dar color y olor.

El nivel de tratamiento terciario se trata de purificación dedicada sólo al agua que será ingerida y usada en la cocina y que representa aproximadamente el 2 % del consumo total. La purificación es un tratamiento costoso porque toma en cuenta diversos tipos de contaminantes que pueden quedar en el agua aun después de los tratamientos anteriores, como materia orgánica, metales pesados, sólidos y bacterias que son potencialmente dañinos al ser humano. Este tratamiento sólo se recomienda para el volumen de agua que se va a consumir.

La Tabla 5.1 clasifica los tratamientos propuestos según la evaluación de la calidad del agua de lluvia del capítulo 4, el uso destinado del agua y la calidad requerida según la NOM-127-SSA1-1994.

Tabla 5.1. Uso del agua de lluvia y tratamiento.

Clasificación	Usos	Calidad que se requiere Valor máximo según la NOM-127-SSA1-1993	Tratamiento
Primario	Lavado de ropa Sanitario Limpieza del hogar Limpieza del auto Jardinería	Turbiedad: 5 UTN Color verdadero: 20 UCV Características organolépticas adecuadas	Tirar primeras lluvias Cribado Separación de primera lluvia Sedimentación Conservación
Secundario	Ducha Higiene personal (lavado de manos y boca) Lavado de trastes	Además de las anteriores pH: Entre 6.5 y 8.5 Coliformes totales: No detectado Coliformes Fecales: No detectado	Además de los anteriores Eliminación de coliformes Filtración >50 µm Remoción de contaminantes orgánicos
Terciario	Agua para beber y cocinar	No debe superar ningún parámetro máximo señalado en la norma	Además de los anteriores Filtración >10 µm Remoción de metales pesados Remoción de contaminantes orgánicos Purificación

## 5.2 COMPONENTES DEL SISTEMA

El sistema está compuesto por 5 unidades básicas. El área de captación, los ductos para conducir el agua, los tratamientos, el tanque de almacenamiento y los complementos.

A su vez cada unidad está compuesta por uno o varios elementos o dispositivos que trabajan en conjunto para recolectar el agua, darle tratamiento para que cumpla con los parámetros dependiendo del uso que se le dará, conducirla y tenerla disponible para su aprovechamiento.

La Tabla 5.2 muestra los elementos y dispositivos propuestos para cumplir con los requerimientos del sistema.

### 5.2.1 ÁREA DE CAPTACIÓN

El área de captación además de ser el lugar para coleccionar la mayor cantidad de agua, es el principal punto de contaminación, según los resultados de la caracterización del capítulo 4. Existen diversas superficies para captar agua, una con mucho potencial es el techo, sobre todo por la calidad del agua que mantiene con respecto al patio.

Aunque en el Ecobarrio de Santa Rosa Xochiac los patios de captación son una opción a tomar en cuenta por su tamaño y el volumen de agua que pueden aportar, la calidad del agua se vuelve más impredecible por el difícil control de la limpieza, lo que trae un tratamiento y mantenimiento más costoso. Este capítulo se enfoca en el aprovechamiento del agua de lluvia captada por techos y sugiere que la que sea captada por patios se destine sólo para uso primario con su debido tratamiento físico.

Tabla 5.2. Unidades del sistema.

Unidad básica	Categoría	Elementos	Función
Área de captación	Plásticas y metálicas	Techos de policarbonato o algún plástico no fotodegradable Techos de lámina metálica	Colectar el agua de lluvia.
	Cemento, impermeabilizadas y tejas	Azoteas de cemento con o sin impermeabilizante Tejados de arcilla, madera o similares	
Tuberías y conductos	Plásticos	Tubería de PVC hidráulica o sanitaria Tubería de PP	Conducción del agua de lluvia.
	Metálicos	Canaletas y tubos de metálicos Tubería de cobre	
Tratamiento	Primario	Separador de hojas Separador de primera lluvia Clarificador o desarenador	Retirar sólidos grandes. Apartar el agua con mayor concentración de contaminantes. Retener sólidos rápidamente sedimentables.
	Secundario	Dosificador de sustancia de conservación Filtros a presión de sólidos Filtro de carbón activado	Eliminar y/o inactivar microorganismos. Retener sólidos de hasta 50 micras. Retener materia orgánica, olor sabor y color.
	Terciario	Filtro a presión Filtro de carbón activado con KDF 85 y 65 Ultravioleta, Ozonador	Retener sólidos de hasta 10 micras Retener materia orgánica, olor sabor, color Eliminar microorganismos y virus.
Depósito de almacenamiento	Cemento	Cisterna de cemento o ferrocemento subterránea o a nivel de piso	Almacenar el agua de lluvia y conservar su alta calidad.
	Plástico y metálico	Cisterna de plástico subterránea o a nivel de piso Tinaco de plástico Cisterna de geomembrana subterránea o a nivel de piso Tinaco de acero inoxidable Cisterna de acero inoxidable	Almacenar el agua de lluvia y conservar su calidad.
Complementos	Automatización, control y otros	Bomba hidráulica Medidores de nivel Dispositivos de control	Mover el agua al lugar que se requiera y hacerla pasar por el tren de tratamiento.

Existen diferentes tipos de techo en las casas del Ecobarrio. Aunque el más común es de cemento impermeabilizado, también puede haber de lámina metálica y policarbonato. Cada superficie además de tener coeficientes de captación específicos, requiere de diferente tratamiento por su calidad asociada.

Una superficie de captación poco porosa, como las de material plástico o metálico, requiere menor cantidad de agua de primera lavada que una superficie porosa de cemento o de terminado en gravilla. Este tipo de superficies lisas una vez lavadas aportan menor cantidad de sólidos y material orgánico que las de cemento, pues estas últimas son un soporte para que los microorganismos terrestres se desarrollen (Martinson y Thomas, 2009).

En general, superficies lisas como las de plástico, metálicas y cerámicas ofrecen una mejor calidad de agua que superficies más porosas como las de cemento o las de terminado en gravilla, en lo referente a sólidos, color, materia orgánica y microorganismos, pero sufren la desventaja de no tener el mismo efecto de neutralización del pH del agua de lluvia.

La Figura 5.1 muestra algunos ejemplos de techos que se pueden utilizar para la captación pluvial.



Figura 5.1. Diferentes tipos de techo como superficies de captación. De izquierda a derecha, cemento impermeabilizado con terminado en gravilla, lámina metálica y policarbonato.

Para cualquier diseño es importante conocer los coeficientes de captación<sup>i</sup> de la superficie a utilizar para el cálculo del volumen de agua de lluvia que se puede aprovechar. En la Tabla 5.3 se mencionan superficies de captación comunes y su coeficiente de captación sugerido.

Tabla 5.3. Coeficientes de captación de superficies comunes en techos

Tipo de superficie	Coeficiente de captación A*	Coeficiente de captación B**
Lámina metálica y plástica	0.8 – 0.85	0.75 – 0.95
Teja de cemento	0.62 – 0.69	0.75 – 0.95
Teja de barro (hecha a máquina)	0.30 – 0.39	---
Teja de barro (hecha a mano)	0.24 – 0.31	---
Loza de concreto	0.73 – 0.76	0.70 – 0.95
Loza con terminado en grava	---	0.25 – 0.70
Loza con terminado de tabique o ladrillo	---	0.70 – 0.85

\* (Gould y Nissen-Petersen , 1999)

\*\* (Mechell *et al.*, 2010)

## 5.2.2 TUBERÍAS Y CANALETAS

Son parte necesaria en cualquier sistema hidráulico para la conducción del fluido. Una vez captada el agua de lluvia por el techo, se requiere canalizarla al tren de tratamiento, al tanque de almacenamiento y distribuirla para su aprovechamiento.

<sup>i</sup> El coeficiente de captación es un valor que otorga un porcentaje de eficiencia de la cantidad de lluvia que una superficie potencialmente puede captar. El valor más eficiente es 1 y el nada eficiente es 0.

Si se trata de una azotea con una serie de caídas de agua, se pueden utilizar canaletas metálicas o plásticas para colectarlas y dirigir las a un tubo de bajada y así centralizar el manejo del sistema.

Por cuestión de costo se propone que este tubo central de bajada de la azotea sea de plástico. Comercialmente existen de PVC sanitario reforzado, pero en la medida de lo posible se sugiere utilizar HDPE por resistir mejor las inclemencias del ambiente (Chacón *et al.*, 2011), ser más inertes con el agua y no favorecer el crecimiento microbiológico. La Figura 5.2 muestra un ejemplo de conducción del agua con canaleta y tubo bajante de PVC. Es recomendable pintar la parte externa de la tubería de PVC con pintura para exteriores para reducir la fotodegradación.

Para llevar el agua del tanque de almacenamiento principal hacia otro tanque secundario, generalmente ubicado en la parte más alta para suministrar el agua a la casa por gravedad, se suele usar tubería de  $\frac{3}{4}$ " o  $\frac{1}{2}$ " de cobre o PP y la presión de una bomba hidráulica. Tanto la tubería de cobre como la de PP son adecuadas para inhibir el crecimiento microbiológico, pero la de primera está expuesta a incrustaciones y es mucho más costosa que la segunda.



Figura 5.2. Canaleta de zinc y tubería de PVC.

### 5.2.3 DEPÓSITO DE ALMACENAMIENTO

Según el Censo de Población y Vivienda 2010 del INEGI, en el Distrito Federal el 54 % de las casas cuentan con depósitos de agua subterráneos conocidos como cisternas o aljibes y el 78 % con tinacos. En el caso del Ecobarrio de Santa Rosa Xochiac, la inexistencia de un sistema entubado de agua potable ha hecho que la mayoría de los habitantes construyan cisternas de cemento o ferrocemento subterráneas y coloquen tinacos para almacenar agua que les es distribuida por medio de autotanques. Esta condición es inmejorable para el desarrollo de sistemas de captación y aprovechamiento pluvial, ya que la cisterna junto con el tinaco elevado y la bomba hidráulica para subir el agua, representan la mayor parte de la inversión total y son componentes indispensables de cualquier sistema de este tipo.

Este trabajo no profundiza en la construcción de la cisterna. Gould y Nissen-Petersen (1999) describen diversas maneras y materiales para construir el depósito de almacenamiento. Algunos ejemplos son tanques superficiales, subterráneos y elevados, de tabique, cemento, ferrocemento, metálicos y plásticos, de diversas formas y tamaños según la necesidad particular.

La experiencia del proyecto Isla Urbana propone que materiales como el cemento, tienen la característica de tener un efecto de neutralización sobre el pH del agua de la lluvia, por la interacción de compuestos alcalinos que contienen calcio y magnesio. La desventaja de estos depósitos es su poca flexibilidad una vez construidas, además que pueden favorecer el crecimiento microbiológico y su mantenimiento es complicado y costoso.

De manera comercial se pueden adquirir cisternas de plástico que ofrecen una mejor calidad de agua al igual que las cisternas metálicas, por no contribuir con sólidos, olor, color, sabor y evitar el crecimiento microbiológico, pero tienen la desventaja de no neutralizar el pH (en caso de acidez). Dentro de este tipo de cisterna se encuentran los *quicktanks* que son tanques de almacenamiento armables de geomembrana con estructura de malla metálica. La Figura 5.3 muestra ejemplos.

Es importante que cualquiera que sea el depósito de almacenamiento se pueda cerrar y no debe estar expuesto a la luz ni calor directo para conservar la calidad del agua. Además, los depósitos requieren de mantenimiento, que incluye el lavado general de las superficies y drenado del material que se deposita al fondo; pues este contenedor actúa como un sedimentador.



Figura 5.3. Depósitos de almacenamiento de agua de lluvia. De izquierda a derecha, tanque de ferrocemento, *quicktank* de geomembrana y de lámina metálica.

#### 5.2.4 COMPONENTES PARA EL TRATAMIENTO PRIMARIO

Con estos dispositivos se propone dar un primer tratamiento al agua de lluvia para no superar parámetros físicos máximos de la NOM-127-SSA1-1994 (ver Tabla 5.1).

Autores como Gould y Nissen-Petersen (1999), Anaya (2009) y Mechell (2010) proponen diversos dispositivos sencillos para mantener la alta calidad del agua de lluvia, basados en tratamientos físicos.

##### 5.2.4.1 DESVÍO AL DRENAJE

Además de ayudar a elevar de manera radical la calidad del agua de lluvia, el desvío al drenaje es un componente necesario en cualquier sistema de captación y aprovechamiento pluvial porque permite la opción de que la lluvia entre al sistema o se dirija a otro lado, como un pozo de absorción, un tanque de almacenamiento o simplemente al drenaje.

Este dispositivo es simplemente una llave de dos posiciones que permite ingresar o desviar el agua. También se puede utilizar un tapón de PVC que cumple con el mismo funcionamiento y es mucho más económico.

#### 5.2.4.2 SEPARADOR DE SÓLIDOS GRANDES

Con base en la evaluación de la calidad de agua de lluvia realizada en el capítulo 4, lo primero que se propone retirar del agua son los sólidos más grandes, entre los que se destacan las hojas, piedras, ramas, insectos y otros materiales que pueden estar presentes en la superficie de captación y ser arrastrados por el agua.

