



**Proyecto de Aprovechamiento y Manejo
Ambiental
de la laguna de Zumpango**

Informe Final



Proyecto de Aprovechamiento y Manejo Ambiental De la laguna de Zumpango

Informe final



CONAHCYT

CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



Agradecimientos

Agradecimiento especial a:

Jean Elaine Burns Stuck

Agradecimientos Gobierno del Estado de México

Delfina Gómez Álvarez
Gobernadora del Estado de México

Pedro Moctezuma Barragan
Secretario del Agua del Estado de México

Leonardo Daniel Amores Rovelo
Director General de Operación y Obras

Baldemar Mendez Antonio
Director de Planeación del Agua y Gestión Integral de Cuencas

Hector Cañada Jaime
Director de Gestión y Supervisión de Obras e Infraestructura

Omar Aurelio Peña Ruiz
Director del Sistema de Información Geográfica Integral

Luis Daniel Magadan Rovelo
Director de Corresponsabilidad y Políticas Hídricas de la Dirección General de Derecho Humano al Agua, Planeación y Ordenamiento.

Lic. Abril Karina Olivares del Río
Coordinadora de Oficinas Regionales

Asesores especiales de la Secretaría del Agua

Mariana Ramirez Acevedo
Ibhar Freddy Islas Vázquez
Edvin Edgardo Abarca Villatoro
Luis Sanchez Peregrina
Luis Fernando Orsini
Serafin González Ramirez
Deysi Lopez Luna
GPO Agroecología Chinampera Tezhuilo
Agustín Gutierrez Moreno
Diana Araceli Curiel Reséndiz
Alejandro Federico Alva Martínez
Juan Pablo Huesca Quintero
Mariana Ramírez Acevedo
María Fernanda Velázquez Romero

Agradecimientos Gobierno Ciudad de México

Clara Marina Brugada Molina
Jefa de Gobierno de la Ciudad de México

José Mario Esparza Hernández
Secretario de Gestión Integral del Agua

Humberto Adán Peña Fuentes
Dirección General de la Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural

Gabriela Osorio Hernández
alcaldesa de Tlalpan

Circe Camacho Bastida



Alcaldesa Xochimilco

Araceli Berenice Hernández Calderón

Alcaldesa Tlahuac

Julia Álvarez Icaza Ramírez

Secretaria del Medio Ambiente de la CDMX

Pedro Álvarez Icaza Longoria

Comisionado Nacional de Áreas Naturales Protegidas

Alejandro Encinas Rodríguez

titular de la Secretaría de Planeación y Ordenamiento Territorial y de Metrópolis

Edna Elena Vega Rangel

Secretaria de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano

Efraín Morales Lopez

Director General Comisión Nacional del Agua

Roberto Capuano

Plan Hídrico Área Metropolitana Cuenca de Mexico

Agradecimientos

Nodo Tláhuac

Abuela Elenita Gaspar

Tío Vicente Gaspar

Elsa Hernández Gaspar

Berta Hernández Gaspar

Concepción Hernández Gaspar

Alfonso Loreto

Alejandra García Hernández

Manuel Edday Farfán Beltrán

Oralia Ruíz Miranda

Nadia Martínez Pérez

Eduardo Romero Martínez

Isidra Ramírez Molina

Antelmo García Hernández

Víctor Galicia

Ramón Flores Galicia

Aurelio López Torres

Grupo de vigilancia de la ciénega

Canoero Rafael García Méndes

Sra Olga Martínez

Grupo de Yoga Raíz en Movimiento

La Milpa del abuelo

Nidia Torres Ruiz

Mayra Nieves

Instituto Tecnológico de Tláhuac

Cátedra UNESCO

Nodo Xochimilco

Carmen Citlali Hernandez Jimémez

Karen Citlali Xolalpa Morales.

Juana Sanchez Sanchez.

Carmen Ebromares Membrillo

David Jiménez Garces

Félix Venancio González

Gerardo Sánchez Trejo

Job Alejandro Fuentes Zamora

Alexander Galicia Ramirez

Jazmin Ordoñez Ávila

Bertha Alicia Águilar Hernández

Tomás Rufino Norato



Maria Teresa Flores Barrera

Macrina Dehesa Sánchez

Maria Lourdes Dehesa Sánchez

Thyani Torres Pelenco.

Amalia Salas Casales.

Amalia Rosas Salas.

Rosalinda Rosas Salas.

Sembrando Cultura Ambiental y

Chinampa Amanalli.

Caltongo Organizado.

Contraloria Puente de Urrutia.

Chinamperxs de San Gregorio.

Talleres de la Chinampa.

Grupo de distrito de Riego, Xochimilco.

Colectivo a Remover la tierra.

Colectivo Agroxolotl.

Nodo Centro

Amada Pérez Alvarez,

Jaqueline Valdéz Arzaluz,

Hugo Enrique González Figueroa Salinas

Diego Antonio Contreras Rodríguez

Nodo Lerma

Joel Osorio Gutiérrez

Evaristo Javier Gamboa Sánchez

Margarita Juana Jiménez Peñalosa

Enrique Carmona

Nodo Tula

Colectivo de Comunidades en Defensa

de la Vida y el Territorio de la Región

Tolteca

Rene Romero Rivera

Ollin Rodríguez de la Rosa

Monica Bibiana Rosas Luna

Reyna Aidee Mares Flores

Isolda Sansores Rodríguez

Nodo Zumpango

José Alfredo Vargas

Guillermo Leon Rodríguez

Comité de Agua Potable de San José la

Loma

Comité de Agua Potable de la Colonia

Santa Lucia

Daniel Vargas

José Ricardo Ovando Ramirez

Lizbeth Anabel Laguna Leal

Regina Monroy Bustamante

Lucia Quezada

Cristina Quezada

Universidad Autónoma del Estado de

México

Claudia Karina Hernández Laguna

Comité de Agua Potable de San Sebastián

Ma Florinda Trinidad Leal Barrera

Aram Adair Leon Leal

Alan Pérez Ortega

Sistema de Agua Potable de San Lucas

Xolox

Aide Vargas

Juanita María

Concepción Guerrero

Ivett Ramos

Maritza Alvarez

Zulema G Reyes



Sembradoras Melchor Ocampo
Eloi Pérez Vargas
Defensores de la Laguna de Axotlan

Nodo Texcoco-Acolhuacan

Teresa de Jesús González
Dra. Miriam Galán Reséndiz
M.C. David Delgado Viveros
Mtra. Saraí Salazar Arredondo
Dr. Jorge Adrián Flores Rangel
Pío Giovanni Chávez Segura
Prof. Santos Vázquez Cervantes
Profa. María De Lourdes Rodríguez
Ramírez
Prof. Edmundo Pérez Godínez
C. Emilio García Ramírez
Mtro. José Luis Rico Robert
Prof. José Cruz Rodríguez
Dr. Juan José Agustín Reyes Rodríguez
René Baños
Sr. Miguel
Renata Báez Romero
Lidia Florencio
Laura Velázquez Florencio
Moria del Toro y familia
Ernesto Sánchez
Arqueol. Luis Morett Alatorre
Arqueol. Guillermo Acosta
Filemón Rojas Ramos
Rodolfo Hernández Casarreal
Víctor Daniel Contreras y familia
Don Cecilo
Rafael Villanueva García
Nikté Segura

Dr. Eliseo Cantellano
Joel Veltrejo
María Isabel Garcés Chávez
Dra. Eloísa Domínguez
Profa. María Elena Rocha
Profa. Pilar Ortega Bastida
Uriel España
Juan Manuel García
Brenda Raya
Diego Cervantes
Aída Juárez Olivares
Salvador V. Banda
Juan Antonio Juárez Moreno
Ernesto Adolfo Rodríguez Álvarez
Paola Mijangos Contreras
Emanuel Ibarra Calzadilla
Red de Organizaciones Ciudadanas del
Acolhuacan
Comité Autónomo del Agua de Santa
Catarina Acolman
Comité del Agua Santa Cruz de Arriba
Comité de Agua Potable y Saneamiento
de San Nicolás Tlaminca
Comuna Axolotl
Proyecto Texcoco en el Tiempo
Proyecto “Espacio sobre la Enseñanza del
Reciclamiento de Aguas Residuales a
través de Humedales Artificiales en el
Barrio de Santiaguito”
Autoridades de la Comunidad, Delegación
y COPACI de Santiaguito
Proyecto Pronaii “Restauración
socioecológica del Acolhuacan” del
CONAHCYT y UACH



Patronato del Agua de Acolman
Red de Juventudes Teotihuacanas
Colectivo Ecolhua Texcoco
Departamento de Suelos de la Universidad
Autónoma Chapingo (UACH)
Departamento de Agroecología de la
UACH
Clase “Gestión y Sistemas de Manejo
Ambiental” de la Universidad Autónoma
Metropolitana-Cuajimalpa
Preparatoria Comunitaria Xochihuacan
Colectivo Todas y todos somos el Río
Coxcacoaco
Proyecto Pronaii 318971 “Fortalecimiento
y articulación de sujetos colectivos para
la defensa y gestión del agua en el
territorio” del CONAHCYT y Centro de
Estudios Mexicanos y Centroamericanos
GeoGráficas
Ethos Cartográfico
FES Zaragoza
Universidad del Bienestar Benito Juárez
campus Iztapalapa
Soneros del Acolhuacan
Taller de Arte Múltiple A.C.
Trajinera del Conocimiento
Frente de Pueblos en Defensa de la Tierra

Manos a la cuenca
Guardianes del Territorio
Comité de Acción para el Saneamiento
del Ambiente A.C.
Telesecundaria de Chiautla (ESTIC 55)
Colegio de Posgraduados
Muros de Agua
CONANP (Área de Protección de Recursos
Naturales Lago de Texcoco-APRN)
Escuela Telesecundaria Vicente
Rivapalacios.

Agradecimientos a los asesores

Equipo Jurídico

Arturo Valdez de la Cruz
Fabiola Vitte Torres
Oscar Arredondo

Equipo cartográfico

Juan Manuel García Reyes
Brenda Alejandra Raya Isidro

De registro y producción audiovisual:

Uriel López España
Juan Carlos Lazarini Ortega



Resumen

El **Proyecto de Aprovechamiento y Manejo Ambiental de la Laguna de Zumpango** pretende el reúso de agua tratada, a través de un buffer ambiental, para consumo humano. Este buffer comprende el uso de plantas de tratamiento de alta tecnología y el uso de humedales artificiales en las orillas de laguna de Zumpango. A su vez, el proyecto comprende el uso de la laguna como cuerpo de regulación de avenidas máximas durante la época de lluvias y el saneamiento de la misma.

El siguiente documento se divide en 5 capítulos:

En el capítulo I, se describe la problemática local desde la perspectiva de la comunidad y la vinculación del equipo técnico con los nodos sociales para el desarrollo de la propuesta conceptual, con el seguimiento y validación de la comunidad.

En el capítulo II, se resume el estudio hidrológico desarrollado para estimar el potencial de agua residual, para reúso, a través de la laguna de Zumpango y las avenidas de diseño para estimar las obras de control necesarias a nivel de ingeniería.

En el capítulo III, se describe la propuesta conceptual de humedales artificiales para el tratamiento de aguas tratadas y su posterior reúso a través de la laguna de Zumpango.

En el capítulo IV, se describe la propuesta tecnológica de dos plantas de tratamiento modulares para el reúso del agua residual a través de un buffer ambiental con los humedales artificiales y la laguna de Zumpango.

En el capítulo V, se desarrolla una evaluación geológica y geotécnica de la zona de estudio como base para el desarrollo de la ingeniería del proyecto.



Contenido

I. Componente Social	22
1.1 Nuestra relación con el agua en la Región Zumpango	22
1.2 Problemática Local.....	25
1.2.1 Déficit de agua.....	25
1.2.2 Crecimiento industrial.....	26
1.2.3 Contaminación.....	26
1.2.4 Drenaje.....	27
1.2.5 Desigualdad	27
1.3 Cómo el Cambio de Paradigma Soluciona la Problemática	27
1.4 Integración de Saberes Comunitarios en el Proyecto Conceptual.....	28
1.5 Visitas de Campo y Levantamiento Fotogramétrico	30
1.5.1 Fotogrametría.....	31
1.5.2 Laguna de Zumpango	32
II. Estudio Hidrológico.....	41
2.1 Esquema Hidrológico.....	41
2.2 Información Disponible	44
2.2.1 Información Hidrométrica	44
2.2.2 Información Climatológica.....	46
2.3 Caudal Disponible para Reúso	48
2.4 Avenidas de Diseño	52
2.5 Lluvias y Evaporaciones en la Laguna.....	56
III. Propuesta Conceptual de Humedales para el Reúso de Agua Tratada a través de la Laguna de Zumpango.....	59
3.1 Humedal Artificial	59
3.2 Elementos ingenieriles.....	60
3.3 Especies vegetales.....	62
3.4 Tipos de humedales.....	63
3.4.1 Humedales Flotantes	63
3.4.2 Humedales de tratamiento de flujo horizontal (FTWS).....	64
3.4.3 Sistema de Macrófitas Sumergidas.....	65
3.4.4 Humedal tipo francés o de Flujo Vertical.....	65
3.4.5 Humedal de tratamiento superficial de agua libre.....	66
3.5 Propuesta de Humedales para el lago de Zumpango	67



3.5.1	Humedales para el reúso de agua tratada.....	67
3.5.2	Humedales para el tratamiento de excedentes pluviales.....	69
3.5.1	Especies vegetales para los humedales	71
IV. Propuesta Conceptual de Tratamiento para el Reúso de Aguas Residuales a través de la Laguna de Zumpango.....		
75		
4.1	Descripción General.....	75
4.2	Propuesta Tecnológica.....	75
4.2.1	Esquema Modular de Tratamiento.....	75
4.2.2	Fases del Tratamiento.....	76
4.3	Estrategia de Selección de Tecnologías.....	79
4.4	Beneficios del Proyecto.....	79
V. Evaluación Geológica-Geotécnica.....		
81		
5.1	Marco Físico.....	81
5.1.1	Fisiografía.....	81
5.1.2	Geomorfología.....	83
5.1.3	Clima Regional.....	84
5.2	Marco Geológico.....	86
5.2.1	Geología Regional	86
5.2.2	Litoestratigrafía de la zona de estudio.....	91
5.2.3	Reconocimiento geológico local	92
5.2.4	Estratigrafía de la zona de estudio.....	94
5.3	Marco Geofísico.....	98
5.3.1	Información geofísica de la zona de estudio	98
5.3.2	Interpretación estratigráfica.....	99
5.3.3	Líneas de calicatas.....	100
5.4	Marco Geotécnico.....	102
5.4.1	Regiones Sísmicas en México.....	102
5.4.2	Registro sísmico en la zona de estudio	103
5.4.3	Información geotécnicas en la zona de estudio	105
5.4.4	Diseño sísmico.....	107
5.5	Diagnóstico.....	111
Conclusión.....		113
Referencias.....		114



Índice de figuras.

Figura 1 Lago de Zumpango, detalle de mapa de Upsala c.a. 1550.....	22
Figura 2 Flujo de trabajo para el desarrollo de los proyectos conceptuales.....	29
Figura 3. Reuniones de trabajo del equipo técnico y social con las comunidades.....	30
Figura 4. Personal del equipo técnico realizando Vuelos con Dron en la laguna de Zumpango.....	32
Figura 5. Recorrido a la Laguna de Zumpango.....	32
Figura 6. Vista hacia el interior de la Laguna de Zumpango en tiempos de total desecación, al fondo el cerro de Zitlaltepec.....	33
Figura 7. Vista hacia el interior de la Laguna de Zumpango en tiempos de total desecación, en paralelo al Gran Canal por el lado oriente de la laguna.....	33
Figura 8. Vista aérea del vertedor de excedencias.....	34
Figura 9 Vista tridimensional a partir de nube de puntos del vertedor de excedencias.	34
Figura 10 Modelo de elevación a partir de nube de puntos del vertedor de excedencias.	35
Figura 11. Vista en planta de la descarga del Canal Santo Tomás a la laguna de Zumpango.....	35
Figura 12. Vista tridimensional a partir de nube de puntos del Canal Santo Tomás ingresando a la laguna de Zumpango.....	36
Figura 13. Vista en planta del canal de desfogue en el lado norte de la laguna.....	36
Figura 14. Vista en planta de la descarga del vertedor de excedencias en el canal de desfogue.....	37
Figura 15. Vista tridimensional a partir de nube de puntos en Gran Canal.....	37
Figura 16. Modelo de elevación a partir de nube de puntos para la modelación de Gran canal.....	38
Figura 17. Vista en planta de la descarga del río de las Avenidas de Pachuca en el Gran Canal.....	39
Figura 18. Descarga del canal Santo Tomas en la laguna de Zumpango.....	41



Figura 19. Derivación del río Cuautitlán hacia la laguna de Zumpango por el canal Santo Tomas..... 41

Figura 20. Descarga de la laguna de Zumpango al nuevo Túnel de Tequixquiác. 42

Figura 21. Principal infraestructura de drenaje actual alrededor de la laguna de Zumpango..... 42

Figura 22. Diagrama de flujos actual alrededor de la Laguna de Zumpango. 43

Figura 23. Escurrimientos medios diarios registrados en la estación B26165..... 45

Figura 24. Escurrimientos medios diarios registrados en la estación B26346..... 45

Figura 25. Escurrimientos medios diarios registrados en las estaciones B26313 y K27MX. 45

Figura 26. Escurrimientos medios diarios registrados en la estación B26216..... 46

Figura 27. Escurrimientos medios diarios registrados en las estaciones B26007 y TTQMX. 46

Figura 28. Lluvias diarias registradas en la estación C15151..... 47

Figura 29. Evaporaciones diarias registradas en la estación C15151..... 47

Figura 30. Lluvias diarias estimadas por POWER-NASA en la coordenada -99.25 y 19.75. 48

Figura 31. Temperaturas medias diarias estimadas por POWER-NASA en la coordenada -99.25 y 19.75..... 48

Figura 32. Escurrimientos medios diarios en el río Cuautitlán antes de la derivación al canal Santo Tomas..... 50

Figura 33. Escurrimientos medios diarios en el Gran Canal a la altura de la laguna de Zumpango..... 51

Figura 34. Distribución de probabilidad de volúmenes de escorrentía directa en el río Cuautitlán antes de la derivación al canal Santo Tomas..... 53

Figura 35. Distribución de probabilidad de volúmenes de escorrentía directa en Gran Canal a la altura de la laguna de Zumpango..... 54



