



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

DISEÑO DE SISTEMAS DE CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA PARA EL MUNICIPIO DE CALPULALPAN, TLAXCALA

NURIA AIDE LÓPEZ HERNÁNDEZ

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

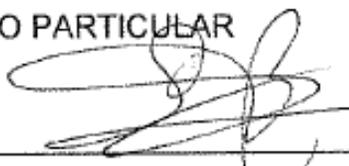
2016

La presente tesis titulada: “**Diseño de sistemas de captación del agua de lluvia para el municipio de Calpulalpan, Tlaxcala**” realizada por la alumna: **Nuria Aide López Hernández** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



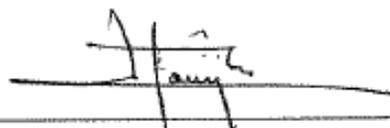
Dr. Óscar Luis Palacios Vélez

ASESOR



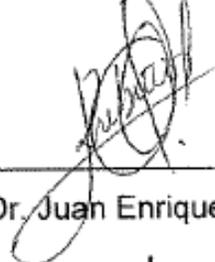
Dr. Manuel Anaya Garduño

ASESOR



Dr. Jesús-Chávez Morales

ASESOR



Dr. Juan Enrique Rubiños Panta

ASESOR



Dr. Mauricio Carrillo García

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Febrero de 2016

Diseño de sistemas de captación del agua de lluvia para el municipio de Calpulalpan, Tlaxcala

Nuria Aide López Hernández, M. C.
Colegio de Postgraduados, 2016

RESUMEN

Los sistemas de captación del agua de lluvia se proponen como una alternativa para reducir la explotación de los acuíferos. El objetivo de este trabajo fue diseñar tres sistemas, para destinar el agua a uso doméstico de un hogar de cuatro integrantes, a consumo humano en una institución educativa de mil personas y al riego de *Stevia rebaudiana* en un invernadero de media hectárea, respectivamente; y comparar, en costo, el agua de lluvia con la extraída del subsuelo. Los tres sistemas fueron propuestos para el municipio de Calpulalpan, Tlaxcala, y la investigación se realizó en el año 2015. El desarrollo del trabajo consistió en generar una metodología de diseño considerando la detección de cambio en la precipitación como posible consecuencia del cambio climático, la estimación de la precipitación a partir de una probabilidad del 75% de ocurrencia y el dimensionamiento del sistema de almacenamiento empleando el método de balance de masas. Adicionalmente se comparó el costo por metro cúbico del agua de lluvia captada contra el del agua subterránea. Los resultados sugieren que el aprovechamiento de agua lluvia puede llegar a ser económicamente más viable que la extracción del agua subterránea cuando la demanda de agua es baja, además de que representa una contribución al desarrollo sostenible del municipio.

Palabras clave: aprovechamiento de la precipitación, viabilidad económica, cambio climático, alternativas sustentables.

Designing of rainwater harvesting systems for Calpulalpan, Tlaxcala City

**Nuria Aide López Hernández, M. C.
Colegio de Postgraduados, 2016**

ABSTRACT

This work, as an alternative to decrease the exploitation of the groundwater, has the target of designing three rainwater harvesting systems, one for domestic use in a home with four members, another for human consumption in an educational institution with one thousand people, and the last one for irrigating *Stevia rebaudiana* in a half of a hectare Greenhouse; and compare the rainwater harvesting and the groundwater in cost. The three systems were proposed for Calpulalpan, Tlaxcala, and the research was made in 2015. The development of this work consisted in generating a design methodology taking into account the change in the rainwater as a possible consequence of the climate change, the estimate of the rainfall as from a 75% occurrence probability and the design of the storage system using the mass balance method. Also the cost per cubic meter of the rainwater harvesting was compare with the cost per cubic meter of the groundwater. The results show that the use of the rainwater is able to become economically viable, especially when the demand of water is low, besides it represents a contribution to the sustainable development for the town.

Key words: exploitation of the rainwater, economic viability, climate change, sustainable alternatives.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis:

A Dios por inspirar mi espíritu y fuerza.

A mi amada mamá Petra Hernández Rodríguez como muestra de mi profundo amor, admiración, gratitud y respeto y por ser mi más grande apoyo en esta vida y mi ejemplo a seguir. Gracias por ser la maestra que cada día que enseña a vivir de manera honesta y digna.

A mi adorado hermano Alfredo López Hernández por ser el ángel que mi vida siempre necesitará y ser mi más grande motivación para salir adelante.

A mi querido Omar Ángel Fuentes Franco por mostrarme con amor lo bella que es la vida e impulsarme cada día a ser mejor. Te quiero y admiro profundamente.

A mi papá Ubaldo López Quiroz, a mis tíos, mis tías, mis primos y primas y a todos mis familiares por ser parte de mi vida.

A todos mis viejos amigos por los agradables momentos compartidos durante tanto tiempo y a los nuevos que conocí durante mis estudios de maestría y que de una manera u otra alegraron mi corazón.

A los miembros de mi consejo particular y todos los grandes maestros de quienes tuve la fortuna de aprender.

Cariñosa y respetuosamente,

Nuria Aide López Hernández

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi profunda gratitud al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por haber financiado mis estudios de maestría.

Al colegio de Postgraduados con acento especial al Postgrado en Hidrociencias por su excelencia académica y por haberme brindado la oportunidad de continuar mi preparación durante estos dos provechosos años.

Al Dr. Óscar Luis Palacios Vélez por su excelencia como profesor y consejero, por todas sus enseñanzas y disposición en las asesorías otorgadas durante la realización de esta investigación.

Al Dr. Manuel Anaya Garduño por sus valiosas enseñanzas y por guiarme en la realización de este trabajo con su gran experiencia profesional.

Al Dr. Jesús Chávez Morales por el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo y sus atinadas observaciones y sugerencias que lo mejoraron en gran medida.

Al Dr. J. Enrique Rubiños Panta por su tiempo dedicado a revisar este trabajo.

Al Dr. Mauricio Carrillo García por el tiempo que dedicó a la revisión del presente trabajo y sus acertadas observaciones.

A todos quienes contribuyeron de alguna manera en mi formación académica durante esta maravillosa etapa de mi vida.

CONTENIDO

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	4
2.1 HIPÓTESIS.....	4
2.2 OBJETIVO GENERAL	4
2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
3. JUSTIFICACIÓN	5
4. REVISIÓN DE LITERATURA	6
4.1 ASPECTOS DEMOGRÁFICOS Y SITUACIÓN DEL AGUA EN EL MUNDO	6
4.1.1 Aspectos demográficos en el mundo	7
4.1.2 Recurso hídrico en el mundo	7
4.1.3 Situación de los acuíferos en el mundo	9
4.1.4 Consumo de agua a escala mundial	12
4.2 ASPECTOS DEMOGRÁFICOS Y SITUACIÓN DEL AGUA EN MÉXICO	14
4.2.1 Aspectos demográficos en México	14
4.2.2 Recurso hídrico en México	15
4.2.3 Situación de los acuíferos en México.....	18
4.2.4 Consumo de agua en México	21
4.3 DEMOGRAFÍA Y AGUA EN EL ESTADO DE TLAXCALA.....	24
4.3.1 Generalidades del estado de Tlaxcala	24
4.3.2 Aspectos demográficos en Tlaxcala.....	25
4.3.3 Recurso hídrico en Tlaxcala	26
4.3.4 Situación de los acuíferos en Tlaxcala.....	29
4.3.5 Consumo de agua en Tlaxcala	30
4.4 DEMOGRAFÍA Y AGUA EN CALPULALPAN, TLAXCALA	32
4.4.1 Generalidades del municipio de Calpulalpan, Tlaxcala	32
4.4.2 Aspectos demográficos del municipio de Calpulalpan, Tlaxcala	33

4.4.3	Recurso hídrico en el municipio de Calpulalpan, Tlaxcala	34
4.4.4	Situación del agua en el acuífero Soltepec (2902)	36
4.4.5	Consumo de agua en Calpulalpan, Tlaxcala.....	37
4.5	CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA	38
4.6	SITUACIÓN ACTUAL DE LA CAPTACIÓN DE LLUVIA EN MÉXICO.....	38
4.7	CALIDAD DEL AGUA	39
5.	MATERIALES y MÉTODOS	41
5.1	UBICACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO	41
5.1.1	Macrolocalización	41
5.1.2	Microlocalización	42
5.2	MATERIALES	44
5.3	METODOLOGÍA GENERAL	44
5.3.1	Análisis de precipitación.	47
5.3.1.1	Ubicación de las estaciones climatológicas.	47
5.3.1.2	Estimación de los datos de precipitación faltantes.....	48
5.3.1.3	Determinación del error estadístico.	50
5.3.1.4	Estimación de la precipitación promedio anual en el área de estudio. 52	
5.3.1.5	Estimación de la probabilidad de lluvia anual	53
5.3.1.6	Período de retorno.....	62
5.3.1.7	Estimación de la intensidad de precipitación	63
5.3.1.8	Determinación de efecto de cambio climático	63
5.3.2	Estimación de la precipitación pluvial neta de diseño	70
5.3.2.1	Metodología CIDECALLI-CP	70
5.3.2.2	Metodología UNATSABAR	72
5.3.2.3	Metodología propuesta.	73
5.3.3	Estimación de la demanda de agua anual	74
5.3.3.1	Demanda de agua anual para consumo humano y uso doméstico	75
5.3.3.2	Cálculo de consumo de agua en un invernadero	76

5.3.4	Determinación del área de captación.....	83
5.3.5	Diseño del sistema de conducción.....	84
5.3.5.1	Diseño de las canaletas.....	84
5.3.5.2	Diseño de las tuberías de bajada	86
5.3.6	Diseño del sistema de almacenamiento (cisterna)	86
5.3.7	Diseño del sistema de purificación.....	87
5.3.9	Costo del agua subterránea y del agua de lluvia	88
5.3.9.1	Costo por metro cúbico del agua subterránea	89
5.3.9.2	Costo por metro cúbico del agua de lluvia captada.....	94
6.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	95
6.1	ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN	95
6.1.1	Estimación de los datos faltantes.....	95
6.1.2	Determinación del error estadístico.....	97
6.1.3	Estimación de la precipitación promedio sobre el área de estudio.	98
6.1.4	Estimación de la probabilidad de lluvia anual.....	98
6.1.5	Período de retorno.....	100
6.1.6	Estimación de la intensidad de precipitación en un período de retorno... ..	100
6.1.7	Determinación de efecto de cambio climático	101
6.3	ESTIMACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL NETA DE DISEÑO.....	103
6.4	ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA.....	106
6.5	DETERMINACIÓN DEL ÁREA DE CAPTACIÓN	109
6.6	DISEÑO DEL SISTEMA DE CONDUCCIÓN	110
6.6.1	Diseño de las canaletas.....	110
6.6.2	Diseño de las tuberías de bajada.....	112
6.7	DISEÑO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO (CISTERNA)	113
6.8	DISEÑO DEL SISTEMA DE PURIFICACIÓN	117
6.9	COSTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y DEL AGUA DE LLUVIA	119
6.9.1	Costo por metro cúbico del agua subterránea	119
6.9.2	Costo por metro cúbico del agua de lluvia captada.....	126

7. CONCLUSIONES	127
8. RECOMENDACIONES	128
9. LITERATURA CITADA	129
10. ANEXOS	137
ANEXO 1. Estimación de datos diarios faltantes.....	137
ANEXO 2. Estimación de datos mensuales faltantes.	141
ANEXO 3. Ajuste de la precipitación a las funciones de distribución.....	142
ANEXO 4. Pruebas de bondad de ajuste.	144
ANEXO 5. precipitaciones máximas estación 29035 Calpulalpan.....	146
ANEXO 6. Costos por metro cúbico del agua de lluvia	147

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 4.1. Distribución del agua renovable per cápita a nivel mundial	9
Figura 4.2. Demanda de agua a nivel mundial, 2000-2050.	13
Figura 4.3. Agua renovable per cápita en México, 1950 al 2030	17
Figura 4.4. Agua subterránea concesionada para usos consuntivos, 2001-2013 ...	19
Figura 4.5. Distribución del agua subterránea por usos, 2014 (hm ³).	19
Figura 4.6. Agua concesionada para usos consuntivos, 2005-2014.	23
Figura 4.7. Población total y tasa de crecimiento promedio anual 1895-2010.	26
Figura 4.8. Recurso Hídrico en Tlaxcala.	28
Figura 4.9. Agua subterránea concesionada en Tlaxcala, 2005-2015.	30
Figura 4.10. Variación del agua concesionada en Tlaxcala, 2005-2014.	31
Figura 4.11. Precipitación pluvial media mensual, Estación Calpulalpan.	35
Figura 4.12. Disponibilidad de servicios en viviendas.	38
Figura 5.1. Macro localización del sitio de estudio.	42
Figura 5.2. Micro localización del sitio de estudio.	43
Figura 5.3. Diagrama de flujo de la metodología.	46
Figura 6.1. Isoyetas de intensidad de precipitación del Estado de Tlaxcala	100
Figura 6.2. Medias decenales de la precipitación estación 29035 Calpulalpan. ...	101
Figura 6.3. Precipitación Máxima Diaria de la estación 29035 Calpulalpan.	102

ÍNDICE DE CUADROS

Página

Cuadro 4.1.	Países con mayor extracción de agua subterránea (2010).	10
Cuadro 4.2.	Agua renovable por Región Hidrológico-Administrativa, 2013 y 2030.	18
Cuadro 4.3.	Acuíferos por Región Hidrológico-Administrativa al año 2013.	20
Cuadro 4.4.	Variación de los acuíferos sobreexplotados.	21
Cuadro 4.5.	Estudios de disponibilidad del acuífero Soltepec	37
Cuadro 4.6.	Límites permisibles de la NOM-127-SSA1-1994.	40
Cuadro 5.1.	Estaciones climatológicas en Calpulalpan, Tlaxcala.	48
Cuadro 5.2.	Parámetros de la distribución Gumbel.	59
Cuadro 5.3.	Valores Críticos para D en la Prueba de Kolmogorov–Smirnov	61
Cuadro 5.4.	Resultados de un ANOVA.	69
Cuadro 5.5.	Coeficiente de escurrimiento según tipo de superficie (CIDECALLI).	71
Cuadro 5.6.	Coeficiente de escorrentía (UNATSABAR).	72
Cuadro 5.7.	Tarifas eléctricas para agua potable y riego.	94
Cuadro 6.1.	Datos de las estaciones climatológicas para estimar datos faltantes.	96
Cuadro 6.2.	Estadísticos de precipitación de la estación 29035 Calpulalpan.	96
Cuadro 6.3.	Variación del error según años de registro.	97
Cuadro 6.4.	Resultados de las pruebas de bondad de ajuste.	99
Cuadro 6.5.	Precipitación mensual en Calpulalpan, Tlaxcala con $P_{75\%}$.	99
Cuadro 6.6.	Resultados del Análisis de Varianza.	103
Cuadro 6.7.	Resultados de precipitación pluvial neta de diseño.	104
Cuadro 6.8.	Precipitación media de diseño.	105
Cuadro 6.9.	Demanda de agua por uso.	106
Cuadro 6.10.	Resultados de evapotranspiración de referencia.	108
Cuadro 6.11.	Evapotranspiración de cultivo y requerimiento de riego.	109
Cuadro 6.12.	Área efectiva de captación para diferentes usos.	110
Cuadro 6.13.	Gastos que deberá conducir la canaleta, en litros por segundo.	111
Cuadro 6.14.	Dimensiones de las canaletas.	112
Cuadro 6.15.	Diseño de las tuberías de bajada.	113

Cuadro 6.16. Balance de masas para todo el año.....	114
Cuadro 6.17. Metodología CIDECALLI para todo el año.	114
Cuadro 6.18. Balance de masas para época de lluvias.....	115
Cuadro 6.19. Metodología CIDECALLI para época de lluvias.	115
Cuadro 6.20. Volumen de la cisterna según época y uso del agua.	115
Cuadro 6.21. Resultados del análisis de agua de lluvia y pozo.	118
Cuadro 6.22. Datos del pozo que abastece de agua al sitio de estudio.	119
Cuadro 6.23. Consumo mensual de energía eléctrica del pozo Depósitos.	120
Cuadro 6.24. Cálculo de costos totales.	121
Cuadro 6.25. Costo por metro cúbico de agua subterránea.	123
Cuadro 6.26. Datos del pozo para estimar consumo de energía eléctrica.	124
Cuadro 6.27. Costos variables para extracción de agua subterránea para riego....	125
Cuadro 6.28. Costos totales de extracción para riego.	125
Cuadro 6.29. Costo por metro cúbico del agua captada.....	126

1. INTRODUCCIÓN

Aunque en algunas regiones del mundo el agua abunda, en general se torna cada vez más escasa, tanto en un aspecto cuantitativo como en calidad necesaria para ser potable (Quispe, 2008), reportándose el dato de que alrededor de 1,100 millones de personas en el mundo carecen de acceso a fuentes mejoradas de agua. (Organización Mundial de la Salud, 2015).

La escasez del agua, se debe a varios factores, pero está ligada principalmente al incremento de su consumo, mismo que se debe al aumento de la población y al nivel de desarrollo de las sociedades (Hieronimi, 2002).

La principal fuente aprovechable para el consumo humano de agua dulce es el agua subterránea (Neri, 2009). Hieronimi (2002) señala que en el siglo XXI, mientras que la población mundial se triplicó, la extracción del agua aumentó más de seis veces. Concretamente, desde 1940, la extracción mundial de agua ha aumentado en promedio entre 2.5% y 3.0% por año, en comparación con un crecimiento anual de la población de 1.5% a 2.0%. Este problema ha traído consigo la explotación desmedida de muchos acuíferos, llegando en muchos casos a su sobreexplotación.

En México, se prevé que la disponibilidad del agua para el año 2025 se reducirá a la mitad de la que se consume actualmente, debido a que el rango de disponibilidad (Herrera, 2010) va de los 3,982 m³/hab/año en el 2013 hacia abajo, debido al crecimiento de la población, siendo de 3,896 m³/hab/año en el 2015 (Comisión Nacional del Agua-SINA, 2015).

Uno de los principales problemas del país es la carencia y desigual distribución del agua. Dos terceras partes del territorio se consideran áridas o semiáridas (Comisión Nacional del Agua, 2013). En la región centro, la demanda del agua se complica con la alta concentración demográfica y actividades económicas donde la presión para

disponer del líquido ha provocado problemas de sobreexplotación de cuencas y acuíferos (Jiménez, *et al.*, 2008).

La situación actual del recurso hídrico en el estado de Tlaxcala es crítica debido a que la demanda de agua está aumentando como resultado del crecimiento de la población y del desarrollo económico, del abatimiento del manto acuífero por sobreexplotación y de la contaminación del agua por uso urbano e industrial. El estado de Tlaxcala ocupa el cuarto lugar en contaminación de las aguas en México, todos los ríos de la entidad son considerados zonas críticas y los afluentes resultan auténticos depósitos de aguas negras (Magaña, 2006).

Un estudio realizado en el estado de Tlaxcala, por investigadores de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en convenio con la senadora Lorena Cuéllar Cisneros, muestra que las principales purificadoras de agua del estado incumplen con la presencia de metales pesados y otros elementos, como Calcio, Sodio, Magnesio y Fierro, que sobrepasan la norma oficial mexicana NOM 127-SSA1-1994 de microgramos (μg) por cada litro, poniendo en riesgo a la población para que se presenten padecimientos de diversa índole (Xico, 2014).

Con el incremento poblacional, la escasez del agua superficial y la sobreexplotación del agua subterránea ha sido necesario buscar alternativas para el suministro de agua potable, como lo son los sistemas de captación del agua de lluvia (SCALL), que permiten captar, almacenar, purificar y envasar agua de lluvia para consumo humano.

Lo anterior indica la urgente necesidad de considerar al agua de lluvia como una solución para hacer frente al abastecimiento de agua a nivel de familia y de comunidad (Anaya, 2011).



En el presente trabajo se diseñaron tres sistemas de captación y aprovechamiento pluvial, uno para destinar el agua a uso potable en un hogar de cuatro integrantes, otro para destinar el agua a consumo humano en una escuela de 1000 usuarios y un tercer sistema para destinar el agua al riego de un invernadero de estevia de media hectárea. Todos los sistemas fueron diseñados para ubicarse en el municipio de Calpulalpan, Tlaxcala, sin embargo la metodología puede aplicarse a cualquier sitio donde exista el interés de colocar un sistema de captación del agua de lluvia.

Los sistemas propuestos se recomiendan como proyectos pilotos en la zona de estudio para su replicación en otras regiones, con el objetivo de fomentar una cultura ambiental y como uno de los primeros pasos para encaminar a un uso racional y sustentable del agua, que permita prevenir una carencia irremediable de dicho recurso.

2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

2.1 HIPÓTESIS

La captación del agua de lluvia para destinarla a consumo humano, uso doméstico y riego, a largo plazo, resulta económicamente viable, lo que propicia un uso sostenible del recurso y una cultura de educación ambiental.

2.2 OBJETIVO GENERAL

Diseñar sistemas de captación de agua de lluvia económicamente viables para consumo humano, uso doméstico y para riego en agricultura en un invernadero.

2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener el costo de la extracción del agua subterránea para destinarla a consumo humano en una escuela, uso doméstico en un hogar y para riego en un invernadero.
- Comparar el costo de extraer el agua subterránea con el costo de captar el agua de lluvia.
- Comparar la calidad del agua de pozo con la del agua de lluvia captada con base en algunos parámetros de la NOM 127-SSA1-1994 que establece los límites permisibles del agua para uso y consumo humano.



3. JUSTIFICACIÓN

No debe esperarse a que se tenga un problema irreversible para buscar soluciones. Existe la necesidad de hacer un uso racional y sustentable del agua y la única forma de hacerlo es conociendo dicho recurso. Por eso mediante este trabajo se presenta la situación histórica y actual del agua a nivel mundial, nacional, estatal y local y se propone la captación del agua de lluvia como una alternativa para reducir la explotación del Acuífero Soltepec, en el municipio de Calpulalpan, Tlaxcala, México.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

En este capítulo se presenta la revisión de literatura mediante la cual se da a conocer la situación histórica y actual del recurso agua, iniciando por el panorama a nivel mundial y concluyéndose con una revisión de la situación hídrica a nivel regional.

La revisión de literatura da a conocer la problemática hídrica a la que nos enfrentamos mundial y regionalmente, y que está muy ligada al aumento de la población al irse reduciendo la disponibilidad de agua per cápita.

Aunado al incremento poblacional y a la necesidad de agua dulce se ha incrementado el problema de sobreexplotación de los acuíferos, de los que se hace una revisión para conocer su situación y proponer la captación del agua de lluvia como una fuente alternativa de agua dulce.

Finalmente los sistemas de captación del agua de lluvia se proponen como una alternativa para hacer frente a los problemas hídricos y se presenta en este capítulo la situación de los mismos.

4.1 ASPECTOS DEMOGRÁFICOS Y SITUACIÓN DEL AGUA EN EL MUNDO

Uno de los principales factores de la creciente escasez del agua es el aumento de la población, en el presente tema se da a conocer el aumento demográfico mundial y posteriormente su relación con la disminución del agua renovable per cápita. Se expone la situación de la explotación de agua de los acuíferos a nivel mundial y el consumo del agua, tanto subterránea como superficial.

4.1.1 Aspectos demográficos en el mundo

En 1950, la población mundial ascendía a 2,529 millones de personas (Comisión Nacional del Agua, 2011a), mientras que para 2010, había aumentado a 6,916 millones (FAO, 2015a). Con datos del año 2010, China es el país más poblado con 1,354.1 millones de habitantes y una densidad de población de 141 habitantes/km², mientras que México se encuentra en undécimo lugar (Comisión Nacional del Agua, 2011a).

A partir de los últimos sesenta años, el crecimiento se concentró principalmente en las regiones en desarrollo, tendencia que se mantiene al 2050. De acuerdo a las proyecciones para el año 2015 coexistimos en el mundo 7,324.786 millones de personas y se estima que para los años 2025 y 2050 la población mundial será de 8,083 y 9,551 millones personas, respectivamente (FAO, 2015a).

4.1.2 Recurso hídrico en el mundo

De acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y la Asociación Mundial del Agua (FAO-GWP, 2013), en relación a la existencia y uso de los recursos hídricos las tres categorías más importantes de fuentes de agua son:

- Las pluviales que provienen de las precipitaciones o aguas de lluvias.
- Superficiales que fluyen sobre la capa superior de la tierra, de forma permanente o intermitente y que conforman los ríos, lagos, lagunas y humedales.
- Subterráneas, referidas al agua que se filtra y satura el suelo o las rocas, se almacena y, a su vez, abastece a cuerpos de agua superficiales, así como a los manantiales y acuíferos.

En la actualidad existe una creciente escasez de agua, ocasionada por el crecimiento demográfico, la urbanización, el desarrollo industrial, las necesidades agrícolas y la explotación de este recurso en exceso (Ramírez, 2008).

La disponibilidad del agua promedio anual en el mundo es de aproximadamente 1,386 millones de km^3 , de los cuales el 97.5% es agua salada y sólo el 2.5%, es decir, 35 millones de km^3 , es agua dulce. De esa cantidad casi el 70% no está disponible para consumo humano debido a que se encuentra en forma de glaciares, nieve o hielo. Del 30% restante, disponible para consumo humano, 10.5 millones de kilómetros cúbicos se encuentran en el agua subterránea, y solamente 135 mil kilómetros cúbicos se encuentran en lagos, ríos, humedad en suelo y aire, humedales, plantas y animales (Comisión Nacional del Agua, 2011a).

El volumen del agua renovable per cápita de un país resulta de la operación de dividir ese recurso renovable entre el número de habitantes (Comisión Nacional del Agua, 2014a). Según este criterio, en 1960 a cada ciudadano del mundo le correspondían 11,300 metros cúbicos por año. En 1992 la disponibilidad era de 7,400 $\text{m}^3/\text{habitante/año}$, considerando que la dotación renovable de agua en el mundo se estimaba en 40,000 $\text{km}^3/\text{año}$ (Postel, 1992, citado en Cámara de Diputados, 2015). Para el año 2000 la disponibilidad fue de 6,600 $\text{m}^3/\text{habitante/año}$, para el 2010 se redujo a 5 mil $\text{m}^3/\text{habitante/año}$ y para el año 2025 se proyecta que disminuirá a 4,800 $\text{m}^3/\text{habitantes/año}$ (Cosgrove y Rijsberman, 2000).

En la Figura 4.1 se presenta una distribución, en metros cúbicos, del agua renovable per cápita a nivel mundial en el año 2013.

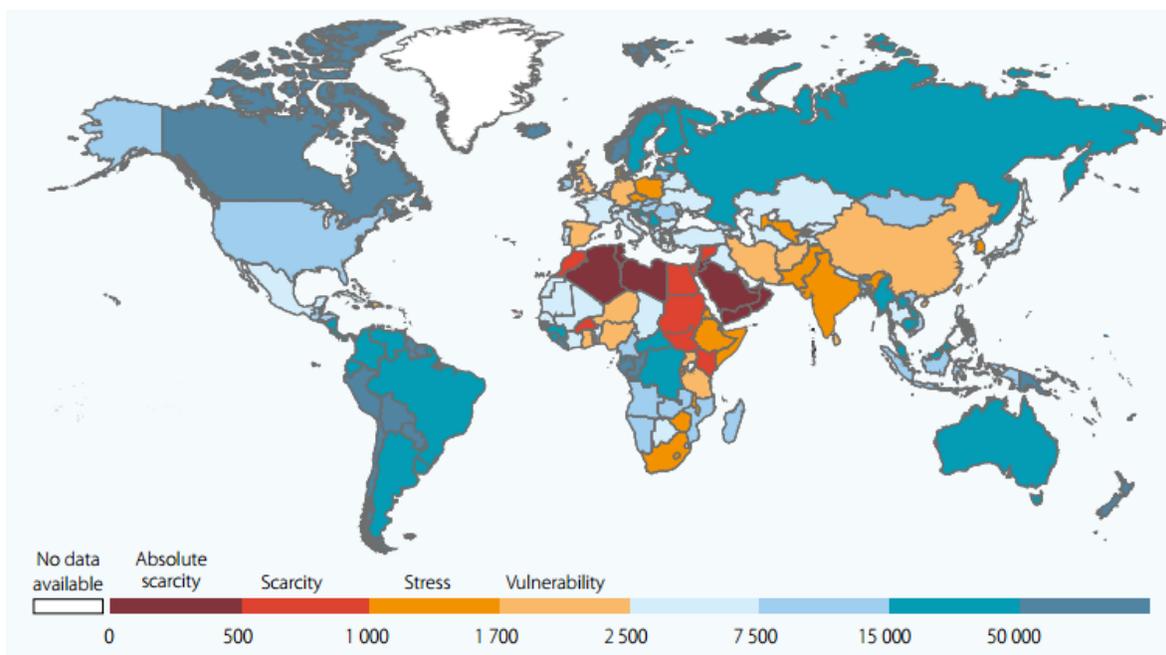


Figura 4.1. Distribución del agua renovable per cápita a nivel mundial, en $\text{m}^3/\text{hab}/\text{año}$, al 2013. Fuente: UNESCO (2015a).

4.1.3 Situación de los acuíferos en el mundo

El Proyecto Internacional para la Gestión de los Recursos Compartidos de Aguas Subterráneas (ISARM) del Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) y la Comisión de Derecho Internacional de las Naciones Unidas, ha inventariado hasta el año 2015, 273 acuíferos transfronterizos: 68 en el continente americano, 38 en África, 65 en Europa Oriental, 90 en Europa Occidental, y 12 en Asia (UNESCO, 2015a). Además hay que contar dos grandes acuíferos en Oceanía.

El agua subterránea representa cerca del 90% del total de agua dulce disponible de la Tierra (UNEP, 2008 citado en OECD, 2012); y aunque la cantidad total de agua subterránea es difícil de contabilizar, una estimación sugiere que, en el mundo hay alrededor de 10.5 millones de km^3 (Shiklomanov y Rodda, 2003 citado en OECD, 2012).

Existe una clara evidencia de que las reservas de agua subterránea están disminuyendo, el volumen extraído de los acuíferos es superior al volumen natural de recarga, de manera que las capas freáticas están menguando. La extracción de agua se ha triplicado en los últimos 50 años. (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2011), dato que es más fácil de entender si se considera que entre 1960 y el año 2000 la extracción de agua a nivel mundial paso de 312 a 734 kilómetros cúbicos, y que en 2010 dicha extracción se estimó en 1,000 km³/año (Wada et al., 2010).

Los diez países que más agua subterránea extraen, con datos hasta el año 2010, se muestran en el Cuadro 4.1.

Cuadro 4.1. Países con mayor extracción de agua subterránea (2010).

País	Extracción (km³/año)
India	251
China	112
USA	112
Pakistán	65
Irán	63
Bangladesh	30
México	29
Arabia Saudita	24
Indonesia	15
Turquía	13

Fuente: National Groundwater Association, 2015.

Se considera que las reservas de agua subterránea del mundo se han mermado más del doble entre los años 1960 y 2000, de 130 a 280 km³ de agua por año (Wada et al., 2010, citado en OECD, 2012).

Se estima que un 20 % de los acuíferos del mundo están sobreexplotados, algunos de forma crítica. El deterioro mundial de los humedales está reduciendo la capacidad de los ecosistemas de purificar el agua (UNESCO, 2014).

La Organización de las Naciones Unidas (2015) en la nota informativa Agua y Desarrollo Sostenible que emitió como resultado de la Conferencia Anual 2015 de ONU-Agua en Zaragoza, menciona que cerca de 1,700 millones de personas viven en cuencas hidrográficas donde el uso excede la recarga de agua con consecuencias negativas sobre los recursos subterráneos y los ecosistemas, lo que representa un gran problema si se considera que cerca de 2,000 millones de personas dependen del agua subterránea para cubrir sus necesidades básicas.

Globalmente, se destina 65% de los recursos hídricos subterráneos a la irrigación (lo que según la UNESCO, 2015 representa el 43% del total de agua empleada en irrigación), un 25% al suministro de agua potable (lo que según la UNESCO, 2015 representa el 50% del total de agua empleada para uso potable) y un 10% a la industria en general (UNESCO, 2015b).

Así mismo se estima que un 10% de la producción de granos en el mundo depende de la extracción insostenible de los acuíferos (FAO-GWP, 2013).

De continuar las tendencias actuales, dos tercios de la población mundial en 2025 vivirá en países con escasez de agua (Organización de las Naciones Unidas, 2015).

4.1.4 Consumo de agua a escala mundial

A nivel mundial, en el año 2015, se estima que de los 7,325 millones de habitantes en el mundo (FAO, 2015), unos 1,100 millones de personas siguen sin acceso a una fuente mejorada de suministro de agua (Organización Mundial de la Salud, 2015). Aunque algunas estimaciones cifran el número de personas cuyo derecho al agua no está cubierto en 3.5 mil millones, y 2.5 mil millones permanecen sin acceso a saneamiento mejorado (UNESCO, 2014).

De acuerdo a la Asociación Mundial para el Agua y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO-GWP, 2013) el vertiginoso crecimiento en el consumo de agua a escala mundial se ha debido a tres causas principales:

- a) El crecimiento de la población, se estima que hacia el año 2025, existirán 2,500 millones de personas más que hoy en día a los que se habrá que abastecer y alimentar.
- b) La expansión de la agricultura de regadío, que ha pasado de unos 50 millones de hectáreas regadas a principios del siglo pasado, a más de 250 millones de hectáreas hoy en día.
- c) El alto desarrollo industrial.

A nivel mundial, en promedio cada persona utiliza 1,240 m³ de agua al año; sin embargo, hay marcadas diferencias entre países. Mientras, los estadounidenses utilizan 1,280 m³ de agua al año por persona, los europeos usan 694 m³, los asiáticos 535 m³, los sudamericanos 311 m³ y los africanos 186 m³ per cápita/año (Dirección General de Análisis Legislativo, 2015).