Se recomienda utilizar un separador de sólidos modelo "b", evaluado en el punto 544.2.1.1, que consta de una rejilla metálica de 1 mm de abertura, dispuesta en forma cilíndrica dentro de una te de PVC de 4" para áreas de hasta 100 m<sup>2</sup> y una te de 6" para áreas de captación superiores. Se propone el uso de este modelo de separador principalmente por la facilidad de su implementación. Para mejorar su eficiencia de aprovechamiento se propone colocarle un tapón comercial para PVC que evite el desperdicio de agua a la vez que permita la limpieza y mantenimiento. La Figura 5.4 muestra un ejemplo de este dispositivo.

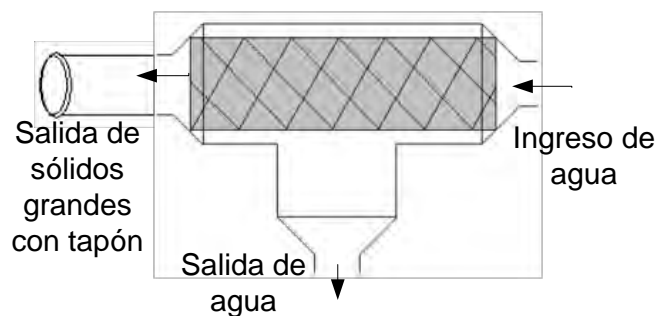


Figura 5.4. Separador de sólidos grandes modelo "b", implementado con una malla metálica en forma cilíndrica dentro de una te de PVC con tapón.

#### 5.2.4.3 SEPARADOR DE PRIMERA LLUVIA

Este dispositivo es ampliamente recomendado por mantener la calidad del agua de lluvia, además de ser fácil de implementar. Martinson y Thomas (2009) reportan disminuciones de turbiedad superiores al 50 % con un separador usado adecuadamente, aun para superficies que aportan turbiedad mayor a 50 UTN.

En el punto 4.2.1.2 se evaluó cualitativamente tres modelos de separador de primera lluvia, donde el más indicado para áreas de captación superiores a 50 m<sup>2</sup> fue el modelo "e" propuesto por Isla Urbana. En la Figura 5.5 se plantea una mejora a dicho modelo, cambiando el arreglo interno por un codo de 90 ° y una "T" de PVC para reducir la fuerza del chorro sobre la pelota que genera mezcla del agua separada con la que se va a aprovechar.



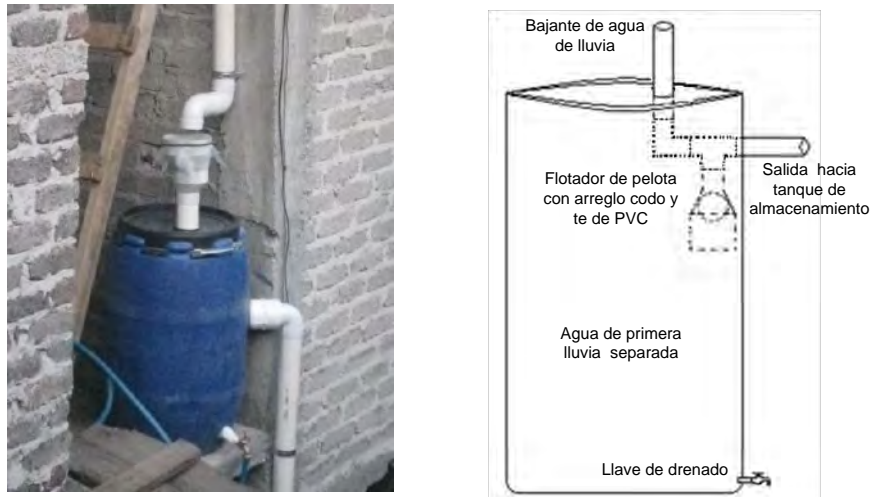


Figura 5.5. Propuesta de mejoramiento al separador de primera lluvia de Isla Urbana.

El modelo “F” que funciona con el flotador tipo tinaco sólo se recomienda para superficies pequeñas de hasta 50 m<sup>2</sup> por cuestiones de flujo máximo.

#### 5.2.4.4 CLARIFICADOR O DESARENADOR

Este dispositivo es un recipiente previo a la cisterna que actúa como un sedimentador rápido que retiene sólidos que precipiten en un lapso no mayor a 45 segundos. Este dispositivo se sugiere para evitar que un gran porcentaje de sólidos mayores a 0.1 mm de diámetro que superen el separador de hojas, se depositen directamente en el tanque de almacenamiento, sirvan para el crecimiento de los microorganismos, hagan más complicada la conservación del agua y en general hagan que todo el sistema requiera mayor tratamiento y mantenimiento.

En la Figura 5.6 se muestran dos ejemplos de desarenadores caseros con entrada superior colocados posterior al separador de primera lluvia.



Figura 5.6. A la izquierda un desarenador rectangular transparente y a la derecha uno cilíndrico propuesto por Chacón *et al.* (2011).

#### 5.2.4.5 CONSERVACIÓN

Si el agua captada se destina a uso de riego, limpieza en general y sanitario se propone dar tratamiento químico de conservación en almacenamiento a la sombra. En este caso, se propone que un sistema para uso no potable contemple la aplicación de  $\text{CuSO}_4$  para prevenir el color y olor que se producen a partir del crecimiento de microorganismos.

Si el agua captada se destina además de los usos anteriores a higiene personal y lavado de trastes, se recomienda optar por un tratamiento que no solo evite el color y el olor, sino que elimine los microorganismos presentes. En este caso se propone el uso de  $\text{NaClO}$  u otra presentación comercial de cloro que esté especificada para potabilización de agua. Y en algunos casos la plata iónica. Ver el punto 5.2.5.2 y 5.2.5.1.

##### 5.2.4.5.1 SULFATO DE COBRE (II)

El cobre es un metal usado desde la antigüedad para fines de higiene pública. Mucho tiempo después los científicos estudiaron las propiedades antimicrobianas de este material. El cobre no solo puede inhibir el crecimiento de bacterias, hongos, levaduras y virus, sino que puede inactivarlos o incluso eliminarlos (Pancorbo, 2009).

Los resultados del experimento de conservación del punto 4.3.1 concluyen que una dosis de 0.5 mg/l de  $\text{CuSO}_4$  hacen diferencia significativa para conservar el agua de lluvia contra el color, turbiedad y olor debidos a microorganismos.

Para obtener la concentración de 0.5 mg/l de  $\text{CuSO}_4$  disuelto en agua se sugiere usar  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  en relación de 800 mg por cada metro cúbico de agua a tratar. La Figura 5.7 muestra esta sustancia en estado sólido. Por seguridad sólo se sugiere su uso para fines no potables.



Figura 5.7.  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ .

#### 5.2.5 COMPONENTES PARA EL TRATAMIENTO SECUNDARIO

El principal punto del tratamiento secundario es la desinfección del agua de lluvia captada. Para ello se recomienda usar un dispositivo dosificador de iones de plata anti microorganismos o simplemente clorar el agua. Cualquiera de estos tratamientos pueden sustituir al de conservación propuesto en el tratamiento primario.

Además se recomienda usar filtros en puntos estratégicos para retirar sólidos, olor, color, materia orgánica, cloro, metales pesados y otros materiales que son indeseables para uso de contacto humano y potable.

#### 5.2.5.1 IONES DE PLATA

La plata se usa como desinfectante desde épocas antiguas. En la actualidad el uso de iones de plata es una tecnología comercialmente emergente por su efectividad contra microorganismos y sobre todo por no tener efectos adversos contra la salud como otros tratamientos, pues se suministra en dosis de ppb (partes por billón), que cumplen normas internacionales de la USEPA y la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Silverlife, 2011).

Este dispositivo libera iones de plata ( $\text{Ag}^+$ ) que por ósmosis actúan sobre las membranas celulares de los microorganismos, destruyéndolos por reacciones de óxido-reducción que le dan sus características desinfectantes.

Un equipo de iones de plata puede sustituir a la cloración, pues está considerado para la potabilización de agua en la modificación a la NOM-127-SSA1-1994, ya que tiene un efecto residual, no es afectado por la temperatura y no deja el desagradable olor del cloro ni tiene efectos crónicos en la salud en estas dosis. Además la plata ayuda a reducir la formación de biopelículas en los medios filtrantes, alargando su vida útil.

Un equipo de plata iónica se puede adquirir en el mercado y aunque el costo puede parecer alto los beneficios de esta inversión son principalmente que es un equipo automático que desinfecta el agua y no tiene las desventajas del cloro. La Figura 5.8 muestra un equipo de iones de plata formado por un controlador y su boya con las placas de plata para la cisterna.



Figura 5.8. Dispositivo automático dosificador de iones de plata para tanques de almacenamiento.

#### 5.2.5.2 CLORACIÓN

Es un tratamiento común entre la población para potabilizar agua. El cloro elimina muchos microorganismos y virus, evita coloración y sobre todo tiene efecto residual.

La cloración incluye el uso de cloro gaseoso ( $\text{Cl}_2$ ) y sus derivados, como: hipoclorito de sodio ( $\text{NaClO}$ ) en solución, hipoclorito de calcio ( $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ) sólido y dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) en solución.

Cada uno requiere parámetros especiales de operación, como tiempo de contacto, pH del agua y concentración, que deben ser especificados por el fabricante.

La Tabla 5.4 propuesta por Mechell *et al.* (2010) muestra el tiempo de contacto por cloración para eliminar algunos ejemplos de microorganismos en el agua de lluvia.

Tabla 5.4. Tiempo de contacto para tratar el agua de lluvia por cloración.

Porcentaje de inactivación %	Tiempo de contacto para diferentes patógenos Min		
	Virus	Giardia	<i>Cryptosporidium</i>
67	0.25	9	No efectivo
90	0.50	19	No efectivo
99	1	37	No efectivo
99.99	3	75	No efectivo

Fuente: Mechell (2010).

El autor Lazcano (2011) menciona que de manera general el agua con concentraciones bajas de contaminantes y pH entre 6 y 8, puede ser clorada manteniendo un tiempo de contacto de 30 a 60 minutos con resultados cercanos al 99 % de eficiencia.

En caso de elegir soluciones de  $\text{NaClO}$  para clorar el agua de lluvia en el depósito de almacenamiento, es recomendable que se usen sólo productos que especifiquen su porcentaje, densidad y no contengan aroma ni otros aditivos o estabilizantes. Estas soluciones tienen un efecto desinfectante satisfactorio generalmente a pH entre 6 y 8, por lo que se puede utilizar en la desinfección del agua de lluvia (ITC, 2011).

El cloro en la mayoría de sus presentaciones tiene algunas desventajas, principalmente que al reaccionar con la materia orgánica dan lugar a trihalometanos (THM), muchos de los cuales son tóxicos y carcinógenos. Otro problema es que al reaccionar con fenoles forma clorofenoles que dan mal olor y al reaccionar con amoníaco disuelto forma cloraminas.

Comercialmente existe la opción del dióxido de cloro, el cual no se combina con amoníaco ni con mucha materia orgánica y por lo tanto es mucho menos susceptible a formar sustancias tóxicas además que puede desinfectar en un rango más variable de pH. Su principal desventaja es que en proporción con el  $\text{NaClO}$  es 10 veces más costoso, pero se recomienda ampliamente por cuestiones de salud. Para su aplicación se recomienda seguir las instrucciones del fabricante (DSENY, 2008).

Este trabajo propone tratamientos alternativos al cloro, pero en caso de preferirlo por sus ventajas sobre todo de costo y accesibilidad, puede utilizarse la siguiente gráfica de dosificación de la Figura 5.9 para cumplir con el manual de Lazcano de 2011, editado por la OMS, que sugiere de 1 a 2 mg/l de cloro como ácido hipocloroso ( $\text{HClO}$ ) para obtener cloro residual libre de 0.4 mg/l o superior.

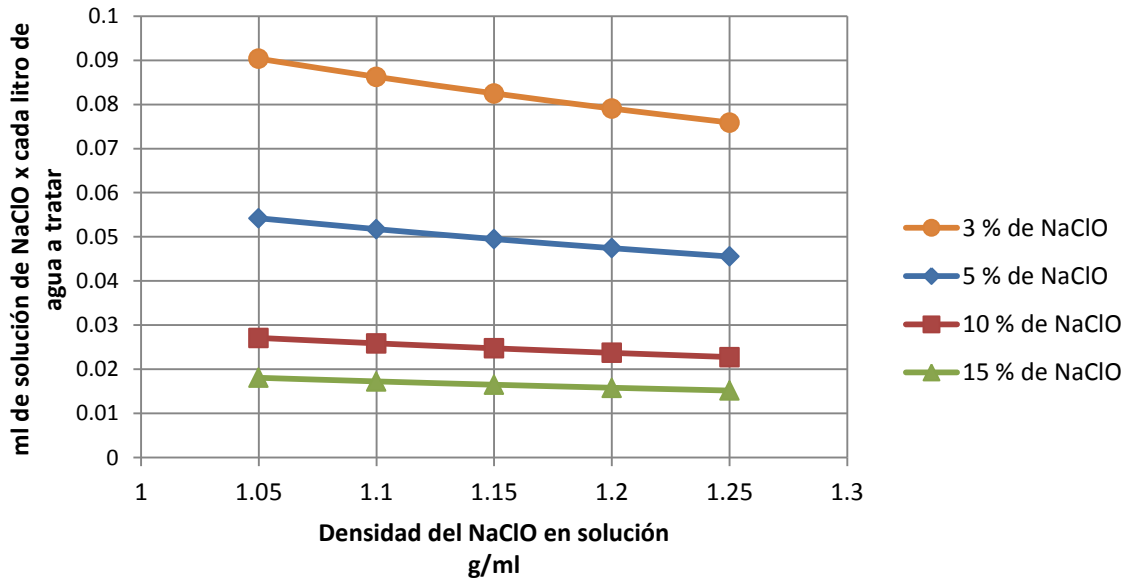


Figura 5.9. Dosificación de solución comercial de NaClO por litro de agua a tratar.