Figura 36. Hidrograma adimensional de esorrentía directa en el rio Cuautitlán antes de la derivación al canal Santo Tomas.....	55
Figura 37. Hidrograma adimensional de esorrentía directa en el Gran Canal a la altura de la laguna de Zumpango.....	55
Figura 38. Lluvias medias mensuales en la laguna de Zumpango.....	56
Figura 39. Evaporaciones medias mensuales en la laguna de Zumpango.....	57
Figura 40. Corte esquemático humedal flotante, componentes del humedal.....	63
Figura 41. Ejemplo de Islas flotantes en el Parque Ecológico de Xochimilco, Ciudad de México.....	64
Figura 42. Corte esquemático humedal flujo horizontal, componentes del humedal.....	64
Figura 43. Corte esquemático humedal de macrófitas sumergidas, componentes del humedal.....	65
Figura 44. Corte esquemático humedal flujo vertical, componentes del humedal.....	66
Figura 45. Corte esquemático humedal flujo superficial, componentes del humedal.....	66
Figura 46. Ubicación propuesta para los humedales dentro del Lago de Zumpango, Estado de México.....	67
Figura 47. Secciones del humedal 1 para Lago de Zumpango.....	68
Figura 48. Secciones del humedal 2 para Lago de Zumpango.....	68
Figura 49. Ubicación propuesta para los cuerpos de agua.....	69
Figura 50. Ubicación propuesta para el tercer humedal.....	70
Figura 51. Sedimentador Vórtice Nautilus Pond, Canada, Soluciones Hidropluviales/ Source2Source.....	70
Figura 52. Phragmites australis.....	71
Figura 53. Typha latifolia.....	71
Figura 54. Sagittaria macrophylla.....	72
Figura 55. Elodea sp.....	72
Figura 56. Ceratophyllum demersum.....	72
Figura 57. Najas minor.....	72



Figura 58. Nymphaea sp.....	72
Figura 59. Pistia stratiotes.....	73
Figura 60. Eichhornia crassipes.....	73
Figura 61. Lemna minor.....	73
Figura 62. Diagrama 1: Proceso General.....	77
Figura 63. Diagrama 2: Sistemas de Monitoreo.....	78
Figura 64. Diagrama 3: Flujos de Energía y Residuos.....	78
Figura 65. Localización y distribución de la provincia fisiografica Eje Neovolcanico.....	82
Figura 66. Localización morfológica regional de la zona de estudio.....	84
Figura 67. Localización y extensión de climas en la zona.....	85
Figura 68. Carta Hidrológica de la República Mexicana.....	86
Figura 69. Geología regional.....	89
Figura 70. Suelos residuales en la zoma de estudio.....	93
Figura 71. Estratigrafía presente en excavación en la zona de estudio.....	94
Figura 72. Localización de lumbreras del TEO cercanas a la laguna de Zumpango.....	95
Figura 73. Sección estratigráfica lumbreras L13, L14, L15 y L16 TEO.....	95
Figura 74. Columna estratigráfica somera en la localidad de San Juan Zitlaltepec.....	97
Figura 75. Sección de Resistividad Aparente.....	98
Figura 76. Sección de Calicateo Geo-eléctrico en La Providencia.....	101
Figura 77. Zonas Sísmicas de México.....	102
Figura 78. Localización de epicentros de sismos en la zona de estudio.....	104
Figura 79. Secuencia estratigráfica en la Providencia.....	105
Figura 80. Aceleración a nivel del terreno.....	108



Índice de cuadros

Cuadro 1. Información hidrométrica utilizada en el estudio.....	44
Cuadro 2. Información climatológica utilizada en el estudio.....	47
Cuadro 3. Caudal disponible para reúso a través de la laguna de Zumpango.....	49
Cuadro 4. Características del flujo hasta la laguna de Zumpango.....	52
Cuadro 5. Funciones de distribución de probabilidad utilizadas para estimar los volúmenes de escorrentía directa máximos anuales.....	53
Cuadro 6. Gastos máximos anuales de escorrentía directa.....	54
Cuadro 7. Lluvia y evaporación media anual en laguna de Zumpango.....	56
Cuadro 8. Resultados de la prueba PCAs en el CDIs Zumpango.....	106
Cuadro 9. Resumen de perforación geotécnica en el CDIs Zumpango.....	107
Cuadro 10. Resumen estratigráfico y velocidades en el CDIs Zumpango.....	109



Acrónimos, Siglas y Unidades

Acrónimo, siglas y unidades	Significado
CAEM	Comisión del Agua del Estado de México
CDMX	Ciudad de México
Ces	Contaminantes emergentes
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CO ₂	Dióxido de carbono
COT	Carbono orgánico total
DAF	Flotación por aire disuelto (pro sus siglas en inglés <i>Dissolved Aire Flotation</i>)
DBO ₅	Demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días
DOF	Diario Oficial de la Federación
DQO	Demanda química de oxígeno, utilizando dicromato de potasio como agente oxidante
FP	Filtro Precolador
LA	Lodos activados
L/s	Litros por segundo (flujo)
MBR	Reactor biológico de membranas (por sus siglas en inglés <i>Membrane Bioreactor</i>)
mg/L	Miligramo por litro (1 mg/L = 1 ppm (parte por millón))
µg/L	Microgramo por litro (1,000 µg/L = 1 mg/L)
µS/cm	Microsiemens por centímetro (unidad de conductividad)
NOM	Normal Oficial Mexicana
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
RPD	Reúso Potable Directo
RPI	Reúso Potable Indirecto
RPIIAS	Reúso Potable Indirecto para el Incremento de Aguas Superficiales
SACMEX	Sistema de Aguas de la Ciudad de México
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (México)
UASB	Reactor anaeróbico de lecho de lodos y flujo ascendente (por sus siglas en inglés <i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>)
UV	Radiación ultravioleta



Glosario

Adsorción. El proceso de adsorción consiste en la captación de sustancias solubles en la superficie de un sólido. Un parámetro fundamental en este caso será la superficie específica del sólido, dado que el compuesto soluble a eliminar se ha de concentrar en la superficie del mismo. Los sistemas de adsorción en ocasiones se utilizan como filtros biológicos donde el carbón activado granular sirve como soporte para las bacterias, sin embargo, suele ir precedido con la adición de ozono para fracturar las moléculas refractarias a la oxidación biológica, esta combinación es una excelente herramienta para remoción de contaminantes emergentes, convirtiéndolo en uno de los métodos preferidos para la remoción de estos contaminantes, bajo algunas categorizaciones, este proceso cae dentro de la clasificación de procesos de Oxidación Avanzada.

Contaminantes emergentes (CES). Microcomponentes o componentes químicos traza presentes en el medio ambiente, incluyen una gran variedad de compuestos químicos, productos farmacéuticos, productos de cuidado personal, agentes tensoactivos, plastificantes, aditivos industriales, etc. (Gil, 2012). Son considerados contaminantes de interés por los efectos negativos que causan a los organismos del medio ambiente acuático y la salud humana.

Filtración. La filtración consiste en la remoción de partículas suspendidas y coloidales presentes en una suspensión acuosa que escurre a través de un medio poroso

Filtro percolador. Sistema de tratamiento biológico que consiste en una cama de grava o un medio plástico sobre el cual se rocían las aguas negras pretratadas. En los filtros percoladores, los microorganismos se apegan al medio del lecho y forman una capa biológica sobre éste. A medida que las aguas negras se percolan por el medio, los microorganismos digieren y eliminan los contaminantes del agua.

Lodos activados. El proceso de lodos activados consiste en un tanque de aireación con mezcla completa y continúa provista por difusores y sopladores de aire, o bien por aireadores mecánicos. Los “lodos” (biomasa) se alimentan y crecen a partir de la materia orgánica del agua residual. Los lodos crecen en forma de flóculos que sedimentan al pasar por un clarificador secundario; el agua clarificada desborda por la parte superior de dicho tanque, en tanto que la biomasa concentrada se recircula al tanque de aireación y una pequeña fracción, la purga, se envía al sistema de tratamiento de lodos.

Normas Oficiales Mexicanas (NOMs). Son regulaciones técnicas de observancia obligatoria expedidas por las dependencias competentes, que tienen como finalidad



establecer las características que deben reunir los procesos o servicios cuando estos puedan constituir un riesgo para la seguridad de las personas o dañar la salud humana.

Parámetro. Una propiedad que se mide o se observa.

Reducción logarítmica. La reducción logarítmica es una medida de qué tan a fondo un proceso de descontaminación reduce la concentración de un contaminante. Una reducción n- log significa que la concentración de contaminantes restantes es sólo 10 n veces menor que el original. Así, por ejemplo, una reducción de 0 logaritmos no es reducción en absoluto, mientras que una reducción de 1 logaritmo corresponde a una reducción del 90 por ciento de la concentración original, y una reducción de 2 logaritmos corresponde a una reducción del 99 por ciento de la concentración original:

Log Reduction	Number of CFUs Remaining	Percentage Reduction
0 log	1,000,000	0%
1log	100,000	90%
2log	10,000	99%
3log	1,000	99.9%
4log	100	99.99%
5log	10	99.999%
6log	1	99.9999%

Recarga artificial. Conjunto de técnicas hidrogeológicas aplicadas para introducir agua a un acuífero, a través de obras construidas con ese fin. (NOM-014-CONAGUA-2003).

Reservorio. Es el almacenamiento de aguas superficiales o subterráneas, para brindar la oportunidad de cortar físicamente la conexión a la fuente, así como ofrecer tiempo para responder a alteraciones imprevistas del proceso. Puede ser de tipo ambiental (natural) o diseñado (construido).

Reúso de agua.

Reúso de facto: Ocurre cuando las comunidades utilizan agua superficial como fuente de agua potable que ha sido sometida a descargas de aguas residuales río arriba.

Reúso no potable: Se refiere al agua tratada que no se usa para beber pero que es segura de usar para irrigación o procesos industriales.

Reúso potable: Se refiere al agua reciclada o recuperada que es segura para beber, ya que ha pasado por un proceso de tratamiento avanzado que garantiza el uso potable

Reúso potable directo (RPD): Representa la introducción de aguas residuales tratadas (con o sin retención en un almacenamiento diseñado) en un suministro de agua potable sin descarga previa a un reservorio ambiental. Las aguas residuales tratadas pueden mezclarse con agua sin tratar de un río, lago, embalse o acuífero antes de una planta potabilizadora; mezclarse con agua tratada aguas abajo de una planta potabilizadora convencional; o introducir directamente en un sistema de distribución de agua potable.



Reúso potable indirecto (RPI): Representa la adición planificada de aguas residuales tratadas a cuerpos de agua utilizados como fuentes de agua potable. Los cuerpos de agua, que pueden incluir ríos, lagos, embalses y acuíferos, se denominan reservorios ambientales. El agua que contiene una proporción de aguas residuales tratadas se toma de la reserva ambiental y se trata para proporcionar agua potable.

UASB. Los reactores UASB (del inglés Upflow Anaerobic Sludge Blanket), también conocido como RAFA (reactor anaerobio de flujo ascendente) son un tipo de biorreactor tubular que operan en régimen continuo y en flujo ascendente, es decir, el afluente entra por la parte inferior del reactor, atraviesa todo el perfil longitudinal, y sale por la parte superior. Son reactores anaerobios en los que los microorganismos se agrupan formando biogránulos.



Proyecto de Aprovechamiento y Manejo Ambiental De la laguna de Zumpango Informe final



I. Componente Social

1.1 Nuestra relación con el agua en la Región Zumpango

Zumpango, uno de los 125 municipios del Estado de México, se localiza al nororiente de la entidad, a una altitud de 2,259 metros sobre el nivel del mar. Su fundación se remonta al 31 de julio de 1820, bajo el decreto de la Constitución de Cádiz. Durante el movimiento independentista de la Nueva España, el municipio incorporó diversas áreas, como las Lomas de España, Loma Larga y los Llanos de Santa Lucía, así como las rancherías que habían sido propiedad de españoles en San Sebastián Buenavista, junto a los corregimientos mayores de San Juan Zitlaltepec y San Bartolo Cuautlalpan.

En la actualidad, el municipio de Zumpango se compone de una cabecera municipal, seis pueblos, una ranchería, ocho colonias ejidales, diecisiete colonias, diecisiete barrios, seis fraccionamientos, treinta y dos conjuntos urbanos, una zona militar y once ejidos. Cabe destacar que Zumpango es uno de los pocos municipios en México que cuenta con su propio himno, además de los himnos nacional y estatal.

Fundado por los mexicas en el siglo XV, Zumpango posee una rica historia que se remonta a cientos de años; su nombre proviene del náhuatl “tzompantli”, que significa “lugar de cráneos”, en referencia a su uso en rituales de sacrificios humanos. Además de su importancia cultural, Zumpango ha mantenido una profunda conexión con el agua, siendo parte de la Gran Cuenca del Valle de México.



Figura 1 Lago de Zumpango, detalle de mapa de Upsala c.a. 1550.



Este vínculo con el agua ha sido constante a lo largo de su historia. En su territorio aún se encuentra uno de los cuerpos de agua más grandes que quedaron tras la desecación de la Cuenca del Valle de México. Aunque otros lagos, como el de Texcoco y el de Xaltocan, han desaparecido o reducido su visibilidad, la laguna de Zumpango sigue siendo un referente importante en la región.

Dentro de la región, la Laguna de Zumpango se erige como un símbolo de naturaleza, grandeza, recreación, unidad y resiliencia. Este cuerpo de agua ha perdurado a lo largo del tiempo, a pesar del proceso de desecación que afectó la Cuenca del Valle de México. Originalmente, y durante muchos años, la laguna se abasteció principalmente de agua pluvial, convirtiéndose en un pilar fundamental para el desarrollo turístico, recreativo y ambiental de la zona.

Las comunidades aledañas vivieron por mucho tiempo del comercio que florecía en torno a la laguna, como la venta de artesanías, alimentos, y la oferta de tours recreativos. Este espacio también acogía aves migratorias, especialmente aquellas que llegaban desde Canadá para pasar el invierno, consolidando la laguna como un santuario natural. Además, la Laguna de Zumpango albergaba una gran variedad de flora única en la región, y en la memoria de los más grandes aún se preservan recuerdos de cuando sus aguas eran tan claras y limpias que la gente podía sumergirse y disfrutar de su frescura. En ese entonces, la laguna era considerada un verdadero santuario.

Sin embargo, hoy este espacio evoca una profunda tristeza. La combinación de malos tratos, el descuido de la ciudadanía y las pésimas decisiones gubernamentales han provocado cambios abruptos en su entorno. A principios de la década del 2000, la laguna fue desecada por completo, justificando la necesidad de firmar un convenio que proponía la incorporación de fuentes de agua adicionales para su subsistencia, en lugar de depender únicamente del agua pluvial, que históricamente había sido suficiente para mantenerla.

A pesar de la oposición de algunas comunidades aledañas, la nueva propuesta fue impuesta. Se decidió entonces que se introduciría agua residual de los canales cercanos, bajo un acuerdo que establecía que la laguna se abastecería con un 70% de agua pluvial y solo un 30% de aguas negras, con la intención de minimizar el impacto. Sin embargo, pronto quedó claro que la Laguna de Zumpango se convertiría en un vaso regulador, debido a la necesidad urgente de la Ciudad de México de desalojar sus aguas residuales lo más rápido posible.

Con el tiempo, se decidió enviar estas aguas negras al estado de Hidalgo, específicamente a la región de Tula, bajo el pretexto de que serían tratadas para devolverlas limpias y útiles para el consumo humano. No obstante, la Laguna de Zumpango pasó a desempeñar un papel de contención temporal de estas aguas residuales, aliviando la presión que se generaba en Tula por el volumen de agua que llegaba desde la capital.



Esta dinámica se ha mantenido durante muchos años, ya que la Ciudad de México, debido a su insostenibilidad hídrica, sigue requiriendo la transferencia de agua desde otras regiones, a pesar de haber sido hogar de uno de los lagos más grandes de la historia. La sobrepoblación, el mal manejo de permisos y las políticas centralistas han llevado a una continua explotación de los recursos naturales, descuidando completamente la preservación de estos bienes esenciales para la vida.

La relación cultural, económica y social de Zumpango ha sido gravemente afectada e incluso rota por lo que se conoce como la gran metrópoli. Este fenómeno, impulsado por procesos descontrolados de urbanización e industrialización, ha transformado el centro del país, concentrando dependencias y servicios en una estructura profundamente centralista.

En el ámbito cultural, las formas tradicionales de organización, vinculadas a los usos y costumbres de los diferentes pueblos, han sido ignoradas por completo por las instancias oficiales. Esto incluye la pérdida de reconocimiento hacia nuestras lenguas, vestimentas típicas y prácticas comunitarias. Sin embargo, a pesar de estos desafíos, en las comunidades persisten esfuerzos por conservar lo que queda de estas tradiciones. Se han adoptado posturas de autodeterminación indígena que buscan preservar y reafirmar una identidad cultural arraigada en el territorio.

La región ha sido históricamente conocida por la producción de una amplia variedad de productos agrícolas y ganaderos, incluyendo maíz, frijol, calabaza, elote, cebolla, chile, espinacas, acelgas, huevo, carne de pollo, carne de cerdo, leche y productos lácteos, entre otros. Sin embargo, hace 20 años, se determinó que la región sería ideal para un proyecto de urbanización masiva mediante la construcción de miles de viviendas de interés social para albergar a la creciente población de la Ciudad de México.

Este cambio de enfoque llevó a una transformación drástica en el uso del suelo. La mayor parte del suelo de conservación fue reconfigurado para ser destinado a usos industriales o habitacionales. Como resultado, muchas rancherías, haciendas y ejidos fueron desmantelados, provocando la pérdida de numerosos sembradíos y alterando significativamente la estructura económica y agrícola de la región.

En el ámbito social, la sociedad se ha organizado principalmente dentro de los pueblos originarios que aún persisten en la región. En estos pueblos, los habitantes han desarrollado procesos internos de organización para autogestionar sus bienes comunes, especialmente el agua. Desde la década de 1970, estos pueblos han mantenido sistemas tradicionales para el abastecimiento de agua, basados en los “Pozos Artesanos”, que son perforaciones en la tierra a profundidades de no más de 5 metros, que permiten extraer agua potable de buena calidad sin necesidad de un encargado externo para su suministro.



Al ver que las autoridades no estaban interesadas en invertir en esta área, ya que no recuperaban la inversión, los pobladores comenzaron a organizarse para satisfacer su demanda de agua, a través de cooperaciones y aportaciones comunitarias. Esta organización permitió costear los trabajos necesarios para el abastecimiento de agua, garantizar el acceso a agua de buena calidad a bajos costos y asegurar una gestión transparente, sin perder de vista la cosmovisión y la relación armoniosa con la naturaleza. El proceso se llevó a cabo en al menos 30 poblados de la región. Ante los desafíos impuestos por la industrialización y las políticas gubernamentales, muchas de estas organizaciones comunitarias siguen trabajando.

La expansión urbana y los cambios en el uso del suelo para la industria inmobiliaria y otros desarrollos han generado conflictos, ya que las autoridades tradicionales en los territorios se han opuesto a compartir el agua de sus comunidades, temiendo quedarse sin recursos. Esta situación ha desencadenado procesos de hostigamiento, acoso e intimidación por parte de gobiernos, industrias y empresas hacia los sistemas comunitarios de agua.