De acuerdo a la OEDC (2012) se prevé que la demanda mundial de agua del año 2000 al año 2050 se incrementará en un 55% principalmente debido a la creciente

demanda de la producción (400 %), generación de energía térmica (140 %) y consumo doméstico (130 %). En la Figura 4.2 se muestra la demanda de agua a nivel mundial en el 2000 y la demanda que se estima tener en el 2050.

Como resultado, la disponibilidad de agua dulce estará bajo mayor presión durante este período, y las previsiones apuntan a que más de un 40 % de la población mundial vivirá en zonas con severos problemas hídricos para el 2050 (UNESCO, 2014).

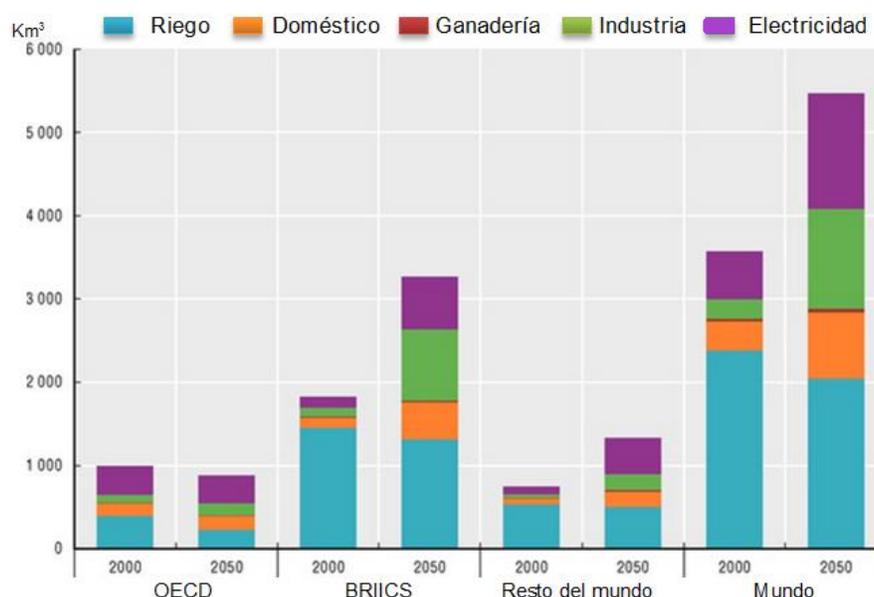


Figura 4.2. Demanda de agua a nivel mundial, 2000-2050. Fuente: OECD (2012).

El primer paso para incrementar el acceso a agua potable, es reconocer que todos los individuos tienen el mismo derecho al agua, independientemente de su capacidad de pago. El derecho al agua está legalizado en 15 países de América Latina, 13 de África Subsahariana, cuatro de Asia Meridional, dos de Asia Oriental y el Pacífico y dos Estados Árabes.

En julio de 2010, la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció el derecho a agua y saneamiento. Además, determinó que el acceso a agua potable y a

saneamiento mejorado forma parte integral de la materialización de todos los derechos humanos. En todos los países, mejorar estos servicios puede ser una fuerza motriz esencial en la lucha contra la pobreza (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2011).

4.2 ASPECTOS DEMOGRÁFICOS Y SITUACIÓN DEL AGUA EN MÉXICO

En el siguiente tema se presentan la evolución demográfica de México misma que se liga a la disminución de la disponibilidad de agua per cápita, por lo que también se presenta la situación histórica y actual del recurso hídrico en México.

Considerando que los sistemas de captación del agua de lluvia se proponen como una fuente de agua dulce alterna al agua subterránea se presenta un apartado con la situación de los acuíferos en México.

También se expone el consumo que se tiene en México tanto del agua subterránea como del agua superficial.

4.2.1 Aspectos demográficos en México

Con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2015) en 1950 había alrededor de 25.791 millones de habitantes en la República Mexicana. En un listado de los países más poblados del mundo del 2010, México se situó en el undécimo lugar con un total de 112,336,538 habitantes (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010).

De acuerdo con los reportes del Consejo Nacional de Población (2015) se calcula que en el año 2015 en México hay 121 millones de personas, de las cuales 59 millones son hombres y 62 millones son mujeres, y además se estima que para los

años 2025 y 2050 habrá aproximadamente 132.6 y 150.8 millones de habitantes en México, respectivamente.

4.2.2 Recurso hídrico en México

Dos terceras partes del territorio se consideran áridas o semiáridas, con precipitaciones anuales menores a los 500 mm, mientras que el sureste es húmedo con precipitaciones promedio que superan los 2,000 mm por año. En la mayor parte del territorio la lluvia es más intensa en verano, principalmente de tipo torrencial (Comisión Nacional del Agua, 2013).

En términos generales de cada 100 litros de lluvia en México, se calcula que 72 regresan a la atmósfera como evapotranspiración, 22 escurren por ríos y arroyos y 6 se infiltran en los acuíferos, además se estima que de cada 100 litros de agua superficial en México, 12.7 provienen de los países vecinos: Estados Unidos, Guatemala y Belice (CONAGUA-SEMARNAT, 2014).

De acuerdo con datos de la FAO (2015) en México el volumen promedio de agua que se obtiene por precipitación cada año es de 1,489 kilómetros cúbicos; no obstante, la mayor parte, alrededor de 1,080 kilómetros cúbicos regresa a la atmósfera por evapotranspiración, por lo que se conoce como “agua verde”. Además del agua que ingresa por precipitación, México recibe alrededor de 53.32 kilómetros cúbicos por importaciones de los ríos de las fronteras norte y sur y exporta 0.432 kilómetros cúbicos del río Bravo a los Estados Unidos de acuerdo con el Tratado sobre Distribución de Aguas Internacionales firmado en 1944.

Considerando los datos anteriores el balance general muestra que la disponibilidad natural media de México, es decir el total de agua dulce renovable, se estima en 461.9 km³/año (FAO, 2015), que incluye 59 kilómetros cúbicos de recarga media de acuíferos y un escurrimiento medio superficial total de 402.9 kilómetros cúbicos.

Para fines administrativos y preservación de las aguas nacionales, a partir de 1997 el país se ha dividido en trece Regiones Hidrológico-Administrativas (RHA), las cuales están formadas por agrupaciones de cuencas, consideradas las unidades básicas de gestión de los recursos hídricos, pero sus límites respetan los municipios para facilitar la integración de la información socioeconómica. La CONAGUA, es el órgano administrativo, normativo, técnico y consultivo encargado de la gestión del agua en México. (Comisión Nacional del Agua, 2013)

Por los 50 principales ríos de México fluye el 87% del escurrimiento superficial y sus cuencas cubren el 65% del territorio nacional. Destacan por su longitud los ríos Grijalva-Usumacinta con 1,521 kilómetros y Nazas-Aguanaval con 1,081; por el tamaño de la cuenca el río Bravo con 225,242 kilómetros cuadrados y Balsas con 117,406. En el río Grijalva-Usumacinta fluye la mayor cantidad de agua al año, equivalente al 26% del escurrimiento en México.

En México existen 4,462 presas y bordos, de las cuales 172 grandes presas representan el 80% del almacenamiento total del país, que es de aproximadamente 150 kilómetros cúbicos. La capacidad de almacenamiento de las tres presas más grandes de México, La Angostura, Malpaso e Infiernillo, representan casi la 4ª parte del almacenamiento total del país (CONAGUA-SEMARNAT, 2014).

El agua renovable media per cápita al año 2015 en México se valora en 3,896 m³/hab/año (Comisión Nacional del Agua, 2014), lo que coloca a México en el ámbito mundial como uno de los países con baja disponibilidad de agua. En la Figura 4.3 se presenta la variación, de 1950 a 2015 y las proyecciones de los años 2020, 2025 y 2030.

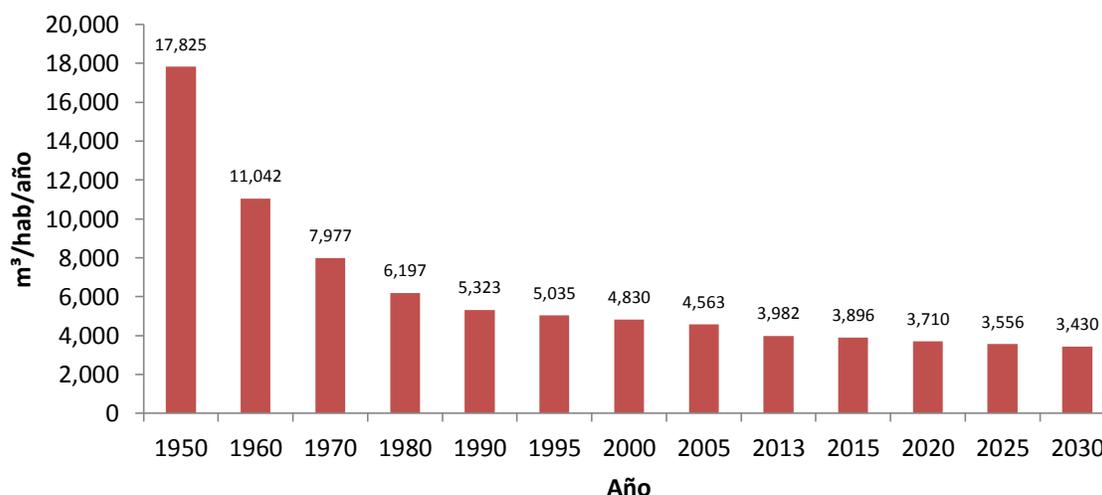


Figura 4.3. Agua renovable per cápita en México, 1950 al 2030.

Fuente: Elaboración propia a partir de Comisión Nacional del Agua (2014a) y Comisión Nacional del Agua (2015).

En algunas regiones hidrológico-administrativas del país, el agua renovable per cápita alcanzará en 2030 niveles cercanos o incluso inferiores a los 1,000 metros cúbicos por habitante por año, lo que se califica como una condición de escasez grave (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2014), dado que una disponibilidad inferior a los 1,700 metros cúbicos por habitante por año se considera como una situación de estrés hídrico (Indicador de Falkenmark; UNDP et al., 2000, citado en SEMARNAT, 2012).

En el Cuadro 4.2, se presenta el agua renovable per cápita por región hidrológico-administrativa del año 2013 al 2030.

Cuadro 4.2. Agua renovable por Región Hidrológico-Administrativa, 2013 y 2030.

	Región Hidrológico-Administrativa	Escorrentamiento natural medio superficial total (mill. m ³ /año)	Agua renovable total (mill. m ³ /año)	Población (mill. de habitantes)	Agua renovable per capita 2013 (m ³ /hab/año)	Agua renovable per cápita al 2030 (m ³ /año)
I	Península de Baja California	3,341	4,999	4.29	1,165	907
II	Noroeste	5,073	8,325	2.76	3,011	2480
III	Pacífico Norte	22,650	25,939	4.42	5,863	5,129
IV	Balsas	17,057	22,899	11.56	1,980	1720
V	Pacífico Sur	30,800	32,351	4.99	6,488	5991
VI	Río Bravo	6,857	12,757	12.00	1,063	888
VII	Cuencas Centrales del Norte	5,745	8,065	4.47	1,806	1574
VIII	Lerma Santiago Pacífico	26,005	35,754	23.60	1,515	1291
IX	Golfo Norte	24,146	28,115	5.19	5,421	4715
X	Golfo Centro	90,419	95,124	10.40	9,149	8195
XI	Frontera Sur	141,128	163,845	7.48	21,906	18526
XII	Península de Yucatán	4,541	29,856	4.43	6,740	5117
XIII	Aguas del Valle de México	1,112	3,468	22.82	152	137
	Total Nacional	378,873	471,498	118.40	3,982	3439

Fuente: Sistema Nacional de Información del agua, 2015.

4.2.3 Situación de los acuíferos en México

Para fines de la administración del agua subterránea, el país se ha dividido en 653 acuíferos, cuyos nombres oficiales fueron publicados en el DOF el 5 de diciembre de 2001 (Sistema Nacional de Información del Agua, 2015).

La importancia del agua subterránea se manifiesta en la magnitud del volumen utilizado por los principales usuarios. Aunque a lo largo de los años, la concesión de este recurso ha variado. Del año 2001 al 2011 era claro el incremento en la concesión, pero a partir del 2012 se ha ido disminuyendo, a pesar de que la

necesidad del recurso se vaya incrementando como resultado del crecimiento poblacional. En la Figura 4.4 se muestra la variación que ha sufrido la concesión del agua subterránea a lo largo de los años.

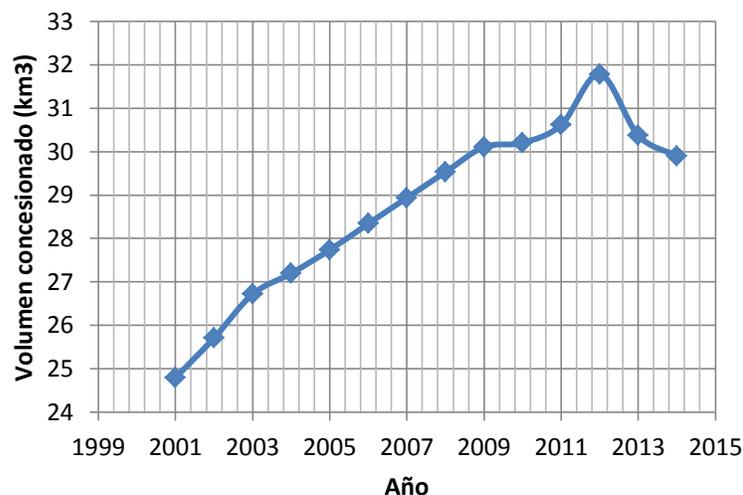


Figura 4.4. Agua subterránea concesionada para usos consuntivos, 2001-2013.
Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos del SINA, 2015.

Actualmente de estos 653 acuíferos se extrae aproximadamente el 60% del volumen total concesionado para usos consuntivos (29,900 millones de metros cúbicos para año al 2014) (Sistema Nacional de Información del Agua, 2015). En la Figura 4.5 se muestra la distribución del agua concesionada por usos al año 2014.

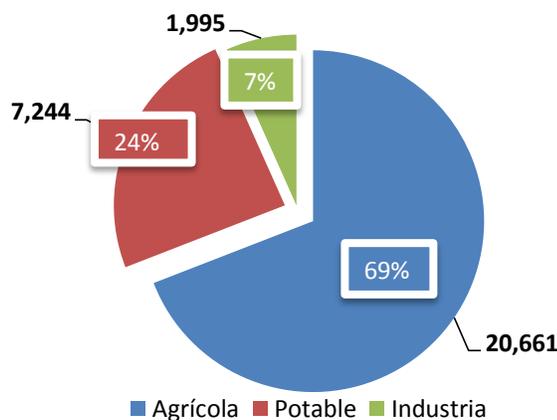


Figura 4.5. Distribución del agua subterránea por usos, 2014 (hm³).
Fuente: Elaboración propia en base a datos del SINA, 2015.

El agua subterránea concesionada tanto al uso potable como al agrícola representa el 60% del total de agua destinada a cada uno de estos usos.

De los 653 acuíferos, 106 de ellos se encuentran sobreexplotados, 15 con intrusión salina y 31 bajo el fenómeno de salinización de suelos y aguas salobres (Sistema Nacional de Información del Agua, 2015).

En el Cuadro 4.3 se presenta el estado de los acuíferos en el año 2013 por Región Hidrológica.

Cuadro 4.3. Acuíferos por Región Hidrológico-Administrativa al año 2013.

	Región Hidrológico-Administrativa	Total de acuíferos	Sobreexplotados	Con intrusión marina	Bajo el fenómeno de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres	Recarga media (hm ³)
I	Península de Baja California	88	15	10	4	1,658.10
II	Noroeste	62	10	5	0	3,206.60
III	Pacífico Norte	24	2	0	0	3,076.40
IV	Balsas	45	1	0	0	5,350.90
V	Pacífico Sur	36	0	0	0	1,935.90
VI	Río Bravo	102	18	0	8	5,900.09
VII	Cuencas Centrales del Norte	65	23	0	18	2,319.55
VIII	Lerma Santiago Pacífico	128	32	0	0	9,669.87
IX	Golfo Norte	40	1	0	0	4,068.70
X	Golfo Centro	22	0	0	0	4,705.30
XI	Frontera Sur	23	0	0	0	22,717.70
XII	Península de Yucatán	4	0	0	1	25,315.70
XIII	Aguas del Valle de México	14	4	0	0	2,346.10
Total		653	106	15	31	92,270.91

Fuente: Sistema Nacional de Información del Agua, 2015.

De acuerdo a la Agencia Iberoamericana para la difusión de la ciencia y la tecnología (2015) en México hay al menos siete acuíferos de los más sobreexplotados del mundo.

En el Cuadro 4.4 se presenta como ha variado el número de acuíferos sobreexplotados desde 1975 hasta el año 2015.

Cuadro 4.4. Variación de los acuíferos sobreexplotados.

Año	Número de acuíferos sobreexplotados
1975	32
1981	36
1985	80
2004	104
2007	101
2010	105
2015	106

Fuente: Actualización de la tabla presentada en INEGI, 2015 (c).

De acuerdo con los pronósticos para 2030, se debe tener especial cuidado con el agua subterránea, ya que su sobreexplotación ocasionará el abatimiento de los niveles freáticos, el hundimiento del terreno, provocará que se tengan que perforar pozos cada vez más profundos, además de las afectaciones a los ecosistemas. Cabe aclarar que la mayor parte de la población rural depende de manera significativa del agua subterránea, y en algunas zonas áridas la dependencia es total (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2014).

4.2.4 Consumo de agua en México

De cada 100 litros de agua usados en México, 15 se emplean para abastecer a la población, 9 provienen de agua subterránea y 6 de agua superficial (CONAGUA-SEMARNAT, 2014).

Cerca de 77% del agua en nuestro país se utiliza en la agricultura, 14%, en el abastecimiento público, 5%, en las termoeléctricas y 4% en la industria (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2014, citado en Dirección General de Análisis Legislativo, 2015).

Para entregar agua potable a la población, en México se emplean 742 plantas, que al 2013 potabilizaron 94.8 metros cúbicos por segundo. La planta potabilizadora más grande de México es parte del sistema Cutzamala, que aporta el 17% del agua para la cuenca del Valle de México. Vence un desnivel de 1100 metros. La electricidad empleada para operar el sistema Cutzamala representa alrededor de 0.5% de la generación total de energía nacional. El caudal de diseño del sistema Cutzamala es de 19 metros cúbicos por segundo y cuenta con un acueducto de 162 kilómetros (CONAGUA-SEMARNAT, 2014).

En el año 2005 la proporción de viviendas particulares habitadas que contaban con agua entubada era de 87.5%, y en el año 2010 fue de 88.2% (INEGI, 2012). Al 2013 se estima que la cobertura nacional con agua potable era de 92.3%. Los mayores rezagos en agua potable se encuentran en Veracruz, Chiapas y el Estado de México, que concentran el 37% de los casi 9 millones de habitantes sin servicio (CONAGUA-SEMARNAT, 2014).

La falta de acceso a agua potable ha convertido a México en el país con mayor consumo per cápita de agua embotellada (Enciso, 2010).

Por otro lado las empresas se han encargado de crear una imagen de pureza en torno al agua embotellada y por ello la industria de agua potable ha crecido aceleradamente y recaba millones de dólares anualmente. Cada vez más empresas trasnacionales se apoderan de las fuentes de agua nacional y de su comercio. El agua es una necesidad y derecho y no

un lujo, pero con el aumento de contaminación y mala infraestructura hidráulica, cada vez más gente se ve en la necesidad de pagar el agua 1000 veces más cara, respecto a su verdadero precio. (Chaidez, 2002; Da Cruz, 2006 citados en UNAM, 2010).

En el 2010 hubo una demanda de 78.4 miles de millones de m³, para cuyo abastecimiento se recurrió a 11.5 miles de millones de metros cúbicos de volumen no sustentable; en el escenario inercial esta brecha se duplicaría en un lapso de 20 años (Comisión Nacional del Agua, 2011).

En la Figura 4.6 se presenta el volumen de agua (superficial y subterránea) destinada a los diferentes usos consuntivos desde el año 2005 hasta el 2014.

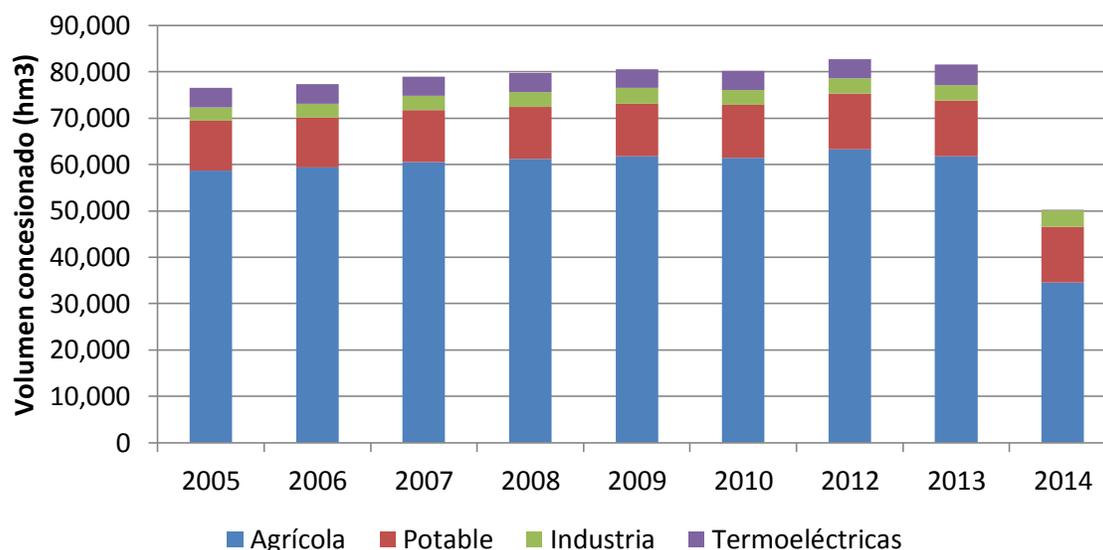


Figura 4.6. Agua concesionada para usos consuntivos, 2005-2014.

Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos SINA, 2015.

4.3 DEMOGRAFÍA Y AGUA EN EL ESTADO DE TLAXCALA

En el siguiente tema se presentan la evolución demográfica del estado de Tlaxcala misma que se relaciona con la disminución de la disponibilidad de agua per cápita, por lo que también se presenta la situación histórica y actual del recurso hídrico en el estado de Tlaxcala

En el presente trabajo los sistemas de captación del agua de lluvia se proponen como una fuente de agua dulce alterna al agua subterránea así que se presenta un apartado con la situación de los acuíferos en el estado de Tlaxcala. También se presenta el consumo que se tiene en Tlaxcala tanto del agua subterránea como del agua superficial.

4.3.1 Generalidades del estado de Tlaxcala

Territorialmente Tlaxcala es el estado más pequeño de la República Mexicana con 3,997 km², representa 0.2% de la superficie del país (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2015), colindada al norte con los estados de Hidalgo y Puebla; al este y sur con Puebla; y al oeste con el Estado de México e Hidalgo.

De acuerdo con el INEGI, gran parte de la superficie estatal se encuentra afectada por procesos erosivos con diversos grados de afectación; de las aproximadamente 399 mil hectáreas que conforman la superficie de la entidad, 120 mil presentan un grado de alteración (González, 2011.)

Ubicación

Se ubica en el Altiplano mexicano entre las coordenadas geográficas 19°44' y 19°06' latitud Norte y 97°38' y 98° 43' Longitud oeste, a una altitud que oscila entre los 2200 y 2800 msnm (INEGI, 2001 en Hernández, 2005). Al 2010, el estado de Tlaxcala está

dividido en 60 municipios (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2015), los más extensos son Tlaxco, Huamantla y Calpulalpan.

Relieve

40.69% del territorio pertenece a la Llanura con Lomeríos y 22.15%, a la Sierra; el resto corresponde a otras zonas fisiográficas. La máxima elevación es el Volcán Malinche (Matlalcuéyetl) con 4 420 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.); le siguen los cerros El Huilotepec y Huilapitzo con 3 500 m.s.n.m. cada uno (INEGI, 2013).

Clima

El 99.2% de la superficie del estado presenta clima templado subhúmedo, el 0.6% presenta clima seco y semiseco, localizado hacia la región este, el restante 0.2% presenta clima frío, localizado en la cumbre de La Malinche. La temperatura media anual es de 14°C, la temperatura máxima promedio es alrededor de 25°C y se presenta en los meses de abril y mayo, la temperatura mínima promedio es de 1.5°C en el mes de enero. La precipitación media estatal es de 720 mm anuales, las lluvias se presentan en verano en los meses de junio a septiembre (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2015).

4.3.2 Aspectos demográficos en Tlaxcala

Con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2015) en 1950 había alrededor de 284,551 habitantes en el Estado de Tlaxcala.

El desarrollo urbano del estado inicio en los años setenta, vinculado a un crecimiento de la población que en treinta años pasó de 470,668 habitantes a 962,646. De acuerdo al Censo de población y vivienda 2010 la población en el estado crece a un ritmo del 1.9% anual, y, la entidad reportó 1,169,936 habitantes (INEGI, 2010).

Para el año 2015 la población se considera de 1.3 millones, de los cuales 618 mil son hombres y 660 mil son mujeres., y de acuerdo a las proyecciones para los años 2025 y 2030 la población en Tlaxcala será de 1.44 y 1.52 millones de habitantes, respectivamente (Consejo Nacional de Población, 2015). En la Figura 4.7 se muestra la variación de la población que ha habido en el estado de Tlaxcala de 1895 hasta el 2010.

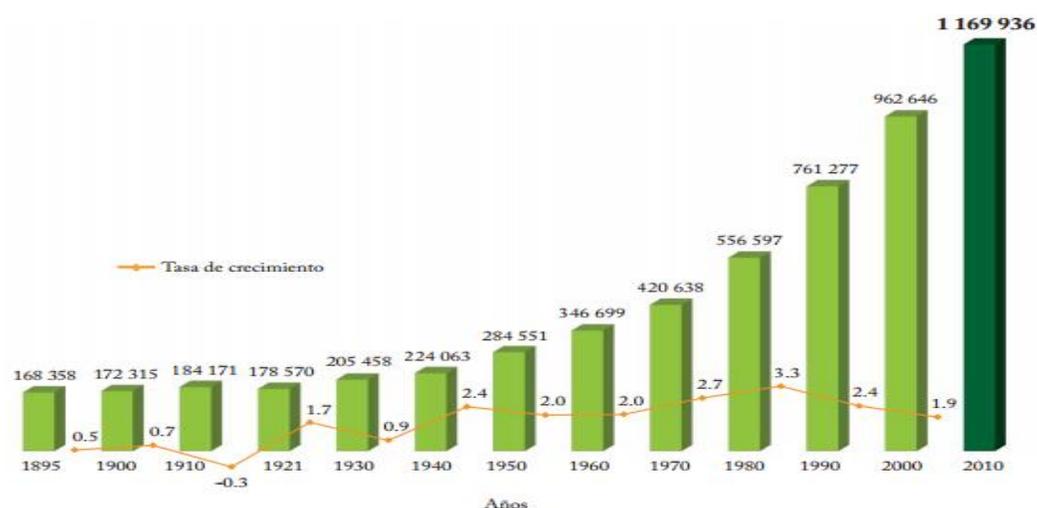


Figura 4.7. Población total y tasa de crecimiento promedio anual 1895-2010.

Fuente: INEGI. Censos de población de 1895 al 2010.

4.3.3 Recurso hídrico en Tlaxcala

La situación actual del recurso hídrico en el estado de Tlaxcala es crítica debido a que la demanda de agua está aumentando como resultado del crecimiento de la población y del desarrollo económico, del abatimiento del manto acuífero por sobreexplotación y de la contaminación del agua por uso urbano e industrial. (Magaña, 2006).

El estado se integra por tres regiones hidrológicas: Pánuco al noroeste (19.93%), cercana al estado de Hidalgo, la región del Balsas al centro (74.44%), y la región Tuxpan-Nautla, al noreste (5.63%) (González, 2011).

1 497.7 hectáreas del territorio de Tlaxcala están ocupadas por cuerpos de agua, los cuales incluyen ríos, presas y lagunas.

El INEGI (2013) reporta 30 ríos en el estado de Tlaxcala, Atotonilco, Altzayanca, Ajejela, Amomoloc, Atoyac, Atenco, Los Llorones, La Caldera, El Fondón, El Capulín, Xonecuila, Agua Santa, Zahuapan, Tepexilac-La Trinidad, El Águila, El Lindero, Grande, San Diego, Santa Ana Ríos, Totolac, Tecocac, Texcalac, Viejo, San José, El Rosario, Los Lavaderos-Tizar, La Vaquería, La Mancera, Tlacaxolo y Tenexac.

La investigadora Adelina Espejel menciona que todos los ríos de la entidad son considerados zonas críticas y los afluentes funcionan como depósitos de aguas negras, que afectan especies acuáticas y provocan desequilibrio ecológico. Lo altos índices de contaminación son causados por elevadas descargas de desechos sólidos y líquidos degradados de usos domésticos, agrícolas e industriales. El principal río contaminado es el Zahuapan que recibe alrededor de 32.5 millones de metros cúbicos anuales de aguas negras. (González, 2011).

En 2010, en el estado se detectaron 70 puntos de descarga de aguas residuales, de los cuales 28 descargaban en suelos o barrancas y 27, en ríos o arroyos (INEGI, 2013).

Dentro de otros cuerpos de agua se encuentran cuatro lagunas: Acuitlapilco, Teometitla, Zacatepec y Jalnene.

En el Inventario Nacional de Presas (2015), que reporta la Comisión Nacional del Agua a través del Sistema de Seguridad de Presas, se consideran 29 presas dentro

del estado de Tlaxcala. El Instituto Nacional de Geografía y Estadística (2013) menciona únicamente diez presas en el estado de Tlaxcala, por ser éstas las de mayor volumen, La Luna, Lázaro Cárdenas, Recoba, San Antonio, San Fernando, San Miguel La Presa, Tenexac, Atlangatepec, El Muerto y El Sol.

Los problemas del sector hídrico en Tlaxcala corresponden a la disponibilidad, uso y reúso del agua. También existen dificultades por los adeudos en el pago por el servicio del agua, una creciente demanda, elevados índices de contaminación en sus afluentes, falta de infraestructura y obsolescencia del equipo existente, que provoca un desperdicio de 40 por ciento de agua (González, 2011).



Figura 4.8. Recurso Hídrico en Tlaxcala.

Para hacer una estimación gruesa del agua renovable media per cápita al año, en Tlaxcala se consideró una precipitación media anual de 720 mm, una superficie

territorial de 3,997 km² y los censos realizados por el Instituto Nacional de Geografía y Estadística de 1950 a 2010 y las proyecciones hasta 2030, obteniéndose que en 1950 el agua renovable para el estado de Tlaxcala era 3,034.1 m³/hab/año, para el año 2010 ya era de 727.9 m³/hab/año y para el año 2015 se estima en 675.4 m³/hab/año. Siguiendo esa tendencia a disminuir se estima que para los años 2015 y 2030 el recurso será de 599.6 y 568 m³/hab/año, valores considerados como baja disponibilidad de agua.

4.3.4 Situación de los acuíferos en Tlaxcala

El estado cuenta con cuatro acuíferos:

El Alto Atoyac, que ocupa la porción norte y centro sur del estado, con 2,031 km², existen dos decretos de veda “Meridional de Puebla” y “Ampliación Meridional de Puebla”, de fechas 15 noviembre de 1967 y 30 de agosto de 1969. La condición geohidrológica del acuífero es de disponibilidad conforme a lo publicado en el Diario Oficial de la Federación el 20 de abril de 2015 en el cual se publica una disponibilidad de 46.7 millones de metros cúbicos (DOF, 2015).

El de Huamantla, ocupa la porción oriente del estado, con 970 km², existe un decreto de veda “Oriental de Puebla”, de fecha 19 de agosto de 1954. (CONAGUA, 2009). La disponibilidad es de 13.90 millones de metros cúbicos (DOF, 2015).

El acuífero de Soltepec, se ubica en la porción poniente del estado, ocupa 736 km², cuenta con dos decretos de veda, el primero de fecha 21 de julio de 1954, se denomina “Cuenca del Valle de México” y de fecha 23 de mayo de 1957, denomina “Ampliación Cuenca de las Lagunas de Tochac y Tecocomulco”, que comprenden únicamente una superficie de 366 km², del estado. El Diario Oficial de la Federación (2015) publica una disponibilidad de 34.5 millones de metros cúbicos

Por último el acuífero Emiliano Zapata, ubicado en la porción nororiente del estado, con una extensión territorial de 177 km², acuífero con condición de libre alumbramiento. En este acuífero por sus condiciones geohidrológicas difíciles para la explotación del agua subterránea, no tiene gran desarrollo. (CONAGUA, 2009). Su disponibilidad es de 0.84 millones de metros cúbicos (DOF, 2015).

De acuerdo con datos del SINA (2015) la concesión de agua subterránea en el estado de Tlaxcala es principalmente para uso agrícola (51%), seguido del uso potable (41%) y en menor medida para la industria (8%). Sin embargo la cantidad concesionada ha variado a lo largo de los años, tal como se muestra en la Figura 4.9.

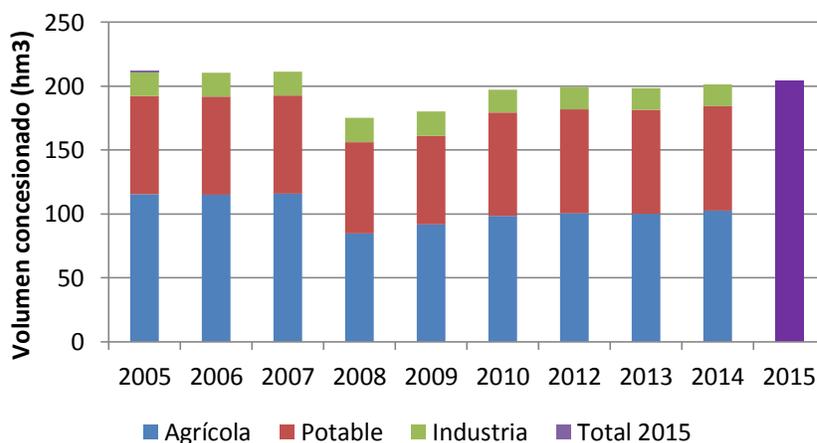


Figura 4.9. Agua subterránea concesionada en Tlaxcala, 2005-2015. Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos del SINA (2015) y la CONAGUA (2015).