Para la construcción de la gráfica anterior y se usó la siguiente ecuación:

$$\frac{2 \text{ mg HClO}}{l} * \frac{74 \text{ mg NaClO}}{52 \text{ mg HClO}} * \frac{100 \text{ mg producto}}{y \text{ mg de NaClO}} * \frac{\text{ml producto}}{z \text{ g producto}} * \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} = x \text{ ml producto}$$

$$\text{Conc. deseada de HClO} \frac{\text{mg}}{L} * \text{Relación de masas } 1.43 * \frac{100}{\text{conc. producto } \%} * \frac{1}{\text{densidad producto (g/ml)}} * \text{factor conversión } 0.001 = \text{mL producto}$$

Una vez determinada la dosis de solución en ml que se usará por cada litro de agua a tratar, de acuerdo al porcentaje de NaClO y a su densidad, se multiplica por el volumen en litros de almacenamiento. Se recomienda hacer un cálculo de cuánto se llenará una cisterna semanalmente para dosificar la solución de NaClO.

Ejemplo: usando una solución comercial de NaClO al 5 % con 1.1 g/ml de densidad se requeriría agregar 250 ml para una cisterna de 5000 litros obteniendo una concentración de HClO de 2 mg/l.

La Tabla 5.5 es un ejemplo usando dosis de producto al 5 % en masa (100 mg producto/5 mg NaClO) y 1.1 g/ml de densidad, si se capta agua de lluvia en una superficie de 100 m<sup>2</sup>.

Con la ecuación y el mismo procedimiento pueden determinarse otras dosis específicas, según cada caso.

Tabla 5.5. Ejemplo de dosificación semanal de producto en solución comercial de NaClO con densidad de 1.1 g/ml y 5 % de NaClO.

	junio	julio	agosto	Septiembre	Octubre
Promedio de lluvia semanal mm	13	13	15	13	4
Promedio de agua de lluvia almacenada semanalmente l	1033	1007	1212	1059	330
Dosis producto NaClO semanal ml	52	50	60	53	17

Otra forma de calcular la dosis de cloro que se debe agregar es midiendo semanalmente los mm de precipitación con ayuda de un pluviómetro casero (ver punto 4.1.2.2) y estimando lo que se puede captar con la superficie (ver punto 5.3.1). Esta aproximación dará un valor cercano a la cantidad de agua almacenada y al multiplicarlo por la dosis de solución de cloro por litro se obtendrá la cantidad necesaria.

### 5.2.5.3 FILTROS A PRESIÓN

Los filtros a presión son aquellos que se colocan en la tubería hidráulica presurizada por la bomba o por la gravedad del agua en el tinaco. Estos filtros son necesarios para retirar sólidos suspendidos y elevar aún más la calidad que se suministra a la casa para uso humano.

En el punto 4.2.2.2 se evaluó un filtro a presión de 20" con cartucho desechable de papel plisado de 50  $\mu\text{m}$  utilizado en el proyecto Isla Urbana, con resultados de eficiencia de flujo del 70 %. Se recomienda utilizar este tipo de filtros porque son económicos, fáciles de encontrar y tienen buena eficiencia de flujo, aunque su principal desventaja es que son desechables.

Se recomienda que de ser posible se cambie los cartuchos de papel plisado por cartuchos de acero inoxidable del mismo tamaño de poro, porque aunque cuestan en promedio 400 % más, la inversión se realiza sólo una vez porque no son desechables.

La Figura 5.10 muestra un ejemplo de filtrado a presión utilizado por el proyecto Isla urbana, que se compone de un filtro de sólidos y uno de carbón activado.



Figura 5.10. Arreglo de filtrado del proyecto Isla Urbana (Isla Urbana, 2011).

#### 5.2.5.4 FILTROS POR GRAVEDAD

Continuando con el tren de filtrado, se recomienda colocar regaderas ahorradoras para ducha con filtros de carbón activado en bloque, como se aprecia en la Figura 5.11. Estos filtros actúan por gravedad y retiran cloro, olor, sabor, color, metales pesados por adsorción y contaminantes orgánicos.

También se propone colocar filtros de 10" de carbón activado en block en las llaves de agua que se usen para lavado de boca y trastes.



Figura 5.11. Regadera ahorradora con filtro de carbón activado integrado.

#### 5.2.6 COMPONENTES PARA EL TRATAMIENTO TERCIARIO

Se necesitan más estudios para establecer si el agua de lluvia puede utilizarse para consumo humano, sobre todo con respecto a cada zona y superficie de captación. En caso de que estudios posteriores determinen que el agua de lluvia es segura para este fin, se recomienda agregar un equipo para purificar el agua sólo en llave destinada para beber y para cocinar. En caso que el agua no se destine para este uso se puede prescindir de este nivel de tratamiento.

A continuación algunos dispositivos para lograr este fin.

### 5.2.6.1 LUZ UV<sup>i</sup>

Según la Procuraduría Federal de Consumidor en el año 2000, un equipo comercial de luz UV destruye coliformes, virus, amibas, cisticercos y salmonella.

La luz UV es un tratamiento físico que se basa en el efecto de la longitud de onda de esta franja del espectro electromagnético sobre ciertos microorganismos. No tiene efectos secundarios sobre la salud de quien consume agua tratada por este medio, pero tiene la desventaja de no tener efecto residual. Este equipo se sugiere solo para tratamiento terciario, es decir, sólo para aplicarse al agua un momento antes de su consumo.

Estos equipos son adquiribles en el mercado para colocarse debajo de la tarja, junto con un filtro de carbón activado con KDF y un filtro pulidor<sup>ii</sup> para obtener en la llave agua purificada para beber y cocinar. La Figura 5.12 muestra una lámpara ultravioleta con sus filtros para purificación de agua.



Figura 5.12. Lámpara de luz UV contra microorganismos para potabilización de agua.

### 5.2.6.2 GENERADOR DE OZONO

El proceso de ozonificación es un proceso de oxidación avanzada que consiste en formar ozono ( $O_3$ ) en un generador eléctrico y hacerlo pasar por el agua, para que al entrar en contacto con los compuestos orgánicos e inorgánicos del agua los oxide. El ozono remanente en el agua, permanece como ozono residual poco tiempo y al igual que el ozono no utilizado se libera y se descompone con rapidez en oxígeno gaseoso ( $O_2$ ) sin tener efectos adversos en la salud. La desinfección ocurre en el momento que el ozono daña los componentes críticos de los microorganismos, aún los recalcitrantes como la *Giardia*, virus y algas. La efectividad de la desinfección es directamente proporcional a la concentración del ozono y al tiempo de contacto.

Este tipo de equipos generadores de ozono se pueden adquirir comercialmente en combinación con un filtro de sólidos y/o carbón activado con KDF para purificación de agua. El efecto residual del ozono es muy corto, por lo que sólo es un método que se propone utilizar un instante antes de beber o cocinar con el agua tratada. Un ejemplo de ozonador se muestra en la Figura 5.13.

---

<sup>i</sup> UV (Ultra Violeta). Radiación electromagnética cuya longitud de onda está comprendida aproximadamente entre los 400 nm y los 15 nm.

<sup>ii</sup> Filtro pulidor es un dispositivo opcional para filtrar sólidos mayores a 10  $\mu$ m





Figura 5.13. Ejemplo de equipo ozonador para tratamiento terciario del agua antes de su consumo.

El carbón activado granular con KDF ofrece mayor seguridad por sus beneficios contra microorganismos, cloro, contaminantes orgánicos y metales pesados.

### 5.2.7 COMPLEMENTOS

Los complementos son otros componentes que no son esenciales en el sistema pero lo complementan por sus beneficios en automatización y aumento de la calidad del agua.

#### 5.2.7.1 VÁLVULA PARA EVITAR REGRESO DE AGUA (VÁLVULA *CHECK*).

Se trata de un dispositivo mecánico que permite el tránsito del agua en el sentido del tanque de almacenamiento hacia el drenaje pero no en sentido inverso. Se recomienda instalar una válvula *check* en el rebosadero que va del tanque de almacenamiento al drenaje para evitar que el agua del drenaje, en un momento de sobrecarga, pueda ingresar al tanque y contaminarlo. Además, este equipo es importante porque evita el paso de animales que pueden estar en el drenaje. La Figura 5.14 muestra un ejemplo de instalación.



Figura 5.14. Válvulas *check* para evitar el regreso de agua del drenaje a la cisterna.

#### 5.2.7.2 FLOTADOR PARA INGRESO DE AGUA DE RED

En caso que la casa donde se instale el sistema de captación cuente con agua de red, la llave de ingreso de ésta se deberá cerrar durante la época de lluvias para permitir espacio en la cisterna donde se almacenará el agua de lluvia. Se recomienda usar un flotador extra para dar redundancia a este sistema. Es decir, un flotador habilitado durante la época de captación que permita el ingreso de agua de la red al llegar un nivel de reserva en caso de que no se presenten lluvias (Lomnitz, 2010).

Este dispositivo mecánico disponible en el mercado, sólo funciona cuando el sistema cuenta con agua de la red y permite un nivel de reserva manteniendo espacio disponible para la lluvia, como se ilustra en la Figura 5.15.

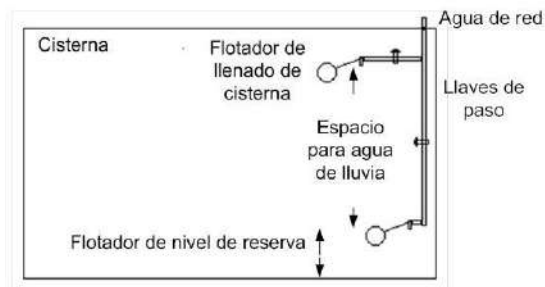


Figura 5.15. Sistema mecánico de flotación para mantener un nivel de reserva en el tanque de almacenamiento de agua.

### 5.2.7.3 PICHANCHA FLOTANTE

Este dispositivo permite que la bomba hidráulica siempre succione a unos centímetros por debajo del nivel del agua. Esto mejora la calidad del agua principalmente por 3 razones:

- algunos sólidos sedimentan al fondo del tanque de almacenamiento,
- al dar tratamiento preventivo o de conservación, algunas sustancias pueden precipitar compuestos al fondo
- y en caso de que la lluvia arrastre metales pesados, se precipitarán al fondo del tanque de almacenamiento al no tener un pH suficientemente ácido para mantenerlos disueltos.

En los tres casos, la calidad del agua se mejora con este dispositivo que evita tomar el agua con sedimentos del fondo como se observa en la Figura 5.16.



Figura 5.16. Pichanca flotante para mejorar la calidad del agua (3PTechnik, 2011).

### 5.2.7.4 REDUCTOR DE TURBULENCIA EN EL TANQUE DE ALMACENAMIENTO

Es un mecanismo muy simple que ayuda a mejorar la calidad de agua lluvia, reduciendo la turbulencia y la suspensión de sedimentos dentro del tanque de almacenamiento.

Algunos ejemplos que favorecen la sedimentación se muestran la Figura 5.17.

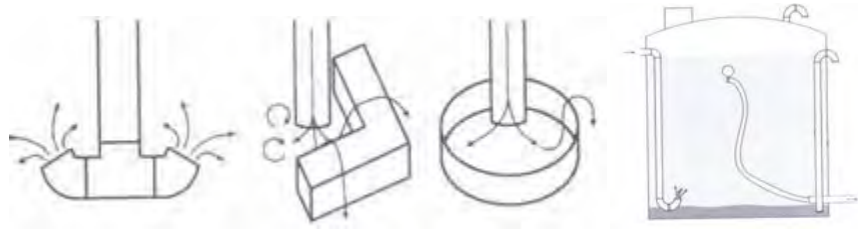


Figura 5.17. Ingreso del agua al tanque de almacenamiento para reducir turbulencia (Mechell *et al.*, 2010).

También se puede implementar de forma más simple con dos codos 90 ° de una medida más grande que el tubo conectado, como se aprecia en la Figura 5.18 .



Figura 5.18. Reductor de turbulencia de entrada a la cisterna.