A pesar de estas dinámicas, no se ha logrado una unión regional efectiva para abordar estos problemas, y la población sigue careciendo de una conciencia adecuada sobre los recursos naturales disponibles y los que se han perdido debido a este proceso de urbanización.

1.2 Problemática Local

En la región de Zumpango, enfrentamos diversas problemáticas relacionadas con el agua, algunas de ellas son muy concretas y otras tienen raíces más profundas, afectando no solo a nuestra localidad, sino también a varios municipios y estados vecinos.

1.2.1 Déficit de agua

Uno de los principales desafíos es un déficit hídrico de más de 188 m³ en las aguas subterráneas que nos abastecen. Esto se debe a que extraemos más agua de la que se infiltra, según los datos publicados y reconocidos por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). En nuestra región no contamos con escurrimientos o manantiales que proporcionen agua superficial, dependemos de pozos profundos, cuya extracción promedio supera los 100 metros.

Esta situación ha llevado a una grave sobreexplotación de nuestros recursos hídricos. Además, la falta de infiltración de agua se ve agravada por la creciente urbanización y las



grandes superficies de concreto, que alteran el ciclo natural del agua, comprometiendo aún más la esencia de nuestra región.

1.2.2 Crecimiento industrial

Nuestra cuenca es una de las más afectadas por la actividad industrial, con un creciente número de empresas, lotificadoras y fraccionadoras. El uso del agua en esta región no es consciente ni amigable, lo que resulta en un ciclo en el que el agua se utiliza una sola vez y luego se desecha por el drenaje. Esto contribuye a que el agua termine en Tula, donde se intenta sanear el agua residual. Sin embargo, este proceso es ineficiente, ya que el agua tratada se mezcla nuevamente con aguas contaminadas, perpetuando el problema.

Los proyectos inmobiliarios e industriales se llevan a cabo sin una planificación adecuada y sin considerar su impacto ambiental. Esta situación se ha intensificado en los últimos años, especialmente tras la llegada del Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles (AIFA), que ha desencadenado una nueva ola de desarrollo industrial. A pesar de los problemas graves que ya enfrenta la región en cuanto al acceso al agua potable, se continúan promoviendo proyectos que demandan enormes cantidades de agua.

La misma preocupación se extiende a la zona industrial de la Ciudad de México-Estado, la del México-Hidalgo y al parque industrial TMEX-PARK más grande de América Latina, que se proyecta como el parque industrial más grande de América Latina y está en construcción. Es alarmante que, a pesar de la declaración de un déficit hídrico, se proponga un modelo de desarrollo que claramente no podrá sostenerse. Esto generará un problema social significativo. Entonces, ¿para qué reconocen un déficit hídrico?, y ¿con qué agua pretenden atender estos proyectos?

1.2.3 Contaminación

La situación en nuestra región también ha generado problemas de contaminación, debido a la falta de procesos adecuados para el tratamiento de aguas residuales. En lugar de gestionar estas aguas, se permite que lleguen a Tula, donde se intenta tratarlas, pero este proceso es ineficiente. En México, la permisividad hacia la industria ha dado lugar a la creación de zonas de emergencia sanitaria y ambiental, y, con las decisiones actuales, corremos el riesgo de ser la próxima en declararse como tal. Es bien sabido que muchas empresas no tratan adecuadamente sus aguas, lo que contamina las aguas subterráneas de la región al verter químicos dañinos, algunos de los cuales están relacionados con cáncer y otras enfermedades por contacto directo.



1.2.4 Drenaje

Además, hay una grave falta de infraestructura a nivel local. El crecimiento desmedido de la urbanización ha sobrepasado la capacidad de los pueblos, y el municipio no está preparado para manejar esta nueva ola de manera sostenible. No contamos con sistemas de saneamiento ni por parte del gobierno ni de particulares en Zumpango.

Las inundaciones se presentan principalmente en áreas donde se han construido fraccionamientos, situados históricamente en zonas de recarga de los mantos acuíferos. En estas elevaciones, se considera, según la cosmovisión ancestral, que el agua es sabia y tiene memoria, lo que genera una mayor cantidad de precipitación. Sin embargo, el aprovechamiento de esta agua es nulo, ya que las capas de concreto impiden que se infiltre en el suelo.

1.2.5 Desigualdad

El acaparamiento de agua por parte de las empresas y el sobre concesionamiento reflejan una falta de atención a las necesidades reales. El agua se ha convertido en un negocio, especialmente a través de la venta de agua en pipa, que se promociona como una solución a la escasez. Esto genera desigualdad y beneficia solo a quienes promueven estas soluciones.

1.3 Cómo el Cambio de Paradigma Soluciona la Problemática

El cambio de paradigma es esencial para abordar la problemática de la región, especialmente en lo que respecta a la gestión del agua. Una de las soluciones clave que se plantea es la recuperación de acuíferos sobreexplotados, como el Cuautitlán-Pachuca, a través de iniciativas de restauración, como la de la Laguna de Zumpango. Este enfoque busca reducir la extracción de agua de los mantos freáticos, permitiendo así su recuperación y mitigando los problemas que enfrenta la población local.

Sin embargo, este cambio no debe limitarse únicamente a la recuperación de cuerpos de agua. También es crucial promover políticas públicas que comprendan la importancia de conservar y preservar las zonas de recarga hídrica. Es necesario evitar la urbanización desmedida y fomentar una relación más amigable y comprometida con la naturaleza. Debemos alejarnos de la idea de que los bienes naturales son mercancías y reconocer que la tierra debe conservar su espacio para desarrollarse y mantener los procesos naturales que sustentan la vida humana.



Además, es importante entender que los bienes naturales forman parte de nuestro entorno y que su degradación tiene consecuencias severas. No podemos permitir que el entorno siga siendo modificado sin proponer cambios estructurales reales que generen conciencia sobre la importancia de estos recursos. La realidad es que las alteraciones provocadas por el cambio climático serán cada vez más agudas si no actuamos.

Es fundamental establecer una relación más armónica entre quienes toman decisiones y quienes defienden los territorios para la conservación de los bienes naturales. Como lo afirma la escritora Vandana Shiva: “El agua no es de nadie, pero es responsabilidad de todos”. Este principio debe guiar nuestras acciones y decisiones hacia un futuro más sostenible.

1.4 Integración de Saberes Comunitarios en el Proyecto Conceptual

Una parte fundamental en la concepción de los proyectos conceptuales, fue conocer la problemática de cada región y entender el funcionamiento actual de los sistemas de abastecimiento, drenaje, riego y navegación en cada uno de los sitios. Este entendimiento sería incompleto sin incorporar el conocimiento comunitario del agua, que aporta una visión insustituible sobre las dinámicas locales.

A gran escala, la extracción, distribución, saneamiento y drenaje del recurso hídrico son gestionados por entidades gubernamentales como CONAGUA, SACMEX, CAEM y CORENADR, a través de la infraestructura hidráulica disponible. Sin embargo, a pequeña escala, son las comunidades y los usuarios quienes enfrentan la tarea de adaptar estos recursos –frecuentemente insuficientes y de mala calidad– para satisfacer sus necesidades. Ellas se ven obligadas a buscar soluciones para mitigar afectaciones como inundaciones o contaminación, asumir los costos derivados de una mala gestión, y desarrollar estrategias resilientes frente a estas problemáticas. Por ello, para comprender verdaderamente el funcionamiento integral del sistema y sus vulnerabilidades, es imprescindible recurrir al conocimiento en sitio que poseen las comunidades.

Además, no se trata únicamente de entender el sistema desde un enfoque técnico, sino también de reconocer cómo los habitantes perciben su operación desde perspectivas sociales y culturales. En muchos casos, los sistemas actuales interfieren con el manejo tradicional del agua, alterando prácticas culturales profundamente arraigadas en las comunidades.

El conocimiento comunitario del agua se integró en la concepción de los proyectos conceptuales de dos maneras claves: primero, para entender el funcionamiento integral



de los sistemas hídricos y sensibilizarnos frente a sus afectaciones, y segundo, para diseñar soluciones que sean verdaderamente holísticas, considerando tanto las necesidades técnicas como las perspectivas sociales y culturales de las comunidades.

Para que las propuestas conceptuales sean técnicamente fundamentadas y socialmente viables, articuladas con los saberes comunitarios y la acción colectiva de los nodos de incidencia, se siguieron los siguientes cinco principios fundamentales propuestos por McCall y Álvarez (2023, pp. 16-17):

- Representar el conocimiento espacial local de la comunidad en productos cartográficos que aporten al diagnóstico y gestión del territorio.
- Consolidar un intercambio flexible y adaptable entre los saberes comunitarios y el conocimiento de expertos, adecuado al entorno social, cultural y físico del territorio.
- Asegurar que el acceso y el uso de la información del conocimiento espacial local representado quede bajo la responsabilidad de las personas que proporcionaron dicho conocimiento.
- Crear espacios de diálogo y formación para capacitar en el manejo de tecnologías de información geográfica que sean de fácil utilidad.
- Combinar distintas metodologías participativas con instrumentos tecnológicos como vuelos de dron para obtener imágenes del territorio, aplicaciones de celular para levantar puntos en campo, entre otras.

En la figura 2 se muestra el flujo de trabajo realizado entre el equipo social, técnico y de cartografía comunitaria, para el desarrollo de los proyectos conceptuales.

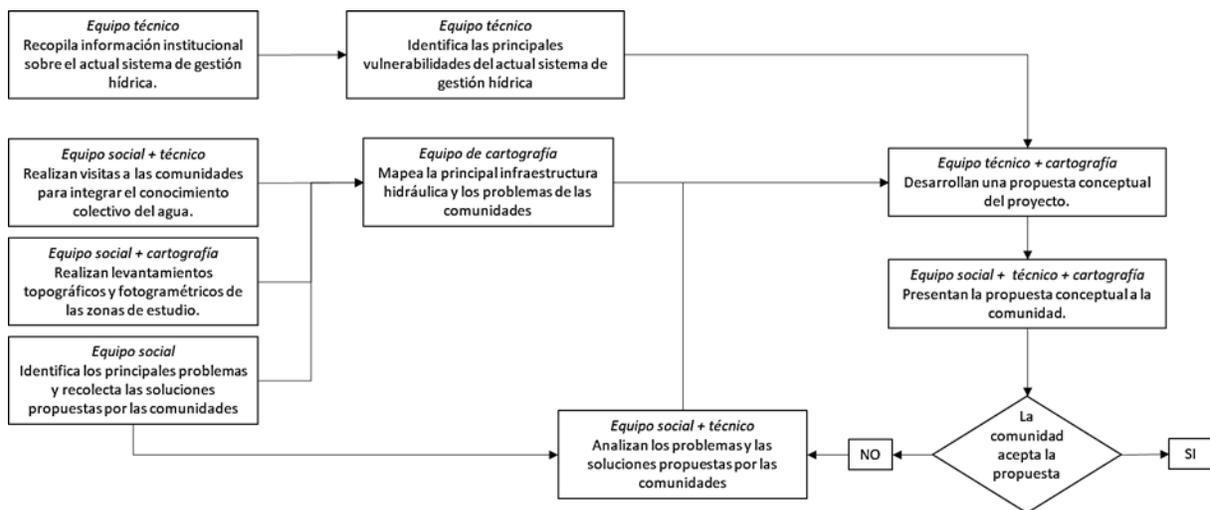


Figura 2 Flujo de trabajo para el desarrollo de los proyectos conceptuales.



Figura 3. Reuniones de trabajo del equipo técnico y social con las comunidades.

En la figura 3 se muestra una de las reuniones del grupo técnico, social y campesinos. En esta reunión se presentó la metodología de trabajo para la elaboración de un anteproyecto en la zona, se escucharon las peticiones de la comunidad, así como la toma de acuerdos para futuras reuniones de seguimiento.

1.5 Visitas de Campo y Levantamiento Fotogramétrico

Los levantamientos fotogramétricos tienen el objetivo de integrar carpetas de información que faciliten la observación de relaciones entre los componentes hídricos urbanos de cada sitio, así como visualizar los potenciales espacios para cada emplazamiento.

El material obtenido es información actualizada de los sitios y de un formato de alta calidad (4K), teniendo como resultado un trabajo adecuado para llevar a cabo la modelación tridimensional a partir de nubes de puntos en los proyectos conceptuales de cada nodo.

Estos vuelos fueron realizados a lo largo del año 2023 y 2024 en distintos escenarios climatológicos, en acompañamiento de los representantes de cada nodo que aportaron un acercamiento con cada problemática local, esto ha representado un enlace de colaboración que permitió obtener esta información.



Por otro lado, el objetivo primordial de las visitas de campo fue el de sensibilizar al grupo técnico con el territorio de cada región, así como de escuchar las opiniones de los pobladores de estas zonas y poder tener un panorama más amplio de la zona de estudio.

Sí bien por la extensión de las zonas de estudio no fue posible hacer los vuelos sobre todos los cuerpos de agua, la utilidad de esta información también radica en la posibilidad de crear montajes de los renders o ubicar los modelos propuestos para la gestión del agua en un escenario actual que permita dar una idea sobre su integración, también es importante hacer mención de otras herramientas empleadas durante el proceso como GPS, información oficial de INEGI o la propia experiencia local de los nodos para determinar las zonas de estudio a partir de un acercamiento seguro a las zonas, la integración de esta información iría evolucionando agregando nuevos determinantes o temas de interés a la información recopilada.

1.5.1 Fotogrametría

La fotogrametría es la técnica cuyo objeto es estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera, utilizando esencialmente medidas hechas sobre una o varias fotografías de ese objeto.

El concepto de fotogrametría es: "medir sobre fotos". Si trabajamos con una foto podemos obtener información en primera instancia de la geometría del objeto, es decir, información bidimensional. Si trabajamos con dos fotos, en la zona común a éstas (zona de traslape), podremos tener visión estereoscópica o, dicho de otro modo, información tridimensional.

Básicamente, es una técnica de medición de coordenadas 3D, que utiliza fotografías u otros sistemas de percepción remota junto con puntos de referencia topográficos sobre el terreno, como medio fundamental para la medición.

La información obtenida se ha combinado con los modelos de elevación de INEGI, esta comparación ha permitido crear un modelo digital de superficie en el programa Civil 3D, un modelo tridimensional de la información espacial con las infraestructuras existentes detalladas en sus distintos ejes, con lo que se ha generado una serie de perfiles y secciones que ayudan al entendimiento de los bordos, la ubicación de las islas, las alturas máximas y en general el funcionamiento de estos componentes.

Otro de los ejercicios elaborados fue la ortofoto sobre el área del inicio del Túnel de Tequixquiac que abarca la zona de la batería de pozos recién construida, y que ha causado ciertas diferencias en la opinión de las comunidades cercanas, principalmente



de Zumpango. Esta información también ayudó a definir la ubicación del bordo, así como para la ubicación de puntos con fallas estructurales. Los ingresos de agua, escurrimiento, pasos vehiculares, cruces peatonales, ubicación de infraestructuras y equipamiento urbano son algunos de los temas que se han ido integrando desde fuentes oficiales y al mismo tiempo de información recabada del sitio.

1.5.2 Laguna de Zumpango

El Lago de Zumpango tiene una extensión amplia que ha representado un reto para la captura de una ortofoto general por lo que se ha implementado en primera instancia una escala de estudio que ofrezca datos puntuales del lago, principalmente de las secciones de los cuerpos de agua, la vialidad terrestre, las elevaciones del cuerpo vertedor, y la composición del Gran Canal por el lado oriente del lago.



Figura 4. Personal del equipo técnico realizando Vuelos con Dron en la laguna de Zumpango.



Figura 5. Recorrido a la Laguna de Zumpango.



Figura 6. Vista hacia el interior de la Laguna de Zumpango en tiempos de total desecación, al fondo el cerro de Zitlaltepec.



Figura 7. Vista hacia el interior de la Laguna de Zumpango en tiempos de total desecación, en paralelo al Gran Canal por el lado oriente de la laguna.



Figura 8. Vista aérea del vertedor de excedencias.



Figura 9 Vista tridimensional a partir de nube de puntos del vertedor de excedencias.

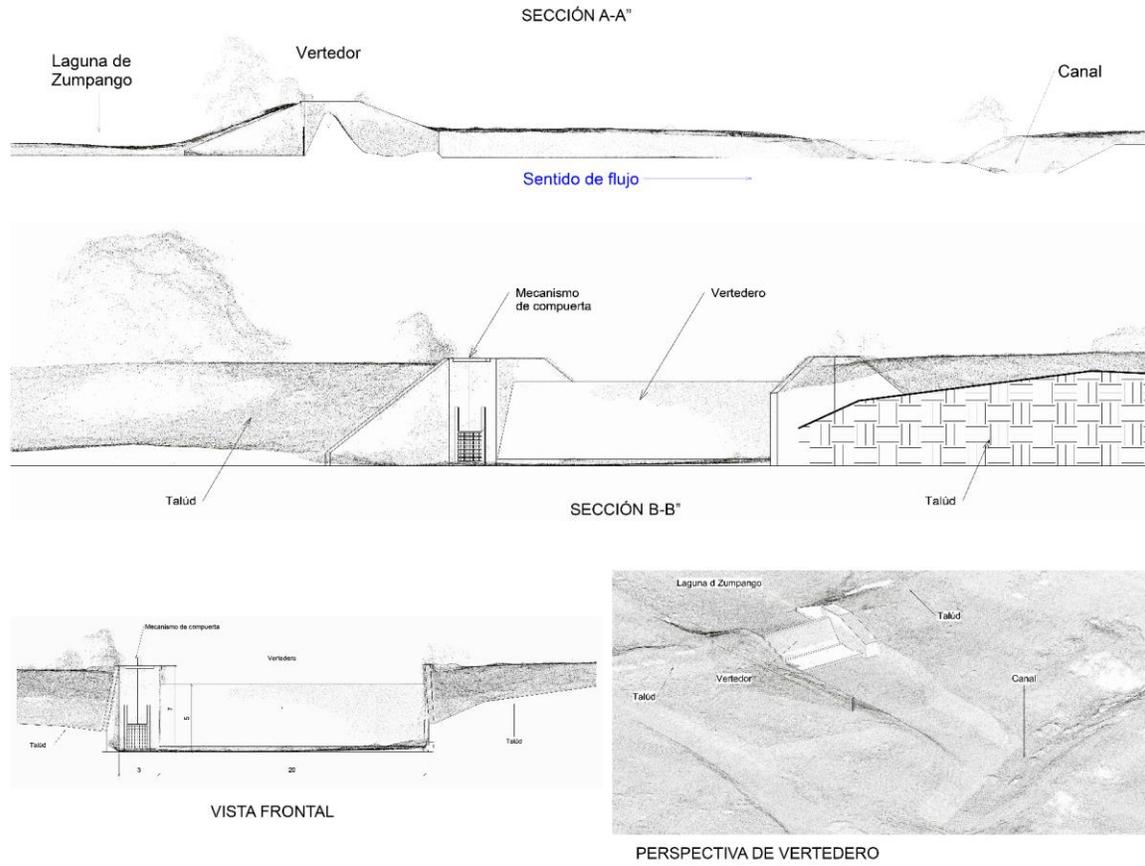


Figura 10 Modelo de elevación a partir de nube de puntos del vertedor de excedencias.