4.3.5 Consumo de agua en Tlaxcala

En el estado de Tlaxcala en el año 2014 el sector agropecuario demandó 141.6 Mm³, la industria demandó un volumen anual de 17.2 Mm³ y el abastecimiento a centros de población, demandó un volumen total del orden de 89.9 Mm³ (SINA, 2015). Si se

compara con el volumen total concesionado en el año 2005 que fue de 281 Mm³ (SINA, 2015), se puede ver que la disponibilidad y el acceso al agua ha disminuido, mientras que la población ha aumentado.

En la Figura 4.10 se muestra la variación del agua concesionada (superficial y subterránea) para el estado de Tlaxcala del año 2005 hasta el 2014.

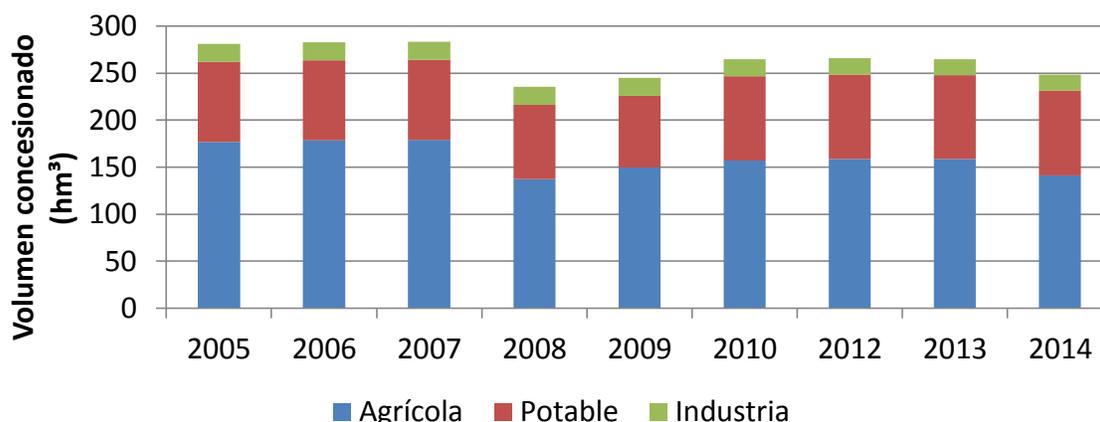


Figura 4.10. Variación del agua concesionada en Tlaxcala, 2005-2014.

Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos del SINA, 2015.

En el año 2010 la proporción de viviendas particulares habitadas con agua entubada fue de 95.3% (INEGI, 2012) correspondiente a 259,620 viviendas, mientras que las viviendas que no disponen de agua corresponden a 11,872 (INEGI, 2013), lo que a nivel nacional sitúa a Tlaxcala en el 6 lugar de entidades federativas con acceso al agua entubada. Para el año 2013 la población con servicio de agua potable se estimó en un 97.2%. Y el agua suministrada para consumo humano fue de 2,558 litros por segundo, de los cuales 2,537 estaban desinfectados, siendo un valor menor al agua suministrada en el año 2010 al ser de 2,691 litros por segundo (CONAGUA-SEMARNAT, 2014).

En el año 2013 las plantas de tratamiento de aguas residuales en operación fueron 76 industriales y 55 municipales, con un caudal tratado de 0.249 y 0.786 m³/s,

respectivamente. Respecto a plantas potabilizadoras no cuenta con ninguna que esté operando (CONAGUA, 2014).

4.4 DEMOGRAFÍA Y AGUA EN CALPULALPAN, TLAXCALA

En el siguiente tema se presentan la evolución demográfica del municipio de estudio misma que se relaciona con la disminución de la disponibilidad de agua per cápita, por lo que también se presenta la situación histórica y actual del recurso hídrico en el municipio de Calpulalpan.

En el presente trabajo los sistemas de captación del agua de lluvia se proponen como una fuente de agua dulce, para el municipio de Calpulalpan, alterna al agua subterránea así que se presenta un apartado con la situación del acuíferos Soltepec. También se presenta el consumo de agua que se tiene en el municipio de Calpulalpan, Tlaxcala.

4.4.1 Generalidades del municipio de Calpulalpan, Tlaxcala

El municipio de Calpulalpan se ubica en el estado de Tlaxcala, tiene una superficie de 254.82 km², ocupando el 6.4% de la superficie del estado. De acuerdo al prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos elaborado en 2009 (Instituto Nacional de Geografía y Estadística, 2009), se tiene la siguiente información.

Ubicación geográfica

El municipio se localiza entre los paralelos 19° 27' y 19° 38' de latitud norte; los meridianos 98° 25' y 98° 42' de longitud oeste; altitud entre 2,500 y 3,500 m. Colinda al norte con los estados de México e Hidalgo y el municipio de Sanctórum de Lázaro Cárdenas; al este con los municipios de Sanctórum de Lázaro Cárdenas y

Nanacamilpa de Mariano Arista; al sur con el municipio de Nanacamilpa de Mariano Arista y los estados de Puebla y México; al oeste con los estados de México e Hidalgo.

Clima

El clima que se tiene en el municipio es en su mayoría (53% del territorio) Templado subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media, siguiendo (29% del territorio) un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad y en menor parte (18% del territorio) se tiene un clima semifrío subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad. El rango de temperatura oscila entre 10-14 °C y la precipitación entre 500-800 mm.

Hidrografía

El municipio de Calpulalpan, Tlaxcala pertenece a la a la región hidrológica Pánuco, a la cuenca hidrográfica Río Moctezuma, y a las subcuencas L. Texcoco y Zumpango (1%) y L. Tochac y Tecocomulco (99%). No cuenta con ningún río ni cuerpo de agua de gran tamaño ni de importancia.

4.4.2 Aspectos demográficos del municipio de Calpulalpan, Tlaxcala

Con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2015) en 1970 había 15,221 habitantes en el municipio de Calpulalpan, Tlaxcala.

De acuerdo al censo realizado por el INEGI en el 2010 el municipio tuvo una población de 44,807 habitantes, de los que 23,077 son mujeres y 21,730 son hombres (INEGI, 2010), lo que representó el 3.8% de la población del estado. Del año 2000 al 2010 el municipio reportó una tasa de crecimiento de 1.8%.

Las proyecciones de población indican que en 2015 existen 49,045 habitantes, y para los años 2025 y 2030 habrá 55,502 y 58,540 habitantes, respectivamente (Consejo Nacional de Población, 2015) en el municipio.

La Secretaría de Desarrollo Social (2015) reporta un total de 228 localidades que conforman al municipio de Calpulalpan, aunque el INEGI (2011) reporta 106 de las cuales gran parte de ellas reportan uno o ningún habitante. Solo dos localidades se consideran urbanas, Calpulalpan y Santiago Cuauila.

La localidad de Calpulalpan es la cabecera municipal de Calpulalpan, Tlaxcala, y en 2010 de acuerdo con la Secretaría de Desarrollo Social (2015) contaba con 33,263 habitantes. El Consejo Nacional de Población (2015) proyecta que en el año 2015 existen 37,199 habitantes en la localidad de Calpulalpan, y que para los años 2025 y 2030 existirán 41,997 y 44,423 habitantes, respectivamente.

4.4.3 Recurso hídrico en el municipio de Calpulalpan, Tlaxcala

El municipio pertenece al organismo de cuenca Aguas del Valle de México, que de acuerdo a la CONAGUA (2014) tiene una disponibilidad de agua de 3,468.4 hm³/año lo que representa el 1% del agua renovable nacional, y un grado de presión (agua usada entre agua renovable) del 137.8%, considerado muy alto. En la Figura 4.11 se muestra la distribución a lo largo del año de la precipitación pluvial media mensual del municipio de Calpulalpan, Tlaxcala.

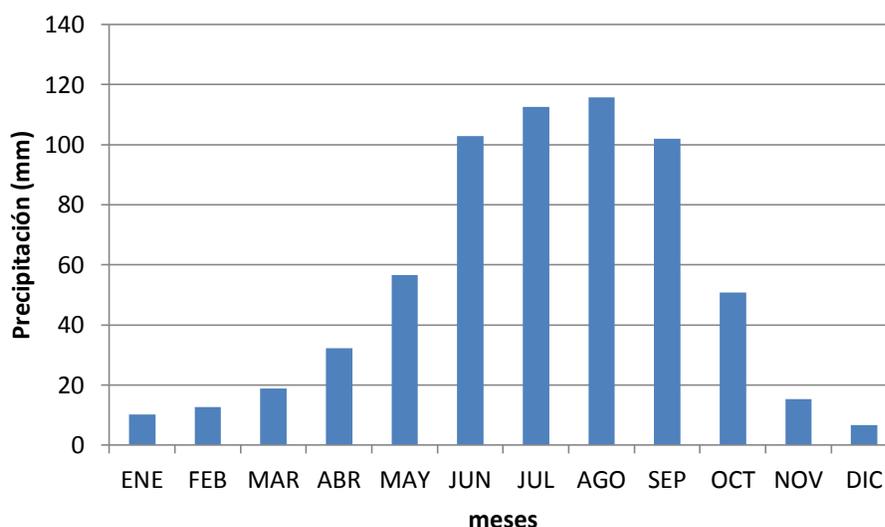


Figura 4.11. Precipitación pluvial media mensual, Estación Calpulalpan.

Para hacer una estimación gruesa del agua renovable media per cápita al año en el municipio de Calpulalpan, Tlaxcala se considera una precipitación media anual de 632.7 mm (Método de Poligonos de Thiessen), la pérdida de un 70% por evapotranspiración (media nacional) y una superficie territorial de 257.8 km² y los censos realizados por el Instituto Nacional de Geografía y Estadística de 1970 a 2010 y las proyecciones hasta 2030, obteniéndose que en 1970 el agua renovable para el Calpulalpan se valoraba en 2,726 m³/hab/año, para el año 2010 ya era de 926 m³/hab/año y para el año 2015 se valora en 846 m³/hab/año. Siguiendo la tendencia a disminuir se estima que para los años 2025 y 2030 el recurso será de 746 y 709 m³/hab/año respectivamente, valores considerados como baja disponibilidad de agua.

En el Inventario Nacional de Presas (2015), que reporta la Comisión Nacional del Agua a través del Sistema de Seguridad de Presas, se menciona que el municipio de Calpulalpan, Tlaxcala se encuentran dos presas, Sarabia y B. Mazapa con un volumen al NAMO de 0.31 y 0.1 hm³, respectivamente.

4.4.4 Situación del agua en el acuífero Soltepec (2902)

De acuerdo al estudio de determinación de la disponibilidad de agua del Acuífero Soltepec, Tlax., publicado en el Diario Oficial de la Federación el 28 de agosto de 2009 el acuífero Soltepec se localiza en la parte norte del estado de Tlaxcala, cubriendo una superficie aproximada de 429 km².

El acuífero comprende los municipios de Tlaxco, Benito Juárez, Hueyotlipan, Calpulalpan, Sanctorum, y una pequeña parte de Atlangatepec y Muñoz de Domingo Arenas. En el año de 1983 se realizó el estudio geohidrológico de la zona de Calpulalpan, Tlaxcala, en el que se determinaron cuatro unidades hidrogeológicas, siendo explotado principalmente el acuífero del Terciario volcánico; la profundidad del nivel estático variaba entre 80 y 150 metros; la recarga proviene de las zonas altas y la descarga natural tiene lugar hacia la laguna Tochac. La extracción en la zona fue estimada en 2.88 Mm³/año, llegando a la conclusión de que el acuífero se encuentra en equilibrio.

La última publicación sobre la disponibilidad del acuífero Soltepec fue realizada el 20 de abril de 2015 en el Diario Oficial de la Federación donde se indica una disponibilidad de 34.5 Mm³/año.

La base de datos del REPDA (2015) reporta 12 pozos dentro del acuífero Soltepec pertenecientes al municipio de Calpulalpan, Tlaxcala. Todos destinados al uso público urbano. El volumen anual extraído de estos doce pozos es de 2,809,387.0 metros cúbicos, representando poco más del 17% del volumen total concesionado del acuífero.

En el Cuadro 4.5. se muestran los valores de los estudios de disponibilidad del acuífero Soltepec publicados en el Diario Oficial de la Federación en las fechas indicadas.

Cuadro 4.5. Estudios de disponibilidad del acuífero Soltepec.

En hm ³	31/01/2003	28/08/2009	20/12/2013	20/04/2015
Recarga	19.10	92.80	92.80	92.80
Descarga natural	0.00	42.00	42.00	42.00
Volumen concesionado	17.85	17.27	16.26	16.28
Disponibilidad	1.24	33.52	34.54	34.52

Fuente: Elaboración propia a partir de datos publicados en el DOF.

El municipio depende al 100% del agua subterránea para abastecer sus necesidades de agua potable. Y en su gran mayoría para la agricultura.

4.4.5 Consumo de agua en Calpulalpan, Tlaxcala.

El municipio depende en su totalidad del agua subterránea para abastecimiento del agua potable en hogares y para la industria. En cuanto a la agricultura casi en su totalidad es de secano.

De acuerdo con datos del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA, 2015) en el municipio existen 12 pozos, todos destinados a uso potable, extrayendo en total 2,809,387 de metros cúbicos anualmente (17.3% de la concesión del acuífero).

En la Figura 4.12 se muestra la disponibilidad de servicios en las viviendas de Calpulalpan, Tlaxcala, incluyendo el agua entubada.

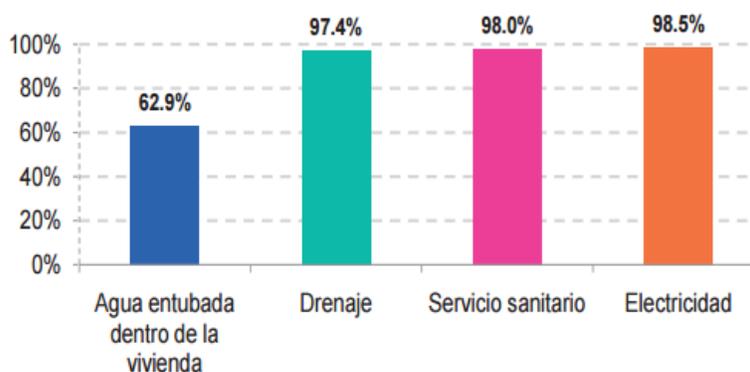


Figura 4.12. Disponibilidad de servicios en viviendas. Fuente: INEGI, 2011

4.5 CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA

La captación del agua de lluvia es la intercepción, colección y almacenamiento de la misma en depósitos para su uso posterior. La captación y aprovechamiento del agua de lluvia es una importante fuente de abastecimiento de agua para uso y consumo humano, pecuario y agrícola para las comunidades rurales con población menor de 500 habitantes, que presentan problemáticas por su topografía, aislamiento, dispersión o ausencia de fuentes de abastecimiento, ya sean superficiales o subterráneas (Juan, 2006).

De acuerdo a la Organización Mundial del Agua y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO-GWP, 2013) todas las prácticas y tecnologías que se promuevan para el uso eficiente del agua, deberían estar acompañadas por acciones dirigidas a la conservación y protección de las áreas de recarga o fuentes hídricas.

4.6 SITUACIÓN ACTUAL DE LA CAPTACIÓN DE LLUVIA EN MÉXICO

Considerando que México recibe del orden de 1,488 miles de millones de m³ de agua en forma de precipitación (SEMARNAT y CONAGUA, 2008), y que existen 13

millones de habitantes sin acceso al agua entubada si solo se aprovechara el 3% de esa cantidad, se podría abastecer a esos 13 millones de mexicanos que actualmente no cuentan con agua potable, dar dos riegos de auxilio a 18 millones de hectáreas de temporal, abastecer a 50 millones de cabezas de animal y regar 100 mil ha de invernadero (Anaya, 2008 citado en Herrera, 2010).

En México a partir del año 2003 y debido a la urgencia de la creación de programas de captación de agua de lluvia a nivel nacional, estatal, municipal y local, se estableció el Centro Internacional de Demostración y Captación en Aprovechamiento del Agua de Lluvia (CIDECALLI) ubicado en el Campus Montecillo del Colegio de Postgraduados, con el apoyo de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación de México (SAGARPA), con el objetivo de generar y transferir tecnologías sobre sistemas de captación y aprovechamiento eficiente del agua de lluvia a nivel de familia y a nivel comunitario, para consumo animal, para producción vegetal y para uso industrial, para ello ha desarrollado diversos prototipos de cisternas revestidas y cubiertas con geomembrana de PVC (Herrera, 2010).

4.7 CALIDAD DEL AGUA

La calidad del agua es un atributo que se define en función del uso que se le asigna (por ejemplo, como agua potable, para recreación, para uso agrícola o industrial), lo que implica necesariamente la existencia de estándares de calidad específicos para los distintos usos (UNDP et al., 2000).

El agua purificada para consumo humano debe cumplir con los parámetros establecidos en las normas oficiales vigentes en los Estados Unidos Mexicanos, que corresponde a las 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. En el Cuadro 4.6 se enlistan dichos parámetros:

Cuadro 4.6. Límites permisibles de la NOM-127-SSA1-1994.

CARACTERÍSTICA	LIMITE PERMISIBLE	CARACTERÍSTICA	LIMITE PERMISIBLE
Coliformes totales	Ausencia	Manganeso	0,15 mg/L
Coliformes fecales	Ausencia	Mercurio	0,001 mg/L
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto.	Nitratos (como N)	10,00 mg/L
Olor y sabor	Agradable	Nitritos (como N)	1,00 mg/L
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas	Nitrógeno amoniacal (como N)	0,50 mg/L
Aluminio	0,20 mg/L	pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	6,5-8,5
Arsénico	0,05 mg/L	Plaguicidas en microgramos/l:	
Bario	0,70 mg/L	Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0,03 mg/L
Cadmio	0,005 mg/L	Clordano (total de isómeros)	0,20 mg/L
Cianuros (como CN-)	0,07 mg/L	DDT (total de isómeros)	1,00 mg/L
Cloro residual libre	0,2-1,50 mg/L	Gamma-HCH (lindano)	2,00 mg/L
Cloruros (como Cl-)	250,00 mg/L	Hexaclorobenceno	1,00 mg/L
Cobre	2,00 mg/L	Heptacloro epóxido y de heptacloro	0,03 mg/L
Cromo total	0,05 mg/L	Metoxicloro	20,00 mg/L
Dureza total (CaCO₃)	500,00 mg/L	2,4 - D	30,00 mg/L
Fenoles	0,3 mg/L	Plomo	0,01 mg/L
Fierro	0,30 mg/L	Sodio	200,00 mg/L
Fluoruros (como F-)	1,50 mg/L	Sólidos disueltos totales	1000,00 mg/L
Zinc	5,00 mg/L	Sulfatos (como SO₄=)	400,00 mg/L
Benceno	10,00 mg/L	Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0,50 mg/L
Etilbenceno	300,00 mg/L	Trihalometanos totales	0,20 mg/L
Tolueno	700,00 mg/L	Yodo residual libre	0,2-0,5 mg/L
Xileno (tres isómeros)	500,00 mg/L		

Fuente: NOM-127-SSA1-1994.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se presenta la ubicación del sitio de estudio, que corresponde al municipio de Calpulalpan, Tlaxcala. Posteriormente se indican los materiales u en el desarrollo de este trabajo y la metodología empleada.

5.1 UBICACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

A continuación se muestra la macrolocalización del municipio de estudio, es decir, su localización, primero dentro del país, y posteriormente dentro del estado de Tlaxcala. También se muestra la microlocalización del sitio de estudio correspondiente a la localidad de Calpulalpan, y su ubicación dentro del municipio de Calpulalpan.

5.1.1 Macrolocalización

En municipio de Calpulalpan, Tlaxcala está situado a 2,580 metros sobre el nivel del mar, en las estribaciones de la sierra Nevada y a orillas del arroyo Calpulalpan. Sus coordenadas geográficas son: 19°35' de latitud norte y 98°34' de longitud oeste. En la Figura 5.1 se muestra la localización del municipio de Calpulalpan dentro del territorio del estado de Tlaxcala.

El municipio se encuentra al poniente de Tlaxcala. Colinda al norte con el estado de Hidalgo; al sur con el municipio de Nanacamilpa de Mariano Arista; al oriente con los municipios de Nanacamilpa de Mariano Arista y Lázaro Cárdenas y al poniente con el estado de México. Siendo el único municipio, de los 60 municipios que constituyen el Estado de Tlaxcala, que colinda con tres estados de la república mexicana.

El municipio de Calpulalpan, Tlaxcala pertenece a la cuenca hidrográfica Río Moctezuma, a las subcuencas L. Texcoco y Zumpango (1%) y L. Tochac y

Tecocomulco (99%), a la región hidrológica Pánuco y al organismo de cuenca (región hidrológico-administrativa) Aguas del Valle de México (99%) y una muy pequeña parte a la Balsas (1%).

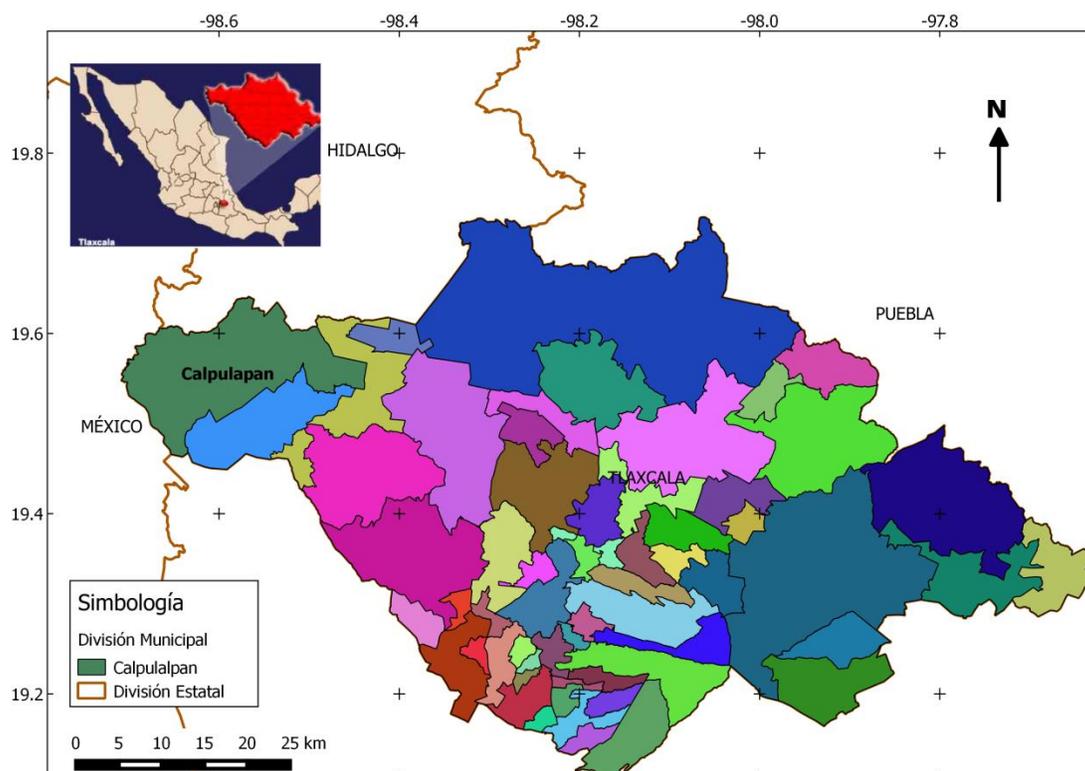
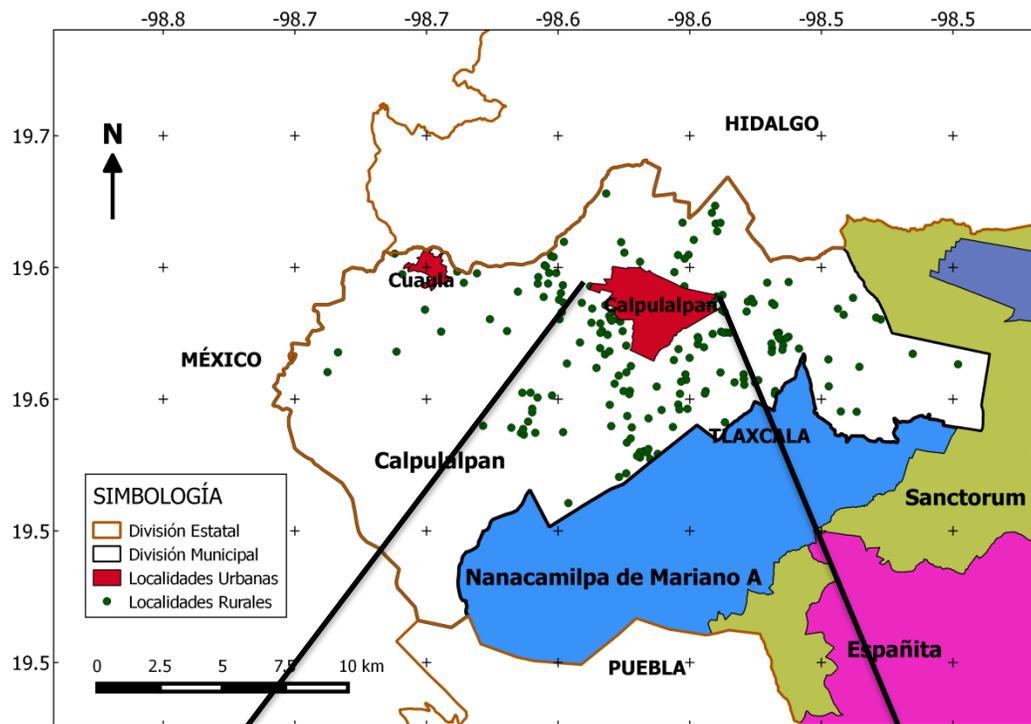


Figura 5.1. Macro localización del sitio de estudio.

5.1.2 Microlocalización

El sitio donde se proyectó instalar los sistemas de captación del agua de lluvia es en la localidad Calpulalpan, perteneciente al municipio de Calpulalpan, Tlaxcala. Los sistemas propuestos no se proyectaron para un hogar, escuela ni invernadero específicos con la intención de que la metodología propuesta se pueda generalizar a cualquier hogar, escuela e invernadero dentro del sitio de estudio.



Municipio Calpulalpan, Tlaxcala

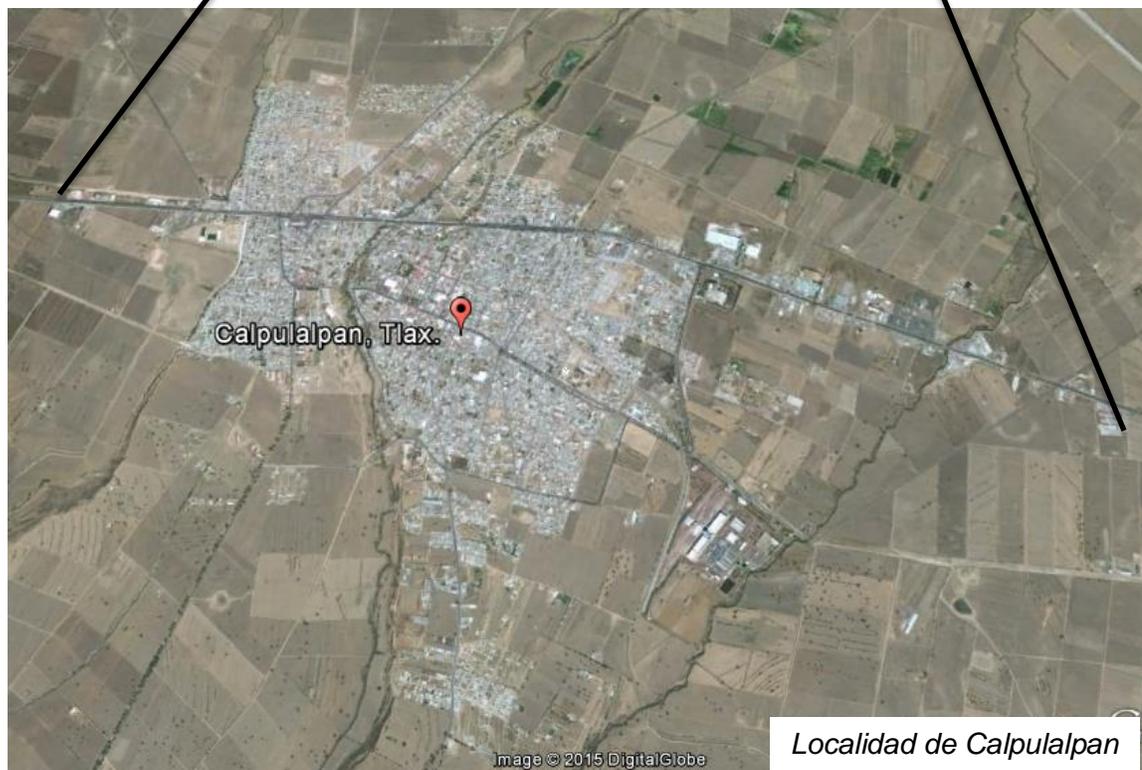


Figura 5.2. Micro localización del sitio de estudio.

5.2 MATERIALES

- Información climatológica.
- Sistemas de información geográfica.
- Muestras y análisis del agua de lluvia y de pozos.
- Información de costos de materiales para un sistema de captación del agua de lluvia y perforación y equipamiento de un pozo.

5.3 METODOLOGÍA GENERAL

A continuación se presenta la metodología empleada para el desarrollo del trabajo. La metodología se dividió en dos fases, la primera fase corresponde a un análisis de la precipitación y la segunda fase al diseño de los sistemas de captación del agua de lluvia.

La primera fase correspondiente al análisis de la precipitación consta de nueve puntos:

El primero es la ubicación de las estaciones climatológicas de donde se extrajeron los datos de precipitación.

El segundo punto consistió en completar la base de datos de la estación climatológica, para lo cual se estimaron los datos faltantes. Este segundo punto es indispensable antes de iniciar cualquier análisis de la precipitación.

El tercer punto, ya completados los datos de precipitación, fue determinar el error estadístico con el que se trabajó la información de precipitación, el objetivo de conocer este error fue para conocer cual es la longitud de registro que conviene considerar para el diseño de los sistemas de captación del agua de lluvia, longitud que también está en función de si existe o no una variación en la precipitación debida al cambio climático.

El cuarto punto fue estimar la precipitación promedio anual que cae sobre el área de estudio. La precipitación media anual es empleada en la mayoría de los métodos de diseño de sistemas de captación del agua de lluvia y en este trabajo se compara con la precipitación obtenida con una probabilidad del 75%.

El quinto punto consistió en estimar la precipitación que cae en el sitio de estudio con una probabilidad del 75%. Para saberlo primero se ajustó la precipitación a cinco funciones de probabilidad y posteriormente, empleando las pruebas de bondad de ajuste, se conoció a que función se ajustaron mejor los datos de precipitación del sitio de estudio. A partir de esa función se determinó la cantidad de lluvia que se tiene anualmente con una probabilidad del 75%.

El sexto punto fue conocer el período de retorno con el que se trabajó y que estuvo en función del nivel de probabilidad propuesto.

El séptimo punto fue estimar la intensidad de precipitación, para lo que se empleó un mapa de intensidad de precipitación.

Finalmente el octavo y último punto de la primera fase del trabajo consistió en determinar si existe o no un efecto de cambio climático en el sitio de estudio. Para saberlo se empleó el método propuesto por Porto de Carvalho et al. (2014) y además se propuso un análisis de varianza de la precipitación. El objetivo, como ya se mencionó anteriormente, es proponer la longitud de registro de precipitación que más conviene para el diseño de los sistemas de captación, y desde luego, conocer como ha variado la precipitación puesto que los sistemas de captación del agua de lluvia se proponen como una alternativa sostenible de abastecimiento hídrico.

La segunda fase del trabajo se compone de siete puntos siendo estos: la estimación de la precipitación de diseño, la determinación de la demanda, el cálculo del área de captación, el diseño del sistema de captación, el diseño del sistema de

almacenamiento, el diseño del sistema de purificación y la determinación del costo por metro cúbico del agua captada y del agua subterránea.

En la Figura 5.3 se muestra la secuencia de la metodología del presente trabajo.

