

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA

PROGRAMAS MULTIDISCIPLINARIOS DE POSGRADO

EN CIENCIAS AMBIENTALES

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

**ESCENARIOS FUTUROS DEL REÚSO DE AGUA RESIDUAL TRATADA A NIVEL
TERCIARIO PARA ABASTECIMIENTO PÚBLICO-URBANO EN ECATEPEC,
ESTADO DE MÉXICO**

PRESENTA:

LILIANA DEL ROCÍO HERRERA ZARAGOZA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ANTONIO CARDONA BENAVIDES

ASESORES:

DRA. MARÍA GUADALUPE GALINDO MENDOZA

DR. JOSÉ ANTONIO AVALOS LOZANO

JULIO 2012



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA
PROGRAMAS MULTIDISCIPLINARIOS DE POSGRADO
EN CIENCIAS AMBIENTALES

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

**ESCENARIOS FUTUROS DEL REÚSO DE AGUA RESIDUAL TRATADA
A NIVEL TERCIARIO PARA ABASTECIMIENTO PÚBLICO-URBANO EN
ECATEPEC, ESTADO DE MÉXICO**

PRESENTA:

LILIANA DEL ROCÍO HERRERA ZARAGOZA

COMITÉ TUTELAR:

DIRECTOR: DR. ANTONIO CARDONA BENAVIDES

ASESOR: DRA. MARÍA GUADALUPE GALINDO MENDOZA

ASESOR: DR. JOSÉ ANTONIO AVALOS LOZANO

SINODALES:

PRESIDENTE: Dr. Antonio Cardona Benavides

SECRETARIO: Dr. José Antonio Avalos Lozano

VOCAL: Dr. Luis Armando Bernal Jacome

Se muestran tres firmas manuscritas escritas sobre líneas horizontales. La primera firma es la más grande y está en la parte superior. La segunda firma es más pequeña y está en el medio. La tercera firma es la más pequeña y está en la parte inferior.

CRÉDITOS INSTITUCIONALES

PROYECTO REALIZADO EN:

**ÁREA CIENCIAS DE LA TIERRA
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ**

CON FINANCIAMIENTO DE:

CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

A TRAVÉS DEL PROYECTO DENOMINADO:

**“ELABORACIÓN DE LOS ESTUDIOS DE CAMPO PARA EL
ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA Y MODELO
HIDROGEOQUÍMICO DEL ACUÍFERO CUAUTITLÁN-PACHUCA,
ASOCIADOS A LA RECARGA ARTIFICIAL TRATADA, EN LA
ZONA DE EL CARACOL, ESTADO DE MÉXICO”**

**AGRADEZCO A CONACyT EL OTORGAMIENTO
DE LA BECA-TESIS**

Becario No. 247866

**LA MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES RECIBE APOYO
ATRAVÉS**

**DEL PROGRAMA NACIONAL DE POSGRADOS DE CALIDAD
(PNPC)**

"La contaminación no se detiene en las fronteras internacionales, y tampoco lo pueden hacer nuestra protección del medio ambiente y la salud. Los problemas ambientales locales y nacionales del pasado son ahora los desafíos globales"

Lisa P. Jackson, administradora de la EPA

DEDICATORIAS

A mis Padres Julián Herrera y Ma. De Jesús Zaragoza por apoyarme en esta etapa de desarrollo profesional y personal en la que sin ellos no podría haberla llevado a cabo, por su gran ejemplo, amor y dedicación. Gracias.

A mis hermanos Julián y Luis por estar siempre a mi lado y hacerme sentir querida e importante en sus vidas, tal y como ellos son parte esencial de la mía. Gracias

A Carlos mi gran cómplice, apoyo, fuerza y motivo.
Cuyo amor me cobijo en momentos de cansancio y alegrías. Gracias.

A mis grandes amigos y amigas que me han acompañado en este proceso de aprendizaje y crecimiento a ti Mariel, Yvonne, Adrix, David, Richard, Bety, Hugo, Flor, Ale, Mariana, Lupita, Gina, Sócrates, Eduardo y muchos más. Gracias

AGRADECIMIENTOS

Dr. Antonio Cardona agradezco la calidad humana, responsabilidad, apoyo e interés en el desarrollo del presente trabajo, además por darme la confianza y oportunidad de crecer, aprender y cumplir metas profesionales.

Dr. José Antonio Avalos por su dedicación, interés y contribuciones atinadas en el proyecto que formaron parte de tan valioso asesoramiento.

Dra. Guadalupe Galindo por sus contribuciones que crearon en mí conocimiento para una visión más amplia de los problemas sociales y el ambiente.

Dr. Luis Armando Bernal por ser parte del grupo evaluador cuyos comentarios formaran parte de un gran aprendizaje en el tema.

Dr. José María Quiroga Alonso Investigador de la Universidad de Cádiz, España por haber facilitado la estancia de investigación y permitirme conocer y aprender un poco más acerca de la reutilización de aguas y haberme apoyado para esta experiencia académica.

A profesores y personal administrativo que forma parte del Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales.

A L.G. Enrique Ibarra, Dr. Miguel Juárez y demás académicos y amigos que participaron en este proyecto con su asesoramiento y enseñanza.

RESUMEN

Debido a las diferentes características geográficas, demográficas y económicas que se presentan en México, la distribución de los recursos hídricos es irregular. La región hidrológico-administrativa XIII: Aguas del Valle de México presenta un elevado crecimiento demográfico y un aporte mayoritario de PIB; que ha generado un alto grado de presión sobre sus recursos hídricos del subsuelo, tal y como lo presentan los acuíferos Zona Metropolitana, Texcoco y Cuautitlán-Pachuca. Aunado a esto, existe una elevada producción de aguas residuales que junto con el escurrimiento pluvial son exportados hacia una cuenca vecina, hecho considerado como fuente de contaminación para la población. El tratamiento de aguas residuales en 2009 fue de 42%, y en la región XIII de 58%; específicamente el Sistema de Alcantarillado municipal del estado de México reportó la colección de un caudal de $25 \text{ m}^3/\text{s}$, de los cuales solo $6 \text{ m}^3/\text{s}$ recibían tratamiento. Por tanto, se destaca la importancia del tratamiento para garantizar el ciclo de reúso en las aguas residuales, y así considerarlas como un recurso valioso cuya demanda aumentará en la medida en que continúe la tendencia actual y se incrementen las necesidades de agua de primer uso. El presente trabajo se encaminó a la caracterización, diagnóstico, y prospección del manejo de los recursos hídricos y aguas residuales en Ecatepec, abordando escenarios alternativos a partir de dos enfoques: reutilización directa de aguas residuales tratadas (efluente directo al sistema de abastecimiento público-urbano después del tratamiento avanzado) e indirecta (recarga artificial a acuíferos en zona “El Caracol”). El resultado: una estrategia integral que contempla el valor del agua residual tratada a nivel ambiental, económico y social, además del análisis en las oportunidades del reúso público-urbano, industrial y ambiental, destacando la importancia de la participación de los usuarios para la aceptación de estrategias y tecnologías que brinden seguridad en los procesos.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	12
1.1 PROPUESTA DE TESIS	14
1.2 OBJETIVO GENERAL.....	15
1.3 MARCO TEÓRICO.....	16
1.4 ÁREA DE ESTUDIO	17
1.4.1 Estado de México	17
1.4.2 Ecatepec de Morelos.....	18
1.4.3 Sosa Texcoco	22
1.5 METODOLOGÍA.....	27
2. MANEJO DE LOS RECURSOS HIDRICOS EN ECATEPEC	30
2.1 CARACTERIZACIÓN	30
2.1.1 Región Hidrológica-Administrativa XIII Aguas del Valle de México,	30
2.1.2 Administración del recurso en Ecatepec.....	33
2.1.3 Suministro y aprovechamiento de agua residual tratada	36
2.1.4 Drenaje	36
2.1.5 Aguas residuales.....	37
2.1.6 Situación del recurso hídrico.....	38
2.2 DIAGNÓSTICO.....	50
2.2.1 Urbanización.....	50
2.2.2 Actividad económica	52
2.2.3 Problemática social	53
2.3 PROSPECCIÓN.....	59
2.3.1 Actores: funcionarios	59
2.3.2 Actores: Ciudadanos.....	62
3. REUTILIZACIÓN	67
3.1 TIPOS DE REUTILIZACIÓN	71
3.2 APLICACIONES DE AGUA RESIDUAL TRATADA	72
3.3 CICLO DEL REÚSO	72
3.4 ASPECTOS SANITARIOS.....	74
3.4.1 Tipos de riesgo	75
3.5 FIABILIDAD Y PLANEACIÓN DE UN SISTEMA DE REUTILIZACIÓN	77
3.6 REUTILIZACIÓN EN LA GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HIDRICOS	78
3.7 GESTIÓN DEL AGUA EN MÉXICO	80
3.8 MARCO LEGAL	82
3.8.1 Ley de Aguas Nacionales	83
3.8.2 Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)	84
3.8.3 Norma oficial mexicana NOM-001-ECOL-1996	85
3.8.4 Norma oficial mexicana NOM-003-ECOL-1997	86
3.8.5 Marco Jurídico estatal y municipal.....	87

4. REUTILIZACIÓN INDIRECTA: RECARGA ARTIFICIAL	89
4.1 APLICACIONES	90
4.2 MÉTODOS DE RECARGA	91
4.3 VIABILIDAD DEL PROYECTO	94
4.4 EXPERIENCIAS EN RECARGA ARTIFICIAL.....	95
4.4.1 Recarga artificial en México	96
4.5 SISTEMA DE RECARGA ARTIFICIAL “EL CARACOL”	98
4.5.1 Acuífero receptor	99
4.5.2 Agua de recarga.....	103
4.5.3 Aspectos legislativos	108
4.5.4 Destino final	111
4.5.5 Evaluación económica	112
5. REUTILIZACIÓN DIRECTA	115
5.1 Factibilidad de reutilización directa: PTAR “El Caracol”	118
6. ESTRATEGIA Y DISCUSIÓN	123
6.1 Medidas en el manejo de agua	124
6.2 Estrategia de reutilización de aguas residuales	129
7. CONCLUSIONES	132
8. RECOMENDACIONES	135
9. BIBLIOGRAFÍA	1351

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Localización de la zona de estudio: Ecatepec de Morelos, Estado de México	18
Figura 1-2: Símbolo y escudo de Ecatepec de Morelos.....	19
Figura 1-3: Localización de Ecatepec de Morelos.....	19
Figura 1-4: Edafología en el Estado de México y municipios de Ecatepec.....	20
Figura 1-5: Volúmenes propuestos para agua residual tratada de PTAR El Caracol	25
Figura 1-6: Polígono de estudio para el Sistema de Recarga Artificial. Fuente: Cardona B. 2011 .	26
Figura 1-7: Primer etapa en la metodología: Fases Caracterización, Diagnóstico y Prospección ...	28
Figura 1-8: Etapa final de la metodología: Reutilización y estrategias	29
Figura 2-1: Región Hidrológico-Administrativa XIII Aguas del Valle de México	31
Figura 2-2: Acuíferos Cuautitlán-Pachuca, Texcoco y ZMCM en la subregión Valle de México ..	38
Figura 2-3: Ubicación de los puntos de muestreo para el SRA en los acuíferos de estudio.	44
Figura 2-4: Diagramas de Stiff: calidad química de elementos mayores en pozos muestreados.....	45
Figura 2-5: Estaciones de Monitoreo en la RHA XIII: Aguas del Valle de México	47
Figura 2-6: Urbanización y área de acuíferos ZMCM, Texcoco y Cuautitlán-Pachuca.	50
Figura 2-7: Concesiones irregulares en Zona Federal del Lago de Texcoco, Ecatepec de Morelos	55
Figura 2-8: Problemas sociales y ambientales en Ecatepec de Morelos	58
Figura 2-9: Primera pregunta a ciudadanos: ¿Qué es el agua para usted?.....	63
Figura 2-10: ¿Con qué frecuencia cuenta con el servicio?	63
Figura 3-1: Cambios en la calidad del agua durante el tiempo y el uso.....	69
Figura 3-2: Tratamiento, regeneración y reutilización en el ciclo hidrológico.....	73
Figura 3-3: Usuarios potenciales para el agua residual tratada.....	74
Figura 3-4: Modelos para la Sustentabilidad	80
Figura 4-1: Recarga Artificial de acuíferos.....	90
Figura 4-2: Beneficios ambientales, sociales y económicos de la recarga artificial.	91
Figura 4-3: Factores de importancia en el proceso operativo de un proyecto de recarga artificial..	94
Figura 4-4: Consideraciones para la viabilidad de un proyecto de recarga.	95
Figura 4-5: Sistema BARDENPHO propuesto por el Instituto de Ingeniería de la UNAM.....	105
Figura 4-6: Área de influencia directa e indirecta del SRA en la zona de El Caracol.	112
Figura 4-7: Inversión en la Planta de Tratamiento El Caracol 2009.....	113
Figura 5-1: Proceso de reutilización propuesto por la CEA de Jalisco para agua potable.....	117
Figura 6-2: Adaptación del Modelo Presión-Estado-Respuesta en la región de El Caracol.....	123
Figura 6-1: Sistemas socio-ambiental y el sistema de decisiones.....	123

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Disponibilidad de agua en la Región Hidrológico-Administrativa XIII.....	31
Tabla 2-2: Tarifas de agua en algunos municipios del estado de México.....	34
Tabla 2-3: Tarifa de agua dependiendo el uso por grupo de municipios.	35
Tabla 2-4: Tarifa por metro cubico de agua por grupo de municipios.....	35
Tabla 2-5: Tarifa por agua disponible.....	36
Tabla 2-6: Capacidad y operación actual de plantas de tratamiento en Ecatepec.....	37
Tabla 2-7: Acuíferos de interés en la Zona de Estudio El Caracol.	39
Tabla 2-8: Parámetros hidráulicos del acuífero de la ZMCM.....	41
Tabla 2-9: Registro de pozos por acuífero.	42
Tabla 2-10: Pozos muestreados con valores por encima de los LMP de la NOM-127-SSA1-1994	45
Tabla 2-11: Parámetros de DBO ₅ y DBO en estaciones de monitoreo 6VM y 7VM.....	47
Tabla 2-12: Calidad de agua: Gran Canal y Río de la Compañía SACM (2002) e IMTA (2008) ...	48
Tabla 2-13: Distribución del territorio en Ecatepec de Morelos para el 2003.	51
Tabla 2-14: Etapa de Prospección con funcionarios y académicos	60
Tabla 3-1: Necesidades y beneficios de la reutilización de agua	70
Tabla 3-2: Contaminantes de preocupación en el agua residual	76
Tabla 3-3: Elementos de la planificación de la reutilización de aguas residuales.....	77
Tabla 3-4: Modelos de Gestión.....	79
Tabla 3-5: Límites máximos permisibles para reúso en servicios públicos.	86
Tabla 4-1: Métodos y dispositivos para la recarga artificial	92
Tabla 4-2: Ventajas y desventajas en los diferentes métodos de recarga artificial	93
Tabla 4-3: Unidades hidrogeológicas en la Cuenca del Valle de México	100
Tabla 4-4: Descripción de los aspectos relativos al acuífero receptor	101
Tabla 4-5: Parámetros de control de calidad para la compatibilidad geoquímica en la recarga. ...	104
Tabla 4-6: Resultados del sistema BANDENPHO correspondiente al tratamiento avanzado.....	106
Tabla 4-7: Resultado de metales de interés en el sistema BARDEPHO.....	107
Tabla 4-8: Parámetros de calidad exigidos por la NOM-014-CONAGUA-2003	110
Tabla 4-9: Parámetros de calidad exigidos por la NOM-015-CONAGUA-2007	111
Tabla 4-10: Valores permitidos para usos ambientales establecidos en España	111
Tabla 4-11: Costo estimado del Proyecto de Sustentabilidad Hídrica del Valle de México.....	113
Tabla 5-1: Objetivos del tipo de tratamiento al cual son sometidas las aguas residuales	119
Tabla 5-2: Calidad de agua residual del Gran Canal después del tratamiento avanzado.....	120

1. INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos se presentan en formas y dimensiones variadas, desde las más evidentes masas de agua superficiales que discurren por los ríos o emergen desde los manantiales, hasta el agua almacenada en los acuíferos aluviales de los ríos o en los pequeños lagos de alta montaña aislados de un flujo continuo de agua (Quiroga Alonso, 2011).

Durante los últimos cincuenta años, la actividad humana ha provocado la contaminación de de estos recursos. Se estima que más de 2 500 millones de personas en el mundo viven sin un sistema adecuado de saneamiento y cada día 2 millones de toneladas de aguas residuales y otros efluentes son drenados hacia las aguas del mundo. En el caso de los países en desarrollo, 90% de los desechos sin procesar y el 70% de los desechos industriales sin tratar se vierten en aguas superficiales (FAOWATER, 2010).

En el marco de los Objetivos del Desarrollo Mundial se destacó la importancia de la calidad del agua, al considerarse que este recurso constituye un insumo básico para el bienestar social y el desarrollo económico por lo que se propuso reducir a la mitad, para el año 2015, el porcentaje de personas que carezcan de acceso sostenible al agua potable y a servicios básicos de saneamiento (FAOWATER, 2010). Debido a esto y a una falla tecnológica el dispendio del agua, la competencia por su uso y la contaminación, generan una problemática creciente, cuya solución exige una planificación y ordenación en el manejo de los recursos hídricos (CONAGUA, 2008).

Es preciso considerar asimismo que en el contexto de la situación del agua en México, los problemas de degradación de suelos, deforestación y pérdida de biodiversidad son la causa de numerosos conflictos sociales que hoy en día se presentan en el país (Álvarez Icaza, 2010; Cotler, 2004). Además el cambio de uso de suelo, intervienen en la gestión del agua, disminuyendo su disponibilidad o afectando su calidad. Sumado a esto, debido al incremento en la necesidad de servicios el proceso de urbanización ha ejercido fuertes presiones sobre el medio ambiente y las instituciones desde los años cincuenta al 2005, la

población del país se cuadruplicó, y pasó de ser rural a urbana en un 77%. (CONAGUA(c), 2010).

Por lo tanto y debido a lo mencionado anteriormente, las bajas eficiencias en el uso del agua aunadas al incesante crecimiento poblacional han ocasionado que el agua de los ríos y lagos sean insuficientes en algunas zonas, que las fuentes de abastecimiento subterráneas estén sobreexplotadas presentan extracción intensiva y que la calidad natural del agua se haya deteriorado (CONAGUA, 2008). Es así como la reutilización y reciclado del agua se está haciendo mucho más común a medida que la demanda excede el suministro (Manahan, 2007). Las prácticas de manejo y reúso de aguas residuales en países en vías de desarrollo a menudo no son ni planeadas ni controladas y generan altas tasas de infiltración a los acuíferos subyacentes (Foster y cols., 2002-2006). Por lo tanto es necesario, redoblar esfuerzos para incrementar sustancialmente este valor, lo que permitirá sustituir agua de primer uso por agua residual tratada, así como recuperar la calidad de los ríos y lagos del territorio e incrementar la recarga de los acuíferos (CONAGUA, 2008). El enfoque actual del agua en el país es a través de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) que prevé una política pública que persigue el desarrollo y manejo coordinado del agua que busca propiciar el aprovechamiento de los recursos bajo criterios de equidad y sostenibilidad (Dourojeanni, 2002).

1.1 PROPUESTA DE TESIS

La situación de los recursos hídricos en México está dispuesta a partir de la distribución desigual del agua a lo largo del país, lo que determina la disponibilidad en ciertas regiones. La Región Hidrológico-Administrativa (RHA) XIII Aguas del Valle de México, presenta la mayor proporción de población en el país; además de ser el principal aporte de Producto Interno Bruto (PIB) en el país; sin embargo, es también la región con menor volumen de agua renovable alcanzando un alto grado de presión sobre el recurso hasta considerarse en estado de estrés hídrico, debido a factores como el rápido crecimiento urbano y económico que ha sufrido la región a lo largo de su perspectiva histórica desde años como 1325 y sus patrones hidrológicos. Los acuíferos de la subregión Valle de México están sujetos a una extracción intensiva a consecuencia del incremento en la demanda de los diferentes usos del agua. Idealmente la urbanización debería estar en función de la disponibilidad del recurso hídrico para poder realizar un manejo adecuado de la oferta, más sin embargo, esto aún no es considerado. Adicionalmente la descarga de aguas residuales es elevada y el caudal tratado es relativamente bajo. Esto se vuelve importante ya que el tratamiento de las aguas residuales es esencial para garantizar el ciclo de vida del recurso. Entre las alternativas futuras se encuentra el reúso de agua residual tratada, el cual es un recurso valioso y su demanda aumentará en la medida en que decrezca la disponibilidad y se incrementen las necesidades de agua de primer uso. Es por ello que el análisis de la reutilización de aguas residuales tratadas se aborda desde el enfoque de escenarios posibles que incluyan la recarga artificial de acuíferos del Valle de México y Plantas de Tratamiento con nivel avanzado para analizar la posibilidad de abastecer a la población.

La hipótesis de este estudio radica en que el reúso de agua residual tratada puede ser considerado como una alternativa para el abastecimiento público-urbano de la población. Mitigando así los problemas de disponibilidad y presión sobre el recurso, lo que a su vez originaría una conciencia del cuidado del agua. En este trabajo se analiza el caso del municipio de Ecatepec, Estado de México, ya que es una zona que manifiesta las características principales de la región XIII Aguas del Valle de México, donde en sus inmediaciones se pretende construir una planta de tratamiento terciario de aguas residuales.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el reúso y aprovechamiento de aguas residuales tratadas para uso público-urbano y determinar escenarios futuros para su factibilidad tanto en la recarga artificial de agua subterránea y la distribución directa de las plantas de tratamiento a nivel terciario.

Objetivos Específicos:

1. Evaluar la Reutilización Indirecta del agua residual tratada de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “El Caracol” para la Recarga Artificial de acuíferos en Ecatepec, estado de México, valorando la normatividad y percepción de actores sociales en esta práctica de reúso.
2. Determinar la factibilidad de la Reutilización Directa del efluente terciario procedente de la PTAR al sistema de distribución para uso público-urbano.
3. Diseñar una estrategia integral con los escenarios posibles del reúso de agua residual tratada en Ecatepec, estado de México y municipios colindantes.

1.3 MARCO TEORICO

El crecimiento demográfico mundial ha presentado a lo largo de la historia cambios notables que han impactado en el desarrollo de una región o país entero. Un ejemplo de ello fue en 1950 cuando la población mundial era de 2529 millones de personas, mientras que para el 2010 esta cifra aumento a 6909 millones. Aunado a esto, para el siglo XX mientras que la población mundial se triplicó, las extracciones de agua se sextuplicaron, situación que afecta en mayor medida el grado de presión sobre los recursos hídricos. El crecimiento se concentró principalmente en las regiones en desarrollo. Estadísticas mundiales ubican a México en el lugar 11° de un total de 222 países con mayor población en centros de desarrollo (CONAGUA, 2011).

En México, el Plan Nacional de Desarrollo (2007-2012) se encaminó al Desarrollo Humano Sustentable, donde se pronuncia una vida digna para sus pobladores sin comprometer el patrimonio de las generaciones futuras; basado en un adecuado manejo y en la conservación del agua como parte fundamental en el bienestar social, desarrollo económico y preservación ecológica del país. Las condiciones propias del país, obligan al uso eficiente del agua en todas las actividades, tanto en el riego como en la industria y en el hogar (CONAGUA, 2008).

Para fines de administración y preservación de las aguas nacionales, el país se ha dividido en 13 RHA, las cuales están formadas por agrupaciones de cuencas, consideradas las unidades básicas de gestión de los recursos hídricos. En el contraste del desarrollo y el agua renovable, la región XIII Valle de México, presenta gran población (1293 hab/km²), baja cantidad de agua renovable, y un aporte de gran proporción de PIB 21% nacional (CONAGUA(c), 2010)

Describiendo el ciclo hidrológico en México, anualmente se reciben del orden de 1489 miles de millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, se estima que el 73% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 22% escurre por los ríos o arroyos, y el 5% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos.

Tomando en cuenta las exportaciones e importaciones de agua con los países vecinos, así como la recarga incidental, anualmente el país cuenta con 460 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable. México en tan sólo 56 años pasó de una disponibilidad de 18035 a tan sólo 4416 m³/hab/año, lo que lo ubica en una situación delicada (CONAGUA, 2008). Por lo tanto, el panorama actual es de desafíos considerando también la distribución desigual de los recursos hídricos en el país, mientras el sureste mexicano tiene una disponibilidad natural de 13290 m³/hab/año, el resto del país posee un promedio de 1 835 m³/hab/año (CONAGUA(a), 2011). El 68% del agua disponible se encuentra en regiones donde vive el 23% de la población, y se genera el 15% de PIB, mientras que el 32% del agua disponible se encuentra en regiones donde se concentra el 77% de la población y se genera el 85% del PIB (INEGI, 2005; Escalante y cols., 2003).

1.4 ÁREA DE ESTUDIO

1.4.1 Estado de México

El Estado de México toma su nombre del antiguo reino; posteriormente Reino y después Intendencia de México en 1786, cuya capital fue la ciudad de México. La palabra México de origen náhuatl deriva de las raíces etimológicas: metztli, “luna”; xictli, “ombligo”, y co, “lugar”, que significa “el lugar del ombligo de la luna” (INAFED, 2010).

Cuenta con una extensión territorial de 22499.95 km², cifra que representa el 1.09% del total del país. Su división política es de 125 municipios, y con una población total registrada de 15175862 habitantes aportando así cerca del 14% de la población total del país (INEGI, 2011).

Geográficamente se localiza en la zona central del país, en la parte oriental de la mesa de Anáhuac, entre el paralelo 18° 20' y 20° 17' latitud norte y 98° 35' y 100° 37' de longitud oeste, a una altura promedio de 2683 msnm, la planicie más alta es el valle de Toluca. Colinda al norte con Querétaro e Hidalgo; al sur con Guerrero y Morelos; hacia el este Puebla y Tlaxcala; y al oeste Guerrero y Michoacán, así como con el Distrito Federal, al

que rodea al norte, este y oeste tal y como lo muestra la Figura 1-1. (INAFED, 2010; INEGI, 2011)

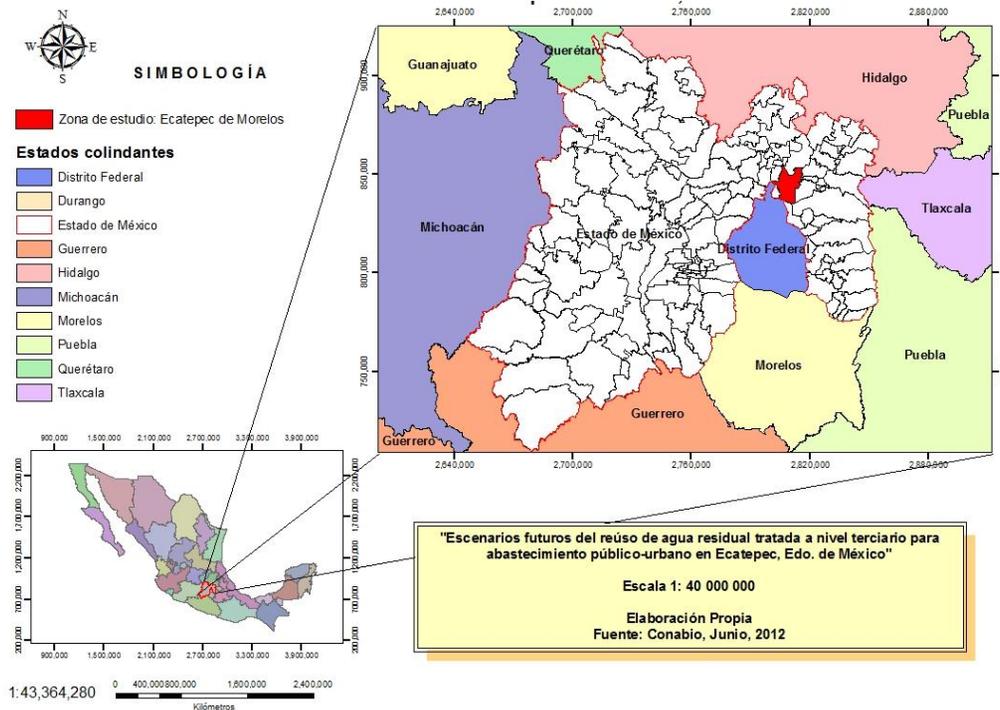


Figura 1-1: Localización de la zona de estudio: Ecatepec de Morelos, Estado de México

Dentro de la superficie del estado de México el uso de suelo se clasifica en 38% destinado a uso agrícola, el 35% forestal, 17% pecuario, el 11% industrial y urbano (INAFED, 2010).

1.4.2 Ecatepec de Morelos

El municipio de Ecatepec de Morelos forma parte de la división política del estado de México, ubicado en su región más poblada denominada Valle Cuautitlán-Texcoco, formando parte del Subsistema Ecatepec-Tecámac (CONAGUA(b), 2010).

De acuerdo a su toponimia náhuatl las palabras Echecha-tepec significa “En el cerro del viento o del aire”, su escudo está simbolizado por una cabeza de un ave emplumada con pico largo que descansa sobre una base de piedra y un monolito que representa su cuerpo.

Mientras que el escudo oficial del municipio resalta los principios de autonomía, unión y trabajo, Figura 1-2 (INAFED, 2010).



Figura 1-2: Símbolo y escudo de Ecatepec de Morelos

La superficie del municipio es considerada en 160.17 km², se localiza geográficamente entre los paralelos 19° 29' y 19° 40' de latitud norte y 98° 58' y 99° 08' de longitud oeste; con una altitud de 2200 a 3000 msnm. Colindando al norte con los municipios de Coacalco de Berriozábal, Tultitlán, Jaltenco, Tonanitla y Tecámac; al este Tecámac, Acolman y Atenco; al sur Atenco, Texcoco, Nezahualcóyotl, Distrito Federal y Tlalnepantla de Baz; y al oeste con Tlalnepantla de Baz, Distrito Federal y Coacalco de Berriozábal, tal y como se representa en la Figura 1-3 (INEGI, 2011).

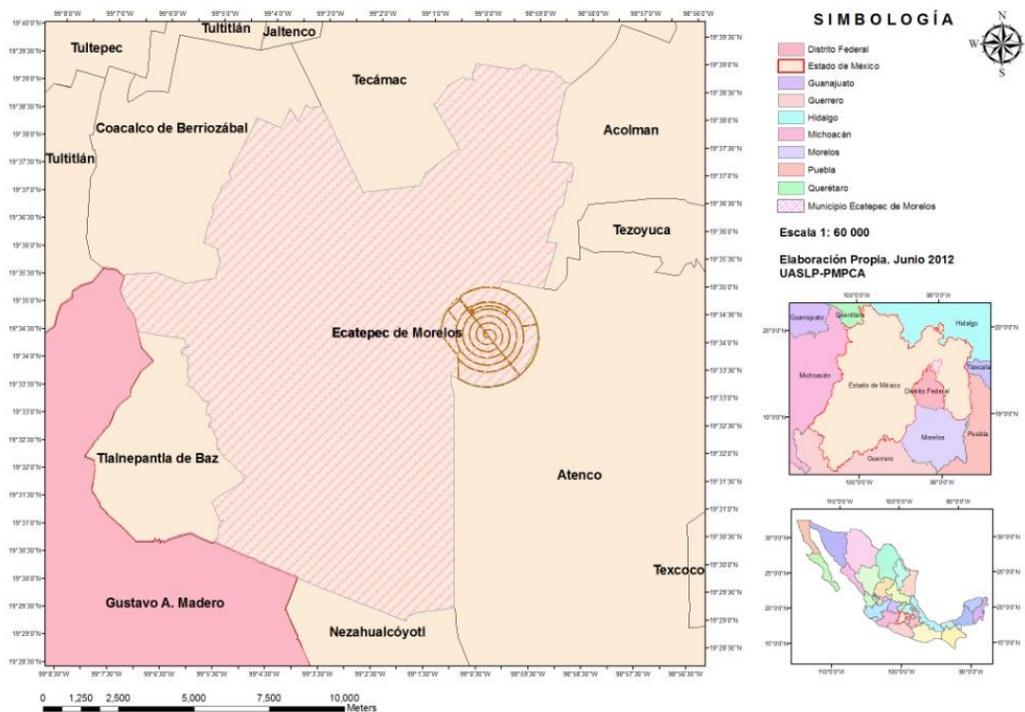


Figura 1-3: Localización de Ecatepec de Morelos

En relación a su relieve, Ecatepec muestra conformaciones principales en la Sierra de Guadalupe con elevaciones entre los 2 250 y 2 900 msnm y pendientes mayores a 35%. Una segunda zona, ubicada por debajo de los 2 250 msnm y una conformación de ligera pendiente hacia el suroeste, las principales elevaciones Los Picos de Moctezuma, Tres Padres, Los Díaz y Yoncuico, Las Canteras, Picacho Grande, Cuanahuatpec, Cerro Gordo, Cabeza Blanca, Chiconautla y De la Cruz localizados a una altitud promedio de 2240 msnm. En la zona plana se detectan subzonas: i) Al oeste terrenos con pendientes del 15% y 35% que implican problemas para usos urbanos, ii) una zona intermedia que en su mayor parte se encuentra poblada con pendientes entre el 5% y 15%; y iii) finalmente al sureste y este la conformación topográfica muestra pendientes muy leves entre 2 y 5 % (Secretaría del Desarrollo Urbano, 2003).

En Ecatepec el suelo se caracteriza por ser de tipo lacustre en un 5% y aluvial en un 0.3%, edafológicamente el tipo de suelo dominante en la zona de estudio comprenden el Zolonchak gleyico definido en la parte poniente y Vertisol Cromico en la parte oriente, Figura 1-4. (Secretaría del Desarrollo Urbano, 2003; INEGI, 2010).

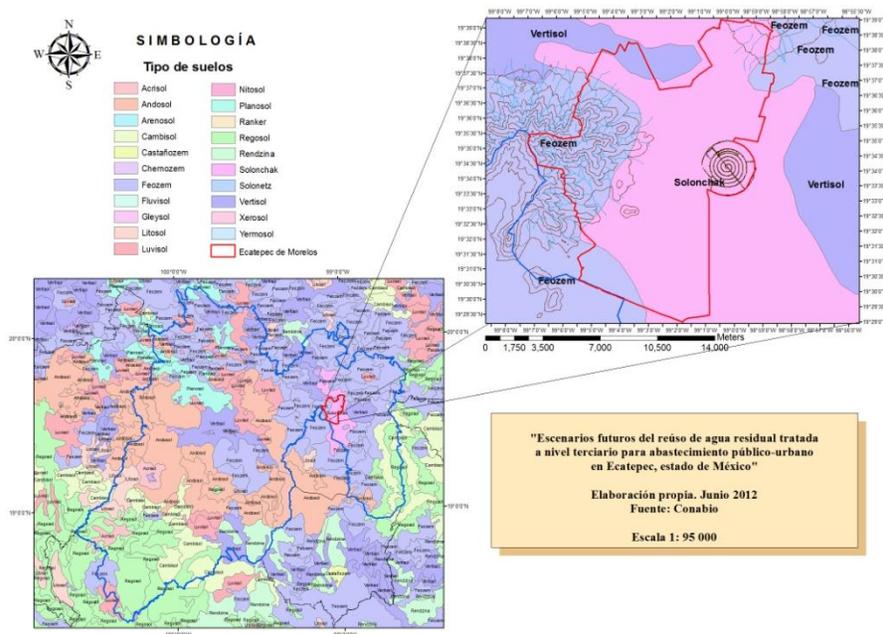


Figura 1-4: Edafología en el Estado de México y municipios de Ecatepec

En cuanto al clima el poniente predomina el clima templado con lluvias y frío en invierno la temperatura promedio es de 7°C en invierno, y máxima de 30°C en verano. En la parte oriente del municipio el clima es semiseco con lluvias en verano con una temperatura media anual de 14.9°C. El rango de precipitación es de 584 y 600 mm anuales, los vientos dominantes provienen del norte y se dirigen hacia el sur con una velocidad promedio de 20 km/hr (Secretaría del Desarrollo Urbano, 2003; INEGI, 2011).

Demográficamente, Ecatepec es uno de los municipios metropolitanos con mayor población y densidad de habitantes por superficie, en 2008 registró 10799 hab/km² (CONAGUA, 2009). Mientras que el último censo de población realizado en 2010 reporta un total de 1 656107 habitantes (INEGI, 2010). Más sin embargo, cifras extraoficiales describen una población mucho mayor a la censada.

En México actualmente prevalece el criterio cuantitativo de 2500 habitantes para delimitar la frontera entre lo urbano y lo rural. James H. Johnson clasifica un asentamiento urbano a aquel que tenga un tamaño, una densidad de población y una estructura de empleo determinados (Villalvazo Peña y cols. 2002). En base al Consejo Nacional de Población los municipios del país se clasifican, primero, como rurales, aquellos donde más de 50 por ciento de la población reside en localidades censales menores de 2 500 habitantes; en segundo término, como semiurbanos, aquellos municipios que tienen este porcentaje de población en rangos de localidades entre 2 500 y 14 999 habitantes; y, finalmente, como urbanos, aquellos que alojan su mayor número de personas en rangos de localidades de 15 mil o más habitantes (CONAPO, 2010), en tanto el municipio de Ecatepec de acuerdo con lo anterior se puede considerar como un núcleo urbano en base a su demografía y actividades productivas, entre otras.

Para ello, el municipio cuenta con una división de 9 localidades y se distribuye en 8 distritos: Zona IV y V, Xalostoc-Jajalpa-Tultetlac, Zona Poniente, San Cristóbal, Guadalupe Victoria, Jardines de Morelos-Llano de Báez, Sosa Texcoco y Chiconautla (Secretaría del Desarrollo Urbano, 2003; Gaceta del gobierno, 2002).

Con respecto al **Índice de Marginación (IM)** que permite de manera general observar el nivel de rezago que un municipio presenta con relación al acceso de servicios básicos (educación, la vivienda, ingresos y servicios públicos), se contempla que un valor inferior a -1.22193 significa marginación baja, mientras que un valor mayor a 1.06659 indica alta marginación con una precaria accesibilidad a los servicios. El municipio de Ecatepec registró para el año 2010 un valor de **-1.61804**, es decir, un índice de marginación **muy bajo** el cual la población de este municipio tiene acceso cómodo a los servicios básico (CONAGUA, 2009; CONAPO, 2010).