#### 5.2.7.5 ELECTRONIVELES Y SISTEMA DE BOMBEO AUTOMÁTICO

Se trata de sensores de nivel de agua en el tinaco que mandan una señal a un controlador que automatiza el funcionamiento de la bomba. El uso de este sistema reduce la intervención manual y protege a la bomba en caso de no haber agua. Para un sistema de captación y aprovechamiento de lluvia la implementación del bombeo automático es importante porque hace pasar el agua por los filtros y mantiene el tinaco con agua sin necesidad de encendido manual, lo que asegura espacio disponible continuo para lluvia en el tanque de almacenamiento.

### 5.3 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA

Para instalar cualquier sistema de aprovechamiento pluvial se recomienda primero calcular la capacidad y los beneficios asociados para decidir el diseño más conveniente y luego elegir y dimensionar los componentes.

#### 5.3.1 CAPACIDAD DE ABASTECIMIENTO DEL SISTEMA

Un sistema de captación y aprovechamiento pluvial tiene una capacidad limitada de abastecimiento de agua que se puede estimar con la siguiente ecuación propuesta por Gould y Nissen-Petersen (1999), y Mechell *et al.* (2010):

$$CA = PP * AC * K$$

Donde los factores que intervienen son:

1. CA. Capacidad de abastecimiento de agua, es decir, cuántos litros de agua de lluvia potencialmente se pueden captar.
2. PP. Precipitación pluvial promedio de la temporada de lluvia del sitio de estudio. Es una variable que no se puede controlar aunque se puede predecir de forma aproximada. Para este trabajo se sugiere un promedio de  $1251 \pm 65$  mm de precipitación de mayo a octubre en la zona de estudio.
3. AC. El área de captación es una variable que se puede controlar. La cantidad de agua que se puede captar es directamente proporcional a los  $m^2$  de área de captación.
4. K. Es el coeficiente de captación que depende del tipo de superficie. Ver Tabla 5.3. Se recomienda usar  $K = 0.8$  para techos de loza impermeabilizados.

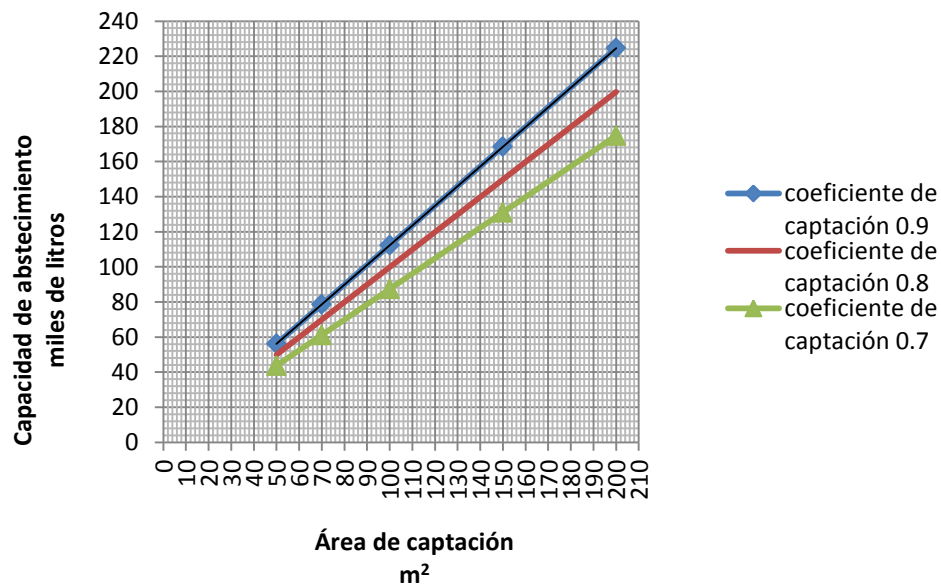


Figura 5.19. Capacidad de abastecimiento del sistema de captación con las lluvias de junio a octubre para diferentes coeficientes de captación.

En la Figura 5.19 se ilustra la capacidad de abastecimiento de un sistema de captación de lluvia durante la temporada de mayo a octubre. Por ejemplo, considerando  $100 m^2$  de área de captación, un coeficiente del 80 % y la precipitación promedio del sitio de estudio de 1248 mm se pueden captar potencialmente en promedio 99 840 litros.

El volumen de almacenamiento requerido para instalar un sistema de captación y aprovechamiento pluvial de acuerdo a las necesidades se dimensiona a continuación.

### 5.3.2 DIMENSIONAMIENTO DEL VOLUMEN DE ALMACENAMIENTO

El dimensionamiento del volumen de almacenamiento es primordial para la elección del diseño de sistema de captación y aprovechamiento más adecuado.

En caso de la instalación de un sistema que aún no cuenta con tanque de almacenamiento se puede planear cuál es el volumen necesario para captar la mayor cantidad de agua posible de acuerdo a la capacidad de abastecimiento y consumo de agua.

Tabla 5.6. Método de determinación del volumen de almacenamiento máximo necesario por la diferencia máxima

Concepto	mayo	junio	Julio	Agosto	septiembre	Octubre	Total temporada
Precipitación mm	87	258	252	303	265	83	1248
Capacidad Abastecimiento l	12528	37152	36288	43632	38160	11952	179712
Acumulado l	12528	49680	85968	129600	167760	179712	-----
Demanda l	18700	18700	18700	18700	18700	18700	112200
Acumulado l	18700	37400	56100	74800	93500	112200	-----
Diferencia l	-6172	12280	29868	54800	<b>74260</b>	67512	232548

Para la determinación del volumen de almacenamiento máximo necesario, Gould y Nissen-Petersen (1999) y Mechell *et al.* (2010) proponen el método de la diferencia máxima entre la sumatoria acumulada<sup>i</sup> de la capacidad de abastecimiento mensual y la sumatoria acumulada del consumo mensual. La Tabla 5.6 muestra un ejemplo de esta determinación con el método mencionado, para una superficie ideal de captación de 180 m<sup>2</sup>, un coeficiente de captación del 80 % y un consumo mensual promedio de 18 700 litros<sup>ii</sup>.

La Figura 5.20 muestra el ejemplo anterior de forma gráfica.

<sup>i</sup> La sumatoria mensual acumulada es el valor de un mes más el acumulado del anterior.

<sup>ii</sup> Este valor de 18 700 litros se obtuvo a partir del dato de consumo de 154 l/hab d y un promedio de 4 habitantes por casa.

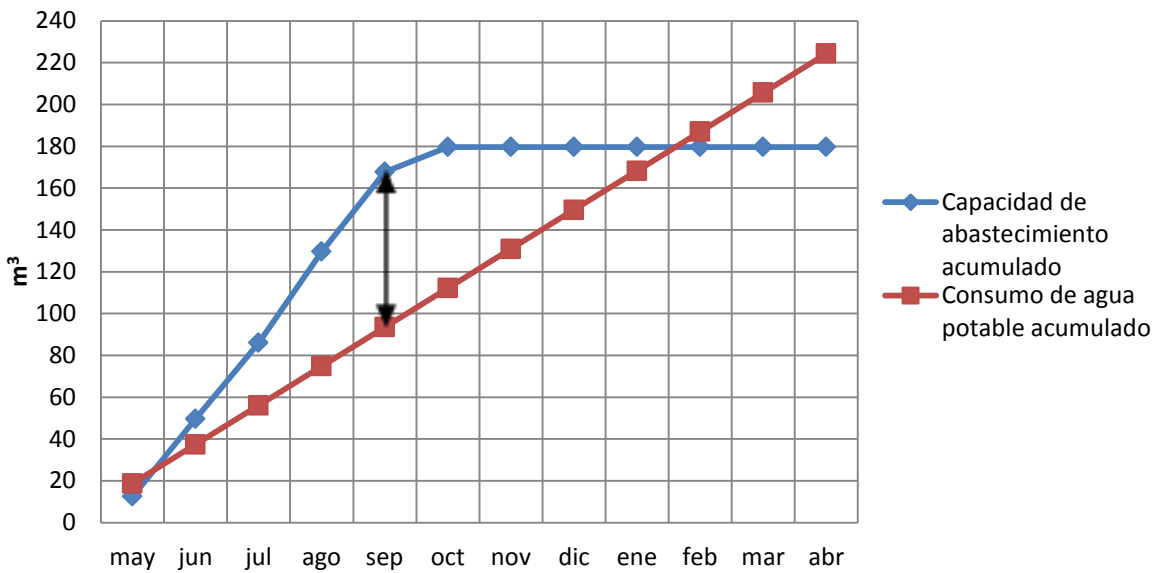


Figura 5.20. Método de la mayor diferencia entre con abastecimiento y consumo.

La Figura 5.21 muestra una gráfica que permite determinar el volumen de almacenamiento máximo necesario con respecto a 3 superficies de captación y tres casos de consumo.

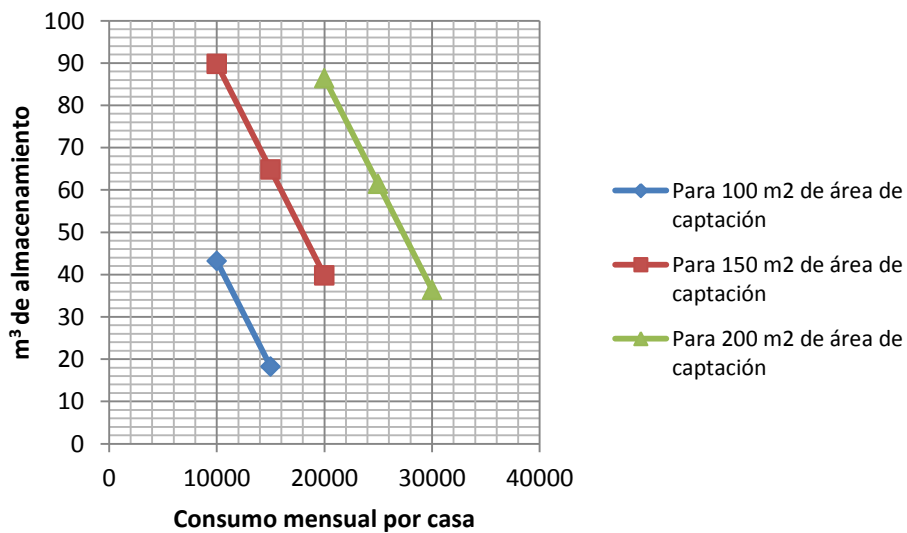


Figura 5.21. Gráfica de determinación del volumen de almacenamiento máximo necesario según consumo mensual por casa y área de captación.

En caso de contar con una cisterna preexistente al sistema de captación que no cumple con el volumen de almacenamiento máximo necesario, se puede conectar con su respectivo rebosadero para evitar derrames e inundaciones.

Para representar un porcentaje importante del abastecimiento doméstico de agua, la propuesta de captación y aprovechamiento pluvial requiere una superficie de captación mayor a 100 m<sup>2</sup> y un volumen de almacenamiento mayor a 20 m<sup>3</sup>. Se propone la implementación de un plan de ahorro de agua que contemple una reducción mínima del 30 % del consumo con la adopción de sanitarios de doble descarga y ahorradores para regadera y lavabos. Con estas medidas complementarias a la captación de lluvia se fortalece una solución integral al problema de agua no sólo en el sitio de estudio sino en la Cuenca de México.

### 5.3.3 DIMENSIONAMIENTO DE LA TUBERÍA Y CANALETA

Del adecuado dimensionamiento e instalación de las tuberías y conductos depende que el agua sea conducida a los sitios donde sea necesaria, evitando estancamientos y fugas.

#### 5.3.3.1 TUBERÍA VERTICAL

La primera tubería en importancia de dimensionar es la que se encarga de la bajada vertical del agua que se capta por el techo. Elegir un tubo subestimado para el caudal que se va a manejar puede traer estancamientos, desbordes, fugas y otros problemas relacionados.

La Tabla 5.7 reportada por Mechell *et al.* (2010), ayuda a la elección del diámetro adecuado para el tubo vertical de bajada central y el que conduzca hacia el tratamiento primario y al tanque de almacenamiento.

Tabla 5.7. Área máxima de captación por intensidad de lluvia y diámetro de tubería de bajada vertical.

Diámetro del tubo "	Flujo L/s	Máxima área de captación admisible para diferente intensidad m <sup>2</sup>				
		Intensidad 50 mm/h	Intensidad 75 mm/h	Intensidad 100 mm/h	Intensidad 125 mm/h	Intensidad 150 mm/h
2	1.5	101	67	51	40	34
3	4.2	300	200	150	120	100
4	9.1	643	429	321	257	214
6	26.8	1895	1263	984	758	632

Fuente: Mechell *et al.* (2010). Para determinar áreas de intensidades no mostradas en la tabla, se puede multiplicar el área dada en la columna de 25 mm/h por 25 y dividir entre la intensidad requerida.

Para elegir la mejor opción, se recomienda dimensionar con respecto a la intensidad máxima en del estudio. En la zona de estudio, la intensidad de la lluvia oscila entre 25 y 118 mm/h, siendo las segundas las más intensas.

La Tabla 5.8 es una adaptación de la anterior con la intensidad máxima de 118 mm/h de la zona de estudio. Con ella un habitante de Santa Rosa Xochiac puede elegir el diámetro de la tubería adecuado según su área de captación.