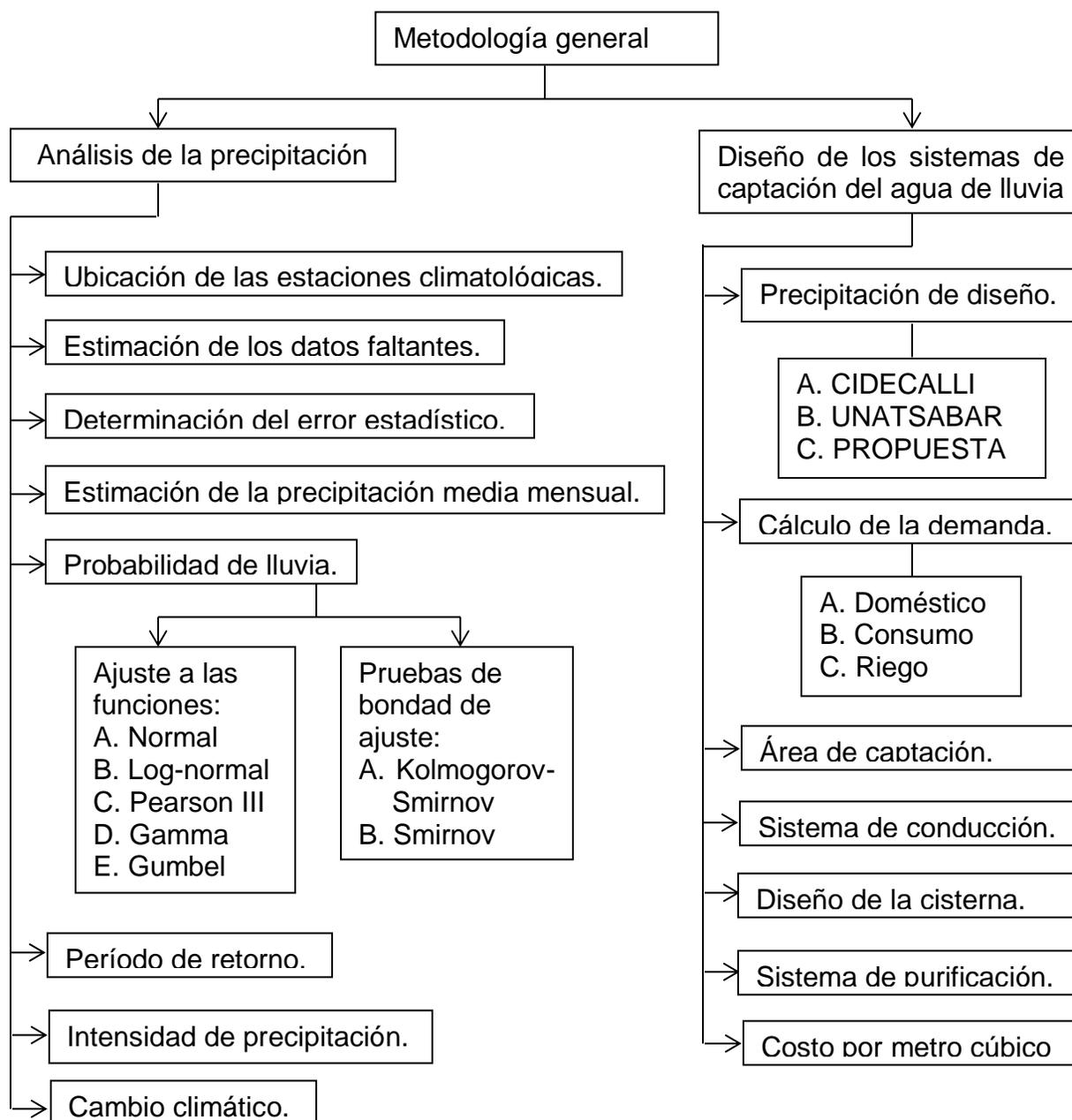


Figura 5.3. Diagrama de flujo de la metodología.

5.3.1 Análisis de precipitación.

A continuación se presentan los análisis que se realizaron a la información de precipitación de las estaciones climatológicas, útiles en el diseño de los Sistemas de Captación del Agua de Lluvia.

5.3.1.1 Ubicación de las estaciones climatológicas.

El municipio de Calpulalpan Tlaxcala cuenta, dentro de su límite territorial, con cinco estaciones climatológicas operando actualmente; la estación más cercana al área de estudio es la Estación Climatológica 29035 Calpulalpan. Fuera de los límites del municipio, pero a distancias cortas se encuentran otras nueve estaciones que permitieron conocer la precipitación media de Calpulalpan, Tlaxcala, y la estimación de los datos faltantes. En la Figura 5.4 se muestra su ubicación.



.Figura 5.4. Ubicación de las estaciones meteorológicas empleadas en el estudio.

En el Cuadro 5.1 se presentan los datos de las estaciones.

Cuadro 5.1. Estaciones climatológicas en Calpulalpan, Tlaxcala.

Clave	Estación	Estado	Municipio	Latitud	Longitud	Altura(msnm)
29035	Calpulalpan	Tlaxcala	Calpulalpan	19°35'10" N	098°33'50" W	2,587.0
29019	San Antonio	Tlaxcala	Calpulalpan	19°33'17" N	098°34'05" W	2,615.0
29034	Zoquiapan	Tlaxcala	Calpulalpan	19°35'05" N	098°28'41" W	2,532.0
29006	Cuacula	Tlaxcala	Calpulalpan	19°36'00" N	098°39'00" W	2,550.0
29025	San Marcos	Tlaxcala	Calpulalpan	19°35'49" N	098°37'55" W	2,601.0
15210	San Juan T.	México	Tepetlaoxtoc	19°31'47" N	098°43'36" W	2,750.0
15135	Xochihuacan	México	Otumba	19°37'26" N	098°40'31" W	1,355.0
13024	Potrerito	Hidalgo	Emiliano Z.	19°36'04" N	098°38'25" W	2,620.0
13138	Emiliano Z.	Hidalgo	Emiliano Z.	19°39'30" N	098°33'00" W	2,490.0
29162	Benito J.	Tlaxcala	Benito J.	19°35'12" N	098°25'39" W	2,537.0
29024	Sanctorum	Tlaxcala	Sanctorum	19°29'33" N	098°28'19" W	2,740.0
29016	Nanacamilpa	Tlaxcala	Nanacamilpa	19°29'33" N	098°32'07" W	2,720.0
13002	Apan	Hidalgo	Apan	19°42'26" N	098°26'57" W	2,496.0
21096	Santa Rita T.	Puebla	Tlahuapan	19°20'47" N	098°34'53" W	2,609.0

Fuente: Elaboración propia a partir de información del Servicio Meteorológico Nacional 2015.

5.3.1.2 Estimación de los datos de precipitación faltantes.

En la gran mayoría de las bases de datos de estaciones climatológicas del país existen datos perdidos como resultado de no haberse medido o no haberse registrado el valor de alguna variable meteorológica, en este caso la precipitación. Para realizar un análisis de los datos de precipitación registrados por una estación es recomendable estimar los datos faltantes.

Los datos faltantes, tanto diarios como mensuales, pueden estimarse en base a los registros de las estaciones cercanas, que sí tengan los datos completos, con el

método del U. S. National Weather Service, o bien, en base al propio registro con el método Racional Deductivo.

Para el Método del U. S. National Weather Service, se deben seleccionar al menos 3 estaciones vecinas que estén lo más cerca posible y sean de altitud parecida a la estación en estudio para obtener resultados confiables. Para mayor confiabilidad se recomienda usar cuatro estaciones auxiliares y que cada una esté localizada en uno de los cuadrantes que definen los ejes coordenados que pasan por la estación de estudio.

El método consiste en ponderar los valores observados en las estaciones vecinas con un factor de ponderación W , igual al recíproco del cuadrado de la distancia (D) entre cada estación vecina y la estación con el dato faltante. La precipitación faltante estimada P_x será igual a:

$$P_x = \frac{\sum(P_i * W_i)}{\sum W_i} \quad (5.1)$$

Dónde:

P_x = Precipitación faltante estimada, mm

P_i = Precipitación observada en la fecha faltante, en las estaciones auxiliares circundantes, mm.

$$W_i = \frac{1}{D_i^2} \quad (5.2)$$

Dónde:

D_i^2 = Distancia entre cada estación circundante y la estación con información faltante, en km.

Cuando no es posible disponer de estaciones cercanas y circundantes a la estación incompleta, o bien, las existentes no cuentan con observaciones de los datos

(meses) faltantes, se puede estimar el valor mensual faltante por medio de un simple promedio aritmético de los valores contenidos en el registro para ese mes, lo anterior se considera válido únicamente si es un solo año (o máximo dos) el faltante y tal promedio se realiza con diez datos (años) como mínimo (o 20 años, en el caso de dos datos mensuales faltantes) (Campos, 1998).

5.3.1.3 Determinación del error estadístico.

Antes de realizar este análisis es necesario saber si se conoce la población total (población finita) o si no se conoce por ser demasiado grande (población infinita). Y también es importante determinar si la muestra con que se va a trabajar es grande (mayor o igual a 30) o es pequeña (menor a 30). Con estos datos será posible obtener el tamaño de muestra necesario para que el error no sea considerablemente grande. Para estimar la longitud de registro necesaria para analizar la precipitación de un lugar, se puede emplear la estadística.

Si se considera que hay una población de tamaño infinito como lo es la lluvia que ha habido en el municipio de Calpulalpan, Tlaxcala, es obvio que no existe registro de la misma, pues no se comenzó a medir desde el primer día que cayó una lluvia en ese lugar y en este caso se dice que se desconoce la población. Sin embargo sí existen algunos años en los que recientemente se ha medido la precipitación, y esa medición se considera una muestra.

Si se desea estimar la precipitación media que cae en un lugar, en este caso Calpulalpan, Tlaxcala, no será posible conocer la media verdadera (pues no se conoce la población), pero si se puede obtener una media muestral, considerando los datos de los años de los que se tiene registro.

Entonces habrá una variación entre la media de precipitación muestral (de la que se tiene registro) y la media verdadera, y dicha variación, diferencia o error entre medias se puede conocer mediante la siguiente función:

$$\hat{P} = \bar{P} \pm Z \frac{S_{Pr}}{\sqrt{n_o}} \quad (5.3)$$

Dónde:

\hat{P} = Estimación de la media.

\bar{P} = Media de la muestra.

S_{Pr} = Desviación estándar de la muestra.

Z = Probabilidad α en la Función de Distribución de Probabilidad normal.

n_o = Tamaño de la muestra.

La diferencia o error entre las medias se puede obtener de la siguiente manera:

$$e = \hat{P} - \bar{P} = Z \frac{S_{Pr}}{\sqrt{n_o}} \quad (5.4)$$

Dónde:

e = Error o diferencia entre la estimación de la media verdadera y la media muestral o límite de probabilidad deseada.

Si la ecuación anterior se eleva al cuadrado y además se despeja n_o , resulta la siguiente expresión:

$$n_o = \frac{Z^2 S_{Pr}^2}{e^2} \quad (5.5)$$

La expresión anterior representa el tamaño de muestra, o longitud de registro en este caso, que se debe considerar en una población de tamaño infinito, cuando se puede contar con un muestra grande para tener un error e , permitiéndonos garantizar que la

diferencia entre la media verdadera y la media muestral sea lo suficientemente pequeña como para ser confiable.

5.3.1.4 Estimación de la precipitación promedio anual en el área de estudio.

En general, la altura de lluvia que cae en un sitio dado difiere de la que cae en los alrededores aunque sea en sitios cercanos. Los aparatos que registran la precipitación en las estaciones meteorológicas lo hacen de manera puntual, es decir la que se produce en el punto en que está instalado el aparato, y en este caso es necesario conocer la lluvia media en una zona y no en el punto de la estación.

Para obtener la precipitación media en el municipio de Calpulalpan, Tlaxcala se aplicó el método de Polígonos de Thiessen, dado que se trata de una región pequeña donde se espera que la topografía no tenga una influencia considerable en la distribución de la precipitación.

Este método considera que los pluviómetros no presentan una distribución uniforme en el área, por lo que se hace una ponderación de cada uno de ellos. Para tal efecto se supone que existe una variación lineal de la precipitación entre los pluviómetros y asigna un fragmento de área a la estación más cercana.

El método de A. H. Thiessen (1911), presentado por Aparicio (2010), consiste en ubicar las estaciones y el área de interés en un mapa, trazar triángulos cuyos vértices toquen a las estaciones y posteriormente trazar las mediatrices perpendiculares a cada lado de los triángulos prolongándolas hasta el límite del área de estudio, lo que formará polígonos alrededor de cada estación, que serán el área de influencia de la estación correspondiente. Finalmente se obtiene la precipitación media como un promedio ponderado de las precipitaciones registradas en cada estación, usando como eso el área de influencia correspondiente.

$$P = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n A_i P_i \quad (5.6)$$

Dónde:

P = Precipitación promedio sobre el área, mm.

A = Área total de la zona de estudio, km².

A_i = Área del polígono de la estación i, km².

P_i = Precipitación registrada en la estación i durante el período de estudio, mm

5.3.1.5 Estimación de la probabilidad de lluvia anual

Para la estimación de la probabilidad de lluvia anual se ajustó la precipitación registrada a funciones de distribución de probabilidad, posteriormente se determinó mediante unas pruebas de bondad de ajuste a que FDP se ajustaba mejor a la información de precipitación. Una vez conocida la función de mejor ajuste está se empleó para conocer la probabilidad de lluvia anual en el sitio de estudio.

5.3.1.5.1 Ajuste de la precipitación a funciones de distribución.

Puede ajustarse a la precipitación registrada una función de distribución de probabilidad, FDP, lo que permite estimar el valor de la precipitación que se puede esperar con un cierto nivel de probabilidad, es decir, se puede estimar que cantidad de lluvia se espera precipitará sobre un lugar con una cierta probabilidad, por ejemplo del 75%.

Convencionalmente, las probabilidades se calculan para eventos mayores o iguales a un valor determinado lo que se denomina probabilidad de excedencia. Esas determinaciones son valiosas para el diseño de sistemas de abastecimiento de agua potable y problemas similares de planeación (Campos, 1998).

La precipitación no siempre se ajustará a la misma función de distribución de probabilidad y en estadística existen varias de estas funciones, por lo tanto es necesario elegir la que mejor se adapte al problema bajo análisis.

La función de distribución de probabilidades acumuladas, o FDP, $F(x)$ se define como la probabilidad de que la variable X tome valores menores o iguales de x .

$$F(x) = P(X \leq x) \quad (5.7)$$

De acuerdo con Aparicio (2010) las funciones de distribución de probabilidad más utilizadas en hidrología aplicada son la Normal, Log-Normal, Pearson, Gumbel, entre otras.

A. Distribución Normal

La función de distribución de probabilidad normal FDP es la integral de la función de densidad de probabilidad FDEP normal que es:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (5.8)$$

Donde μ y σ son la media aritmética y la desviación estándar de la población, respectivamente, lo que lleva a que sería necesario conocer estos valores, por lo que se definió la variable estandarizada.

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (5.9)$$

Por lo que la función normal de distribución de probabilidad se puede escribir como:

$$F(x) = F(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-z^2/2} dz \quad (5.10)$$

La función $F(z)$ se ha calculado numéricamente y se han publicado tablas de ella, como las que publica Aparicio (2010).

B. Distribución Log-Normal o Galton

La distribución Log-Normal o de Galton generalmente se aplica a datos asimétricos, a partir de la transformación de los datos originales a logaritmos, basándose en que la función de los logaritmos naturales se distribuyen normalmente.

La función de distribución de probabilidad de Galton es:

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{x\beta} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \alpha}{\beta}\right)^2} dx \quad (5.11).$$

Si

$$y = \ln x \quad (5.12).$$

$$F(y) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{S_y} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y - \bar{y}}{S_y}\right)^2} dy \quad (5.13).$$

Donde α y β son la media y la desviación estándar de los logaritmos de la variable aleatoria, respectivamente. Definiéndose la variable estandarizada.

$$z = \frac{\ln x - \alpha}{\beta} \quad (5.14)$$

C. Pearson III o Gamma de tres parámetros

Esta función es un caso especial de la Gamma, es asimétrica y generalmente con forma de campana, depende de tres parámetros estadísticos y por ello es bastante flexible (Campos, 1998).

La función de distribución de probabilidad Pearson III es:

$$F(x) = \frac{1}{\alpha_1 \Gamma(\beta_1)} \int_0^x e^{-\left(\frac{x-\delta_1}{\delta_1}\right)} \left(\frac{x-\delta_1}{\delta_1}\right)^{\beta_1-1} dx \quad (5.15)$$

Donde, α_1 , β_1 y δ_1 son los parámetros de la función y $\Gamma(\beta_1)$ es la función Gamma.

Los tres parámetros resultan de:

$$\bar{x} = \alpha_1 \beta_1 + \delta_1 \quad (5.16)$$

A partir de donde:

$$S^2 = \alpha_1^2 \beta_1 \quad (5.17)$$

$$\gamma = \frac{2}{\sqrt{\beta_1}} \quad (5.18)$$

Dónde \bar{x} es la media de n datos, S^2 su varianza y γ su coeficiente de sesgo.

Además sustituyendo,

$$y = \frac{x - \delta_1}{\alpha_1} \quad (5.19)$$

La función de distribución de probabilidad Pearson III queda:

$$F(y) = \frac{1}{\Gamma(\beta_1)} \int_0^y y^{\beta_1-1} e^{-y} dy \quad (5.20)$$

D. Gamma incompleta

La distribución Gamma incompleta depende únicamente de dos parámetros (α y β). Y para calcular esos dos parámetros existen diferentes procedimientos, pero los más usados son el método de los momentos y el procedimiento de máxima verisimilitud propuesto por Thom (1966).

Con el método de los momentos la estimación se realiza de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{\bar{x}^2}{S^2} \quad (5.21)$$

$$\beta = \frac{S^2}{\bar{x}^2} \quad (5.22)$$

\bar{x} = precipitación promedio de la muestra, y

S^2 = varianza de la muestra, calculada con $n-1$ grados de libertad.

Las restricciones para la aplicación de este procedimiento son que los valores de la precipitación necesitan ser mayores de cero y α debe ser un número entero y positivo.

El procedimiento de Thom por su parte se efectúa como sigue:

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (5.23)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}^2}{\alpha} \quad (5.24)$$

Dónde:

$$A = \text{Ln}(\bar{x}) - \frac{\sum \text{Ln}(x)}{n} \quad (5.25)$$

x = valor de la precipitación;

n = número de observaciones.

E. Distribución Gumbel

La función de distribución de probabilidad de x tiende a:

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad (5.26)$$

Donde α y β son los parámetros de la función, que se estiman de diferente manera cuando las muestras son grandes y cuando son pequeñas.

Muestras grandes ($n > 100$)	Muestras pequeñas ($n \leq 100$)
$\alpha = \frac{1.2825}{S}$	$\alpha = \frac{\sigma_y}{S}$
$\beta = \bar{x} - 0.45 S$	$\beta = \bar{x} - \mu_y / \alpha$
	σ_y y μ_y dependen del número de datos.

Cuadro 5.2. Parámetros de la distribución Gumbel.

n	μ_y	σ_y	n	μ_y	σ_y
10	0.4952	0.9496	55	0.5504	1.1682
15	0.5128	1.0206	60	0.5521	1.1747
20	0.5236	1.0628	65	0.5535	1.1803
25	0.5309	1.0914	70	0.5548	1.1854
30	0.5362	1.1124	75	0.5559	1.1898
35	0.5403	1.1285	80	0.5569	1.1938
40	0.5436	1.1413	85	0.5578	1.1974
45	0.5463	1.1518	90	0.5586	1.2007
50	0.5485	1.1607	100	0.5600	1.2065

Fuente: Aparicio, 2010.

5.3.1.5.2 Pruebas de bondad de ajuste

Las pruebas de bondad de ajuste permiten elegir la distribución más adecuada para calcular las probabilidades de lluvia. Las pruebas más usadas son la Prueba de Kolmogorov-Smirnov y la Prueba de Smirnov.

A. Prueba Kolmogorov-Smirnov

De acuerdo con Aparicio (2010) la Prueba de Kolmogorov-Smirnov, es también conocida como la prueba de la distancia máxima pues consiste en comparar la mayor diferencia absoluta ($D_{\text{máx}}$), entre los valores de probabilidad observados $F_o(x)$ y los calculados con la función de distribución de probabilidad $F(x)$, con un valor crítico d_{tablas} que depende del número de datos y el nivel de significancia seleccionado.

El valor absoluto de esa diferencia o distancia máxima, $D_{\text{máx}}$, se compara con el valor de tablas, d_{tablas} , y si resulta menor ($D_{\text{máx}} < d_{\text{tablas}}$), se dice que tiene buen ajuste.

Así la prueba consiste de:

$$D_{\text{máx}} = \text{máx}|F_0(x) - F(x)| \quad (5.27)$$

Dónde:

$$F_0(x) = 1 - \frac{m}{n + 1} \quad (5.28)$$

m = número de orden

n = número total de datos

Cuadro 5.3. Valores Críticos para D en la Prueba de Kolmogorov–Smirnov.

Tamaño de Muestra (N)	Nivel de Significancia para $D = \text{máxima}/F_o(x) - S_N(x)/$		
	0.10	0.05	0.01
1	0.950	0.975	0.995
2	0.776	0.842	0.929
3	0.642	0.708	0.828
4	0.564	0.624	0.733
5	0.510	0.565	0.669
6	0.470	0.521	0.618
7	0.438	0.486	0.577
8	0.411	0.457	0.543
9	0.388	0.432	0.514
10	0.368	0.410	0.490
11	0.352	0.391	0.468
12	0.338	0.375	0.450
13	0.325	0.361	0.433
14	0.314	0.349	0.418
15	0.304	0.338	0.404
16	0.295	0.328	0.392
17	0.286	0.318	0.381
18	0.278	0.309	0.371
19	0.272	0.301	0.363
20	0.264	0.294	0.356
25	0.24	0.27	0.32
30	0.22	0.24	0.29
35	0.21	0.23	0.27
> 35	$\frac{1.22}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.36}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.63}{\sqrt{N}}$

Fuente: (Ortiz, 2011).

B. Prueba Smirnov

La Prueba de Smirnov, de acuerdo con Ortiz (2011), consiste en calcular el estadístico no-paramétrico, $n\omega^2$, cuya fórmula es:

$$n\omega^2 = \frac{1}{12n} + \sum_{i=1}^n \left[F(x_i) - \frac{2i-1}{2n} \right]^2 \quad (5.29)$$

Dónde:

n = número de observaciones;

i = número de orden;

F(xi) = valor probabilístico de la distribución que se desea probar, para la observación i.

También, se indica que la esperanza matemática del estadístico de Smirnov es:

$$E(n\omega^2) = \frac{1}{6} = 0.1666 \quad (5.30)$$

Con la cual la regla de decisión para aprobar o rechazar el ajuste establece que la distribución propuesta se ajusta sí el estadístico de Smirnov calculado con los datos de la distribución de interés es menor a 0.1666, es decir,

Sí $E(n\omega^2)_{calculada} < 0.1666$, la distribución se ajusta y se puede aceptar.

5.3.1.6 Período de retorno

El número de años en que, en promedio, se presenta un evento, se llama período de retorno, intervalo de recurrencia o simplemente frecuencia y se acostumbra denotarlo con T (Aparicio, 2010). Por lo tanto, si se tiene el periodo de retorno de un evento A

de T años, significa que existe una probabilidad P de que en promedio al menos una vez en T años se presente un evento A. Esa probabilidad de que ocurra un evento igual o mayor que A es inversamente proporcional al período de retorno.

$$T = \frac{1}{P(X \geq A)} = \frac{1}{1 - P(X \leq A)} \quad (5.31)$$

5.3.1.7 Estimación de la intensidad de precipitación

La intensidad de precipitación indica la lámina de lluvia que cae sobre una superficie durante un determinado tiempo, se expresa en milímetros por hora. En este trabajo la intensidad de precipitación es necesaria para el diseño de las canaletas, por tanto es muy importante conocer la intensidad de precipitación de un sitio para que la canaleta sea capaz de transportar toda el agua precipitada en un cierto tiempo.

En la mayoría de las estaciones meteorológicas se cuenta con registros de la lluvia máxima en 24 horas. A partir de esta información puede calcularse una intensidad de precipitación para algún período de retorno, Anaya (2011) recomienda emplear un período de retorno de 10 años y una duración de 60 minutos de lluvia.

La Secretaria de Comunicaciones y Transportes (2015) publica mapas de intensidad de precipitación para varios periodos de retorno y diferentes duraciones de lluvia para cada estado de la República. De estos mapas es posible obtener la información necesaria, estos mapas fueron los empleados en este trabajo.

5.3.1.8 Determinación de efecto de cambio climático

Una de las formas de detectar si hay efecto del cambio climático en una región es analizar el comportamiento de la precipitación de dicha región. En este trabajo se

usó la metodología propuesta por Porto de Carvalho et al. (2014) y una propuesta de análisis de varianza.

A. Porto de Carvalho

Porto de Carvalho et al. (2014) proponen construir una serie de tiempo a partir de los datos de precipitación media anual y generar grupos de precipitación media cada 10 años para encontrar si existe alguna tendencia en el comportamiento de la precipitación.

Porto de Carvalho et al. (2014) también ajustan la precipitación máxima en 24 horas a una función lineal para conocer la tendencia que ha tenido, con la finalidad de reconocer si esta va en aumento, descenso o permanece constante a lo largo de los años.

Finalmente se propone realizar un análisis de varianza a los datos de precipitación con la intención de saber si la cantidad de lluvia ha cambiado a lo largo de los años de los que se tiene registro.

B. Análisis de Varianza

En el presente trabajo el Análisis de Varianza (ANOVA por sus siglas en inglés) es útil para saber si la precipitación pluvial que cae sobre un lugar ha cambiado (en cantidad) significativamente a lo largo de los años o si ha permanecido semejante.

El ANOVA es un método que permite comparar dos o más medias dado que permite conocer la variabilidad que existe entre las medias de un conjunto de datos.

La forma en que se comparan las medias en un ANOVA es planteado dos hipótesis:

La hipótesis nula (H_0) indica que las medias de los tratamientos (o bloques) son similares o iguales o no existe efecto o es el mismo.

La hipótesis alterna (H_a) indica que al menos un tratamiento (o bloque) es diferente a los demás o existe efecto de tratamientos o al menos un tratamiento produce un efecto diferente a los demás.

El ANOVA puede emplearse a diferentes tipos de diseños como son:

- Diseño Completamente Aleatorizado (DCA). Cuando existe homogeneidad entre unidades experimentales.
- Diseño en Bloques Completamente Aleatorizados (DBCA). Cuando existe una fuente de variación entre las unidades experimentales.
- Diseño en Cuadro Latino (DCL). Cuando existen dos fuentes de variación en las unidades experimentales.
- Diseño en Cuadro Grecolatino (DCGL).

El Diseño en Bloques Completamente Aleatorizado (DBCA) se aplica cuando en el material experimental se tiene una variabilidad en un factor. En este trabajo el DBCA resulta muy útil dado que la lluvia de cada mes está afectada por la variabilidad en el tiempo.

El modelo estadístico para este diseño es:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, I; \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (5.32)$$

Dónde

y_{ij} = Variable aleatoria que representa la observación (i)-ésima del bloque (j)-ésimo.

μ = Efecto constante que mide el nivel promedio de respuesta para todas

las unidades, denominado media global.

τ_i = Efecto producido por el nivel i-ésimo del factor principal.

β_j = Efecto producido por el nivel j-ésimo del factor secundario o factor de bloque.

ε_{ij} = Perturbaciones o error experimental.

Para poder hacer la comparación de medias las hipótesis a probar son:

Para los tratamientos:

$$\begin{aligned} H_0 &= \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a \\ &\text{contra} \\ H_a &= \tau_i \neq \tau_j \text{ para } i \neq j \text{ donde } i, j = 1, 2, \dots, a \end{aligned} \quad (5.33)$$

Para los bloques:

$$\begin{aligned} H_0 &= \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b \\ &\text{contra} \\ H_a &= \beta_i \neq \beta_j \text{ para } i \neq j \text{ donde } i, j = 1, 2, \dots, b \end{aligned} \quad (5.34)$$

Dónde:

H_0 = Hipótesis nula.

H_a = Hipótesis alterna.

τ_a = Medias de los tratamientos

a = número de tratamientos.

β_b = Medias de los bloques.

b = número de bloques

En este modelo intervienen dos factores, el factor tratamiento y el factor bloque. Al primero es usual llamarlo factor principal mientras que al segundo factor secundario, puesto que nuestro interés fundamentalmente está centrado en el primero y el factor bloque se introduce en el modelo para eliminar su influencia en la variable respuesta.

Empleando este diseño los meses representan cada uno un bloque y los 66 años de registros representan los tratamientos, dado que lo que interesa conocer es el efecto que el tiempo (los años) ha generado en la cantidad de precipitación.

Supónganse k muestras aleatorias independientes, de tamaño n , extraídas de una única población normal. A partir de ellas existen diferentes maneras independientes de estimar la varianza de la población σ^2 (V. Abaira y Pérez de Vargas, 1996).

La varianza total S_T^2 se compone de la varianza entre bloques S_b^2 (que pueden ser considerados como las repeticiones que se hacen en un experimento), de la varianza entre tratamientos S_t^2 y la varianza entre errores S_e^2 .

$$S_T^2 = S_b^2 + S_t^2 + S_e^2 \quad (5.35)$$

1) La varianza entre bloques (S_b^2) es a la diferencia que existe entre las repeticiones de un experimento, se representa como CMB y es un cociente de la suma de cuadrados de los bloques SCb entre los grados libertad de los bloques ($b-1$).

2) La llamada varianza de los tratamientos (S_t^2), o varianza entre grupos, o cuadrados medios de los tratamientos es representada por CMA y sólo contribuye a ella la varianza entre las distintas muestras. Se calcula a partir de la varianza de las medias muestrales y es también un cociente; al numerador se le llama suma de cuadrados de los tratamientos (se le representa por SCa) y al denominador $(a-1)$ grados de libertad de los tratamientos.

3) La llamada varianza del error (S_e^2) o varianza dentro de los grupos (ya que sólo contribuye a ella la varianza dentro de las muestras), o cuadrados medios del error, es representada por CMe que se calcula como la media de las k varianzas muestrales (cada varianza muestral es un estimador centrado de σ^2 y la media de k estimadores centrados es también un estimador centrado y más eficiente que

todos ellos). CMe es un cociente: al numerador se le llama suma de cuadrados del error SCE y al denominador grados de libertad del error $(a-1)*(b-1)$.

4) La varianza total (S_T^2) es otra manera de estimar la varianza de la población, aunque no es independiente de las anteriores. Si se consideran las kn observaciones como una única muestra, su varianza muestral también es un estimador centrado de σ^2 : Se suele representar por CMT , se le denomina varianza total o cuadrados medios totales, es también un cociente y al numerador se le llama suma de cuadrados total y se representa por SCT , y el denominador $(N-1)$ grados de libertad.

CMA y CMe , estiman la varianza poblacional en la hipótesis de que las k muestras provengan de la misma población. La distribución muestral del cociente de dos estimaciones independientes de la varianza de una población normal es una F con los grados de libertad correspondientes al numerador y denominador respectivamente, por lo tanto se puede contrastar dicha hipótesis usando esa distribución.

Si en base a este contraste se rechaza la hipótesis de que CMA y CMe estimen la misma varianza, se puede rechazar la hipótesis de que las k medias provengan de una misma población. Aceptando que las muestras provengan de poblaciones con la misma varianza, este rechazo implica que las medias poblacionales son distintas, de modo que con un único contraste se contrasta la igualdad de k medias. Los resultados de un ANOVA se suelen representar en una tabla como la siguiente:

Cuadro 5.4 Resultados de un ANOVA.

Fuente de variación	Grados libertad (G.L.)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrado medio (CM)	F calculada
Entre bloques	b-1	SCb	CMb/ (b-1)	CMb/CMe
Entre tratamientos	a-1	SCa	CMa/(a-1)	CMa/CMe
Dentro del error	(a-1)*(b-1)	SCe	CMe/(a-1)*(b-1)	
Total	N-1	SCT		

Fuente: Elaboración propia.

Dónde:

b = Número de bloques.

a = Número de tratamientos.

N = Número total de eventos = NB+NT

CMb = Varianza de los bloques.

SCb = Suma de cuadrados de los bloques.

CMa = Varianza de los tratamientos.

SCa = Suma de cuadrados de los tratamientos.

CMe = Varianza del error.

SCe = Suma de cuadrados del error.

SCT = Suma de cuadrados totales.

F se usa para realizar el contraste de la hipótesis de medias iguales. La región crítica para dicho contraste es $F > F_{\alpha(k-1,(n-1)k)}$.

En este trabajo la varianza entre bloques se espera sea significativa dado que la precipitación media mensual es diferente para cada uno de los 12 meses que conforman un año.

Al contrario la varianza entre tratamientos puede llegar a ser significativa, en caso de que la cantidad precipitada haya variado mucho entre un año y otro como posible

efecto de un cambio climático, pero también puede llegar a ser no significativa lo que se entendería como que la precipitación de un lugar ha permanecido muy semejante en cantidad durante todos los años de registro.

5.3.2 Estimación de la precipitación pluvial neta de diseño

La precipitación pluvial neta de diseño es aquella que se estima lloverá anualmente en un sitio. En el presente trabajo se estimó con tres métodos diferentes. El primero de ellos es el propuesto por el Centro Internacional de Demostración y Capacitación en Aprovechamiento del Agua de Lluvia y el Colegio de Postgraduados, el segundo método es el propuesto por la Unidad de Apoyo Técnico en Saneamiento Básico Rural, y el tercer método es propuesto como parte de la investigación del presente trabajo. La intención de obtener la precipitación pluvial neta de diseño con tres metodologías distintas fue compararlas.

5.3.2.1 Metodología CIDECALLI-CP

En la metodología propuesta por el Centro Internacional de Demostración y Capacitación en Aprovechamiento del Agua de Lluvia y el Colegio de Postgraduados (CIDECALLI-CP) se define a la precipitación neta de diseño como la cantidad de agua de lluvia que queda a disposición del sistema (SCALL), una vez considerado un coeficiente de escurrimiento cuyo valor depende del tipo de material del área de captación, en el Cuadro 5.6 se presentan los valores de dicho coeficiente, y un coeficiente de captación que se ha planteado del 85% (0.85) que descuenta las pérdidas por factores como salpicamiento, velocidad del viento, evaporación, fricción, tamaño de gota. La forma de calcular la precipitación neta es.

$$PN = P * Cc * Ce \quad (5.36)$$

Dónde:

PN = Precipitación neta de diseño

P = Precipitación de diseño

C_c = Coeficiente de captación = 85% (0.85)

C_e = Coeficiente de escurrimiento

La precipitación de diseño (P) es la suma de las precipitaciones medias mensuales del sitio de estudio cuyos valores sean superiores a 40 mm. El CIDECALLI no recomienda tomar en cuenta las precipitaciones medias mensuales con valores inferiores a 40 mm, ya que la cantidad y calidad no las considera de buena calidad.

Para obtener las precipitaciones medias mensuales propone emplear registros de lluvias únicamente de los últimos 10 años respecto a la fecha de diseño del sistema, con la intención de que el diseño no se vea afectado por la variación de la lluvia por efecto del cambio climático.

Cuadro 5.5. Coeficiente de escurrimiento según tipo de superficie (CIDECALLI).