Por otro lado, el **Índice de Desarrollo Humano (IDH)** mide como una sociedad mejora la condición de vida de sus ciudadanos a través de un incremento de los bienes con los que puede cubrir sus necesidades básicas y complementarias. Un IDH con valor de uno corresponde al máximo logro posible, mientras que un valor de cero establece que no existe avance alguno. En el caso de Ecatepec en el 2005 presentó un IDH **alto (0.8527)** que indicaba que para ese año se cubrían las necesidades de mejoramiento de los ciudadanos de este municipio en relación a otros en el Estado de México (CONAGUA, 2009).

1.4.3 Sosa Texcoco

El distrito de Sosa Texcoco se localiza en la parte central del municipio y se delimita al norte por la Avenida Matamoros en el poniente por la Avenida Central, al sur por el Canal de las Sales y al poniente por el Depósito de Evaporación solar “El Caracol”. Actualmente este distrito no cuenta con población residente por ser baldío (Secretaría del Desarrollo Urbano, 2003).

Sosa Texcoco está compuesto por dos zonas: el Depósito de Evaporación Solar “El Caracol” (con una superficie de 653.37has) que es una zona inundable con alto contenido de sales en el suelo y en temporada de vientos genera tolvánicas nocivas arrastrando bicarbonato de sodio; en la segunda zona se encuentran los predios de la antigua industria Sosa Texcoco que cuentan con cinco pozos profundos, subestación eléctrica e

infraestructura ferroviaria (Secretaría del Desarrollo Urbano, 2003; Gaceta del gobierno, 2002).

En 1943 el gobierno federal otorgó la concesión por cincuenta años a la empresa Sosa Texcoco S.A para el uso de la Aguas Salinas provenientes de la bonificación de las tierras del Lago de Texcoco y las del subsuelo que puedan hacerse aflorar por medio de pozos. Desde 1938 habían realizado los primeros trabajos para encontrar una forma de aprovechar industrialmente las sales del Lago de Texcoco, siendo el evaporador solar y algunas de las plantas experimentales sus principales contribuciones al proyecto que más tarde llevaría en nombre de "Sosa Texcoco". La planta original fue diseñada por la Chemical Construction Corporation de Nueva York, partiendo de los estudios efectuados por el Dr. Antonio Mandinaveitia, para una producción diaria de 100 toneladas de carbonato de sodio, la mitad de ellas destinadas a la fabricación de sosa cáustica en la misma planta. Se encontraba ubicada en las inmediaciones del municipio de Ecatepec de Morelos, en el Estado de México; al borde del antiguo Lago de Texcoco. Este se encuentra situado el noreste de la ciudad de México, con aproximadamente 40 kilómetros de longitud (norte-sur) por 20 kilómetros de anchura (este-oeste); circundado por lo municipios de Ecatepec y Texcoco, y las zonas de Chapingo y Santa Clara. Actualmente los terrenos de la planta son los que ocupa el fraccionamiento "Las Américas, Ecatepec".

En el territorio predominan las llanuras con una altitud promedio 2250msnm, el predio se encuentra conformado por sedimentos salinos. El tipo de suelos es de mediana estabilidad, con ciertas restricciones para asentamientos humanos, ya que provocan inundaciones en la época de lluvia por la poca permeabilidad, y el alto manto freático son también suelos expansivos que provocan agrietamientos y daños a las construcciones sin las cimentaciones adecuadas (Gaceta del gobierno, 2002).

En el Distrito de Sosa Texcoco, más específicamente en la zona de El Caracol se presenta pastizal con dominancia de especies gramíneas, se distinguen tres tipos: Pastizal natural, secundario y halófilo, en todos ellos el papel principal corresponde a los zacates. El tipo Halófilo se presenta debido a la desecación de la zona lacustre original de la cuenca del

Valle de México, formándose zonas con condiciones edáficas con alto contenido de sales y mal drenaje. Esta característica es la de mayor distribución en la Zona Federal del ex Lago de Texcoco (CONAGUA(b), 2010).

1.4.3.1 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Caracol

El Distrito de Sosa Texcoco es de interés para el presente análisis, ya que es en esta zona de predio federal es donde se construirá la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) El Caracol, en los terrenos del antiguo Depósito de Evaporación Solar de la extinta empresa Sosa Texcoco, ubicada al noreste de la Zona Conurbada de la Ciudad de México con colindancia a la Delegación Gustavo A. Madero; al norte se ubica Coacalco de Berriozábal, Tecámac y Tultitlan; al sur Netzahualcóyotl y Texcoco, al este Acolman y Atenco mientras que al oeste Tlalnepantla y delegación Gustavo A. Madero (CONAGUA(b), 2010). La superficie de construcción es cercana a las 44 hectáreas ubicadas en el municipio de Ecatepec y en colindancia con colonias como Valle de Ecatepec, Ampliación joyas de Ecatepec, Alfredo del Mazo y Josefa Ortiz de Domínguez; al norte limita con Fraccionamiento las Américas y el Centro Comercial del mismo nombre. Este sitio asignado para la PTAR se considera ideal para la captación y disposición de un caudal considerable de aguas residuales procedentes del Distrito Federal y estado de México desalojadas por el **Gran Canal** (CONAGUA(b), 2010).

Este proyecto es parte del Programa de Sustentabilidad Hídrica de la Cuenca del Valle de México, que contempla un gasto de $4\text{m}^3/\text{s}$ para cubrir los objetivos de proporcionar agua para riego de cultivos en la zona, tanto para la agricultura como para el programa de reforestación en Ecatepec, Atenco y Texcoco (CONAGUA, 2010).

El Sistema de Tratamiento constará de un tratamiento primario integrado por un tratamiento preliminar y sedimentación primaria seguido a una caja partidora de gasto de los $4\text{m}^3/\text{s}$ donde: $1\text{m}^3/\text{s}$ va a tratamiento secundario compuesto por **lodos activados**, sedimentador secundario y cloración. Otros $2\text{m}^3/\text{s}$ serán sometidos a tratamiento con **lagunas de estabilización** y finalmente $1\text{m}^3/\text{s}$ estaría destinado a **tratamiento avanzado** conformado

por sedimentación secundaria, tratamiento químico, ozonación, adsorción y desinfección con UV; este efluente será utilizado para el proyecto de recarga de acuíferos (Figura 1-5).



Figura 1-5: Volúmenes propuestos para agua residual tratada de PTAR El Caracol

Se destaca que las actividades que se realizarán a la operación del proyecto comprenden solo el tratamiento de las **aguas residuales del Gran Canal**, mientras que para el tratamiento y desecho de los **lodos residuales**, serán vertidos al Túnel Emisor Oriente para su tratamiento en la PTAR Atotonilco (CONAGUA, 2010).

Es el Instituto de Ingeniería de la UNAM quien fue el encargado junto con la CONAGUA para el diseño y operación de una planta a nivel laboratorio que contemplará el proceso de tratamiento para la PTAR de El Caracol, llamado BARDENPHO, el cual se describirá en el apartado del Sistema de Recarga Artificial.

1.4.3.2 Zona de estudio para el Sistema de Recarga Artificial

El sistema de recarga en el cual se estudia la factibilidad para la recarga con agua residual tratada está constituida por una superficie de 370km², y se encuentra dentro del polígono formado por las siguientes coordenadas y es mostrado en la figura 1-6:

19°30'14"	Latitud N;	99° 5'17"	Longitud W
19°30'13"	Latitud N;	98°54'49.33"	Longitud W
19°41'9.40"	Latitud N;	98°54'50.40"	Longitud W
19°41'10.67"	Latitud N;	99° 5'19.33"	Longitud W

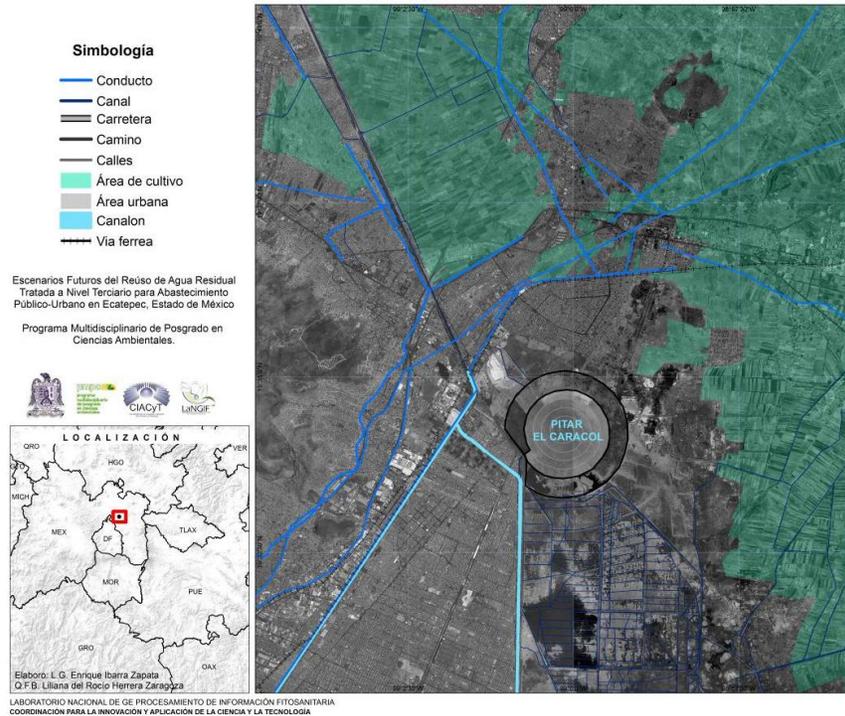


Figura 1-6: Polígono de estudio para el Sistema de Recarga Artificial. Fuente: Cardona B. 2011

En la zona de estudio El Caracol, aflora una secuencia de rocas constituida por estructuras volcánicas, tales como domos y estratovolcanes colapsados, los cuales tienen asociados depósitos de caída, flujos piroclásticos, flujos de lodo y avalanchas. La planicie incluida en la mayor parte del área de El Caracol, incluye depósitos lacustres del Reciente. Están representados por arcillas lacustres, que son sedimentos asociados con los diversos lagos que se desarrollaron en las planicies de la porción nororiental de la Ciudad de México (Cardona Benavides, 2011).

La geología del subsuelo en El Caracol, está representada por sedimentos finos de granulometría variada (entre arenas y limos, en ocasiones con arcillas) hasta una profundidad del orden de 70m, posteriormente se identifican horizontes de basaltos con un espesor del orden de 30-40 m, que sobreyacen a arenas fluviales y sedimentos de granulometría variada (Cardona Benavides, 2011).

A escala de la Cuenca de México, las zonas de recarga de mayor importancia para los sistemas de flujo subterráneo, corresponden con las elevaciones que limitan a la Cuenca hacia el oriente y hacia el sur; zonas de recarga cualitativamente de menor importancia se detectan en la porción occidental de la cuenca. Cabe señalar que, en las partes altas, en donde las rocas fracturadas alternan con depósitos menos permeables, se suelen originar acuíferos colgados independientes al sistema regional, siendo su descarga a través de manantiales transitorios o permanentes (Cardona Benavides, 2011).

Se registró en la zona de estudio que la vegetación terrestre dominante y abundante son los pastos o zacates salados *Distichlis spicata*, el pasto salado es una especie nativa que se desarrolla en la zona en forma natural de acuerdo a trabajos de pastización que ya se han realizado (CONAGUA, 2010).

1.5 METODOLOGÍA

Es importante señalar que para el análisis de la reutilización de agua residual en el presente trabajo se parte de llevar a cabo un **Sistema de Planeación Estratégica** que permite evaluar las posibilidades y oportunidades de este recurso: agua residual tratada en base a situación actual de la zona de estudio.

Por lo tanto, en el desarrollo de cada uno de los objetivos planteados, se analizará conforme a la adaptación de la metodología del Ordenamiento ecológico que sugiere el Instituto Nacional de Ecología, el cual destacan las fases: Caracterización, Diagnóstico, Prospección, Propuesta, Gestión e Instrumentación (INE, 2000). En este estudio se considerarán solo las tres primeras fases que permitirán desarrollar los objetivos establecidos (Figura 1-7).

Es de suma importancia considerar que la gestión e instrumentación se refieren a la acción coordinadora de la participación social, gubernamental, académica y empresarial en el proceso de integrar un proyecto o evaluación dentro del sistema de planeación nacional (INE, 2000). Debido a esto, el presente trabajo consiste básicamente en la construcción de los posibles escenarios a los que se enfrenta la gestión y la reutilización de aguas residuales.

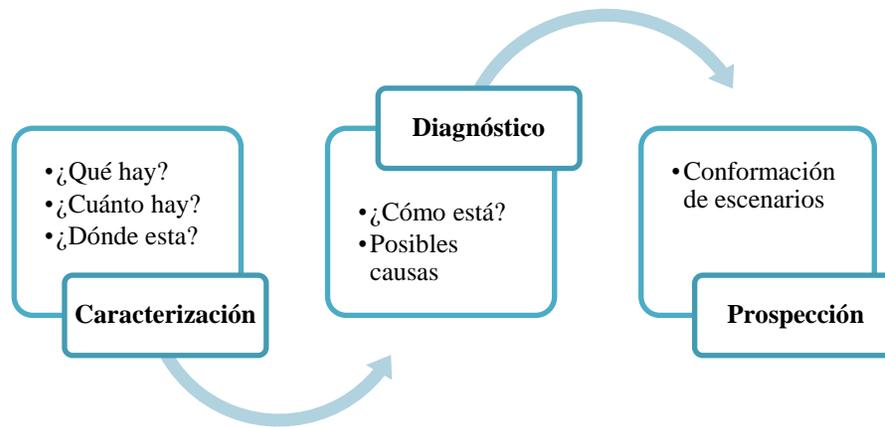


Figura 1-7: Primer etapa en la metodología: Fases Caracterización, Diagnóstico y Prospección

La fase de **Caracterización**: Contempla un panorama cualitativo y cuantitativo de los recursos hídricos de la Zona en relación a: origen de agua, situación en la que se encuentra el recurso, requerimientos del municipio, caudal de aguas residuales y tratamiento de estas.

- Esto se llevó a cabo a partir de la recopilación de información generada en investigaciones anteriores o por organizaciones gubernamentales encargadas.

Fase de **Diagnóstico**: Encaminado al análisis y valoración de la problemática ambiental en cuanto a: ¿Cómo están los recursos hídricos en relación con la población y las actividades productivas? La recopilación de información brindó un panorama global de la urbanización, actividades económicas y las problemáticas sociales más recurrentes entre el recurso y la sociedad.

- Además esta fase incluye los Capítulo 3 y 4 con la revisión del marco legal tanto para la reutilización de aguas residuales tratadas y los proyectos emblemáticos de la recarga artificial. Considerando a su vez la normativa de agua para consumo humano.

Y finalmente la **Prospección** es el proceso de articulación de las expectativas y capacidades de los actores sociales para alcanzar un futuro que se proyecta como deseable:

« Reutilización de agua residual tratada para abastecimiento de uso público urbano»

Esta fase se consideró en dos etapas:

- Primera: Se realizaron pláticas entre actores sociales como autoridades del sector gubernamental y del suministro de agua así como a representantes de la sociedad.
- Segunda: La construcción de escenarios con una estrategia integral del manejo de los recursos hídricos a partir de la información recabada en la etapa anterior.

Como resultado del estudio se integrará la información con el fin de obtener los escenarios ante el reúso de agua residual tratada y la tecnología en la zona de análisis. Asimismo las medidas que aportarán el análisis en el manejo del agua y las estrategias por sectores para la reutilización del agua residual tratada (Figura 1-8):



Figura 1-8: Etapa final de la metodología: Reutilización y estrategias

2. MANEJO DE LOS RECURSOS HIDRICOS EN ECATEPEC

De acuerdo a la metodología propuesta se describirá a continuación la fase de Caracterización donde engloba el panorama de los recursos hídricos en la zona de estudio.

2.1 CARACTERIZACIÓN

La cuenca del Valle de México se localiza en la parte Central–Este del Cinturón Volcánico Mexicano entre los paralelos 19°00' y 20°35' de latitud Norte y 98°11' y 99°40' de longitud Oeste. El fondo de la cuenca es una planicie lacustre de 1,431 km², a una altitud que varía entre 2 230 y 2 240 msnm. Se ubica en la Cuenca alta del Río Pánuco, y está formada por dos subcuencas, Valle de México y Río Tula (CONAGUA, 2009).

El área del Lago de Texcoco se ha utilizado como regulador de la hidrología superficial de la región sur de la cuenca de México y del drenaje urbano de dicha Ciudad. Por casi tres siglos se ha usado como lago de regulación en donde temporalmente se continúa vertiendo agua residual, la cual fluye finalmente por el Gran canal hacia el exterior de la cuenca de México (Huizar Álvarez, Hernández Garcia, Angeles, & Ruiz, 2002).

2.1.1 Región Hidrológica-Administrativa XIII Aguas del Valle de México,

La región RH-A XIII se divide en dos subregiones, Valle de México y Tula (Fig.2-1). La subregión Valle de México está conformada por 69 municipios (50 del estado de México, 15 de Hidalgo y 4 de Tlaxcala) y las 16 delegaciones políticas del DF. Por su parte, la subregión Tula está conformada por 31 municipios (7 del estado de México y 24 de Hidalgo).

La disponibilidad natural media per cápita por subregiones es de 74m³/hab para el Valle de México y de 1522 m³/hab para la subregión de Tula (Tabla 2-1). Otro dato de interés es

el aprovechamiento de agua residual donde la subregión de valle de México no registra volumen mientras que el uso total se realiza en la subregión Tula (CONAGUA, 2009).

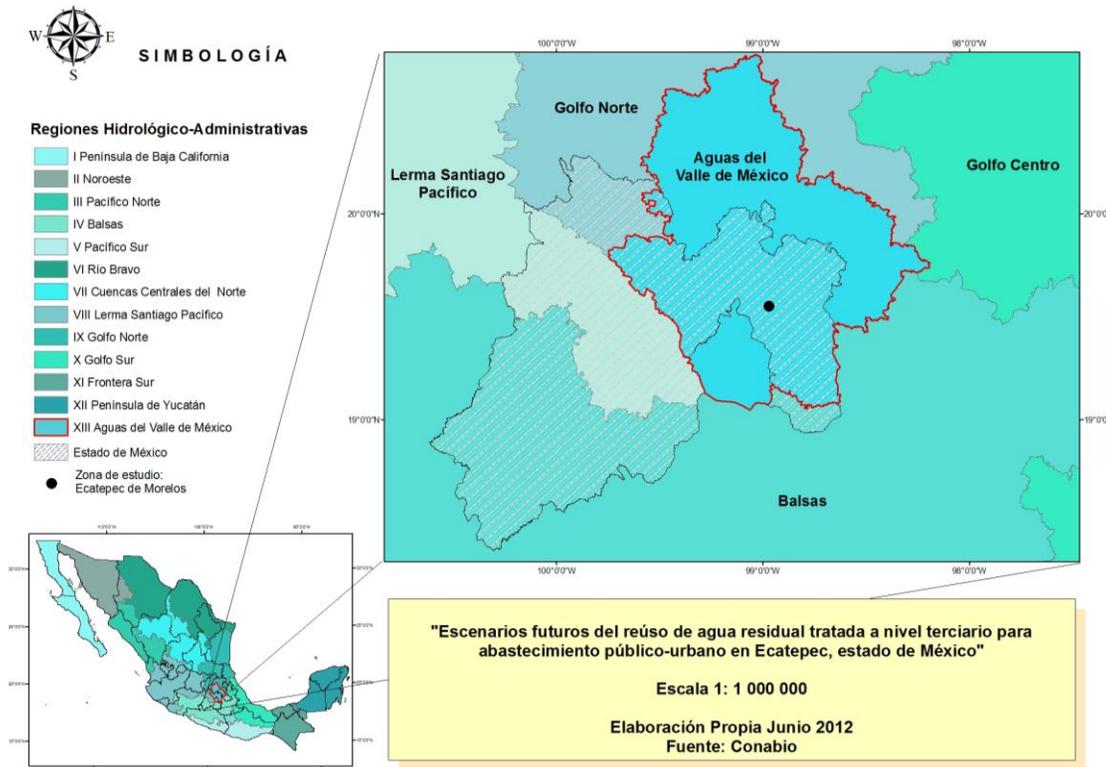


Figura 2-1: Región Hidrológico-Administrativa XIII Aguas del Valle de México

Tabla 2-1: Disponibilidad de agua en la Región Hidrológico-Administrativa XIII

Subregión	Precipitación media histórica (1980-2004) (hm ³)	Escorrentamiento superficial virgen medio (hm ³)	Recarga media de acuíferos (hm ³)	Disponibilidad natural media (hm ³)	Disponibilidad natural media per cápita (población 2008) (m ³ /hab)
Valle de México	6 771.20	746.31	750.70	1 497.01	74
Tula	3 604.38	428.12	959.90	1 388.02	1 522
Total	3 604.38	1 174.43	1 710.60	2 885.03	136

Subregión	Extracciones de agua subterránea	Aprovechamiento de aguas superficiales	Importación de otras cuencas ^c	Aprovechamiento de agua residual	Total
Valle de México	1 876.39	91.45	614.95	0.00	2 582.80
Tula	167.14	220.75	0.00	1 545.26	1 933.16
Total	2 043.53	312.21	614.95	1 545.26	4 515.96

El **Grado de presión** que se registra en cada una de las subregiones es de 182% en el Valle de México y 111% para la subregión de Tula. El término de estrés hídrico severo, se refiere a la situación en la que las extracciones de agua superan el 40% de los recursos renovables. En consecuencia, el valor en cada una de estas subregiones se encuentra muy por encima de la definición de estrés hídrico.

Una vez ubicada la región hídrica de influencia en el municipio de Ecatepec, se describe de forma particular las corrientes presentes en esta zona del municipio. Este se sitúa en el noreste del Distrito Federal ocupando en su mayor parte el lecho de un antiguo lago que formaba parte del sistema hidráulico de la cuenca del Valle de México (Calderón Sosa, 2005). Ecatepec forma parte de la Región Hidrológica 26 “Alto Pánuco”, y cuenta con escurrimientos de agua importantes de los cuales destacan: el Arroyo Puente de Piedra, La Guiada, Tres Barrancas, La Tabla y El Calvario. Estos escurrimientos en periodo de lluvias acarrearán gran cantidad de sedimentos de las partes altas y erosionadas de la Sierra, así como basura, lo que ocasiona conflictos viales sobre la Vía Morelos y calles perpendiculares (Secretaría del Desarrollo Urbano, 2003).

El recurso hidrológico superficial proviene del Río de los Remedios ubicado al sur del municipio y funciona como límite municipal e interestatal con Nezahualcóyotl y el Distrito Federal, actualmente es la descarga de aguas residuales municipales y, además en él se mezclan las aguas del Gran Canal del Desagüe procedentes del Distrito Federal cruzando de sur a noroeste (INAFED, 2010). Al este se localiza el cuerpo de agua del Depósito de evaporación solar “El Caracol” (Secretaría del Desarrollo Urbano, 2003).

Asimismo, Ecatepec es atravesado por tres grandes canales a cielo abierto: el Gran Canal, el Canal de las sales y Río de los Remedios, en los cuales se lleva a cabo el desalojo de aguas residuales, domésticas e industriales sin tratamiento previo (INAFED, 2010; Secretaría del Desarrollo Urbano, 2003).

2.1.2 Administración del recurso hídrico en Ecatepec

La administración del agua potable y del desalojo, tratamiento y depuración de agua residual está a cargo del Organismo Público Descentralizado: Sistema de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Ecatepec (SAPASE).

En cuanto al **Agua potable**. El organismo operador encargado de proveer el servicio de agua potable a 3 millones de habitantes cuenta con 71 pozos y bloques de aportaciones en las derivaciones federales. La información registrada por SAPASE es que de los pozos de agua se extraen 3 000 l/s, además de los 1 800 l/s que se reciben a través del **Sistema Cutzamala**, es decir, **4 800 l/s** como caudal de suministro para el municipio (Gobierno de Ecatepec, 2009).

En el 2005, Calderón Sosa desglosa las fuentes de abastecimiento de donde se obtiene el recurso en el municipio estas son:

- 33 pozos profundos propios
- 54 pozos profundos estatales ubicados principalmente en la Cabecera Municipal, Jardines de Morelos y Zona Quinta.
- Tomas de agua en bloque suministrada por Acueducto Chiconautla, tanque Cerro Gordo y toma las Huertas para uso habitacional.
- Sistema Cutzamala (Macrocircuito) con 14 tomas
- 16 pozos de agua operados por cisternas independientes
- 130 pozos de uso industrial

De acuerdo a lo descrito por la Secretaria de Ecología (2004), la **oferta** de agua potable en Ecatepec es de 6,280 l/s mientras que la **demanda** es de 7,092 l/s, por lo que hay un déficit de 812 l/s. y hace la distinción que el resto de los municipios de la región no presentan déficit. Hay que distinguir que esta agua subterránea no solo abastece a Ecatepec, también lo hacen para el Distrito Federal y el municipio de Tlalnepantla a través del Sistema de pozos de **Plan de Acción Inmediata (PAI)** a través del acueducto Chiconautla y el Ramal de los Reyes, esto se realiza a través de la **Red de distribución de agua potable** el cual

está integrada por siete sistemas independientes que suman 1 836.5 Km de canalizaciones (115.5 km de red primaria y 1,725 Km de red secundaria). Este sistema de suministro funciona por bombeo, auxiliándose de 6 tanques elevados y 39 tanques superficiales, para bombear a las partes altas. Se estima que el 85% de la población es beneficiada con el servicio, de esta el 90% es atendida por SAPASE y el resto por los sistemas independientes (Secretaría del Desarrollo Urbano, 2003).

En las zonas contiguas a las instalaciones de Sosa Texcoco son alimentadas por la red municipal de agua potable, está a su vez se alimenta de los 15 pozos existentes en la sección norte de la colonia Jardines de Morelos (Gaceta del gobierno, 2002).

En el tema de la **oferta y la demanda**, en el Sistema Nacional de Tarifas administrado por la Comisión Nacional del Agua están publicados los informes de tarifa por estado y municipios, para detallar la situación de Ecatepec se muestra la Tabla 2-2 que indican algunas tarifas para agua potable, alcantarillado y saneamiento para municipios como Toluca, Atizapán y Naucalpan.

Tabla 2-2: Tarifas de agua en algunos municipios del estado de México

Municipio	Usuario	Subclasificación	Consumo (m ³)	Tarifa AP/ m ³	Tarifa Alc/ m ³	Tarifa San/ m ³
Toluca	Doméstico	Popular	30	8.74	1.75	0
Atizapán	Doméstico	Residencial Alto	30	13.46	1.62	0
Naucalpan	Doméstico	Residencial Alto	30	13.47	1.16	0

El cobro de derechos se encuentra regido por la Ley Federal de Derechos donde clasifica a los municipios de una región y determina la zona de disponibilidad, de acuerdo a como lo establece el artículo 223: “Por la explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales (...) se pagará el derecho sobre agua, de conformidad con la zona de disponibilidad de agua en que se efectúe su extracción” (Ley Federal de Derechos , 2007). Actualmente existen 9 zonas de disponibilidad, para la RHA XIII donde el municipio de Ecatepec pertenece a la **Zona 1**. Una vez identificado se manifiesta lo siguiente: **A.-** Por las aguas provenientes de fuentes superficiales o extraídas del subsuelo, a excepción de las del mar, por cada metro cúbico se pagará:

Zona de disponibilidad 1 \$ 16.5665

Sin embargo, el Estado de México en particular, a través de la Gaceta de Gobierno da a conocer las Cuotas y tarifas para el ejercicio Fiscal de 2010, previstas en el título tercero "de los ingresos del estado", Capítulo segundo "de los derechos disposiciones generales" del código Financiero del estado de México y municipios.

- I. Por la conexión de la toma para el suministro de agua en bloque proporcionada por la Comisión del Agua del Estado de México, se pagará de acuerdo a la tabla 2-3: (Gaceta del Gobierno, 2010):

Tabla 2-3: Tarifa de agua dependiendo el uso por grupo de municipios.

m ³ /día	1	2	3	4
Uso domestico	\$2559	\$2405	\$2252	\$2100
Uso no doméstico	\$3199	\$2892	\$2686	\$2531

- II. Por los servicios proporcionados a través de la Comisión del Agua del Estado de México, se pagarán los siguientes derechos:

- A). Para el suministro de agua en bloque, se pagará de acuerdo con la tabla 2-4:

Tabla 2-4: Tarifa por metro cubico de agua por grupo de municipios

Grupo	1	1b	2	3	4	Otros
\$/m3	5.73	5.30	4.74	4.13	3.2	6.88

- Grupo 1.** Atizapán de Zaragoza, Coacalco de Berriozábal, Cuautitlán, Cuautitlán Izcalli, **Ecatepec de Morelos**, Naucalpan de Juárez, Tlalnepantla de Baz y Tultitlán.
- Grupo 1b.** Chimalhuacán, Huixquilucan, Ixtapaluca, La Paz, Lerma, Nezahualcóyotl, Nicolás Romero, Tepotzotlán, Toluca y Valle de Chalco Solidaridad.
- Grupo 2.** Atlacomulco, Chicoloapan, Huehuetoca, Nextlalpan, Ocoyoacac, Tecámac, Tianguistenco, Tultepec y Zumpango.
- Grupo 3.** Almoloya de Juárez, Amecameca, Atlautla, Coyotepec, Hueypoxtla, Ixtlahuaca, Jaltenco, Otumba, Tenango del Valle, Teoloyucan, Tequiquiac y Tlalmanalco.
- Grupo 4.** Axapusco, Ayapango, Ecatingo, Jilotepec, Joquicingo, Juchitepec, Luvianos, Ozumba, San Simón de Guerrero, Soyaniquilpan de Juárez, Tejupilco, Temascaltepec, Tenango del Aire, Tepetlixpa y Timilpan.

2.1.3 Suministro y aprovechamiento de agua residual tratada

Por el agua disponible dentro de las instalaciones de las **plantas de tratamiento** de jurisdicción estatal, se pagará conforme a la Tabla 2-5 (Gaceta del Gobierno, 2010):

Tabla 2-5: Tarifa por agua disponible

Usos	Pesos/m ³
Uso a cargo del municipio	\$1.82
Otros usos	\$4.24

Conexión, tratamiento y manejo ecológico de aguas residuales:

1. Conexión a colectores que descargan en las plantas de tratamiento \$2747 m³/día.
2. Tratamiento de aguas residuales en las plantas de tratamiento \$3.91 m³

Por el suministro y recarga de reactivos Gas-Cloro e Hipoclorito de Sodio y mantenimiento de equipos de cloración, se pagarán \$ 0.115 por metro cúbico establecido en el Código financiero del Edo. de México y municipios.

2.1.4 Drenaje

La infraestructura sanitaria es crítica, rebasada, antigua y carente de inversión en su rehabilitación desde hace más de 25 años. Este panorama no es nada alentador si se considera que además hay 7 comunidades sin el servicio de alcantarillado, y los que cuentan con él, 18 zonas son susceptibles de inundación (Gobierno de Ecatepec, 2009). A nivel municipal, el servicio se proporciona al 80% de la población con un sistema de descarga sin previo tratamiento.

Existen 25 cárcamos mediante los cuales se desalojan tanto aguas residuales como pluviales, a los cinco afluentes federales que atraviesan el municipio: Gran Canal de Desagüe, Canal de la Draga, el Dren de Cartagena, Río de los Remedios y el Dren General del Valle, con descargas por gravedad utilizando tuberías con diámetros de hasta 3.05 m (Secretaría del Desarrollo Urbano, 2003; Gaceta del gobierno, 2002).

A pesar de que las autoridades municipales son las que tienen las mayores posibilidades de transferir a los usuarios los costos de utilización de los usos del agua, este mecanismo sigue siendo indirecto a través de los impuestos locales y de las cuotas de recuperación por suministro del líquido. Los ciudadanos son, por decirlo de alguna manera, clientes cautivos de sus propias necesidades, pero lo más importante es que la valoración de los costos reales para el uso eficiente del agua puede y debe ser transferida a los usuarios a través de tasas impositivas con resultados medibles, tanto económica como políticamente, al menos cada tres años, en el periodo de elecciones municipales (Álvarez Icaza, 2010).

2.1.5 Aguas residuales

El sistema de alcantarillado municipal del Estado de México recibe un caudal de 25 m³/s, y de ese volumen se da tratamiento a 5.69 m³/s (Gobierno del Estado de México, 2009). En la región a donde pertenece Ecatepec, se generan alrededor de 160 millones de m³/año de aguas residuales que son vertidas principalmente al Canal Cartagena, Dren San Diego, Canal Nexquipayac, Río Grande, Arroyo La Soledad, Río Salado, Arroyo Estete y campos de absorción, todos pertenecientes a la cuenca del Río Moctezuma de la Región Hidrológica del Pánuco (Secretaría de Ecología, 2004). En el municipio, la descarga promedio de aguas residuales que se genera es de 5.07 m³/s. Existen para ello dos plantas de tratamiento con un proceso de tratamiento en base **a lodos activados**, ver tabla 2-6:

Tabla 2-6: Capacidad y operación actual de plantas de tratamiento en Ecatepec.

Planta de Tratamiento	Capacidad m ³ /s	Operación actual m ³ /s
Termoeléctrica Valle de México	0.5	0.45
Papelera San Cristóbal	0.35	0.26

2.1.6 Situación del recurso hídrico

2.1.6.1 Agua subterránea

La RH-A Aguas del Valle de México incluye diez acuíferos, que abarcan los estados de Hidalgo, México y Tlaxcala así como el Distrito Federal estos son el de ZMCM, Valle del Mezquital, Ixmiquilpan, Actopan-Santiago de Anaya, Tecocomulco, Apan , Chalco-Amecameca, Texcoco, Cuautitlán-Pachuca y Soltepec (CONAGUA , 2009).

En Ecatepec convergen tres acuíferos, figura 2-2, que comparten características de pertenencia a RH-A XIII, RH 26, cuenca Moctezuma, subregión Valle México y condición de extracción intensiva.

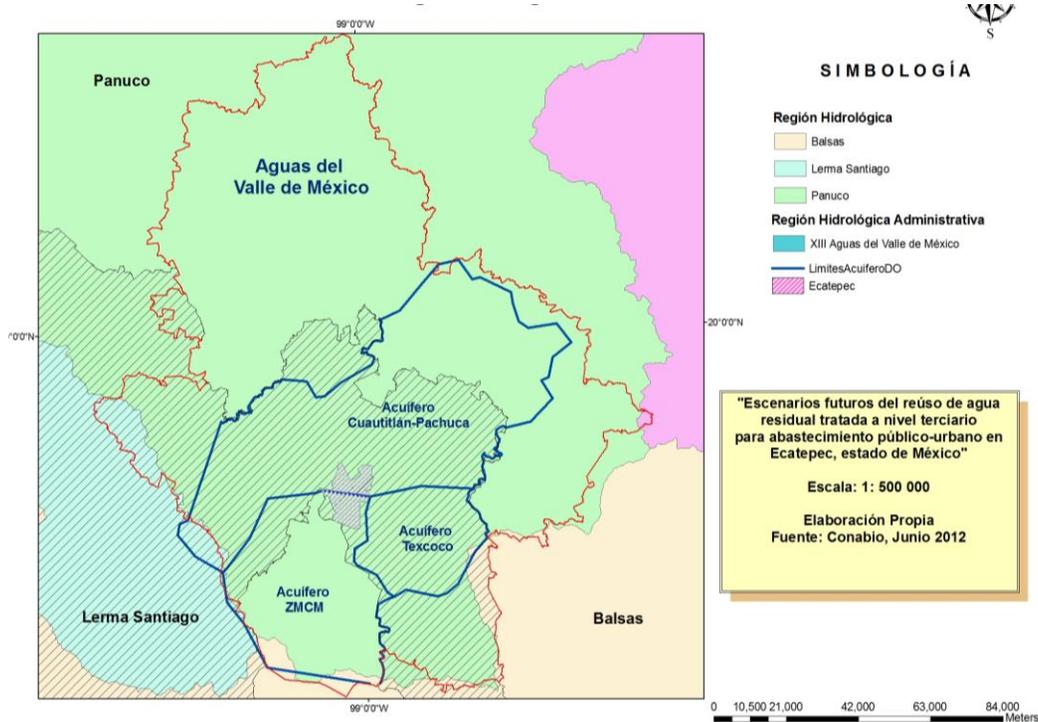


Figura 2-2: Acuíferos Cuautitlán-Pachuca, Texcoco y ZMCM en la subregión Valle de México

La CONAGUA en su reporte oficial del 2009 brinda la información de disponibilidad de cada uno de los acuíferos de interés (Tabla 2-7). Donde se destaca que para este año la relación de extracción en cuanto al volumen concesionado muestra cierta presión en los acuíferos, además se observa que hay un gran déficit a causa de un volumen elevado de demanda por el recurso.

Tabla 2-7: Acuíferos de interés en la Zona de Estudio El Caracol. Fuente: Diario Oficial (2009)

Clave	Acuíferos	Extracción	Recarga	Descarga Natural comprometida	Volumen concesionado	Volumen de extracción consignado a estudio técnico	Disponibilidad media anual	Déficit
		Millones de m ³ anuales						
0901	ZMCM	623.8	512.8	0.0	1,226.43	623.8	0.0	-713.6292
1507	Texcoco	184.2	161.0	10.4	199.67	184.2	0.0	-49.0734
1508	Cuautilán-Pachuca	751.3	356.7	0	546.69	751.3	0.0	-189.9915

Acuíferos:

El **acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM)**, ubicado en el sur poniente de la Cuenca del Valle de México, ocupa el 17% de la superficie de la cuenca endorreica. La Ciudad de México y su área conurbada dependen fundamentalmente para abastecimiento de agua potable del suministro del acuífero. La ciudad y el acuífero están separados, en su mayor parte por un acuitardo arcilloso, el espesor del acuitardo es de alrededor de 50 metros, el acuífero alcanza profundidades mayores a 800 metros; y en él se encuentran pozos con profundidades entre 100 y 400 m (CONAGUA (d), 2002).