Tabla 5.8. Elección del diámetro adecuado de la tubería vertical según el área de captación

Área máxima en m <sup>2</sup>	Diámetro de la tubería en pulgadas
802	6
272	4
127	3
43	2

La tubería cilíndrica se puede cambiar a una con cara rectangular, siempre y cuando sea de área transversal equivalente.

Por ejemplo, para canalizar el agua de lluvia que captará una superficie de hasta 127 m<sup>2</sup> con intensidad de hasta 118 mm/h, se puede utilizar una tubería de PVC de 3”.

### 5.3.3.2 CANALIZACIÓN HORIZONTAL

Para dimensionar los conductos horizontales para el agua de lluvia se tiene como referencia las siguientes tablas propuestas por Mechell *et al.* (2010).

La Tabla 5.9 es de utilidad para la conducción horizontal del agua.

Tabla 5.9. Dimensiones de la canaleta según intensidad de lluvia e inclinación.

Pendiente de inclinación de canaleta	Ancho de canaleta “	Máxima área de captación admisible para diferente intensidad m <sup>2</sup>				
		Intensidad 50 mm/h	Intensidad 75 mm/h	Intensidad 100 mm/h	Intensidad 125 mm/h	Intensidad 150 mm/h
1 %	3	45	30	22	18	15
	4	95	63	47	38	32
	6	253	169	126	101	84
	8	521	348	260	208	174
2 %	3	63	42	32	25	21
	4	134	89	67	54	45
	6	357	238	179	143	119
	8	740	494	370	296	247
4 %	3	89	60	45	36	30
	4	190	126	95	76	63
	6	515	344	258	206	172
	8	1042	694	521	417	347

Fuente: Mechell *et al.* (2010).



Para el caso de estudio, Santa Rosa Xochiac, se recomienda usar la tubería de acuerdo a cada área de captación y pendiente, con la intensidad de 125 mm/h.

Un declive más pronunciado de la canalización determina mayor capacidad para soportar áreas de captación más grandes.

La Tabla 5.10 ayuda a la elección de tubería horizontal de acuerdo a intensidad de lluvia, diámetro de tubería y su inclinación.

Tabla 5.10. Elección del diámetro adecuado de la tubería horizontal según área de captación.

Pendiente de inclinación tubería	Diámetro de tubería "	Flujo L/s	Máxima área de captación admisible para diferente intensidad m <sup>2</sup>				
			Intensidad 50 mm/h	Intensidad 75 mm/h	Intensidad 100 mm/h	Intensidad 125 mm/h	Intensidad 150 mm/h
1 %	3	2	153	102	76	61	51
	4	5	350	233	175	140	117
	6	14	995	663	498	398	332
	8	30	2139	1425	1070	856	713
2 %	3	3	216	144	108	86	72
	4	7	493	329	246	197	164
	6	20	1404	936	702	562	468
	8	43	3031	2021	1516	1213	1011
4 %	3	4	306	204	153	122	102
	4	10	699	466	350	280	233
	6	28	1990	1327	995	798	664
	8	60	4278	2850	2139	1711	1425

Fuente: Mechell *et al.* (2010).

### 5.3.4 DIMENSIONAMIENTO DEL DESVÍO AL DRENAJE

El desvío al drenaje debe tener un diámetro de tubo equivalente al de la tubería de bajada vertical para evitar flujo lento. Además se debe verificar que el sitio donde descargará debe soportar el caudal para evitar sobrecarga del sistema.

### 5.3.5 DIMENSIONAMIENTO DEL SEPARADOR DE PRIMERA LLUVIA

El separador de primera lluvia es el dispositivo que da el tratamiento medular al agua de lluvia. En resumen el trabajo del separador es retener el agua más sucia para que los siguientes tratamientos sean más eficientes y menos costosos (Isla Urbana, 2011).

Martinson y Thomas en su artículo "*Quantifying the first flush phenomenon*" del 2005, proponen la Tabla 5.11 que ayuda a elegir la cantidad de mm de lluvia que deben ser separados para disminuir la turbiedad a diferentes grados.

Una vez determinada la cantidad de mm de precipitación que hay que separar para la disminución seleccionada de turbiedad, se calcula el volumen necesario del separador multiplicando los mm

por el área de captación conectada en m<sup>2</sup>. Por ejemplo, para reducir la turbiedad desde 50 hasta 10 UTN, se requiere separar 2.5 mm de lluvia. Por ejemplo, para un superficie de 180 m<sup>2</sup> sería necesario un dispositivo de 2.5 l/m<sup>2</sup> \* 180 m<sup>2</sup> = 450 l.

En los resultados obtenidos de la caracterización de agua de lluvia del punto 4.1.2.1, la turbiedad en todas las muestras se mantuvo por debajo de 50 UTN, pero el techo donde se muestreó fue limpiado por las lluvias de mayo y los primeros días de junio. Se recomienda dimensionar este dispositivo con 1 a 2 mm de separación, entonces el volumen se obtiene multiplicando los mm por el área de captación conectada.

Tabla 5.11. Determinación del volumen de separación de acuerdo a la turbiedad deseada a la salida.

Turbiedad real del agua de lluvia UTN	mm de precipitación			
	Turbiedad deseada UTN			
	50	20	10	5
50	0	1.5	2.5	3.5
100	1	2.5	3.5	4.5
200	2	3.5	4.5	5.5
500	3.5	4.5	5.5	6.5
1000	4.5	5.5	6.5	7.5
2000	5.5	6.5	7.5	8.5

Fuente: Martinson y Thomas (2005).

Se recomienda elaborar un separador doméstico con la modificación propuesta al modelo “b” de Isla Urbana, como se ilustra en el punto 5.2.4.3.

Además de reducir la turbiedad, la separación de primera lluvia reduce contaminación microbiológica y química, pues esa primera lluvia limpia tanto a la atmósfera como a la superficie de captación y queda separada de la que se almacena para filtrar.

### 5.3.6 DIMENSIONAMIENTO DEL DESARENADOR

Este sistema considera un desarenador para retener un alto porcentaje de sólidos sedimentables que superen el separador de sólidos grandes y el de primera lluvia. Para dimensionar este dispositivo se utiliza la intensidad máxima de lluvia para la zona que es de 1.97 mm/min. Multiplicando este valor de intensidad por el área de captación disponible en m<sup>2</sup>, se obtiene un aproximado de flujo máximo, como se observa en la Tabla 5.12.

Tabla 5.12. Dimensionamiento del desarenador considerando 118 mm/h de intensidad máxima.

Área de captación	50 m <sup>2</sup>	100 m <sup>2</sup>	150 m <sup>2</sup>	200 m <sup>2</sup>
Flujo máximo* l/min	44	89	133	177
Tamaño clarificador l	30	50	100	120

\*El flujo máximo considera una intensidad máxima de 1.97 mm/min y un coeficiente de 0.8 de pérdida en techos y 0.7 de pérdida de presión en tubería.

## 5.4 PROPUESTA DE SISTEMA DE CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO PLUVIAL

Se describe a continuación la propuesta de diseño del sistema para captación y aprovechamiento a nivel doméstico para uso potable y no potable

### 5.4.1 TREN DE TRATAMIENTO

En la Figura 5.22 se esquematiza el tren de tratamiento general del sistema de captación y aprovechamiento pluvial propuesto para implementación doméstica. El tren de tratamiento se compone por un tratamiento primario, secundario y terciario, según la calidad que requiere.

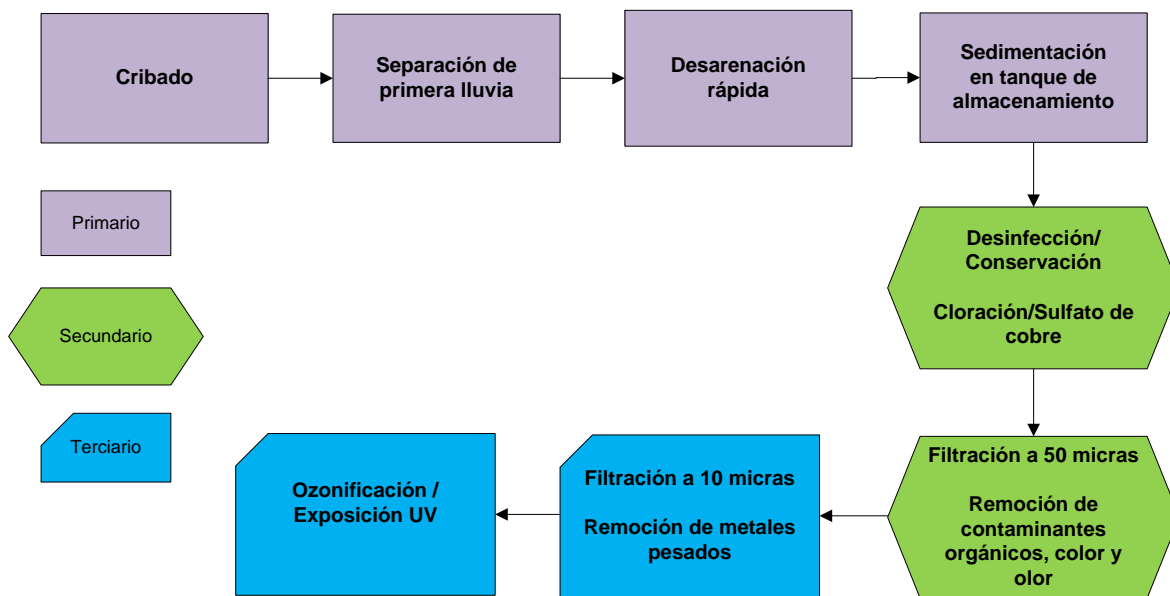


Figura 5.22. Tren de tratamiento para aprovechamiento pluvial por etapas de tratamiento.

### 5.4.2 DISEÑO DE SISTEMA DE CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO PLUVIAL

Se ha desarrollado el sistema en los puntos anteriores como un sistema con componentes y etapas modulares y escalables. Es decir, se puede adaptar el sistema a cada caso y hay situaciones que no requieren alguna etapa de tratamiento o dispositivo en particular. Se propone que estos sistemas se adapten completamente a casas construidas aunque no se hayan pensado desde su inicio para captar lluvia.

En la Figura 5.23 se aprecia la distribución general del sistema. Las partes visibles, a excepción del número 8, filtro a presión, pertenecen al tratamiento primario. El número 3, desvío al drenaje, es parte del tratamiento de separación de primera lluvia, etapa medular para la eficiencia de las posteriores según la experiencia del proyecto Isla Urbana (2011).

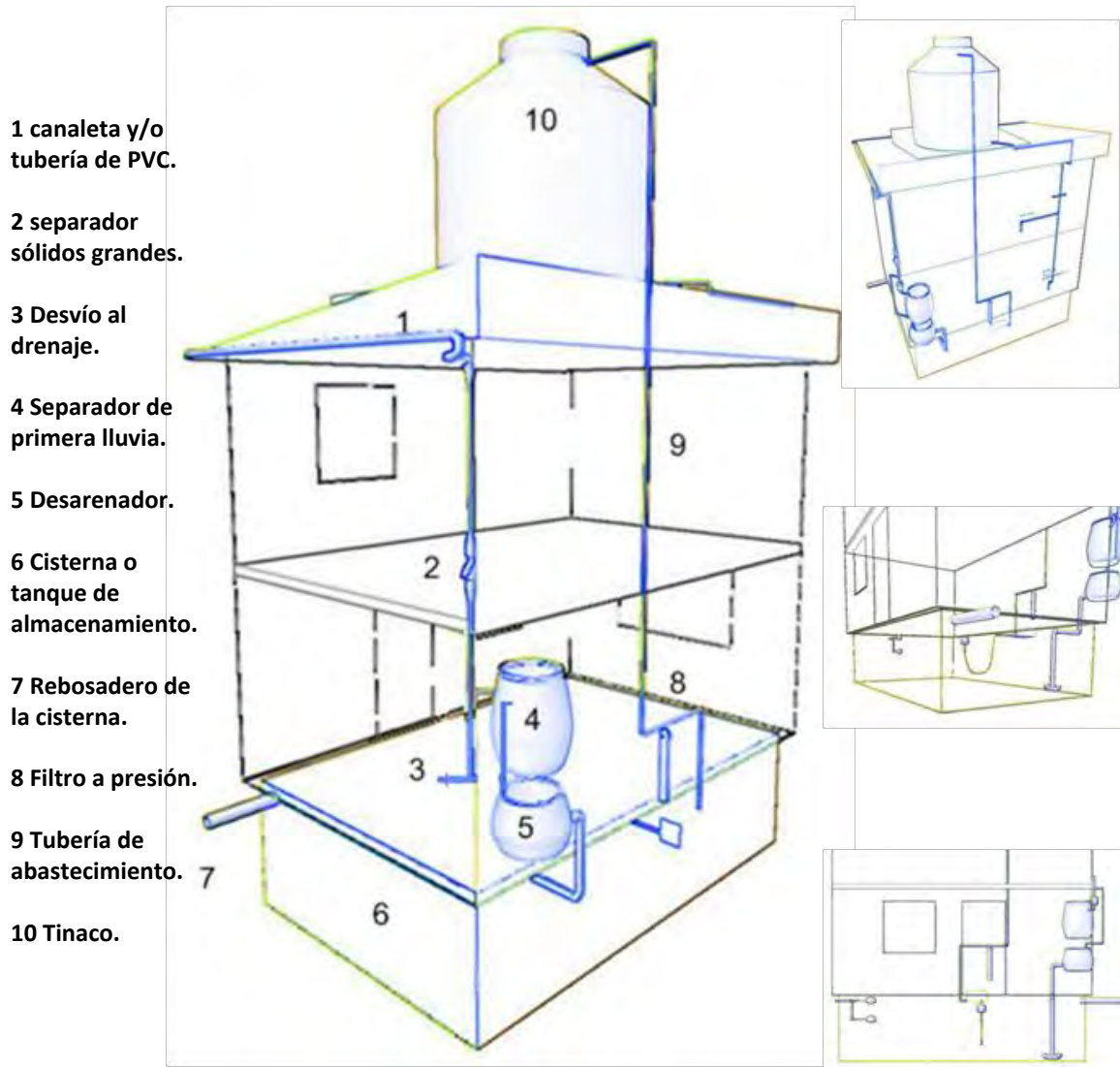


Figura 5.23. Diseño del sistema de captación y aprovechamiento pluvial.