Tipo de captación	C_e
Cubiertas superficiales	
Concreto	0.6 – 0.8
Pavimento	0.5 – 0.6
Geomembrana de PVC	0.85 – 0.90
Azotea	
Azulejos, tejas	0.8 – 0.9
Hojas de metal acanaladas	0.7 – 0.9
Captación en tierra	
Suelo con pendientes menores a 10%	0.0 – 0.3

Fuente: Anaya (2011).

5.3.2.2 Metodología UNATSABAR

La Unidad de Apoyo Técnico en Saneamiento Básico Rural (UNATSABAR) de Perú propone en su “Guía de diseño de captación del agua de lluvia” emplear la ecuación 5.37.

$$PN = P * Ce \quad (5.37)$$

Dónde:

PN = Precipitación neta de diseño, mm.

P = Precipitación de diseño, mm.

Ce = Coeficiente de escorrentía

La precipitación de diseño (P) es la suma de las precipitaciones medias mensuales considerando por lo menos los últimos 10 años, e ideal de los últimos 15 años. El valor del coeficiente de escorrentía se obtiene del Cuadro 5.6.

Cuadro 5.6. Coeficiente de escorrentía (UNATSABAR).

Material	Coeficiente de escorrentía
Calamina metálica	0.9
Tejas de arcilla	0.8 – 0.9
Madera	0.8 – 0.9
Paja	0.6 – 0.7

Fuente: UNATSABAR (2011).

5.3.2.3 Metodología propuesta.

A partir de las metodologías propuestas por el CIDECALLI-CP y UNATSABAR, y considerando algunas modificaciones, en este trabajo se generó una propuesta de diseño de sistemas de captación del agua de lluvia, para la estimación de la precipitación pluvial neta de diseño se proponen los siguientes pasos:

- a. Ubicar la estación climatológica actualmente operando más cercana al sitio de estudio.
- b. Considerar todos los años con datos completos que se tengan de registro. Para estar seguros de que el cambio climático no ha afectado la variación de la precipitación se puede consultar el tema 5.3.1.8. Cuando se presenta un cambio en la cantidad o intensidad de la lluvia, por efecto de cambio climático, se recomienda emplear únicamente los últimos 10 años de registros de precipitación.
- c. Estimar los datos faltantes, en caso de faltar.
- d. Proponer la probabilidad de ocurrencia con la que se desee diseñar. En este trabajo se consideró una probabilidad del 75% con la intención de no encarecer el sistema de captación pero tener una mayor certeza de la cantidad de lluvia con la que se contará anualmente.
- e. Considerando la probabilidad de ocurrencia y el período de retorno elegidos ajustar los datos de precipitación mensual a una función de distribución, misma que se acepta a partir de que la prueba de bondad de ajuste lo justifique.
- f. Conociendo la cantidad de lluvia que con una cierta probabilidad (en este caso 75%) ocurrirá cada mes se pueden descartar los meses con valores inferiores a 40 mm por ser de mala calidad. Al resto de los meses, es decir aquellos con precipitación superior a 40 mm se les multiplica por un coeficiente de escurrimiento:

$$PN_j = P_j^{75} * Ce \quad (5.38)$$

Dónde:

PN_j = Precipitación neta del mes j , (1,2,3,...,12), mm.

P_j^{75} = Precipitación total del mes j , (1,2,3,...,12) con una probabilidad de ocurrencia del 75% > 40 mm, mm.

C_e = Coeficiente de escurrimiento.

- g. Finalmente se realiza la suma de la precipitación de cada mes y se obtiene la precipitación anual neta de diseño.

$$PN_{diseño} = \sum_{j=1}^n PN_j \quad (5.39)$$

Dónde:

$PN_{diseño}$ = Precipitación neta total de diseño con una probabilidad de ocurrencia del 75%, mm.

$\sum_{j=1}^n PN_j$ = Suma de la precipitación neta de los meses con una probabilidad de ocurrencia del 75% y precipitación igual o superior a 40 mm, mm.

5.3.3 Estimación de la demanda de agua anual

La demanda de agua es la cantidad de agua necesaria, durante un determinado período de tiempo (diario, mensual, anual), para satisfacer los usos mencionados en la Ley de Aguas Nacionales:

1. Doméstico
2. Público urbano
3. Pecuario
4. Agrícola
5. Uso para la conservación ecológica o uso ambiental
6. Generación de energía eléctrica para servicio público

7. Industrial
8. Acuacultura
9. Generación de energía eléctrica para servicio privado
10. Lavado y entarquinamiento de terrenos
11. Uso para turismo, recreación y fines terapéuticos
12. Uso múltiple
13. Otros.

En este trabajo el objetivo es destinar al agua a tres tipos de uso:

- Doméstico para consumo humano, es decir, satisfacer la necesidad diaria que tiene el cuerpo humano para que pueda cumplir con sus funciones físicas y biológicas.
- Doméstico para uso particular de las personas, del hogar y riego de sus jardines.
- Agrícola para riego en invernaderos.

5.3.3.1 Demanda de agua anual para consumo humano y uso doméstico

Mediante la siguiente metodología se explica cómo se obtuvo la demanda de agua para consumo humano para el sistema de captación del agua de lluvia propuesto para una escuela y la demanda de agua para uso doméstico para un hogar.

La demanda de agua anual se estima mediante:

$$D_{anual} = \sum_{j=1}^{12} D_j \quad (5.40)$$

Dónde:

D_{anual} = Demanda de agua anual, litros.

D_j = Demanda de agua mensual del mes j , ($j = 1,2,3,\dots,12$), litros.

La demanda de agua mensual se obtiene aplicando la expresión siguiente:

$$D_j = N_b * R_b * N_d \quad (5.41)$$

Dónde:

D_j = Demanda de agua mensual del mes j ($j = 1,2,3,\dots,12$), litros.

N_b = Número de beneficiarios, personas.

R_b = Requerimiento de agua por día por beneficiario, litros/persona/día.

N_d = Número de días que se debe cubrir la demanda.

5.3.3.2 Cálculo de consumo de agua en un invernadero

El proceso de uso del agua por los cultivos tiene dos componentes principales: uno debido a las pérdidas por evaporación del suelo y del cultivo, usualmente llamada evapotranspiración del cultivo (Etc) y el otro que incluye todas las pérdidas resultantes de la distribución del agua en el cultivo (Macías, 2009).

Las pérdidas resultantes de la distribución y aplicación del riego se conocen como eficiencia de riego y resulta del producto de la eficiencia de distribución que se considera de 95% al igual que la eficiencia de aplicación en un riego por goteo. Para obtener el requerimiento de riego se emplea la ecuación. 5.42

$$Rr = Lr * Sup \quad (5.42)$$

Rr = Requerimiento de riego, m^3 .

Lr = Lámina de riego, m.

Sup = Superficie de riego, m^2 .

El valor de la lámina de riego necesaria, se estima como:

$$Lr = \frac{Et_c}{Er} \quad (5.43)$$

Dónde:

Lr = Lámina de riego, cm.

Et_c = Evapotranspiración de cultivo, cm.

Er = Eficiencia de riego, adimensional.

La evapotranspiración de cultivo (Et_c) se obtiene al multiplicar la evapotranspiración de referencia (Et_o) por un coeficiente de cultivo (K_c), mismo que depende de la etapa fenológica de dicho cultivo, tal como se indica en la ecuación 5.44.

$$Et_c = Et_o * K_c \quad (5.44)$$

Para estimar la evapotranspiración de referencia dentro de un invernadero se empleó el método propuesto por Stanghellini (1987) hizo una evaluación minuciosa del modelo de Penman-Monteith, revisó la ecuación combinada para representar las condiciones de transpiración en un invernadero. Además, propone un modelo en el que la resistencia estomática (interna) depende de: la radiación solar, el déficit de presión de vapor la hoja, la temperatura foliar y la concentración de bióxido de carbono (Zamarripa et al., 2013).

Esmeral (2011) presenta la fórmula de Stanghellini (1987):

$$Et_o = 2 * IAF * \frac{0.408\Delta(R_n - G) + [(e_s - e_a) * 0.006 * \sigma * (T + 273)^3]}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (5.45)$$

Dónde:

IAF = Índice de área foliar, m^2 (área de hoja) m^{-2} (superficie del suelo).

Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor, $kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$

R_n = Radiación neta en la superficie del cultivo, $MJ \text{ } m^{-2} \text{ día}^{-1}$

G = flujo del calor de suelo, $MJ \text{ } m^{-2} \text{ día}^{-1}$

e_s = Presión de vapor de saturación, kPa

e_a = presión de vapor real kPa

γ = Constante psicrométrica, $kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$

σ = Constante de Stefan-Boltzmann = $4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ } K^{-4} \text{ } m^{-2} \text{ día}^{-1}$

La Ec. 5.45 se elaboró bajo condiciones de velocidad del viento u_2 menores a $1 \text{ m } s^{-1}$, por lo tanto considerar ese valor es muy adecuado para resolver la ecuación. Para solucionar la Ec. 5.54, además, es necesario obtener el valor de los parámetros que se presentan a continuación:

- **Pendiente de la curva de presión de vapor**

$$\Delta = \frac{4098 \cdot \left[0.6108 \cdot \exp\left(\frac{17.27 \cdot T}{T + 237.3}\right) \right]}{(T + 237.3)^2} = \frac{4098 \cdot e^o(T)}{(T + 237.3)^2} \quad (5.46)$$

Dónde:

Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor, $kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$

T = Temperatura media de aire, $^\circ C$

$e^o(T)$ = Presión de vapor a saturación a la temperatura T , kPa

Dónde:

$$e^o(T) = 0.6108 \cdot \exp\left[\frac{17.27 * T}{T + 237.3}\right] \quad (5.47)$$

- Radiación Neta, R_n

Se calcula como:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (5.48)$$

Dónde:

R_{ns} = Radiación neta de onda corta, $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$;

R_{nl} = Radiación neta de onda larga, $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$;

Para R_{ns} se utiliza:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (5.49)$$

Dónde:

α = albedo o coeficiente de reflexión del cultivo = 0.23

R_s = Radiación solar entrante, $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}$, que se genera como:

$$R_s = (0.25 + 0.50 \frac{n}{N}) \cdot R_a \quad (5.50)$$

n/N puede obtenerse como un valor medio para cada mes, quedando n/N_{15} .

Dónde:

n = Número real de horas insolación

N_{15} = Duración del día 15 de cada mes

R_a = Radiación extraterrestre, $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$

Para obtener n/N_{15} es posible emplear el método propuesto por Tejeda (2006), dado que ofrece de la ventaja de que únicamente se requiere el número de días nublados, medio nublados y despejados del mes y esa información es fácil de obtener de la base de datos del ERIC III, y posteriormente emplear la ecuación 5.51.

$$\frac{n}{N_{15}} = 0.31 + 0.48 \left(\frac{DESP + 0.5MNUB}{NUB + MNUB + DESP} \right) \quad (5.51)$$

Dónde:

NUB = Número de días del mes cerrados.

MNUB = Número de días del mes medio nublados.

DESP = Número de días del mes despejados.

La radiación extraterrestre (R_A) se puede obtener a partir del método de Ortiz y Pájaro (2007), tal como se muestra a continuación:

Cuadro 5.6. Modelos de radiación extraterrestre.

MES	MODELO
ENERO	$R_A = 872.72 - 10.511 (L) - 0.0619 (L)^2$
FEBRERO	$R_A = 899.602 - 6.59394 (L) - 0.0956439 (L)^2$
MARZO	$R_A = 911.156 - 1.74545 (L) - 0.119318 (L)^2$
ABRIL	$R_A = 878.348 + 4.11212 (L) - 0.132576 (L)^2$
MAYO	$R_A = 827.229 + 8.13636 (L) - 0.125947 (L)^2$
JUNIO	$R_A = 795.826 + 9.75455 (L) - 0.116477 (L)^2$
JULIO	$R_A = 806.453 + 9.00909 (L) - 0.123106 (L)^2$
AGOSTO	$R_A = 852.912 + 5.50303 (L) - 0.130682 (L)^2$
SEPTIEMBRE	$R_A = 892.229 + 0.136364 (L) - 0.125947 (L)^2$
OCTUBRE	$R_A = 898.73 - 5.78485 (L) - 0.09375 (L)^2$
NOVIEMBRE	$R_A = 874.644 - 10.0242 (L) - 0.0625 (L)^2$
DICIEMBRE	$R_A = 864.364 - 11.7909 (L) - 0.0454545 (L)^2$

Fuente: Ortiz y Pájaro (2007).

Dónde:

R_A = Radiación extraterrestre, cal/cm²/día

L = Latitud del sitio, grados.

Para R_{nl} se utiliza:

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\max, K^4} + T_{\min, K^4}}{2} \right] \cdot (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \cdot \left(1.35 \cdot \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad (5.52)$$

Dónde:

- σ = Constante de Stefan-Boltzmann = $4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$
 $T_{\max, K}$ = Temperatura máxima absoluta, $K = ^\circ\text{C} + 273.16$
 $T_{\min, K}$ = Temperatura mínima absoluta, $K = ^\circ\text{C} + 273.16$
 e_a = Presión de vapor real, kPa

$$e_a = 0.6108 \cdot \exp \left[\frac{17.27 \cdot (T_{\min} - 2.5)}{(T_{\min} - 2.5) + 237.3} \right] \quad (5.53)$$

Con:

T_{\min} = Temperatura mensual mínima, $^\circ\text{C}$

R_s/R_{so} = Radiación relativa de onda corta, valores ≤ 1.0

R_{so} = Radiación en un día despejado, $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$

$$R_{so} = [0.75 + 2(z) \cdot 10^{-5}] \cdot R_a \quad (5.54)$$

Con:

z = Altitud del sitio, m

R_a = Radiación extraterrestre, $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$

- **Flujo de Calor del Suelo, G**

A nivel mensual se asume una capacidad calorífica constante del suelo igual a $2.1 \text{ MJ m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ y una profundidad media.

La fórmula más empleada es:

$$G_{\text{mes}, i} = 0.14 (T_{\text{mes}, i} - T_{\text{mes}, i-1}) \quad (5.55)$$

Dónde:

$T_{\text{mes}, i}$ = Temperatura media del aire en el mes i , °C

$T_{\text{mes}, i-1}$ = Temperatura media del aire en el mes $i - 1$, °C

- **Déficit de Presión de Vapor**

$$e_s = \frac{e^{\circ}(T \text{ max}) + e^{\circ}(T \text{ min})}{2} \quad (5.56)$$

Dónde:

$e^{\circ}(T \text{ max})$ = Presión de vapor a saturación a $T \text{ max}$, kPa;

$e^{\circ}(T \text{ min})$ = Presión de vapor a saturación a $T \text{ min}$, kPa;

- **Presión de vapor real**

$$e_a = e_o(T \text{ rocío}) = e_o(T_{\text{min}} - 2.5) \quad (5.57)$$

- **Constante Psicrométrica, γ**

$$\gamma = \frac{c_p \cdot P}{\varepsilon \cdot \lambda} \times 10^{-3} = 0.00163 \cdot \frac{P}{\lambda} \quad (5.58)$$

Dónde:

c_p = Calor específico del aire = $1.013 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

ε = Relación molecular del vapor de agua/aire seco = 0.622

P = Presión atmosférica, kPa, se puede estimar con:

$$P = 101.3 \cdot \left(\frac{293 - 0.0065 \cdot z}{293} \right)^{5.26} \quad (5.59)$$

Con:

z = Altitud, m

λ = Calor latente de vaporización, MJkg¹, se calcula con:

$$\lambda = 2.501 - (2.361 \times 10^{-3}) \cdot T \quad (5.60)$$

Dónde:

T = Temperatura del aire, °C;

- **El índice de área foliar**, según Bontsema et al., 2007, puede ser obtenida al despejarse de:

$$R_n = 0.86 * (1 - e^{-0.7 * IAF}) \quad (5.61)$$

5.3.4 Determinación del área de captación

La superficie sobre la cual cae el agua de lluvia que será conducida, almacenada, tratada y destinada a algún uso se conoce como el área de captación y es parte del sistema SCALL. Las superficies o áreas de captación son, por lo regular, techos y laderas. Esta superficie debe cumplir con los requisitos siguientes:

- Tener una pendiente que facilite la conducción del agua, aunque para el diseño del SCALL solo se considera la proyección horizontal.
- No desprender olores, colores ni ningún contaminante, con la finalidad de no empobrecer su calidad o volverla no apta, en este caso, para consumo humano.
- Ser altamente impermeable, preferentemente.

La ecuación para calcular el área de captación es:

$$A_{ec} = \frac{D_{anual}}{PN_{diseño}} \quad (5.62)$$

Dónde:

A_{ec} = Área efectiva de captación, en m^2 .

D_{anual} = Demanda de agua anual, en m^3 .

$PN_{diseño}$ = Precipitación neta total de diseño con una probabilidad de ocurrencia del 75%, m.

5.3.5 Diseño del sistema de conducción

El sistema de conducción se compone de las canaletas y la tubería de bajada, el diseño se de estos componentes se presenta a continuación.

5.3.5.1 Diseño de las canaletas

Primero debe conocerse la cantidad total de agua que cae sobre el área efectiva de captación en un determinado tiempo conocido como intensidad de precipitación. La intensidad de precipitación se determina siguiendo la metodología presentada en el punto 5.3.1.6, y el área de efectiva de captación se obtiene a partir de la ecuación 5.62. El volumen que cae en un determinado tiempo es el gasto que se espera para un período de retorno determinado y para obtenerlo se emplea la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{5}{18} (I * A_{ec}) \quad (5.63)$$

Dónde:

Q = Gasto que se espera para un período de retorno determinado, en lps.

I = Intensidad de lluvia para un período de retorno determinado, en m/hora

A_{ec} = Área efectiva de captación, en m^2 .

$\frac{5}{18}$ = Factor de conversión de m^3 /hora a lps.

Una vez conocida la cantidad de agua que se espera caiga sobre el área de captación en un determinado período de tiempo, es necesario calcular las dimensiones de la canaleta para que transporte esa agua. Para determinar el tamaño de la tubería que permita conducir el gasto de agua captada, calculado con la ecuación 5.63, se emplea la ecuación de continuidad:

$$Q = A * v \quad (5.64)$$

Dónde:

Q = Gasto que se espera para un período de retorno determinado (2 años), en lps.

A = Área de la sección de conducción, en m^2 .

v = Velocidad del caudal, en m/s.

El área de la sección dependerá de la forma de la tubería o canaleta de conducción y la velocidad del caudal se obtiene mediante la ecuación de Manning.

$$v = \frac{1}{n} r^{2/3} S^{1/2} \quad (5.65)$$

Dónde:

v = Velocidad del caudal, en m/s.

n = Coeficiente de rugosidad. Depende del material con el que esté revestida la tubería o canaleta.

r = Radio hidráulico (igual al área hidráulica entre el perímetro mojado), en metros.

Para solucionar la ecuación 5.65 bastará con proponer dimensiones de tubería hasta que el gasto de la ecuación. 5.65 sea igual o mayor al obtenido con la ecuación 5.64.

5.2.5.2 Diseño de las tuberías de bajada

El número de bajadas que se recomiendan es una por cada 100 metros cuadrados. En el caso de áreas mayores se tiene que instalar una a cada 5 metros y máximo una a cada 9 metros de distancia (Juan, 2011). Para seleccionar el diámetro de la tubería se emplea la ecuación 5.66 que fue presentada en el XXIV Diplomado Internacional de Captación del Agua de Lluvia 2015.

$$D = 2 \sqrt{\frac{Q}{\pi * v}} \quad (5.66)$$

Dónde:

D = Diámetro de las tuberías de bajada (m).

Q = Gasto que debe conducir la canaleta (m^3), obtenida con la ecuación 5.64.

v = Velocidad del agua (m/s), obtenida con la ecuación 5.65.

5.3.6 Diseño del sistema de almacenamiento (cisterna)

El sistema de almacenamiento, en este caso la cisterna es la parte del sistema de captación del agua de lluvia más costosa, por lo que su dimensionamiento debe realizarse con sumo cuidado, buscando no encarecer demasiado el sistema.

Para el diseño del almacenamiento dos técnicas son las más conocidas. La primera de ellas es propuesta por el CIDECALLI y la segunda se basa en un balance de

masas, esta última considera el tiempo que deja de llover por lo que el agua abastecida tiene que estar previamente captada y almacenada,

De acuerdo al CIDECALLI, con el objeto de asegurar el abastecimiento de agua a la población propone la ecuación 5.67 para obtener el volumen de la cisterna.

$$V_{cisterna} = D_j * M_{sequía+2} \quad (5.67)$$

Dónde:

$V_{cisterna}$ = Volumen mínimo de la cisterna, m³.

D_j = Demanda mensual, m³ mes⁻¹.

$M_{sequía+2}$ = Meses con sequía más 2.

Para el segundo método se hace un balance de entradas (precipitación mensual) y salidas (demanda mensual) obteniéndose sus diferencias acumuladas y el máximo valor se toma como el volumen mínimo requerido para el sistema de almacenamiento.

5.3.7 Diseño del sistema de purificación

El tipo de sistema de purificación es importante para consumo humano y uso doméstico pues debe garantizarse que el agua que se ingiera cumpla con los límites permisibles indicados en la NOM-127-SSA1-1994 que en presente trabajo puede verse en el Cuadro 4.6. Para el caso del uso del agua para riego de un invernadero no se requiere un sistema de purificación, pues la calidad del agua se manejará dentro del invernadero como mejor convenga a las necesidades hídricas y nutricionales del cultivo.

Métodos de tratamiento para obtener agua potable y purificada.

Cloración. Puede ser con hipoclorito de sodio al 13% o dióxido de cloro al 8%. El cloro elimina la mayor parte de las bacterias, hongos, virus, esporas y algas presentes en el agua.

Filtro tamíz o Speedy. Elimina sólidos, arena, tierra, lodo, arcilla, etc., hasta un tamaño de 100 μm .

Filtro lecho profundo o de arena. Retiene impurezas (sólidos) de hasta 30 μm .

Filtro de carbón activado. Elimina cloro, sabores, olores y una gran variedad de contaminantes orgánicos como: pesticidas, herbicidas, plaguicidas, metilato de mercurio e hidrocarburos halogenados. El equipo de filtración por carbón activado tiene un costo aproximado de \$1,800 (incluye un tanque de fibra de vidrio, una válvula de control y el filtro), y puede durar hasta 6 años.

Filtro suavizador o de resinas catiónicas. Remueve minerales disueltos como hierro, calcio y magnesio.

Osmosis inversa. Realiza un tratamiento desalinizador físico, químico y bacteriológico del agua.

Pulidor con microfiltro. Elimina los sedimentos de hasta 10 μm .

Luz ultravioleta. Es un método físico de desinfección del agua que no altera las propiedades fisicoquímicas del agua.

Ozonificación. El ozono destruye a los microorganismos en un proceso denominado destrucción de celda.

5.3.9 Costo del agua subterránea y del agua de lluvia

En el presente tema se explica la metodología empleada para obtener el costo por metro cúbico tanto del agua subterránea como del agua captada.

5.3.9.1 Costo por metro cúbico del agua subterránea

Costo Unitario

Para obtener el costo unitario de la extracción del agua subterránea y operación de cada uno de los pozos se empleó la metodología propuesta por Cruz (2009) donde se dividen los costos totales del pozo entre el volumen extraído durante el año, tal como se muestra en la ecuación 5.68.

$$\text{Costo por metro cúbico} \left(\frac{\$}{\text{m}^3} \right) = \frac{C.T.}{V_{\text{anual}}} \quad (5.68)$$

Dónde:

$C.T.$ = Costos totales, pesos.

V_{anual} = Volumen extraído durante un año, m^3 .

El **volumen anual extraído** (V_{anual}) puede obtenerse si se conoce el gasto del pozo y el tiempo de operación.

$$V = Q * t \quad (5.69)$$

Dónde:

V = Volumen anual, m^3 .

Q = Gasto diario, $\text{m}^3/\text{día}$.

t = Tiempo de operación al año, días.

Los **costos totales** ($C.T.$) son la suma de los costos fijos totales y los costos variables totales.

$$C.T. = \sum C.F + \sum C.V \quad (5.70)$$

Dónde:

$C.T.$ = Costos totales, pesos.

$C.F$ = Costos fijos, pesos.

$C.V$ = Costos variables, pesos.

Los **costos fijos** incluyen la inversión (en este caso la perforación y equipamiento del pozo), depreciaciones o amortizaciones y seguros e impuestos.

- Los costos de inversión anual se obtienen a partir de:

$$CI = \frac{(V + V \text{ residual}) * TMAR}{2} \quad (5.71)$$

Dónde:

CI = Costo de inversión anual (de la perforación o equipamiento), pesos.

V = Valor inicial de la perforación o del equipamiento, pesos.

$V \text{ residual}$ = Valor residual de la perforación o del equipamiento, pesos.

$TMAR$ = Tasa de interés, decimal.

El valor inicial tanto de la perforación como del equipamiento se puede obtener de una cotización. El valor residual es el valor que podría tener el activo al final de la vida útil, en el caso de la perforación el valor residual se considera cero y para el equipo de bombeo es el 10% de su valor inicial. La TMAR es la suma de las tasas de interés de CETES, inflación y % de seguridad.

El costo anual total de inversión es la suma de la inversión anual de la perforación más la inversión anual del equipamiento.

- Los costos de depreciación se obtienen con la siguiente ecuación.

$$Da = \frac{V - V \text{ residual}}{Vu} \quad (5.72)$$

Dónde:

Da = Depreciación anual (de la perforación o equipamiento), pesos.

V = Valor inicial de la perforación o del equipamiento, pesos.

$V_{residual}$ = Valor residual de la perforación o del equipamiento, pesos.

Vu = Vida útil (del pozo o del equipo de bombeo), años.

La vida útil de una perforación se estima en 30 años y la del equipo de bombeo de 10.

El costo anual total de depreciación es la suma de la depreciación anual de la perforación más la depreciación anual del equipamiento.

Los **costos variables** incluyen costos de consumos (en este caso el costo de consumo de energía eléctrica), operación (mano de obra) y mantenimiento del equipo.

- Costos por mano de obra.

Se obtienen según la cantidad de horas (jornal) que haya trabajo y el salario es, por lo regular, el de un ayudante general.

- Costos por mantenimiento del equipo.

Se considera como el 10% del valor del equipamiento del equipo.

- Costos de consumo de energía eléctrica.

Estos costos se pueden obtener directamente de los recibos emitidos por CFE o calcularlos conociendo el volumen anual de extracción, la demanda de energía y las tarifas eléctricas, como se muestra en la ecuación 5.73.

$$Costo_{EE} = P_{cm} * t_c * T_e \quad (5.73)$$

Dónde:

$Costo_{EE}$ = Costo de la energía eléctrica por kilowatt-hora, pesos.

P_{cm} = Potencia consumida por el motor, kilowatt-hora.

t_c = Tiempo de consumo, horas.

T_e = Tarifa eléctrica, pesos.

Potencia consumida por el motor

Existen varias formas de obtener la potencia consumida por el motor pero una de las más sencillas es a partir de los datos de la placa del motor y mediciones directas de intensidad de corriente y tensión, como se muestra a continuación:

$$P_{cm} = \frac{I_m T_m}{I_p T_p} HP_p \quad (5.74)$$

Dónde:

P_{cm} = Potencia consumida por el motor, HP.

I_m = Intensidad de corriente promedio de las fases medidas, Amperes.

T_m = Tensión promedio medida, volts.

I_p = Intensidad de corriente de la placa del motor, Amperes.

T_p = Tensión de la placa de motor, volts.

HP_p = Potencia nominal del motor leída de la placa, HP.

Otro método igual de sencillo es a partir del factor de potencia (f_p), dato que viene especificado en los recibos de luz de la CFE. Para aplicar este segundo método se emplea la ecuación 5.75.

$$P_{cm} = \frac{\sqrt{n} f_p I_m T_m}{745} \quad (5.75)$$

Dónde:

P_{cm} = Potencia consumida por el motor, HP.

I_m = Intensidad de corriente promedio de las fases medida, Amperes.

T_m = Tensión promedio medida, volts.

\sqrt{n} = Número de fases.

f_p = Factor de potencia.

Para hacer la conversión de unidades de la potencia consumida por el motor de HP a kilowatt-hora y viceversa se emplea la siguiente relación:

$$1 \text{ HP} = 0.746 \text{ kW}$$

Tiempo de consumo

Se refiere al tiempo, en horas, que la bomba está funcionando para extraer el agua del subsuelo. En el caso del pozo para uso doméstico trabaja 22 horas los 365 días del año.

Tarifa eléctrica

Las tarifas son las establecidas por la Comisión Federal de Electricidad y dependen del uso para el cual se destina el agua extraída. En el caso del agua que se destina para agua potable de servicio público corresponde a la tarifa específica 6, esta tarifa se compone de un cargo fijo, independiente de la energía consumida, y de un cargo adicional que depende de la energía consumida por cada kilowatt-hora. En el caso de agua destinada a riego aplican las tarifas 9, 9M, 9-CU y 9N.

Cuadro 5.7. Tarifas eléctricas para agua potable y riego.

TARIFA 6 Servicio para bombeo de aguas potables o negras, de servicio público	
\$ 1.839	Por cada kilowatt-hora.
\$ 335.06	Cargo fijo, independiente de la energía consumida.
TARIFA 9 Servicio para bombeo de agua para riego agrícola en baja tensión, diciembre 2015	
\$ 6.308	Por cada uno de los primeros 5,000 (cinco mil) kilowatts-hora.
\$ 7.022	Por cada uno de los siguientes 10,000 (diez mil) kilowatts-hora.
\$ 7.664	Por cada uno de los siguientes 20,000 (veinte mil) kilowatts-hora.
\$ 8.412	por cada kilowatt-hora adicional a los anteriores
TARIFA 9M Servicio para bombeo de agua para riego agrícola en baja mediana, diciembre 2015	
\$ 6.308	Por cada uno de los primeros 5,000 (cinco mil) kilowatts-hora.
\$ 7.081	Por cada uno de los siguientes 10,000 (diez mil) kilowatts-hora.
\$ 7.752	Por cada uno de los siguientes 20,000 (veinte mil) kilowatts-hora.
\$ 8.459	por cada kilowatt-hora adicional a los anteriores
TARIFA 9-N Tarifa de estímulo nocturna para bombeo de agua para riego agrícola, diciembre 2014	
\$ 0.540	Por cada kilowatt-hora.
TARIFA 9-CU Tarifa de estímulo para bombeo de agua para riego agrícola con cargo único, diciembre 2014	
\$ 0.520	Por cada kilowatt-hora. No disponible para el año 2015.

Fuente: Comisión Federal de Electricidad (2015).

5.3.9.2 Costo por metro cúbico del agua de lluvia captada

El método es similar al empleado en el tema anterior para conocer el costo por metro cúbico de agua captada, es decir se emplea la ecuación 5.68. Debe considerarse el costo del sistema de captación del agua de lluvia y el volumen captado según el uso que se le dará al agua.

6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente tema se muestran los resultados obtenidos al aplicar la metodología presentada en el tema 5, se analizan y discuten los mismos.

6.1 ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN

A continuación se presentan los resultados del análisis que se realizó a los datos de precipitación con la finalidad de emplearlos posteriormente en el diseño del Sistema de Captación del Agua de Lluvia.

6.1.1 Estimación de los datos faltantes

De las cinco estaciones climatológicas que se localizan dentro del límite territorial del municipio de Calpulalpan, Tlaxcala y que están actualmente operando, la más cercana al área de estudio es la Estación Climatológica 29035 Calpulalpan. El Servicio Meteorológico Nacional (2015) reporta datos de la estación 29035 desde el 1 de octubre de 1947 hasta el 31 de diciembre de 2013. Con la finalidad de analizar datos de años completos se consideraran sus registros a partir de 1 de enero de 1948 hasta el 31 de diciembre de 2013. Sin embargo distribuidos a lo largo de estos años se tienen ciento treinta datos diarios faltantes y veintinueve meses completamente sin datos, que deben estimarse.

Cuando un mes no presentaba información de precipitación de algunos días se empleó la estimación de datos diarios faltantes, y cuando el mes completo estaba sin datos entonces se empleó el método de estimación de datos mensuales faltantes.

En el Cuadro 6.1 se presentan los datos de cada estación que fueron empleados para la estimación de los datos faltantes.

Cuadro 6.1. Datos de las estaciones climatológicas para estimar datos faltantes.

Clave	Estación	Período de registro	Altura (msnm)	Precipitación media (mm)	Distancia a la estación 29035 (km)
29035	Calpulalpan	01/10/1947 – 31/12/2013	2,587.0	663.0	
29019	San Antonio	01/01/1969 – 31/12/2006	2,615.0	642.0	3.5
29034	Zoquiapan	01/04/1966 – 31/12/2011	2,532.0	554.6	9.0
29006	Cuauila	01/07/1966 – 31/10/2005	2,550.0	643.3	9.2
29025	San Marcos	01/08/1996 – 31/12/2013	2,601.0	659.3	7.2
15210	San Juan T.	01/01/1976 – 31/12/2012	2,750.0	560.6	18.2
15135	Xochihuacan	01/01/1969 – 31/12/2011	1,355.0	651.9	12.4
13024	Potrerito	13/11/1969 – 31/12/2012	2,620.0	604.6	8.2
13138	Emiliano Z.	01/01/1982 – 31/12/2012	2,490.0	526.1	8.1
29162	Benito J.	01/01/1988 – 31/12/2013	2,537.0	631.8	14.3
29024	Sanctorum	01/07/1966 – 30/06/2009	2,740.0	717.0	14.2
29016	Nanacamilpa	01/01/1985 – 31/12/2012	2,720.0	749.5	10.8
13002	Apan	01/01/1986 – 31/12/2012	2,496.0	618.2	18.0

Fuente: Elaboración propia a partir de información del Servicio Meteorológico Nacional 2015.

Tomando en cuenta la estimación de los datos faltantes se obtuvo la información presentada en el Cuadro 6.2.

Cuadro 6.2. Estadísticos de precipitación de la estación 29035 Calpulalpan.

	Precipitación media anual (mm)	Desviación estándar de la precipitación anual (mm)
Normal Climatológica¹	663.0	
Estimados²	666.2	127.5

Fuente: Elaboración propia.