En cuanto a los decretos de veda las 13 delegaciones que se encuentran incluidas dentro de este acuífero están vedadas de manera total desde 1954. Según el decreto de la Veda de la Cuenca del Valle de México del 19 de agosto de 1954, fecha de su publicación en el Diario Oficial. Los municipios considerados dentro de este acuífero que se encuentran vedados de manera total son: Atizapán de Zaragoza y Tlanepantla, parcialmente está vedado el Municipio de Huixquilucan (CONAGUA (d), 2002).

En el censo realizado por la CONAGUA en el 2002 se determinó que el principal uso de agua extraída era destinado para uso Público-Urbano con un total de 448.499 Mm³ anuales, el segundo volumen más importante de extracción fue para uso Industrial con 49.419 Mm³ anual y el tercer uso era para el uso Comercial con 6.540 Mm³ anuales.

Acuífero de Texcoco se encuentra comunicado con el acuífero Cuautilán-Pachuca en la parte norte a través de los materiales aluviales y lacustres común en estas planicies;

asimismo en la parte oriente con el acuífero ZMCM a través de la continuidad de los depósitos lacustres y aluviales, y hacia el sur con el acuífero Chalco-Amecameca. La superficie contemplada en este polígono es de 939.04 km². Entre sus límites territoriales se encuentran 12 municipios del Estado de México. Para el 2006 de acuerdo a la actualización de lo reportado por el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) permitió identificar que se contaba con 552 pozos destinados a diversos aprovechamientos y de los cuales están distribuidos en: norias (5), pozos (524), manantiales (18) y combinados norias-pozos (5). El volumen total extraído del acuífero superior fue de 183 Mm³/año, siendo el consumo por sector, de mayor a menor volumen: público urbano 128 Mm³/año, agrícola 48 Mm³/año, industrial 4 Mm³/año, múltiple y servicios 1.6 Mm³/año y pecuario, 0.8 Mm³/año (Cardona Benavides, 2011).

Para el año de 2006, los niveles de agua oscilaron entre los 30 y 150 m de profundidad, obteniéndose una profundidad en el poblado de Texcoco de aproximadamente 65 m en el caso de las cargas potenciométricas se establecieron entre 2 153 y 2 287 msnm; la superficie piezométrica presenta una serie de conos de abatimiento ubicados en el poblado de Texcoco y hacia Santa María Chiconautla (Cardona Benavides, 2011).

Acuífero Cuautitlán-Pachuca localizado al norte de la Ciudad de México, en el límite sureste del Estado de Hidalgo, comprendiendo alrededor de un 10% de su superficie total al Estado de México. La zona está comprendida en 38 municipios, entre los cuales los de mayor importancia están en el Estado de México (CONAGUA (e), 2002). Con una superficie aproximada de 4349 km², representa el 23,6% de la Cuenca del Valle de México y es la principal fuente de abastecimiento de la zona norte de la Ciudad de México (Galindo Castillo y cols., 2009).

En el informe de la Gerencia Regional de Aguas del Valle de México en 1999, reveló la existencia de 1038 aprovechamientos para ese año con los cuales se explotaba un volumen del orden de 483 hm³/año. En el año 2009 la CONAGUA realizó una actualización del censo de pozos de bombeo en el área con el fin de tener un mayor control de la cantidad de agua que se extrae del acuífero y actualizar la información de los aprovechamientos

subterráneos. Se obtuvo así un total de 1098 pozos en el acuífero, que extraen un caudal del orden de 546 hm³/año (Galindo Castillo y cols., 2009).

En la siguiente tabla 2-8 se hace el compendio de algunos parámetros en cada uno de los acuíferos de interés:

Tabla 2-8: Parámetros hidráulicos del acuífero de la ZMCM

Parámetro	ZMCM	Texcoco	Cuautitlán-Pachuca
Material predominante	Material granular (arena)	Material granular (grava y arena)	
Conductividad Hidráulica (k)	10 ⁻² a 10 ⁻⁹ m/s	10 ⁻¹³ a 10 ⁻⁵ m/s	8.64 e ⁻⁴ m/día
Rendimiento específico o porosidad Eficaz (Sy)	10 a 30 %	15 a 30 %	-
Transmisividad <ul style="list-style-type: none"> ➤ En rellenos lacustres ➤ Escoria basáltica 	-	-	4864.32 y 7110.72 m ² /día 8873.28 m ² /día
Coefficiente de Almacenamiento S	0.000825 considerando un espesor de 250 m por la constante 3.3*10 ⁻⁶	0.00033 considerando un espesor de 100 m por la constante 3.3*10 ⁻⁶	0.000462 Coeficiente de almacenamiento s, considerando un espesor de 140 m por la constante 3.3*10 ⁻⁶

Con la información actualizada en relación al tipo de aprovechamiento, Tabla 2-9, de cada uno de los acuíferos analizados se observa que para los acuíferos Cuautitlán-Pachuca y ZMCM los requerimientos de mayor exigencia son a causa del sector público-urbano, mientras que en el caso de Texcoco son a cuenta del sector agrícola (CONAGUA(c), 2010).

En lo que respecta a la **calidad**, la interacción natural entre el agua subterránea y los minerales que se componen en los diferentes acuíferos administrativos en la Cuenca de México producen “a lo largo de la dirección de flujo subterráneo, una gran diversidad de concentraciones que originan efectos en la calidad del agua; por ejemplo en propiedades la salinidad, concentración de Cl, SO₄ y compuestos nitrogenados, produciendo en ocasiones agua de mala calidad natural”. Cabe señalar que otro aspecto que afecta las condiciones de calidad de agua son las actividades antrópicas (Cardona Benavides, 2011).

Tabla 2-9: Registro de pozos por acuífero. Fuente: CONAGUA (2010)

Uso	Cuautitlán-Pachuca	Texcoco	ZMCM
Agrícola	300	270	10
Industrial	63	34	203
Público-urbano	836	269	945
Múltiple	142	75	142
Servicios	31	25	70
Otros Usos	236	38	84
Sin dato	89	94	70
TOTAL	1697	805	1524

Existen reportes donde demuestran que el caso del acuífero de ZMCM algunas concentraciones rebasan la norma en parámetros como **cloruros** (fuertes variaciones en la parte noreste en el Municipio de Ecatepec con incrementos de 400 mg/l), **dureza**, y **amonio**. Esto indica que existe contaminación de las aguas que posiblemente se debe al drenaje de la ciudad, así como la posible infiltración de aguas residuales provenientes de asentamientos humanos irregulares (CONAGUA (d), 2002). Asimismo se detectan valores elevados de bacterias coliformes (totales y fecales) y constituyentes inorgánicos (alcalinidad, hierro, manganeso y cloruros). Más sin embargo se indica que en la mayoría de los casos “los constituyentes inorgánicos que rebasan la Norma de Calidad en el agua subterránea, en general son producidos por el proceso natural de interacción agua-acuífero” (Cardona Benavides, 2011).

En el año de 2007 el tipo de agua que se captaba en los pozos era de tipo mixta en un 40%; y en un 58% del agua el sodio constituye el principal elemento. El **sodio** se convirtió en el catión predominante en el acuífero Cuautitlán-Pachuca, el promedio de la concentración de sodio en 1995 resultó de **95 mg/l**, incrementándose para el 2007 hasta **126.4 mg/l**. En los principales ramales que se utilizan para el abastecimiento público urbano (Tizayuca-Pachuca, Teoloyucan, Reyes-FFCC y Reyes-Ecatepec), se presentaron valores relativamente elevados, para el ramal Tizayuca-Pachuca se registraron **114.1 mg/l** y en los ramales Teoloyucan, Reyes-FFCC y Reyes-Ecatepec los valores son de **114.8 mg/l; 165.5 mg/l y 165 mg/l** respectivamente; estos valores son sensiblemente menores a los

identificados en años anteriores. En forma contrastante a la situación del incremento en sodio, los análisis químicos de este muestreo indican que la concentración **cloruro** en el acuífero Cuautitlán-Pachuca ha disminuido. El promedio para 2007 resultó de 84 mg/l mientras que en 1995 el valor resultó de 94.2 mg/l. El ramal con menor concentración de cloruro es el Tizayuca-Pachuca con 35.8 mg/l en 2007 y 42 mg/l de concentración promedio en 1995; en los Reyes-Ecatepec se identificaron los mayores valores con 202mg/l en promedio para 1995 que disminuyen en 2007 a 173.3 mg/l (Cardona Benavides, 2011).

En la zona de estudio El Caracol, Ecatepec de Morelos, Cardona B. en 2011 realizó un monitoreo de un total de 14 muestras de agua subterránea a partir de 13 pozos en operación y 1 inactivo, Figura 2-3. Las muestras de agua subterránea fueron obtenidas de distintos acuíferos (Cuautitlán-Pachuca, Texcoco y ZMCM) de aprovechamientos subterráneos utilizados para el abastecimiento público-urbano, con caudales y tiempos de operación diversos, profundidades máximas del orden de 250-300 m; por lo que presentan características físicas y químicas sumamente variadas.

En este estudio se concluye que existen algunas regiones en la porción oriental de la ZMCM, además de las inmediaciones de la zona de El Caracol, específicamente en los alrededores de la zona del Lago de Texcoco, en donde la calidad del agua no es adecuada para consumo directo. Condiciones que pueden estar asociadas a: 1) procesos naturales de interacción agua/acuífero o 2) contaminación relacionada con desechos sólidos y líquidos.

Los resultados obtenidos indican que en los parámetros microbiológicos (coliformes totales y fecales) se superan los límites máximos permisibles establecidos en la modificación a la norma oficial mexicana para Agua de uso y consumo humano (NOM-127-SSA1-1994), con valores por encima de 2 NMP/100 ml para coliformes totales y no detección de coliformes fecales. Esto indica por lo tanto, que existe una elevada contaminación con materia fecal de las aguas subterráneas que ocasiona una exposición a un vehículo transmisor de enfermedades e infecciones humanas, aunado a un control incipiente de la calidad de agua en estos puntos.

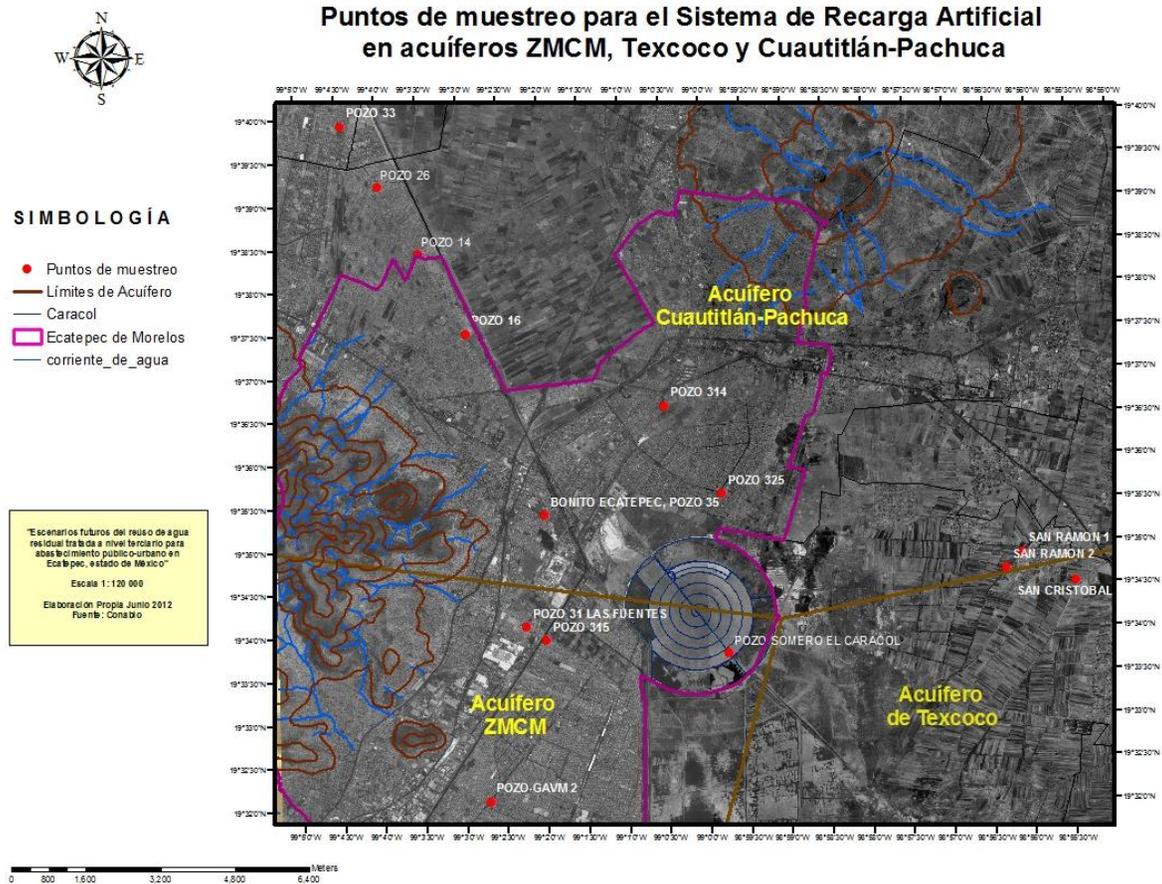


Figura 2-3: Ubicación de los puntos de muestreo para el Sistema de recarga Artificial en los acuíferos de estudio.

En lo que respecta a la calidad química de los pozos analizados, se muestra a continuación los diagramas de Stiff, Figura 2-4, los cuales son representaciones gráficas que muestran sintéticamente las características principales de un agua, facilitando su clasificación en base a los elementos mayores tales como Na, Mg, Ca, Cl, SO_4 y HCO_3 .

Una vez analizados los parámetros químicos y su cumplimiento con los límites máximos permisibles de la norma, se identificaron los pozos con valores por encima de los límites máximos permisibles en los parámetros químicos: pH, Na, Cl, SDT y Dureza los diferentes acuíferos en evaluación, tal y como lo muestra la Tabla 2-10.

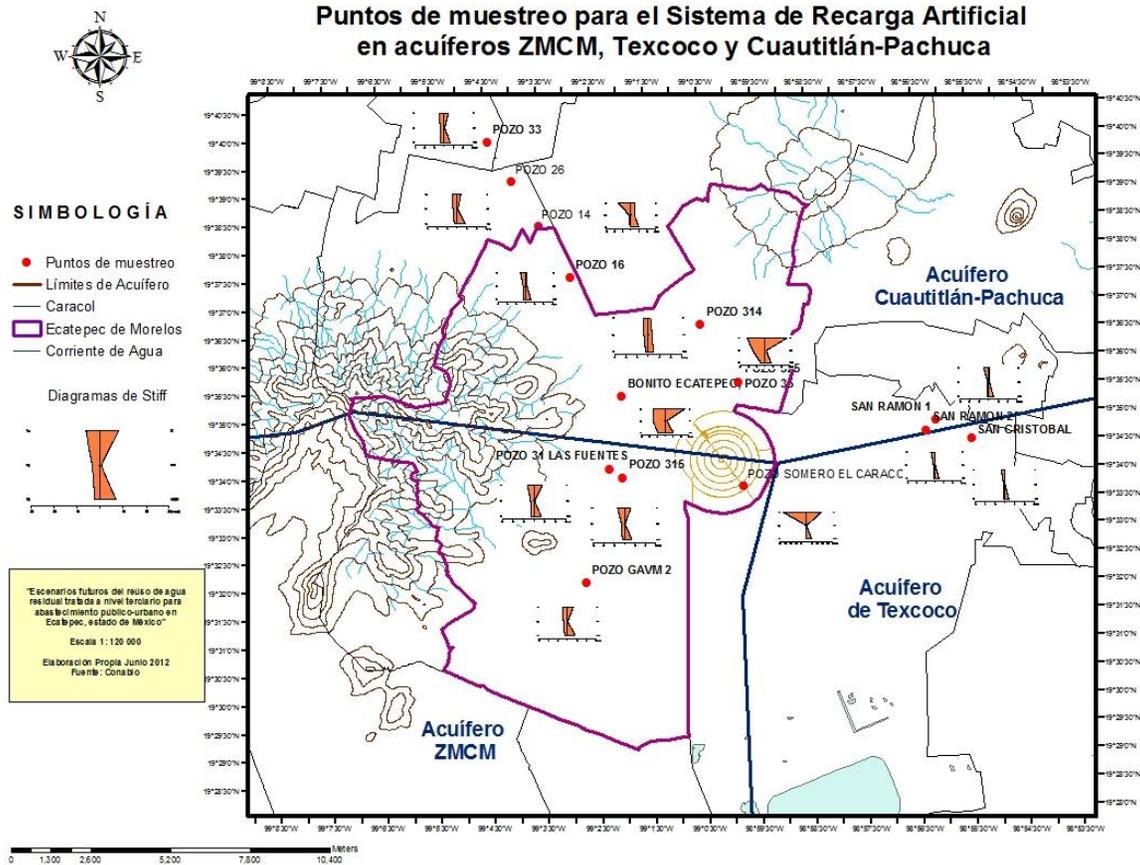


Figura 2-4: Diagramas de Stiff que indican la calidad química de los elementos mayores en los puntos muestreados.

Tabla 2-10: Pozos muestreados con valores por encima de los límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA1-1994

Parámetro	Cuautitlán-Pachuca	ZMCM
pH	Pozo 314	-
Na	Pozo 35, Pozo 314, Pozo 325	-
Cl	Pozo 35	Pozo 31
SDT	Pozo 35	-
Dureza	Pozo 35, pozo 325	-
Otro	Pozo 314 (As)	-

Como parte de los resultados del estudio realizado por Cardona Benavides en el 2011 se indica que “cada acuífero manifiesta en términos generales una composición relativamente particular, aunque no estrictamente homogénea, lo que sugiere que las muestras son producto de la interacción del agua subterránea con los minerales del acuífero a lo largo de diferentes direcciones de flujo; produciendo procesos y reacciones químicas diferentes”.

Diferenciando cada uno de los acuíferos y su composición hidrogeoquímica:

- El acuífero de la ZMCM muestra una composición heterogénea de tipo HCO₃-Mix, HCO₃-Na y Cl-Na.
- En el acuífero Cuautitlán-Pachuca se manifiesta mayor heterogeneidad, ya que pozos con mayor salinidad el tipo de agua es clasificada como Cl-Mix y Cl-Na, mientras que para los de menor salinidad a lo largo del Ramal Reyes-Ecatepec es HCO₃-Mix y HCO₃-Na.
- Y en el acuífero de Texcoco, muestra un agua tipo HCO₃-Na lo que sugiere que representa agua subterránea producida por reacciones con sedimentos derivados de rocas volcánicas, incluyendo de manera importante probablemente reacciones de intercambio catiónico (que liberan al sodio hacia la solución desde la matriz vítrea de las rocas volcánicas); para el caso del agua somera en El Caracol la composición es Cl-Na, representaría probablemente la evolución del agua HCO₃-Na después de estar sometida a evaporación en el pasado del agua en los sedimentos del lago de Texcoco y con reacciones químicas adicionales.

2.1.6.2 Agua superficial

En la RHA XIII las estaciones de monitoreo indican una fuerte contaminación a partir de los parámetros Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO₅) y Demanda Química de Oxígeno (DQO), en la siguiente figura 2-5 se ubican las principales estaciones de monitoreo en la región.

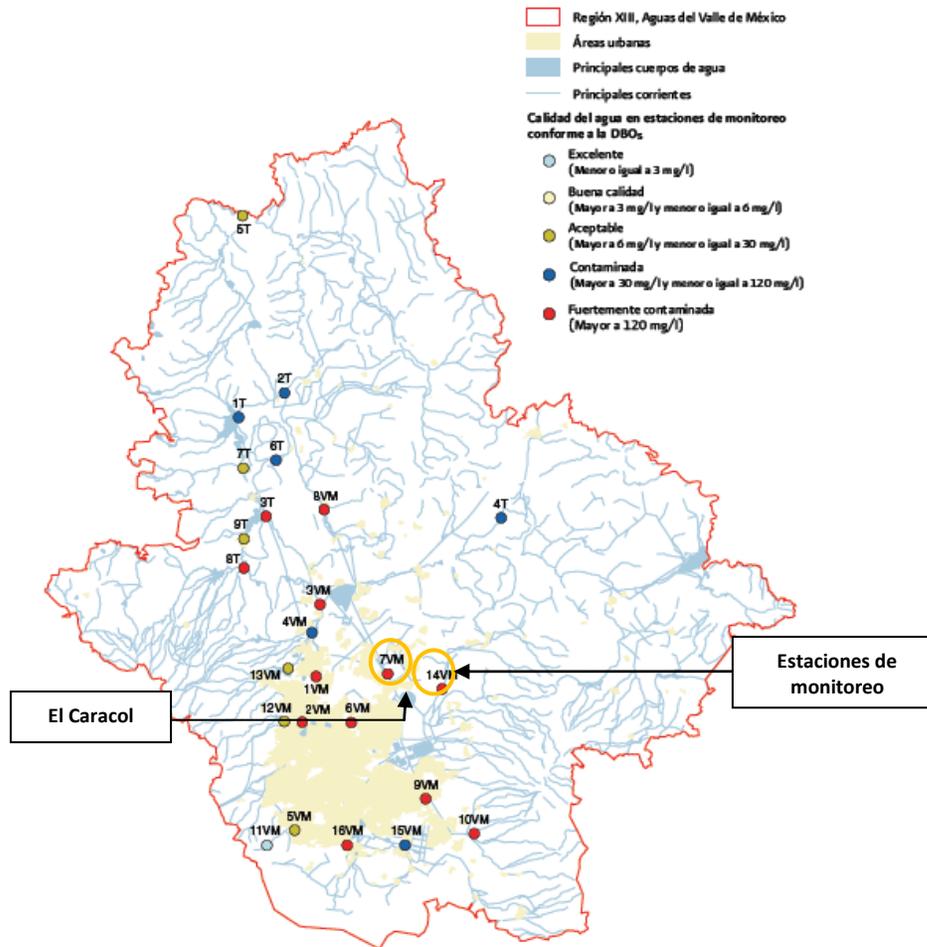


Figura 2-5: Estaciones de Monitoreo en la Región Hidrológico-Administrativa XIII Aguas del Valle de México

En lo que respecta a la zona de estudio, el análisis de calidad de cuerpos de agua la brinda las estaciones 6 VM Río de los Remedios y 7VM Gran Canal, Tabla 2-11, estas dos estaciones brindan información que indican una elevada a contaminación de acuerdo a los parámetros establecidos para el monitoreo de estas estaciones (CONAGUA , 2009).

Tabla 2-11: Parámetros de DBO₅ y DQO en estaciones de monitoreo 6VM Río de los Remedios y 7VM Gran Canal

Estación evaluada	DBO ₅ (120mg/l)*	DQO (200mg/l)**
6 VM Río de los Remedios	233mg/l	634.85mg/l
7 VM Gran Canal	279 mg/l	514.40mg/l

*Demanda Bioquímica de Oxígeno con valor mayor a 120mg/l indica contaminación fuerte en un cuerpo de agua.

** Demanda Química de Oxígeno con valor mayor a 200 mg/l es indicativo de contaminación fuerte en un cuerpo de agua.

Por otro lado, en esta misma zona el sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM) realizó muestreos en los años de 1997 a 2002 para determinar la calidad de agua en el Gran Canal y Río de los Remedios, asimismo la CONAGUA a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, (IMTA) realizó nuestros a los mismos sitios en el 2008. En seguida se muestra recopilada esta información en la Tabla 2-12.

Tabla 2-12: Calidad de agua en el Gran Canal y Río de la Compañía SACM (2002) e IMTA (2008).

Parámetro	Unidades	Gran Canal Promedio anual (SACM)	Gran Canal Promedio Anual (IMTA)	Río de la Compañía (IMTA)	NOM-001-ECOL-1996
pH	UpH	7.9	7.7	7.5	5 - 10
Color	Pt/Co	192	SD	SD	15
Turbiedad	UNT	166	SD	SD	20
Alcalinidad total	mg/l	626	SD	SD	
Dureza total	mg/l	277	SD	SD	200 *OMS
Bicarbonatos	mg/l	626	SD	SD	
CE	μS/cm	1872	2142	1846	
Cloruros	mg/l	200	SD	SD	
Boro	mg/l	2.2	SD	SD	
Dur. Ca	mg/l	139	SD	SD	
Dur. Mg	mg/l	136	SD	SD	
ST	mg/l	1453	SD	SD	
STF	mg/l	1095	SD	SD	
STV	mg/l	358	SD	SD	
SDT	mg/l	1237	SD	SD	
SDF	mg/l	989	SD	SD	
SDV	mg/l	237	SD	SD	
SST	mg/l	218	204	156	150
SSF	mg/l	102	SD	SD	
SSV	mg/l	120	117	87	
SSV/SST	mg/l	0.55	0.6	0.56	
Sólidos sedimentables	mg/l	1.1	1	0.7	1
DBO ₅ Soluble	mg/l	115	110	99	150
DQO	mg/l	475	515	461	
DQO soluble	mg/l	219	233	209	
N-TOT	mg/l	51	48	59	40
N-NH ₃	mg/l	38	35	46	
N-NO ₃	mg/l	0.2	SD	SD	

N-NO2	mg/l	0.06	SD	SD	
N-ORG	mg/l	13	SD	SD	
PO₄total	mg/l	41	26	SD	20
Ca total	mg/l	56	SD	SD	
Mg total	mg/l	33	SD	SD	

Na total	mg/l	290	SD	SD	
K total	mg/l	47	SD	SD	
As total	mg/l	ND	0.01	0.0088	0.2
Fe total	mg/l	4.1	SD	SD	
Mn total	mg/l	0.2	SD	SD	
Pb total	mg/l	0.08	0.1	0.1	0.5
Cd total	mg/l	0.01	0.02	0.02	0.2
Cr total	mg/l	0.08	0.05	0.05	4.0
Zn Total	mg/l	0.22	0.44	0.147	10
Cu total	mg/l	0.06	0.06	0.054	4.0
Si total	mg/l	34	SD	SD	
Coliformes totales	col/100ml	6.70E+07	SD	SD	
Coliformes fecales	col/100ml	2.00E+07	5.92E+06	4.45E+06	1000
SO₄	mg/l	99	98	79	
Fenoles	mg/l	ND	0.12	0.113	
GyA	mg/l	10	39	23	
SAAM	mg/l	12	5	5.2	

*SD= Sin Dato

De acuerdo a la calidad mostrada anteriormente, se puede observar que los valores de algunos parámetros rebasan los límites establecidos en el NOM-001-ECOL-1996 referente a las descargas a cuerpos receptores como por ejemplo: DQO, ST, SST, Nitrógeno total, dureza, fosfato, coliformes totales y fecales. Lo que es indicativo que no existe la regulación en las descargas por parte de los diversos sectores de la zona.

2.2 DIAGNÓSTICO

2.2.1 Urbanización

En el entendimiento de la presión poblacional y su influencia en el territorio, Álvarez Icaza (2010) enuncia que “es vital entender la distribución de la densidad de población por municipio y la presión que ejercen sus actividades económicas en relación directa con el aprovechamiento de los recursos hídricos”.

La urbanización en esta región del valle de México se ha presentado, a lo largo de las últimas décadas, de una forma acelerada y con una falta de planeación para su desarrollo, en la siguiente figura 2-6 se muestra la mancha urbana entre los límites de los acuíferos de ZMCM, Texcoco y Cuautitlán-Pachuca, observándose que la extensión urbana más notable ha sido sobre el acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

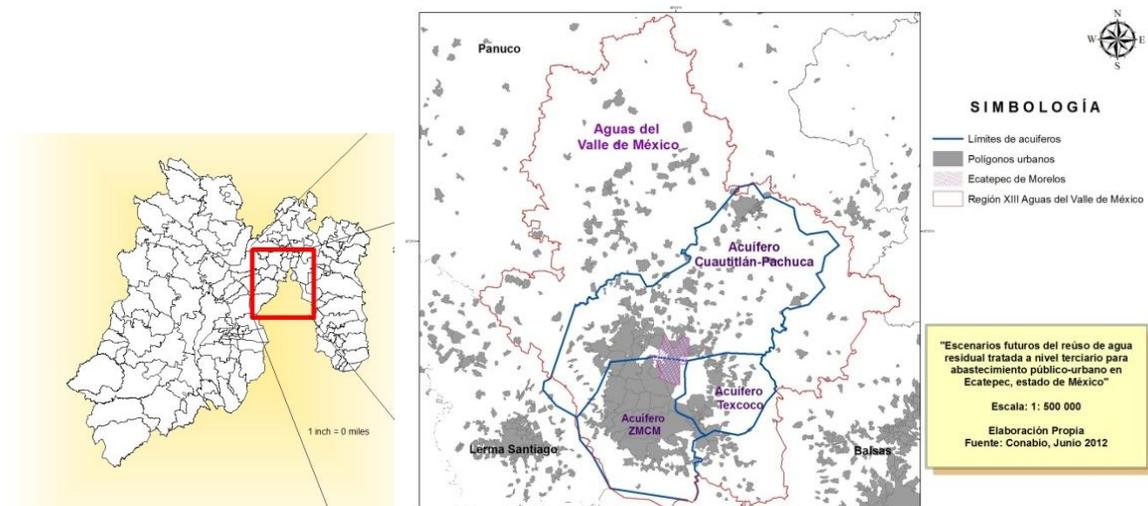


Figura 2-6: Urbanización y área de acuíferos ZMCM, Texcoco y Cuautitlán-Pachuca.

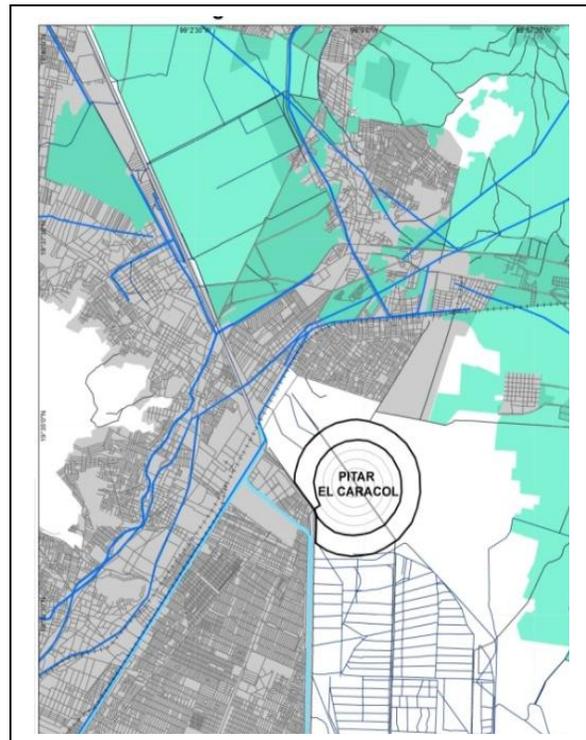
En los municipios de Chicoloapan, Chimalhuacan, Texcoco, Atenco, **Ecatepec**, Acolman, Chiautla, Papalotla, Ixtapaluca y Chalco, se ha dado un fenómeno de urbanización dispersa, con la construcción de grandes bloques de miles de viviendas, en medio de tierras de cultivo. Este patrón de urbanización, estilo tablero de ajedrez, se ha estado extendiendo sobre los depósitos aluviales vitales e indispensables para la recarga de los pozos

metropolitanos. Con la acción impermeabilizante de los suelos agrícolas y forestales la Cuenca no sólo perdió capacidad de recarga, sino la capacidad de autorregularse con respecto a los picos de lluvia. El agua que antes había recargado los acuíferos, empezó a escurrir libremente e inundar las zonas urbanas cuenca abajo (UAM, 2009).

Propiamente en Ecatepec de Morelos el área urbana actual corresponde aproximadamente al 55.28% del territorio Municipal, existen grandes baldíos urbanos en la Cabecera Municipal, Guadalupe Victoria, Chiconautla, Llano de Báez, Tulpetlac, **Sosa Texcoco** y San Isidro Atlautenco. La distribución del territorio para el año 2003 fue como lo muestra la siguiente tabla 2-13, cabe mencionar que no existe en publicación un informe actualizado a la fecha (Secretaría del Desarrollo Urbano, 2003).

Tabla 2-13: Distribución del territorio en Ecatepec de Morelos para el 2003.

AREA URBANA	HAS	%
Uso habitacional	7627.41	41.02
Uso comercial	1167.00	6.27
Uso industrial	1052.60	5.65
Vialidades	435.98	2.34
Subtotal	10282.99	55.28
AREA NO URBANIZABLE		
Parque Estatal	1956.44	11.38
Cerro Gordo	58.43	0.34
Zona Tulpetlac	622.85	3.62
Chiconautla	57.68	0.35
Caracol	843.00	4.92
Subtotal	3538.40	19.04
ÁREAS NO CONTEMPLADAS Y EN CONFLICTO	1703.00	9.15



La división territorial del municipio se cuenta con 1 ciudad, 8 pueblos (San Pedro Xalostoc, Santo Tomás Chiconautla, San Isidro Atlautenco, San Andrés de la Cañada, Santa Clara Coatitla, Santa María Tulpetlac, Santa María Chiconautla y Guadalupe Victoria), 2

rancherías, 6 ejidos, 12 barrios, 169 fraccionamientos y 351 colonias, identificándose un poco más de 70 asentamientos irregulares.

La urbanización descontrolada ha afectado también las zonas planas, incluyendo 570 ha. en áreas de recarga acuífera. Las zonas con uso habitacional ocupan el 41.02% del territorio, de estas un 35% están conformadas por poblados tradicionales, el 45% por desarrollos habitacionales regulares y un 20% por asentamientos irregulares. Aproximadamente un 70% se trata de zonas habitacionales de bajo costo correspondiendo con la estructura de ingresos de la población (Secretaría del Desarrollo Urbano, 2003).

2.2.2 Actividad económica

Sector primario: La actividad económica del sector primario se ha perdido gradualmente en la medida que el proceso de urbanización del Municipio ha ocupado las tierras de cultivo y ganado, este proceso de urbanización ha sido catalizado por la poca productividad de las tierras, la falta de apoyos para el agricultor y la inmigración de la población (Secretaría del Desarrollo Urbano, 2003).

Actualmente, los ejidatarios encuentran más rentable desincorporar la tierra de sistema ejidal y dedicarla a otras actividades diferentes de la agricultura y la ganadería. El municipio cuenta con 10,609 hectáreas de terrenos cultivables, de las cuales 6,018 son de temporal y 4,591 de riego; se produce principalmente alfalfa, maíz, cebada, remolacha y trigo (CONAGUA, 2010).

La ganadería es de menor importancia dentro de las actividades económicas. El último Censo registró un total aproximado de 18,954 cabezas de ganado vacuno, lanar, porcino, equino y caprino, y se considera que en el lapso transcurrido esta producción representa por lo menos el 15% del valor de los productos corrientes, los que valen aproximadamente 92 millones de pesos (CONAGUA, 2010).

Sector secundario. La actividad industrial del Municipio ha sido muy importante desde los años 40's, época en la que se asentaron grandes empresas en su territorio, llegando a ocupar el 4º lugar del país, en la actualidad dentro el Municipio existen 8 zonas industriales:

- Esfuerzo Nacional, Xalostoc, Santa Clara, Tulpetlac, Urbana Ixhuatepec, La Viga, Cerro Gordo y Francisco Villa.

Actualmente este sector presenta diferencias muy marcadas, por una parte están las grandes industrias, con alta productividad, calidad y capacidad tecnológica, que han trascendido los mercados regionales nacionales e internacionales. Sin embargo también está la mediana, pequeña y micro industria que presentan dificultades de liquidez financiamiento y obsolescencia tecnológica aunada a una limitada presencia en mercados regionales (Secretaría del Desarrollo Urbano, 2003). Existen 1315 industrias establecidas: 20 son grandes industrias y 1295 son del grupo de medianas, pequeñas. Las microindustrias ascienden a un número de 1068.

Sector terciario creció ampliamente, debido a diferentes factores como el crecimiento poblacional, la reducción de la actividad industrial, falta de empleos formales etc. Este crecimiento no es indicativo de una mejoría para la población del municipio, ya que el desmesurado crecimiento también implica el crecimiento de la oferta y disminución del margen de utilidad, por lo que la mayor parte de la población dedicada al comercio y prestación de servicios se ubican dentro de la economía informal (Secretaría del Desarrollo Urbano, 2003). Se compone por las actividades de comercio y suman un total de 1,883 establecimientos:

- Prestación de servicios y administración pública 1272 establecimientos
- Construcción registro 86 establecimientos únicamente.

2.2.3 Problemática social

1. Ocupación ilegal de las zonas de conservación ecológica, fundamentalmente la Sierra de Guadalupe.
2. El elevado volumen en los escurrimientos pluviales generan inundaciones y contaminación de aguas negras. Las constantes inundaciones afectan colonias enteras del municipio de Ecatepec.

- Ciudad Azteca
- Jardines de Santa Clara
- Nuevo Laredo
- Río de luz
- San Agustín
- Cabecera municipal
- Josefa Ortiz de Domínguez
- Xalostoc
- Vía López Portillo
- Los Reyes
- Cerro Gordo
- Sagitario
- Tulpetlac

3. Otro de los síntomas del abatimiento de los niveles de agua en los acuíferos de la región es el hundimiento del suelo, fenómeno que se reportó por primera vez en la Ciudad de México entre 1891 y 1895, entonces a una tasa de 5 cm por año. Sin embargo, fue hasta 1949 cuando se demostró fehacientemente que el hundimiento del suelo estaba relacionado con el bombeo de agua subterránea, por lo que, en consecuencia, se consideró la edificación de obras para resarcir los daños. De igual manera los hundimientos han provocado fracturas y fallas en el sistema de alcantarillado en las colonias siguientes del municipio de Ecatepec.