Figura 11. Vista en planta de la descarga del Canal Santo Tomás a la laguna de Zumpango.

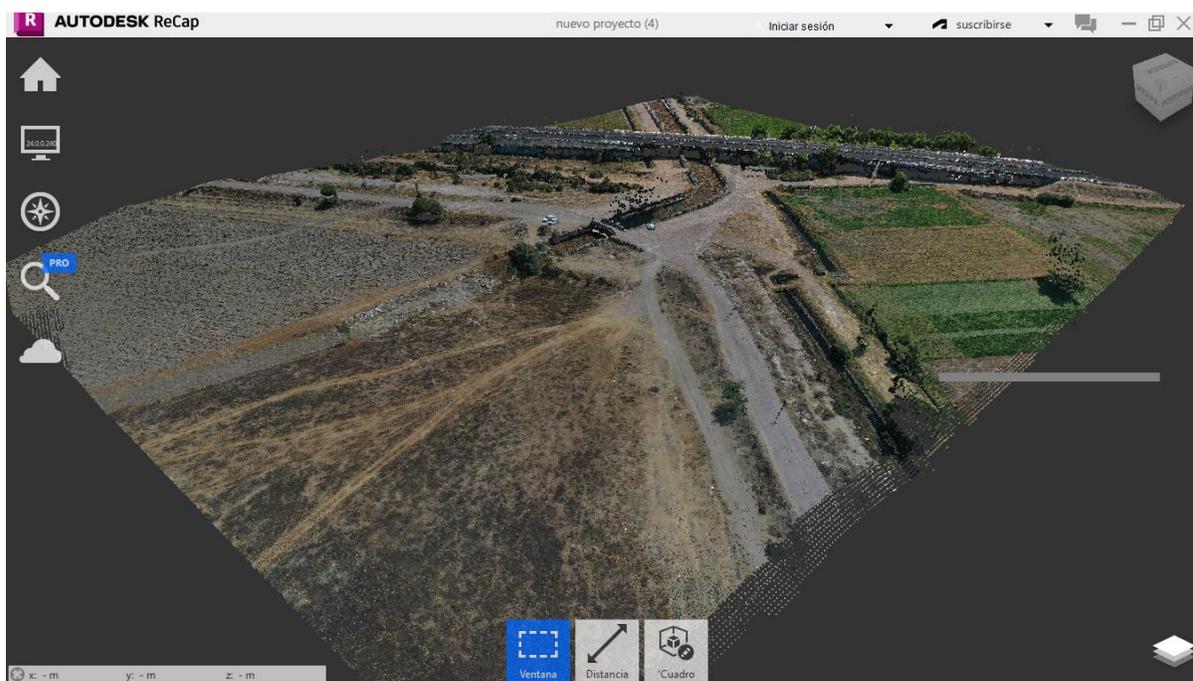


Figura 12. Vista tridimensional a partir de nube de puntos del Canal Santo Tomás ingresando a la laguna de Zumpango.

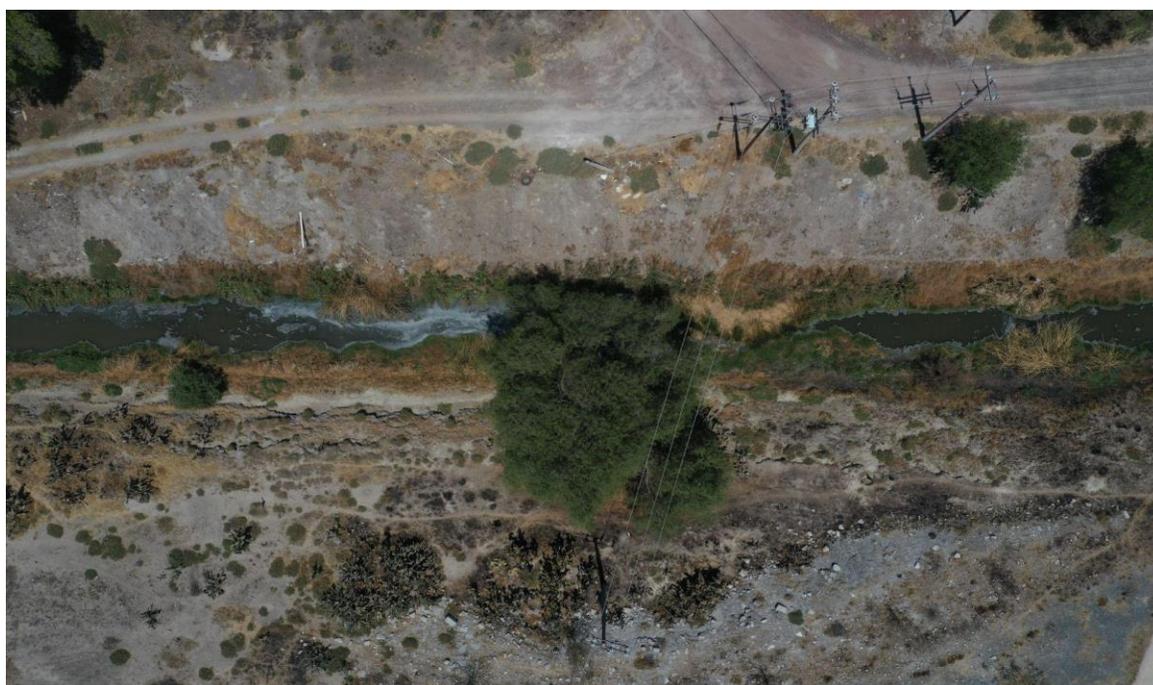


Figura 13. Vista en planta del canal de desfogue en el lado norte de la laguna.

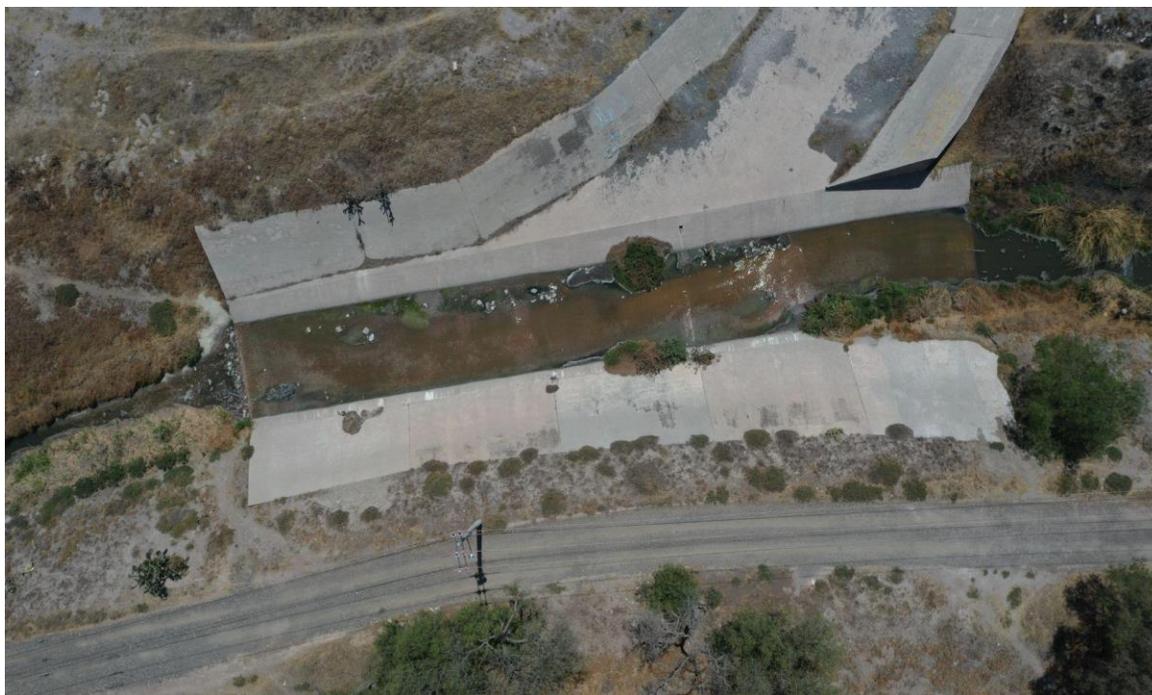


Figura 14. Vista en planta de la descarga del vertedor de excedencias en el canal de desfogue.

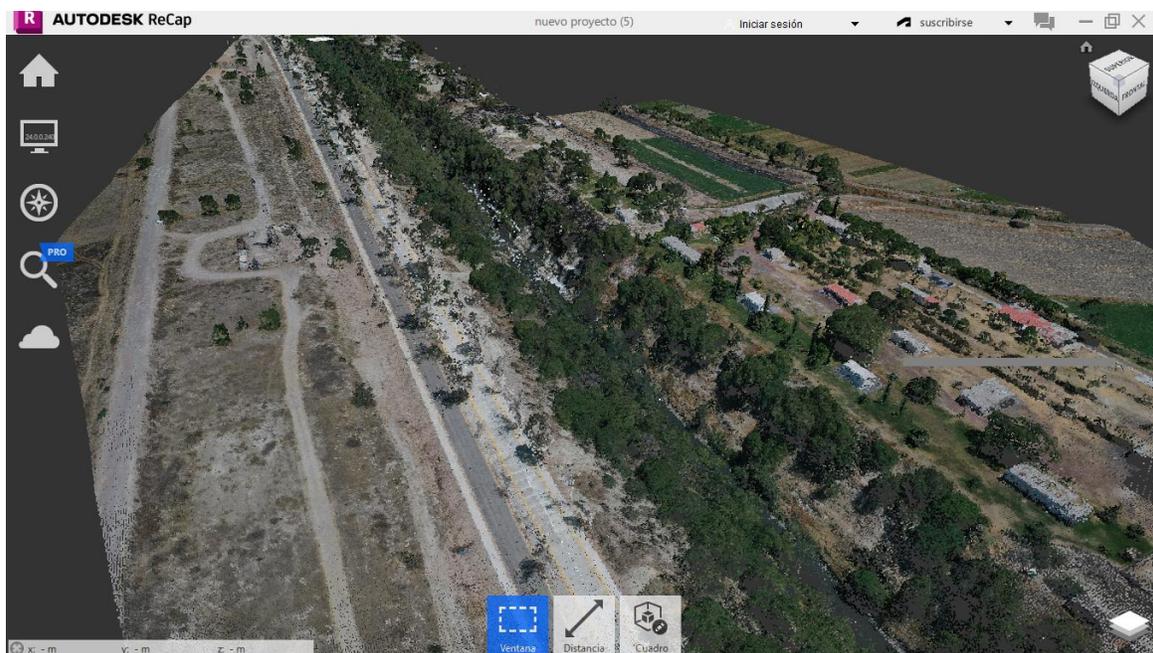


Figura 15. Vista tridimensional a partir de nube de puntos en Gran Canal.



Link de visualización de foto 360° del Gran Canal en su descarga a los túneles de Tequixquiac:

https://www.google.com/maps/contrib/104286368711894418627/photos/@19.8117832,-99.1097917,3a,75y,90t/data=!3m7!1e1!3m5!1sAF1QipPDpG7rOpL26Dxa-JTPSnIN_pot2hjNk4sg4i9O!2e10!6shttps:%2F%2Fh5.googleusercontent.com%2Fp%2FAF1QipPDpG7rOpL26Dxa-JTPSnIN_pot2hjNk4sg4i9O%3Dw900-h600-k-no-pi0-ya0-ro-fo100!7i8192!8i4096!4m3!8m2!3m1!1e1?entry=ttu&_ep=EgoyMDI0MTEyNy4wIjKXMDSoA SAFQAw%3D%3D

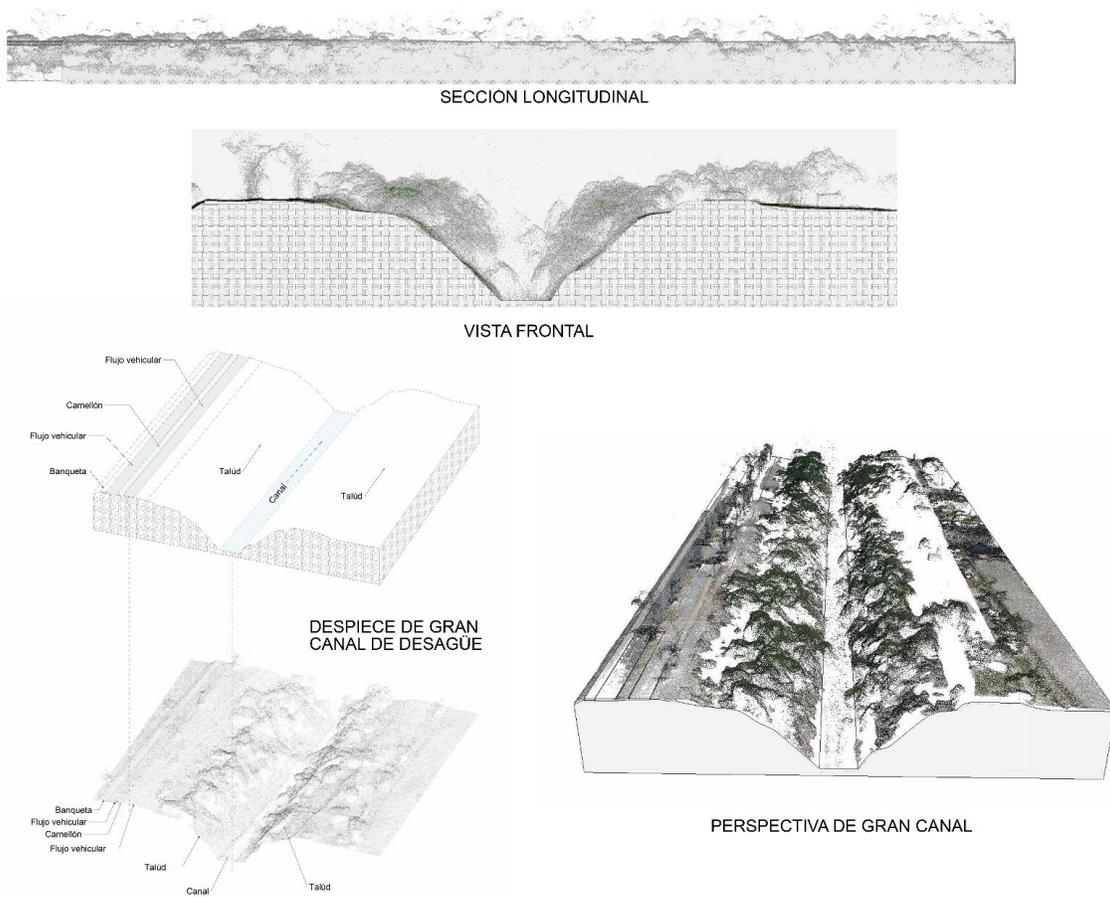


Figura 16. Modelo de elevación a partir de nube de puntos para la modelación de Gran canal.



Figura 17. Vista en planta de la descarga del río de las Avenidas de Pachuca en el Gran Canal.



Capítulo 2

Estudio Hidrológico



II. Estudio Hidrológico

2.1 Esquema Hidrológico

La actual laguna de Zumpango se extiende sobre un área de aproximadamente 18.0 km² entre los municipios de Teoloyucan y Zumpango. Actualmente recibe parte de los escurrimientos del río Cuautitlán y vierte sus excedencias al río el Salado a través del nuevo túnel de Tequixquiac.

Se conecta con el río Cuautitlán a través del canal Santo Tomas. Este canal descarga sobre la laguna (figura 18) una fracción del caudal que escurre por el río Cuautitlán, el cual se controla a través de una obra de control en la intersección del río Cuautitlán y el canal Santo Tomas (figura 19).

Para verter sus excedencias hacia el río El Salado, la laguna cuenta con una obra de excedencia que descarga sobre un canal de riego perimetral que se conecta con la descarga del Gran Canal hacia el nuevo Túnel de Tequixquiac (figura 20). Al norte de la laguna, se encuentra la planta de bombeo M. Hidalgo (figura 20), que extrae agua de la laguna para surtir al sistema de riego Los Insurgentes.



Figura 18. Descarga del canal Santo Tomas en la laguna de Zumpango.



Figura 19. Derivación del río Cuautitlán hacia la laguna de Zumpango por el canal Santo Tomas.

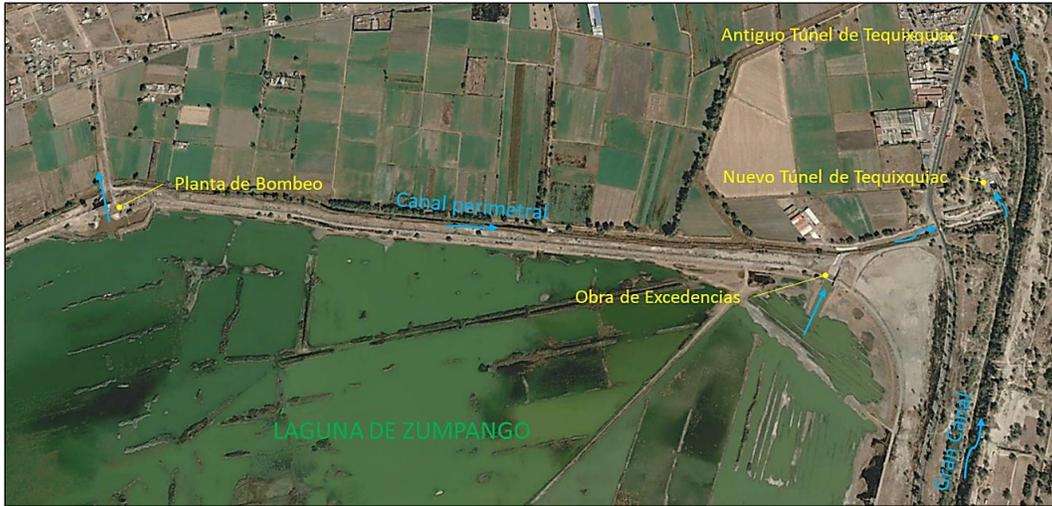


Figura 20. Descarga de la laguna de Zumpango al nuevo Túnel de Tequixquiac.



Figura 21. Principal infraestructura de drenaje actual alrededor de la laguna de Zumpango.



El proyecto conceptual de reúso plantea tomar parte de los caudales de agua residual, que escurren en la red de drenaje de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), e ingresarlos a la laguna de Zumpango, mediante un proceso de tratamiento convencional y el uso de humedales, para luego potabilizarla y reusarla para riego agrícola y consumo humano.