¹Datos reportados por el Servicio Meteorológico en la Normal Climatológica con período 1951-2010.

²Datos estimados a partir de la información de Climatología Diaria del Servicio Meteorológico Nacional a julio de 2014 y considerando datos faltantes estimados.

En los Anexos 1 y 2 se presentan los datos diarios y mensuales estimados, respectivamente, y los valores de los datos de precipitación a partir de los cuales se hizo la estimación.

6.1.2 Determinación del error estadístico.

Entre más grande es una muestra es más pequeño el error al realizar estimaciones. En este caso se cuenta con 66 años de registro de lluvia, por lo tanto resultaría conveniente conocer el error con el que se está trabajando. A partir de la ecuación 5.3 y si se considera un nivel de confianza del 95% ($z=1.96$) y que la precipitación media anual estimada de la estación 29035 Calpulalpan es de 666.2 mm, entonces el error es de 30.8 mm de lluvia entre la media de precipitación anual real y la media de precipitación anual muestral. Este valor de error indica que la precipitación de la estación Calpulalpan es de 666.2 ± 30.8 mm.

En el Cuadro 6.3 se presenta el error que se obtiene considerando una cantidad diferente de años. Es notorio como el error se va incrementando conforme se considera un menor número de años del registro. Siempre se toman en cuenta los últimos registros.

Cuadro 6.3. Variación del error según años de registro.

Número de años de registro	Error (mm)	Número de años de registro	Error (mm)
66	30.8	20	55.9
50	35.4	10	79.1
40	39.5	5	111.8
30	45.6		

Fuente: Elaboración propia.

El emplear todos los años de registro de precipitación para obtener la precipitación neta de diseño reduce el error significativamente, dado que el error entre la precipitación media real y la estimada es de ± 30.8 mm, mientras que si se emplean únicamente 20 o 10 años de registro el error es de 55.9 y 79.1 mm, respectivamente. De hecho se observa que considerar sólo diez años de registro duplica el error.

6.1.3 Estimación de la precipitación promedio sobre el área de estudio.

Para obtener la precipitación media anual del municipio de empleo el método de polígonos de Thiessen, resultando de 632.7 milímetros.

6.1.4 Estimación de la probabilidad de lluvia anual

Los datos de precipitación media anual de 1948 a 2013 de la estación 29035 Calpulalpan se ajustaron a las funciones de distribución de probabilidad Normal, Galton, Gamma Incompleta, y Gumbel, mismas que se presentan en el Anexo 3. Posteriormente se realizaron dos pruebas de bondad de ajuste, la prueba Kolmogorov-Smirnov y la prueba Smirnov con la intención de determinar cuál es la función a la que mejor se ajustan los datos de precipitación de la estación Calpulalpan. Las pruebas de bondad de ajuste se presentan en el Anexo 4.

En base a los resultados de las dos pruebas de bondad de ajuste realizada se comprobó que los datos de registro de precipitación se ajustan bien a las cuatro funciones de distribución. El resultado de la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov con una $d_{\text{tablas}} = 0.167$ indica que la función que mejor se ajusta es la Log-Normal, y el resultado de la prueba de bondad de ajuste de Smirnov indica que la función que mejor se ajusta es la Gamma. Sin embargo la función de distribución elegida es la función normal, dado que datos de

precipitación diaria existen valores cero que imposibilitan usar la funciones que emplean logaritmos, y porque en ambas pruebas de bondad de ajuste la distribución normal resultó como una función de buen ajuste.

En el Cuadro 6.4 se muestran los resultados de las pruebas de bondad de ajuste y el orden de prioridad del 1 al 4 siendo el 1 el mejor ajuste y el 4 el de menor, es decir, la función a la que se ajustan mejor los valores de precipitación tiene el valor 1 en el orden de prioridad.

Cuadro 6.4. Resultados de las pruebas de bondad de ajuste.

DISTRIBUCIÓN	D _{MAX}	AJUSTE EN KOLMOGOROV-SMIRNOV	ORDEN DE PRIORIDAD EN KOLMOGOROV-SMIRNOV	Nw ² cal	AJUSTE EN SMIRNOV	ORDEN DE PRIORIDAD EN SMIRNOV
Normal	0.083	Bueno	3	0.083	Bueno	2
Log-Normal	0.080	Bueno	1	0.080	Bueno	3
Gamma	0.082	Bueno	2	0.082	Bueno	1
Gumbel	0.085	Bueno	4	0.085	Bueno	4

Fuente: Elaboración propia.

Tomando en cuenta que la distribución a la que se ajustan los registros de precipitación es la Normal se obtuvo para cada mes la precipitación mínima que se tiene con una probabilidad de ocurrencia del 75%. En el Cuadro se muestra la precipitación que ocurre en Calpulalpan cada mes con una probabilidad del 75% ($z = -0.674$).

Cuadro 6.5. Precipitación mensual en Calpulalpan, Tlaxcala con P_{75%}.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
MEDIA	13.9	13.4	16.4	33.3	62.3	117.9	117.7	116.1	99.4	50.8	18.5	7.1
DESV. EST	32.4	25.7	16.8	23.7	31.2	59.0	40.0	54.8	52.0	34.4	27.0	10.9
Precipitación con P 75%	0	0	5.1	17.3	41.3	78.1	90.7	79.2	64.4	27.6	0.3	0

Fuente: Elaboración propia.

6.1.5 Período de retorno

De acuerdo con Juan (2011) un sistema de captación del agua de lluvia adecuado es aquel que se diseña con un período de retorno mayor a 1.053 y menor a 2 años. En este trabajo se trabajó con probabilidad de 75% de ocurrencia de un evento, por lo tanto el período de retorno es de 1.3 años.

6.1.6 Estimación de la intensidad de precipitación en un período de retorno

Para obtener la intensidad de precipitación se empleó el mapa que publica la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2015). En la Figura 6.1 se muestra el mapa de isoyetas para el Estado de Tlaxcala con un período de retorno de 10 años y una duración de 60 minutos. Como puede notarse el sitio de estudio cuenta con una intensidad de precipitación de 41 mm/hora.

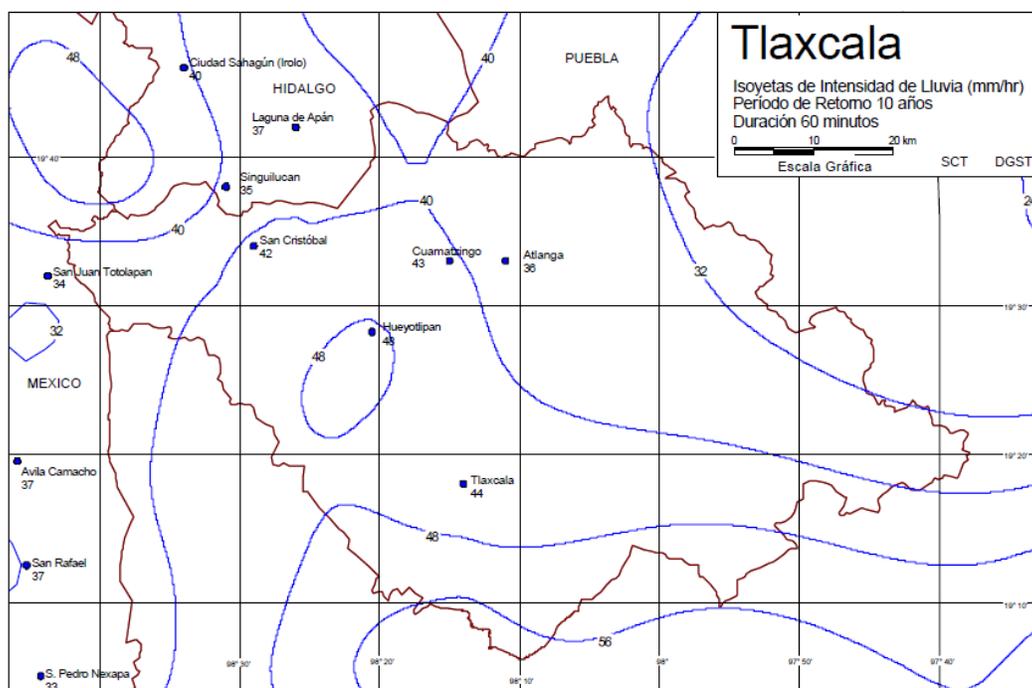


Figura 6.1. Isoyetas de intensidad de precipitación del Estado de Tlaxcala.
 Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2015).

6.1.7 Determinación de efecto de cambio climático

A continuación se presentan los resultados de los métodos empleados para saber si existe un cambio en la precipitación del municipio de Calpulalpan, Tlaxcala.

A. Porto de Carvalho

Con la finalidad de detectar un efecto del cambio climático en la precipitación de Calpulalpan, Tlaxcala se generó una serie de tiempo construida a partir de los datos de precipitación media anual de la estación climatológica 29035 desde el año 1954 hasta el año 2013. Para identificar una tendencia se crearon grupos de precipitación media cada 10 años. El resultado se muestra en la Figura 6.2.

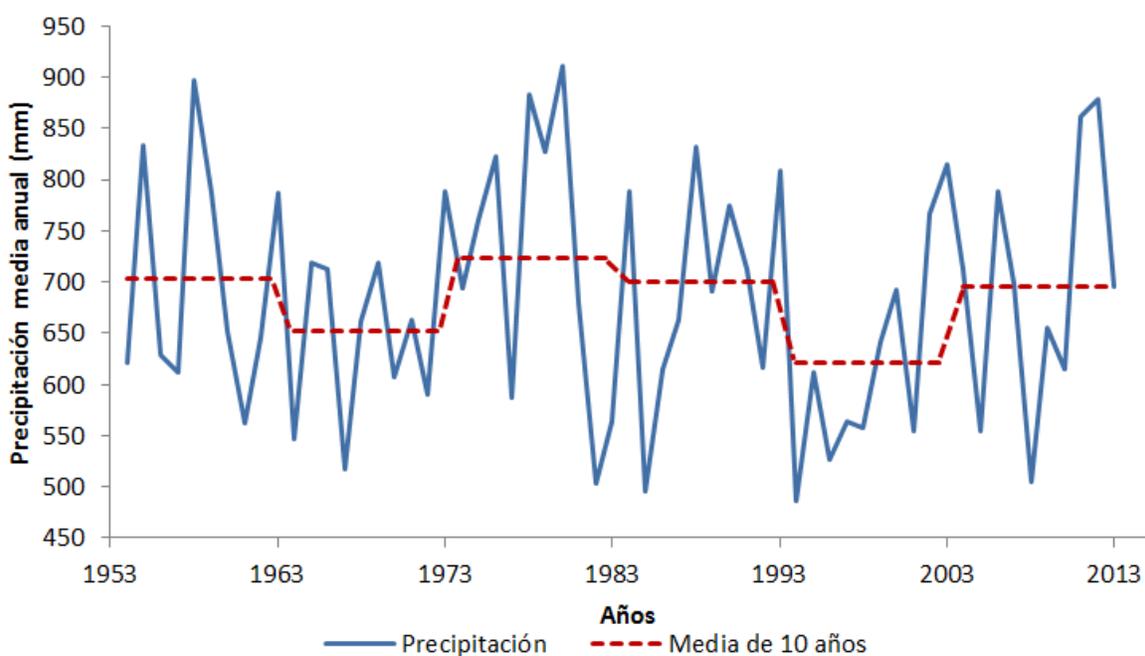


Figura 6.2. Medias decenales de la precipitación estación 29035 Calpulalpan.

En la Figura se observa que la cantidad de precipitación media no presenta cambios visibles significativos. Se observan fluctuaciones como que 1963 la

precipitación disminuye pero vuelve a aumentar en 1973, ciclo que se repite en otros años como en 1993 y 2004, por lo tanto las variaciones que se presentan pueden ser consideradas como parte del comportamiento propio de la precipitación.

Adicionalmente se elaboró una gráfica con los registros de precipitación máxima diaria que se han presentado en Calpulalpan, Tlaxcala a través de los años, tal y como se muestra en la Figura 6.3.

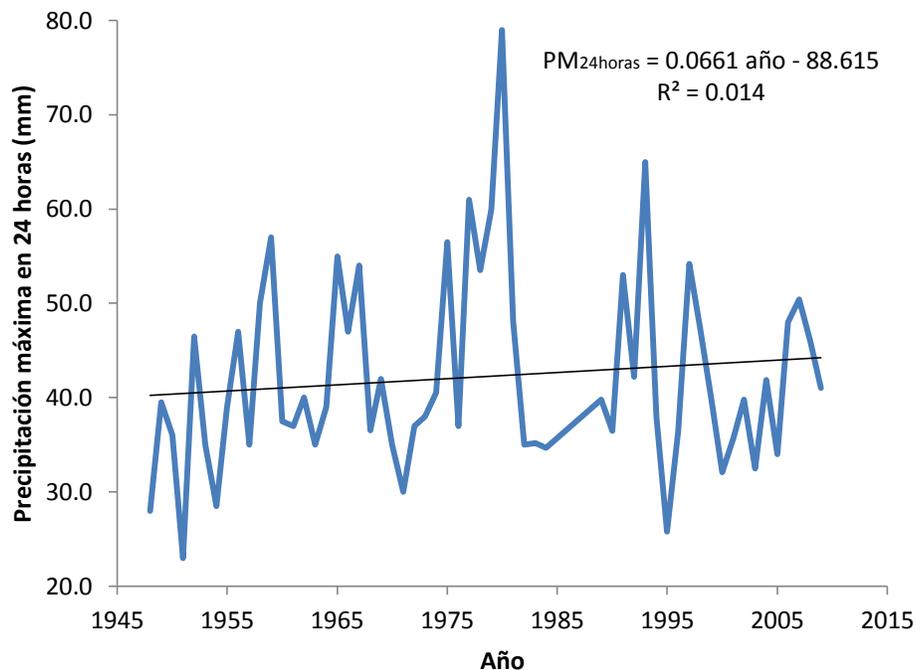


Figura 6.3. Precipitación Máxima Diaria de la estación 29035 Calpulalpan.

En la Figura 6.3 se observa que al ajustar los datos de precipitación máxima diaria a una ecuación lineal la tendencia es positiva indicando que está va en aumento a lo largo del tiempo, pero en realidad el ajuste no es nada bueno, lo que implica que no se observa que la precipitación máxima en 24 horas haya aumentado ni disminuido considerablemente en Calpulalpan, Tlaxcala desde el año 1948.

B. Análisis de Varianza

A partir del Análisis de Varianza realizado a los datos de precipitación media mensual de la estación 29035 Calpulalpan de los últimos 66 años de registro que presenta el Servicio Meteorológico Nacional en la Normal Climatológica de la estación y considerando un Diseño en Bloques Completamente Aleatorizados se obtuvieron los resultados presentados en el Cuadro 6.6.

Cuadro 6.6. Resultados del Análisis de Varianza.

Fuente	G.L.	SumCuad	CuadMed	F-calc	F-5%	F-1%	Prob
Tratamientos	65	88,121.31	1,355.71	0.978	1.325	1.484	0.5281
Bloques	11	1,496,745.47	136,067.77	98.147	1.802	2.273	8.2E-135
Error	715	991,255.45	1,386.37				
Total	791	2,576,122.23					

Fuente: Elaboración propia.

Al 1 y al 5% de significancia existe diferencia significativa entre bloques lo que era de esperarse dado que la precipitación varía cada mes a lo largo de un año, presentándose meses más húmedos (lluviosos) que otros. Sin embargo no existe diferencia significativa entre tratamientos, lo que implica que no ha habido una variación importante en la cantidad de lluvia precipitada en Calpulalpan, Tlaxcala desde hace 66 años que se tiene registro.

6.3 ESTIMACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL NETA DE DISEÑO

En el Cuadro 6.7 se presentan los resultados obtenidos con cada metodología.

Cuadro 6.7. Resultados de precipitación pluvial neta de diseño.

METODOLOGÍA	PRECIPITACION NETA DE DISEÑO (mm)
CIDECALLI-CP	375.7
UNATSABAR	591.1
PROPUESTA	324.1

Fuente: Elaboración propia.

Para obtener la precipitación neta de diseño con la metodología propuesta por el CIDECALLI-CP se consideró la precipitación media mensual de los últimos 10 años de registros para la estación meteorológica 29035 Calpulalpan (del año 2004 al año 2013). Se tomó un coeficiente de escurrimiento de 0.85 perteneciente al techo de metal y el coeficiente de captación del 85% (0.85) que propone esta metodología. Para obtener la precipitación neta total se sumó la precipitación de aquellos meses que después de ser afectados tanto por el coeficiente de escurrimiento como por el de captación su precipitación era superior a los 40 milímetros.

Para obtener la precipitación neta de diseño con la metodología UNATSABAR se obtuvo la precipitación media mensual de los últimos quince años de registros (del año 1999 al año 2013), y posteriormente se multiplicó cada media mensual por el coeficiente de escurrimiento correspondiente al techo de metal y se sumaron los resultados de cada mes.

Finalmente se obtuvo la precipitación media mensual con la metodología propuesta. Tomando en cuenta que la distribución a la que se ajustan los registros de precipitación es la Normal se obtuvo para cada mes la precipitación que se tiene con una probabilidad de ocurrencia del 75%, y de acuerdo con Anaya (2011) quién no recomienda considerar precipitaciones mensuales menores de 40 mm (pues la cantidad y calidad del agua serían muy bajas), para el diseño del SCALL

se consideran aquellos meses con precipitación igual o mayor a 40 mm, esos meses son junio, julio, agosto y septiembre.

En este trabajo en particular para el diseño del SCALL, por recomendación en base a la experiencia del CIDECALLI, también es considerada la lluvia de los meses de mayo y octubre, que a pesar de ser inferiores a los 40 mm recomendados, ayudará para que el volumen de la cisterna no sea tan grande, evitando encarecer el SCALL.

Para obtener la precipitación neta de cada mes se consideró un coeficiente de escurrimiento de 0.85, dado que el área de captación es una cubierta de metal. Finalmente se obtuvo una precipitación neta total de diseño de 324.1 mm, que comparado con la precipitación media del lugar (632.7 mm) representa un 51%.

Cuadro 6.8. Precipitación media de diseño.

Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Precipitación (85%)	0	0	0	17.3	41.3	78.1	90.7	79.2	64.4	27.6	0	0
PNj diseño con Ce	0	0	4	14.7	35.1	66.4	77.1	67.3	54.7	23.5	0	0
PNj diseño					35.1	66.4	77.1	67.3	54.7	23.5		

Fuente: Elaboración propia.

Al estar considerando una probabilidad de lluvia superior al 50% (la media) se optó por ya no considerar el coeficiente de captación que se recomienda en la metodología CIDECALLI-CP.

Para obtener la precipitación total de cada mes con una probabilidad de ocurrencia del 75% se emplearon los valores de los 66 años de registro de la estación Calpulalpan, pues no se observó ningún efecto de cambio climático considerable, razón por la cual otras metodologías proponen emplear únicamente los registros de los últimos 10 o 15 años.

Emplear la metodología propuesta redujo la cantidad de lluvia anual estimada en un 45% respecto a la metodología UNATSABAR y en un 14% respecto a la metodología CIDECALLI.

La precipitación neta de diseño obtenida con la metodología propuesta es de 324.1 mm, misma que comparada con la precipitación media del lugar representa un 51%, lo que implica una mayor seguridad de tener cada año la cantidad de lluvia calculada.

6.4 ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA

La demanda de agua se estimó para los tres sistemas de captación del agua de lluvia propuestos. En el Cuadro 6.9 se resumen los resultados de demanda para cada uso del agua.

Cuadro 6.9. Demanda de agua por uso.

Uso del agua	Demanda de agua anual (m ³)
Humano	330
Doméstico	146
Riego	1,575

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se describe la estimación de la demanda de agua para cada uno de los tres casos en particular.

6.4.1 Demanda de agua para consumo humano en una escuela.

El agua de lluvia captada se pretende usar para satisfacer la necesidad diaria que tiene el cuerpo humano, para cumplir con sus funciones físicas y biológicas, de una población de estudiantes de secundaria.

Hernández, et. al. (2012), citando a Bourgues (2009), indica que la ingesta diaria sugerida de consumo de agua total en adolescentes (14 – 18 años) es de 2,781 y 2, 490 mililitros para hombres y mujeres, respectivamente. Por lo tanto para el diseño del SCALL se considerará satisfacer un poco más del 50% de su requerimiento diario proveyendo 1.5 litros/persona/día.

Teniendo una población total de 1000 personas en la institución incluyendo alumnado, docentes y administrativos se requiere satisfacer 1,500 litros/día. Finalmente se considera que un ciclo escolar comprende 200 días (N_d), resultando una demanda de agua anual de 300 m³.

6.4.2 Demanda de agua para uso doméstico en un hogar.

Los servicios de abastecimiento de agua y saneamiento para cada persona deben ser continuos y suficientes para el uso personal y doméstico. Estos usos incluyen normalmente agua de boca, saneamiento personal, lavado de ropa, preparación de alimentos, higiene personal y limpieza del hogar. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), son necesarios entre 50 y 100 litros de agua por persona al día para garantizar que se cubren las necesidades básicas y que no surjan grandes amenazas para la salud (ONU, 2015)

6.4.3 Demanda de agua para uso agrícola para riego en un invernadero

Empleando la ecuación 5.45 se obtuvo la evapotranspiración de referencia. Los resultados finales para cada mes se muestran en el Cuadro 6.10.

Cuadro 6.10. Resultados de evapotranspiración de referencia.

PARÁMETRO	UNIDAD	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
T _{máx}	°C	21.7	22.9	25.2	26.3	25.8	23.8	22.9	23.4	22.4	22.4	21.9	21.5
T _{min}	°C	0.3	1.3	2.9	5.2	6.9	8.3	7.2	7.0	7.4	5.1	2.6	0.8
% días MNUB	%	13.6	16.2	21.5	22.9	25.7	25.2	32.8	29.7	27.2	22.8	18.1	17.9
% días NUB	%	13.8	11.9	13.7	24.2	29.0	35.4	37.1	35.0	38.9	27.2	16.4	12.6
Δ	kPa/°C	0.09	0.09	0.10	0.11	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10	0.09	0.09
R _n	MJ/m ² /día	7.37	9.07	10.70	11.95	12.38	12.48	11.96	11.69	10.68	9.19	7.58	6.82
G	MJ/m ³ /°C	-0.70	0.15	0.27	0.24	0.08	-0.04	-0.14	0.02	-0.04	-0.16	-0.21	-0.15
es-ea	kPa	1.09	1.17	1.35	1.41	1.32	1.10	1.05	1.10	1.00	1.06	1.07	1.07
γ	MJ/kg	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
IAF	m ² /m ²	3.11	3.50	3.80	4.00	4.06	4.07	4.00	3.96	3.80	3.52	3.16	2.97
E _{to}	mm/día	11.7	15.0	19.9	24.3	26.2	26.6	24.7	23.7	20.8	16.4	11.9	9.7
E _{to}	mm/mes	364.1	418.7	615.8	728.9	813.1	798.8	767.0	734.9	622.9	508.3	356.0	301.0

Fuente: Elaboración propia.

Los valores del K_c para la estevia fueron determinados por González et al. (2002) y fueron de 0,25; 0,56 y 0,82 para los periodos comprendidos entre el corte de uniformidad hasta los 20 días después de éste; entre los 21 y 46 y entre los 47 y 70 días después de dicho corte, respectivamente. Tomando como referencia estos coeficientes de cultivo, y que en México se hacen cuatro cortes con un ciclo alrededor de los 70 días, se obtuvo la evapotranspiración de cultivo empleando la ecuación 5.45. Finalmente para obtener el requerimiento de riego se consideró una eficiencia del 90% y se empleó la ecuación 5.42. Los resultados se muestran en el Cuadro 6.11.

Cuadro 6.11. Evapotranspiración de cultivo y requerimiento de riego.

Mes	Etc (mm/mes)	Rr (mm/mes)
Ene	298.5	331.7
Febrero	157.0	174.4
Marzo	307.9	342.1
Abril	540.4	600.4
Mayo	292.7	325.2
Junio	551.2	612.4
Julio	331.0	367.8
Agosto	395.7	439.6
Septiembre	458.0	508.9
Octubre	187.1	207.8
Noviembre	199.4	221.5
Diciembre	198.8	220.8
TOTAL (mm) =	3,917.6	4,352.9

Fuente: Elaboración propia.

Considerando un invernadero de media hectárea, con capacidad para 32,000 plantas, cada una en macetas de 12 centímetros de diámetro, se obtiene una superficie efectiva de cultivo de 362 m². Empleando la ecuación 5.42 se obtiene un requerimiento anual de 1,575 m³.

6.5 DETERMINACIÓN DEL ÁREA DE CAPTACIÓN

A partir de la ecuación 5.62 es posible obtener la superficie requerida para captar el volumen de agua necesario para cubrir la demanda establecida. Dado que un término de la ecuación es la precipitación neta de diseño y está se obtuvo por tres diferentes metodologías (metodología CIDECALLI, metodología UNATSABAR y una metodología propuesta), resultó un valor de área de captación por cada metodología. Los resultados se presentan en el Cuadro 6.12.

Cuadro 6.12. Área efectiva de captación para diferentes usos.

Precipitación neta total de diseño (m)		Área efectiva de captación por su del agua (m ²)		
		CONSUMO HUMANO	USO DOMÉSTICO	RIEGO
CIDECALLI	0.376	799	389	4,193
UNATSABAR	0.591	508	247	2,665
PROPUESTA	0.324	929	450	4,588*

Fuente: Elaboración propia. * En el caso exclusivamente del agua destinada a riego en un invernadero se considera toda la precipitación probable en el año (343 mm), inclusive de los meses con precipitación menor a 40 mm pues la calidad del agua de lluvia puede manejarse al momento de elaborar el plan de nutrición del cultivo.

El área efectiva de captación más grande se obtiene empleando la metodología propuesta en este trabajo para obtener la precipitación neta, como resultado de asegurar una mayor probabilidad de que se tenga esa cantidad de lluvia por lo menos. La menor área efectiva de captación requerida se obtuvo con la metodología UNATSABAR.

6.6 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONDUCCIÓN

El diseño del sistema de conducción tuvo dos componentes, las canaletas y la tubería de bajada, mismos que se muestran a continuación.

6.6.1 Diseño de las canaletas

Para conocer el gasto que deberá transportar la canaleta se emplea la ecuación 5.63, donde el área efectiva de captación fue determinada en el punto 6.5 del presente trabajo y la intensidad de lluvia en el tema 6.1.6, tema donde se muestra que la intensidad de lluvia que se consideró para diseñar sistemas de captación del agua de lluvia en el sitio de estudio es de 41 mm/hora.

Aplicando la ecuación 5.63 se obtiene el gasto que se espera deberá recolectar la canaleta, los resultados se muestran en el Cuadro 6.13.

Cuadro 6.13. Gastos que deberá conducir la canaleta, en litros por segundo.

Metodología empleada para obtener la precipitación neta total de diseño	Gasto que deberá conducir la canaleta, lps		
	CONSUMO HUMANO	USO DOMÉSTICO	RIEGO
CIDECALLI	9.0	4.4	47.3
UNATSABAR	5.7	2.8	30.0
PROPUESTA	10.4	5.1	51.7

Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse la cantidad de precipitación neta total de diseño determina en gran medida el gasto que en teoría va a transportarse a través de la canaleta de recolección. La metodología UNATSABAR es con la que resulta el menor valor de gasto, caso contrario a la metodología propuesta en este trabajo.

Cuando en el diseño de captación de agua de lluvia es muy importante asegurar una cierta cantidad de agua como en el caso de riego en un invernadero lo más recomendable es emplear una metodología con mayor probabilidad como la propuesta en este trabajo. Cuando el agua va a emplearse en un hogar y existe la posibilidad de contar con otra fuente de abastecimiento entonces es posible emplear una metodología menos segura pero mucho más eficiente en cuestión de costo como lo son las metodologías UNATSABAR Y CIDECALLI.

Para conocer las dimensiones que requiere tener la canaleta para que transporte el gasto presentado en el Cuadro 6.14 se aplica la ecuación 5.64. Para lo cual se considera diseñar canaletas rectangulares, de PVC (con $n=0.008$), con una pendiente de 2% y el gasto que deberá conducir la canaleta es el obtenido con la metodología propuesta. Los resultados se muestran en el Cuadro 6.14.

Cuadro 6.14. Dimensiones de las canaletas.

Uso del agua	Aec (m ²)	Gasto que debe conducir la canaleta (m ³)	Base (m)	Altura (m)	Área (m ²)	Perímetro (m)	Radio hidráulico (m)	Velocidad (m/s)	Gasto que transporta la canaleta (m ³)
CONSUMO HUMANO	925.6	0.0104	0.15	0.05	0.0075	0.25	0.030	1.71	0.0128
USO DOMÉSTICO	450.4	0.0051	0.1	0.05	0.005	0.20	0.025	1.51	0.0076
RIEGO	500.0	0.0056	0.1	0.05	0.005	0.20	0.025	1.51	0.0076

Fuente: Elaboración propia.

En el caso del invernadero se consideraran secciones de 500 m² y para cada sección una canaleta.

6.6.2 Diseño de las tuberías de bajada

Considerando que Juan (2011) recomienda tener una bajada por cada 100 metros cuadrados, para el diseño del sistema de captación del agua de lluvia, de este trabajo en particular, para consumo humano se recomiendan 9 bajadas, para el de uso doméstico 5 y para el de riego en un invernadero 50.

Para diseño de las dimensiones de las tuberías de bajada a cada 100 metros cuadrados, se emplea la ecuación 5.66, quedando tuberías de PVC de 2 pulgadas por ser las tuberías comerciales más cercanas a las necesidades de diseño, tal como se muestra en el Cuadro 6.15.

Cuadro 6.15. Diseño de las tuberías de bajada.

Área efectiva de captación	100	m ²
Gasto que deberá conducir la canaleta	0.0011	m ³
Base	0.05	m
Altura	0.03	m
Área hidráulica	0.0015	m ²
Perímetro mojado	0.11	m
Radio hidráulico	0.01	m
Velocidad diseño gasto	1.0	m/s
Gasto que transportará la canaleta	0.002	m ³
Velocidad diseño diámetro	0.75	m/s
Diámetro	0.04	m
Diámetro comercial	2	"

Fuente: Elaboración propia.

6.7 DISEÑO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO (CISTERNA)

Para el diseño de los sistemas de almacenamiento para los sistemas de captación del presente trabajo se empleó tanto la metodología propuesta por el CIDECALLI como el balance de masas, con la intención de comparar ambas metodologías y sugerir la más adecuada según convenga.

A manera de ejemplo se presenta el cálculo del volumen de la cisterna para el sistema de captación del agua de lluvia con destino a consumo humano empleando la metodología de balance de masas. En el Cuadro 6.16 Se muestra el balance de masas cuando se desea tener agua todo el año, y en el Cuadro 6.18 cuando únicamente se considera la época de lluvias. En cada caso también se presenta el cálculo del volumen de la cisterna empleando el método propuesto por el CIDECALLI, en los Cuadros 6.17 y 6.19.

Cuadro 6.16. Balance de masas para todo el año.

Personas	1,000							
Consumo	0.0015 m ³ /día							
Área de captación	926 m ²							
	Precipitación (mm)	Oferta (m3)	oferta acumulada	demanda	demanda acumulada	oferta-demanda acumuladas	balance cisterna	
volumen inicial de la cisterna								
0								
Mayo	20	35.1	32.5	32	30	30	2	2
Junio	20	66.4	61.4	94	30	60	34	34
Julio	15	77.1	71.4	165	22.5	82.5	83	83
Agosto	20	67.3	62.3	228	30	112.5	115	115
Septiembre	20	54.7	50.7	278	30	142.5	136	136
Octubre	20	23.5	21.7	300	30	172.5	128	128
Noviembre	15	0	0	300	22.5	195	105	105
Diciembre	10	0	0	300	15	210	90	90
Enero	20	0	0	300	30	240	60	60
Febrero	15	0	0	300	22.5	262.5	37	38
Marzo	15	0	0	300	22.5	285	15	15
Abril	10	0	0	300	15	300	0	0
Total	200	324.1	300		300			
							volumen inicial cisterna:	0
							volumen cisterna:	136

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 6.17. Metodología CIDECALLI para todo el año.

Demanda mensual	= D_j	= 30	m ³ /mes
Meses con sequía + 2	= $M_{sequía + 2}$	= 8	
Volumen de la cisterna	= $V_{cisterna}$	= 240	m³

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 6.18. Balance de masas para época de lluvias.

Personas		1,000						
Consumo		0.0015 m ³ /día						
Área de captación		532 m ²						
	Precipitación (mm)	Oferta m3	oferta acumulada	demanda	demanda acumulada	oferta-demanda acumuladas	balance cisterna	
Volumen inicial de la cisterna								11
Mayo	20	35.1	18.7	19	30	30	-11	0
Junio	20	66.4	35.3	54	30	60	-6	5
Julio	15	77.1	41.0	95	22.5	82.5	13	24
Agosto	20	67.3	35.8	131	30	112.5	18	29
Septiembre	20	54.7	29.1	160	30	142.5	17	28
Octubre	20	23.5	12.5	173	30	172.5	0	11
Total	115	324.1	172.50		172.5			
							volumen inicial cisterna:	11
							volumen cisterna:	29

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 6.19 Metodología CIDECALLI para época de lluvias.

Demanda mensual = D_j	= 30	m ³ /mes
Meses con sequía + 2 = $M_{\text{sequía} + 2}$	= 2	
Volumen de la cisterna = V_{cisterna}	= 60	m³

Fuente: Elaboración propia.

En el Cuadro 6.20 se presenta un resumen de los resultados del volumen de cisterna requerido por ambas metodologías según el uso que se le dará al agua de lluvia y si esta se usará todo el año o solo en época de lluvias.

Cuadro 6.20. Volumen de la cisterna según época y uso del agua.

USO DEL AGUA DE LLUVIA	Volumen de la cisterna			
	TODO EL AÑO		ÉPOCA DE LLUVIAS	
	CIDECALLI	BALANCE	CIDECALLI	BALANCE
Consumo humano	240	136	60	29
Uso doméstico	99.2	74	24.8	11
Riego	1050.2	597	262.6	104

Fuente: Elaboración propia.