- M XIV
- Ciudad Amanecer
- Campiña de Aragón
- Sagitario I
- Nueva Aragón
- Valle de Santiago
- La Florida
- Quinto Sol
- Ciudad Azteca
- Petroquímica Ecatepec
- Novela Mexicana
- Josefa Ortiz de Domínguez
- Alborada
- INDECO Santa Clara

4. En el Estado de México entre las veinte principales enfermedades prevalentes en su población, las infecciones intestinales son la segunda enfermedad más presente en un amplio rango de edad. El uso de agua negra en este estado se ha estudiado y los primeros resultados demostraron que hay un alto riesgo de infecciones por *Ascaris lumbricoides* (CENAVECE, 2009). Dichos estudios sugieren una relación entre enfermedades diarreicas y la exposición de niños agricultores a aguas residuales de diferente calidad; niños de familias expuestas a agua residual tienen un pequeño pero significativo incremento del riesgo (CONAGUA, 2010). Esto nos lleva a sugerir que la población del municipio de Ecatepec al encontrarse expuesta a aguas residuales no tratadas elevan la posibilidad de una enfermedad o infección de este tipo.

5. Abundan irregularidades por parte de los usuarios de las de concesiones, incluyendo la presentación de información falsa en la solicitud de la concesión; la utilización de medidores inhabilitados; el uso múltiple de una sola concesión para justificar varios proyectos; el mantenimiento de concesiones “fantasma”; la extracción de volúmenes mayores a los concesionados; y la excavación de pozos sin contar con concesiones. Desafortunadamente, la Conagua cuenta con poco presupuesto y personal para realizar visitas de inspección (UAM, 2009). Las siguientes imágenes 2-7 son tomadas como muestra de la problemática en la Zona federal de Lago de Texcoco en cercanías con la plaza las Américas de Ecatepec de Morelos.



Figura 2-7: Concesiones irregulares en Zona Federal del Lago de Texcoco, Ecatepec de Morelos

6. El recurso coadyuvado a la dificultad geográfica para el abastecimiento, así como carencia en programas integrales de obras hidráulicas que conlleva a enfrentamientos entre la sociedad y el gobierno (Negrete Flores y cols., 2002).
7. El municipio de Ecatepec presenta características de alta organización social, reflejada en múltiples grupos sociales con gran presión en el territorio, por mencionar algunas:
 - ✓ Frente de Izquierda por el Estado de México (FIEM)
 - ✓ Contingentes: Ricardo Flores Magón, Cambio Democrático Social, Quinto Sol, Unión Democrática, Coordinadora Metropolitana, Sector 1, Grupo

Heberto Castillo, Asociación Civil Nueva Era, Organización Nacional de Intereses Ciudadanos (ONICAC).

8. Problema de fugas: Al respecto, debe recordarse que se calcula que el Distrito Federal pierde aproximadamente 37% del caudal que se le suministra, mientras que en el Estado de México se pierde alrededor de 30%. En cuanto a las pérdidas de agua que se generan en las redes, se considera que podría abastecerse a importantes núcleos de población si se midiera y controlara el flujo que se conduce por las redes de agua potable (Gobierno del Estado de México, 2009). De cada mil litros de agua, sólo se facturan 600 y se cobran apenas 360. Es decir, alrededor de 300 litros se fugan por la red, 100 se pierden en tomas clandestinas y 240 no son cobrados. Debido al estado actual de la red de suministro en el municipio de Ecatepec, se presentan constantes fugas superficiales y subterráneas que no son atendidas de manera expedita por carecer el SAPASE del personal de campo y equipo suficiente para solucionar estos problemas (Secretaría del Desarrollo Urbano, 2003).

Fuentes primarias

Otra forma de conocer parte de la situación en el municipio es a través de fuentes primarias como son en el caso de diferentes medios de comunicación impresos:

Hundimiento

El hundimiento en la cuenca se ve reflejado en zonas donde la tasa es de 40 cm/año, debido a la compactación de su grueso acuitardo, causada por la sobreexplotación del acuífero subyacente. En 1947, el Dr. Nabor Carrillo demostró que la pérdida de presión del agua que satura al estrato arcilloso era la causa principal del hundimiento de la Ciudad de México. Las zonas que presentan mayor hundimiento son las zonas con mayor concentración de pozos, y se caracterizan por poseer las capas de arcilla de mayor grosor (UAM, 2009).

(2006) La Jornada	“A punto del colapso, cientos de casas en Ecatepec; tienen daños severos” En Fuentes de Aragón, hundimientos hasta 50cm; 640 viviendas presentan inclinaciones.
(2007) El Universal	“Ecatepec se hunde por el drenaje viejo” Por lo menos seis derrumbes se han registrado sobre la avenida Adolfo López Mateos, porque los tubos se fracturan y el agua erosiona el subsuelo.

(2011) La Razón	“Hundimiento por lluvia en Ecatepec” Protección civil informó hundimiento de tres metros de ancho, tres metros de largo y cinco de profundidad.
-----------------	---

Desabasto

En la Cuenca de México, la disponibilidad natural media es 85 m³/habitante/año, lo cual está considerado como una situación límite de sustentabilidad humana por representar sólo el 8.5% de la cantidad clasificada como extremadamente baja (UAM, 2009).

(2007) Agencia de Noticias Independiente	“Continúa la escasez de agua en Ecatepec; SAPASE advierte que de seguir el irregular suministro pedirá la intervención del Poder Legislativo”.
(2007) Milenio	“Desabasto de agua en Ecatepec, niegan pipas” Urgente mejorar gestión” Urgente mejorar gestión del patrimonio hidráulico.
(2009) La Jornada	“Ecatepec, el municipio con mayor desabasto de agua en el Edomex” Fugas, falta de infraestructura y uso político.
(2012) La Jornada	“Sufren desabasto de agua mil 800 familias de La Pradera, Ecatepec, desde hace 4 años”

Inundaciones

La urbanización de las zonas de recarga daña la capacidad de la cuenca para amortiguar los picos de lluvia. El agua que normalmente habría sido infiltrada por las zonas agrícolas ó forestales, avanza violentamente sobre las zonas urbanas, llegando con fuerza y basura a los poblados de la cuenca baja (UAM, 2009). Si se lograra el saneamiento de los cauces, se podría retener el agua pluvial para aprovecharla en sustitución de agua subterránea, y para aumentar la recarga de los acuíferos. De esta manera se disminuirían los riesgos y los costos asociados con el traslado masivo del agua de los picos de lluvia, a causa del bombeo en contrapendiente (UAM, 2009).

(2011) El Universal	“Se desborda río de los Remedios” Cierran Periférico, desde avenida Central. Reportan encharcamientos en calles de colonias.
El Economista	“Se desbordan Río de los Remedios y dren Xochiaca”
La Jornada	“Edomex: más de 3 mil damnificados por aguas negras” Inundaciones en Neza y Ecatepec tras seis horas de lluvias.

Conflictos sociales

En esta región los conflictos registrados en la prensa se concentraron en el municipio de Ecatepec principalmente, y en segundo lugar en los municipios de Tecámac y Cuautitlán

Izcalli. Ecatepec presente alta conflictividad: es el municipio más poblado de la entidad y padece una situación contradictoria en el manejo del agua por un lado cede agua hacia Tlalnepantla y hacia el DF, al mismo tiempo que recibe agua del Sistema Cutzamala. (González Reynoso & Pliego Carrasco, 2005).

(2010) Mexiquense	“Reprime policía de Ecatepec a vecinos que protestaban por perforación de pozos que afecta también a sus viviendas”
(2010) Agencia MANL	“Organizaciones sociales de Ecatepec piden a Eruviel Ávila obras y servicios públicos.”
(2011) El Universal	“Vecinos bloquean periférico; piden entubar Río de los Remedios” Los manifestantes señalan que se encuentran en un grave riesgo debido a un posible desbordamiento del Río.
(2011) Cronista de Ecatepec	“Organizaciones sociales rechazan nuevos fraccionamientos de Ecatepec.”
(2011) Movimiento Antorchista	“Mil 500 familias exigen a la CAEM equipo para bombeo de aguas negras”

La siguiente figura 2-8 se engloban las problemáticas que enfrentan la mayoría de las colonias de este municipio en estudio.

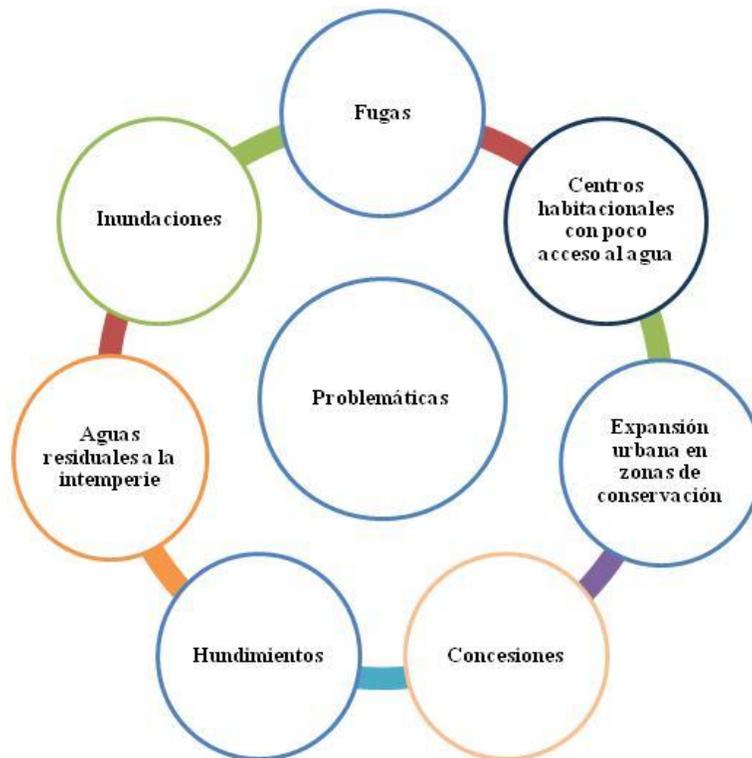


Figura 2-8: Problemas sociales y ambientales en Ecatepec de Morelos

2.3 PROSPECCIÓN

2.3.1 Actores: funcionarios

Consistió en el proceso del conocimiento de las expectativas, experiencias y capacidades de los actores sociales para un tema central como es el Agua en la RH-A Aguas del Valle de México. Los actores participantes fueron de dos dependencias, por su parte de la CONAGUA se entrevistó a las Gerencias de Agua y Saneamiento y de Agua Subterránea, así como las subgerencias de Evaluación y Manejo de acuíferos y Exploración y monitoreo Geohidrológico además de investigadores del Instituto de Geografía de la UNAM.

En las entrevistas se abordaron temas cuyo interés fue el siguiente:

- Situación del Recurso: Es la articulación de la realidad de acuerdo a su conocimiento y experiencia en relación a como se encuentran los recursos hídricos tanto subterráneos como superficiales.
- Manejo actual: Relacionado a como es la administración, organización, distribución y coordinación general de los recursos hídricos.
- Calidad: Conocimiento en la calidad de las aguas del D.F. y municipios de la ZMCM
- Agua residual tratada: Conocimiento en el potencial del volumen que representa este recurso.
- Reutilización: Información en cuanto alternativas en tecnología, proyectos vigentes, potencial e importancia.
- Posibles soluciones: Propuestas de acciones para mejorar el manejo de los recursos y favorecer la reutilización de agua residual tratada.

En seguida se presenta la información por temas y se engloban los comentarios emitidos en cada uno de los rubros Tabla 2-14:

Tabla 2-14: Etapa de Prospección con funcionarios y académicos expertos en la condición del recurso en la Región.

Situación del Recurso	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema no autosuficiente • Sector industrial y agropecuario mayores requerimientos. • Existen vedas en algunos acuíferos de la zona • Decremento en volumen y calidad de agua superficial y subterránea • Falta de estudios de disponibilidad • El interés que se le da al agua residual no es correspondiente al volumen que existe • En el país no se conocen los canales de aguas residuales, solo los cuerpos de aguas con calidad no deseable • No existe escasez hace falta infraestructura para dotar a la población y cubrir requerimientos. • Sistema Cutzamala pierde 40% del agua en fugas • Falta de infraestructura para separación de aguas residuales y aguas pluviales • Costo de agua potable con variaciones, pero existen incentivos que favorecen la industria extranjeras
Manejo Actual	<ul style="list-style-type: none"> • Dependencia técnica y política • Sector Industrial se maneja por concesiones • No existe coordinación entre instituciones • Falta de integración en información • Poca valoración al recurso por parte de la sociedad. • Problema en el cobro de tarifas • Restricción en zonas de veda • Plan de manejo de acuíferos incluye participación social e integración de ONGs, universidades, cotas y usuarios. • Sector agrícola no se cuenta con un registro de flujos entrantes y salientes. • La burocracia es un inconveniente para llevar a cabo un proyecto • Conagua cuenta con un área de comunicación social • No existe gestión ya que no hay participación de la población • Existe la Teoría de la Idea estructural: construir sin analizar la situación • El crecimiento demográfico obedece aspectos políticos y el agua es un medio para controlar "Controlas el agua, controlas la gente" • Sustentabilidad hídrica no existe, ante la ley el agua es un recurso=producto= economía no ambiental
Calidad	<ul style="list-style-type: none"> • Agua subterránea calidad variable en zonas al oriente de la CM con mala calidad y zonas al norte de la ZMCM con mejor calidad. • Problema con el desalojo de agua residual a valle de Mezquitil

Agua residual tratada

- La calidad está en función al uso que se le destine.
- Aprovechamiento de aguas en la recarga artificial de acuíferos
- Existe poca experiencia en proyectos como la recarga
- No hay relación del volumen total de agua residual y el volumen tratado en proyectos de reutilización.

Reutilización

- Verificar el origen del agua que se planea reutilizar
- Necesaria infraestructura que separe las descargas municipales, industriales y pluviales
- Eficientar los procesos productivos
- Pago por descarga en industria pago cero por descarga cero.
- Hacer uso de la tecnología adecuada
- Intercambio de uso
- Valorar la tecnología ya que en algunos casos es cara, distante y presenta ciertas resistencias.
- Información a la sociedad en cuanto a proyectos de reutilización para su aceptación
- Conocer la percepción acerca de que piensa la gente ante la tecnología y la reutilización
- Viabilidad de un proyecto debe considerar la parte técnica, social y económica

Posibles soluciones

- El subsidio debe ir disminuyendo y que pague más el que gaste más.
- Racionalizar el recurso en lugar de restringirlo
- Pago de impuestos ambientales
- Cumplimiento en zonas de veda
- Fomentar la participación social
- Sector agrícola requiere de medidores para registrar el volumen
- Sector agrícola Rotación o cambio por cultivos ahorradores de agua
- tecnificación de riego
- Incentivos fiscales por uso racional del agua
- Sector industrial evitar pago al municipio por cero descargas o brindar tratamiento y quizá vender al municipio
- Cambio de legislación en la concesión del agua
- Falta hacer conciencia entre la gente para el uso eficiente de agua de lluvia.

2.3.2 Actores: Ciudadanos

En el siguiente apartado se observa de forma globalizada las opiniones recabadas de los ciudadanos.

1. El Consejo Consultivo del Agua realizó en el año 2009 un taller con los pobladores de Ecatepec para conocer la relación del uso y saneamiento del agua en su municipio. Las conclusiones de este taller son de suma importancia ya que apoyan los resultados del trabajo de campo en el presente estudio.

- Conceptos y conocimiento del origen del problema del agua.

Uso del agua: habitantes hacen referencia a las actividades que realizan con ella. La minoría hace referencia a darle un uso adecuado al agua y al no desperdicio, pero no hay conocimiento de conceptos como uso racional o eficiente.

Saneamiento del agua: Existe una falta de información sobre el tema, es un término desconocido y no de uso cotidiano entre los habitantes de Ecatepec.

Origen del agua La mayoría “cree” que el agua potable de Ecatepec tiene dos orígenes.: Sistema Cutzamala y pozos.

Infraestructura hidráulica en opinión de los entrevistados, constituye una problemática que agrava el abastecimiento en Ecatepec. Pero **se ignora** el nivel de relevancia que tiene el drenaje, es relevante la **problemática** que el drenaje genera por las deficiencias que presenta en inundaciones como basura, falta de limpieza en coladeras.

Percepción del uso de suelo consideran que en los últimos 15 años ha habido una explotación desmedida de los recursos hidráulicos y sanitarios, asociados con la construcción excesiva de fraccionamientos, obras públicas y plazas comerciales y hoteles.

- Consecuencias sociales por falta de agua, forma de distribución y acciones.

Sentir Alto nivel de tensión y estrés. Con un alto costo emocional, se ven obligados a estar en permanente vigilancia y guardia de consumo y recolección del agua. Existe la sensación de que el abasto del agua rige su vida personal y familiar, sus hábitos de aseo, e incluso la economía familiar.

Tandeo Es la forma más frecuente en la que se recibe agua. Regularmente es dos veces por semana, y el horario en el que el “cae” agua en mayor cantidad es por la noche.

Por goteo en el día Es el mayor problema para la captación de agua, por las noches que la cantidad de agua aumenta y es cuando se almacena.

Constaste Forma menos frecuente en la que los colonos de Ecatepec reciben agua. No logran identificar zonas o áreas específicas en las que esto suceda, consideran que dentro de sus colonias, con diferencia de una cuadra a otra, existe escasez y ocasionalmente agua corriente.

Pipas públicas y privadas existe la sensación de insatisfacción ya que generan fuerte impacto a la economía y esclavitud.

Garrafones impacto a la economía

2. El día 7 de junio del 2012 se realizó un cuestionario de diez preguntas a padres de familia originarios de las colonias Ciudad Azteca, Las Américas, Jardines de Casanueva, Jardines de Cerro Gordo, Jardines de Santa Clara, 1° de Mayo, Progreso de la unión, Río de Luz y Valle de Ecatepec todas estas pertenecientes al municipio de Ecatepec de Morelos. Los resultados obtenidos se muestran a continuación en forma de porcentaje en los siguientes gráficos.

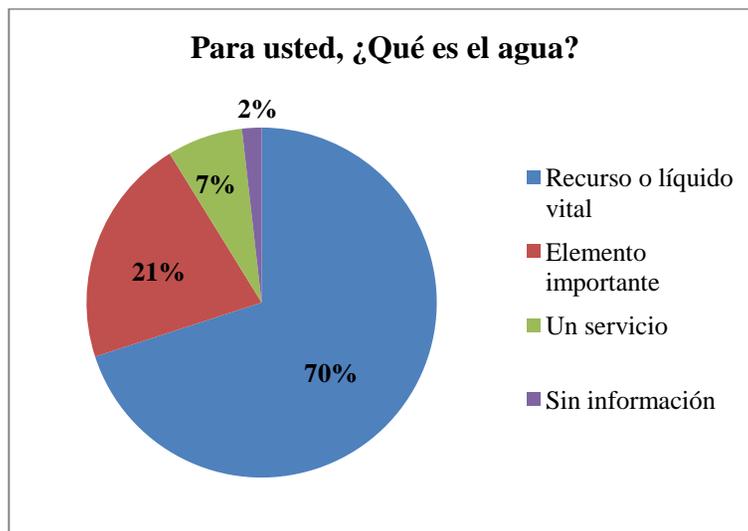


Figura 2-9: Preguntas a ciudadanos de colonias en Ecatepec

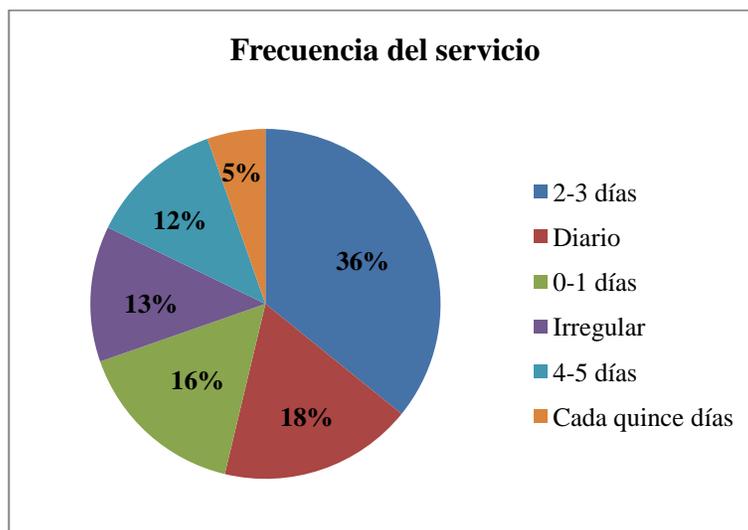
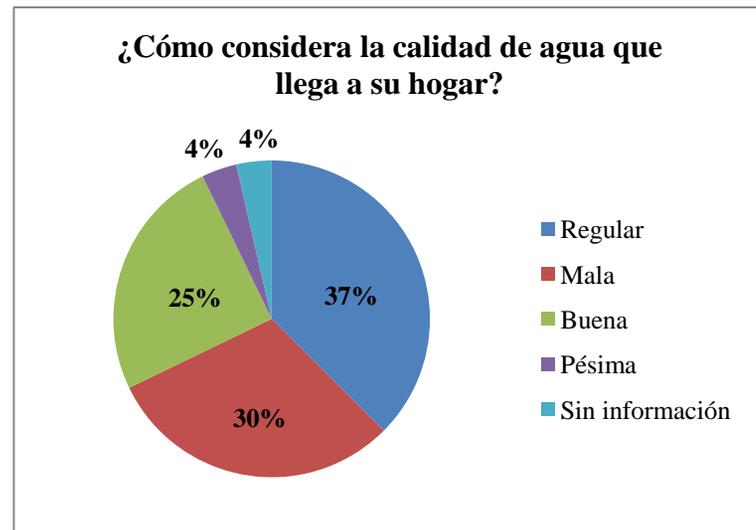
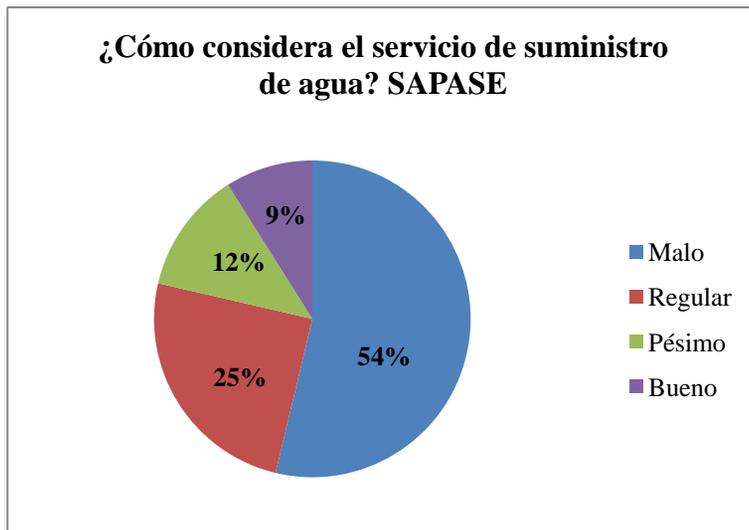
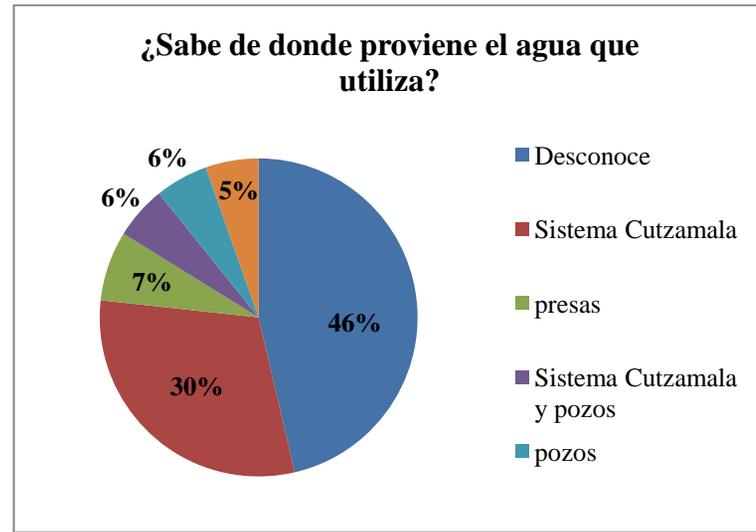
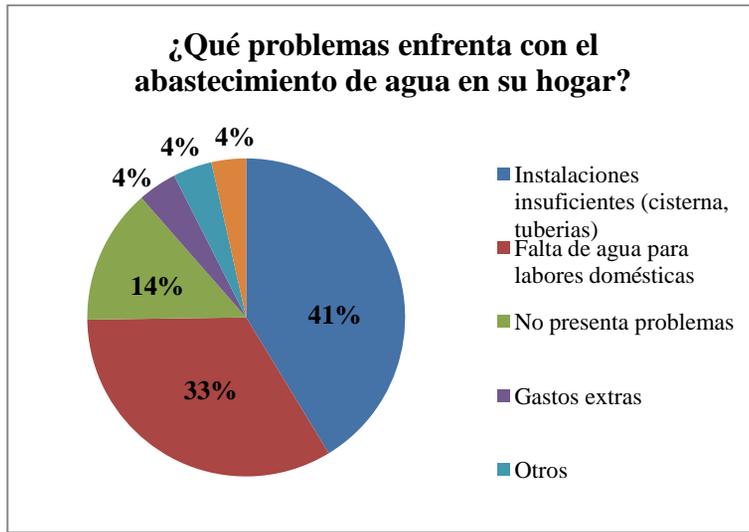
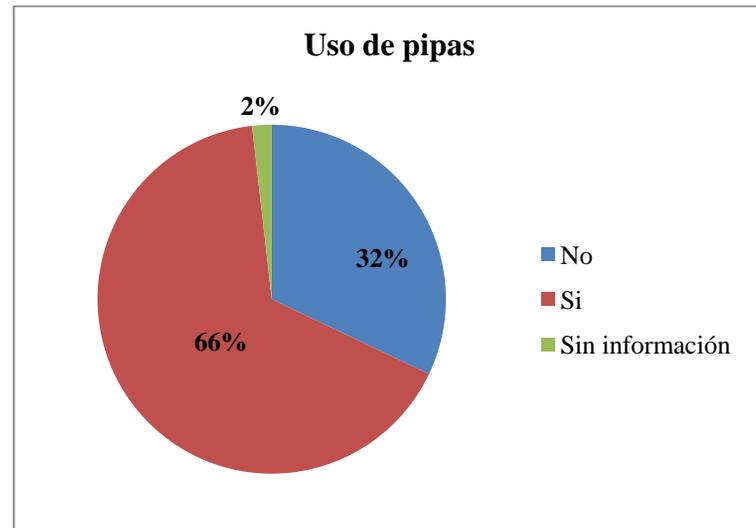
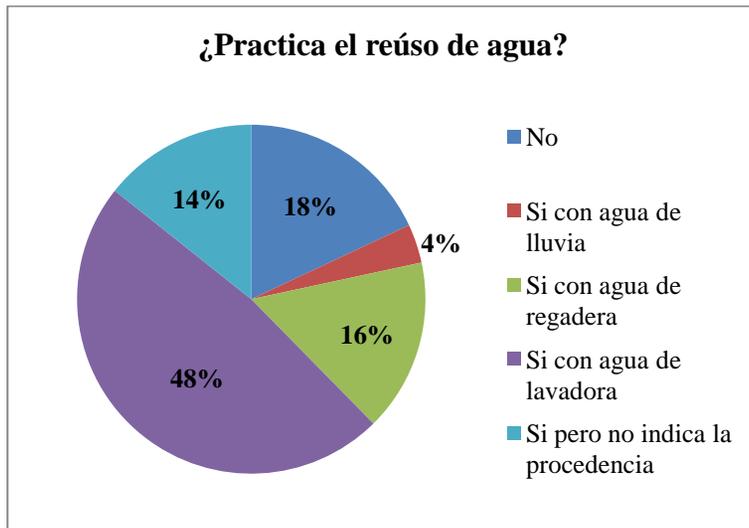
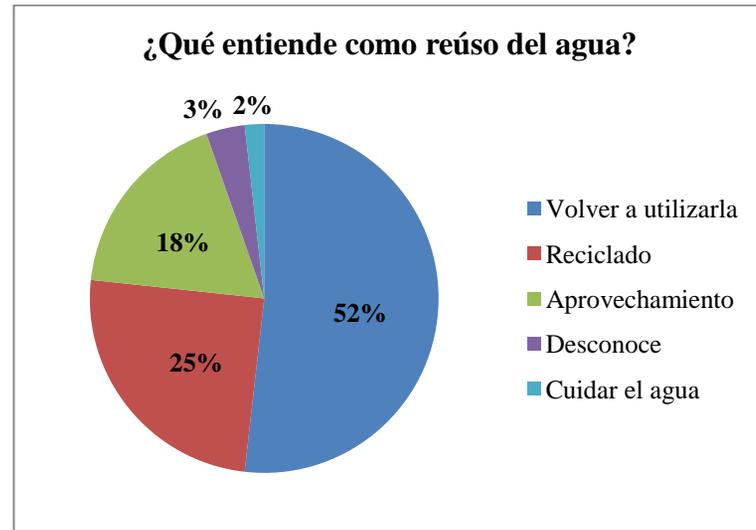
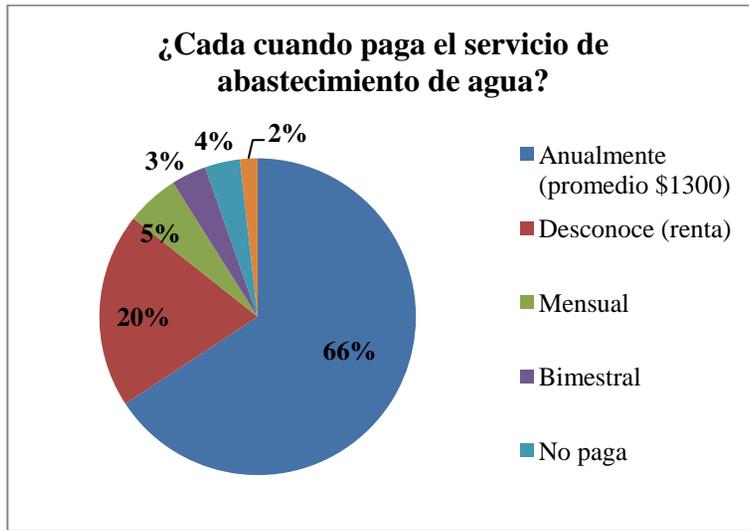


Figura 2-10: ¿Con qué frecuencia cuenta con el servicio?





Con la información obtenida a partir de los cuestionarios se conoce que el agua para la mayoría de los habitantes (70%) es un recurso vital y primordial sea la condición en la que se encuentre.

Al preguntar acerca de la frecuencia del líquido, un 36% refiere que cuentan con el agua de 2 a 3 días a la semana en contraparte a un 18% que indicó que la frecuencia es diaria. En relación a esta misma pregunta, los habitantes respondieron a que los mayores problemas que enfrentan con el abastecimiento de agua es a causa de instalaciones insuficientes, por mencionar la falta de cisterna que les permita mayor almacenamiento o falta de tuberías que les provean de un volumen mayor. Al evaluar el servicio de la SAPASE, un 54% de los cuestionados responden que es de malo a regular y muestran inconformidad a este organismo.

En cuanto a la calidad del agua que les llega a su domicilio, los colonos responden que es de una calidad regular a mala debido a un alto olor y sabor a cloro, así como cierta turbidez, suciedad o algunos sedimentos que perciben en esta agua.

Otro tema de interés para el estudio fue acerca del conocimiento de la reutilización del agua el cual, en su mayoría (52%) refieren que es la acción de volver a usar o reciclar, en la que se confirma en las acciones realizadas de reúso como son las de origen pluvial y las de labores domesticas (agua de regadera y de lavadora) las cuales destinan a riego de plantas, lavado de calles o trastes.

Finalmente en la última gráfica, referente a la contratación de pipas, las personas cuestionadas indican una frecuencia en el uso de esta alternativa en la siguiente forma: 1 a 2 semanas 32%, 1 a 2 veces al mes 14%, 1 vez al año 8%, 2 a 3 veces al año 16% y un 30% no describen con qué frecuencia hacen uso de las pipas.

3. REUTILIZACIÓN

La Ley de Aguas Nacionales establece en el artículo 3° que las aguas residuales son aquellas aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas (Ley de Aguas Nacionales , 2008).

En México, las descargas de aguas residuales se clasifican en municipales e industriales, las primeras corresponden a los sistemas de alcantarillado municipales urbanos y rurales, las cuales para el 2009 el volumen fue de $7.49\text{km}^3/\text{año}$ ($237.5\text{ m}^3/\text{s}$). Las descargas industriales son aquellas que se descargan directamente a los cuerpos receptores de propiedad nacional, como es el caso de la industria autoabastecida que para el mismo año su volumen fue considerado en $6.01\text{km}^3/\text{año}$ ($190.4\text{ m}^3/\text{s}$). En forma global, en el año 2009 se registró un total de aguas residuales de $13.5\text{ km}^3/\text{año}$ (CONAGUA, 2011).

Las aguas con este origen pueden ocasionar ciertos problemas como en:

- Conducciones: incrustaciones, corrosión y problemas de biofouling (ensuciamiento)
- Suelo: salinización, problemas de permeabilidad y de estructura
- Riesgo de infección por microorganismos patógenos
- Nutrientes. un exceso de las necesidades de la planta, pueden causar problemas relacionados con el excesivo crecimiento vegetario, retraso en la madurez o la reducción en la calidad de la planta
- Inadecuada manipulación del agua

La reutilización de las aguas residuales es una actividad creciente en todo el mundo, siendo varios los factores que han conducido a ello. Mediante el vertido de efluentes depurados a los cursos de agua y su dilución con el caudal circulante, las aguas residuales depuradas se han reutilizado incidentalmente en puntos aguas debajo de los cauces para aprovechamientos urbanos, agrícolas e industriales.

Las actividades de reúso del agua en la ZMVM comenzaron de manera oficial en 1984, con el Programa Nacional de Uso Eficiente del Agua (Departamento del Distrito Federal, 1990b). Los proyectos para el reúso del agua formaron parte de un programa más amplio destinado a reducir la pérdida de agua y mejorar los ingresos económicos por este concepto. Durante el periodo 1990–1992, el programa se concentró en varias actividades para el reúso del agua en la ZMVM, que incluyeron la protección de las zonas naturales de recarga del acuífero, la recarga del acuífero con agua de lluvia y aguas residuales municipales recuperadas, así como el uso de aguas residuales recuperadas de los sectores industrial y de servicios. Este programa nacional abarcó el establecimiento de nuevos reglamentos para la descarga de aguas residuales en el Distrito Federal; en 1990, se establecieron las disposiciones para un programa industrial de “pretratamiento”—un importante requisito previo para las actividades de recuperación y reúso. Sin embargo, existe poca información disponible relativa a la duración y el éxito de los programas de pretratamiento industrial en la ZMVM (National Academy of Sciences, 1995).

Se estima que en el año 2008 en México se reutilizaron $5.05 \text{ km}^3/\text{año}$ ($160 \text{ m}^3/\text{s}$) y que este reúso fue a partir del agua de origen municipal cuyo destino son los cultivos agrícolas, y en una menor proporción una reutilización en industrias y termoeléctricas (CONAGUA, 2011).

Específicamente, en la subregión Tula, la reutilización del agua residual sin tratar, que se genera en la ZMVM, ha sido una práctica común desde hace más de 100 años y en particular en el Distrito de Riego 003 Tula en el Estado de Hidalgo. El reúso de agua residual en la región asciende a un volumen anual de $1785 \text{ hm}^3/\text{año}$ ($56.60 \text{ m}^3/\text{s}$), el mayor del país. Casi un 94% se emplea para el riego, principalmente del Valle de Tula; un 4% se utiliza para el riego de jardines y lavado de autos en el Valle de México y el 2% restante en las industrias asentadas en ambas subregiones (CONAGUA, 2009).

El Programa de Sustentabilidad Hídrica de la cuenca del Valle de México desarrollado en el 2007 contó entre sus objetivos las áreas de protección para acuíferos, el desarrollo de nuevas fuentes de agua potable, intercambio de aguas de uso agrícola, drenaje, tratamiento de aguas residuales y restauración ecológica de cuerpos de agua. Entre las obras

representativas contempladas son el Túnel Emisor Oriente y las Plantas de Tratamiento de Aguas residuales (PTAR) Atotonilco, el Caracol, Zumpango, Vaso del Cristo y Berriozabal para un total de 42.0 m³/s, y con una capacidad hidráulica adicional para manejar los gastos de aguas pluviales que se mezclan con las aguas residuales. Este programa contempla el tratamiento del 100% de las aguas residuales del Valle de México (actualmente solo se tratan 15%), esto después de un siglo de verter más de 725 millones de m³/año de aguas negras al estado vecino de Hidalgo, con una carga contaminante por año de más de 180 mil toneladas de SST y otra cantidad igual de DBO (CONAGUA, 2010; Espino de la O, 2011).

En relación a lo anterior, existen tecnologías que brindan tratamientos de tipo químico, físico y biológico con los cuales las aguas residuales pueden alcanzar niveles de calidad variables y con ello ser reutilizadas en determinados usos. Dependiendo del tratamiento la calidad variará de tal modo como lo muestra la figura 3-1 (Asano, 2002)

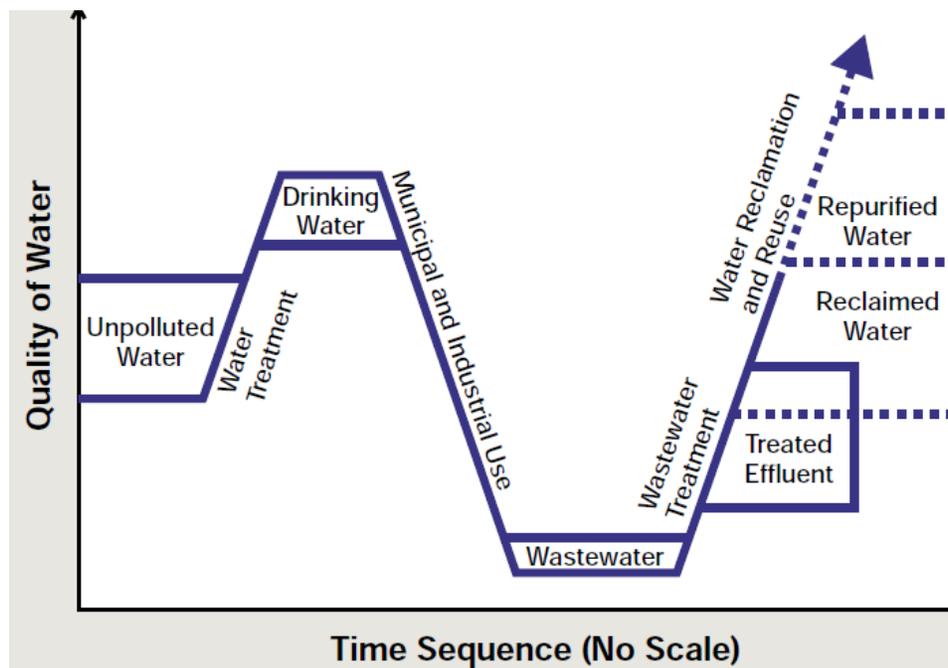


Figura 3-1: Cambios en la calidad del agua durante el tiempo y el uso (Asano, 2002).