La Figura 5.24 es un acercamiento al depósito de almacenamiento dónde se concentran algunos de los componentes complementarios al sistema, como flotador de nivel de reserva, pichancho flotante, válvula *check*, ingreso con reductor de turbulencia y pichancho flotante.

- 11 Ingreso de agua de la red municipal con nivel de reserva.
- 12 pichancho flotante.
- 13 bomba hidráulica.
- 14 Ingreso de agua de lluvia con reducción de turbulencia.
- 15 rebosadero con válvulas *check*

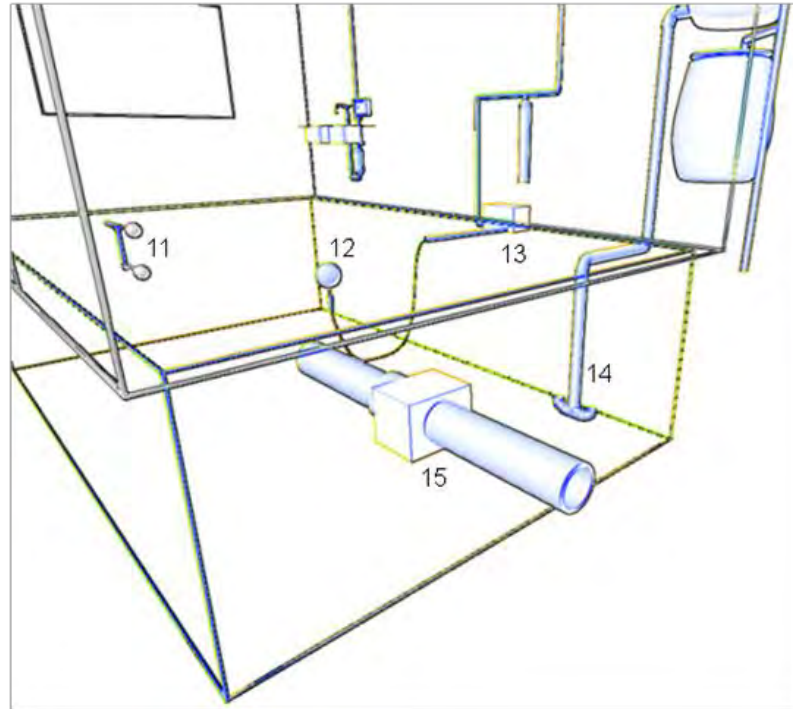


Figura 5.24. Componentes recomendados en tanque de almacenamiento.

Para los baños se recomienda seguir el siguiente diseño, donde el carbón activado complementa la segunda etapa de tratamiento, como se ilustra en la Figura 5.25. El filtro de carbón *block* principalmente está para retener cloro, olor, sabor y color, pero en caso de no tener problemas con este tipo de problemas puede suprimirse.

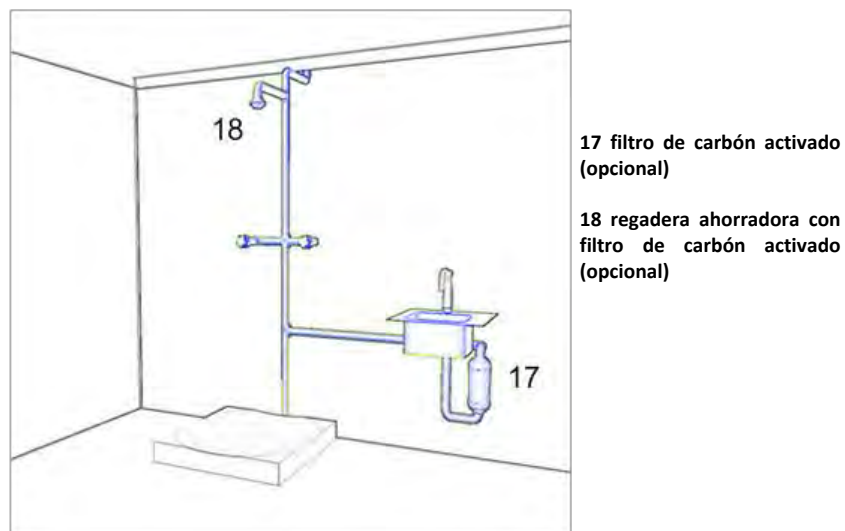


Figura 5.25. Tratamiento recomendado para baños.

El último punto del diseño se concentra en la cocina de la casa, donde se propone un filtro de carbón activado granular con KDF y un ozonador o lámpara de luz UV para tratamiento terciario de purificación. Este arreglo es opcional, pues sólo se recomienda cuando se pretende usar el agua para beber y/o cocinar.

**Etapa de tratamiento terciario sólo en caso de beber el agua de lluvia o cocinar.**

**19 filtro de carbón activado granular con KDF 85 a gravedad.**

**20 ozonador o Lámpara de luz UV, para salida de agua purificada.**

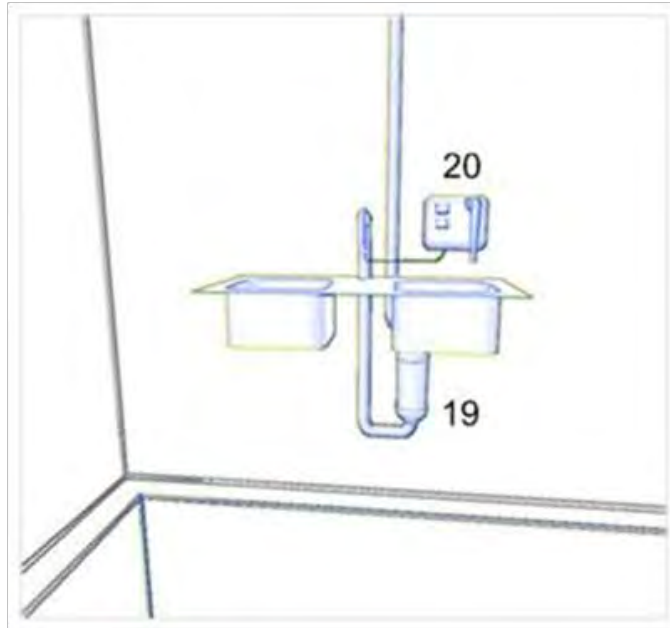


Figura 5.26. Diseño del sistema en cocina, sólo en caso de beber o cocinar con el agua de lluvia.

Nótese que la propuesta completa del sistema de captación y aprovechamiento pluvial se integra a los componentes preexistentes en la casa. Además es modular y el beneficiario puede bajar los costos del tratamiento considerando sólo el tratamiento primario y los complementos para abastecer sólo su demanda de para uso no potable, como limpieza, riego y uso sanitario. Esta posibilidad requiere un tanque de almacenamiento, bombeo, tubería y tinaco independiente del agua potable. El sistema también es escalable, ya que el interesado puede comenzar con un sistema base y a partir de ahí puede conectar más superficies de captación, colocar más tanques de almacenamiento y complementar sus tratamientos. La decisión del diseño debe estar fundamentada en la planeación y un análisis costo-beneficio. A continuación se presenta un ejemplo.

## 5.5 ANÁLISIS COSTO BENEFICIO

Según el análisis del punto 3.3.1.2.1, el consumo de agua potable en el Ecobarrio de Santa Rosa Xochiac se aproxima a los 280 m<sup>3</sup> anuales. Esta agua se abastece principalmente por medio de autotanques de 10 m<sup>3</sup> a un costo de \$450 a \$1 000 MN cada una.

La implementación de un sistema de captación de agua de lluvia doméstico tiene beneficios según el área de captación, el consumo de agua y el volumen de almacenamiento, como indica la Tabla 5.13.

Tabla 5.13. Cálculo<sup>i</sup> del beneficio de un sistema de aprovechamiento pluvial según área de captación y volumen de almacenamiento necesario.

Área de captación m <sup>2</sup>	Concepto Cantidad anual	Abastecimiento con sistema de aprovechamiento pluvial	Volumen de almacenamiento necesario m <sup>3</sup>	Observaciones
50	Litros	46 400	2.5	Representa 39 % del consumo de junio a octubre
	% de ahorro	16		
	Ahorro \$	2 100		
100	Litros	92 800	5	Representa 79 % de junio a octubre
	% de ahorro	33		
	\$	4100		
150	Litros	139 250	10	Representa el 100% de junio a octubre
	% de ahorro	50		
	\$	6 260		
200	Litros	185 600	50	Representa el consumo de junio a diciembre
	% de ahorro	66		
	\$	8 350		

El área de captación y capacidad de almacenamiento son parámetros limitantes. Un sistema con un área de captación de 50 m<sup>2</sup> puede abastecer el 16 % de la demanda total anual si cuenta con capacidad de almacenamiento de 2.5 m<sup>3</sup>, mientras que una superficie de 200 m<sup>2</sup> y capacidad de almacenamiento de 50 m<sup>3</sup> pueden abastecer el 66 % de la demanda total anual de agua.

Para que el beneficio sea mayor se propone la aplicación de un plan de ahorro de agua que sumado al aprovechamiento de la lluvia pueden representar hasta un 80 % de la demanda total. El plan de ahorro es muy simple, incluye la sustitución de sanitarios normales por aquellos de descarga separada para sólidos y líquidos que prometen una reducción en consumo del 30 % y el uso de dispositivos ahorradores en lavamanos, fregaderos y regaderas que ofrecen una reducción mínima del 50 %.

En la Tabla 5.14 se observa que con 100 m<sup>2</sup> de superficie de captación, una capacidad de almacenamiento de 5 m<sup>3</sup>, un coeficiente de aprovechamiento conservador del 80 % y un plan de ahorro sencillo, se podría abastecer una vivienda promedio con hasta un 63 % de su demanda total anual y permitiría ahorrar más de \$7 900 MN anuales por casa.

<sup>i</sup> Se tomó en cuenta 0.8 como coeficiente de captación, el consumo de agua de 280 m<sup>3</sup> anuales promedio por casa, la precipitación de junio a octubre en el sitio de estudio y el costo de \$450 por unidad de 10 000 litros.

Tabla 5.14. Cálculo de beneficio de un sistema de aprovechamiento pluvial adicional a un plan de ahorro de agua<sup>i</sup>.

Área de captación m <sup>2</sup>	Concepto Cantidad anual	Abastecimiento con el sistema + plan de ahorro	Volumen de almacenamiento m <sup>3</sup>	Observaciones
50	Litros	130 700	2.5	Representa 69 % de junio a octubre
	% de ahorro	47		
	Ahorro \$	5 881		
100	Litros	177 100	5	Representa el 100 % de junio a octubre
	% de ahorro	63		
	\$	7 970		
150	Litros	223 500	40	Cubriría el consumo de junio a diciembre
	% de ahorro	80		
	\$	10 000		
200	Litros	270 000	80	Hasta marzo del siguiente año
	% de ahorro	96		
	\$	12 100		

A continuación se desarrolla el caso de la vivienda con 100 m<sup>2</sup> de superficie de captación.

### 5.5.1 ANÁLISIS PARA 100 M<sup>2</sup> DE SUPERFICIE DE CAPTACIÓN

Las casas del Ecobarrio de Santa Rosa Xochiac tienen una área de captación disponible muy variable, pero 100 m<sup>2</sup> es una área representativa de la comunidad para fines de este análisis.

Con 100 m<sup>2</sup> de superficie de captación, se puede abastecer un 33 % de la demanda anual. Si se aplica un plan de ahorro de agua sencillo que considere sanitario con descarga separada y ahorradores en regaderas y lavabos, se podría disminuir además un 30 % la demanda, es decir entre el plan y el sistema se podría dar solución a un 63 % de la demanda anual de agua potable, dejando solo un 37 % para cubrir con otra forma de abastecimiento, como se muestra en la Figura 5.27.