El método de cálculo del volumen de la cisterna propuesto por el CIDECALLI, es 43% mayor cuando el agua se destina a consumo humano y se abastece todo el año, mientras que si sólo se abasteciera en época de lluvias el volumen sería 52% mayor que al emplear balance de masas. Cuando el agua se destina a uso doméstico el volumen es mayor en un 25% o un 56%, si se abastece todo el año o en época de lluvias, respectivamente. Mientras que cuando el agua se destina a riego en un invernadero el volumen es mayor en un 43% si se abastece todo el año y un 60% si se abastece únicamente en época de lluvias. En conclusión el método del CIDECALLI llega a duplicar el volumen de la CISTERNA lo que aumenta considerablemente su costo.

Tal como se expresa en el párrafo anterior el volumen de la cisterna se diseñó para dos condiciones distintas, una de ellas implica obtener el volumen de la cisterna que permita almacenar la cantidad de agua necesaria para satisfacer la demanda durante todo un año, y la otra condición implica obtener el volumen de la cisterna que permita satisfacer la demanda únicamente en época de lluvias. Empleando la metodología propuesta por el CIDECALLI para obtener el volumen de la cisterna éste es 75% menor cuando se diseña para abastecer de agua únicamente en época de lluvias respecto a cuándo se diseña para abastecer todo el año. Empleando el método de balance de masas el volumen se reduce en promedio un 82%.

Se observa que todos los casos el método de balance de masas proporciona un volumen de cisterna menor al obtenido con el método del CIDECALLI lo que se ve reflejado en el costo de la cisterna, desde luego entre más grande sea la cisterna mayor será el costo brindando a su vez el beneficio de brindar un mayor volumen que podría llenarse si la cantidad de lluvia lo permite.

6.8 DISEÑO DEL SISTEMA DE PURIFICACIÓN

En el Cuadro 6.21 se presentan los resultados de análisis realizados al agua de un pozo y al agua de lluvia de Calpulalpan, Tlaxcala con la intención de proponer un sistema de purificación adecuado, es decir que no esté excedido y con ello reducir costos pero que garantice el bienestar físico de las personas que usen e ingieran el agua de lluvia.

En el cuadro puede observarse que tanto el agua de lluvia como el agua extraída de un pozo (de abastecimiento público a uso doméstico del municipio) cumplen con casi todos los límites permisibles para consumo humano, con excepción del parámetro de nitritos, que ambas fuentes de agua exceden el límite permisible e inclusive el agua de pozo se excede en mayor medida.

Adicionalmente el agua de lluvia presenta contaminación biológica por coliformes fecales y totales. Por lo tanto para hacer totalmente apta el agua de lluvia para consumo humano se propone hacerla pasar por cloración con hipoclorito de sodio al 13% o dióxido de cloro al 8% o en su defecto por luz ultravioleta para eliminar los contaminantes biológicos.

También se propone hacerla pasar por un filtro de carbón activado para eliminar cloro, sabores, olores y contaminantes orgánicos como pesticidas, herbicidas, plaguicidas, metilato de mercurio e hidrocarburos halogenados que pudiera haber en el agua.

Cuadro 6.21. Resultados del análisis de agua de lluvia y pozo.

		INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL Escuela Nacional de Ciencias Biológicas LABORATORIO CENTRAL DE INSTRUMENTACIÓN				
Parámetro		NOM-127-SSA1-1994 Límites máximos permisibles	Resultado obtenido agua de lluvia	Resultado obtenido agua de pozo	Unidades	Norma mexicana de análisis
1	Olor	Agradable	Agradable	Agradable		NMX-AA-083-1982
2	Sabor	Agradable	Desagradable	Agradable		NOM-127-SSA1-1994
3	Color	20	< 1	< 1	unidades	NMX-AA-045-SCFI-2001
4	Turbiedad	5	< 1	< 1	UTN	NMX-AA-038-SCFI-2001
5	Aluminio	0.20	0.035	0.011	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001
6	Arsénico	0.05	< 0.002	< 0.002	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001
7	Bario	0.70	< 0.009	< 0.009	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001
8	Cadmio	0.005	< 0.0048	< 0.0048	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001
9	Ciauros	0.07	< 0.02	< 0.02	mg/L	NMX-AA-058-SCFI-2001
10	Cloro libre	0.2-1.5	ND	0.2	mg/L	Escala de Taylor
11	Cloruros	250	< 2	5.0	mg/L	NMX-AA-073-SCFI-2001
12	Cobre	2.0	< 0.16	< 0.16	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001
13	Cromo total	0.05	< 0.0052	< 0.0052	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001
14	Dureza	500	< 0.2	64.0	mg/L	NMX-AA-072-SCFI-2001
15	Fierro	0.3	< 0.16	< 0.16	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001
16	Fluoruros	1.5	< 0.2	0.25	mg/L	NMX-AA-077-SCFI-2001
17	Manganeso	0.15	< 0.074	< 0.074	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001
18	Mercurio	0.001	< 0.001	< 0.001	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001
19	Nitratos	10.0	0.37	1.29	mg/L	NMX-AA-079-SCFI-2001
20	Nitritos	1.0	2.39	9.03	mg/L	NMX-AA-099-SCFI-2006
21	Nitrógeno	0.5	0.45	< 0.10	mg/L	NMX-AA-026-SCFI-2010
22	pH	6.5-8.5	6.39 U ± 0.03	7.79 U ± 0.03	unidades	NMX-AA-008-SCFI-2011
23	Sodio	200	0.208	11.5	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001
24	SDT	1000	< 23	< 23	mg/L	NMX-AA-034-SCFI-2001
25	Sulfatos	400	< 5.0	< 5.0	mg/L	NMX-AA-074-SCFI-1981
26	SAAM	0.5	0.22	0.17	mg/L	NMX-AA-039-SCFI-2001
27	Zinc	5.0	< 0.16	< 0.16	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001
28	Plomo	0.01	< 0.0052	< 0.0052	mg/L	NMX-AA-051-SCFI-2001
29	Coliformes totales	N.D. NMP/100 mL	17.0	N.D.	NMP/100 mL	NOM-112-SSA1-1994
30	Coliformes fecales	N.D. NMP/100 mL	2.0	N.D.	NMP/100 mL	NOM-112-SSA1-1994

NA= No aplica, NSI= No se indica, P.D.= Promedio diario, P= Presente, A= Ausente, S.F. = Sin flujo, <= Menor al límite de cuantificación, U= Incertidumbre k=2, N.D.= No detectable, NMP= Número más probable, UNT= Unidades nefelométricas de turbiedad.

6.9 COSTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y DEL AGUA DE LLUVIA

En el siguiente tema se presentan los resultados del costo por metro cúbico tanto del agua subterránea como del agua de lluvia captada.

6.9.1 Costo por metro cúbico del agua subterránea

Para obtener el costo de un metro cúbico de agua subterránea se consideró el pozo de abastecimiento público que dota de agua al sitio de estudio. Los datos del pozo se muestran en el Cuadro 6.22.

Cuadro 6.22. Datos del pozo que abastece de agua al sitio de estudio.

Nombre del pozo	Depósitos				
Uso	Servicio público de agua potable.	Volumen extraído (m ³ /año)	520,344.0	Longitud de columna (m)	174.7
Año de construcción	1967	Prof. De perf. (m)	195.0	Diámetro de descarga (")	4
Volumen concesionado (m ³)	549,839.0	Diámetro de perf. (cm)	18	Nivel estático (m)	153.3
Horas y días de operación por año	365 días al año, 22 horas diarias	Diámetro de ademe (")	12	Tipo de bomba	Sumergible
Gasto (lps)	18	Diámetro de columna (")	4	Potencia de equipo de bombeo	75 HP, 440 Volts

Fuente: Elaboración propia a partir de los registros de la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado Municipal, de Calpulalpan, Tlaxcala.

Para consumo humano y uso doméstico

Volumen extraído anualmente

Para poder aplicar la ecuación 5.68 y conocer el costo por metro cúbico del agua subterránea se requiere conocer el volumen de extracción anual, que se obtiene a partir de la ecuación 5.69, considerando un gasto de 18 lps y que el pozo trabaja

22 horas diarias los 365 días del año, el volumen extraído del pozo Los Depósitos es de 520,344.0 m³ al año.

Costos totales

También es necesario conocer el costo total de extracción, que como se expresa en la ecuación 5.70 es la suma de los costos fijos y los variables. En el caso de los costos fijos se considera la construcción del pozo, su equipamiento, la red de distribución y el hipoclorito de sodio necesario para purificar el agua; y en el caso de consumo humano se agrega un filtro de carbón activado. A todos los costos se les aplican las ecuaciones 5.71 y 5.72, resultando \$369,499.62 de costos fijos para uso doméstico y de \$369,881.61 para consumo humano.

Para obtener el valor de la tasa de interés TMAR se consideró CETES de 3.03%, inflación de 4.08% y de seguridad 2%, quedando una TMAR de 9.11%.

Para el cálculo de los costos variables se toma en cuenta un operador que trabaja una jordana de 8 horas, un salario de \$238.63 y que labora todo el año. Los gastos de mantenimiento se consideran el 10% del costo total de equipamiento.

Finalmente el costo por consumo anual de energía eléctrica que tiene el pozo se obtuvo de los recibos emitidos por la CFE a la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado (CAPAM) del municipio de Calpulalpan, Tlaxcala, y en el Cuadro 6.23 se muestran los datos proporcionados en los recibos del año 2015.

Cuadro 6.23. Consumo mensual de energía eléctrica del pozo Depósitos.

Mes	Consumo total kWh	Precio \$/kWh	Importe total \$
Diciembre 14	45,440	1.8088	\$82,191.87
Enero 15	41,200	1.8214	\$75,041.68
Febrero	42,240	1.8296	\$77,282.30
Marzo	41,360	1.8399	\$76,098.26

Mes	Consumo total kWh	Precio \$/kWh	Importe total \$
Abril	45,600	1.8494	\$84,332.64
Mayo	42,160	1.8594	\$78,392.30
Junio	46,160	1.7485	\$80,710.76
Julio	48,480	1.7562	\$85,140.58
Agosto	47,760	1.7629	\$84,196.10
Septiembre	48,560	1.7710	\$85,999.76
Octubre	54,840	1.7789	\$97,554.88
Noviembre	37,680	1.8002	\$67,831.54
Promedio mes	45,123	1.8022	\$81,231.06

Considerando los promedios mensuales de consumo y precio, en un año el costo es de \$975,848.05 por concepto de energía eléctrica.

El cálculo de costos totales que se requirió realizar para aplicar la ecuación 5.68 es muy semejante cuando el agua se destina a consumo humano y uso doméstico, variando únicamente por la inclusión del filtro de carbón activado para el agua destinada a consumo humano. El cálculo de los costos totales se muestra en el Cuadro 6.24.

Cuadro 6.24. Cálculo de costos totales.

COSTOS FIJOS

Perforación de un pozo profundo

	Concepto	Unidad	P.U.	Cantidad	Importe
1	Movimiento del equipo de perforación con capacidad para profundidades hasta 450 m, hasta un distancia de 15 km.	Lote	\$40,764.50	1	\$40,764.50
3	Excavación y relleno de fosas para lodos.	Lote	\$15,348.75	1	\$15,348.75
4	Lodo de perforación.	m ³	\$262.54	35	\$9,188.87
5	Acarreo de agua en camiones tanque (pipas) primer kilómetro.	m ³	\$46.24	35	\$1,618.40
6	Perforación de pozos de 30.48 cm (12" nominal) de diámetro en material Tipo II de 0 a 100 metros de profundidad.	m	\$3,214.87	100	\$321,487.10
7	Perforación de pozos de 30.48 cm (12" nominal) de diámetro en material Tipo II de 100 a 200 metros de profundidad.	m	\$3,442.92	95	\$327,077.36

8	Ampliación de pozos de 30.48 cm (12" nominal) a 45.72 cm (18" nominal) de diámetro en material Tipo II de 0 a 100 metros de profundidad.	m	\$3,856.84	100	\$385,684.37
9	Ampliación de pozos de 30.48 cm (12" nominal) a 45.72 cm (18" nominal) de diámetro en material Tipo II de 100 a 200 metros de profundidad.	m	\$4,091.15	95	\$388,658.82
10	Colocación de tubería para ademe soldando las juntas con doble cordón al arco eléctrico de 12" de diámetro	m	\$322.19	195	\$62,826.93
11	Cementación de tubería para ademe con equipo de perforación.	m ³	\$3,726.43	5	\$18,632.15
12	Colocación de filtro de grava para pozos.	m ³	\$4,396.15	7	\$30,773.05
13	Acarreo de grava para filtro de pozo en kilómetros subsecuentes al primero.	m ³ /Km	\$10.94	0	\$0.00
14	Tratamiento de pozo con dispersor de arcilla.	l	\$49.78	500	\$24,890.90
15	Acarreo primer kilómetro de tubería para ademe de acero.	Ton	\$30.81	30	\$924.43
16	Acarreo de tubería para ademe de acero en kilómetros subsecuentes al primero.	Ton/Km	\$5.46	0	\$0.00
17	Acarreo de cemento, bentonita y similares al primer kilómetro.	Ton	\$54.13	35	\$1,894.54
18	Desarrollo y aforo o prueba de bombeo efectuado con bomba vertical tipo turbina, con motor de combustión interna por un lapso de 24 horas, bomba con columna de 8" (203 mm) de diámetro hasta 100 metros de longitud.	Lote	\$68,474.95	1	\$68,474.95

Equipo de bombeo

Concepto	Unidad	P.U.	Cantidad	Importe
1 Bomba sumergible marca BAMSA con motor eléctrico trifásico 75 HP, 440 V	Unidad	\$42,588.33	1	\$42,588.33
2 Arrancador	Unidad	\$7,653.99	1	\$7,653.99
3 Transformador	Unidad	\$71,631.56	1	\$71,631.56

Equipo de purificación y potabilización

1 Filtro de carbón activado		\$1,800	1	\$1,800
Red de distribución	Lote	\$1,897,567	1	\$1,897,567

COSTOS VARIABLES

Consumo

Concepto	Unidad	P.U.	Cantidad	Importe anual
1 Consumo de energía eléctrica.	kW-h	\$1.8022	541,476	\$975,848.05
2 Hipoclorito de sodio	kg	\$6.340	400	\$2,536.00

Operación

1 Operación por mano de obra (8 horas/día).	Jor	\$238.63	365	\$87,099.95
---	-----	----------	-----	-------------

Mantenimiento

1 Mantenimiento del equipo.	Lote	10% equipamiento	1	\$202,124.09
-----------------------------	------	------------------	---	--------------

Costo por metro cúbico de agua subterránea extraída

Finalmente el costo de extracción de agua subterránea para destinarla tanto a uso doméstico como a consumo humano es de \$3.15 por metro cúbico si se considera todo el volumen extraído por el pozo, sin embargo si solo se considerara construir un pozo para abastecer a la escuela para destinar el agua a consumo humano, es decir extraer los 300 m³/año calculados como la demanda, entonces el costo por metro cúbico sería de \$2,199.1, desde luego económicamente no es viable construir y operar un pozo para extraer un volumen tan bajo, la comparación se hace con la intención de demostrar que la captación del agua de lluvia es una opción, que además de brindar sustentabilidad hídrica, es económicamente viable para volúmenes pequeños como en este caso.

Cuadro 6.25. Costo por metro cúbico de agua subterránea.

COSTOS FIJOS	\$369,881.61				
	Valor inicial	Valor residual	Vida útil	Depreciación	Inversión
Perforación del pozo profundo	\$1,814,604.45	0	30	\$60,486.82	\$82,655.23
Equipo de bombeo	\$121,873.88	\$12,187.39	15	\$7,312.43	\$6,106.49
Equipo de purificación	\$1,800	0	6	\$300.00	\$81.99
Red de distribución	\$1,897,567	0	15	\$126,504.47	\$86,434.18
	Costo anual total de depreciación =			\$194,603.71	
		Costo anual total de inversión =			\$175,277.89
COSTOS VARIABLES	\$1,267,608.09				
COSTO TOTAL	\$1,637,489.69				
Volumen anual extraído	520,344.0 m ³				
Costo por metro cúbico	\$3.15				

Agua para riego en un invernadero

Volumen extraído anualmente

El volumen extraído del pozo es el determinado en la demanda, es decir, de 1,575 m³/año.

Costos totales.

El cálculo de los costos fijos es el presentado en el Cuadro 6.24, por tomarse como referencia el mismo pozo. Para calcular los costos variables el concepto de costo por consumo de energía eléctrica puede estimarse aplicando la ecuación 5.73, de donde el valor de potencia consumida por el motor (P_{cm}) es posible conocerlo a partir de la ecuación 5.75. En el Cuadro 6.26 se presentan los datos del pozo que se ha venido tomando como referencia si se obtuviera el consumo de energía eléctrica de la forma anteriormente explicada, sin embargo en el presente trabajo el consumo de energía eléctrica se estimó de manera gruesa a partir de la relación entre consumo y precio, es decir, conociendo que el pozo que abastece al sitio de estudio consume aproximadamente 541,476 kW por año y provee un volumen de 520,344 m³, entonces para abastecer 1,575 m³ requeriría un consumo de 1,639 kW.

Cuadro 6.26. Datos del pozo para estimar consumo de energía eléctrica.

Im =	182 Amperes
Tm =	450 Volts
n =	3 fases
fp =	0.8676
Pcm =	165.2 HP
Pcm =	123.2 kw

En el Cuadro 6.27 se presenta el cálculo de los costos variables cuando el agua se extrae del pozo y se destina a riego.

Cuadro 6.27. Costos variables para extracción de agua subterránea para riego.

COSTOS VARIABLES				
Consumo				
Concepto	Unidad	P.U.	Cantidad	Importe anual
1 Consumo de energía eléctrica.	kW-h	\$6.308	1,639	\$10,338.6
2 Hipoclorito de sodio	kg	\$6.340	0	\$0.0
Operación				
1 Operación por mano de obra (8 horas/día).	jor	\$238.63	365	\$87,099.95
Mantenimiento				
1 Mantenimiento del equipo.	Lote	10% equipamiento	1	\$201,944.09

En el Cuadro 6.28 se presenta el cálculo del costo total.

Cuadro 6.28 Costos totales de extracción para riego.

COSTOS FIJOS	\$369,499.62				
	Valor inicial	Valor residual	Vida útil	Depreciación	Inversión
Perforación del pozo profundo	\$1,814,604.45	0	30	\$60,486.82	\$82,655.23
Equipo de bombeo	\$121,873.88	\$12,187.39	15	\$7,312.43	\$6,106.49
Equipo de purificación	\$0	0	6	\$0.00	\$0.00
Red de distribución	\$1,897,567	0	15	\$126,504.47	\$86,434.18
	Costo anual total de depreciación =			\$194,303.71	
		Costo anual total de inversión =			\$175,195.90
COSTOS VARIABLES	\$299,382.62				
COSTO TOTAL	\$668,882.23				
Volumen anual extraído	1,575	m ³			
Costo por metro cúbico	\$424.69				

Puede verse que el costo por metro cubico en el caso del invernadero se incrementa en gran medida, la razón es que la tarifa eléctrica es elevada y el volumen, que en teoría se extrae del pozo, es pequeño lo que hace que no sea rentable construir y operar un pozo para esa cantidad de agua.

6.9.2 Costo por metro cúbico del agua de lluvia captada

Para obtener el costo por metro cúbico del agua captada se empleó la misma metodología que se usó para obtener el costo por metro cúbico del agua extraída. En el Anexo 6 se presenta el desglose de los costos a partir de los cuales se estimó el valor por metro cúbico del agua de lluvia captada. En el Cuadro 6. 29 se presentan los resultados.

Cuadro 6.29. Costo por metro cúbico del agua captada.

Uso del agua	Inversión inicial	Volumen captado anualmente (m ³ /año)	Capacidad del sistema de almacenamiento (m ³)	Área a recubrir con geomembrana (m ²)	Costo por metro cúbico del agua captada
Potable, con capacidad para 1,000 personas	\$94,765.0	300	136	171.5	\$42.1
Doméstico, para un hogar de 4 personas	\$46,207.5	146	74	84.8	\$40.3
Para riego de un invernadero de 0.5 Ha,	\$329,810.0	1,575	597	370.0	\$26.0

Fuente: Elaboración propia.

La inversión inicial para cada sistema considera el costo del sistema de recolección y distribución (tuberías y canaletas), el sistema de almacenamiento (cisterna) y el equipo de purificación y potabilización. Puede verse que la inversión inicial es alta pero a lo largo de los años ya no es necesario invertir más, únicamente darle mantenimiento al sistema para optimizar y prolongar su vida útil. El volumen captado es la demanda anual estimada en el apartado 6.4 del presente trabajo, mientras que la capacidad de la cisterna es la obtenida con el método de balance de masas.

7. CONCLUSIONES

Se propuso la implementación de sistemas de captación del agua de lluvia como una alternativa sustentable para abastecer de agua a la población y con ello satisfacer necesidades prioritarias como la ingesta diaria del líquido vital, el uso doméstico para garantizar calidad de vida y el uso en la agricultura como un recurso fundamental en el camino a la seguridad alimentaria.

Se diseñaron tres sistemas de captación del agua de lluvia. La metodología propuesta incrementa el costo del SCALL por emplear una precipitación de diseño anual con una probabilidad de ocurrencia del 75% pero a cambio brinda mayor seguridad de satisfacer la demanda cada año.

El diseño de la cisterna requiere de gran cuidado por ser la parte más costosa del SCALL. El método de balance de masas proporciona un volumen de cisterna menor al obtenido con el método del CIDECALLI lo que se ve reflejado en el costo de la cisterna.

La extracción del agua subterránea es considerada económicamente viable cuando se extraen cantidades grandes, sin embargo el impacto ambiental se incrementa considerablemente, pues pone en riesgo la sustentabilidad de los acuíferos.

Implementar un sistema de captación del agua de lluvia para satisfacer un volumen demandado relativamente bajo resulta económicamente viable

Tanto el agua de pozo como el agua de lluvia captada tienen calidad alta pues cumplen con casi todos los parámetros de la NOM 127-SSA1-1994 que establece los límites permisibles del agua para uso y consumo humano. Los únicos parámetros que no cumplen son, en el caso de ambas aguas, la cantidad de nitritos permisibles, siendo el agua de pozo la que más rebasa el nivel.

8. RECOMENDACIONES

Tomando en cuenta que existen el concepto de cambio climático y que se tiene la idea de que altera la cantidad e intensidad de la precipitación pluvial, debe considerarse su detección en el momento de diseñar el SCALL, especialmente para cuando el agua va a ser destinada como fuente exclusiva de abastecimiento y/o cuando el costo del sistema de captación sea lo suficientemente elevado como para requerir mayor certidumbre.

Se recomienda ampliar el porcentaje de probabilidad de ocurrencia de lluvia cuando el agua de lluvia captada es fundamental e irremplazable por otra fuente de abastecimiento, al contrario cuando se tiene acceso a otra fuente de abastecimiento de agua, el sistemas de captación es de limitada magnitud y/o cuando el sitio donde se pretenda implementar el SCALL es considerado lluvioso se recomienda trabajar con probabilidades de ocurrencia de lluvia menores a la empleada en el presente trabajo.

La implementación de Sistemas de Captación del Agua de Lluvia para abastecer de agua potable y para uso doméstico se remienda por la buena calidad del agua de lluvia, requiriéndose un tratamiento mínimo para su uso.

Los sistemas de captación del agua de lluvia se recomiendan para el riego en invernaderos, por asegurar abastecimiento hídrico, ser económicamente viable a largo plazo. Cuando el requerimiento de riego anual no es muy elevado resulta incluso más económico que la extracción del agua del subsuelo.

Se recomienda emplear el método de balance de masas para el diseño de la cisterna, pues es considerado un método preciso, fiable y reduce considerablemente el espacio necesario para almacenar, lo que a su vez va ligado a una reducción importante en el costo del sistema de almacenamiento.

9. LITERATURA CITADA

Anaya G., M. 2011. Captación del agua de lluvia: solución caída del cielo. Ed. Biblioteca Básica de Agricultura. México. 133 p.

Anaya G., M. y J. Juan M. 2007. Sistemas de captación y aprovechamiento del agua de lluvia para uso doméstico y consumo humano en América Latina y el Caribe. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, México. 149 p.

Aparicio M., F. J. 2010. Fundamentos de hidrología de superficie. Ed. Limusa. México. 304 p.

Beernaerts I., 2005. Captación de agua de lluvia para mejorar la agricultura de temporal en el Subsahara de África: potencial, restricciones y oportunidades. FAO, Roma, Italia.

Cámara de Diputados. 2015. El agua dulce en el mundo. Servicio de Investigación y Análisis.

<http://www.diputados.gob.mx/bibliot/publica/inveyana/polisoc/dps03/introagu.html>
#3

Campos A., D. F. 1998. Procesos del ciclo hidrológico. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México.

Comisión Federal de Electricidad. 2015. Consulta en línea de tarifas eléctricas.
<http://www.cfe.gob.mx/>

Comisión Nacional del Agua. 2011a. Estadísticas del agua en México, edición 2011. México.

Comisión Nacional del Agua. 2011b. Agenda del agua 2030. México. 66 p.

Comisión Nacional del Agua. 2013. Estadísticas del agua en México, edición 2013. México. 165 p.

Comisión Nacional del Agua. 2014a. Atlas del Agua en México 2014. Biblioteca Mexicana del Conocimiento. México. 139 p.

Comisión Nacional del Agua. 2014b. Estadísticas del agua en México edición 2014. México.

Comisión Nacional del Agua. 2015. Atlas Digital del Agua en México 2012. México
<http://www.conagua.gob.mx/atlas/ciclo12.html#>

Comisión Nacional del Agua-SINA. 2015. <http://201.116.60.25/sina/>

CONAGUA-SEMARNAT. 2014a. Numeragua México 2014.
<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/Numeragua.pdf>

CONAGUA-SEMARNAT, 2014b. Situación del sector agua potable, drenaje y saneamiento, edición 2014. México. 345 p.

Consejo Nacional de Población. 2015. Proyecciones de población en México 2010-2050. http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones_Datos

Cosgrove V., J y R. Rijsberman F. 2000. Visión del Agua en el Mundo: que el agua sea asunto de todos. Consejo Mundial del Agua. Londres.
<http://www.worldwatercouncil.org/index.php?id=963>

Cruz H., C. 2009. Determinación de costos de extracción de agua subterránea en Chapingo, Estado de México. Tesis de licenciatura, Departamento de Ingeniería en Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. México.

Diario Oficial de la Federación, 2015. Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican.

http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5389380&fecha=20/04/2015

Dirección General de Análisis Legislativo, 2015. Senado de la República. Instituto Belisario Domínguez. Serie “Al día: las cifras hablan”. No. 35 Día Mundial del Agua. México.

Enciso, A. 2010. México, primer lugar en consumo de agua embotellada; la demanda crece 40%.

<http://www.jornada.unam.mx/2010/05/18/sociedad/041n1soc> Febrero 2015.

Esmera V., Y. R. 2011. Análisis de la evapotranspiración real en el cultivo de rosa. Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

FAO. 2015a. Statistics Division. http://faostat3.fao.org/browse/O/*/E

FAO. 2015b. Computation of long-term annual renewable water resources by country: Mexico. Global Water Information System. <http://www.fao.org/nr/water/aquastat>

FAO-GWP, 2013. Tecnologías para el uso sostenible del agua: una contribución a la seguridad alimentaria y la adaptación al cambio climático. Tegucigalpa, M. D. C, Honduras. 71 p.

- González V. F. 2011. Identificación de estudios y proyectos del sector hídrico: Oaxaca, Puebla y Tlaxcala 2005-2011. Universidad Nacional Autónoma de México. 87 p.
- Herrera M., L. 2010. Estudio de alternativas, para el uso sustentable del agua de lluvia. Tesis de maestría, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. Instituto Politécnico Nacional. México.
- Hieronimi, H. 2002. Manejo sostenible del agua. Permacultura. <http://www.tierramor.org/permacultura/permacultura.htm>
- Instituto Nacional de Geografía y Estadística. 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Calpulalpan, Tlaxcala.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2010. Censo de Población y Vivienda 2010.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2011. Panorama sociodemográfico de Tlaxcala. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2012. Perspectiva estadística Tlaxcala. México. 90 p.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2013a. Conociendo Tlaxcala. México
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2013b. Anuario estadístico y geográfico por entidad federativa 2013. México
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2014. Estadísticas a propósito del... día mundial del agua (22 de marzo). Aguascalientes, México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2015a. Cuéntame INEGI. Estado de Tlaxcala. <http://cuentame.inegi.org.mx>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2015b. Censos y conteos de población y vivienda. <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/Proyectos/ccpv/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2015 (c). Cuéntame INEGI: Sobreexplotación y contaminación del agua. <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/sobreexplota.aspx?tema=T>

Inventario Nacional de Presas. 2015. <http://201.116.60.136/inventario/hinicio.aspx>

Jimenez V., M. y Gaiska A. B. 2008. Sistemas de abastecimiento de agua para consumo doméstico en tres comunidades, de la porción alta del río Temascatío, estado de Guanajuato. Boletín del archivo histórico del agua. No. Extra 40. Ejemplar dedicado a captación de agua de lluvia. Pp. 44-54.

Juan J., M. 2011. Estrategias para el abastecimiento de agua a comunidades marginadas y urbanas. Tesis de doctorado. Colegio de Postgraduados. México.

Macías H., R. 2009. Estimación de la evapotranspiración de cultivo y requerimientos hídricos del tomate (*Solanum lycopersicum* Mill. cv. El Cid) en invernadero. Departamento de recursos naturales. Instituto Politécnico Nacional. Michoacán, México.

Magaña, Víctor. 2006. Adaptación al cambio climático. Universidad Nacional Autónoma de México-Instituto Nacional de Ecología. México. 23 p.

National Groundwater Association. 2015. <http://www.ngwa.org/>

Neri F., I. 2009. Agua subterránea: el agua que no vemos. Revista de divulgación científica y tecnológica de la Universidad Veracruzana 22:1.

OECD. 2012. OECD Environmental Outlook to 2025: The Consequences of Inaction. OECD Publishing. Paris. DOI: <http://dx.doi.org/10.1787/9789264122246-en>

Organización Mundial de la Salud. 2015. Agua, saneamiento y salud: agua potable salubre y saneamiento básico en pro de la salud. http://www.who.int/water_sanitation_health/mdg1/es/

Organización de las Naciones Unidas. 2015a. El agua, fuente de vida. Programa de ONU-Agua para la Promoción y la Comunicación en el marco del Decenio. Zaragoza, España.

Organización de las Naciones Unidas. 2015b. Agua y Desarrollo Sostenible: de la visión a la acción. Conferencia Anual 2015 de ONU-Agua en Zaragoza. 15-17 de enero de 2015.

Ortiz S., C. A. y D. Pájaro. H. 1993. . Estimación de la Radiación Global para la República Mexicana (Primera Aproximación). Geografía Agrícola 18:77-84.

Ortiz S., C. A. 2011. Elementos de agrometeorología cuantitativa con aplicaciones en la república mexicana. Edición del autor. México.

Pineda T., M. 2007. Manejo de agua para el uso doméstico en Jumiltepec, Municipio de Ocuituco, Estado de Morelos. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, México. 101 p.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. 2011. Informe sobre desarrollo humano 2011. Sostenibilidad y equidad: un mejor futuro para todos. Nueva York, Estados Unidos.

Porto de Carvalho et al. 2014. Annual maximum daily rainfall trends in the Midwest, southeast and southern Brazil in the last 71 years. *Weather and Climate Extremes* 5-6(2014)7–15.

Quispe L., A. 2008. Captación de agua de lluvia para la agricultura familiar, una experiencia en comunidades rurales de Tlaxcala. *Boletín del Archivo Histórico el Agua* 40:82-91.

Ramírez C., V. 2008. Captación y almacenamiento del agua de lluvia a nivel familiar y su impacto en las comunidades rurales de Tlaxcala. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, México. 265 pp

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. 2015. Isoyetas de intensidad de precipitación. <http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/isoyetas/>

Secretaría de Desarrollo Social. 2015. Unidad de microrregiones. Dirección Adjunta de Planeación Microrregional. Catálogo de localidades. <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/LocdeMun.aspx?tipo=clave&campo=loc&ent=29&mun=006>

Servicio Meteorológico Nacional. 2015. Normales Climatológicas http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75

UNESCO. 2012. *Groundwater and Global Change:Trends, Opportunities and Challenges.*

UNESCO. 2014. *Agua y Energía. Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los recursos hídricos en el mundo 2014.*

UNESCO. 2015a. Asamblea General de las Naciones Unidas adopta Resolución sobre la Ley de Acuíferos Transfronterizos. http://www.unesco.org/water/news/acuiferos_transfronterizos.shtml

UNESCO. 2015b. Water for a sustainable world. France, Paris. 139 p.

Universidad Nacional Autónoma de México. 2010. Pumagua: agua saludable acción de todos. http://www.pumagua.unam.mx/assets/pdfs/informes/2010/comunicacion_participacion_2010.pdf).

UNATSABAR. 2011. 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. Lima.

Wada et al., 2010. Global depletion of groundwater resources. Geophysical research letters Vol. 37. doi:10.1029/2010GL044571.

Xico, C. 2014. Tlaxcala consume agua purificada contaminada. 12 de Noviembre de 2014. http://www.agua.unam.mx/padhpot/noticias/2014/tlaxcala/not_tlaxcala_noviembre12_2.html

Zamarripa et al. 2013. Comparación de tres modelos para estimar la transpiración de un cultivo de jitomate en invernadero. Terra Latinoamericana, 31:9-21.

XXIV Diplomado Internacional de Captación del Agua de Lluvia 2015. Texcoco, Edo. De México. México.

10. ANEXOS

ANEXO 1. ESTIMACIÓN DE DATOS DIARIOS FALTANTES.