Al mismo tiempo, el proyecto plantea tomar parte de los caudales máximos que escurren en época de lluvias, e ingresarla al cuerpo de la laguna para atenuar los picos de los hidrogramas y mitigar los problemas de inundación.

En la figura 21 se muestra la principal infraestructura actual de la red de drenaje alrededor de la laguna de Zumpango. En la figura 22, un esquema unifilar de flujos en los sitios de interés para el proyecto.

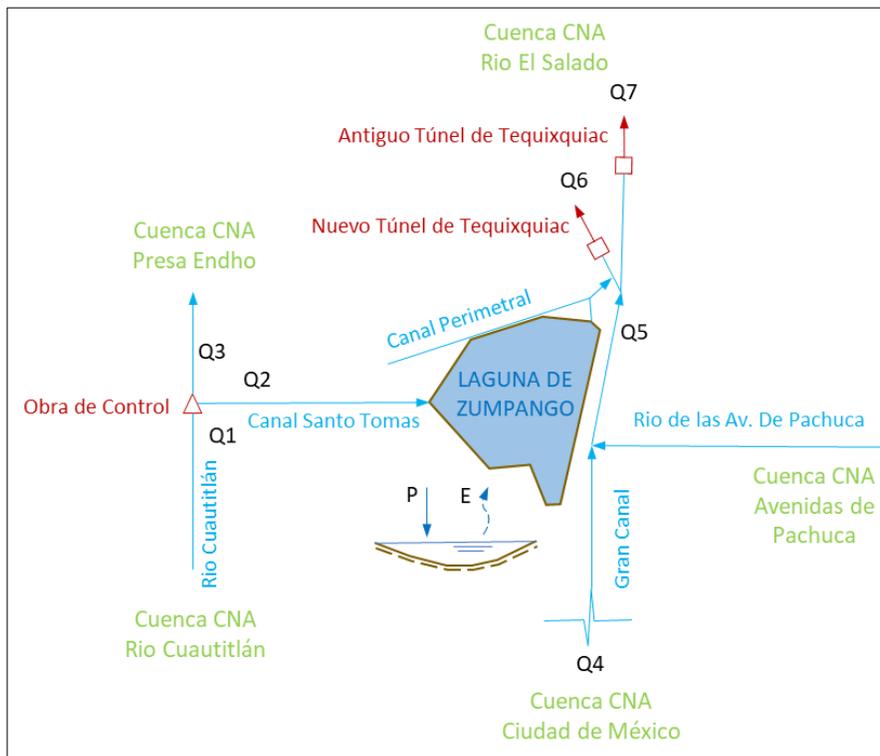


Figura 22. Diagrama de flujos actual alrededor de la Laguna de Zumpango.



2.2 Información Disponible

2.2.1 Información Hidrométrica

A pesar de que la información hidrométrica disponible no está actualizada, porque muchas estaciones dejaron de medir desde ya hace varios años, se considera que brinda información representativa de las condiciones actuales. En el cuadro 1 se muestra una relación de las estaciones hidrométricas utilizadas en este estudio (CONAGUA, 2019).

Cuadro 1. Información hidrométrica utilizada en el estudio.

Estación	Corriente	Periodo de registro
B26346	Rio Cuautitlán	1965 - 2006
B26165	Canal Santo Tomas	1966 - 1997
B26313	Gran Canal	1965 - 2014
K27MX		2005 - 2024
B26007	Antiguo Túnel de	1965 - 2014
TTQMX	Tequixquiac	2012 - 2024
B26216	Nuevo Túnel de Tequixquiac	1965 - 2011

En el proceso de reconstrucción de las series de escurrimientos diarios se depuraron aquellos datos muy altos, y valores nulos o repetidos prolongados por mucho días o semanas que no se asemejen al patrón del resto del registro. Para estimar algunos datos faltantes se aplicó un modelo de regresión por *Vecinos más Cercanos* entre las estaciones con registro y las estaciones con datos faltantes.

En las figuras 23 a 27 se muestran los registros de gastos medios diarios disponibles en las estaciones hidrométricas utilizadas en el estudio.

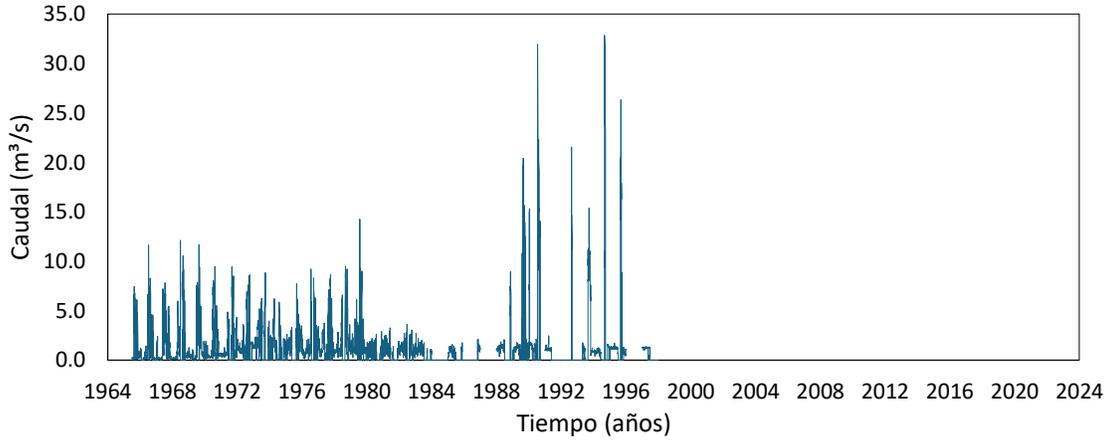


Figura 23. Escurreimientos medios diarios registrados en la estación B26165.

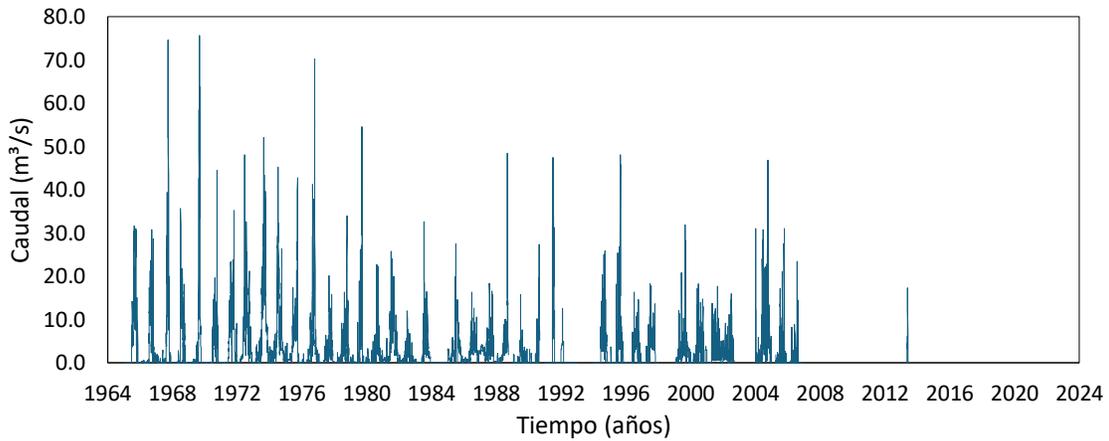


Figura 24. Escurreimientos medios diarios registrados en la estación B26346.

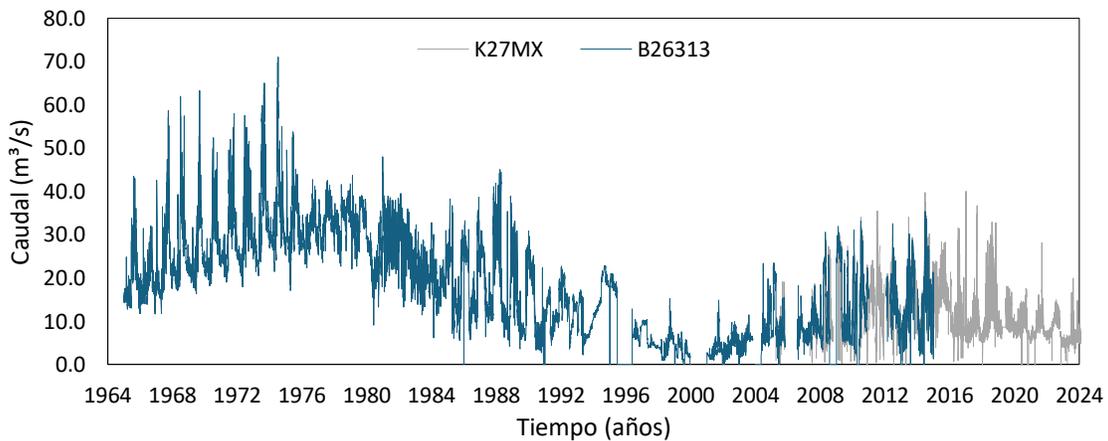


Figura 25. Escurreimientos medios diarios registrados en las estaciones B26313 y K27MX.

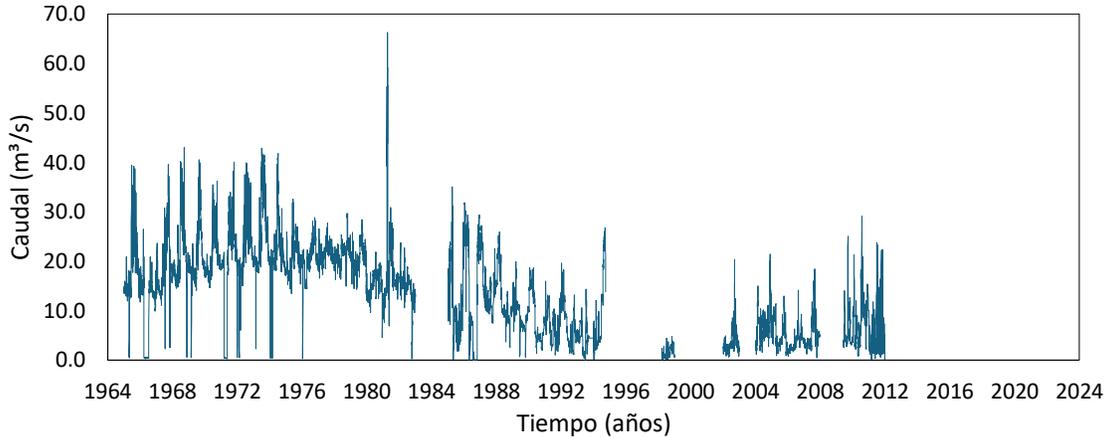


Figura 26. Escurrecimientos medios diarios registrados en la estación B26216.

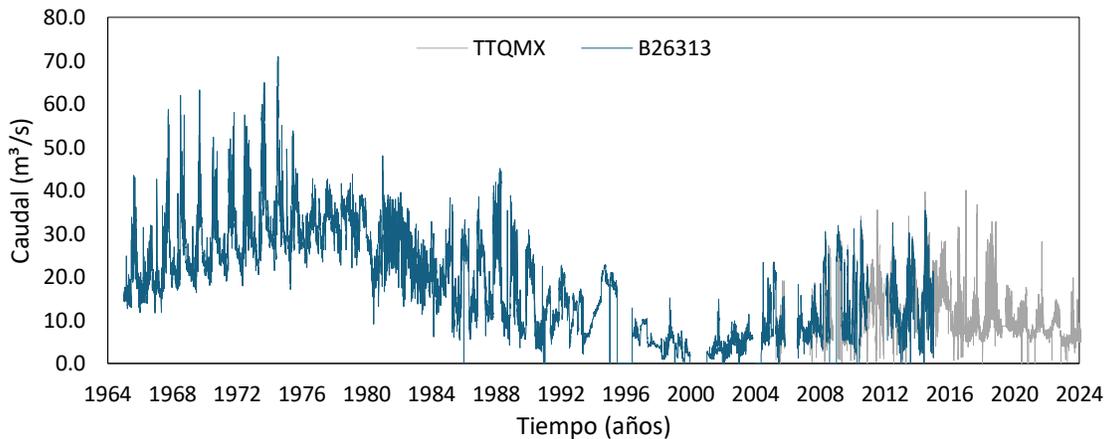


Figura 27. Escurrecimientos medios diarios registrados en las estaciones B26007 y TTQMX.

2.2.2 Información Climatológica

La estación climatológica más cercana a la laguna y con mayor información disponible es la C15115 (CONAGUA, 2019). Sin embargo, como dejó de operar el año 2019, sus datos se extrapolarán, mediante un modelo de regresión por *Vecinos más Cercanos*, con la información climatológica satelital proporcionada por el proyecto POWER (NASA, 2024).

En el cuadro 2 se muestra una relación de la información climatológica utilizada en el estudio. En las figuras 28 a 31 se muestran los registros de información climatológica disponible.



Cuadro 2. Información climatológica utilizada en el estudio.

Estación	Variable	Periodo de registro
C15151	Precipitación en 24 h	1961 a 2019
	Evaporación en 24 h	1961 a 2019
POWER-NASA Coordenadas: -99.25 y 19.75	Precipitación diaria	1981 a 2024
	Temperatura media a 2m	1981 a 2024

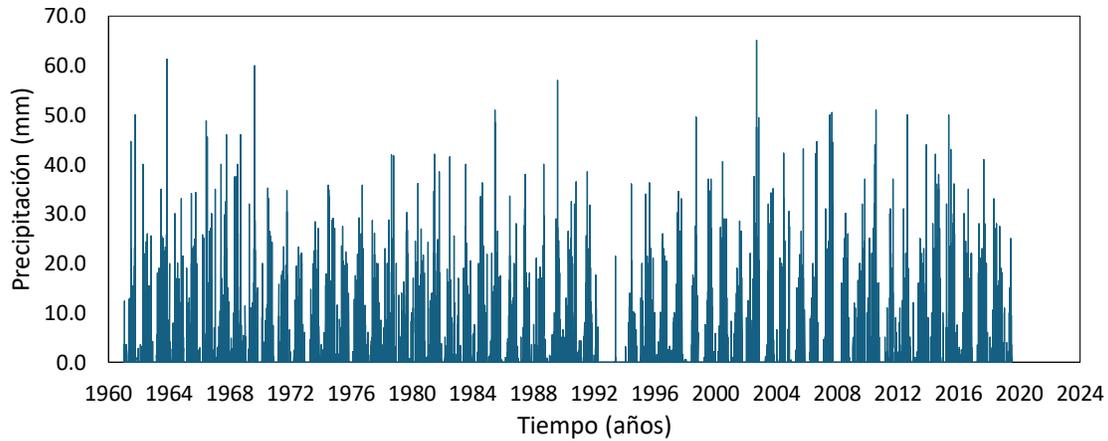


Figura 28. Lluvias diarias registradas en la estación C15151.

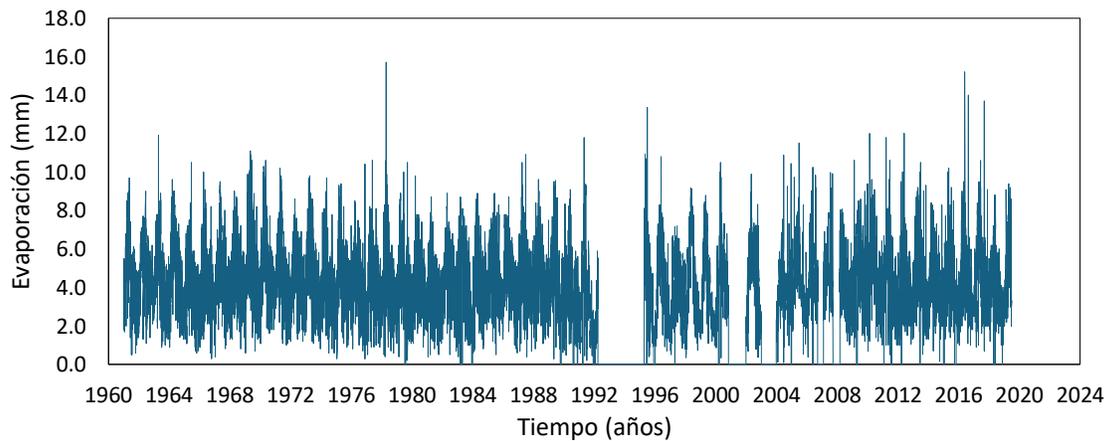


Figura 29. Evaporaciones diarias registradas en la estación C15151.

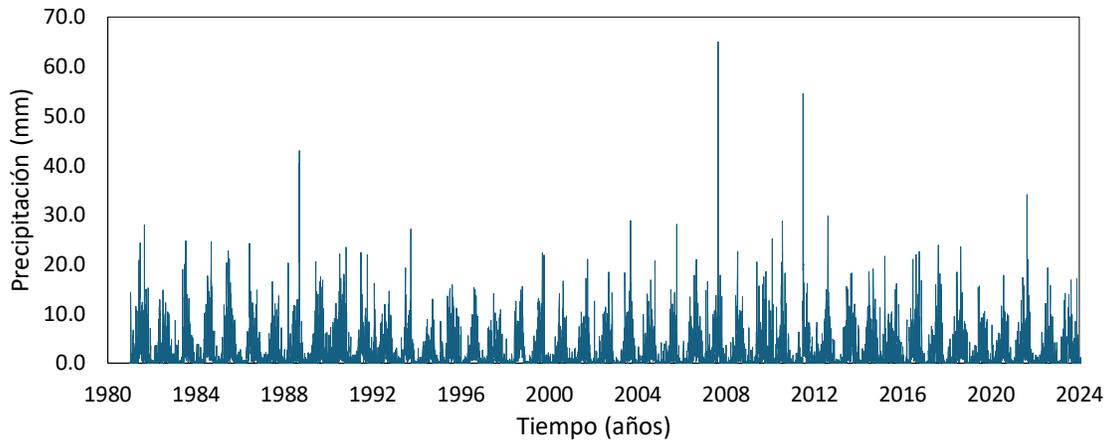


Figura 30. Lluvias diarias estimadas por POWER-NASA en la coordenada -99.25 y 19.75.