<sup>i</sup> El plan de ahorro contempla una reducción del 30 % el consumo promedio de 280 m<sup>3</sup>, calculado con el porcentaje del uso del agua del punto 3.3.1.2.2 y las especificaciones de reducción de consumo del fabricante de sistemas doble descarga en sanitario, regaderas ahorradoras y ahorradores para llaves de lavabo.





Figura 5.27. Abastecimiento de agua a nivel doméstico con sistema de captación pluvial con 100 m<sup>2</sup>, plan de ahorro y autotanques.

En la Figura 5.28 se aprecia que durante todo el año el plan de ahorro es constante reduciendo la demanda en un 30 %. A partir de junio se hace uso del sistema de captación y sumado al plan de ahorro se puede abastecer más de la mitad de la demanda, llegando a sobrepasar el 100 % en los meses de junio a septiembre. Para los meses de noviembre y diciembre la demanda depende del plan de ahorro y de otra forma de abastecimiento.

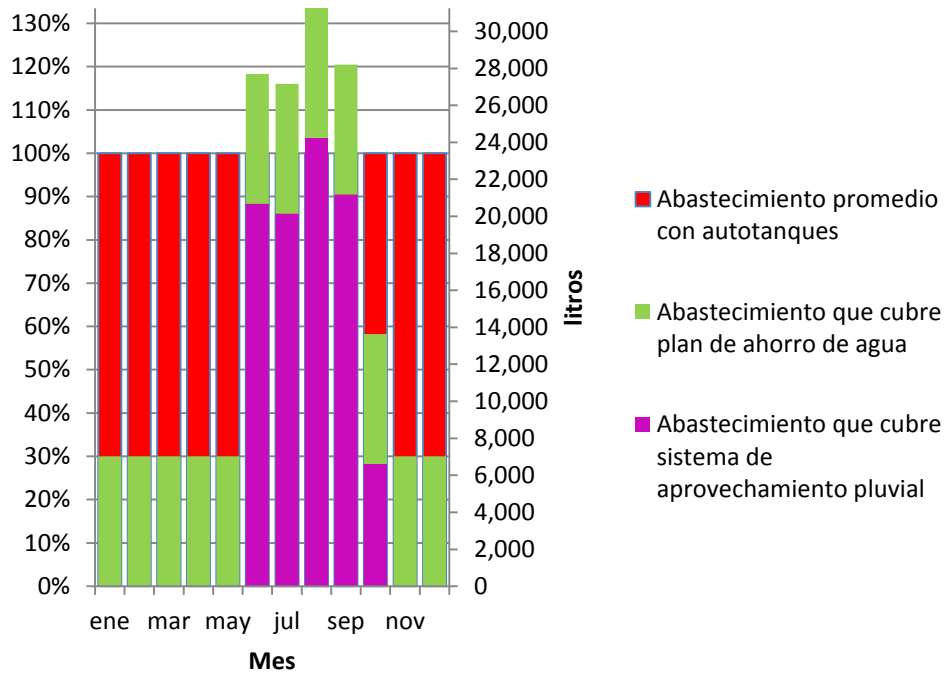


Figura 5.28. Cobertura de abastecimiento con sistema de aprovechamiento pluvial y plan de ahorro.

El principal beneficio de un plan de ahorro y un sistema de captación agua de lluvia es la disponibilidad del agua durante la época de lluvia, pero además existe un beneficio económico y ambiental. La reducción en la demanda de autotanques por parte de la comunidad puede repercutir en la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero por bombeo y transporte, además de disminución en la explotación del acuífero y otras fuentes.

Económicamente, una reducción en el gasto de autotanques u otra forma de abastecimiento es un incentivo extra pero tangible de la implementación de un sistema de captación y aprovechamiento de agua de lluvia.

El abastecimiento por medio de autotanques tiene un costo superior a \$12 000 MN anuales, mientras que implementando el plan de ahorro y la captación de lluvia, el costo disminuiría a un 37 % del total.

Una vez analizado lo anterior, se puede entender que cada 10 m<sup>2</sup> de área de captación en la zona, son potencialmente equivalentes a un autotanque de 10 000 litros de agua al año y su respectivo ahorro.

Por otro lado, el costo de inversión de un sistema es demasiado variable y depende de las características de cada implementación, como los materiales, la mano de obra, los componentes que se deseen instalar, el grado de automatización, etc. En el proyecto Isla Urbana, la implementación del sistema requiere que el beneficiario cuente con cisterna, tinaco y bomba, pues representan la mayor inversión de todo el sistema. El sistema básico que instala este proyecto incluye un separador de primera lluvia, filtro separador de sólidos grandes, tubería de conducción a la cisterna, un filtro de sólidos y de carbón activado a presión, todo por un costo que varía entre los \$4 000 y los \$6 000 MN e incluye la mano de obra de la instalación.

Si se toma en cuenta el caso de Isla Urbana con un costo de implementación de \$6 000 MN, el retorno de inversión de la implementación de un sistema de captación pluvial básico sería de uno a dos años. Este sistema toma en cuenta el tratamiento primario y secundario.

Un sistema entonces se puede ver como una inversión redituable en costo de abastecimiento de agua y al ser modular y escalable se puede agregar con el tiempo y posibilidades más área de captación y volumen de almacenamiento para maximizar los beneficios y depender lo menos posible del abastecimiento por autotanques.

## **5.6 GUÍA RÁPIDA DE MANTENIMIENTO Y BUENAS PRÁCTICAS**

La calidad del agua del sistema de captación y aprovechamiento de lluvia se basa en la prevención.

La propuesta de implementar estos sistemas trae implícitamente una forma de abastecimiento independiente. Gran parte el éxito captar lluvia consiste en medidas de limpieza y mantenimiento de parte del beneficiario a su sistema.

### **Guía rápida de mantenimiento y buenas prácticas**

- 1) Mantener lo más limpio posible la superficie de captación y en general todo el sistema.

- 2) Usar el desviador al drenaje para dejar escapar los primeros 3 a 5 aguaceros de la temporada de lluvia.
- 3) Mantener limpio el filtro de sólidos grandes.
- 4) Drenar el separador de primera lluvia por cada evento de lluvia y mantenerlo limpio. El agua del separador puede ocuparse en otros usos como riego, limpieza, etc.
- 5) Usar algún método de desinfección y conservación, como cloración,  $\text{CuSO}_4$  o iones de plata en el depósito de almacenamiento.
- 6) Los filtros tienen un tiempo de vida, se deben limpiar y reemplazar según el fabricante. Muchos modelos de filtros comerciales se pueden retrolavar para alargar el tiempo de vida.
- 7) Es importante que el rebosadero del tanque de almacenamiento siempre esté protegido contra la contaminación que puede entrar del drenaje. Revisar el funcionamiento de las válvulas *check* y/o trampas para evitar problemas de contaminación.
- 8) Lavar al menos cada año el tinaco y la cisterna, de preferencia antes de la temporada de lluvia.

## 5.7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de la experiencia de este trabajo se plantean las siguientes conclusiones y recomendaciones.

### 5.7.1 CONCLUSIONES

- Con base en el punto 4.1, el agua de lluvia captada por el techo de una casa en el Ecobarrio de Santa Rosa Xochiac obtuvo una mejor calidad y menor variabilidad que el agua captada por el patio, en los parámetros: color verdadero, turbiedad, SST, sólidos sedimentables, CE, sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), sodio ( $\text{Na}^+$ ), coliformes totales, coliformes fecales y mesófilos aerobios.

El agua de lluvia captada por el techo, cumplió con la NOM-127-SSA1-1994 en los parámetros: turbiedad, sólidos disueltos totales, sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), sodio ( $\text{Na}^+$ ) y coliformes fecales. El color verdadero lo cumplió de manera marginal y no cumplió con los coliformes totales.

Se necesitan más estudios que continúen ampliando el panorama acerca de la calidad del agua de lluvia que escurre por diversas superficies de captación y después de su tratamiento, sobre todo en parámetros de contaminación orgánica y metales pesados, que esclarezcan su potencial para consumo humano.

- El tren de tratamiento propuesto está basado en tres niveles. El tratamiento primario destinado para controlar la contaminación física, y el secundario para contaminación fisicoquímica y microbiológica. Ambos están pensados para dar calidad de agua para

ducha, lavado de trastes, ropa, limpieza en general y uso sanitario. El tratamiento terciario se propone sólo en caso que estudios posteriores prueben la seguridad del agua para consumo humano.

Mediante metodologías de evaluación sencillas, se eligieron los componentes del tratamiento primario, que en orden de aparición cuenta con: un separador de sólidos grandes, un separador de primera lluvia y un desarenador. Además las metodologías propuestas por este trabajo pueden utilizarse y adaptarse para el desarrollo de dispositivos similares.

El agua de lluvia una vez que recibió el tratamiento primario, puede conservar sus buenas características evitando el crecimiento microbiológico si se aplica  $\text{CuSO}_4$ , pero por su toxicidad no se sugiere para agua que se destine en los siguientes usos: beber, cocinar, lavado de trastes, ducha e higiene bucal.

El  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  aplicado en solución a dosis de 0.8 mg/l en agua de lluvia almacenada sin luz directa y en un recipiente cerrado, puede eliminar coliformes totales después de 3 horas de tiempo de contacto y mantener parámetros de color y turbiedad dentro de la NOM-127-SSA1-1994 hasta 14 días después.

Para dar un tratamiento microbiológico al agua de lluvia con menores restricciones, se sugiere uso de cloro o la plata iónica, a excepción de agua para beber y cocinar.

- Se pueden implementar componentes sencillos pero eficientes para cubrir el tratamiento primario del agua de lluvia captada por una superficie. Para los niveles de tratamiento posteriores existen dispositivos comerciales, eficientes y accesibles para los habitantes de Santa Rosa Xochiac.

Implementar un sistema de captación y aprovechamiento pluvial doméstico es viable en el sentido técnico y económico. La implementación del sistema básico de aprovechamiento pluvial con tratamiento primario y secundario (costo aproximado de \$6 000 MN) tiene un retorno de inversión entre 1 y 2 años.

- El sistema de aprovechamiento pluvial propuesto es sencillo de manera intencional para que pueda instalarse con conocimientos técnicos básicos. Además es modular para que pueda implementarse sólo el nivel de tratamiento necesario. También es un sistema escalable para que, una vez iniciado, pueda seguirse ampliando con el tiempo y crecimiento según las necesidades de cada usuario. Todo lo anterior lo hace replicable en beneficio de los interesados.

### 5.7.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar este trabajo, en especial el capítulo 5 como una guía de implementación del sistema.

- En la medida de lo posible, se pueden ir cambiando los materiales aquí propuestos por otros de mejor calidad, como el tubo de PVC por tubo de HDPE y los filtros desechables por otros que no lo sean, todo en beneficio del propio beneficiario y del ambiente.
- Los sistemas de captación de lluvia, aunque no son un tema nuevo, requieren de más investigación y creatividad para que dejen de ser temas y casos aislados, y puedan detonar una mejora significativa en la manera de abastecimiento de agua humana en beneficio del ambiente y la sociedad.

## REFERENCIAS

1. Almeida-Leñero L., 2007. Servicios ecosistémicos en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México. Instituto Nacional de Ecología. *Gaceta ecológica* número especial 84-85. [Fecha de consulta 18 de octubre de 2009]. Disponible en: <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/gacetas/523/ecosistemas.pdf>
2. American Public Health Association, 2005. Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater. American Public Health Association, 21ª edición.
3. Anaya M., 1998. Sistemas de captación de agua de lluvia para uso doméstico en América Latina y el Caribe, Manual técnico. IICA Biblioteca. Venezuela. [Fecha de consulta 28 de septiembre de 2009]. Disponible en: <http://books.google.com.mx/books?id=894qAAAAYAAJ&printsec=frontcover>
4. Aquor. "Filtros KDF-85". Grupo NOVEM. [Fecha de consulta 28 de septiembre de 2009] Disponible en: <http://www.novem.com.mx/precursor/KDF-85.pdf>
5. ASTM (American Society for Testing Materials), 1990. "Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter". ASTM D5084 - 9. ASTM International.
6. ATHA (Asociación Española de Fabricantes de Tubos de Hormigón Armado), 2010. Biblioteca y publicaciones: Manual ATHA. Almazán J.L. (coordinador). España. [Fecha de consulta 15 de noviembre de 2010] Disponible en: [http://www.atha.es/atha\\_archivos/manual/c4473.htm](http://www.atha.es/atha_archivos/manual/c4473.htm)
7. Arviza J., Balbestre I. y P. González, 2002. Ingeniería Rural: Hidráulica. Universidad Politécnica de Valencia. España. [Fecha de consulta 28 de octubre de 2009]. Disponible en: [http://books.google.com.mx/books?id=PIbhSEZZDkoC&printsec=frontcover&dq=hidraulic a#PPP1,M1](http://books.google.com.mx/books?id=PIbhSEZZDkoC&printsec=frontcover&dq=hidraulic+a#PPP1,M1)
8. Báez A., Belmont R., García R., Padilla H., Torres, M.C., 2007. Chemical composition of rainwater collected at a southwest site of Mexico City, Mexico. *Atmospheric Research* **86**(1):61-75.
9. Ballén J., 2006. Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia. Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua. João Pessoa, Brasil. 5 a 7 de junio. [Fecha de consulta 18 de septiembre de 2009]. Disponible en: <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/6serea/TRABALHOS/trabalhoH.pdf>
10. Bosch P., 1997. La zeolita una piedra que hierve. Fondo de Cultura Económica. México. [Fecha de consulta 25 de septiembre de 2010]. Disponible en: [http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/55/htm/sec\\_1.html](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/55/htm/sec_1.html)
11. Bravo H., Sosa E., Sánchez P., Soto R. y J. Alarcón, 2005. Precipitación Ácida en la Costa del Golfo de México, 535-552. En: Botello A.V., Rendón-von Osten J., Gold-Bouchet G. y C.