En la tabla 3-1 se enlistan una serie de necesidades y beneficios por las cuales la reutilización ha tomado un papel importante en el ciclo del reúso (Quiroga Alonso, 2011; Mujeriego Sahuquillo, 2010).

Tabla 3-1: Necesidades y beneficios de la reutilización de agua

Necesidad	Beneficios
<ul style="list-style-type: none"> • Demandas crecientes por zonas urbanas. • Pérdida gradual de la calidad de aguas disponibles. • Requerimientos en procesos industriales. • Falta de agua disponible en zonas inaccesibles. • Distancias crecientes entre las nuevas fuentes de abastecimiento y los núcleos urbanos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nueva fuente de suministro de agua, capaz de aportar recursos hídricos adicionales, bien sea en forma de recursos netos o recursos alternativos. • Disminución de los costes de tratamiento y de vertido del agua depurada. • Reducción del aporte de contaminantes. • Ahorro energético, al evitar aportes adicionales de aguas desde zonas alejadas. • Aprovechamiento de los elementos nutritivos contenidos en el agua, especialmente cuando el agua regenerada se utiliza para riego agrícola y jardinería • Mayor garantía de suministro. Regularidad del caudal de agua disponible • Reemplazo del agua potable para otros usos • Agua residual tratada es valiosa para tirarla.

Todo ello hace que el agua residual tratada o regenerada se convierta en una fuente alternativa de abastecimiento, económica y segura desde el punto de vista sanitario y ambiental, y a veces, la única fuente alternativa de agua en muchas zonas del mundo para corregir el déficit hídrico y permite usar aguas que antes no se contaba como recurso, liberando caudales de agua de mejor calidad para usos más nobles (Quiroga Alonso, 2011).

Entre las barreras y condicionantes que presenta la reutilización se encuentran:

- Financiación del sistema incluyendo la inversión y operación.
- Aceptación social entre los potenciales usuarios.

La regeneración de agua residual se concibe actualmente como un proceso destinado a obtener un producto de calidad. Su elaboración y comercialización, debe plantearse en un marco más amplio que el tradicional de lucha contra la contaminación y con una nueva mentalidad en la planificación, concepción y aprovechamiento de los procesos de regeneración diferente a la adoptada generalmente en el tratamiento de agua residual (Mujeriego Sahuquillo, 2010).

3.1 TIPOS DE REUTILIZACIÓN

Atendiendo al posible contacto o ingestión del agua residual tratada por parte de las personas, la reutilización se clasifica en: **uso no potable** y **uso potable** (Mujeriego Sahuquillo, 2010).

La **reutilización para uso potable** se divide en dos posibles usos:

- *Reutilización Indirecta* para uso potable, cuando el agua regenerada se mezcla con otra masa de agua natural, como ocurre durante la infiltración de agua regenerada en un acuífero natural del que posteriormente se extrae agua como materia prima para la elaboración de agua potable.
- *Reutilización Directa* para uso potable, cuando el agua regenerada se introduce directamente en la red de distribución de agua potable (vehículos espaciales). Esta posibilidad tiene un origen más reciente y supone el aprovechamiento directo de efluentes, con un mayor o menor grado de pre-tratamiento previo, mediante su transporte hasta el punto de tratamiento, sin mediar para ello la existencia de un vertido o una dilución en un curso natural de agua (Mujeriego Sahuquillo, 2010).

Igualmente al hablar de reutilización también se pueden asignar los términos de **reutilización planificada o sin planificar**; la primera expresión se refiere en el caso de los vertidos de las aguas residuales a los cauces después de haber sido sometidas a algún tipo de tratamiento y previendo algún posible uso posterior. En cambio, la reutilización sin planificar es la acción del vertido de las aguas residuales sin ningún tipo de tratamiento y sin prever su posible uso posterior. Algunos autores suponen que la reutilización planificada es un componente esencial de la gestión integrada de los recursos hídricos, pues contribuye al aumento neto de dichos recursos, tanto para reutilización en riego agrícola y de jardinería como para infiltración y almacenamiento de acuíferos (Quiroga Alonso, 2011).

3.2 APLICACIONES DE AGUA RESIDUAL TRATADA

Dado que en la actualidad existen tecnologías suficientes para conseguir el grado de calidad de agua que deseemos, si el objetivo del tratamiento es la reutilización, es preciso considerar a que aplicación concreta se quiere destinar el agua (Mujeriego Sahuquillo, 2010; Quiroga Alonso, 2011). De las distintas aplicaciones que presenta la reutilización de aguas residuales tratadas destacan las siguientes:

- Reutilización urbana (jardinería, lucha contra los incendios, regado de jardines, limpieza de calles, limpieza de automóviles)
- Reutilización potable (naves espaciales tripuladas, incremento de los recursos de agua potable).
- Reutilización industrial (agua de refrigeración, agua de limpieza, aguas de procesos)
- Reutilización agrícola y forestal en cultivos que se consumen crudos, en cultivos que se consumen previamente cocinados, cultivos que alimentan ganado, etc.
- Uso medioambiental (creación de humedales artificiales, mantenimiento de caudales ecológicos, etc.).
- Reutilización ornamental y recreativa (fuentes urbanas, estanques)
- Mejora y preservación del medio natural (regeneración de acuíferos lucha contra las intrusiones marinas, recarga de acuíferos sobre-explotados, etc.).

3.3 CICLO DEL REÚSO

El ciclo del agua es un modelo conceptual de transporte continuo de agua a través del medio ambiente, consta de aguas superficiales, subterráneas, aguas asociadas a usos de la tierra y vapor de agua atmosférico. La regeneración del agua, reciclado y reutilización se ha convertido en un componente significativo del ciclo hidrológico en las zonas urbanas, industriales y agrícolas. La reutilización de aguas residuales es parte intrínseca del ciclo natural del agua (Mujeriego Sahuquillo, 2010).

Asano T. en el 2002 describe de una forma clara la visión conceptual del ciclo del agua desde los recursos superficiales y subterráneos a las instalaciones de tratamiento, así como

a las aplicaciones en riego, usos municipales, industriales. Los procesos de regeneración o reutilización comienzan a partir de una agua residual urbana que ha recibido ya un tratamiento primario y secundario, con el objetivo básico de poderla incorporar al medio natural. En la figura 3-2 se muestra el ciclo de la reutilización incorporado al ciclo hidrológico.

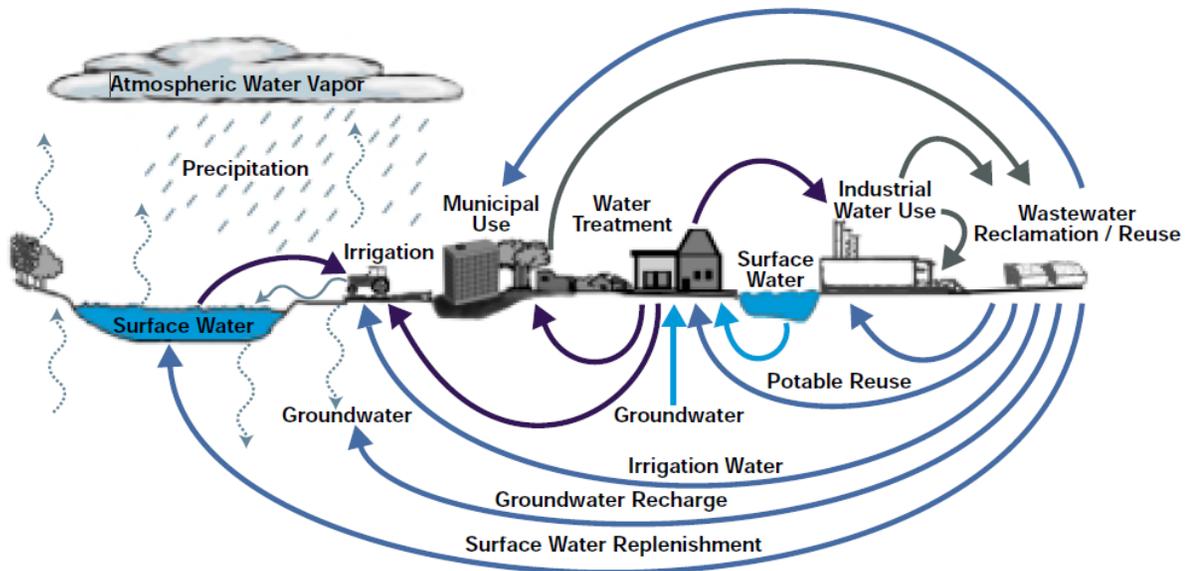


Figura 3-2: Papel del tratamiento, regeneración y reutilización en los usos del agua a través del ciclo hidrológico (Asano T., 2002)

Esto lleva a entender a la reutilización como una forma de conservación y aumento de los recursos disponibles con el uso beneficioso de este recurso no convencional. Mas sin embargo, el aprovechamiento de las aguas residuales requiere como primer paso esencial procurar la separación de las aguas pluviales, hasta lograr su tratamiento. Una vez tratadas, pueden ser utilizadas directamente para fines industriales o agrícolas, en sustitución de agua subterránea o importada de “primer uso”. También pueden ser reutilizados por el sector público-doméstico, en este caso requiere de un proceso de tratamiento más exigente (UAM, 2009).

Los problemas que presentan los ciclos de reúso son el elevado costo y la complejidad que implican los procesos de tratamiento. Más sin embargo habría que valorar el beneficio que involucraría directamente en la disponibilidad del agua, como es el caso de las aguas

tratadas utilizadas para riego agrícola, que terminan recargando los acuíferos. Cada litro reutilizado reemplaza la necesidad de importar agua o sobreexplotar los acuíferos (UAM, 2009). En los ciclos de tratamiento y reúso se involucra a diferentes actores, como los indicados en la figura 3-3:

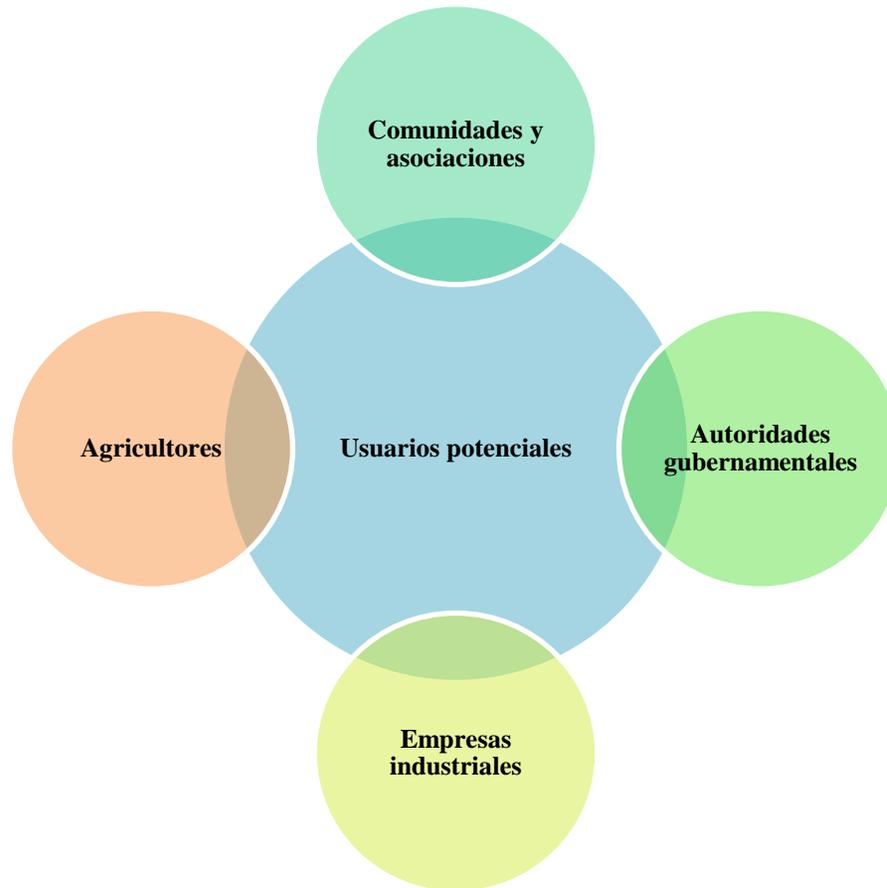


Figura 3-3: Usuarios potenciales para el agua residual tratada.

3.4 ASPECTOS SANITARIOS

En la reutilización no potable existen prioridades a considerar como son:

1. Establecer metodologías de evaluación del riesgo microbiano que ayuden a definir criterios de reutilización del agua.
2. Identificar criterios de reutilización que ofrezca una protección suficiente de la salud pública, así como la flexibilidad máxima y un uso eficiente de las tecnologías de tratamiento.

3. Establecer la relación existente entre la inactivación microbiana y los parámetros de control de varios procesos de desinfección y de tratamiento, como forma de desarrollar una protección económica de la salud pública.
4. Desarrollar un programa capaz de cuantificar, medir, comparar y comunicar los niveles de seguridad relativos propios de la reutilización no potable ante el público en general y los legisladores.

El proceso de obtención de un agua residual tratada que satisfaga los criterios de calidad propuestos por la USEPA en 2004 para el riego de jardinería de zonas públicas, consta fundamentalmente de cuatro elementos principales (Mujeriego, 2005):

1. La implantación de un control de vertidos a la red de saneamiento que asegure la ausencia de contaminantes que puedan hipotecar o impedir la reutilización del agua regenerada.
2. Un tratamiento biológico secundario capaz de producir un efluente con un contenido de materia en suspensión inferior a 10-20 mg MES/l y valores comparables de DBO₅.
3. Un tratamiento terciario destinado a eliminar la materia en suspensión del afluente secundario, mediante una filtración directa, y a desinfectar completamente el efluente. Este proceso de tratamiento constituye propiamente la fase de regeneración del agua.
4. Un depósito regulador de los caudales de agua regenerada, a fin de adecuar la producción de la planta a la demanda de uso, y asegurar una cierta reserva de agua regenerada.

3.4.1 Tipos de riesgo

Según la naturaleza del agente implicado el tipo de riesgo puede ser:

- **Biológico:** causado por todos los microorganismos presentes en el agua a tratar. Es el tipo de riesgo que más problemas de salud presenta por su potencialidad infectiva y su Patogenicidad.

- **Químico:** motivado por la presencia de compuestos químicos: fertilizantes, metales pesados, etc. Que presenta menos peligro, dado que es necesaria una mayor exposición a los mismos, pero que no conviene ignorar.

Tabla 3-2: Contaminantes de preocupación en el agua residual (Wilf, 2010).

Category	Parameters of special interest	Environmental effect
Microorganisms	Pathogenic bacteria, virus, protozoan cysts, and worm eggs	Risk from direct exposure and ingestion, (e.g., shellfish)
Biodegradable organic material	Oxygen depletion in rivers, lakes and estuaries	Decrease in diversity in aquatic life, fish kills, odors
Solids	Total dissolved solids, suspended solids	Adverse affect on aquatic communities, clogging irrigation equipment
Synthetic organic materials	Endocrine disrupting chemicals, pharmaceuticals, personal care products, pesticides, solvents, phenol, cyanide, disinfection-by-products	Mutagenic, carcinogenic, and otherwise toxic effects on aquatic life, bioaccumulation, public acceptance issues
Other organic materials	Fats, oils and grease, colors	Aesthetic issues, interference with conveyance and treatment systems
Nutrients	Nitrogen, phosphorus, ammonia	Eutrophication, toxicity, oxygen depletion
Metals	Hg, Pb, Cd, Cr, Cu, Ni	Toxic effects, bioaccumulation
Other inorganic materials	Acids, hydrogen sulfide, bases	Corrosion, toxicity
Thermal effects	Temperature	Changing living conditions for flora and fauna
Taste and odor	Hydrogen sulfide	Aesthetic issues, toxic effects
Radioactivity	Radon, radium	Somatic and genetic effects, bioaccumulation, cancer

Los extensos trabajos de experimentación y de seguimiento de las numerosas instalaciones de regeneración de agua existentes en California y Florida en los Estados Unidos de América ponen de manifiesto que un buen efluente biológico secundario (menos de 10 mg/l de MES y DBO₅) filtrado mediante un filtro de arena, o de arena y carbón, con la eventual adición de unos miligramos por litro de coagulante (alúmina, generalmente), y una desinfección con cloro con un tiempo de contacto de entre 30 minutos (Florida) y 2 horas (California), hasta alcanzar la eliminación de coliformes totales o fecales, permite obtener un agua regenerada desprovista de virus y bacterias patógenas, y por lo tanto, ofrece una garantía de calidad similar a la de un agua potable de consumo público (Asano y cols., 1990), cuando se trata de utilizarla para usos no potables.

3.5 FIABILIDAD Y PLANEACIÓN DE UN SISTEMA DE REUTILIZACIÓN

En los casos de reutilización hay que realizar un estudio específico en el que, a partir de las necesidades de la zona, se tenga en cuenta la calidad del efluente de la planta de tratamiento y la calidad que se desea alcanzar para cada uno de los usos posibles, con el fin de definir los tratamientos complementarios y las modificaciones necesarias en el proceso. La inclusión de la regeneración de aguas residuales planificadas, reciclado, y reutilización en los sistemas de gestión de recursos de agua implica la aplicación de desarrollos complementarios en la tecnología, conocimientos de los riesgos sobre la salud y la aceptación pública para mitigar los límites impuestos por el aumento de escasez de recursos de agua, todos estos aspectos conducentes a que sea un proceso fiable (Prats Rico, 2000).

La fiabilidad del proceso ha de ser tal, que el primer objetivo en el aprovechamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales para su reutilización, debe ser el perfecto y continuado mantenimiento de los equipos e instalaciones. Por otro lado, la aceptación pública de esta agua dependerá: 1) la calidad del agua tanto microbiológica y físico-química, 2) fiabilidad del tratamiento y 3) los costes de la reutilización. En el caso de la optimización en los procesos de reutilización, resulta esencial disponer de una adecuada planificación que a nivel conceptual implica de forma general: definición del proyecto, estimación de costos y la identificación de un mercado potencial para el agua residual tratada. Esta planificación preliminar permite tener una idea de la viabilidad de la reutilización de los efluentes (Quiroga Alonso, 2011). Entre los principales elementos para la planificación de la reutilización de aguas residuales se presentan en la siguiente tabla 3-3.

Tabla 3-3: Elementos de la planificación de la reutilización de aguas residuales (Quiroga Alonso J., 2011)

Fases	Objetivos
Valorar el tratamiento del agua residual y las necesidades de vertido	Evaluar la cantidad de agua residual disponible para la reutilización y las opciones de vertido
Evaluar la oferta y demanda.	Evaluar los modelos de usos dominantes del agua.
Analizar el mercado para el agua residual tratada.	Identificar los usuarios potenciales del agua regenerada y los requerimientos de cantidad y calidad de agua

Realizar análisis económicos y de ingeniería.	Determinar el tratamiento y los requerimientos del sistema de distribución para usuarios potenciales del agua regenerada
Desarrollar un plan de implementación con un análisis financiero.	Desarrollar las estrategias, el calendario y las opciones de financiación para la implementación del proyecto.

3.6 REUTILIZACIÓN EN LA GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HIDRICOS

La Gestión Integral de Recursos Hídricos (GIRH) es una respuesta de la última década a los problemas mundiales, regionales, nacionales y locales de escasez, calidad y saneamiento del agua, así como su acceso universal que tienen una relación muy íntima con la pobreza, como lo explica el Informe de Desarrollo Humano de 2006 de las Naciones Unidas.

Existen diversos conceptos que se refieren a esta gestión, por mencionar algunos:

- Integración del conocimiento de una diversidad de sistemas que deben considerarse en forma simultánea, bajo distintas disciplinas, concepciones, conocimientos, investigaciones, órganos normativos y de gestión, instituciones y usuarios.
- Asignación armónica y equilibrada entre los diferentes usos o aprovechamientos, teniendo en cuenta las relaciones existentes entre los diferentes componentes de esos recursos y en particular el papel determinante que el agua tiene para la preservación y la mejora del medio ambiente.
- Es un enfoque de política pública, incremental y adaptativo, que persigue el desarrollo y manejo coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados. Está orientada a propiciar que el aprovechamiento de los recursos hídricos se dirija hacia la consecución de objetivos nacionales de desarrollo económico y social bajo criterios de equidad y sostenibilidad ambiental.
- Proceso que promueve la gestión y desarrollo coordinado del agua, la tierra, los recursos relacionados con éstos y el ambiente, con el fin de maximizar el bienestar social y económico equitativamente sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas (Ley de Aguas Nacionales , 2008).

Estas cuatro propuestas destacan en el entendimiento de la integración, coordinación, equidad, desarrollo y bienestar social-económico-ambiental. Y conforme transcurre el

tiempo y el interés por alcanzar un modelo de gestión ha existido una diversificación de enfoques tales como los de la tabla 3-4 (Quiroga Alonso, 2011).

Tabla 3-4: Modelos de Gestión

GESTIÓN		
OFERTA	DEMANDA	USO SOSTENIBLE
Basado tradicionalmente en conseguir un aumento de los recursos disponibles capaz de cubrir todas las necesidades actuales y futuras.	Acciones puntuales de incremento de precios o impuestos para los usuarios y a campañas de concienciación para los mismos. Si al gestionar la demanda tampoco se consigue un equilibrio o balance de los recursos, se debe recurrir a los recursos no convencionales.	El agua se considera un bien social, es capaz de satisfacer las necesidades de agua dulce, en cantidad y calidad, tanto en nuestras generaciones como a los ecosistemas del planeta, sin impedir que las futuras generaciones satisfagan sus propias necesidades.

Las bases para el Modelo de Uso Sostenible son:

1. Distribuir las actividades de acuerdo con la capacidad de los ecosistemas.
2. Regular las actividades de forma que se respete la recuperación de los sistemas de flujo subterráneo y su capacidad autodepuradora.
3. Establecer Planes Integrales de Gestión de la Demanda con racionalización mediante concientización, programas de tarifas, eficacia de la minimización de fugas y la distribución y uso.
4. Incrementar, la cantidad de los recursos hídricos sin que conlleve una disminución de su calidad.

La figura 3-4 esquematiza la sustentabilidad de los recursos hídricos.

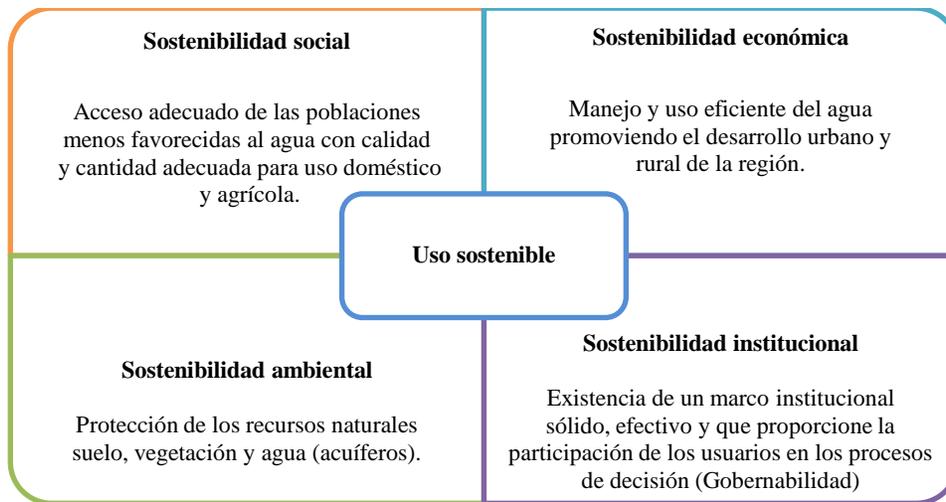


Figura 3-4: Modelos para la Sustentabilidad

3.7 GESTIÓN DEL AGUA EN MÉXICO

La GIRH en México se sustenta a través de:

- Ley de Aguas Nacionales que establece la explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral sustentable.
- La Comisión Nacional del Agua cuya misión es administrar y preservar las aguas nacionales y sus bienes inherentes, para lograr su uso sustentable.

La Gestión del Agua, de acuerdo a la Ley de Aguas Nacionales del 2008, artículo 3º es el conjunto de principios, políticas, actos, recursos, instrumentos, normas formales y no formales, bienes, recursos, derechos, atribuciones y responsabilidades, mediante el cual coordinadamente el Estado, los usuarios del agua y las organizaciones de la sociedad, promueven e instrumentan para lograr el desarrollo sustentable en beneficio de los seres humanos y su medio social, económico y ambiental en:

- Control y manejo del agua y las cuencas hidrológicas, incluyendo acuíferos
- Regulación de la explotación, uso o aprovechamiento del agua
- Preservación y sustentabilidad de los recursos hídricos en cantidad y calidad

La administración del agua es a través CONAGUA, órgano administrativo desconcentrado de SEMARNAT, entre cuyas facultades sobresalen cuidar la cantidad y calidad de las aguas nacionales así como establecer la política hídrica nacional a partir del Programa Nacional Hídrico. En México, la cuenca es la unidad básica para la gestión del agua, para lo que se han definido las trece grandes regiones tomando como base la división hidrológica y ajustándola a los límites municipales (unidad administrativa mínima). Cada región presenta características particulares que la hacen diferenciarse de las demás (Cotler, 2004).

Para facilitar la coordinación de las políticas y programas hidráulicos entre los tres niveles de gobierno (Federal, Estatal y Municipal) y propiciar la concertación de objetivos, metas, estrategias, políticas, programas, proyectos y acciones, entre la autoridad federal del agua y los usuarios del agua debidamente acreditados y grupos y organizaciones diversas de la sociedad, la Ley de Aguas Nacionales en su artículo 13 contempla y ordena el establecimiento de **Consejos de Cuenca** para la operatividad de sus acciones, cuenta con organizaciones auxiliares: Comisiones de cuenca (nivel Subcuenca), Comités de Cuenca (nivel microcuencas) y Comités Técnicos de Aguas subterráneas (acuíferos). En la política hidráulica la gestión integral al nivel de cuenca es a través de las figuras de Consejo, Comisión y Comité que facilita y alienta a la participación activa de los usuarios y la sociedad (CONAGUA , 2007).

La administración del agua está sujeta a los siguientes ordenamientos jurídicos:

1. Ley Federal de Derechos
2. Ley de Contribución de Mejoras por Obras Públicas Federales de Infraestructura Hidráulica
3. Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
4. Reglamento interior de la Semarnat
5. Ley Federal sobre Metrología y Normalización
6. Ley General de Bienes Nacionales
7. Leyes estatales en materia de agua promulgadas en las entidades federativas

En el marco institucional del agua en el país se anticipa la división a diferentes niveles:

Orden Federal

- Coordinación a nivel estatal y municipal para una eficiente gestión, cuidado y administración del recurso.
- Control de extracción, explotación, uso y aprovechamiento de las aguas nacionales considerando la sustentabilidad hidrológica de los ecosistemas.

Orden Estatal (Estado de México)

- Secretaría del Agua y Obra Pública (**SAOP**) verifica el cumplimiento oportuno del Programa Hidráulico Estatal, además de que cuenta con la facultad para impulsar la creación y apoyar en la consolidación de organismos operadores de agua municipales, con el propósito de ampliar la cobertura de las obras y servicios hidráulicos en la entidad.
- Por otro lado, la Comisión del Agua del Estado de México (**CAEM**), cuya misión es administrar los sistemas de agua potable, drenaje, tratamiento y reúso de aguas residuales tratadas. Entre otras funciones, este organismo tiene la atribución de prestar asistencia técnica a los ayuntamientos que así lo requieran, en la administración de sus sistemas de agua potable, drenaje, tratamiento y reúso de aguas residuales.

Orden municipal

- El Sistema de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Ecatepec de Morelos (**SAPASE**) se encargará de otorgar la prestación del servicio público de agua potable, alcantarillado y saneamiento, dentro de la competencia territorial del municipio de Ecatepec de Morelos, estado de México.

3.8 MARCO LEGAL

Entre los factores determinantes en la implantación y desarrollo de la reutilización planificada de aguas, está el establecimiento de normas de calidad en cada una de las aplicaciones posibles que se pretenda realizar. De esta forma se evalúa tanto la seguridad sanitaria y química, como la efectividad de las tecnologías de tratamiento empleadas.

Los organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS), Food and Agriculture Organization (FAO) y la United States Environmental Protection Agency (USEPA) entre otras, establecen límites sanitarios y en algunos casos de carácter agronómico, cuando se trata de reutilización de las aguas residuales en la agricultura. Un problema es la diversidad de criterios entre las normativas de carácter sanitario, debido a la dificultad de establecer una relación causal entre la calidad del agua y los posibles efectos sobre la salud y el medio ambiente.

La USEPA (1992) expone las líneas básicas de la reutilización de las aguas residuales urbanas, aunque las recomendaciones de calidad son muy estrictas, reduciendo considerablemente los límites establecidos en las últimas directrices de la OMS. California, U.S.A. es el estado más conocido por el uso de agua reutilizada. La primera legislación sobre reutilización fue promulgada en 1918 y el **Título 22** es un código que brinda las regulaciones para los requerimientos en el tratamiento de agua reutilizada dependiendo a su aplicación. Desde entonces, esta normativa ha sido mejorada y ampliada hasta la normativa actual en vigencia desde 1978, aunque en proceso de revisión (Crook, 1994).

3.8.1 Ley de Aguas Nacionales

De acuerdo a lo establecido en el artículo 3° en su fracción XLVI se entiende como **reúso** a “la explotación, uso o aprovechamiento de aguas residuales con o sin tratamiento previo”. Asimismo determina en el artículo 7° que es de utilidad pública “el mejoramiento de la calidad de las aguas residuales, la prevención y control de su contaminación, la recirculación y el reúso de dichas aguas, así como la construcción y operación de obras de prevención, control y mitigación de la contaminación del agua, incluyendo plantas de tratamiento de aguas residuales”.

La Comisión a nivel nacional, los Organismos de Cuenca y los Consejos de Cuenca son las instituciones encargadas de “fomentar y apoyar con los servicios públicos de agua potable, alcantarillado, saneamiento, recirculación y reúso en el territorio nacional”, apoyados con las autoridades estatales y municipales (Art. 9, 12 y 13).

Entre los principios de la Política Hídrica Nacional se proclama en la sección XII del artículo 14° que “el aprovechamiento del agua debe realizarse con eficiencia y debe promoverse su reúso y recirculación”, este principio da pauta la planificación y programación hídrica.

En el cometido de las solicitudes de concesiones o asignaciones, estipula que debe contener en “los proyectos de obras a realizar o las características de las obras existentes para su extracción y aprovechamiento, así como las respectivas para su descarga, incluyendo tratamiento de las aguas residuales y los procesos y medidas para el reúso del agua, en su caso, y restauración del recurso hídrico” (Art. 21). Asimismo los concesionarios esta obligados a cumplir los requisitos de uso eficiente del agua y realizar su reúso en los términos que la normatividad establece (Art. 29). Se destaca además que en el reúso de aguas residuales, se deberán respetar los derechos de terceros relativos a los volúmenes de éstas que estén inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua Art. 45.

Finalmente en esta misma línea, la Comisión con el concurso de los Organismos de Cuenca, deberá promover entre la población, autoridades y medios de comunicación, la **Cultura del agua** acorde con la realidad del país y sus regiones hidrológicas. Incorporando (...) conceptos de cultura del agua, en particular, sobre disponibilidad del recurso; valor económico, social y ambiental; uso eficiente; necesidades y ventajas del tratamiento y reúso de las aguas residuales; conservación del agua y su entorno; el pago de servicios de agua y de derechos por extracción, descarga y servicios ambientales (Art. 84).

3.8.2 Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)

Continuando con temas relacionados a reutilización, la LGEEPA en el rubro de las descargas dicta en su artículo 5° que la Federación es quien fomentará la aplicación de tecnologías, equipos y procesos que reduzcan las emisiones y descargas contaminantes provenientes de cualquier tipo de fuente.

Asimismo en su artículo 92° establece que las autoridades competentes promoverán el ahorro y uso eficiente del agua, el tratamiento de aguas residuales y su reúso. Se señala además en el artículo 117° que “el aprovechamiento del agua en actividades productivas susceptibles de producir su contaminación, conlleva la responsabilidad del tratamiento de las descargas, para reintegrarla en condiciones adecuadas para su utilización en otras actividades y para mantener el equilibrio de los ecosistemas; por otra parte las aguas residuales de origen urbano deben recibir tratamiento previo a su descarga en ríos, cuencas, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua, incluyendo las aguas del subsuelo.

3.8.3 Norma oficial mexicana NOM-001-ECOL-1996

Esta norma tiene como objetivo la protección de la calidad de las aguas y bienes nacionales para posibilitar sus usos. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales.

La norma indica que los tipos de contaminantes a determinar son de tipo 1) básico: compuestos y parámetros que pueden ser removidos o estabilizados mediante tratamientos convencionales como grasas y aceites, materia flotante, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, DBO₅, nitrógeno total, fósforo total, temperatura y pH; 2) patógenos y parasitarios que son aquellos microorganismos, quistes y huevos de parásitos que representan un riesgo a la salud humana, flora o fauna. Se considera para ello, coliformes fecales y los huevos de helminto. 3) metales pesados (arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo, zinc) y cianuros.

Conjuntamente establece los cuerpos receptores donde se descargan las aguas residuales así como los terrenos en donde se infiltran o inyectan dichas aguas. Estos son corrientes, depósitos naturales de agua, presas, cauces, zonas marinas o bienes nacionales.

El cumplimiento de esta norma para las descargas municipales y no municipales es gradual y progresivo conforme a los rangos de población y dependiendo de la carga contaminante (DBO₅ o SST). Aquellos responsables de descarga, cuya concentración de contaminantes en cualquiera de los parámetros básicos, metales pesados y cianuros, que rebasen los límites,

multiplicados por cinco, para cuerpos receptores de ríos y uso público urbano, quedan obligados a presentar un programa de las acciones u obras para el control de sus descargas. Aunado a esto se obliga a realizar monitoreo para determinar el promedio diario y mensual. Mas sin embargo, el promedio mensual, es el valor que el responsable de la descarga está obligado a cumplir, siempre y cuando lo notifique por escrito a la CONAGUA.

3.8.4 Norma oficial mexicana NOM-003-ECOL-1997

Una vez revisada la norma para las descargas y retomando el tema principal de este capítulo, esta norma establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

La norma divide el tipo de reúso tanto de contacto directo e indirecto:

- **Reúso en servicios al público con contacto directo:** Llenado de lagos y canales artificiales recreativos con paseos en lancha, remo, canotaje y esquí, fuentes de ornato, lavado de vehículos, riego de parques y jardines.
- **Reúso en servicios al público con contacto indirecto u ocasional** Es un tipo de contacto físico incidental y que su acceso es restringido como en casos de Riego de jardines y camellones en autopistas, camellones en avenidas, fuentes de ornato, campos de golf, abastecimiento de hidrantes de sistemas contra incendio, lagos artificiales no recreativos y barreras hidráulicas de seguridad y panteones.

Entre los parámetros a vigilar son Coliformes fecales, huevos de helminto, grasas y aceites, DBO₅ y SST las concentraciones específicas son descritas en la tabla 3-5.

Tabla 3-5: Límites máximos permisibles para reúso en servicios públicos.

TIPO DE REUSO	PROMEDIO MENSUAL				
	Coliformes fecales NMP/100 ml	Huevos de helminto (h/l)	Grasas y aceites mg/l	DBO ₅ mg/l	SST mg/l
SERVICIOS AL PUBLICO CON CONTACTO DIRECTO	240	1	15	20	20
SERVICIOS AL PUBLICO CON CONTACTO INDIRECTO U OCASIONAL	1,000	5	15	30	30

Además de los parámetros anteriores existen especificaciones como:

- La materia flotante debe estar ausente en el agua residual tratada,
- El agua residual tratada reusada en servicios al público, no deberá contener concentraciones de metales pesados y cianuros mayores a los límites máximos permisibles establecidos para embalses naturales y artificiales con uso en riego agrícola.
- Las entidades públicas responsables del tratamiento de las aguas residuales que reúsen en servicios al público, tienen la obligación de realizar el monitoreo de las aguas tratadas y de conservar al menos durante los últimos tres años los registros de la información.

3.8.5 Marco Jurídico estatal y municipal

La Secretaría de Agua y Obras Públicas del estado de México es la encargada de apoyar la creación y consolidación de los organismos descentralizados municipales encargados de la prestación de los servicios públicos de suministro de agua potable, drenaje y tratamiento de aguas residuales. Es en la **Ley Orgánica Municipal** del estado de México, en el apartado de servicios públicos, en el artículo 125°, donde se establece que los municipios tendrán a su cargo la prestación, explotación, administración y conservación de los servicios públicos municipales, como Agua potable, alcantarillado, saneamiento y aguas residuales. Por otro lado, la **Ley del Agua para el estado de México y municipios** en su artículo 9° enuncia que en el Sistema Estatal del Agua se contemplan las políticas e instrumentos para la prestación de los servicios públicos de suministro de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento, reúso de aguas residuales tratadas y la disposición final de sus productos resultantes; y en el artículo 17° fracción VIII dicta que la secretaria de agua y obras públicas es la encargada de impulsar el tratamiento de las aguas residuales, con el fin de promover su reutilización, así como prevenir y revertir la degradación de los cuerpos de agua; es en la fracción XVII de este mismo artículo que dicta que la planeación y programación será coordinadamente con las dependencias gubernamentales, federales, estatales y municipales, las obras de suministro de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento, reúso de aguas residuales tratadas y la disposición final de sus productos resultantes.