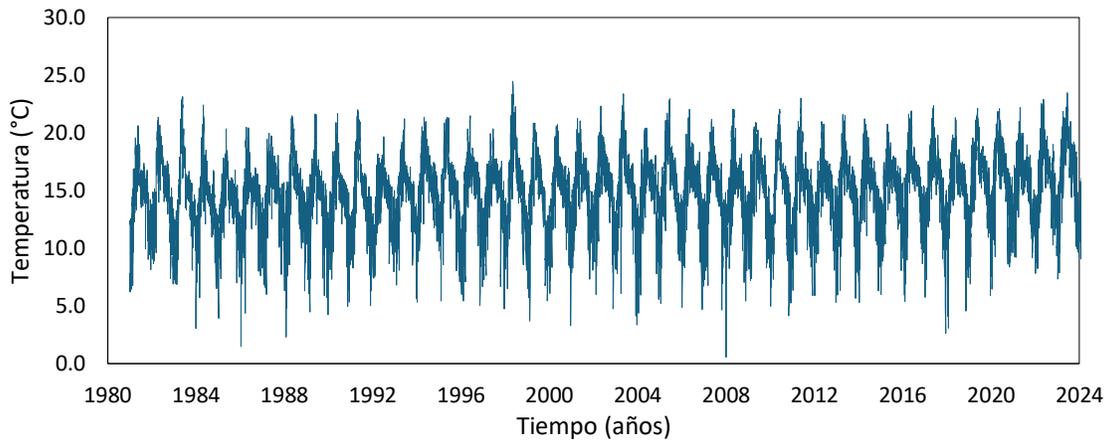


Figura 31. Temperaturas medias diarias estimadas por POWER-NASA en la coordenada -99.25 y 19.75.

2.3 Caudal Disponible para Reúso

Se considera caudal disponible para reúso a aquel caudal base que se pueda extraer del Gran Canal y del canal Santo Tomas e ingresarlo a la laguna a través de una o dos plantas de tratamiento (PTAR). Es ideal que este gasto base sea casi constante para una óptima operación de las PTAR.

Para estimar el caudal disponible en Gran Canal, se estima el flujo base en Q5 y se selecciona un gasto constante con una probabilidad de excedencia próxima al 95%. Actualmente, el caudal disponible en el canal Santo Tomas estaría descrito por la serie de escurrimientos en Q2, sin embargo, se estima el caudal base en Q1, pensando que se pueda restablecer la política de operación en la



obra de control del río Cuautitlán. Del mismo modo, se selecciona un gasto base constante con una probabilidad de excedencia próxima al 95%.

Los caudales en Q2 y Q3 se estiman directamente de los datos registrados en las hidrométricas B26165 y B26346. Del mismo modo, el caudal Q4, de las hidrométricas B26313 y K27MX, el caudal Q6, de la hidrométrica B26216 y el caudal Q7, de las hidrométricas B26007 y TTQMX.

El Caudal Q1 se estima como la suma de los caudales Q2 y Q3. El caudal Q5, como el 90% de la suma de los caudales Q6 y Q7, asumiendo que el flujo por el canal perimetral (que incluye las excedencias intermitentes de la laguna) no superaría el 10% del caudal que llega por el Gran Canal. Para estimar el caudal base en la serie se escurrimientos diarios, se aplica la expresión general de un filtro (low-pass) de un parámetro como se describe en Eckhardt (2005).

$$Q_t = B_t + F_t$$

$$B_t = a \cdot B_{t-1} + (1 - a) \cdot Q_t$$

Donde:

Q_t : escurrimiento superficial

B_t : flujo base

F_t : escurrimiento directo

a : constante de recesión

En las figuras 32 y 33 se muestran las series de escurrimientos medios diarios estimados en Q1 y Q5 y sus componentes de flujo base con sus respectivos rangos de variación. En el cuadro 3 se muestran los valores de caudal base estimados como caudal disponible para reúso a través de la laguna de Zumpango.

Cuadro 3. Caudal disponible para reúso a través de la laguna de Zumpango.

Corriente	Caudal disponible (m ³ /s)
Canal Santo Tomas	0.90
Gran Canal	3.50

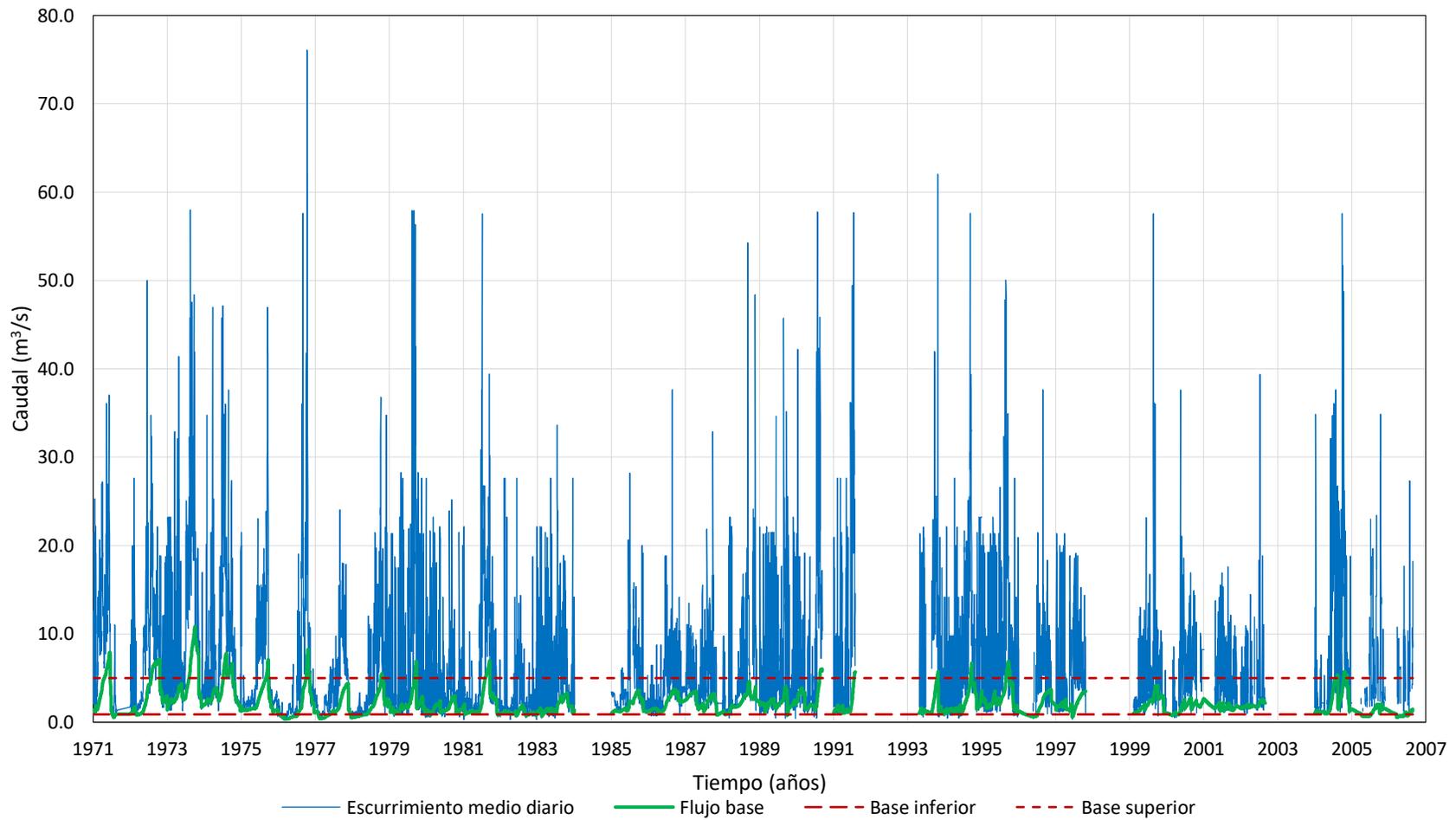


Figura 32. Escorrentamientos medios diarios en el río Cuautitlán antes de la derivación al canal Santo Tomas.

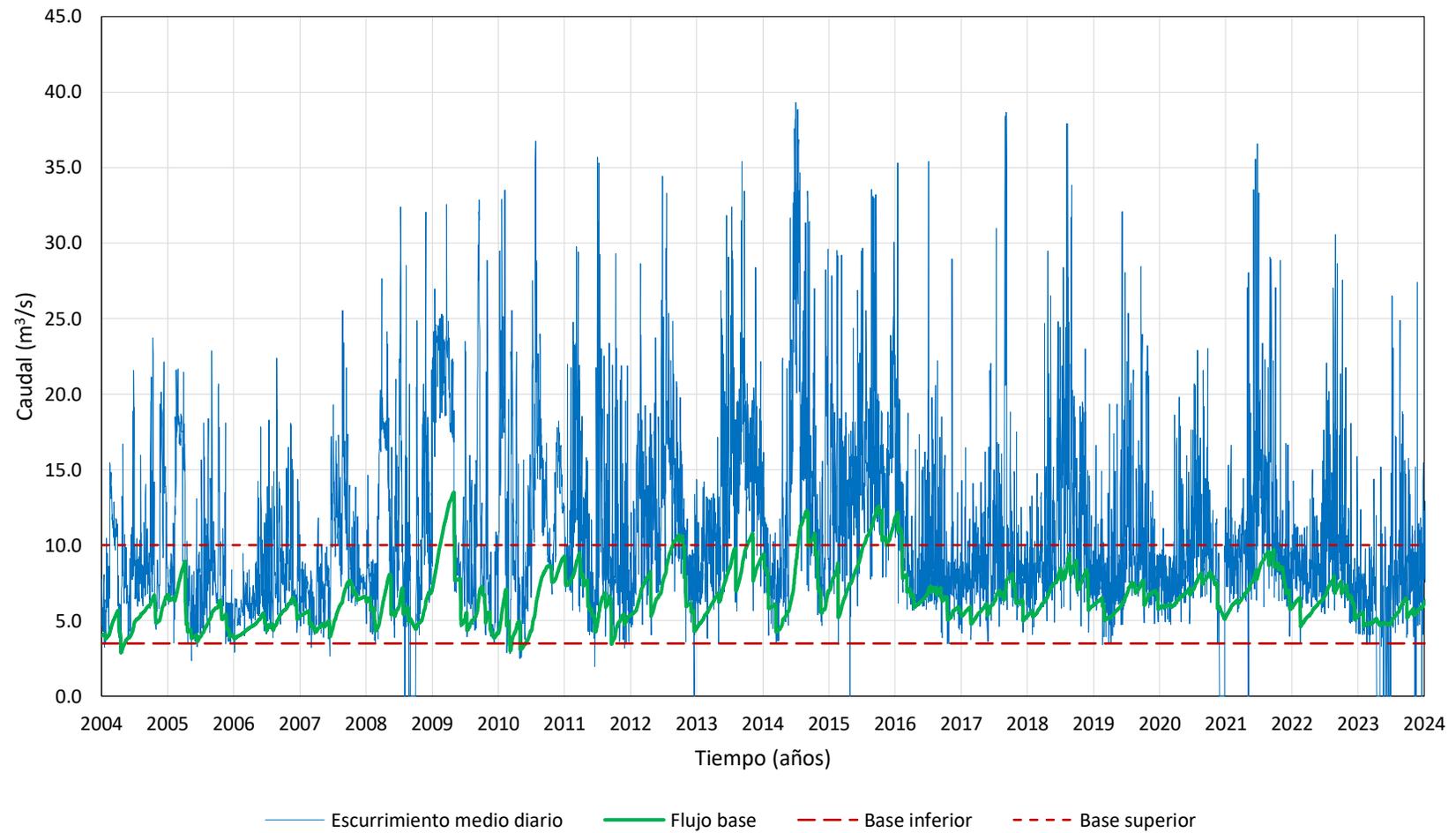


Figura 33. Escorrentamientos medios diarios en el Gran Canal a la altura de la laguna de Zumpango.



2.4 Avenidas de Diseño

Las avenidas de diseño también se estiman en Q1 y Q5, ya que a partir de estos sitios se tienen previstas las obras de control y excedencias necesarias para el proyecto.

Como en Q1 y Q5 se tienen estimados escurrimientos medios diarios, primero se estiman los volúmenes máximos de escorrentía directa, luego estos volúmenes se distribuyen con la forma del hidrograma adimensional del USDA (USDA, 0000) y, finalmente, se les añade una componente de flujo base. En el cuadro 4 se resumen las características de flujo estimadas para definir los hidrogramas unitarios en Q1 y Q5.

Cuadro 4. Características del flujo hasta la laguna de Zumpango.

Característica	Gran Canal	Rio Cuautitlán
Longitud de flujo (km)	120.0	70.0
Tiempo de concentración (h)	19.7	9.7
Tiempo base (h)	48.0	24.0
Tiempo al pico (h)	18.0	9.0
Flujo base (m ³ /s)	6.50	2.20

En función de los tiempos de concentración estimados hasta la laguna de Zumpango, se reconoce que una tormenta en la Cuenca del valle de México generaría un hidrograma de respuesta de 24 h hasta Q1 y de 48 h hasta Q5. Por esta razón, para el hidrograma unitario en Q1 se adoptan los volúmenes máximos anuales de 1 día, y en Q5 se adoptan los volúmenes máximos anuales de 2 días consecutivos.

Para estimar los volúmenes de escorrentía directa para diferentes periodos de retorno, se ajustaron diferentes funciones de distribución de probabilidad a las series de volúmenes máximos anuales, y se adoptó aquella con un menor error estándar de ajuste. En el cuadro 5 se muestra una relación de las funciones de distribución de probabilidad contrastadas y los errores de ajuste obtenidos.

En ambos casos, las distribuciones con un Error Estándar de Ajuste menor fueron las de valores extremos mixtas (Gumbel Mixta y Weibull Mixta). En las figuras 34 y 35 se muestra la distribución de probabilidad de los volúmenes de escorrentía directa en Q1 y Q5.



Cuadro 5. Funciones de distribución de probabilidad utilizadas para estimar los volúmenes de escorrentía directa máximos anuales.

Función de Probabilidad Acumulada	Error Estándar de Ajuste (m ³ /s)	
	Gran Canal	Rio Cuautitlán
Pearson tipo III (Gamma)	113.3	220.0
Log-Pearson III	145.7	261.9
Log-Normal	138.1	252.0
Valores Extremos tipo I (Gumbel)	156.4	238.3
Valores Extremos tipo II (Frechet)	316.4	497.7
Valores Extremos tipo III (Weibull)	136.6	225.6
Gumbel Mixta (EV11)	90.8	198.8
Weibull Mixta (EV33)	98.4	209.3

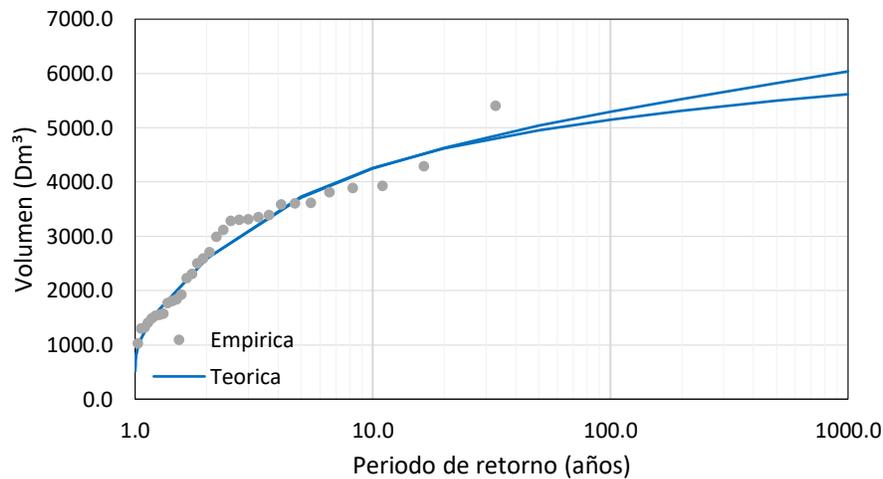


Figura 34. Distribución de probabilidad de volúmenes de escorrentía directa en el rio Cuautitlán antes de la derivación al canal Santo Tomas.

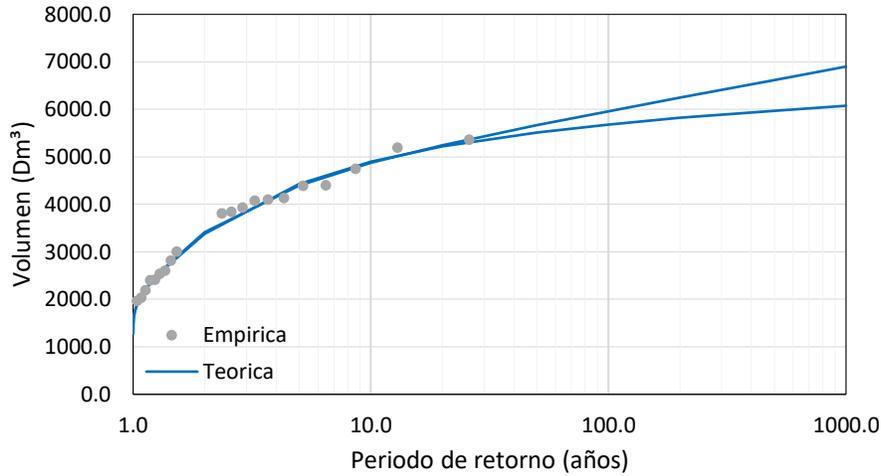


Figura 35. Distribución de probabilidad de volúmenes de escorrentía directa en Gran Canal a la altura de la laguna de Zumpango.

En el cuadro 6 se resumen los gastos máximos anuales de escorrentía directa estimados para diferentes periodos de retorno. En las figuras 36 y 37, se muestran los hidrogramas adimensionales obtenidos en Q1 y Q5. Para obtener los hidrogramas de escorrentía total, o de diseño, se debe agregar el caudal base correspondiente (ver Cuadro 4).

Cuadro 6. Gastos máximos anuales de escorrentía directa.

Periodo de retorno (años)	Gasto pico (m³/s)	
	Gran Canal	Rio Cuautitlán
1000	75.1	139.8
500	72.9	134.9
200	69.8	128.1
100	67.4	122.6
50	64.7	116.6
20	60.5	107.3
10	56.5	98.2
5	51.1	86.0
2	39.3	60.0

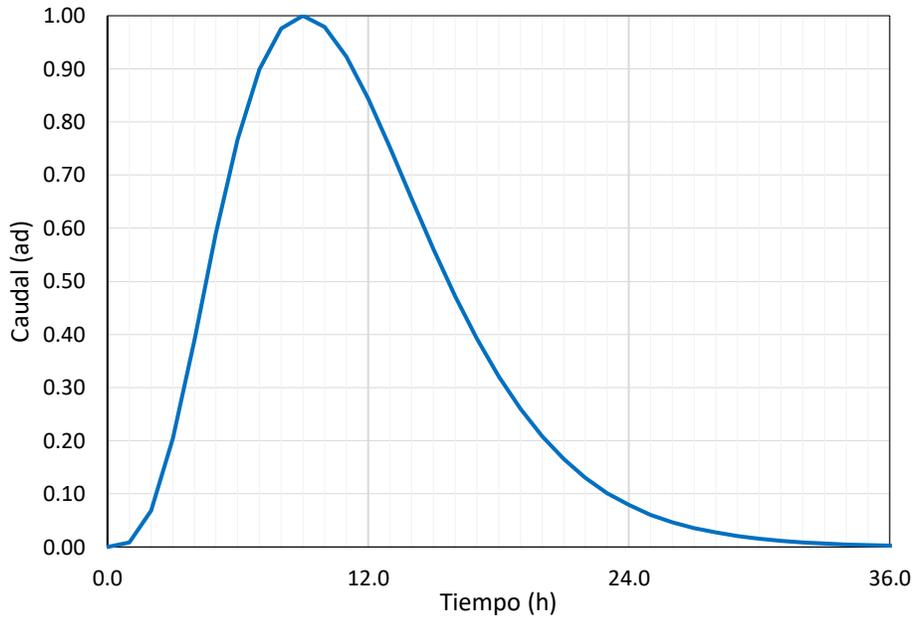


Figura 36. Hidrograma adimensional de escorrentía directa en el río Cuautitlán antes de la derivación al canal Santo Tomas.