- Agraz-Hernández (Eds). Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), INE (Instituto Nacional de Ecología).
12. Camacho A., Giles M., Palao M., Serrano B. y O. Velázquez, 2007. Técnicas para el análisis microbiológico de alimentos. Facultad de Química, UNAM 2ª Edición.
  13. Campos I., 2000. Saneamiento Ambiental. Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica. Publicado por EUNED. Costa Rica. [Fecha de consulta 16 de mayo de 2010]. Disponible en: <http://books.google.com.mx/books?id=lsgrGBGIGeMC&pg=PA100&dq=lluvia#PPP1,M1>
  14. CCAYAC-M-004, 2006. Estimación de la densidad microbiana por la técnica de número más probable, detección de coliformes totales, coliformes fecales y *Escherichia coli* por número más probable.
  15. Chacón-Nava J., López-Mejía E. y S. Mendoza-Herrera S., 2011. CAP Dispositivo Cosechador de aguas pluviales. Tesis (Licenciatura en Diseño Industrial). UNAM, Facultad de Arquitectura, México.
  16. CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2008. Estadísticas del agua en México. SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). México.
  17. COPODF (Consejo de Población del Distrito Federal). [Fecha de consulta 9 de abril de 2009]. Disponible en: <http://www.copo.df.gob.mx>
  18. Cruz E., 2007. Estudio comparativo entre la deposición húmeda y seca de Ciudad Universitaria (zona metropolitana de la Ciudad de México) y el Tajín (Veracruz). Tesis (Licenciatura en Química Industrial). UNAM, Facultad de Estudios Superiores de Cuautitlán. México.
  19. DAO (Delegación Álvaro Obregón). [Fecha de consulta 5 de septiembre de 2009]. Disponible en: <http://www.dao.gob.mx/inicio.php>
  20. Davis M., 2005. Ingeniería y ciencias ambientales. Mc Graw Hill.
  21. De Lorenz F., 2009. Proyecto: Diagnóstico de las condiciones ambientales actuales dentro de la poligonal que habitan los vecinos organizados por un futuro verde, Santa Rosa Xochiac, para el Gobierno del Distrito Federal. México. (Comunicación personal).
  22. DSENY (Departamento de sanidad del Estado de Nueva York), 2008. Manual de tratamiento de aguas. Editorial Limusa. México.
  23. Ecologic maintenances Mexico. “¿Qué es zeolita?” Mérida, México. [Fecha de consulta 30 de agosto de 2010]. Disponible en: <http://www.emmexico.com/zeoponiaem.pdf>
  24. Espinosa R., 2006. Metodologías para evaluar la calidad del agua. Universidad Autónoma Metropolitana. México.

25. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación), 2000. Manual de captación y aprovechamiento del agua de lluvia. *Serie: Zonas Áridas y Semiáridas No. 13*. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile.
26. Fernández G., 2007. Manual de laboratorio de química de agua. Facultad de Ingeniería de la UNAM, 2ª edición.
27. García R., Belmont R., Padilla H., Torres M.C. y A. Baez, 2009. Trace metals and inorganic ion measurements in rain from Mexico City and a nearby rural area. *Chemistry and Ecology* **25**:71-86.
28. García R., Del Torres C., Padilla H., Belmont R., y E. Azpra, 2006. Measurement of chemical elements in rain from Rancho Viejo, a rural wooded area in the state of Mexico, Mexico. *Atmospheric Environment* **40**: 6088-6100.
29. Garrido S., 2005. Captación de agua para uso doméstico en la tierra: Captación y tratamiento de agua en Morelos. *Hypatia* **14**. [Fecha de consulta 3 de septiembre de 2009]. Disponible en:  
[http://hypatia.morelos.gob.mx/no14/Rescatando\\_agua/aguadelcielo.html](http://hypatia.morelos.gob.mx/no14/Rescatando_agua/aguadelcielo.html)
30. Google Maps, 2010. Google. [Fecha de consulta 15 de febrero de 2010]. Disponible en:  
<http://maps.google.com.mx/>
31. Gomella C. y H. Guerree, 1982. La distribución del agua en las aglomeraciones urbanas y rurales. Editores técnicos asociados S.A., 2da Edición. Barcelona. Disponible en:  
<http://books.google.com.mx/books?id=yIeYRU0neiwC&printsec=frontcover>
32. Gould J. y E. Nissen-Petersen, 1999. Rainwater Catchment Systems for Domestic Supply: Design, Construction and Implementation. Action Publishing, EUA.
33. High Purity Standards. "Trace Metals in Drinking Water Standards". [Fecha de consulta 20 de mayo de 2011]. Disponible en:  
<http://www.highpuritystandards.com/tmdw.php>
34. INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática), 2012. [Fecha de consulta 18 de septiembre de 2012]. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/>
35. INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática), 2005. Estadísticas del Medio Ambiente del Distrito Federal y Zona Metropolitana 2002. INEGI.
36. Isla Urbana, 2010. Proyecto del IIRRI (Instituto Internacional de Recursos Renovables). México. [Fecha de consulta 20 de febrero de 2010]. Disponible en:  
<http://www.islaurbana.org/>
37. ITC (Injection Tecnical Control Inc.). "Cloración de agua potable". [Fecha de consulta 2 de abril de 2011]. Disponible en:  
[http://www.itc.es/pdf/Technical\\_documents/Agua-marca-Esp.pdf](http://www.itc.es/pdf/Technical_documents/Agua-marca-Esp.pdf)



38. Kinkade-Levario H., 2007. Design for Water. New Society Publishers, EUA.
39. Lazcano C. "Fallas y problemas de la desinfección urbana". SEDAPAL, Perú. [Fecha de consulta 1° abril de 2011]. Disponible en:  
<http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacg/e/fulltext/simposio/ponen2.pdf>
40. Lesur L., 2006. Manual de purificación del agua. Editorial Trillas, México.
41. Lesur L., 2007. Manual de mantenimiento e cisternas, tinacos y fosas sépticas. Editorial Trillas, México.
42. Lomnitz E., 2011. "Cosechando agua". Documental, Urrutia X. (directora); Ecofilm Festival, México. Disponible en:  
<http://www.ecofilmfestival.org/>
43. Martinson B. y T. Thomas, "Quantifying the first-flush phenomenon". En: 12th International Rainwater Catchment Systems Conference, Nov 2005, New Delhi, India.
44. Masters G.M., 2007. Introduction to Environmental Engineering and Science. Prentice Hall, 3a edición.
45. Mechell J., Kniffen B., Lesikar B., Kingman D., Jaber F., Alexander R. y B. Clayton, 2010. Rainwater Harvesting: System Planning. Texas AgriLife Extension.
46. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. D. O. F. 22 de noviembre, 2000.
47. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-181-SSA1-1994. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Requisitos sanitarios que deben cumplir las sustancias germicidas para tratamiento de agua, de tipo doméstico. D. O. F. 16 de diciembre, 1999.
48. Pancorbo F., 2009. "Desinfección del agua mediante procesos electrofísicos cobre/plata". [Fecha de consulta 3 de enero de 2011]. Disponible en:  
<http://dspace.universia.net/bitstream/2024/233/1/DESINFECCION+DEL+AGUA+MEDIANTE+COBRE-PLATA.pdf>
49. Planetaazul.com.mx. "Proyectan ecopoblado de ensueño". Marzo 2008. [Fecha de consulta 5 de septiembre de 2009]. Disponible en:  
<http://www.planetaazul.com.mx/www/2008/03/03/proyectan-ecopoblado-de-ensueno/>
50. Prieto C., 2004. El agua: Sus formas, efectos, abastecimientos, usos, daños, control y conservación. ECOE Ediciones, 2da Edición. Disponible en:  
<http://books.google.com.mx/books?id=9c-Bjue-cBsC&printsec=frontcover>
51. Pürschel W., 1976. Tratado general del agua y su distribución. La calidad del agua y su tratamiento. URMO Ediciones.

52. Quiñones G., 2008. Determinación de metales pesados por ICP-MS en agua de lluvia colectada en Ciudad Universitaria. Tesis (licenciatura en Biología). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM, México.
53. Quispe A., 2008. Captación de agua de lluvia para la agricultura familiar, una experiencia en comunidades rurales de Tlaxcala. *Boletín del archivo histórico del agua* Vol. **13**: 82-91. Jacinta Palerm (coordinadora). SEMARNAT.
54. Ramírez B., 2007. "Se cierne amenaza sobre el único afluente vivo del DF". *La Jornada* (lunes 19 de febrero 2007). [Fecha de consulta 18 de octubre de 2009]. Disponible en: <http://www.jornada.unam.mx/2007/02/19/index.php?section=capital&article=043n1cap>
55. Rea F., 2008. Manifestación del impacto ambiental para los vecinos organizados de Santa Rosa Xochiac, México, D.F. Tesis (Licenciatura en Ingeniería Civil). Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM, México.
56. Sagar K. 2002. Sampling and physico-chemical analysis of precipitation: a review. *Environmental Pollution* **120** (3): 565-594.
57. Salinity Management Guide (Guía de manejo de salinidad), 2007. "Fundamentals". [Fecha de consulta 20 de febrero de 2010]. Disponible en: [http://www.salinitymanagement.org/Salinity%20Management%20Guide/Is/Is\\_3d.html](http://www.salinitymanagement.org/Salinity%20Management%20Guide/Is/Is_3d.html)
58. SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes), 2004. "Isoyetas de intensidad de lluvia para el Distrito Federal". Dirección General de Servicios Técnicos, México. [Fecha de consulta 1° abril de 2011]. Disponible en: [http://dgst.sct.gob.mx/fileadmin/Isoyetas/distrito\\_federal.pdf](http://dgst.sct.gob.mx/fileadmin/Isoyetas/distrito_federal.pdf)
59. Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal, 2004. Inventario de emisiones ZMCM 2004. Sarmiento R., Ruíz M.C. y S. Rodríguez (coordinadores). México.
60. SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales), 2006. Gestión Ambiental del Aire en el Distrito Federal 2000-2006. Gobierno del Distrito Federal. México.
61. Silverlife, 2011. [Fecha de consulta 21 de abril de 2011]. Disponible en: <http://silverlife.com.mx/>
62. Simón A. "Capacitan a niños en respeto a la ecología". *El Universal* (lunes 9 de agosto de 2004). [Fecha de consulta 17 de noviembre de 2009]. Disponible en: [http://www2.eluniversal.com.mx/pls/impreso/noticia.html?id\\_nota=61572&tabla=ciudad](http://www2.eluniversal.com.mx/pls/impreso/noticia.html?id_nota=61572&tabla=ciudad)
63. Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT), 2011. [Fecha de consulta 3 de septiembre de 2009]. Disponible en: <http://www.sma.df.gob.mx/simat2/>
64. Talbot D. y J. Talbot, 2007. Corrosion and science technology. CRC Press. [Fecha de consulta 10 de diciembre de 2009]. Disponible en:

<http://books.google.es/books?id=lwLer72nHROC&printsec=frontcover#v=onepage&q=&f=false>

65. Tchobanoglous G., 2004. Wastewater engineering/Metcalf & Eddy. Mcgraw-Hill, 4ta edición. Boston.
66. UAM (Universidad Autónoma Metropolitana), 2009. Repensar la cuenca: La gestión de ciclos del agua en el Valle de México. Burns E. (coordinadora). Universidad Autónoma Metropolitana. México.
67. UNATSABAR (Unidad de Apoyo Técnico en Saneamiento Básico Rural), 2001. Guía de diseño para captación del agua de lluvia. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, División de Salud y Ambiente, Organización Panamericana de la Salud, Oficina Sanitaria Panamericana, Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud. Perú.
68. USEPA (Environmental Protection Agency of United States), 1994. Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems. Volume V: Precipitation Measurement Systems. USA.
69. Vannam A., 2000. Environmental Microbiology. Manson Publishing
70. Vázquez A., 2006. Manual de prácticas de laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Facultad de Ingeniería de la UNAM.
71. Velasco H., Segovia E., Hidalgo M., Ramíerz S., García H., Romero I., Maldonado A.M., Ángeles F., Retama A., Campos A., Montañó J. A. Wellens, 2002. "Lluvia ácida en los bosques del poniente del Valle de México". En: XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cancún, México, 27 al 31 de octubre.
72. 3PTechnik. Sistemas Pluvias S.A. de C.V., 3P México. [Fecha de consulta enero de 2011]. Disponible en:  
<http://www.3ptechnik.com.mx/mx/paginainicial.html>