Es en el artículo 26°, de esta misma ley, donde reconoce a la CAEM como un organismo sectorizado a la Secretaría, que tiene por objeto, planear, programar, presupuestar, diseñar, construir, conservar, mantener, operar y administrar sistemas de suministro de agua potable, desinfección, drenaje, alcantarillado, tratamiento, reúso de aguas residuales tratadas y la disposición final de sus productos resultantes.

En tema de reutilización como tal, el artículo 86 establece que la comisión y el organismo operador de agua promoverán el reuso de aguas residuales que se descarguen en los sistemas de drenaje y alcantarillado, y están obligados a desarrollar la infraestructura para el reuso de las que resulten del tratamiento de los sistemas públicos y privados. El organismo operador atenderá prioritariamente al desarrollo de la infraestructura que permita el mayor aprovechamiento de las aguas residuales tratadas. En el caso de aguas residuales tratadas, tendrá prioridad el *reúso para recarga de acuíferos sobreexplotados*.

Las aguas residuales tratadas serán utilizadas en: 1) Los municipios, en el riego de las áreas verdes y limpieza de infraestructura urbana municipales; 2) Los conjuntos habitacionales y establecimientos mercantiles nuevos, en sus actividades de limpieza de instalaciones, parque vehicular y riego de áreas verdes; 3) Los establecimientos de servicios, de recreación y centros comerciales, en sus actividades de limpieza de instalaciones, parque vehicular y riego de áreas verdes; 4) Los establecimientos comerciales, de servicios e industriales que den mantenimiento a vehículos automotores o laven carrocerías; 5) Las industrias en todos aquellos procesos que no requieran agua de calidad potable.

Las personas que incumplan lo dispuesto por el presente artículo, se harán acreedoras a las sanciones establecidas en esta Ley.

El **Reglamento Interno de la Administración Pública Municipal de Ecatepec de Morelos, estado de México** señala que la inspección y vigilancia de los servicios públicos de agua potable, alcantarillado y saneamiento de aguas residuales, están a cargo del Sistema de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Ecatepec de Morelos (SAPASE) esto dentro del territorio municipal y conforme a las leyes, más sin embargo no establece la reutilización e infraestructura de las aguas residuales, dejando esta función a los organismos estatales.

4. REUTILIZACIÓN INDIRECTA: RECARGA ARTIFICIAL

La importancia de esta alternativa cada vez es mayor debido al manejo de uso conjunto que se tiene para el agua superficial, subterránea y agua residual tratada considerándose así como conjunto en el manejo integral de los recursos (Asano & Cotruvo, 2004).

Existen proyectos emblemáticos de reutilización indirecta para usos no potables, como son:

1. En el Upper Occoquan Sewerage Authority in Fairfax, Virginia, en el que una excelente instalación, se vierte el efluente de un tratamiento avanzado en un afluente del río que alimenta un embalse utilizado como fuente de agua para abastecimiento público.
2. En el Condado de los Ángeles, que funciona desde hace más de 30 años, un efluente terciario es aprovechado para la recarga artificial de un acuífero utilizado como fuente de agua de abastecimiento público.
3. Desde hace 20 años al sur de California en el condado de Orange, la empresa Orange County Water District (OCWD) realiza la inyección del efluente terciario (carbón activado y osmosis inversa) a un acuífero costero como forma de crear una barrera ante la intrusión salina y de propiciar la recarga artificial de un acuífero utilizado como fuente de agua para abastecimiento público. Esta organización ha funcionado a partir de 1936 y comenzó a comprar las partes del canal del Río Santa Ana para la recarga y con los años se ha ampliado aún más su sistema de recarga (OCWD, 2008).

La Recarga artificial es una “estrategia de integración en la que se utiliza la capacidad de almacenamiento que tienen los acuíferos para aceptar agua procedente de distintas fuentes (...) con el objeto de aumentar la disponibilidad y el grado de garantía en la satisfacción de la demanda con la calidad adecuada al uso al que se destina”. Ver figura 4-1 (Murillo Díaz y cols., 2010).

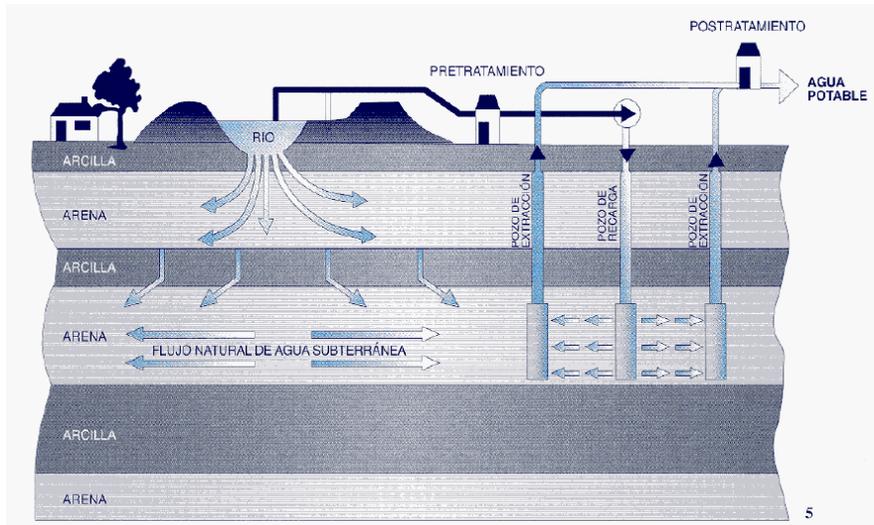


Figura 4-1: Recarga Artificial de acuíferos (Murillo, 2010).

El Sistema de Agua de la Ciudad de México (SACM) concibe esta técnica como un aprovechamiento del agua residual tratada, formando parte de un recurso valioso en el manejo hídrico nacional (SACM, 2009).

4.1 APLICACIONES

Las aplicaciones más comunes de la recarga artificial son (Murillo Díaz y cols., 2000):

- Almacenamiento de escorrentías superficiales
- Reducción o eliminación del descenso piezométrico
- Reducción de costos de transporte, almacenamiento o bombeo
- Actuación contra subsidencia del terreno
- Disminución o corrección de problemas de intrusión marina
- Aprovechamiento de las propiedades del suelo y de la zona no saturada como elemento de tratamiento tanto para aguas potables como residuales
- Dilución del excesivo contenido en nitratos, cloruros u otros constituyentes químicos de las aguas de determinados acuíferos

Entre las ventajas del almacenamiento del agua residual a través de la recarga, se incluyen (Asano & Cotruvo, 2004):

1. El costo de la recarga artificial puede ser menor que al de los embalses.
2. El acuífero sirve como una distribución natural y puede reducir la necesidad de la transmisión tuberías o canales para las aguas superficiales.
3. El agua almacenada en depósitos superficiales está sujeto a evaporación, generación de sabor y olor debido a los problemas de las algas y la productividad de otras especies acuáticas, y a la contaminación; riesgos que pueden ser evitados por el tratamiento del suelo-acuífero y el almacenamiento subterráneo.
4. La inclusión de aguas residuales en la recarga puede proporcionar beneficios psicológicos y estéticos. Este aspecto es particularmente importante cuando existe la posibilidad en la regeneración de aguas residuales.

De forma general los beneficios de la recarga artificial son de tipo ambientales, sociales y económicos tal y como se muestra en la siguiente figura 4-2 (Espino de la O, 2011).

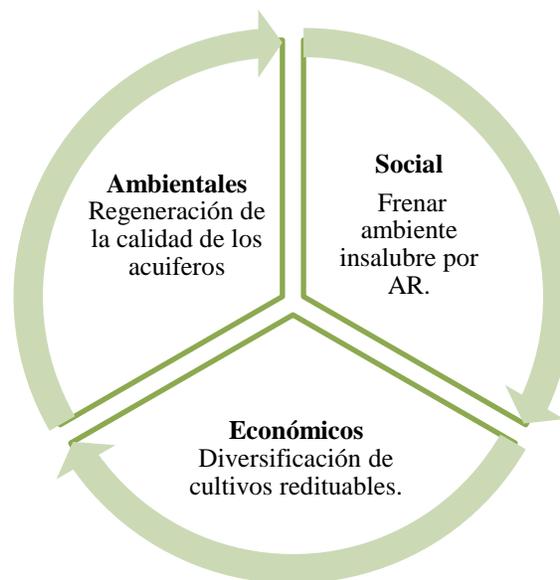


Figura 4-2: Beneficios ambientales, sociales y económicos de la recarga artificial.

4.2 MÉTODOS DE RECARGA

Existen diversos métodos disponibles para los proyectos de recarga artificial, entre ellos mencionamos métodos superficiales y de profundidad. Los primeros consisten en la extensión de agua buscando una gran superficie de contacto agua-terreno. En cambio los

métodos a profundidad radican en la introducción de agua en el acuífero, generalmente mediante pozos, sondeos etc. Se emplean de una forma generalizada en terrenos formados por una alternancia de niveles permeables e impermeables (Murillo Díaz y cols. 2000).

En la Tabla 4-1 se muestra la descripción de los métodos de operación en la recarga artificial la cual consiste en la infiltración directamente en el suelo.

Tabla 4-1: Métodos y dispositivos para la recarga artificial (Murillo, 2000).

Métodos de Recarga Artificial			
Superficiales	En cauces	Serpenteos y represas	Aumenta el tiempo y la superficie de contacto entre el agua y el terreno, bien mediante la construcción de diques o de muros de tierra en forma de L.
	Fuera de cauces	Escarificación	Consiste en escarificar el lecho del río eliminando finos y mejorando la infiltración
		Vasos permeables	Embalses de superficie cuya cerrada no es totalmente impermeable
		Balsas	Dispositivos alargados, poco profundos, y de gran superficie. La infiltración se produce predominantemente por el fondo.
		Fosas	Semejantes a las balsas, pero la superficie lateral es importante. Domina la infiltración por los flancos.
		Canales	Dispositivos poco profundos que siguen la topografía del terreno. La infiltración se produce tanto por el fondo como los flancos.
	Campos de extensión	Extensión de agua por la superficie del terreno, normalmente mediante riego con grandes dotaciones.	
Profundidad	Pozos de Inyección		Mediante la construcción de pozos profundos se inyecta el agua en el acuífero.
	Simas y Dolinas		Consiste en aprovechar las simas y dolinas de los terrenos calcáreos para introducir agua.
	Drenes y Galerías		Consiste en realizar en el fondo de un pozo, por el que se introduce el agua, drenes y galerías.
	Zanjas y Sondeos		Consiste en una gran zanja de infiltración, escasa profundidad, rellena de grava calibrada, dentro de la cual se ubican sondeos de recarga.

A continuación en la tabla 4-2 se describen las ventajas y desventajas de los distintos sistemas de recarga artificial analizando el precio y disponibilidad del terreno, factores estéticos y ambientales, permeabilidad del acuífero, pérdidas por evaporación, calidad del agua y colmatación.

Tabla 4-2: Ventajas y desventajas en los diferentes métodos de recarga artificial (Murillo, 2000).

Factor\ Métodos	Superficiales	En profundidad
Precio y disponibilidad del terreno	Difícil en zonas urbanas o agrícolas por espacio. Precisa en general terrenos baratos, así como de grandes superficies si se quieren infiltrar importantes volúmenes de agua.	En el costo es pequeño y precisa poco espacio.
Factores estéticos y ambientales	Posible proliferación de insectos y roedores. Requieren cercados y vallas.	Escasos
Permeabilidad del acuífero	Media a grande. Permeabilidades bajas exigen grandes extensiones de terreno para poder recargar	Variable. Se emplea de una forma generalizada en terrenos formados por una alternancia de niveles permeables e impermeables o cuando existen niveles poco permeables entre la superficie del suelo y el acuífero.
Pérdidas por evaporación	Determinados casos pueden ser importantes. Depende del tamaño de las instalaciones.	Nulas
Calidad de agua	No tan exigente aprovechamiento de la posible autodepuración de la zona no saturada	Exigente ya que el agua se introduce directamente en el acuífero. Implica coste en pretratamiento.
Colmatación	El agua debe presentar un bajo contenido de sólidos en suspensión.	Presenta una gran susceptibilidad a la colmatación.

Entre las mayores consideraciones que se deben tomar en cuenta una vez elegido el método operativo, son los parámetros a controlar de los cuales, los de mayor rigurosidad son el **nivel piezométrico y la hidroquímica** del agua subterránea, así como el **caudal y la calidad del agua de recarga**. Otro aspecto importante es la conducción del agua de recarga hasta las instalaciones de infiltración para ello es necesario disponer de una infraestructura de conducción adecuada o, en su caso, construirla. En algunos casos será necesario construir depósitos o estructuras de almacenamiento de agua. El mayor problema que enfrenta la recarga es la colmatación, entendiéndose como la acumulación de materiales sobre la superficie de infiltración del agua (Murillo Díaz y cols., 2000).

Estos mismos autores señalan que una vez decidido que la técnica de la recarga artificial de acuíferos puede constituir una herramienta **útil, válida y competitiva** es preciso evaluar la viabilidad de la operación de recarga artificial mediante el análisis y estudio de factores, algunos de ellos se muestran en la siguiente figura 4-3 (Murillo Díaz y cols., 2000):

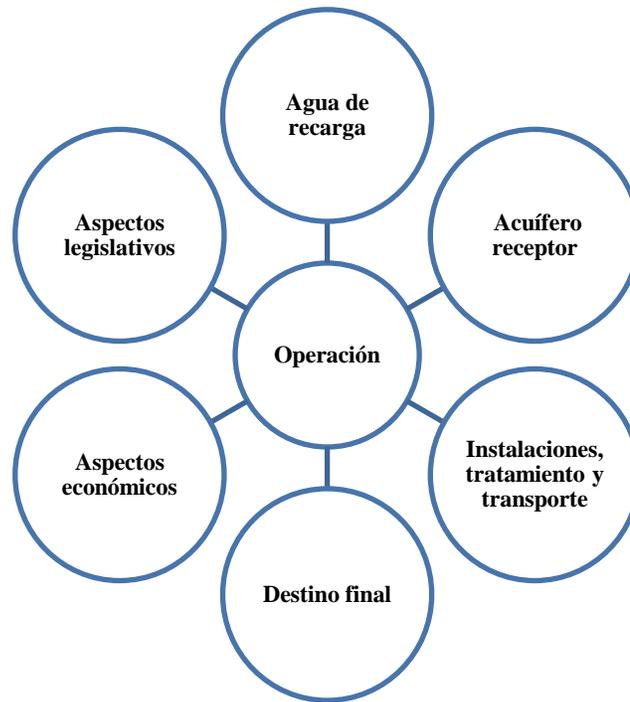


Figura 4-3: Factores de importancia en el proceso operativo de un proyecto de recarga artificial

4.3 VIABILIDAD DEL PROYECTO

Entre los elementos esenciales que determinan la viabilidad de un proyecto de recarga artificial se deben considerar ciertos aspectos (Figura 4-4): 1) análisis de demandas y usos actuales y futuros, 2) análisis de elementos de regulación actual y futura, 3) evaluación de las hipótesis de gestión enfocadas al aumento de la regulación, al incremento de la garantía o a ambas conjuntamente y 4) aplicación de criterios y técnicas de utilización conjunta o gestión coordinada (Murillo Díaz y cols., 2000).

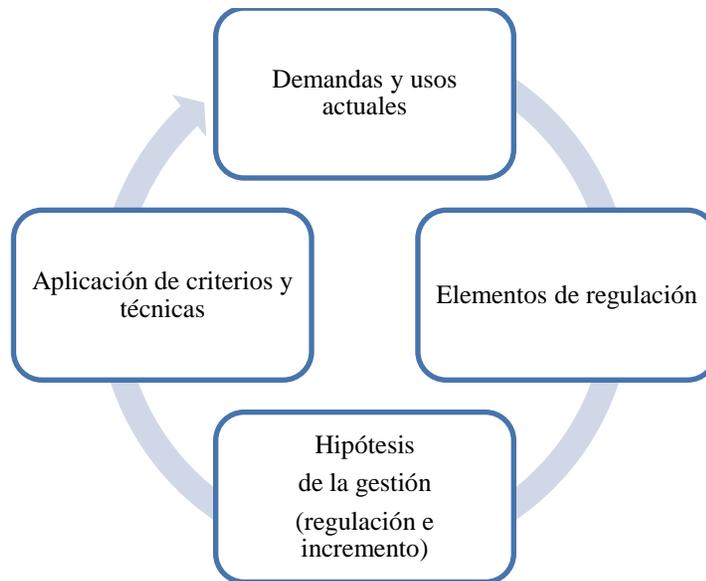


Figura 4-4: Consideraciones para la viabilidad de un proyecto de recarga (Murillo, 2000).

4.4 EXPERIENCIAS EN RECARGA ARTIFICIAL

Finlandia es el primer país europeo que comenzó a utilizar la recarga artificial a escala industrial mediante el sistema de recarga inducida. El porcentaje que la recarga artificial supone del total para abastecimiento urbano es de 9% y en caso de la recarga inducida es de otro 9%. Este país prevé un uso de esta técnica a un nivel cada vez más importante como apoyo al suministro urbano de poblaciones. Otro ejemplo es Suecia el cual puso en marcha desde 1995 un proyecto en el que se utiliza la técnica de la recarga artificial en un acuífero que constituye la principal fuente de abastecimiento a una ciudad. En el caso de Alemania, desde 1875 se ha recurrido a esta técnica para abastecimiento urbano, preservación de zonas húmedas, recuperación y restablecimiento de niveles piezométricos, mantenimiento hídrico de lagos, almacenamiento subterráneo de recursos hídricos e incluso desplazamiento de aguas subterráneas no deseadas por su mala calidad. Asimismo se está aplicando para compensar balances deficitarios en los acuíferos. Experiencias similares han ocurrido en Dinamarca donde el 99% del agua suministrada para consumo humano es de origen subterráneo, de ahí la importancia de la recarga artificial. Holanda en su caso tiene el problema de ríos de mala calidad además de que los acuíferos almacenan agua con alto contenido en sales. Por otro lado, tanto Estados Unidos de América como Australia han puesto en marcha proyectos de este tipo son encaminados a la industria o a la agricultura,

aunque las exigencias ambientales de la legislación en estos países son muy estrictas en cuanto a los parámetros de calidad de las aguas que se van a utilizar en la recarga. Y es así como en otros países como Hungría, Austria, Kuwait, Líbano, Israel, Omán o Egipto se ha alcanzado un desarrollo en la recarga artificial como una fuente futura de suministro de agua a poblaciones considerándose así en un sistema integral de gestión del agua (Murillo Díaz y cols., 2000).

4.4.1 Recarga artificial en México

La recarga artificial de agua subterránea ha sido usada en la zona de la Ciudad de México desde 1943 como un método para reducir las inundaciones, y esto todavía se aplica en la actualidad. Los primeros proyectos abarcaban la retención del desbordamiento y la ampliación de la superficie, la modificación de los canales y los pozos de infiltración. Muchos de estos proyectos se llevaron a cabo en el basalto altamente permeable de las zonas altas y lograron tasas de infiltración muy altas en los periodos de lluvias torrenciales. La recarga artificial usando pozos de inyección se desarrolló primero en el Distrito Federal alrededor de 1953. Se reportaron cifras de inyección de agua de 0.1 a 0.3 m³/s; sin embargo, la fuente o la calidad del agua de recarga no se midió en esos primeros proyectos, y la mitad de los pozos fueron cerrados después debido a problemas operacionales. En 1970 se perforaron alrededor de 56 pozos con el propósito de infiltrar el agua de lluvia. Estos pozos tenían la capacidad de manejar en conjunto hasta 35 m³/s de agua. Aunque los pozos no estaban diseñados para la recarga, el agua de lluvia llegó probablemente al acuífero. El Departamento del Distrito Federal está también desarrollando un sistema de represas en las laderas de la Magdalena Contreras, con el fin de recolectar el agua de lluvia y promover la infiltración natural (National Academy of Sciences, 1995).

Asimismo, el Proyecto Texcoco está llevando a cabo estudios sobre el reúso de manera indirecta del agua residual tratada (secundario y avanzado) recuperada a través de la recarga artificial del acuífero. El efluente final puede ser utilizado en represas de infiltración o pozos de inyección. En un programa separado llevado a cabo por el DDF, un estudio a nivel de planta piloto está inyectando agua que pasó del tratamiento avanzado directamente al acuífero a un ritmo de 0.05 m³/s. Se utilizan pozos de monitoreo para

detectar los cambios de la calidad del agua y de los niveles piezométricos (National Academy of Sciences, 1995).

El SACM planea la experimentación a nivel piloto con una producción de 20 l/s aplicar la potabilización con el Efluente de la PTAR Cerro de la Estrella, para inyectarla en la zona de Iztapalapa con la finalidad de iniciar la recarga del acuífero, mejorar las características del agua nativa y poder ser utilizada como fuente de suministro de agua potable después de la inyección artificial al acuífero. El tratamiento consta de los procesos de: Floculación, Filtración arena sílica, Ozonación, Adsorción, Osmosis inversa, desinfección con Radiación UV. Este mismo grupo buscó la demostración de la confiabilidad del proyecto con instalaciones para informar a la sociedad y buscar su aceptación. El proyecto de recarga de agua residual tratada de tipo directa tiene un costo aproximado de 1927 millones de pesos que incluye la planta de tratamiento, líneas de conducción, perforación, plantas de bombeo y otros estudios. Este costo no incluye los terrenos (SACM, 2009).

El SACM ha realizado diferentes estudios para determinar sitios adecuados para la infiltración de agua a través de pozos de absorción. Ha determinado zonas aptas para la recarga de los mantos acuíferos en la zona sur del distrito federal, en zonas que se encuentran urbanizadas y sin servicios de drenaje, en donde es viable realizar obras de captación, canalización y de pretratamiento para encausar el agua de lluvia hacia los pozos, existen 600 sitios propicios, de los cuales se cuenta con 135 estudiados. (SACM, 2009).

Una alternativa más para apoyo de la infiltración de agua al acuífero es:

La construcción de presas de gaviones y los Pozos de infiltración

Otro caso es la recarga artificial con agua residual tratada San Luis Río Colorado, Son. Las lagunas anaeróbicas y facultativas, están impermeabilizadas en el fondo y los taludes con telas de polipropileno, además los taludes tienen enrocamiento para evitar erosión y pérdidas por infiltración. Asimismo la recarga artificial en la Región Lagunera, Coah.-Dgo. Habilitación de dos embalses (sedimentación e infiltración) con superficie de 130,000m² y capacidad de 185,000m³ cada uno (Chavéz Guillén, 2011).

Un reporte reciente del Consejo Nacional de Investigación (National Research Council, 1994) concluye que la recarga artificial con aguas residuales municipales recuperadas “ofrece particularmente un potencial significativo para usos no potables”, y puede “...reducir la demanda de agua pura limitada con un riesgo mínimo para la salud.” Si se considera la recarga artificial para usos potables indirectos, los riesgos para la salud pueden ser mayores y la aceptación del público es más incierta. De cualquier manera, pero especialmente en la que considera el reuso como agua potable, se requiere una planeación y un estudio minucioso previo al proyecto (National Academy of Sciences, 1995).

En el eje del Programa de Sustentabilidad las obras por desarrollar (Espino de la O, 2011):

1. **Sustitución gradual de agua de primer uso** por agua residual tratada para riego agrícola dentro del Valle de México:
 - Unidad de saneamiento El Caracol, 2m³/s
 - Unidad de saneamiento Zumpango, 2 m³/s
 - Unidad de saneamiento Vaso El Cristo, 4 m³/s
2. **Recarga directa de acuíferos** del Valle de México con agua residual tratada:
 - Unidad de saneamiento El Caracol, 1 m³/s en 1^a etapa
3. **Reciclado del agua del acuífero** de Tula para suministro de agua potable:
 - Planta Atotonilco para sanear las aguas del Valle de Tula,
 - Proyecto Tula, por definir (5 m³/s en 1^a etapa)

4.5 SISTEMA DE RECARGA ARTIFICIAL “EL CARACOL”

En la cuenca de México, la principal fuente de *Recarga Natural* de sus acuíferos es la precipitación pluvial. Más sin embargo también recibe aportaciones derivadas de las fugas en la red de distribución de agua potable y drenaje.

En el siguiente apartado se analizarán cada uno de los elementos importantes para la *Recarga Artificial* tales como: acuífero receptor (Cuautitlán-Pachuca), agua de recarga, aspectos de legislación, destino final y evaluación económica.

4.5.1 Acuífero receptor

De acuerdo a Murillo y cols., en el 2000 describe que no todos los acuíferos son adecuados para realizar una recarga artificial. La efectividad de esta técnica está relacionada a las características hidrogeológicas, hidrodinámicas y de almacenamiento del acuífero receptor, así como al régimen de explotación al que se encuentra sometido.

En la tabla 4-3 se describen las principales unidades hidrogeológicas presentes en la Cuenca del valle de México tomado de UAM, 2009 y se evalúa la viabilidad de la posible recarga en cada una de las unidades en relación a su litología, características y porosidad.

En 2011 Cardona B. con el trabajo denominado “Estudios de campo para el análisis de la calidad del agua y modelo hidrogeoquímico del acuífero Cuautitlán –Pachuca, asociados a la recarga artificial con agua residual tratada, en la zona de el caracol, estado de México” hace una recomendación en base a los resultados del modelo hidrogeoquímico conceptual y las simulaciones realizadas, donde el ramal Reyes-Ecatepec dentro del **acuífero Cuautitlán-Pachuca** en la zona de El Caracol cuenta con las mejores condiciones para la inyección del agua residual tratada.

Se identificó una variación en los cationes que predominan en el agua subterránea de este acuífero, ya que para el año de 1995 aproximadamente en el 70 % de los casos no predominaba ningún catión, por lo que el agua se clasificó como mixta; en el 28% el sodio constituye el catión principal. En contraste, para el año de 2007 el porcentaje de agua que se capta en los pozos es tipo mixta es de alrededor del 40 % del agua; el porcentaje de agua en la que el sodio constituye el principal anión alcanza el 58%. Para este acuífero, el promedio de la concentración de sodio para el año 1995 resultó de 95 mg/l, incrementándose para el 2007 hasta 126.4 mg/l. En los principales ramales que se utilizan para el abastecimiento público urbano (Tizayuca-Pachuca, Teoloyucan, Reyes-FFCC y Reyes-Ecatepec), se presentaron valores relativamente elevados, por ejemplo, para el ramal Tizayuca-Pachuca se registraron 114.1 mg/l en los ramales Teoloyucan, Reyes-FFCC y Reyes-Ecatepec los valores son de 114.8 mg/l; 165.5 mg/l y 165 mg/l respectivamente; estos valores son sensiblemente menores a los identificados en años anteriores.

Tabla 4-3: Unidades hidrogeológicas en la Cuenca del Valle de México para evaluar la recarga artificial

Clasificación hidrogeológica	Litología	Características	Potencial p/recarga (Porosidad eficaz) Tasa de extracción
Acuitardo superior	Arcilla lacustre.	Antiguo lecho lacustre. Profundidad entre 5-40 metros. En proceso de compactación y agrietamiento por desecación. La infiltración puede tardar 100 años.	Baja (3%)
Acuífero superior: principal-fuente de agua subterránea en la Cuenca	Depósitos aluviales (del Cuaternario): aflora en los suelos agrícolas de la planicie y subyace la capa de arcilla ocupada por la zona urbana.	Compuesto de arenas y gravas, intercaladas con lavas y piedras arrojadas por las emisiones volcánicas. Flujo simple entre materiales granulares. Gran parte de los pozos metropolitanos extraen de esta unidad, la cual sufre de un severo abatimiento, excepto en la zona de las presas. El agua recargada en esta zona puede ser recuperada con relativa rapidez, con poca mineralización.	Alta (22%) Tasa de extracción: 30-60 lps Recarga local
	Vulcanitas del Cuaternario sierras Chichinautzin, Santa Catarina, y cerros como Chapultepec	Compuesto de piroclastos y lavas; permeabilidad por fracturas. Los pozos extraen del pie de monte bajo y la planicie aluvial. El agua recargada puede ser recuperada rápidamente, sin mineralización.	Muy alta (35%) Tasa de extracción: 50-140 lps Recarga local
	Formación Tarango Pie de monte de las sierras Nevada y Las Cruces	Depósitos en pendiente compuestos de pómez, lahares, cenizas, suelos, gravas, arena, al pie de las sierras. Flujo simple, entre materiales granulares. El agua recargada puede ser recuperada con relativa rapidez, con poca mineralización.	Alta (18%) Tasa de extracción: 12-30 lps Recarga local
	Rocas ígneas del Cuaternario sierras Nevada, Río Frío, Las Cruces	Transmiten agua hacia la planicie a través de fracturas. El agua recargada sólo es recuperada en décadas o siglos, con altos contenidos de minerales.	Muy alta (35%) Recarga regional
	Vulcanitas del Plioceno Sierra de Xochitepec y la base de Sierra de Guadalupe	Porosidad por fracturas. El agua recargada sólo es recuperada años después, con moderada mineralización.	Alta (30%) Recarga subregional
Acuitardo medio	Depósitos lacustres del Plioceno	Arcillas intercaladas con lavas; Espesor máx. 300 m; Por compresión, son más impermeables que arcillas superficiales.	Muy baja

A continuación se precisará información detallada y relativa a la descripción del acuífero receptor en la siguiente tabla 4-4:

Tabla 4-4: Descripción de los aspectos relativos al acuífero receptor

Información relativa al acuífero	Descripción
1. Litología y aspectos geológicos del acuífero	Área comprendida dentro de la Provincia Geológica de Eje Neovolcánico, la edad de las formaciones geológicas en esta porción de la Cuenca de México varía desde el Terciario Inferior (Eoceno) hasta el Reciente (CONAGUA (e), 2002). Las unidades permeables incluyen entre otras lavas basálticas y tobas del Cuaternario; así como depósitos de la Formación Tarango, además de basaltos del Terciario y Rocas ígneas ácidas del Mioceno e intermedias del Oligoceno que en conjunto afloran en las sierras de Pachuca, Monte Alto y Guadalupe.
2. Geometría	El acuífero cubre una superficie 2850 km ² . Las coordenadas del acuífero se describen en el Anexo (1)
3. Piezometría	El análisis piezométrico contempla el procesamiento e interpretación de los niveles estáticos (n.e.). El esquema piezométrico para 1991 mostraba que a en algunas zonas del valle el nivel se recupera con respecto a los años anteriores, mientras que en otras zonas el nivel se ve afectado: En la porción noreste el n.e. varía entre los 100 y 50 m, en la parte central varía entre los 100 y 120 m, mientras que en el extremo sur varía entre 65 y 120 m de profundidad. GRAVAMEX reporta una profundidad del n.e. de 109.22 m para el año de 1999 (CONAGUA (e), 2002). En 1996 la profundidad del n.e. en la ciudad de Pachuca fue de alrededor de 60 m y hacia el poblado de Tolcayuca de 130 m. En los poblados de Tizayuca y Cuautitlán se presentaron profundidades del n.e. de 65 y 70 m., respectivamente; mismos que, en el año de 2006, aumentaron alrededor de los 80 m, la profundidad del n.e. se mantiene en la ciudad de Pachuca, no así en Tolcayuca que se incrementa a 135 m (Cardona Benavides, 2011).
4. Hidroquímica y calidad del agua	Los resultados de hidrogeología se tomaron del estudio dirigido por Cardona Benavides en el 2011 e indica que la interacción del agua subterránea con lo materiales geológicos condiciona que el bicarbonato constituya en principal ion dominante en el 88% de las muestras de agua subterránea colectadas en los pozos ubicados en este acuífero (ver anexo 2). En la concentración de cationes ha mostrado variación, ya que para 1995 el 70 % de los casos no predominaba ningún catión, por lo que el agua se clasificó como mixta; en el 28% el sodio constituía el catión principal. En cambio, en el 2007 el agua que se capta en los pozos es tipo mixta en alrededor 40%; y el sodio constituye el principal anión alcanzando el 58%. El promedio de la concentración de sodio en 1995 era de 95 mg/l, incrementándose para 2007 hasta 126.4 mg/l. En los principales ramales que se utilizan para el abastecimiento público urbano (Tizayuca-Pachuca, Teoloyucan, Reyes-FFCC y Reyes-Ecatepec), se presentaron valores relativamente elevados. El ramal Tizayuca-Pachuca registró 114.1 mg/l, en los ramales Teoloyucan, Reyes-FFCC y Reyes-Ecatepec los valores son de 114.8 mg/l; 165.5 mg/l y 165 mg/l respectivamente; estos valores son sensiblemente menores a los identificados en años anteriores. Otro parámetro analizado fue STD

	que en el año 2007 se identificaron 5 sitios, 2 pozos en el ramal Reyes-Ecatepec y los 3 restantes en las inmediaciones del ramal Tizayuca-Pachuca que presentaron valores superiores al límite permisible en el agua para consumo humano. Por otro lado y en contraste con el sodio se han identificado incrementos de la concentración de cloruro el cual ha disminuido desde 1995 (94.2 mg/l) hasta el 2007 (84 mg/l).
5. Parámetros hidráulicos	<p>Transmisividad mide la cantidad de agua, por unidad de ancho, que puede ser transmitida horizontalmente a través del espesor saturado de un acuífero con un gradiente hidráulico igual a 1</p> <ul style="list-style-type: none"> • En rellenos lacustres fluctúan de 4864.32 y 7110.72 m²/día • Escoria basáltica 8873.28 m²/día <p>Conductividad hidráulica representa la facilidad con que el medio deja pasar el agua a través de él por unidad de área transversal a la dirección del flujo 8.64 x 10⁻⁴ m/día.</p> <p>Coefficiente de almacenamiento volumen de agua, por unidad de área y cambio en altura de agua, que una unidad permeable absorberá o liberará desde almacenamiento. Considerando un espesor de 140 m por la constante 3.3*10⁻⁶ el valor de coeficiente es 0.000462 (CONAGUA (e), 2002)</p>
6. Velocidad del agua subterránea y direcciones preferenciales de flujo	Las direcciones preferenciales de flujo en la parte centro-septentrional del sistema, son de NE-SW, con gradientes hidráulicos que varían entre 0.004 y 0.015; mientras que en la parte meridional, la dirección de flujo es SW-NE (de la sierra de Monte Alto hacia Cuautitlán) con un gradiente de 0.008 (CONAGUA (e), 2002).
7. Volúmenes disponibles en el acuífero	Las cifras siguientes están dadas en Millones de m ³ anuales (Diario oficial,2009)
	<p>Extracción: 751.3</p> <p>Recarga: 356.7</p> <p>Descarga natural comprometida: 0</p> <p>Volumen concesionado: 546.7</p> <p>Volumen de extracción consignado a estudio técnico: 751.3</p> <p>Disponibilidad media anual: 0</p> <p>Déficit: -189.9</p>
8. Zonas de drenaje o descarga natural	Debido a que es una cuenca cerrada no se estiman pérdidas por descargas naturales, ya que toda el agua que cae en ella se queda en forma natural en la misma zona y el volumen de extracción por manantiales es muy pequeño, por lo cual no se considera una descarga representativa para este análisis (CONAGUA (e), 2002).
9. Usos, demandas y consumos de agua.	El acuífero tiene el registro de 1697 pozos de los cuales la principal demanda es por el sector público-urbano con 836 pozos, mientras que el sector agrícola como la segunda demanda cuenta con un registro de 300 pozos.

4.5.2 Agua de recarga

Ante un proyecto de recarga artificial se cuenta con la premisa de disponer con un **volumen de agua excedente** en la zona, como por ejemplo el caudal de aguas residuales (24.555 m³/s) que capta el Sistema de Alcantarillado municipal del Estado de México (Gobierno de Ecatepec, 2009).

Los estudios relacionados indican que el origen del agua que se emplea en la recarga artificial puede provenir de distintas fuentes:

- Agua superficial continua o discontinua tomada directamente o con un cierto grado de tratamiento.
- Agua residual doméstica que, con un cierto grado de tratamiento, es posible reutilizar o mezclar con agua procedente de otra fuente.
- Agua procedente de otro acuífero. Generalmente se refiere a la drenada a través de manantiales.

Es indispensable la consideración en las características de calidad y variabilidad temporal en el agua de recarga, tomando en cuenta composición fisicoquímica, compuestos de nitrógeno y fósforo, compuestos orgánicos, metales pesados, bacteriología y virología así como elementos radiactivos. Se hace notar que en cuanto a la calidad química el agua de recarga debe ser compatible con el material del acuífero para evitar reacciones químicas que pueda reducir la porosidad efectiva y la capacidad de recarga. Asimismo sucede con la precipitación química y reacciones desfavorables de intercambio, así como la presencia de gases disueltos, los cuales son motivos de preocupación. Un ejemplo de ello son las reacciones de intercambio catiónico con el sodio en agua que implican la recarga ya que puede hacer que las partículas de arcilla se hinchen o se dispersan, disminuyendo así la tasa de infiltración o la permeabilidad del acuífero. Por otro lado, los gases disueltos pueden alterar el pH del acuífero o producir burbujas de gas que ocupen el espacio poroso y con ello disminuir la permeabilidad del acuífero; las sustancias tóxicas en exceso deben apegarse a las concentraciones de las normas sanitarias establecidas. Solo y si la recarga

artificial es con el propósito obtener agua para consumo humano, entonces la fuente de agua debe ajustarse a los estándares de agua potable (Central Ground Water Board , 2007).

El agua de recarga debe permanecer en el acuífero el tiempo suficiente para permitir su utilización posterior. Los aspectos que se deben analizar son los siguientes (Murillo Díaz y cols., 2000):

- Tiempo de almacenamiento en el acuífero.
- Grado de recuperación del agua recargada.
- Calidad obtenible

En relación a la importancia en la calidad química los parámetros recomendados por Cardona B. para el análisis de compatibilidad geoquímica en el proyecto de la recarga con aguas residuales tratadas en el sistema de recarga son los siguientes, tabla 4-5:

Tabla 4-5: Parámetros de control de calidad para la compatibilidad geoquímica en la recarga.