Datos de precipitación diaria en las estaciones auxiliares y dato faltante estimado									
i	ESTACIÓN:	29034	29025	13024	29162	15210	13138	13002	Px
	1/Di ² =	0.0123	0.0191	0.0149	0.0049	0.0030	0.0151	0.0031	
1	31/10/1976	0	0	0					0
2	08/07/1979	11.5	19	10.9					14.4
3	31/08/1979	0	0	0					0
4	11/12/1992		0	0			0		0
5	19/12/1992		0	0			0		0
6	24/12/1992		0	0			0		0
7	26/12/1992		0	0			0		0
8	31/12/1992		0	0			0		0
9	02/01/1993		0	0			0		0
10	10/01/1993		0	0			0		0
11	16/01/1993		0	0			0		0
12	23/01/1993		0	5.1			6.6		3.6
13	30/01/1993		0	0			0		0
14	04/02/1993	0	0				0		0
15	06/02/1993	0	3				0		1.2
16	13/02/1993	0	0				0		0
17	20/02/1993	0	0				0		0
18	27/02/1993	0	0				0		0
19	24/04/1993	0	0	0					0
20	30/04/1993	0	0	0.2					0.1
21	08/05/1993	0	2	1.6					1.3
22	15/05/1993	0	0	0					0
23	22/05/1993	0	1.5	0.6					0.8
24	29/05/1993	0	1.5	2.7					1.5
25	05/06/1993	0	0	0					0
26	12/06/1993	9.5	6.5	7.1					7.5
27	19/06/1993	0	0	0					0
28	26/06/1993	0	0	0					0
29	03/07/1993		14	9			8.3		10.7
30	11/07/1993		9	9			0.7		6.4
31	17/07/1993		0	0.2			0		0.1

Datos de precipitación diaria en las estaciones auxiliares y dato faltante estimado									
i	ESTACIÓN:	29034	29025	13024	29162	15210	13138	13002	Px
	1/Di ² =	0.0123	0.0191	0.0149	0.0049	0.0030	0.0151	0.0031	
32	31/07/1993		0	0.1			0.5		0.2
33	07/08/1993		0	0			0		0
34	14/08/1993		15	14.1			1.9		10.7
35	21/08/1993		1	0.9			0.5		0.8
36	28/08/1993		0	0			0		0
37	31/08/1993		3	2.4			2.2		2.6
38	04/09/1993		0.5	0.4				0	0.4
39	11/09/1993		12	12.2			2		9.0
40	25/09/1993		0				0	0.1	0
41	02/10/1993	0	0	0					0
42	09/10/1993	0	0	0					0
43	16/10/1993	0	0	0					0
44	22/03/1994	0	0	0					0
45	30/04/1994	0	0.2	0.6					0.3
46	07/02/1998	0	0	0					0
47	07/02/2002		0	0	0				0
48	10/02/2002		0	0.3	0				0.1
49	13/02/2002		0	0	0				0
50	13/03/2002			0	0	0			0
51	19/03/2002			0.5	0	0			0.3
52	03/04/2002		0	0	0				0
53	04/04/2002		0	0.5	0				0.2
54	08/04/2002		0	0	0				0
55	26/04/2002		0	0	0				0
56	17/05/2002		0.5	0.5	0				0.4
57	06/06/2002		0	0	0				0
58	20/06/2002		0	0	0				0
59	23/06/2002		0	2.4	0				0.9
60	25/06/2002		0	0.6	2				0.5
61	26/06/2002		0	0	0				0
62	30/06/2002		0	0	0				0
63	06/08/2002		0	0	0				0
64	23/08/2002		1.3	1.6	0				1.3
65	05/09/2002		1.5	0	0				0.7
66	16/09/2002		0	0	0				0
67	18/09/2002		0	0	7				0.9

Datos de precipitación diaria en las estaciones auxiliares y dato faltante estimado									
i	ESTACIÓN:	29034	29025	13024	29162	15210	13138	13002	Px
	1/Di ² =	0.0123	0.0191	0.0149	0.0049	0.0030	0.0151	0.0031	
68	23/09/2002		0	0	0				0
69	12/01/2003	0	0	0					0
70	30/01/2003	0	0	0					0
71	19/02/2003	0	0	0					0
72	11/03/2003	0	0	0					0
73	14/05/2003	0	0	0					0
74	04/07/2003	0	0	0					0
75	08/07/2003	1	0	0					0.3
76	21/07/2003	0	0	0					0
77	22/07/2003	0	0	0					0
78	12/09/2003	10	3.8	0					4.2
79	19/09/2003	0	0	0					0
80	27/09/2003	14	41.5	34.5					31.9
81	27/11/2003		0	0			0		0
82	31/12/2003		0	0			0		0
83	09/01/2004		0	0	0				0
84	29/02/2004		0	0	0				0
85	07/03/2004		0	0	0				0
86	02/04/2004		0	0	0				0
87	17/05/2004	0	0	0					0
88	28/05/2004	0	0	0					0
89	01/06/2004	0	0	0					0
90	06/06/2004	0	0	0					0
91	30/06/2004	0	2.3	5					2.6
92	12/07/2004	0	0	0					0
93	30/07/2004	1	0	0					0.3
94	04/08/2004	0	0	0					0
95	15/08/2004	0	0	0					0
96	27/08/2004	5	0.5	0.6					1.7
97	12/09/2004		0	0	20				2.5
98	01/10/2004		7.5	8.6	0				7.0
99	13/10/2004		0	0	0				0
100	04/06/2009	0	0	0					0
101	05/06/2009	0	0	0					0
102	01/07/2009	0	16	9.3					9.6
103	02/07/2009	6	0	1					1.9

Datos de precipitación diaria en las estaciones auxiliares y dato faltante estimado									
i	ESTACIÓN:	29034	29025	13024	29162	15210	13138	13002	Px
	1/Di ² =	0.0123	0.0191	0.0149	0.0049	0.0030	0.0151	0.0031	
104	03/07/2009	0	15	4					7.5
105	04/07/2009	0	0	0					0
106	05/07/2009	0	0	0					0
107	06/07/2009	0	0	0					0
108	07/07/2009	0	0	0					0
109	08/07/2009	12	0	0					3.2
110	09/07/2009	0	0	0					0
111	10/07/2009	0	0	0					0
112	11/07/2009	0	0	0					0
113	12/07/2009	0	0	0					0
114	13/07/2009	0	4	3					2.6
115	14/07/2009	7	0	0					1.9
116	15/07/2009	0	0	0					0
117	16/07/2009	0	0	0					0
118	17/07/2009	0	0	1					0.3
119	18/07/2009	0	0	0					0
120	19/07/2009	0	0	0					0
121	20/07/2009	10	0	0					2.7
122	21/07/2009	0	0	0					0
123	22/07/2009	0	3	1.7					1.8
124	23/07/2009	0	0	0					0
125	24/07/2009	0	5	3.5					3.2
126	25/07/2009	26	24	25.8					25.1
127	26/07/2009	0	2	1.1					1.2
128	30/06/2010	0	0				0		0
129	22/12/2011	0	0	0					0
130	28/12/2011	0	0	0					0

ANEXO 2. ESTIMACIÓN DE DATOS MENSUALES FALTANTES.

ESTIMACIÓN DE LOS DATOS MENSUALES FALTANTES									
Año	Estación	29034	29025	29019	13024	29024	29162	29016	Px
	W =	0.012	0.019	0.081	0.015	0.005	0.005	0.009	
1953	DIC								8.5
1964	MAR								14.8
	ABR								34.3
1965	SEP								100.1
1968	MAY	85	81.5			101			85.4
	JUN	226	202			152			203.3
	JUL	72	93.6			180			98.1
1971	NOV	0	8	4					4.2
1977	DIC	2.5	9	1.2					2.7
1980	JUN	109	82.5	120.5					112.8
	JUL	80.2	73	91.5					87.1
	AGO	126.6	142.1	151.5					147.2
	SEP	106.7	74	112					105.0
1981	AGO	126	110.5	159.5					147.6
	SEP	50.7	45	34					37.7
	OCT	11.7	48.5	71					60.7
	NOV	7.5	2.5	1					2.0
	DIC	0	1	0					0.2
1982	ENE	0	0	0					0.0
	FEB	7.5	7	16					13.6
	MAR	30	37	42.5					40.2
	OCT	64	69.5	43.5					50.13
1983	DIC	2.5		0	1.7				0.5
1984	OCT		56	46					40.0
	NOV	2	1	2.5					2.2
	DIC	5	4.5	12.5					10.3
1985	ENE	2.1	4.5	13					10.4
	FEB	0	7	2.5					3.0
	MAR	4.5	35	31.5					29.1
1989	MAR	9.5					9.5		9.5
	ABR	33.3					30.2		32.4
2009	JUN	113			116			134.7	119.4

ANEXO 3. AJUSTE DE LA PRECIPITACIÓN A LAS FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN

Datos Precipitación		En orden descendente			DISTR NORMAL		DISTRIBUCIÓN GALTON			DISTR GAMMA INCOMPLETA			DISTRIBUCIÓN GUMBEL	
AÑO	ANUAL	i	AÑO	ANUAL	P≥Po	P≤Po	LOG P	P≥Po	P≤Po	LN P	P≥Po	P≤Po	P≥Po	P≤Po
1948	464.5	1	1980	910.6	0.027	0.973	2.959	0.046	0.954	6.814	0.039	0.961	0.057	0.943
1949	455.1	2	1958	897.5	0.034	0.966	2.953	0.054	0.946	6.800	0.046	0.954	0.064	0.936
1950	479.0	3	1978	883.6	0.043	0.957	2.946	0.063	0.937	6.784	0.056	0.944	0.073	0.927
1951	382.0	4	2012	877.7	0.047	0.953	2.943	0.068	0.932	6.777	0.060	0.940	0.077	0.923
1952	795.7	5	2011	862.0	0.061	0.939	2.936	0.080	0.920	6.759	0.073	0.927	0.088	0.912
1953	436.4	6	1955	834.0	0.092	0.908	2.921	0.108	0.892	6.726	0.102	0.898	0.113	0.887
1954	621.3	7	1988	832.6	0.094	0.906	2.920	0.110	0.890	6.725	0.104	0.896	0.115	0.885
1955	834.0	8	1979	826.7	0.102	0.898	2.917	0.117	0.883	6.717	0.111	0.889	0.121	0.879
1956	628.4	9	1976	822.6	0.108	0.892	2.915	0.122	0.878	6.712	0.117	0.883	0.125	0.875
1957	611.2	10	2003	815.6	0.119	0.881	2.911	0.131	0.869	6.704	0.126	0.874	0.133	0.867
1958	897.5	11	1993	809.3	0.129	0.871	2.908	0.139	0.861	6.696	0.135	0.865	0.140	0.860
1959	787.1	12	1952	795.7	0.153	0.847	2.901	0.159	0.841	6.679	0.157	0.843	0.158	0.842
1960	652.3	13	1973	789.0	0.166	0.834	2.897	0.170	0.830	6.671	0.168	0.832	0.167	0.833
1961	562.1	14	2006	788.2	0.168	0.832	2.897	0.171	0.829	6.670	0.169	0.831	0.168	0.832
1962	645.8	15	1984	788.2	0.168	0.832	2.897	0.171	0.829	6.670	0.169	0.831	0.168	0.832
1963	786.7	16	1959	787.1	0.170	0.830	2.896	0.173	0.827	6.668	0.171	0.829	0.170	0.830
1964	546.1	17	1963	786.7	0.171	0.829	2.896	0.174	0.826	6.668	0.172	0.828	0.170	0.830
1965	719.0	18	1990	774.6	0.196	0.804	2.889	0.195	0.805	6.652	0.194	0.806	0.189	0.811
1966	713.0	19	2002	766.6	0.214	0.786	2.885	0.209	0.791	6.642	0.210	0.790	0.202	0.798
1967	516.6	20	1975	760.0	0.229	0.771	2.881	0.222	0.778	6.633	0.224	0.776	0.213	0.787
1968	661.4	21	1965	719.0	0.338	0.662	2.857	0.315	0.685	6.578	0.322	0.678	0.296	0.704
1969	718.0	22	1969	718.0	0.341	0.659	2.856	0.317	0.683	6.576	0.324	0.676	0.299	0.701
1970	606.8	23	1991	713.0	0.356	0.644	2.853	0.330	0.670	6.569	0.338	0.662	0.310	0.690
1971	662.7	24	1966	713.0	0.356	0.644	2.853	0.330	0.670	6.569	0.338	0.662	0.310	0.690
1972	589.5	25	2004	712.7	0.357	0.643	2.853	0.331	0.669	6.569	0.338	0.662	0.311	0.689
1973	789.0	26	2007	698.8	0.398	0.602	2.844	0.368	0.632	6.549	0.377	0.623	0.346	0.654
1974	694.0	27	2013	694.8	0.411	0.589	2.842	0.379	0.621	6.544	0.389	0.611	0.356	0.644
1975	760.0	28	1974	694.0	0.413	0.587	2.841	0.381	0.619	6.542	0.391	0.609	0.358	0.642
1976	822.6	29	2000	691.7	0.420	0.580	2.840	0.387	0.613	6.539	0.398	0.602	0.364	0.636
1977	586.4	30	1989	691.0	0.422	0.578	2.839	0.389	0.611	6.538	0.400	0.600	0.366	0.634
1978	883.6	31	1981	679.4	0.458	0.542	2.832	0.422	0.578	6.521	0.434	0.566	0.398	0.602
1979	826.7	32	1987	663.5	0.508	0.492	2.822	0.470	0.530	6.498	0.482	0.518	0.445	0.555
1980	910.6	33	1971	662.7	0.511	0.489	2.821	0.472	0.528	6.496	0.485	0.515	0.448	0.552
1981	679.4	34	1968	661.4	0.515	0.485	2.820	0.476	0.524	6.494	0.489	0.511	0.452	0.548
1982	502.8	35	2009	654.4	0.537	0.463	2.816	0.498	0.502	6.484	0.511	0.489	0.473	0.527

Datos Precipitación		En orden descendente		DISTR NORMAL		DISTRIBUCIÓN GALTON			DISTRIBUCIÓN GAMMA INCOMPLETA			DISTRIBUCIÓN GUMBEL		
AÑO	ANUAL	i	AÑO	ANUAL	P \geq Po	P \leq Po	LOG P	P \geq Po	P \leq Po	LN P	P \geq Po	P \leq Po	P \geq Po	P \leq Po
1983	563.9	36	1960	652.3	0.544	0.456	2.814	0.504	0.496	6.481	0.517	0.483	0.480	0.520
1984	788.2	37	1962	645.8	0.564	0.436	2.810	0.525	0.475	6.470	0.538	0.462	0.501	0.499
1985	495.6	38	1999	640.8	0.579	0.421	2.807	0.540	0.460	6.463	0.553	0.447	0.517	0.483
1986	614.4	39	1956	628.4	0.617	0.383	2.798	0.579	0.421	6.443	0.592	0.408	0.559	0.441
1987	663.5	40	1954	621.3	0.639	0.361	2.793	0.602	0.398	6.432	0.614	0.386	0.583	0.417
1988	832.6	41	1992	617.0	0.651	0.349	2.790	0.615	0.385	6.425	0.628	0.372	0.597	0.403
1989	691.0	42	2010	614.6	0.658	0.342	2.789	0.623	0.377	6.421	0.635	0.365	0.605	0.395
1990	774.6	43	1986	614.4	0.659	0.341	2.788	0.623	0.377	6.421	0.636	0.364	0.606	0.394
1991	713.0	44	1995	612.2	0.665	0.335	2.787	0.630	0.370	6.417	0.642	0.358	0.614	0.386
1992	617.0	45	1957	611.2	0.668	0.332	2.786	0.633	0.367	6.415	0.645	0.355	0.617	0.383
1993	809.3	46	1970	606.8	0.680	0.320	2.783	0.647	0.353	6.408	0.659	0.341	0.632	0.368
1994	486.1	47	1972	589.5	0.728	0.272	2.770	0.700	0.300	6.379	0.710	0.290	0.691	0.309
1995	612.2	48	1977	586.4	0.736	0.264	2.768	0.709	0.291	6.374	0.719	0.281	0.702	0.298
1996	526.8	49	1983	563.9	0.790	0.210	2.751	0.773	0.227	6.335	0.780	0.220	0.775	0.225
1997	563.3	50	1997	563.3	0.792	0.208	2.751	0.775	0.225	6.334	0.781	0.219	0.777	0.223
1998	557.5	51	1961	562.1	0.795	0.205	2.750	0.778	0.222	6.332	0.784	0.216	0.781	0.219
1999	640.8	52	1998	557.5	0.805	0.195	2.746	0.790	0.210	6.323	0.796	0.204	0.795	0.205
2000	691.7	53	2001	554.3	0.812	0.188	2.744	0.799	0.201	6.318	0.804	0.196	0.804	0.196
2001	554.3	54	2005	554.3	0.812	0.188	2.744	0.799	0.201	6.318	0.804	0.196	0.804	0.196
2002	766.6	55	1964	546.1	0.829	0.171	2.737	0.819	0.181	6.303	0.823	0.177	0.828	0.172
2003	815.6	56	1996	526.8	0.865	0.135	2.722	0.863	0.137	6.267	0.864	0.136	0.879	0.121
2004	712.7	57	1967	516.6	0.881	0.119	2.713	0.884	0.116	6.247	0.884	0.116	0.902	0.098
2005	554.3	58	2008	504.8	0.899	0.101	2.703	0.905	0.095	6.224	0.904	0.096	0.925	0.075
2006	788.2	59	1982	502.8	0.902	0.098	2.701	0.909	0.091	6.220	0.907	0.093	0.929	0.071
2007	698.8	60	1985	495.6	0.911	0.089	2.695	0.920	0.080	6.206	0.918	0.082	0.940	0.060
2008	504.8	61	1994	486.1	0.923	0.077	2.687	0.934	0.066	6.186	0.930	0.070	0.954	0.046
2009	654.4	62	1950	479.0	0.930	0.070	2.680	0.943	0.057	6.172	0.939	0.061	0.963	0.037
2010	614.6	63	1948	464.5	0.944	0.056	2.667	0.958	0.042	6.141	0.954	0.046	0.977	0.023
2011	862.0	64	1949	455.1	0.952	0.048	2.658	0.967	0.033	6.121	0.963	0.037	0.984	0.016
2012	877.7	65	1953	436.4	0.965	0.035	2.640	0.980	0.020	6.078	0.976	0.024	0.993	0.007
2013	694.8	66	1951	382.0	0.988	0.012	2.582	0.997	0.003	5.945	0.995	0.005	1.000	0.000
				MEDIA= 666.2			MEDIA= 2.815				SUMA= 427.8			SIGMA y = 1.1803
				DESV. EST. = 126.6			DESV. EST. = 0.086				A= 0.019			MIU y = 0.5535
											ALFA= 26.63			ALFA = 0.0093
											BETA= 25.02			BETA = 606.82

ANEXO 4. PRUEBAS DE BONDAD DE AJUSTE.

PRUEBA SMIRNOV					PRUEBA KOLMOGOROV-SMIRNOV				
(2i-1)/2n	$(F(x)_i - ((2i-1)/2n))^2$				Fo	$F_0(x) - F(x)$			
	NORMA L	GALTON	GAMMA A	GUMBEL L		NORMA L	GALTON	GAMMA A	GUMBEL L
0.0076	0.00037	0.00151	0.00098	0.00246	0.985	0.012	0.031	0.024	0.042
0.0227	0.00012	0.00097	0.00056	0.00173	0.970	0.004	0.024	0.016	0.034
0.0379	0.00003	0.00064	0.00031	0.00123	0.955	0.002	0.018	0.011	0.028
0.0530	0.00003	0.00021	0.00005	0.00057	0.940	0.012	0.008	0.000	0.017
0.0682	0.00005	0.00015	0.00002	0.00041	0.925	0.014	0.006	0.001	0.014
0.0833	0.00008	0.00062	0.00036	0.00090	0.910	0.003	0.019	0.013	0.024
0.0985	0.00002	0.00013	0.00003	0.00026	0.896	0.010	0.005	0.000	0.010
0.1136	0.00013	0.00001	0.00000	0.00005	0.881	0.017	0.003	0.008	0.001
0.1288	0.00042	0.00005	0.00015	0.00001	0.866	0.026	0.012	0.018	0.009
0.1439	0.00063	0.00017	0.00031	0.00012	0.851	0.030	0.018	0.023	0.016
0.1591	0.00090	0.00039	0.00056	0.00035	0.836	0.035	0.025	0.029	0.024
0.1742	0.00045	0.00022	0.00031	0.00027	0.821	0.026	0.020	0.022	0.021
0.1894	0.00055	0.00038	0.00046	0.00049	0.806	0.028	0.024	0.026	0.027
0.2045	0.00137	0.00110	0.00124	0.00131	0.791	0.041	0.038	0.040	0.041
0.2197	0.00272	0.00234	0.00253	0.00264	0.776	0.056	0.053	0.054	0.056
0.2348	0.00424	0.00381	0.00404	0.00422	0.761	0.069	0.066	0.068	0.069
0.2500	0.00632	0.00581	0.00609	0.00633	0.746	0.083	0.080	0.082	0.083
0.2652	0.00480	0.00496	0.00502	0.00584	0.731	0.073	0.074	0.074	0.080
0.2803	0.00443	0.00501	0.00492	0.00617	0.716	0.070	0.074	0.073	0.082
0.2955	0.00438	0.00534	0.00512	0.00678	0.701	0.069	0.076	0.075	0.085
0.3106	0.00076	0.00002	0.00012	0.00021	0.687	0.025	0.001	0.008	0.017
0.3258	0.00024	0.00008	0.00000	0.00074	0.672	0.013	0.011	0.004	0.030
0.3409	0.00022	0.00012	0.00001	0.00094	0.657	0.012	0.013	0.006	0.033
0.3561	0.00000	0.00069	0.00034	0.00209	0.642	0.002	0.028	0.021	0.048
0.3712	0.00022	0.00166	0.00108	0.00363	0.627	0.017	0.043	0.035	0.062
0.3864	0.00014	0.00035	0.00009	0.00166	0.612	0.010	0.021	0.011	0.042
0.4015	0.00008	0.00053	0.00017	0.00206	0.597	0.008	0.024	0.014	0.047
0.4167	0.00001	0.00129	0.00067	0.00341	0.582	0.005	0.037	0.027	0.060
0.4318	0.00014	0.00199	0.00117	0.00455	0.567	0.013	0.046	0.035	0.068
0.4470	0.00061	0.00334	0.00225	0.00652	0.552	0.026	0.059	0.048	0.082
0.4621	0.00001	0.00157	0.00079	0.00406	0.537	0.004	0.040	0.029	0.064
0.4773	0.00097	0.00005	0.00003	0.00102	0.522	0.031	0.008	0.005	0.032

PRUEBA SMIRNOV					PRUEBA KOLMOGOROV-SMIRNOV				
(2i-1)/2n	(F(x) _i - ((2i-1)/2n)) ²				Fo	F ₀ (x) - F(x)			
	NORMA L	GALTON	GAMMA A	GUMBEL L		NORMA L	GALTON	GAMMA A	GUMBEL L
0.4924	0.00034	0.00041	0.00006	0.00200	0.507	0.018	0.020	0.008	0.045
0.5076	0.00006	0.00097	0.00034	0.00310	0.493	0.008	0.031	0.018	0.056
0.5227	0.00020	0.00062	0.00014	0.00242	0.478	0.015	0.025	0.012	0.049
0.5379	0.00003	0.00112	0.00042	0.00332	0.463	0.006	0.033	0.020	0.057
0.5530	0.00012	0.00081	0.00023	0.00270	0.448	0.012	0.028	0.015	0.051
0.5682	0.00013	0.00078	0.00022	0.00259	0.433	0.012	0.027	0.014	0.050
0.5833	0.00115	0.00002	0.00008	0.00061	0.418	0.035	0.003	0.010	0.024
0.5985	0.00160	0.00001	0.00025	0.00025	0.403	0.042	0.005	0.017	0.014
0.6136	0.00141	0.00000	0.00020	0.00027	0.388	0.039	0.003	0.016	0.015
0.6288	0.00086	0.00004	0.00004	0.00054	0.373	0.031	0.004	0.008	0.021
0.6439	0.00022	0.00042	0.00007	0.00143	0.358	0.017	0.018	0.006	0.036
0.6591	0.00004	0.00083	0.00028	0.00206	0.343	0.008	0.026	0.014	0.043
0.6742	0.00004	0.00166	0.00083	0.00327	0.328	0.004	0.038	0.026	0.055
0.6894	0.00008	0.00178	0.00094	0.00327	0.313	0.006	0.039	0.028	0.054
0.7045	0.00053	0.00002	0.00003	0.00018	0.299	0.026	0.001	0.008	0.010
0.7197	0.00026	0.00011	0.00000	0.00032	0.284	0.019	0.007	0.002	0.015
0.7348	0.00309	0.00147	0.00201	0.00162	0.269	0.059	0.042	0.048	0.044
0.7500	0.00175	0.00062	0.00098	0.00073	0.254	0.046	0.029	0.035	0.031
0.7652	0.00086	0.00017	0.00037	0.00024	0.239	0.033	0.017	0.023	0.020
0.7803	0.00060	0.00010	0.00024	0.00021	0.224	0.029	0.014	0.020	0.019
0.7955	0.00026	0.00001	0.00007	0.00008	0.209	0.021	0.008	0.013	0.013
0.8106	0.00000	0.00014	0.00005	0.00004	0.194	0.006	0.007	0.002	0.002
0.8258	0.00001	0.00004	0.00001	0.00001	0.179	0.008	0.002	0.002	0.007
0.8409	0.00056	0.00050	0.00055	0.00142	0.164	0.029	0.027	0.028	0.043
0.8561	0.00064	0.00077	0.00076	0.00208	0.149	0.031	0.033	0.033	0.051
0.8712	0.00076	0.00115	0.00105	0.00288	0.134	0.033	0.039	0.038	0.059
0.8864	0.00023	0.00049	0.00042	0.00178	0.119	0.021	0.028	0.026	0.048
0.9015	0.00009	0.00034	0.00026	0.00152	0.104	0.016	0.024	0.022	0.045
0.9167	0.00003	0.00028	0.00019	0.00140	0.090	0.012	0.023	0.020	0.044
0.9318	0.00000	0.00012	0.00005	0.00096	0.075	0.005	0.017	0.014	0.037
0.9470	0.00001	0.00013	0.00005	0.00090	0.060	0.004	0.018	0.014	0.037
0.9621	0.00010	0.00002	0.00000	0.00046	0.045	0.003	0.012	0.007	0.028
0.9773	0.00014	0.00001	0.00000	0.00023	0.030	0.005	0.010	0.006	0.022
0.9924	0.00002	0.00002	0.00001	0.00005	0.015	0.003	0.012	0.010	0.015
SUMA =	0.05168	0.06149	0.05097	0.11798	D MAX=	0.083	0.080	0.082	0.085

PRUEBA SMIRNOV					PRUEBA KOLMOGOROV-SMIRNOV				
(2i-1)/2n	(F(x)i-((2i-1)/2n)) ²				F _o	F _o (x) - F(x)			
	NORMA L	GALTON	GAMMA A	GUMBEL L		NORMA L	GALTON	GAMMA A	GUMBEL L
1/12n =		0.00126			d tablas =		0.167		
Nw ² cal =	0.05295	0.06275	0.05223	0.11924	AJUSTE =	BUENO	BUENO	BUENO	BUENO
AJUSTE	BUENO	BUENO	BUENO	BUENO	ORDEN	3	1	2	4
ORDEN	2	3	1	4					

ANEXO 5. PRECIPITACIONES MÁXIMAS ESTACIÓN 29035 CALPULALPAN.

i	AÑO	PMAX	i	AÑO	PMAX	i	AÑO	PMAX
1	1948	28	21	1968	36.6	40	1991	53
2	1949	39.5	22	1969	42	41	1992	42.2
3	1950	36	23	1970	35	42	1993	65
4	1951	23	24	1971	30	43	1994	38
5	1952	46.5	25	1972	37	44	1995	25.8
6	1953	35	26	1973	38	45	1996	36.4
7	1954	28.5	27	1974	40.5	46	1997	54.2
8	1955	39	28	1975	56.5	47	1998	47.5
9	1956	47	29	1976	37	48	1999	40
10	1957	35	30	1977	61	49	2000	32.1
11	1958	50	31	1978	53.5	50	2001	35.7
12	1959	57	32	1979	60	51	2002	39.8
13	1960	37.5	33	1980	79	52	2003	32.5
14	1961	37	34	1981	48.1	53	2004	41.9
15	1962	40	35	1982	35	54	2005	34
16	1963	35	36	1983	35.2	55	2006	48
17	1964	39	37	1984	34.7	56	2007	50.4
18	1965	55	38	1989	39.8	57	2008	46
19	1966	47	39	1990	36.5	58	2009	41
20	1967	54						

ANEXO 6. Costos por metro cúbico del agua de lluvia

Costos por metro cúbico del agua de lluvia destinada a consumo humano.

COSTOS FIJOS

Sistema de recolección y distribución

Concepto	Unidad	P.U.	Cantidad	Importe
1 Canaletas, tuberías	Lote	\$15,000.0	1	\$15,000.0

Sistema de almacenamiento

Concepto	Unidad	P.U.	Cantidad	Importe
1 Excavación de la cisterna	m ³	\$230.0	136	\$31,280.0
2 Recubrimiento con geo membrana	m ²	\$250.0	171.5	\$42,885.0

Equipo de purificación y potabilización

1 Filtro de carbón activado	Lote	\$1,800.0	1	\$1,800
2 Osmosis Inversa	Lote	\$3,800.0	1	\$3,800

COSTOS VARIABLES

Consumo

Concepto	Unidad	P.U.	Cantidad	Importe anual
2 Hipoclorito de sodio	kg	\$6.340	10	\$63.40

Mantenimiento

1 Mantenimiento del equipo.	Lote	5% equipamiento	1	\$3,798.25
-----------------------------	------	-----------------	---	------------

COSTOS FIJOS	\$8,780.98				
	Valor inicial	Valor residual	Vida útil	Depreciación	Inversión
Sistema de recolección y distribución	\$15,000.0	\$1,500.0	15	\$900.00	\$751.58
Sistema de almacenamiento	\$74,165.0	\$7,416.5	30	\$2,224.95	\$3,716.04
Equipo de purificación y potabilización	\$5,600.0	0	6	\$933.33	\$255.08
	Costo anual total de depreciación =			\$4,058.28	
				Costo anual total de inversión =	\$4,722.69
COSTOS VARIABLES	\$3,861.65				
COSTO TOTAL	\$12,642.63				
Volumen anual extraído	300 m ³				
Costo por metro cúbico	\$42.1/m ³				

Costos por metro cúbico del agua de lluvia destinada a uso doméstico

COSTOS FIJOS

Sistema de recolección y distribución

Concepto	Unidad	P.U.	Cantidad	Importe
1 Canaletas, tuberías	Lote	\$8,000.0	1	\$8,000.0

Sistema de almacenamiento

Concepto	Unidad	P.U.	Cantidad	Importe
1 Excavación de la cisterna	m ³	\$230.0	74	\$7,400.0
2 Recubrimiento con geo membrana	m ²	\$250.0	84.8	\$21,187.5

Equipo de purificación y potabilización

1 Filtro de carbón activado	Lote	\$1,800	0	\$0.0
2 Osmosis Inversa	Lote	\$3,800	0	\$0.0

COSTOS VARIABLES

Consumo

Concepto	Unidad	P.U.	Cantidad	Importe anual
2 Hipoclorito de sodio	kg	\$6.340	5	\$31.70

Mantenimiento

1 Mantenimiento del equipo.	Lote	5% equipamiento	1	\$1,519.38
-----------------------------	------	-----------------	---	------------

COSTOS FIJOS	Valor inicial	Valor residual	Vida útil	Depreciación anual	Inversión anual
Sistema de recolección y distribución	\$8,000.0	\$800.0	15	\$480.00	\$400.84
Sistema de almacenamiento	\$38,207.5	\$3,820.75	30	\$,146.23	\$1,914.39
Equipo de purificación y potabilización	\$0	0	6	\$0	\$0
Costo anual total de depreciación =				\$1,626.23	
				Costo anual total de inversión =	\$2,315.23
COSTOS VARIABLES	\$1,942.08				
COSTO TOTAL	\$5,883.53				
Volumen anual extraído	146.0 m ³				
Costo por metro cúbico	\$40.3/m ³				

Costos por metro cúbico del agua de lluvia destinada a riego en un invernadero

COSTOS FIJOS

Sistema de recolección y distribución

Concepto	Unidad	P.U.	Cantidad	Importe
1 Canaletas, tuberías	Lote	\$100,000.0	1	\$100,000.0

Sistema de almacenamiento

Concepto	Unidad	P.U.	Cantidad	Importe
1 Excavación de la cisterna	m ³	\$230.00	597	\$137,310.0
2 Recubrimiento con geo membrana	m ²	\$250.00	370	\$92,500.0

Equipo de purificación y potabilización

1 Filtro de carbón activado	Lote	\$1,800.0	0	\$0.0
2 Osmosis Inversa	Lote	\$3,800.0	0	\$0.0

COSTOS VARIABLES

Consumo

Concepto	Unidad	P.U.	Cantidad	Importe anual
2 Hipoclorito de sodio	kg	\$6.340	0	\$0

Mantenimiento

1 Mantenimiento del equipo.	Lote	5% equipamiento	1	\$11,490.5
-----------------------------	------	-----------------	---	------------

COSTOS FIJOS	\$29,419.43				
	Valor inicial	Valor residual	Vida útil	Depreciación anual	Inversión anual
Sistema de recolección y distribución	\$100,000.0	\$10,000.0	15	\$6,000.0	\$5,010.5
Sistema de almacenamiento	\$229,810.0	\$22,981.0	30	\$6,894.3	\$11,514.6
Equipo de purificación y potabilización	\$0.0	\$0.0	6	\$0.0	\$0.0
	Costo anual total de depreciación =			\$12,894.30	
				Costo anual total de inversión =	\$16,525.13
COSTOS VARIABLES	\$11,490.5				
COSTO TOTAL	\$40,909.93				
Volumen anual extraído	1,575 m ³				
Costo por metro cúbico	\$26.0/m ³				