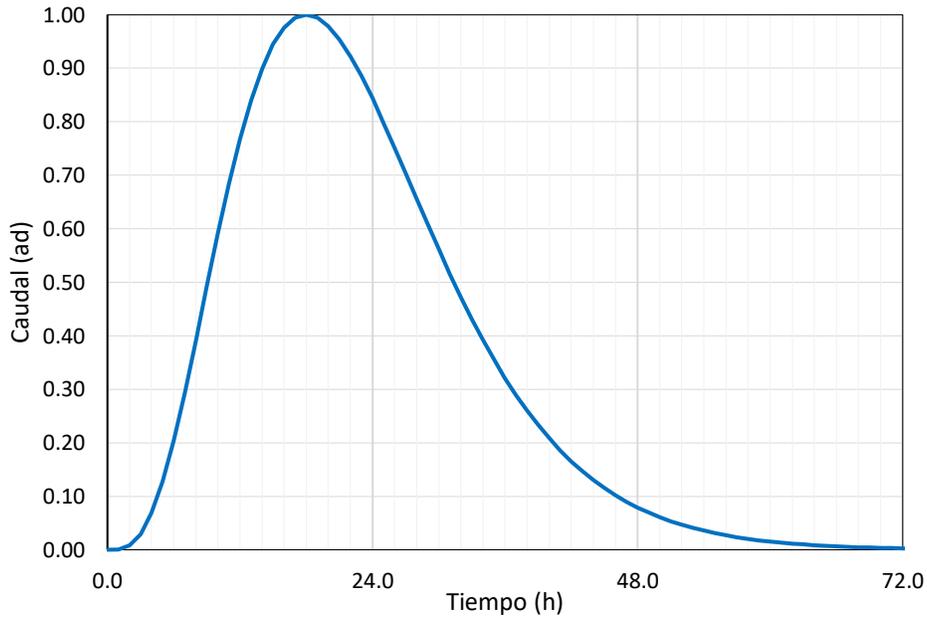


Figura 37. Hidrograma adimensional de escorrentía directa en el Gran Canal a la altura de la laguna de Zumpango.



2.5 Lluvias y Evaporaciones en la Laguna

Se asume que las series de lluvias y evaporaciones reconstruidas a partir de los registros en la estación climatológica C15151, y la información climatológica satelital proporcionada por el proyecto POWER-NASA, son representativas de las lluvias y evaporaciones que ocurren actualmente en la laguna.

En el cuadro 7 se muestran los valores de precipitación y evaporación anual estimados en la laguna de Zumpango para el periodo de 1981 al 2024. En las figuras 38 y 39, se muestran los hietogramas de precipitación y evaporación mensuales estimados para el mismo periodo.

Cuadro 7. Lluvia y evaporación media anual en laguna de Zumpango.

Variable	Valor Medio Anual (mm)
Precipitación anual	604.3
Evaporación anual	1561.2

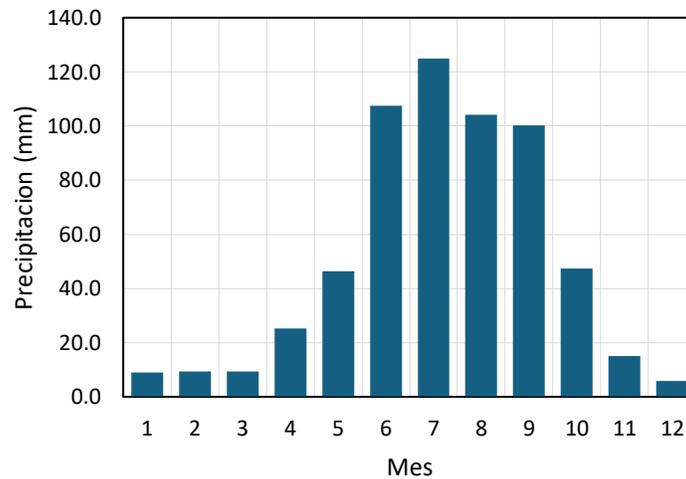


Figura 38. Lluvias medias mensuales en la laguna de Zumpango.

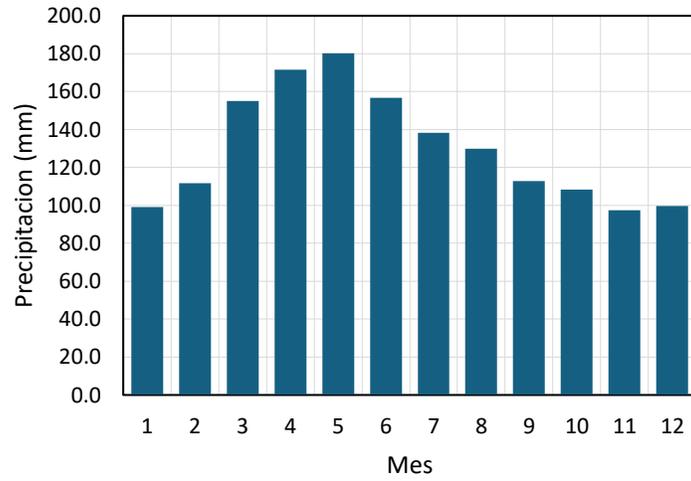


Figura 39. Evaporaciones medias mensuales en la laguna de Zumpango.



Capítulo 3

Propuesta Conceptual de Humedales para el Reúso de Agua Tratada a través de la Laguna de Zumpango



III. Propuesta Conceptual de Humedales para el Reúso de Agua Tratada a través de la Laguna de Zumpango

3.1 Humedal Artificial

Los humedales de forma natural son ecosistemas muy dinámicos, debido a que estos son sitios de transición entre los ambientes terrestre y acuático, por lo tanto tienen una gran importancia ambiental, ya que los además de ser grandes reservorios de biodiversidad de micro y macroorganismos hablando de anfibios, reptiles, algunos mamíferos y un gran número de aves acuáticas, así como una amplia variedad de especies vegetales acuáticas o semiacuáticas, a su vez otorgan servicios ambientales, como el secuestro de carbono en forma de dióxido de carbono (CO₂).

Por otro lado, los humedales artificiales son infraestructuras basadas en la naturaleza que buscan recrear las cadenas de nutrientes, logrando una estabilización de los ecosistemas acuáticos, ofreciendo beneficios ecológicos tecnológicos y sociales. Dentro de los beneficios ambientales se encuentran:

- Regulación térmica del ambiente
- Secuestro de carbono
- Retención de contaminantes
- Transparentan el agua con la estabilización de sedimentos suspendidos
- Brindan refugio para estadios tempranos de animales como peces, anfibios y aves
- Recrean ecosistemas nativos o los complementan para establecer las cadenas de nutrientes deterioradas

No obstante, este tipo de infraestructura trae consigo beneficios sociales como:

- Espacios de recreo y entretenimiento para distintos sectores de la sociedad
- Otorga valor visual como paisaje
- Desarrollo urbano sostenible
- Valor cultural

Otro valor importante de los humedales artificiales ubicados en zonas urbanas colindantes, es que pueden ser utilizados como propuestas biotecnológicas en materia de biorremediación por medio del uso de plantas o microorganismos que gracias a sus características fisiológicas son capaces de amortiguar, mitigar y disminuir los impactos de contaminación acuática, además de que se pueden implementar como alternativa de depuración de agua posterior a un tratamiento primario de aguas residuales.



Debido a lo antes mencionado, los humedales artificiales desempeñan un papel importante en la descentralización de sistemas de tratamiento de aguas residuales, debido a sus características como "sistemas basados en la naturaleza" de fácil aplicación, con un óptimo costo, un uso eficaz y bajas exigencias operativas.

Son generalmente diseñados para la eliminación de contaminantes en aguas residuales como:

- Materia orgánica (medida como DBO5 y DQO, Demanda Biológica o Demanda Química de Oxígeno)
- Sólidos suspendidos totales (SST)
- Nutrientes (nitrógeno y fósforo)
- Patógenos, metales pesados y otros contaminantes

El proceso de tratamiento de estos contaminantes se basa en una serie de procesos biológicos y físicos (adsorción, precipitación, filtración, nitrificación, depredación, descomposición, etc.). El proceso más importante es la filtración biológica que se realiza por la formación de la biopelícula que se compone por bacterias aerobias y facultativas.

Sin embargo, para utilizar los humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales se requiere cumplir con ciertas consideraciones y requisitos, ya que al ser un "sistema de baja carga" debe tener suficiente espacio disponible, por lo que el espacio requerido es mayor en comparación a los sistemas convencionales.

En cuanto al clima de la zona, es preferible que no tengan períodos largos de heladas, en caso de que exista este tipo de condiciones, se puede adaptar el diseño los humedales artificiales para bien en este tipo de climas. Se recomienda tener condiciones totales de luz solar, debido a que es necesario que el área superficial se pueda secar de forma regular, en caso de generarse excesivas sombras en el proyecto se corre el riesgo de obstrucción debido al crecimiento excesivo de la biopelícula.

3.2 Elementos ingenieriles

Los humedales de forma natural son ecosistemas muy dinámicos, debido a que estos son sitios de transición entre los ambientes terrestre y acuático, por lo tanto tienen una gran importancia ambiental, ya que los además de ser grandes reservorios de biodiversidad de micro y macroorganismos hablando de anfibios, reptiles, algunos mamíferos y un gran número de aves acuáticas, así como una amplia variedad de especies vegetales acuáticas o semiacuáticas, a su vez otorgan servicios ambientales, como el secuestro de carbono en forma de dióxido de carbono (CO₂).



Por otro lado, los humedales artificiales son infraestructuras basadas en la naturaleza que buscan recrear las cadenas de nutrientes, logrando una estabilización de los ecosistemas acuáticos, ofreciendo beneficios ecológicos tecnológicos y sociales. Dentro de los beneficios ambientales se encuentran:

- Regulación térmica del ambiente
- Secuestro de carbono
- Retención de contaminantes
- Transparentan el agua con la estabilización de sedimentos suspendidos
- Brindan refugio para estadios tempranos de animales como peces, anfibios y aves
- Recrean ecosistemas nativos o los complementan para establecer las cadenas de nutrientes deterioradas

No obstante, este tipo de infraestructura trae consigo beneficios sociales como:

- Espacios de recreo y entretenimiento para distintos sectores de la sociedad
- Otorga valor visual como paisaje
- Desarrollo urbano sostenible
- Valor cultural

Otro valor importante de los humedales artificiales ubicados en zonas urbanas colindantes es que pueden ser utilizados como propuestas biotecnológicas en materia de biorremediación por medio del uso de plantas o microorganismos que gracias a sus características fisiológicas son capaces de amortiguar, mitigar y disminuir los impactos de contaminación acuática, además de que se pueden implementar como alternativa de depuración de agua posterior a un tratamiento primario de aguas residuales.

Debido a lo antes mencionado, los humedales artificiales desempeñan un papel importante en la descentralización de sistemas de tratamiento de aguas residuales, debido a sus características como "sistemas basados en la naturaleza" de fácil aplicación, con un óptimo costo, un uso eficaz y bajas exigencias operativas.

Son generalmente diseñados para la eliminación de contaminantes en aguas residuales como:

- Materia orgánica (medida como DBO5 y DQO, Demanda Biológica o Demanda Química de Oxígeno)
- Sólidos suspendidos totales (SST)
- Nutrientes (por ejemplo, nitrógeno y fósforo)
- Patógenos, metales pesados y otros contaminantes



El proceso de tratamiento de estos contaminantes se basa en una serie de procesos biológicos y físicos (adsorción, precipitación, filtración, nitrificación, depredación, descomposición, etc.). El proceso más importante es la filtración biológica que se realiza por la formación de la biopelícula que se compone por bacterias aerobias y facultativas.

Sin embargo, se requieren ciertas consideraciones y requisitos para poder utilizar humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Al ser un "sistema de baja carga" debe tener suficiente espacio disponible ya que, requiere de un mayor espacio que los sistemas convencionales.

En cuanto al clima de la zona, es preferible que no tengan períodos largos de heladas, en caso de que exista este tipo de condiciones, se puede adaptar el diseño los humedales artificiales para bien en este tipo de climas. Se recomienda tener condiciones totales de luz solar, debido a que es necesario que el área superficial se pueda secar de forma regular, en caso de generarse excesivas sombras en el proyecto se corre el riesgo de obstrucción debido al crecimiento excesivo de la biopelícula.

3.3 Especies vegetales

Un punto importante a considerar para la implementación de este tipo de infraestructura verde, es el tipo de vegetación que se colocará, porque la vegetación empleada con fines de fitorremediación debe cumplir con una serie de puntos importantes, dentro de los cuales destacan.

- Altas tasas de crecimiento y producción de biomasa
- Arquitectura radicular compleja y ramificada
- Amplia distribución, así como un amplio potencial de adaptación para diferentes ambientes
- Alta tolerancia para las fluctuaciones en las características fisicoquímicas del agua y en la diversidad de contaminantes
- Alta resistencia contra patógenos
- Ser de fácil cultivo y cosecha

Otra manera con la cual se pretende realizar la remoción de contaminantes es por medio de las macrófitas, ya que pueden realizar la remoción mediante la asimilación de contaminantes en el agua, tales como nutrientes o elementos esenciales (ej. Nitrógeno, Fósforo, Aluminio, Zinc, etc.), también tienen la capacidad de remover y degradar contaminantes complejos (ej. polifenoles, hormonas, residuos de medicamentos, toxinas, etc.) hasta su almacenamiento o su volatilización.



Teniendo en cuenta esto último, hay una amplia variedad de especies vegetales que se han utilizado para la construcción de humedales artificiales dentro de la Ciudad de México, los cuales tienen la finalidad no solo de fomentar las áreas verde-azules de este tipo para uso recreativo, si no para el mejoramiento de aguas residuales, por ejemplo: el humedal de Chapultepec, el bajo puente de Cuemanco, Humedal Cuitláhuac, Humedal Cuauhtepc y Canal Nacional. Dentro de las especies vegetales que destacan en los sitios mencionados son: *Eleocharis macrostachya*, *Schoenoplectus americanus*, *Juncus effusus*, *Wolffia columbiana*, *Potamogeton illioensis*, *Typha latifolia*, *Beerula erecta*, *Hydrocotyle ranunculoides*, *Ceratophyllum demersum*.

3.4 Tipos de humedales

3.4.1 Humedales Flotantes

Los sistemas de humedales flotantes se realizan utilizando estructuras de soporte para macrófitas acuáticas (figura 40). Son altamente utilizadas y efectivas para fines de purificación. Este tipo de depuración permite tratar grandes volúmenes de agua en espacios relativamente pequeños y es adecuado para el tratamiento de aguas residuales en canales, ríos y acequias, pero también se puede realizar dentro de tanques instalados adecuadamente. El desarrollo de las raíces de las plantas y para exceder el metro de profundidad, desempeñando un papel importante de filtración física y absorción de efecto nutritivo y purificador combinado con comunidades microbianas simbióticas. Las plantas no sufren las fluctuaciones estacionales normales en el nivel del agua en la medida que flotan sobre él y, por lo tanto, el peligro de un período de sequía más o menos largo que deteriora su vitalidad (Borin et al., 2012 y Cross et al., 2021).



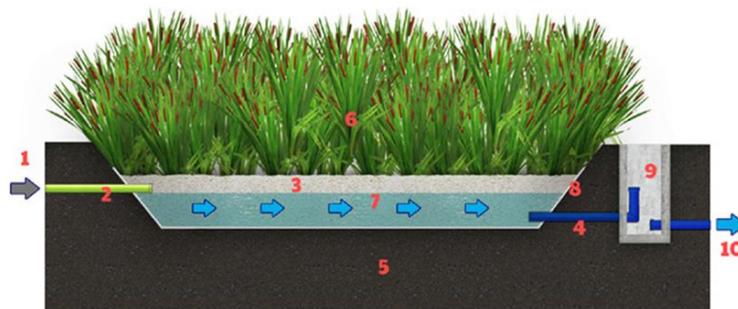
Figura 40. Corte esquemático humedal flotante, componentes del humedal



Figura 41. Ejemplo de Islas flotantes en el Parque Ecológico de Xochimilco, Ciudad de México.

3.4.2 Humedales de tratamiento de flujo horizontal (FTWS)

Los humedales de tratamiento de flujo horizontal (FTWS) consisten en bases cubiertas con sustrato, el cual suele ser grava, plantados con plantas macrófitas de formas de vida enraizadas emergentes, estos humedales promueven el flujo horizontal a través de los medios filtrantes. Los medios están completamente saturados con agua y pueden crear un ambiente anóxico, manteniendo un flujo subterráneo. Las partículas se retienen por colado o filtración, los solubles se absorben parcialmente de forma abiótica o biótica. La transformación adicional y la degradación de las sustancias retenidas se produce debido a procesos químicos y principalmente biológicos en los medios de filtro. La zona radicular proporciona un entorno altamente activo para la unión de biopelículas, oxígeno e intercambio, y sostiene el flujo hidráulico.



- | | |
|-----------------------------|--------------------------------------|
| 1 - Entrada | 6 - Plantas |
| 2 - Sistema de alimentación | 7 - Nivel de agua saturada |
| 3 - Medio poroso | 8 - Revestimiento impermeable |
| 4 - Sistema de drenaje | 9 - Boca de inspección de regulación |
| 5 - Suelo original | 10 - Salida |

Figura 42. Corte esquemático humedal flujo horizontal, componentes del humedal.



3.4.3 Sistema de Macrófitas Sumergidas

El sistema de macrófitas sumergidas es un tipo de humedales de flujo horizontal que utiliza plantas acuáticas de forma de vida sumergida, para transferir, estabilizar o eliminar contaminantes en las aguas residuales que tienen impacto negativo en los ecosistemas acuáticos debido a la introducción de nitrógeno, fósforo y contaminantes emergentes en el sistema. El Sistema es una fitorremediación (fito = planta y remediar = corregir) que utiliza una variedad de plantas para descomponer, extraer o retener los contaminantes presentes tanto en los suelos como en agua. Esta tecnología ha sido considerada como una alternativa de mitigación de contaminación y una opción de bajo costo en comparación con otros métodos, como biorreactores de membrana y otros (Moshiri, 1993, Nimptsch, et al. 2008, Pflugmacher et al., 2015).