Parámetros	Tipos de Parámetros
Sodio Cloruros Sulfatos Sólidos Disueltos Totales	Parámetros de salinidad
Calcio Magnesio Bicarbonato (alcalinidad) pH	Parámetros de equilibrio de Carbonato mineral
Hierro Manganeso ORP/Eh Oxígeno Disuelto Redox couples (e.g., $\text{NO}_2^{-1}/\text{NO}_3^{-1}$)	Reacciones Redox minerales
Arsénico Uranio Molibdeno Níquel Zinc Cobalto	Metales Lixiviados
Sílice disuelta (H_2SiO_4) Potasio Flúor Bario Carbón orgánico Disuelto Coliformes totales y fecales	Silicatos minerales Y parámetros varios

En el proyecto de la PTAR “El Caracol” el **Instituto de Ingeniería** de la Universidad Nacional Autónoma de México diseñó, equipó y operó una planta de laboratorio que incluyó el proceso de tratamiento contemplado para la planta El Caracol cuyos objetivos fueron la remoción de la materia orgánica y los nutrientes (N y P), basado principalmente en el proceso BARDENPHO en cinco etapas (II-UNAM , 2010). Las etapas del sistema se observan en el siguiente esquema 4-5:

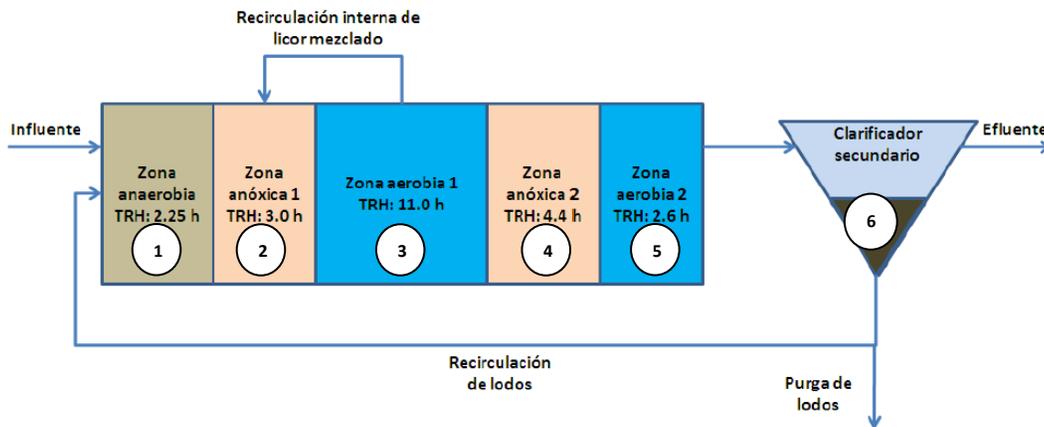


Figura 4-5: Sistema BARDENPHO propuesto por el Instituto de Ingeniería de la UNAM

El objetivo de cada una de las etapas en el sistema BARDENPHO se describen a continuación: la **etapa 1** se busca la eliminación de la materia orgánica y la liberación de fósforo al medio, posteriormente en las **etapas 2 y 4** ocurre la desnitrificación conocido como el proceso de eliminación del nitrógeno del agua residual; en las **fases 3 y 5** se realiza la asimilación del fósforo por las células y el proceso de nitrificación; por último en el sedimentador secundario se separa el lodo y el efluente tratado, además de la eliminación del fósforo del sistema (II-UNAM , 2010).

Una vez diseñado el sistema de tratamiento, se realizaron los muestreos de agua residual en la lumbrera No. 5 del Túnel emisor oriente, en el municipio de Ecatepec, Estado de México, esta agua fue sometida al sistema BARDENPHO y los resultados promedio para 152 días de experimentos se presentan en la tabla 4-6, haciendo notar que la última etapa para este análisis fue la correspondiente a la desinfección con luz ultravioleta:

Tabla 4-6: Resultados del sistema BANDENPHO correspondiente hasta el tratamiento avanzado.

Parámetros	Unidades		Sedimentador	Ozonador	Filtros	UV	Directa y superficial
DBO (total)	mg/L	SA	10.1			6.50	≤ 30
		CA	15.5			4.30	
DBO(soluble)	mg/L	SA	6.1				
		CA	15.2				
DQO (total)	mg O ₂ /L	SA	61.3			5.50	
		CA	55.1			4.86	
DQO (soluble)	mg O ₂ /L	SA	51.5	44.0	26.0		
		CA	42.7	40.6	29.7		
COT	mg/L	SA	44.0	38.0	< 10	< 10	≤1
		CA	110.0	30.0	< 10	< 10	
SST	mg/L	SA	41.1			12.00	
		CA	21.7			11.43	
SSV	mg/L	SA	34.0			8.00	
		CA	15.4			5.71	
SDT	mg/L	SA	1002.6			256.75	1000.0
		CA	1351.4			283.10	
Sólidos Sedimentables	mL/L	SA					
		CA					
Conductividad	mS/cm	SA	1590.7	1952.0	2033.0	450.00	
		CA	2002.8	2004.6	1902.4	435.34	
Fósforo Total (PO ₄ ⁻³)	mg/L	SA	23.18				
		CA	2.95				
Fósforo Soluble (PO ₄ ⁻³)	mg/L	SA	18.27			0.65	
		CA	3.20			0.14	
Fósforo Total (P-PO ₄)	mg/L	SA	7.78				
		CA	0.96				
Fósforo soluble (P-PO ₄)	mg/L	SA	5.96			0.21	
		CA	1.04			0.05	
NTK (Soluble)	mg/L	SA	16.26			3.90	
		CA	5.83			0.99	
N-NH ₄ ⁺	mg/L	SA	1.04				0.50
		CA	0.47			0.00	
N-NO ₃ ⁻	mg/L	SA	5.25				10
		CA	3.20			3.24	
pH		SA	8.08	8.50	8.37	7.70	6.5-8.5
		CA	8.29	8.44	8.26	7.88	
Alcalinidad	(mg CaCO ₃ /L)	SA	345.2				
		CA	700.6			178.3	
Temperatura	°C		21.5	21.5	22.9	23.4	

SO ₄	mg/L	SA	89.4			0.0	400
		CA	69.9			0.0	
ORP	mV	SA	40.3				
		CA	16.1	14.4	9.9	13.4	
Oxígeno Disuelto	mg/L	SA	2.7	7.9	6.2	6.8	
		CA	2.8	6.5	5.6	5.9	

Tabla 4-7: Resultado de metales de interés en el sistema BARDEPHO

Fecha: 23-5-11	Unidades	EFLUENTE			NOM-014-CONAGUA-2003
		Sedimentador secundario	Filtros	UV final	Directa y superficial
Bicarbonatos	mg/L	794	630	48	<10
Carbonatos	mg/L	ND	ND	ND	
Boro	mg/L	1.168	1.116	1.472	
Silicio Total	mg/L	44.8	37.8	4.9	
Sílice coloidal	mg/L	66.7	53.4	5.2	
Sílice reactiva	mg/L	29.1	27.7	5.3	
Silicio Soluble	mg/L	40.8	33.7	4.2	
Bario	mg/L	0.0377	ND	ND	0.70
Estroncio	mg/L	0.2911	0.2362	ND	
Níquel	mg/L	ND	ND	ND	
Zinc	mg/L	0.0488	0.0186	0.0983	5.0
Na	mg/L	318.95	323.46	34.23	200
K	mg/L	35.75	35.08	3.73	
Ca	mg/L	59.14	48.62	1.59	
Mg	mg/L	24.5	23.9	0.84	
Fluoruro	mg/L	0.327	0.264	< 0.050	1.50
Cloruro	mg/L	195.2	261.3	30.0	250
Bromuro	mg/L	18.29	39.79	15.60	
Sulfatos	mg/L	68.07	64.90	2.32	400
Fosfatos	mg/L	6.8	0.7	< 0.5	
Arsénico	mg/L	8.5	< 1.0	<1.0	0.025
Hierro	mg/L	< 0.5	0.14	0.13	0.30
Aluminio	mg/L	< 1.0	< 1.0	< 1.0	0.20
Manganeso	mg/L	< 0.5	< 0.5	< 0.5	0.15
Coliformes totales	NMP/100 mL	4600	430	ND	Remoción o inactivación
Coliformes fecales	NMP/100 mL	4600	230	ND	Remoción o inactivación
Redox couples	mV	41	71	79	

Con los resultados anteriormente mostrados, se demuestra entonces que el proceso propuesto por el II-UNAM es alentador para la obtención de un agua residual de calidad regular ya que muestra **Disminución:** en DBO, DQO, SST, SDT, conductividad, nitratos, fosfatos, alcalinidad, sulfato, sodio, potasio, calcio, magnesio, fluoruros, cloruros, una **Remoción:** de Carbonatos, bario, estroncio, níquel, coliformes totales y fecales, y que requiere **Ajuste:** en otros parámetros como COT, bromuros, arsénico, hierro, aluminio, manganeso. Se hace mención que el COT es uno de los principales parámetros de control para la Recarga artificial, pero que sin duda alguna se requieren de mayores pruebas y experimentos para cumplir con lo establecido por la norma.

4.5.3 Aspectos legislativos

En lo referente a México y en el marco legislativo, la **Ley de Agua Nacionales** en sus **artículos 7 y 91** que es de utilidad pública la protección, mejoramiento, conservación y restauración de acuíferos así como la infiltración natural o artificial de aguas para reabastecer los mantos acuíferos buscando el equilibrio hidrológico de las aguas superficiales y del subsuelo con acciones en zonas reglamentadas, las vedas, las reservas y las zonas para recarga artificial de acuíferos. Esto último, requiere de un permiso por la “autoridad del agua” además de ajustarse a las normas oficiales mexicanas que al efecto se emitan, en este caso la Norma-014-CONAGUA-2003.

En el estado de México particularmente en la **Ley del Agua para el Estado de México y municipios** el tema de recarga artificial se trata en los **artículos 89° y 90°** los cuales describen que la Comisión encargada y el Organismo Operador de Agua, están obligados a inyectar a los mantos acuíferos, el mayor volumen posible de agua residual tratada, de una calidad que satisfaga lo establecido por las normas oficiales mexicanas, en especial cuando los centros de población se abastezcan de agua potable proveniente de acuíferos sobreexplotados, asimismo los municipios cuyos centros de población se abastezcan de agua proveniente de estos acuíferos sobreexplotados, promoverán la participación de los sectores social y privado en la construcción de sistemas de tratamiento y la inyección de su efluente, previa certificación de su calidad de acuerdo con las normas oficiales en la

materia, estas hacen referencias a la NOM-014-CONAGUA-2003 y NOM-015-CONAGUA-2007.

4.5.3.1 NOM-014-CONAGUA-2003

En el 2008 se expidió la norma **NOM-014-CONAGUA-2003**, con el título Requisitos para la Recarga Artificial de Acuíferos con agua residual tratada en la cual se establece la calidad del agua, operación y monitoreo utilizados en los sistemas de recarga artificial.

La norma considera que el suelo y subsuelo funciona como una planta de tratamiento natural que puede ser aprovechada con una combinación adecuada de pre-tratamiento y pos tratamiento. Asimismo establece que las fuentes de recarga podrían ser las aguas meteóricas colectadas en instalaciones urbanas (agua de lluvia, nieve y granizo, siendo una agua blanda, poca cantidad de sales Ca y Mg), escurrimientos extraordinarios generados por lluvias torrenciales, agua superficial regulada en presas de almacenamiento o **aguas residuales de las zonas urbanas-industriales**.

Entre los criterios que establece la norma se describen los límites para microorganismos patógenos, tales como bacterias, virus, protozoos y helmintos; asimismo los contaminantes biológicos, físicos y químicos que se detallan en la modificación de la 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 un último requerimiento del tipo de contaminante se describe aquellos otros no regulados por la norma que es el caso de la demanda bioquímica de oxígeno para 5 días (DBO₅) y el *carbono orgánico total (COT), el cual corresponde al carbono orgánico disuelto y el carbono orgánico particulado (Tabla 4-8). Este parámetro es de suma importancia para el sistema de recarga de tipo directa ya que este puede reaccionar con el cloro utilizado en la desinfección y provocar con ello reducción en la eficacia bactericida o producción de compuestos organoclorados simples o complejos con un marcado carácter tóxico, mutagénico o cancerígeno.

Tabla 4-8: Parámetros de calidad exigidos por la NOM-014-CONAGUA-2003

Tipo de contaminante	Tipos de Sistemas de Recarga	
	Superficial/subsuperficial	Directo
Microorganismos patógenos	Remoción o inactivación de microorganismos entero patógenos.	Remoción o inactivación total de microorganismos entero patógenos.
Contaminantes regulados por Norma	Límites permisibles NOM-127-SSA1-1994	Límites permisibles NOM-127-SSA1-1994
Contaminantes <u>no</u> regulados por Norma	DBO ₅ ≤ 30 mg/l COT = 16 mg/l	*COT ≤ 1 mg/l

4.5.3.2 NOM-015-CONAGUA-2007

Otra norma con importancia en el sistema de recarga es la **NOM-015-CONAGUA-2007**, cuyo título es la “Infiltración artificial de agua a los acuíferos.- características y especificaciones de las obras y del agua”, en la que se manejan los objetivos de protección a la calidad del agua de los acuíferos y el aprovechamiento del agua pluvial y de escurrimientos superficiales para aumentar la disponibilidad de agua subterránea a través de la infiltración artificial.

Algunas de sus especificaciones consideran que las obras de infiltración respetarán lo dispuesto por las declaratorias de áreas naturales protegidas y sus programas de manejo, se caracterizará además el suelo en relación con la protección del agua subterránea y se asegurará que la zona no sea un predio contaminado y si fue clasificado así demostrar la remediación en conformidad por la Ley General para la prevención y gestión integral de los residuos y su reglamento. Por último, se destaca que la infiltración no deberá afectar la calidad del agua nativa y que las obras de disposición de aguas al subsuelo mediante pozos de infiltración, deben contar con un sistema de tratamiento que garantice que el agua en el punto de infiltración tendrá los límites establecidos para grasa y aceites, materia flotante, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, nitrógeno total, fósforo total y coliformes fecales.

Tabla 4-9: Parámetros de calidad exigidos por la NOM-015-CONAGUA-2007

Contaminante	Límite
Grasas y aceites	15 mg/L
Materia flotante	0
Sólidos sedimentables	2 mg/L
Sólidos suspendidos totales	150mg/L
Nitrógeno total	40 mg/L
Fósforo total	20mg/l
Coliformes fecales	No detectable

A nivel internacional la importancia de la recarga artificial ha generado el establecimiento de criterios de calidad estrictos países como E.U.A. Israel y España entre muchos otros, en el caso de este último, en el 2007 se dio a conocer el Real Decreto 1620/2007 el cual establece los criterios de calidad para la reutilización de aguas regeneradas o reutilizadas. En donde el uso del agua para la recarga artificial se clasifica en usos ambientales ya sea por método de percolación o por inyección directa, y los valores límites de mayor importancia son los recabados en la tabla 4-10:

Tabla 4-10: Valores permitidos para usos ambientales establecidos en España

Usos ambientales	Valores
1. Recarga de acuíferos por percolación localizada a través del terreno	<ul style="list-style-type: none"> • Nematodos intestinales - No se fija límite • <i>Escherichia coli</i> - 1.000 UFC /100 mL • Sólidos en suspensión - 35 mg/L • Turbidez – No se fija límite • NT: 10 mg N/L • NO₃: 25 mg NO₃/L
2. Recarga de acuíferos por inyección directa	<ul style="list-style-type: none"> • Nematodos intestinales - 1 huevo/10 L • <i>Escherichia coli</i> - 0 UFC /100 mL • Sólidos en suspensión - 10 mg/L • Turbidez - 2 UNT • NT: 10 mg N/L • NO₃: 25 mg NO₃/L

4.5.4 Destino final

En relación al área de influencia que contempla el Sistema de Recarga Artificial en la zona de El Caracol prevé que sea de manera directa e indirecta, el cual la primera considera un

abastecimiento de 600 000 habitantes, y en la forma indirecta de otros más 250 000 habitantes. Se hace notar que el área de influencia de esta técnica cubrirá los requerimientos demandados por usos públicos urbanos e industriales principalmente por el municipio de Ecatepec y algunas zonas del D.F. (Figura 4-6). Se considera además que el tiempo de servicio puede variar de tal manera que llegue a un tiempo indefinido hasta 120 años respectivamente (CONAGUA , 2011).

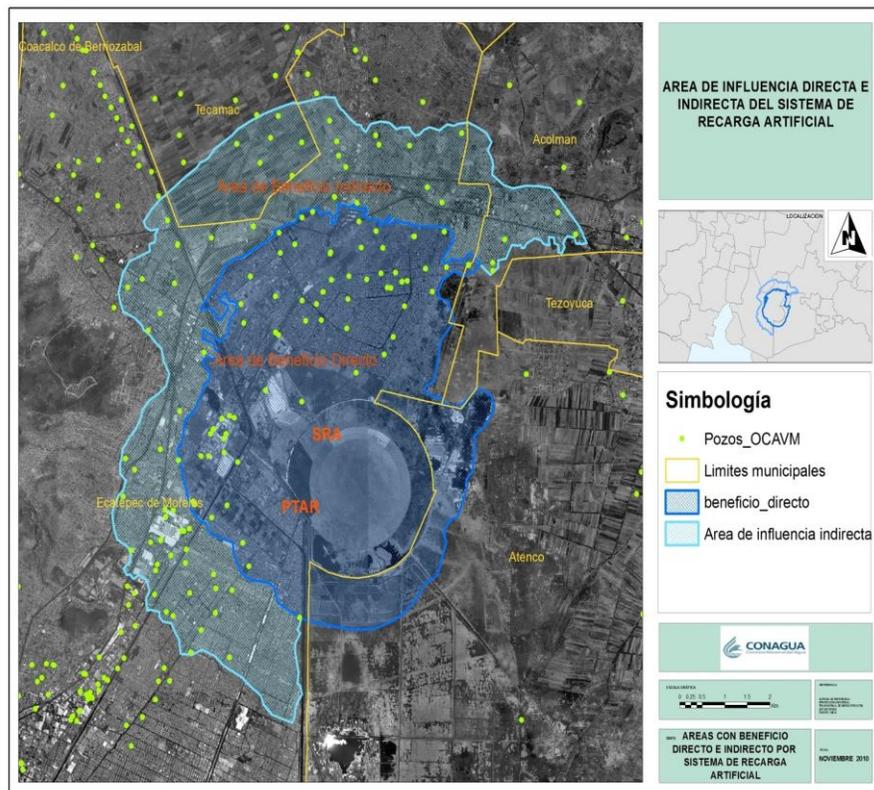


Figura 4-6: Área de influencia directa e indirecta del Sistema de Recarga Artificial en la zona de El Caracol.

4.5.5 Evaluación económica

Una de las primeras ideas que se asocia con la técnica de la recarga artificial es su elevado costo, pero este factor es relativo y debatible, ya que como lo manifiesta Murillo y cols. “la decisión de efectuar un proyecto de estas características no sólo depende de análisis estrictamente económicos, sino también de consideraciones sociales y ecológicas” (Murillo Díaz y cols., 2000).

La evaluación económica se determina por distintos procesos como ejemplo, el agua puesta en almacenamiento y el agua puesta de nuevo a disposición. Se asume además, el costo de otros procesos tales como la investigación hidrogeológica, agua a recargar, adquisición de los terrenos, instalaciones de pre-tratamiento, auxiliares, de recarga, control y seguimiento así como de explotación y conservación.

En el marco del Proyecto de Sustentabilidad Hídrica del Valle de México, en su primera etapa correspondiente al proyecto de recarga artificial en la zona de El Caracol, el costo estimado en el año 2008 oscilaba entre 1830 millones de pesos tal y como lo describe Espino de la O (Tabla 4-10):

Tabla 4-11: Costo estimado del Proyecto de Sustentabilidad Hídrica del Valle de México

Item		Costo estimado Millones de \$
Primera etapa	Modulo 1. Riego de zona de mitigación ambiental	518
	Modulo 2. Recarga de acuíferos	1830
Segunda etapa	Modulo 3. Riego agrícola	652
	Modulo 4. Reúsos industriales y comerciales	355
Suma		3355

Más sin embargo, en el año 2009 a través de la Coordinación de Proyectos del Valle de México y la Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento se dio a conocer que en el análisis de costos para las Plantas de Tratamiento Atotonilco y El Caracol, la inversión económica para esta última sería de **2123 millones de pesos**, en el esquema 4-7:

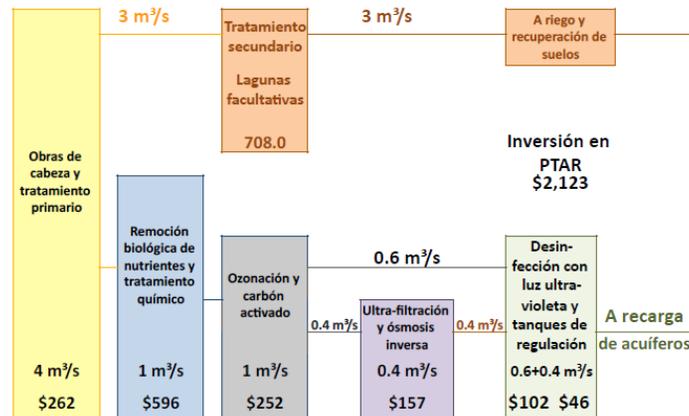


Figura 4-7: Inversión en la Planta de Tratamiento El Caracol con procesos avanzados para el año 2009

En el año 2007, según datos de la CONAGUA, el costo total en energéticos para el bombeo de agua potable en el área metropolitana de la Cuenca de México fue \$7.4 mil millones (\$20 millones/día), representando un costo más de 10 veces mayor al de 1993, por la misma cantidad de agua. Si continuara la misma tendencia de aumento, en el año 2021, el costo en energéticos por familia en la Cuenca será \$17 082 por año, para una dotación de 200 litros/habitante/día (UAM, 2009).

Separando el funcionamiento y aportación de agua por cada una de las fuentes abastecedoras, el **Sistema Cutzamala** con un caudal de $19 \text{ m}^3/\text{s}$ es aprovechado desde una altura de 1100 m lo cual requiere de 102 estaciones de bombeo, 17 túneles y 7.5 km de canales. En cuanto a los requerimientos de energía son aproximadamente 1787 millones de kWh al año y con costos de funcionamiento cercanos a \$128.5 millones/año (CONAGUA(b), 2010). En el caso del **Sistema PAI** el costo anual de operación para entregar un caudal promedio de $8.2 \text{ m}^3/\text{s}$ es de 682.6 millones de pesos de estos 77% corresponde a costos por energía eléctrica.

5. REUTILIZACIÓN DIRECTA

Entre las perspectivas futuras para la reutilización de aguas residuales se encuentra la reutilización directa (de tubería a tubería) como fuente de consumo humano, esto aún no está permitido actualmente, ya que la mayor preocupación se centra en los efectos de salud crónicos que pueden resultar de la ingestión de la mezcla de contaminantes inorgánicos y orgánicos que quedan en el agua, aún después de haber sido sometida a los más avanzados métodos de tratamiento. Se ha investigado en los Estados Unidos y en el resto del mundo a través de instalaciones experimentales, pero aún existen restricciones a nivel internacional, en España, por ejemplo, en el Reglamento de Dominio Público Hidráulico se declara que se “prohíbe la reutilización directa de las aguas residuales depuradas para el consumo humano, excepto en situaciones catastróficas o de emergencia” (Quiroga Alonso, 2011).

Si bien no se ha empleado aún este tipo de agua para la obtención de agua para el consumo humano, un proyecto llevado a cabo en **Denver, Colorado E.U.A.** estuvieron tratando 160 m³/h de un agua sin clorar, procedente de un tratamiento secundario, para conseguir un agua de calidad potable, la instalación ha estado en operación durante más de doce años y ha examinado la capacidad del proceso para producir sin interrupción agua de calidad potable; los principales objetivos marcados eran la seguridad del producto y la fiabilidad del proceso de tratamiento aplicado. En los últimos años de operación, se ha utilizado el siguiente proceso: Clarificación con cal a alto pH, recarbonatación, filtración, irradiación con rayos UV, adsorción con carbón activo, ósmosis inversa o ultrafiltración, desgasificación atmosférica, ozonización y cloración (Martín Mateo, 1996).

El estudio estuvo conformado por expertos científicos, ingenieros, políticos, economistas, sociólogos, abogados, doctores y representantes de la Administración. Las pruebas para los estudios de los efectos sobre salud, fueron desarrolladas durante varios años, se examinaron 19 parámetros generales, 8 radiológicos, 19 microbiológicos, 41 inorgánicos (más 36 indetectables) y 15 orgánicos con un total de 1487 test de orgánicos. Se combinaron los resultados de los estudios sobre animales, así como los derivados del programa completo de análisis del agua, para determinar la seguridad relativa del agua regenerada, comparada con

el agua destinada al consumo humano de Denver. De acuerdo con el informe final, los resultados indicaron que el agua regenerada alcanzaba una pureza mayor que la del agua del municipio y las pruebas de los efectos sobre la salud no dieron ningún efecto toxicológico o cancerígeno. Otro estudio en **Los Ángeles County** sobre los efectos en la salud por el uso del agua residual tratada, en cooperación con el Departamento de Estado para los Servicios de la Salud, concluye demostrando que el uso de esta agua no tiene impactos medibles adversos sobre la salud (Quiroga Alonso, 2011).

Otra caso de reutilización directa es en **Windhoek, Namibia África del Sur**, donde se han estado realizando durante 20 años estudios epidemiológicos, comparando poblaciones que bebían agua residual altamente tratada, con otras que lo hacían con agua procedente de suministros superficiales potables. Los resultados de estos estudios determino que no se han observado, estadísticamente, diferencias significativas entre ambos grupos, todos los análisis de enfermedades, organismos tóxicos y mutágenos han sido negativos, la población que bebía agua residual tratada tenía generalmente mejor salud que la otra, el tratamiento incluía procesos similares a los usados en otras partes del mundo: tratamiento secundario, coagulación, floculación, filtración, membranas, ozonización, cloración y estabilización con cal. Aunque la planta de recuperación de Windhoek demostró la viabilidad del reuso directo del agua residual como agua potable, el efecto a largo plazo de esta forma de reuso sigue en duda y por lo tanto representa una preocupación. Aún está por determinarse el efecto potencial que la exposición muy prolongada a los distintos químicos que se encuentran en las aguas residuales recuperadas puede tener en la salud. Otra gran preocupación es la posible presencia de restos orgánicos en el agua de desecho sin tratar, no detectados por las pruebas analíticas y que no puedan ser eliminados por las tecnologías actuales. Por estas razones (y tal vez por otras, como la falta de aceptación del público) la reutilización directa del agua residual como agua potable debe ser considerada con precaución y representar la opción menos deseable para resolver un problema de escasez de agua (Quiroga Alonso, 2011; National Academy of Sciences, 1995).

Los opositores a la idea de utilizar agua procedente del agua residual para beber, ignoran que ésta es una práctica común con los modernos sistemas de saneamiento. En E.U.A. un

tercio de la población bebe agua procedente de fuentes que han recibido agua residual tratada. El río Támesis del Reino Unido (la principal fuente de agua para la ciudad de Londres), contiene aproximadamente un 14% de agua residual tratada. El río Rhin, que sirve como fuente de agua para unos 6 millones de europeos, puede contener hasta un 40% de agua residual tratada (National Academy of Sciences, 1995).

El 1983 en **México**, el Departamento del Distrito Federal construyó dos plantas piloto para el tratamiento de agua, para estudiar el potencial del tratamiento avanzado de aguas residuales del efluente secundario para su reúso como agua potable, y para examinar su potencial para tratar agua subterránea contaminada. Con base en los resultados de las plantas piloto, se construyó otra instalación con el mismo propósito, con la capacidad de 0.3 m³/s, y diseñada tanto para tratar agua subterránea como para la reutilización potable directa. El objetivo del proyecto de reúso era mezclar el agua residual recuperada con agua subterránea tratada para añadirla directamente al sistema de distribución (National Academy of Sciences, 1995).

En las pasadas jornadas técnicas sobre la “Recarga Artificial de Acuíferos y Reúso de Agua” a cargo del Instituto de Ingeniería de la UNAM se dio a conocer por parte de la Comisión Estatal del Agua de Jalisco la posibilidad de que tras un tratamiento avanzado continúe un proceso tal, que permita obtener agua potable para abastecimiento. Este proceso propuesto se muestra en la siguiente figura 5-1:

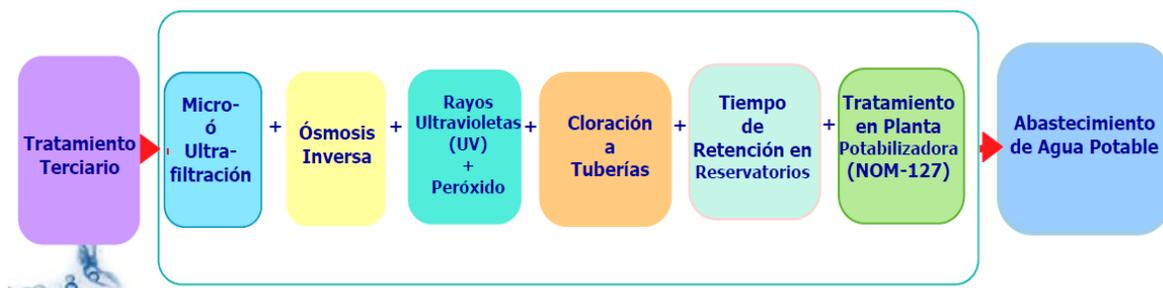


Figura 5-1: Proceso de reutilización propuesto por la CEA de Jalisco para obtención de agua potable

Las etapas del proceso señalado anteriormente cuenta con operaciones unitarias similares a los que a nivel internacional se han probado y establecido como adecuadas para casos de

reutilización directa, lo importante es no perder de vista igualmente la calidad de origen y la que se desea alcanzar para un fin en específico.

5.1 Factibilidad de reutilización directa: PTAR “El Caracol”

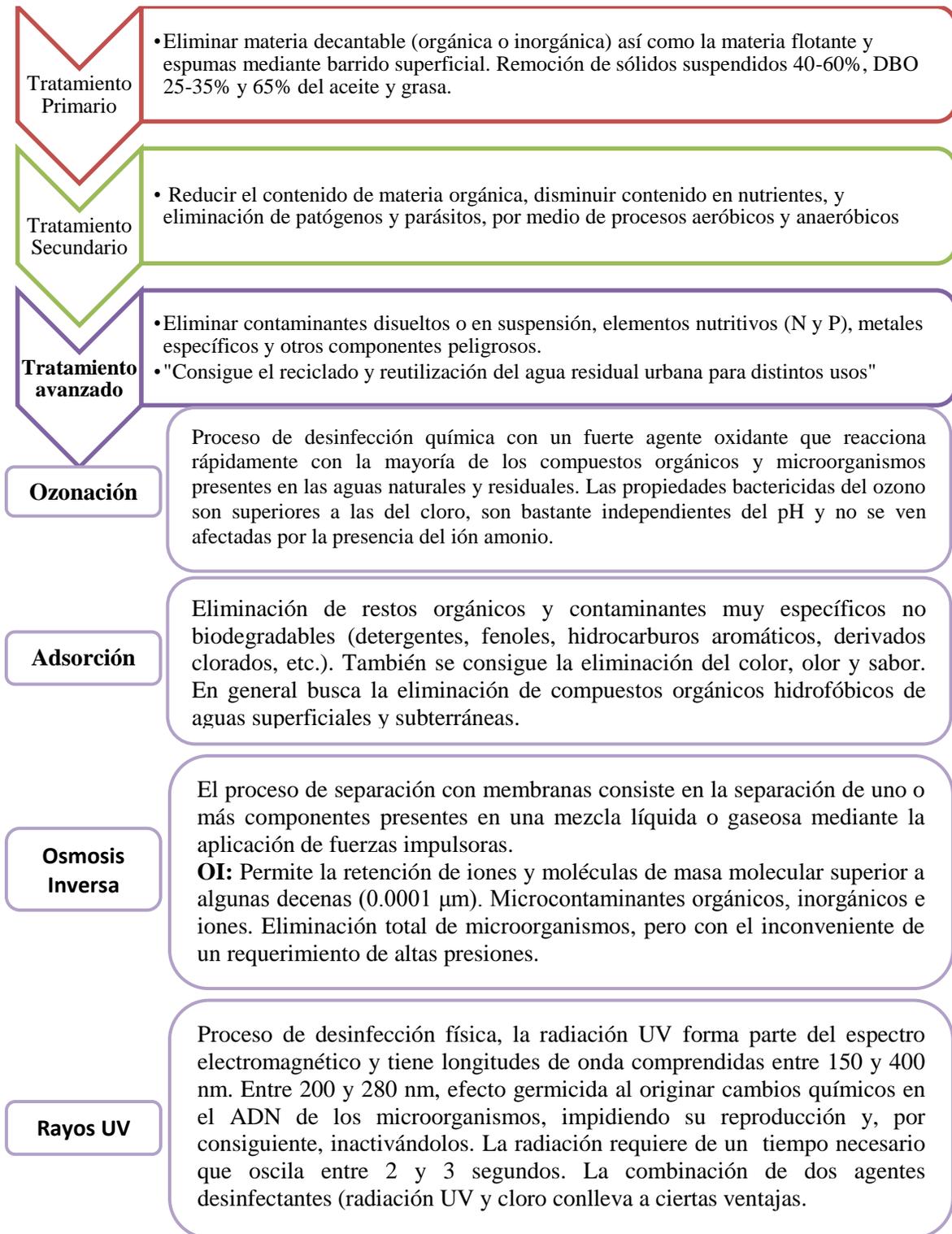
Dentro de la propuesta del presente estudio, se encuentra determinar la **Factibilidad de la Reutilización Directa del efluente de la planta de El Caracol**, por lo que se analizará cada una de las etapas del tratamiento avanzado (ozonación, adsorción, osmosis inversa y desinfección UV) las cuales se contempla para la PTAR; así como evaluar la calidad tentativa resultado de un primer análisis químico del efluente después del tratamiento terciario y los parámetros establecidos en la modificación de la norma **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 un inicio, se hace notar que para que un agua sea considerada como potable debe cumplir con ciertas características:

- **Físicas** tales como turbidez, color, olor, y sabor los cuales no deberán ser tan fuertes que molesten los sentidos de la vista, gusto u olfato del consumidor. En la normatividad mexicana se indica que la turbiedad no debe sobrepasar 5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN); para color 20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto y en el caso del sabor y olor debe ser “agradable”.
- **Químicas** el agua no debe contener impurezas en concentraciones peligrosas, ni ser excesivamente corrosiva, ni tener residuos excesivos de las sustancias que se emplearon en su tratamiento.
- **Microbiológicas** el agua para beber y cocinar debe liberarse de organismos patógenos, como virus, bacterias, protozoarios y helmintos.

Entendiendo la importancia de las características, se describe cada proceso del tratamiento en el siguiente esquema.

Tabla 5-1: Objetivos del tipo de tratamiento al cual son sometidas las aguas residuales



Y tal y como se mostro en el apartado anterior, los resultados del análisis químico del agua después del tratamiento terciario hasta alcanzar doble desinfección y filtración en membrana de Osmosis Inversa muestran una disminución de ciertos parámetros esenciales en el agua potable.

Tabla 5-2: Calidad de agua residual del Gran Canal después del tratamiento avanzado.

Parámetros	Unidades	Influyente	UV	NOM-127-	OMS 2006
DBO (total)	mg/L	56.5	6.50	≤ 30	
		62.2	4.30		
DBO(soluble)	mg/L	55.8			
		61.3			
DQO (total)	mg O ₂ /L	451.5	5.50		
		683.1	4.86		
DQO (soluble)	mg O ₂ /L	283.8			
		450.7			
COT	mg/L	212.0	< 10	≤ 1	
		405.0	< 10		
SST	mg/L	161.4	12.00		
		207.4	11.43		
SSV	mg/L	127.9	8.00		
		160.0	5.71		
SDT	mg/L	1135.5	256.75	1000.0	600 ^a 1000
		1630.4	283.10		
Sólidos Sedimentables	mL/L				
Conductividad	mS/cm	1816.1	450.00		
		2221.0	435.34		
Fósforo Total (PO ₄ ⁻³)	mg/L	28.48			
		32.80			
Fósforo Soluble (PO ₄ ⁻³)	mg/L	22.07	0.65		
		23.39	0.14		
Fósforo Total (P-PO ₄)	mg/L	9.51			
		10.69			
Fósforo soluble (P-PO ₄)	mg/L	7.20	0.21		
		7.62	0.05		
NTK (Soluble)	mg/L	44.48	3.90		
		40.43	0.99		
N-NH ₄ ⁺	mg/L	35.46		0.50	
		32.44	0.00		

N-NO₃⁻	mg/L	19.74		10	
		16.74	3.24		
pH		7.73	7.70	6.5-8.5	6.5 -9.5
		7.67	7.88		
Alcalinidad	(mg CaCO ₃ /L)	565.3			
		795.4	178.3		
Temperatura	°C	21.0	23.4		
SO₄	mg/L	101.7	0.0	400	
		73.8	0.0		
ORP	mV	33.6			
		15.1	13.4		
Oxígeno Disuelto	mg/L	0.2	6.8		
		0.2	5.9		

Fecha: 23-5-11	Unidades	UV final	NOM-127-SSA1-1994	Agua potable OMS
Bicarbonatos	mg/L	48	<10	
Carbonatos	mg/L	ND		
Boro	mg/L	1.472		0.5
Silicio Total	mg/L	4.9		
Sílice coloidal	mg/L	5.2		
Sílice reactiva	mg/L	5.3		
Silicio Soluble	mg/L	4.2		
Bario	mg/L	ND	0.70	0.7
Estroncio	mg/L	ND		
Níquel	mg/L	ND		0.07
Zinc	mg/L	0.0983	5.0	3.0
Na	mg/L	34.23	200	200
K	mg/L	3.73		
Ca	mg/L	1.59		100-300
Mg	mg/L	0.84		
Fluoruro	mg/L	< 0.050	1.50	1.5
Cloruro	mg/L	30.0	250	250
Bromuro	mg/L	15.60		
Sulfatos	mg/L	2.32	400	500
Fosfatos	mg/L	< 0.5		
Arsénico	mg/L	<1.0	0.025	0.01
Hierro	mg/L	0.13	0.30	0.30
Aluminio	mg/L	< 1.0	0.20	0.1
Manganeso	mg/L	< 0.5	0.15	0.4
Coliformes totales	NMP/100 mL	ND	Remoción o inactivación	Ausencia

Coliformes fecales	NMP/100 mL	ND	Remoción o inactivación	ausencia
Redox couples	mV	79		

Tal y como lo pronuncia la Organización Mundial de la Salud, “el riesgo para la salud más común y extendido asociado al agua de consumo es la contaminación microbiana, cuyas consecuencias son tales que su control debe ser siempre un objetivo de importancia primordial” (OMS, 2006). Mas sin embargo para casos especiales y como es el caso de este análisis no se debe dejar a un lado la toxicología de algunos metales o compuestos emergentes que se desconozca actualmente su efecto. Para ello, lo que resta comentar es que para el escenario de la reutilización directa es necesario asegurar la salud de las personas con investigaciones más detallada de la calidad de agua obtenida con este tipo de procesos, ya que la formación de compuestos ajenos al agua residual tratada podrían surgir una vez finalizado el tratamiento.

6. ESTRATEGIA Y DISCUSIÓN

Este capítulo centra la parte medular del estudio, ya que en base a la revisión bibliográfica y el trabajo de campo se hace una integración de la información que permite la formulación de propuestas para el manejo de las aguas en la zona (superficiales y subterráneas) y la evaluación en los distintos escenarios presentados para el agua residual tratada.

El análisis de los sistemas socio-ambientales y su relación con el sistema de decisiones para una Gestión Integral de los Recursos Hídricos en la zona, esquema 6-1, tal y como lo describe González Reynoso & Pliego Carrasco en el 2005 se basa en los aspectos siguientes, los cuales consideraremos en la visión general de la problemática del municipio:

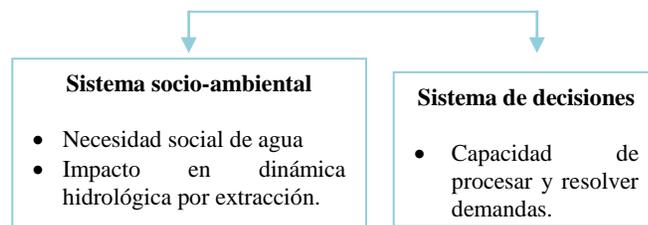


Figura 6-1: Sistemas socio-ambiental y el sistema de decisiones (Gonzalez R. 2005)

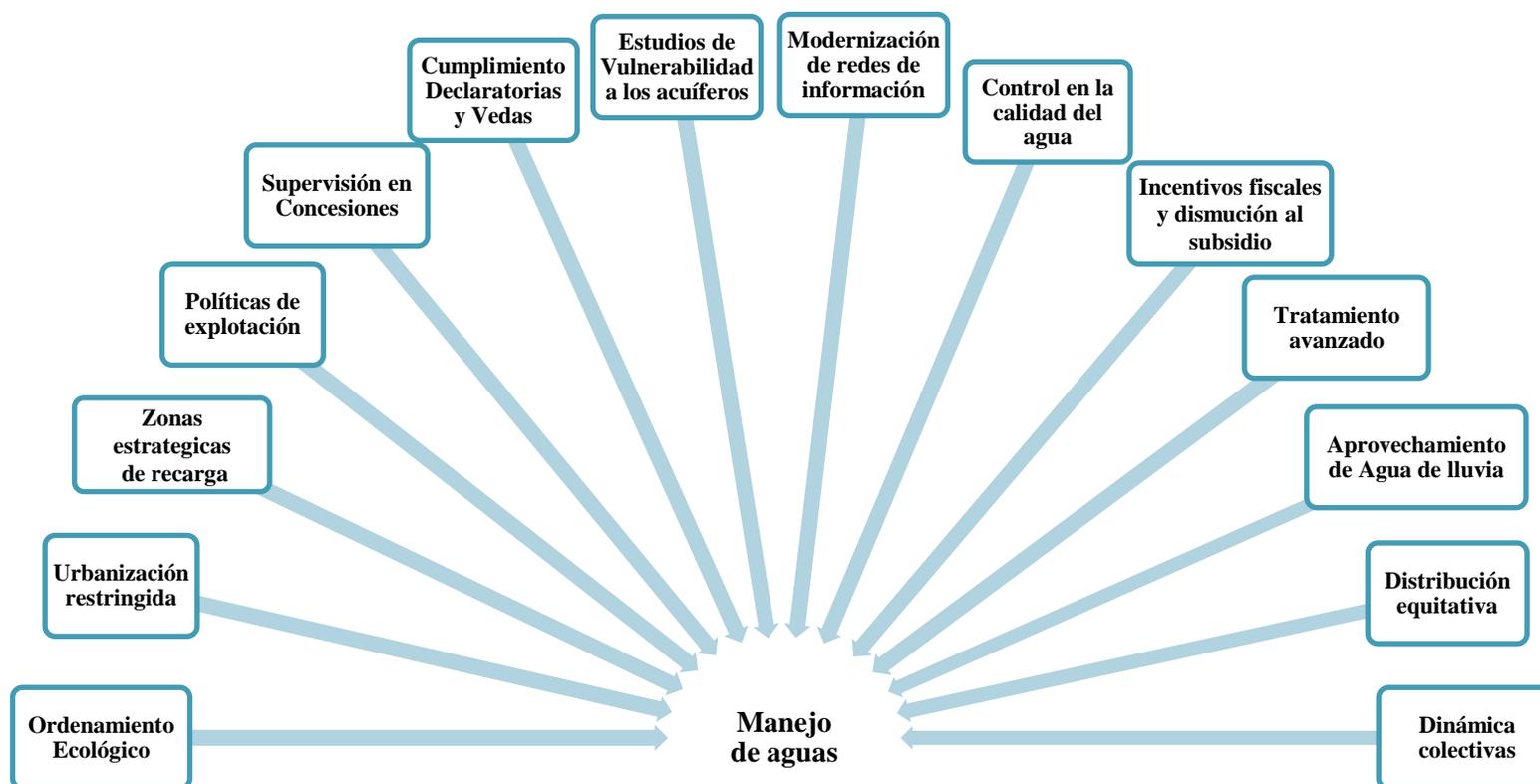
Una vez identificado en qué consisten los sistemas, se hizo la adaptación al modelo de la OCDE (Presión-Estado y Respuesta), que integra la información recopilada en cada uno de los capítulos antecesores. Figura 6-2.



Figura 6-2: Adaptación del Modelo Presión-Estado-Respuesta en la situación de la región de El Caracol.

6.1 Medidas en el manejo de agua

Tal y como se muestra en el modelo anterior, la problemática en la región hidrológico-administrativa XIII hizo necesaria la revisión detallada del manejo actual de los recursos hídricos, lo que conllevó a proponer medidas que permitan alcanzar en cierta manera la sustentabilidad hídrica, apegadas a la información bibliográfica y a los resultados obtenidos en el presente estudio.



El **Ordenamiento Ecológico** es considerado como un “instrumento de la política ambiental que regula las modalidades del uso del suelo y orienta el emplazamiento de las actividades productivas, en el marco de la política de desarrollo regional y a partir de procesos de planeación participativa” (INE, 2000), es así como la acelerada urbanización y la ocupación de zonas de conservación y áreas no aptas para el desarrollo urbano debe ser controlado en beneficio a los recursos naturales y a la calidad de vida de los pobladores de Ecatepec, llevando a consideración los aspectos de los sistemas productivos que favorezcan la mitigación en el impacto ambiental de la zona, en este caso, la influencia que ejerce el sector industrial en el ambiente no solo del municipio, influyendo además en el impacto regional.

Existe además la propuesta, de que la recarga intencional o artificial sea considerada en la ley como un término que se establezca como **Zonas estratégicas de recarga** las cuales podrían ser definidas como “superficie que permite la percolación natural ó intencional de aguas de lluvia, escurrimientos, ó aguas residuales tratadas, las cuales llegan a ser almacenadas en un acuífero sujeto a un decreto de veda u otra forma de reglamentación, debido a su condición de sobreexplotación” (UAM, 2009), debe entenderse que este es un primer acercamiento para la adecuación en las Leyes respectivas a la recarga artificial, referentes a la Ley de Aguas Nacionales, Ley General del Equilibrio Ecológico y Ley General del Asentamiento Humano, este último cuyo objetivo primordial es la regulación de la urbanización.

En lo que se refiere a las **políticas de explotación** se debe garantizar el cumplimiento de la Ley de Aguas Nacionales el cual designa a la federación como la entidad que controla la extracción y explotación de las aguas nacionales, y que será a través de títulos de concesión o asignación tal aprovechamiento. Además, las concesiones o asignaciones deberán tomar en consideración la disponibilidad media anual del recurso. Más sin embargo, las concesiones otorgadas en la zona, más específicamente en los acuíferos en estudio (ZMCM, Texcoco, Cuautitlán-Pachuca) no consideran esta disponibilidad ya que para el 2009 las cifras eran negativas. Otro instrumento legal que debe ser revisado y en dado caso, llevar a cabo su cumplimiento es el acorde a las **declaratorias y vedas**, es en el Registro Público de

Derechos de Agua (REPDA) donde se restringen las extracciones de agua en diversas zonas, con el fin de revertir la sobreexplotación de los acuíferos y cuencas del país. En relación a esto, desde 1927 se encuentre el registro de la declaratoria de veda de concesiones de aguas sobre el río Tula por tiempo indefinido el cual abarcaría toda la cuenca tributaria, dentro del estado de Hidalgo, incluyendo además lagos de Texcoco y Zumpango, el Gran Canal del Desagüe del Valle de México, río Cuautitlán, El Salado y demás afluentes del Río Tula. Asimismo en 1931 se da a conocer el decreto de veda por tiempo indefinido para el Río Lerma. Y en 1966 para el caso del Río Balsas por tiempo indefinido. En cuanto a las vedas subterráneas, desde 1949, 1965 y 1978 se impusieron decretos para la conservación de los mantos acuíferos en la superficie comprendida por los límites geopolíticos del Estado de México; en 1954 se estableció veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona conocida por Cuenca o Valle de México (CONAGUA , 2010).

Otro aspecto a considerar, es también la **transmisión de derechos en las concesiones** de forma total o parcial, en el 2008 se habían transmitido de su uso original a otro final, un volumen de 91 hm³. El uso industrial ha transferido casi el 40% del volumen total transmitido en la región; en segundo lugar se tiene al uso agrícola con un 33%; y finalmente el volumen transmitido a cargo del público-urbano fue de 9% del volumen total (CONAGUA , 2009). Esto lleva a sugerir la revisión en estas transferencias, ya que puede darse el caso, por ejemplo, que algún uso con título de concesión agrícola sea destinado finalmente para uso público-urbano y que esto derive en la construcción de fraccionamientos en zonas ejidales y favorezca la expansión territorial de una forma más desagregada. Esto queda en manifiesto en que según el Registro Público de Derechos al Agua, los volúmenes de agua concesionados con relación a los cuatro principales acuíferos de la Cuenca (59 m³/s), son tres veces mayores a la disponibilidad total (19 m³/s).

Por otro lado, el presente trabajo sugiere el impulso en los **estudios de vulnerabilidad** de los acuíferos, enfocados en “las características intrínsecas que determinan su susceptibilidad a ser adversamente afectado por una carga contaminante que cause cambios químicos, físicos o biológicos que estén por encima de las normas de utilización del agua”;

consisten en el uso de mapas que permiten evaluar la magnitud del riesgo de contaminación en diferentes sectores ante la presencia de actividades humanas el cual contribuirá en las estrategias de protección al agua subterránea. Las técnicas para desarrollar la cartografía de vulnerabilidad son diversas, una de las más conocidas es DRASTIC que involucra D: profundidad del nivel del agua; R: recarga neta; A: formación geológica que constituye el acuífero; S: cubierta edáfica bajo la superficie del terreno; T: pendiente del terreno; I: tipo de material geológico de la zona no saturada; y C: conductividad hidráulica del acuífero (Agua y SIG, 2011), estos parámetros ayudan a generar información para la toma de decisiones acordes a la protección del los acuíferos.

En cuanto a la **modernización de redes de información y el control de calidad de aguas**, existe en el país la Red Nacional de Monitoreo de Calidad del Agua el cual proporciona información del comportamiento en la calidad del agua de los cuerpos de agua superficial y subterránea, además de ser el encargado de vigilar el cumplimiento en la regulación de los contaminantes a través de los distintos componentes de monitoreo (red primaria, red secundaria) dando como resultado el sistema de información. Ante esto, se sugiere que la información de la calidad sea más detallada y se haga uso de los estudios especiales como estudios de gabinete. Ya que actualmente la importancia radica en los parámetros Demanda Bioquímica de Oxígeno y Demanda Química de Oxígeno que sólo brindan información acerca de la cantidad de materia biodegradable en el agua, y no del estado real y condiciones que enfrenta un cuerpo receptor, ante ello se sugiere la consideración de metales, análisis microbiológicos (aparte de coliformes), plaguicidas, contaminantes orgánicos persistentes y otros contaminantes emergentes, los cuales al ser considerados y establecidos legalmente para el monitoreo nacional, aseguraría un mayor apego y cumplimiento de las entidades generadoras de estos residuos y habría un control inmediato de las descargas residuales municipales y no municipales.

En el tema de los **incentivos fiscales** se destaca que en torno a la Política Hídrica Nacional y lo establecido por la Ley de Aguas Nacional (art. 14 Fracción XVII y XVIII) las personas físicas o morales que hagan un uso eficiente y limpio del agua se harán acreedores a incentivos económicos, incluyendo los de carácter fiscal. Asimismo, manifiesta que

aquellos que contaminen los recursos hídricos son responsables de restaurar su calidad, y se aplicará el principio de "quien contamina, paga". Y en el caso de los **subsidios** un gran problema que aqueja al sector hídrico son los apoyos que se le brindan a ciertos fines, un ejemplo, es el costo del agua de riego, el cual suele ser inferior al costo social, lo que ocasiona el desperdicio o en dado caso a las transferencias de concesiones. Influye además que no existe un control del caudal inicial y de retorno, y mucho menos en la calidad de estas aguas. Por lo que es necesario un cambio en el paradigma del abastecimiento de los sectores económicos del país, y pensar ahora en la tecnología necesaria para recuperar la calidad óptima en cada uno de los usos público-urbano, industrial y agrícola en función a la conservación y equilibrio de las aguas e impulsar la disminución del subsidio para sectores que no cuentan con el control deseado.

En relación al **aprovechamiento de agua de lluvia** aún no existe como tal una política pública encaminada para este fin y ha sido poco el aprovechamiento en la infiltración a los acuíferos. En cambio se ha concebido como un problema en temporadas de alta precipitación por los escurrimientos de gran caudal en zonas urbanas provocando con ello saturación en el drenaje e inundaciones que ocasionan la mezcla con las descargas residuales. Más sin embargo, las aguas de origen pluvial podrían contribuir en la mitigación del déficit que presenta el recurso en ciertas zonas. Existen proyectos en sistemas de captación de agua de lluvia que muestran resultados prometedores en el almacenamiento de esta agua que contribuiría en abastecimiento en temporadas de estiaje, esto a través de cisternas comunales o familiar, uso de materiales impermeables en los techos de las viviendas, etc. Además debe considerarse la implementación de infraestructura que haga la separación de esta agua y los desechos. Ya que esta en lugar de ser desalojada en la mezcla de aguas destinadas al norte del estado de México podrían ser usadas en la misma zona y aumentar la oferta del recurso.

Finalmente en las medidas del manejo, la **distribución equitativa y las dinámicas colectivas** se consideran aspectos medulares la gestión del agua. En el primer aspecto, la instalación de medidores en las tomas de agua es el régimen en el control del volumen usado que indirectamente con la aplicación de esta medida contribuiría en la conciencia en el consumo de agua por parte de los usuarios y crearía conformidad en el pago por el

servicio, asimismo favorecería la detección de tomas clandestinas y fugas. Esta medida debe ser extensiva a los tres sectores de demanda, ya que el sector agrícola durante años se ha beneficiado del aporte de enormes volúmenes sin saber con certeza cuál es el gasto real que llega a estas zonas. Por otro lado, el segundo aspecto, las dinámicas colectivas, entendidas en el contexto de la gobernanza o gobernabilidad, el cual se concibe como la “capacidad para lograr los consensos para el uso eficiente de un recurso”, lo que conllevaría a que el poder o las decisiones en materia de agua se desarrollen a cargo de los usuarios que son los que ejercerán la presión sobre el uso y distribución del recurso, involucrando así al gobierno y la sociedad (Álvarez Icaza, 2010). Entonces queda claro que es imprescindible la participación e involucramiento de la sociedad en los grupos u organismos para considerar los requerimientos que cada sector demanda, asumiendo además los usos y usuarios futuros que garanticen el cubrimiento de los factores exponenciales a largo plazo.

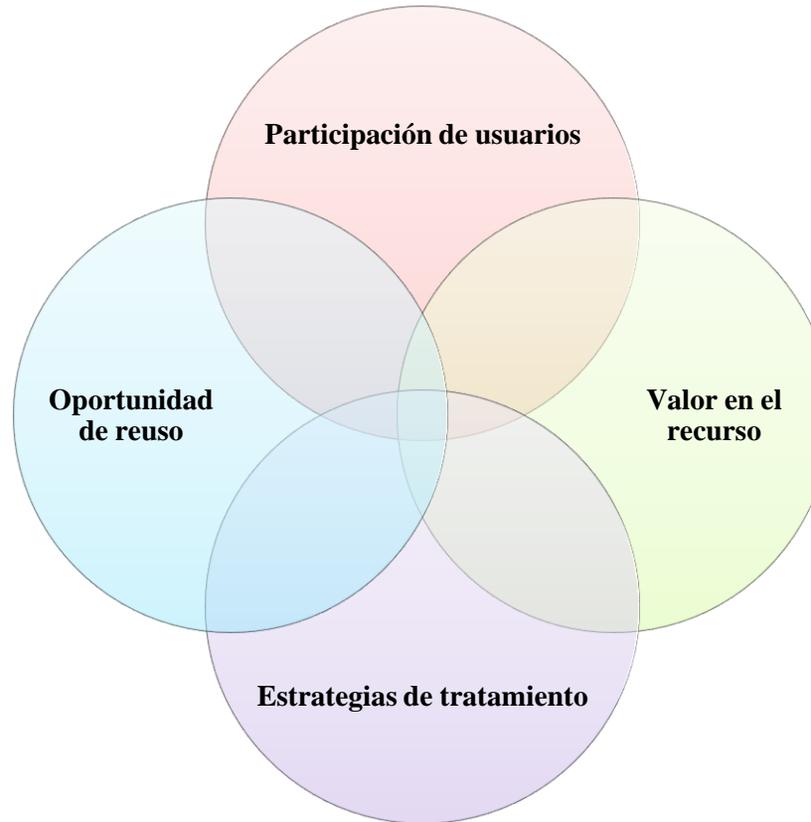
6.2 Estrategia de reutilización de aguas residuales

Una vez analizada cada una de las medidas para el manejo de las agua en la región, la estrategia propuesta en la reutilización de aguas residuales tratadas estará en función de cuatro aspectos importantes:

1. **Valor en el agua residual** que dependerá el cómo este recurso es incorporado en el ciclo del agua y considerado como un recurso valioso en lugar de ser visto como un producto de desecho.
2. **Estrategias de tratamiento** estas dependerán del destino deseado. Existen hoy en día alternativas de tratamiento que aseguran una calidad con apego a los más altos criterios y que conllevan un valor importante para ciertos fines.

1. Dinámicas colectivas
2. Información a la población
3. Cooperación e integración de organismos operadores, gobierno y sociedad.

1. **Agrícola** requiere un nivel de calidad inferior al de Recarga (tratamiento sencillo y menos costoso con alto rendimiento por los nutrientes presentes).
2. **Industrial:** reciclaje, agua para refrigeración, limpieza y otros procesos. Estímulos fiscales por descarga cero.
3. **Público-Urbano:** Reúso domestico, seguridad en contacto y áreas verdes. Y en la **Recarga de Acuíferos**



1. ART parte del Ciclo del reúso.
2. ART producto de calidad y no un desecho.
3. Forma de incremento en los recursos hídricos.

1. Las alternativas de tratamiento dependerán de la calidad requerida para el destino final.
2. El proceso elegido debe garantizar el equilibrio ambiental y de salud humana.

3. **Oportunidades de uso** dado que en la actualidad existen tecnologías suficientes para conseguir el grado de calidad de agua que deseemos, es preciso considerar a que aplicación concreta se quiere destinar el agua.

Uso agrícola: La utilización en el riego presenta la ventaja de exigir un nivel de calidad inferior que en agua potable, lo que con lleva un tratamiento más sencillo y menos costoso, además de un incremento en los rendimientos de los cultivos por los nutrientes que el agua lleva (ahorro en abonos). El agua residual tratada se puede aplicar al suelo de diferentes formas: por superficie, por subsuperficie, por goteo y por aspersores, siendo clave reducir al máximo la exposición de los trabajadores. En este sentido, el riego por goteo al estar el agua entubada proporciona una protección adicional en comparación con los sistemas de aspersión.

Uso industrial Las industrias necesitan suministro de agua la utilizan para los procesos de fabricación y para la refrigeración. En muchas industrias se necesita una significativa cantidad de agua para aportación a las torres del circuito cerrado de refrigeración. Al tratarse normalmente de un lazo cerrado, con sus requerimientos específicos de calidad de agua, su abastecimiento puede ser independiente de las necesidades del resto de la factoría.

Uso público-urbano Como se observo en el documento, no existe manifiesto que impida legalmente en nuestro país del uso directo del agua residual tratada, mas sin embargo esta debe garantizar la calidad de agua potable. Sin embargo, la reutilización indirecta como agua potable se practica en cierta medida con la inyección de esta agua a los acuíferos.

4. **Participación de usuarios** la aceptación del valor como recurso esencial para el equilibrio y fuente de abastecimiento lo dará la población con el total conocimiento e información de la tecnología disponible, la evaluación de los beneficios y desventajas que tiene el uso de esta agua residual tratada. Lo que lleva a un trabajo conjunto de instituciones, organismos operadores, académicos y sociedad entera.

7. CONCLUSIONES

El estado actual de las aguas del Valle de México requiere del control en la extracción de sus recursos subterráneos y la implementación de declaratorias de veda, zonas de protección y restricción de zonas que favorezcan la recarga natural para mitigar la presión ejercida en la región.

El saneamiento de los recursos hídricos es inminente y de prioridad para garantizar el equilibrio ambiental y salvaguarden la salud de los habitantes, ya que la exposición frecuente a aguas residuales sin tratar es un foco latente de infección o enfermedades que pueden causar en algún momento un problema de salud pública.

Los indicadores demográficos y económicos muestran que junto a las pérdidas de zonas de recarga han provocado un estrés hídrico que obliga a considerar fuentes alternas de abastecimiento como pueden ser el agua residual tratada, buscando así ubicarse como un producto de calidad y ya no más un desecho.

En base al presente estudio se concluye que de acuerdo a las alternativas tecnológicas y características de la región es factible la Reutilización de Aguas Residuales en la zona de El Caracol, Ecatepec de Morelos, más sin embargo, la complicación observada en este análisis es la fragmentación entre las leyes en relación hídrica y el ordenamiento que ha presentado esta zona metropolitana que impide una gestión más adecuada para los recursos hídricos.

Los proyectos en reutilización y fuentes alternas de agua deben contar con una integración entre instituciones gubernamentales, académicas, sectores productivos, representantes de la población en la que cada uno exponga la problemática presente, las demandas futuras y las alternativas de reúso en relación al agua (potable como no potable) para con ello lograr la sustentabilidad hídrica que sea amigable con el ambiente y cubras las demandas.

Considerando que la viabilidad de la Planta de Tratamiento El Caracol está en función de la calidad de agua tratada obtenida tras el tratamiento avanzado, se parte de que la disposición de esta agua está ligada a un control estricto del agua residual, desde su captación con una adecuada separación en el sistema de drenaje de aguas de origen urbano e industrial.

En relación a la Reutilización Indirecta y con base al cumplimiento en los aspectos legales, las características de calidad hidrogeología del acuífero Cuautitlán-Pachuca (Ramal-Reyes), la eficiencia en el tratamiento BARDEPHRO para la disminución y remoción de contaminantes en el agua a inyectar, hace que la Recarga artificial sea una técnica con amplios beneficios ambientales y sociales no solo para los habitantes de Ecatepec de Morelos, sino influenciando a más municipios de la ZM y cubriendo con ello los requerimientos en el sector público-urbano.

Por otro lado, en la Reutilización Directa el destino del agua residual tratada como fuente de agua de consumo humano, aún se encuentra en la etapa evaluativa por los posibles efectos nocivos en la salud. Sin embargo, la tecnología actual ha mostrado un futuro alentador y mientras que la Normatividad mexicana 127-SSA1-1994 referente a agua de consumo no estipule o restrinja el uso de agua residual tratada para el consumo, esta deberá cumplir con los límites más estrictos que ésta estipula así como aquellas normas acordes internacionales.

8. RECOMENDACIONES

En la planeación de proyectos de reutilización de aguas residuales se deben considerar los aspectos de captación y manejo de aguas residuales, control de la calidad en los cuerpos receptores, actividades económicas, legislación y estado actual de las aguas superficiales y subterráneas entre otras, para con ello llevar a cabo una estrategia integral en los recursos hídricos de la zona y asignar así la viabilidad de un proyecto de esta magnitud y analizar los posibles impactos benéficos o adversos en el medio.

Además es necesario e imprescindible continuar con la investigación y análisis de contaminantes ajenos a la normativa nacional de agua para consumo humano (NOM-127-SSA-1994) para descartar o contemplar contaminantes emergentes los cuales puedan afectar la salud humana y ambiental para así en un futuro cercano considerar al agua de origen residual como una alternativa de abastecimiento y mitigación a los problemas que hoy en día presenta la Región H-A XIII.

Finalmente los tomadores de decisiones enfrentan el dar prioridad a las acciones que propician la reducción de la demanda, esto a partir de un cambio en el enfoque de la gestión anterior basado en la intensiva explotación y proyectos de obras hidráulicas para cubrir la oferta hídrica, para con esto apoyar aún más la reutilización y el uso eficiente del agua.

9. BIBLIOGRAFIA

- Agua y SIG. (2011, febrero 13). *Determinación de la vulnerabilidad de un acuífero a través del método DRASTIC utilizando ArcGIS 9.3*. Retrieved junio 26, 2012, from Hidrología, ArcGis y agua subterránea: <http://www.aguaysig.com/2011/02/determinacion-de-la-vulnerabilidad-de.html>
- Álvarez Icaza P. (2010). *Dinámicas Colectivas en la Apropiación de las Aguas Subterráneas Manejo de Recursos de Uso Común*. México: Instituto Nacional de Ecología.
- Asano, T. (2002). Multiple Uses of Water:Reclamation and Reuse. *GAIA: Water and Efficiency* , 277-280.
- Asano, T., & Cotruvo, J. (2004). Groundwater recharge with reclaimed municipal wastewater: health and regulatory considerations. *Elsevier* , 1-11.
- Calderón Sosa, R. (2005). *Territorio, actores y gestión urbana del agua. El caso del municipio de Écatepec de Morelos, Estado de México*.
- Cardona Benavides, A. (2011). *Elaboración de los estudios de campo para el análisis de la calidad del agua y modelo hidrogeoquímico del acuífero Cuautitlán – Pachuca, asociados a la recarga artificial con agua residual tratada, en la zona de el caracol, Estado de México*. San Luis Potosí.
- CEA. (2011). *La Reutilización del Agua, la Alternativa de Hoy*. México: Comisión Estatal de Agua- Jornadas técnicas Recarga Artificial de acuíferos y reuso de agua.
- CENAVECE. (2009). *Centro Nacional de Vigilancia Epidemiológica y Control de Enfermedades*. Retrieved Diciembre 12, 2011, from Morbilidad de Enfermedades: <http://www.dgepi.salud.gob.mx/anuario/html/anuarios.html>
- Central Ground Water Board . (2007). *Manual on Artificial Recharge of Ground Water* . India: Ministry of water resources .
- Chavéz Guillén, R. (2011). La recarga artificial de acuíferos en México. *Jornadas técnicas. Instituto de Ingeniería de la UNAM* .
- CONAGUA. (2007, Noviembre). *Comisión Nacional del agua* . Retrieved Mayo 2012, from Los Consejos de Cuenca y sus Organizaciones Auxiliares de Cuenca: <http://www.conagua.gob.mx/ocavm/Espaniol/TmpContenido.aspx?id=7fdd8a5d-db3f-482b-a751-19ce9a935a20|Consejos de Cuenca|0|5|0|0|0>
- CONAGUA. (2009). *Estadísticas del Agua de la Región Hidrológico-Administrativa XIII, Aguas del Valle de México. Edición 2009*. México: CONAGUA.

- CONAGUA. (2010). *Estudios de disponibilidad, vedas y reservas*. Retrieved Junio 26, 2012, from Registro Público de Derechos de Agua (REPGA): <http://www.conagua.gob.mx/Contenido.aspx?n1=5&n2=37&n3=38>
- CONAGUA. (2011). *Tratamiento y reúso de aguas residuales Sistema de Recarga Artificial, El Caracol*. México : Coordinación de Proyectos Especiales del Valle de México. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento.
- CONAGUA (a). (2011). *Estadísticas del agua en México, edición 2011*. México, D.F.: SEMARNAT
- CONAGUA (b). (2010). *Factibilidad ambiental para la planta de tratamiento de aguas residuales El Caracol en Ecatepec, Estado de México*. México: CONAGUA.
- CONAGUA (c). (2010). *Estadísticas del Agua en México, edición 2010*. México, D.F.: SEMARNAT.
- CONAGUA (d). (2002). *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. México: SEMARNAT.
- CONAGUA (e). (2002). *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Cuautitlán-Pachuca, estados de México e Hidalgo*. México: SEMARNAT.
- CONAGUA. (2008). *Programa Nacional Hídrico 2007-2012*. México, D.F.: SEMARNAT.
- CONAPO. (2010). *Consejo Nacional de Población*. Retrieved Noviembre 13, 2011, from Indices de Marginación: http://www.conapo.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=478&Itemid=194
- Cotler H. (2004). *El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política en México*. México, D.F.: Instituto Nacional de Ecología.
- Dourojeanni A., J. A. (2002). Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica . *Programa agua, medio ambiente y sociedad* , 12.
- Escalante, V., Cardoso, L., Ramírez, E., Moeller, G., Mantilla, G., & Montecillos, J. (2003). *El reúso del agua residual tratada en México*.
- Espino de la O, E. (2011). *El PSHCVM y los programas de recarga artificial de acuíferos y reúso de agua* . México, D.F.: Jornadas técnicas sobre la Recarga artificial de acuíferos y reúso de agua .
- FAOWATER. (2010). *Unwater*. Retrieved abril 13, 2011, from Unwater: http://www.unwater.org/wwd10/downloads/WWD2010_LOWRES_BROCHURE_ES.pdf

- Foster, S., Garduño, H., Tuinhof, A., Kemper, K., & Nanni, M. (2002-2006). Recarga del Agua Subterránea con Aguas Residuales Urbanas evaluación y manejo de los riesgos y beneficios. *Sustainable Groundwater Management* , 1-6.
- Gaceta del Gobierno. (2002, Febrero 25). Plan parcial de desarrollo urbano Sosa-Textcoco, Ecatepec, Estado de México. *Gaceta del Gobierno* , pp. 1-52.
- Gaceta del Gobierno. (2010). *Acuerdo por el que se dan a conocer las cuotas y tarifas para el ejercicio fiscal de 2010*. Estado de México: Periódico Oficial del Gobierno del Estado Libre y Soberano de México.
- Galindo Castillo, E., Otazo Sánchez, E. M., Reyes Gutierrez, R., & Arellano Islas, S. (2009). BALANCE HÍDRICO EN EL ACUÍFERO CUAUTILAN–PACHUCA, MÉXICO: PROYECCIONES PARA 2021. *GeoFocus* , 65-90.
- Gobierno de Ecatepec. (2009, Diciembre). *Servicios de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas residuales*. Retrieved Octubre 18, 2011, from AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO: <http://www.ecatepec.gob.mx/transparencia/art15/servicios.php>
- Gobierno del Estado de México. (2009). *Cultura del Agua: Hacia un uso eficiente del recurso vital*. Estado de México: Consejo Editorial de la Administración Pública Estatal.
- González Reynoso, A., & Pliego Carrasco, F. (2005). Interdependencia y corresponsabilidad en el manejo de los sistemas socio-acuíferos de los valles de México y Toluca. *Programa Universitario de Medio Ambiente-Instituto de Investigaciones sociales* . México : Universidad Nacional Autónoma de México .
- Huizar Álvarez, R., Hernández Garcia, G., Angeles, G., & Ruiz, J. (2002). Respuesta química y de temperatura del agua subterránea extraída en el área de Textcoco. *Groundwater and Human development* , 813- 819.
- II-UNAM . (2010). *CONSTRUCCIÓN, ARRANQUE Y OPERACIÓN DE UNA PLANTA PILOTO DEL TREN DE TRATAMIENTO PROPUESTO PARA LA ELIMINACIÓN DE NUTRIENTES EN EL ANTEPROYECTO DE LA PTAR EL CARACOL*. Ciudad de México: Instituto de Ingeniería-Universidad Nacional Autónoma de México.
- INAFED. (2010). *Instituto para el Federalismo y el Desarrollo Municipal*. Retrieved agosto 30, 2011, from http://www.e-local.gob.mx/wb2/ELOCAL/EMM_mexico
- INE. (2000). *El ordenamiento ecológico del territorio* . México: Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca.
- INEGI. (2005). *Estadísticas del Medio Ambiente del Distrito Federal y Zona Metropolitana 2002*. México : Instituto Nacional de Estadística y Geografía .

- INEGI. (2010). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Retrieved Octubre 15, 2011, from Información nacional por entidad federativa y municipios: <http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?ent=15>
- INEGI. (2011). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía* . Retrieved Abril 27, 2012, from Información Nacional, por entidad federativa y municipios : <http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?e=15>
- Ley de Aguas Nacionales . (2008). *Artículo 3º*. México, D.F.: Diario Oficial de la Federación.
- Ley Federal de Derechos . (2007). *DISPOSICIONES APLICABLES EN MATERIA DE AGUAS NACIONALES*.
- Manahan, S. E. (2007). *Introducción a la Química Ambiental*. Barcelona, España: Reverté.
- Martín Mateo, R. (1996). SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS FUTURAS DE LA REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES COMO UNA FUENTE DE RECURSOS HIDRÁULICOS. *Ingeniería del Agua* , 68-78.
- Mujeriego Sahuquillo, R. (2010). Agua regenerada: un recurso fiable para promover la autosuficiencia. *Agbar* , 1-22.
- Mujeriego, R. (2005). *LA REUTILIZACIÓN PLANIFICADA DEL AGUA: Aspectos reglamentarios, sanitarios, técnicos y de gestión*. Retrieved mayo 30 , 2012, from Canagua : <http://www.canagua.com/es/pdf/reutilizacion.pdf>
- Murillo Díaz , J. M., Lopez Geta , J. A., & Rodríguez Hernandez , L. (2010). *Desarrollo sostenible, uso conjunto y gestión integral de recursos hídricos. Estudios y actuaciones realizadas en la provincia de Alicante*. Provincia de Alicante, España: Instituto Geológico y Minero de España.
- Murillo Díaz, J. M., Orden Gómez, J. A., Armayor Cachero, J. L., & Castaño Castaño, S. (2000). *RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS. SÍNTESIS METODOLÓGICA. ESTUDIOS Y ACTUACIONES REALIZADAS EN LA PROVINCIA DE ALICANTE*. Alicante, España: Diputación Provincial de Alicante.
- National Academy of Sciences. (1995). *Mexico City's Water Supply: Improving the Outlook for Sustainability*. Retrieved from Water Supply, Distribution, and Disposal : http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=4937&page=143
- Negrete Flores, R., Olvera Bernabe , M., & Ramirez Medina , V. (2002). Las políticas públicas del agua en el municipio de Ecatepec . *Las políticas públicas del agua en el municipio de Ecatepec* . Estado de México .
- OCWD. (2008). *Groundwater Recharge Operations*. Retrieved junio 1, 2012, from Orange County Water District : <http://www.ocwd.com/>

- OMS. (2006). *Guías para la calidad del agua potable [recurso electrónico]: incluye el primer apéndice. Vol. 1: Recomendaciones. Tercera edición.* Suiza: Organización Mundial de la Salud.
- Prats Rico, D. (2000). Reutilización de aguas residuales Calidad requerida y costes asociados. *Congreso Nacional de Desalación y Reutilización.* Murcia, España.
- Quiroga Alonso, J. (2011). *Aspectos Básicos en la Reutilización de las Aguas.* Cádiz, España: Departamento de Tecnologías del Medio Ambiente, Universidad de Cádiz.
- SACM. (2009). Sistema de agua de la ciudad de México. Recarga artificial de acuíferos a partir de agua de lluvia y residual potabilizada. Ciudad de México.
- Secretaría del Desarrollo Urbano. (2003). *Plan municipal de desarrollo urbano en Ecatepec.* Ecatepec de Morelos, Estado de México: Gobierno del Estado de México.
- Secretaría de Ecología. (2004). *Diagnóstico Ambiental Región III: Ecatepec.* México: Gobierno del Estado de México.
- UAM. (2009). *Repensar la Cuenca: La gestión de ciclos del agua en el Valle de México.* México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Villalvazo Peña, P., Corona Medina, J. P., & García Mora, S. (2002). Urbano-rural, constante búsqueda de fronteras conceptuales. *Datos, hechos y lugares. INEGI*, 17-24.
- Wilf, M. (2010). *The Guidebook to Membrana Technology for Wastewater Reclamation.* USA: Balaban.