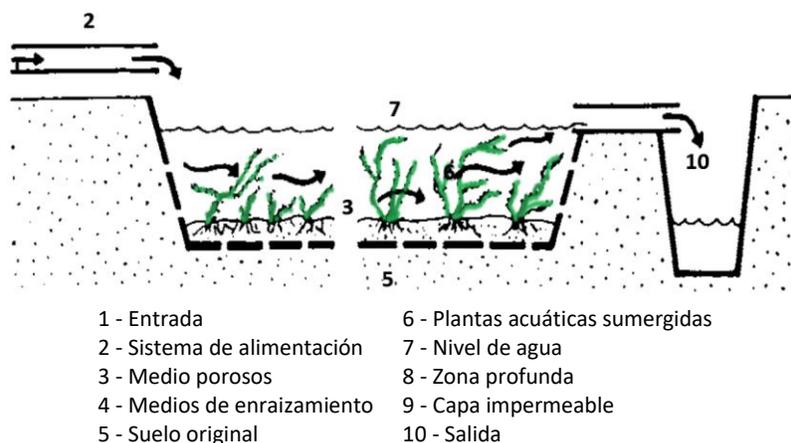
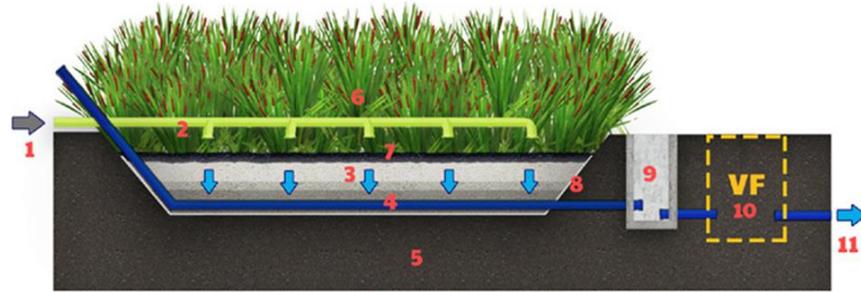


Figura 43. Corte esquemático humedal de macrófitas sumergidas, componentes del humedal.

3.4.4 Humedal tipo francés o de Flujo Vertical

El humedal de tratamiento consta de dos etapas verticales posteriores con diferentes medios filtrantes. El diseño específico y esquema de funcionamiento permite un tratamiento de aguas residuales brutas después de pasar una simple criba. En particular, la primera etapa recibe aguas residuales brutas. Los lodos se acumulan y se mineralizan en la superficie; esto permite una operación sin eliminar este depósito de capa (20 cm máximo) entre 10 y 15 años. La segunda etapa suele ser un flujo vertical clásico, pero puede sustituirse por otras etapas de humedales para respetar la calidad del agua específica del contexto regulaciones (por ejemplo, flujo horizontal (HF) para desnitrificación) (Tondera et al., 2021).

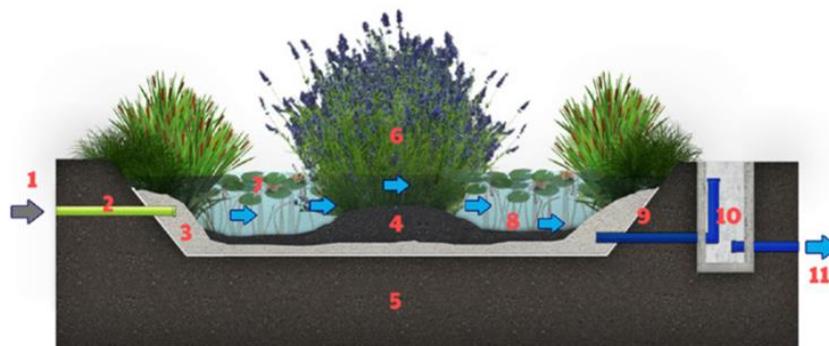


- | | |
|-----------------------------|--------------------------------------|
| 1 - Entrada | 7 - Capa de lodo |
| 2 - Sistema de alimentación | 8 - Revestimiento impermeable |
| 3 - Medio poroso | 9 - Boca de inspección de regulación |
| 4 - Sistema de drenaje | 10 - Segunda etapa de flujo vertical |
| 5 - Suelo original | 11 - Salida |
| 6 - Plantas | |

Figura 44. Corte esquemático humedal flujo vertical, componentes del humedal.

3.4.5 Humedal de tratamiento superficial de agua libre

Un humedal de tratamiento superficial de agua libre (FWS-TW) es más parecido a un humedal natural y se caracteriza por tener a lo largo del humedal un espejo de agua de 0.5 a 1 metro de profundidad. Se puede usar una combinación de diferentes tipos de plantas acuáticas y de humedales (flotantes, emergentes, y sumergidos) en áreas de aguas abiertas. La estructura de las distintas plantas sirve como sustrato físico para la biopelícula, mientras que las propias plantas incorporan amoníaco, nitrógeno y fósforo. Una parte importante de la biomasa vegetal se encuentra en la rizosfera. con planta la senescencia, los detritos y la basura se acumulan en el fondo, formando una estera en la superficie, y afectan el ciclo interno de las sustancias.



- | | |
|--|---|
| 1 - Entrada | 7 - Nivel de agua |
| 2 - Sistema de alimentación | 8 - Zona profunda |
| 3 - Medio poroso | 9 - Capa impermeable (geomembrana o arcilla compacta) |
| 4 - Medios de enraizamiento | 10 - Boca de inspección de regulación |
| 5 - Suelo original | 11 - Salida |
| 6 - Diferentes plantas acuáticas correspondientes a diferentes niveles de agua | |

Figura 45. Corte esquemático humedal flujo superficial, componentes del humedal.



3.5 Propuesta de Humedales para el lago de Zumpango

Dentro del Lago de Zumpango se plantea la construcción de dos macro humedales artificiales para mejorar la calidad de agua proveniente de las plantas de tratamiento de agua residual. Además, se plantea la construcción de un humedal para tratar las aguas negras excedentes que se descargan al Lago de Zumpango, con la intención de retirar la mayor carga de contaminantes que se presenta en el flujo del agua.



Figura 46. Ubicación propuesta para los humedales dentro del Lago de Zumpango, Estado de México.

3.5.1 Humedales para el reúso de agua tratada

Los humedales para el tratamiento del agua se colocarán tanto a la izquierda como a la derecha del Lago de Zumpango y tendrán una configuración similar, procurando que cada humedal funcione con una capacidad de tratamiento de 1.5 m³/s. Los humedales tendrán tres secciones los cuales se mantendrán separados del Lago mediante un bordo, de esta manera las aguas que pasan por los humedales tendrán una calidad diferente al agua del lago, las secciones del humedal se dividirán en:

1. Humedal superficial de flujo libre, el cual se encargará de un primer tratamiento del agua tratada que ingresa, esta sección se enfocará en la precipitación de sedimentos y oxigenación de la zona superficial del humedal por medio de dinámica de vientos.
2. Seguido al humedal de flujo libre se realizará una “barrera” replicando el modelo de chinampas, este módulo se encargará principalmente de filtrar contaminantes químicos que puedan ser absorbidos dentro del sedimento de las chinampas



(metales pesados, contaminantes emergentes, entre otros). Al interior de estas chinampas se proyecta la colocación de vegetación tolerante a la humedad radicular alta, como berro (*Berula erecta*), chilillo (*Polygonum mexicanum*), ahuejote (*Salix bomplandiana*) entre otros.

3. Seguido a la sección de las chinampas, se encontrará un humedal tipo de flotante libre, compuestos por macrófitas de forma de vid flotante libre, como lechuguilla (*Pistia stratiotes*), lirio acuático (*Eichhornia crassipes*), entre otras; en esta zona se procesará la remoción de contaminantes como nutrientes y entre las plantas y algunos organismos como microalgas, bacterias del tipo coliforme y algunos otros patógenos se generarán relaciones competitivas por nutrientes.
4. Por último, en la zona colindante a la zona urbana se replicará el modelo de chinampas, evitando de esta manera que algún contaminante entre en contacto con la población.



Gasto de tratamiento (Qt)	Qt : 1.50 m3/s
Volumen de tratamiento por día (Vt)	Vt : 1,5 x 86,400 Vt : 129,600 m3/día
Tiempo de retención (Tr)	Tr : 5 días
Volumen de retención (Vr)	Vr : 129,600 x 5 Vr : 648,000 m3
Área requerida (Ar)	Ar : 648,000 / 0.5 Ar : 1,296,000 / 10,000 Ar : 126 hectáreas

Figura 47. Secciones del humedal 1 para Lago de Zumpango.



Gasto de tratamiento (Qt)	Qt : 1.50 m3/s
Volumen de tratamiento por día (Vt)	Vt : 1,5 x 86,400 Vt : 129,600 m3/día
Tiempo de retención (Tr)	Tr : 5 días
Volumen de retención (Vr)	Vr : 129,600 x 5 Vr : 648,000 m3
Área requerida (Ar)	Ar : 648,000 / 0.5 Ar : 1,296,000 / 10,000 Ar : 126 hectáreas

Figura 48. Secciones del humedal 2 para Lago de Zumpango.



El área necesaria para tratar $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ se obtiene al considerar que el agua tratada tendrá un tiempo de retención dentro del sistema de 5 días y debido al tipo de humedales, el tirante de agua alcanzará un promedio de 0.5m, por lo que el área estimada por humedal es de 126 hectáreas.

Como parte de los humedales de tratamiento se propone la existencia de dos cuerpos de agua, los cuales funcionarán como buffer de almacenamiento entre los humedales artificiales y las plantas potabilizadoras, manteniendo el agua que ha pasado por el humedal separada del agua del Lago de Zumpango. El segundo cuerpo de agua además de operar como un almacenamiento, funcionará como una pista de canotaje para realizar actividades recreativas.



Figura 49. Ubicación propuesta para los cuerpos de agua.

3.5.2 Humedales para el tratamiento de excedentes pluviales

El tercer humedal artificial se localizará cerca del ingreso del canal Santo Tomas, este humedal recibirá el agua pluvial excedente que se descarga dentro del Lago de Zumpango.

Previo al humedal de tratamiento, se colocará un sedimentador tipo vórtice (Nautilus Pond) para retirar sedimentos y otros contaminantes gruesos que sean arrastrados por el canal. El sedimentador tipo vórtice protegerá al humedal artificial, previniendo que los sedimentos se acumulen en el humedal o en el Lago de Zumpango.



Figura 50. Ubicación propuesta para el tercer humedal.

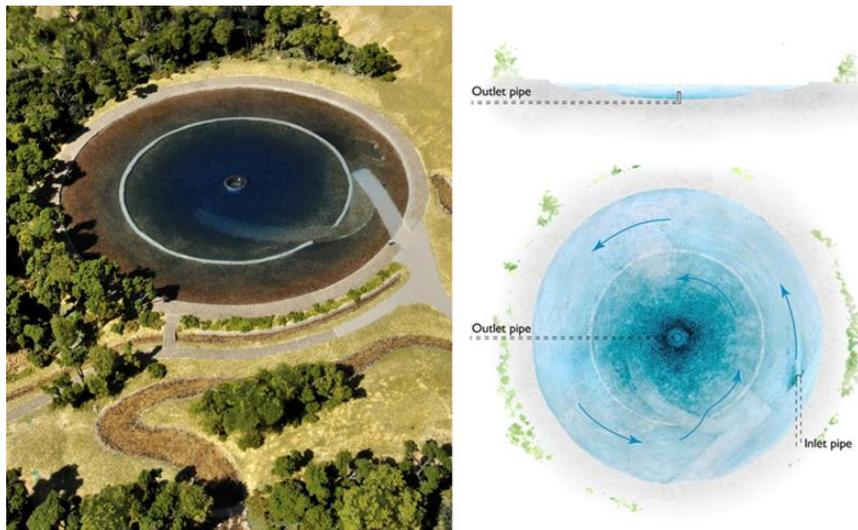


Figura 51. Sedimentador Vórtice Nautilus Pond, Canada, Soluciones Hidropluviales/ Source2Source.

El área propuesta para este humedal es de 41 hectáreas, el humedal realizará un tratamiento adecuado del agua que ingresa a través del canal, si bien el área de este humedal es menor en comparación a los anteriores, el agua excedente es una combinación entre agua residual y pluvial proveniente de la CDMX, por lo que su carga de contaminantes es menor a comparación al agua exclusivamente sanitaria y por ende su tratamiento no requiere de un área tan extensa.



3.5.1 Especies vegetales para los humedales

A continuación, se muestra una lista de posibles especies vegetales para el humedal de Xochimilco.

Sección de humedal de flujo superficial:

- *Phragmites australis*.
- *Typha latifolia*.
- *Sagittaria macrophylla*.

Sección de humedal macrófitas sumergidas:

- *Elodea* sp.
- *Ceratophyllum demersum*.
- *Najas minor*.

Sección de Islas flotantes:

- *Nymphaea* sp.
- *Pistia stratiotes*.
- *Eichhornia crassipes*.
- *Lemna minor*.



Figura 52. *Phragmites australis*.



Figura 53. *Typha latifolia*.



Figura 54. *Sagittaria macrophylla*.



Figura 55. *Elodea sp.*

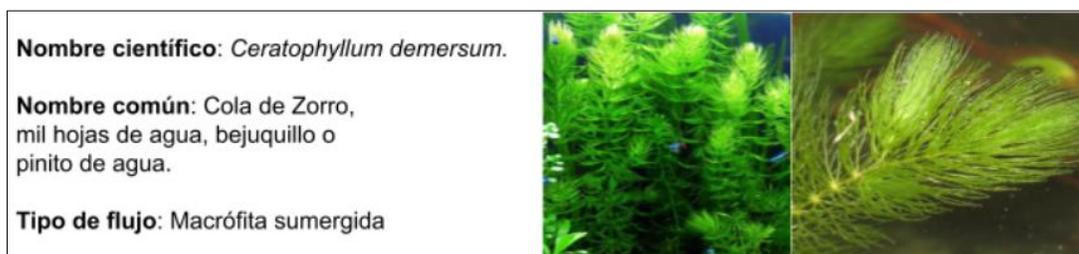


Figura 56. *Ceratophyllum demersum*.



Figura 57. *Najas minor*.



Figura 58. *Nymphaea sp.*



Nombre científico: *Pistia stratiotes*.

Nombre común: repollo del agua o lechuga de agua

Tipo de flujo: Superficial



Figura 59. *Pistia stratiotes*.

Nombre científico: *Eichhornia crassipes*.

Nombre común: Jacinto de agua, lirio acuático, flor de bora, buchón de agua, camalote, aguapey, lechuguín, tarope, tarulla, taruya o reyna

Tipo de flujo: Superficial



Figura 60. *Eichhornia crassipes*.

Nombre científico: *Lemna minor*.

Nombre común: Lenteja de agua.

Tipo de flujo: Superficial

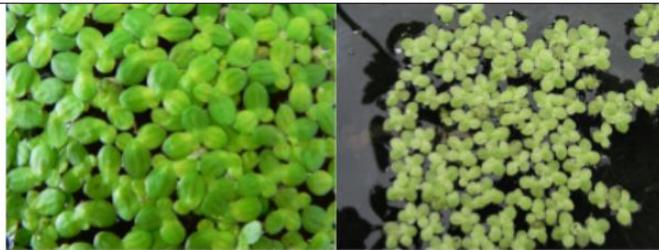


Figura 61. *Lemna minor*.



Capítulo 4

Propuesta Conceptual de Tratamiento para el Reúso de Aguas Residuales a través de la Laguna de Zumpango



IV. Propuesta Conceptual de Tratamiento para el Reúso de Aguas Residuales a través de la Laguna de Zumpango

4.1 Descripción General

La Laguna de Zumpango, ubicada en el Estado de México, es un cuerpo de agua clave para la región, pero enfrenta serios problemas de contaminación. La principal fuente de deterioro proviene de descargas de aguas residuales domésticas y comerciales, las cuales han incrementado los niveles de materia orgánica, organismos patógenos y coliformes. Esto genera riesgos para la salud pública y la biodiversidad, además de limitar el potencial de reutilización de este recurso hídrico.

Esta propuesta propone tratar al menos 2 m³/s, a través de 2 plantas de tratamiento con una capacidad de 1 m³/s cada una. El proyecto contempla que el agua tratada pueda ser potabilizada y usada para consumo humano. El tratamiento se propone mediante un sistema modular de tratamiento de aguas residuales que asegura sostenibilidad, eficiencia y flexibilidad para adaptarse al crecimiento de la región. La combinación de tecnologías anaerobias y aerobias garantiza un tratamiento óptimo y cumplimiento normativo. Con un área estimada de 8 a 9 hectáreas, el diseño permite un balance entre espacio, eficiencia y escalabilidad, garantizando un impacto positivo para la Laguna de Zumpango y las comunidades locales.

4.2 Propuesta Tecnológica

La propuesta consiste en un sistema de tratamiento de aguas residuales modular y escalable que combine tecnologías anaerobias y aerobias, garantizando el cumplimiento de la **NOM-001-SEMARNAT-2021** y permitiendo la reutilización del agua tratada para usos agrícolas o recarga de acuíferos, e inclusive llevarla mediante tratamiento adicional a potabilización para consumo humano.

4.2.1 Esquema Modular de Tratamiento

- **Capacidad:** 1,000 L/s, dividido en módulos de **250 L/s**.
- **Beneficio:** Escalabilidad y adaptabilidad para futuras necesidades.



- **Área Requerida: 8 a 9 hectáreas** estimadas para la planta completa, dependiendo de las tecnologías seleccionadas (UASB y MBR o LA) y sin considerar área para disposición de lodos.

4.2.2 Fases del Tratamiento

1. Pretratamiento:

- a. **Tecnología:** Rejas gruesas y finas, desarenadores, y desengrasadores.
- b. **Función:** Eliminación de sólidos grandes, arenas, grasas y aceites.

2. Tratamiento Primario (Anaerobio):

- a. **Tecnología:** Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (UASB).
- b. **Ventajas:**
 - i. Bajo costo operativo.
 - ii. Generación de biogás para cogeneración energética.
 - iii. Producción reducida de lodos.

3. Tratamiento Secundario (Aerobio):

- a. **Opciones Tecnológicas:**
 - i. Reactores Biológicos de Membrana (MBR).
 - ii. Reactores de Lodos Activados (LA).
 - iii. Filtros Percoladores (FP).
- b. **Función:** Remoción de materia orgánica y nitrificación para eliminar nitrógeno amoniacal.

4. Tratamiento Terciario:

- a. **Tecnología:** Filtración con arena y desinfección UV.
- b. **Función:** Pulimiento final del agua para descarga segura o reúso.

5. Manejo de Lodos:

- a. **Tecnología:** Filtros prensa y centrifugadoras.
- b. **Cumplimiento:** **NOM-004-SEMARNAT-2002** para disposición segura.

A continuación, se presenta los diagramas que detallan el proceso.

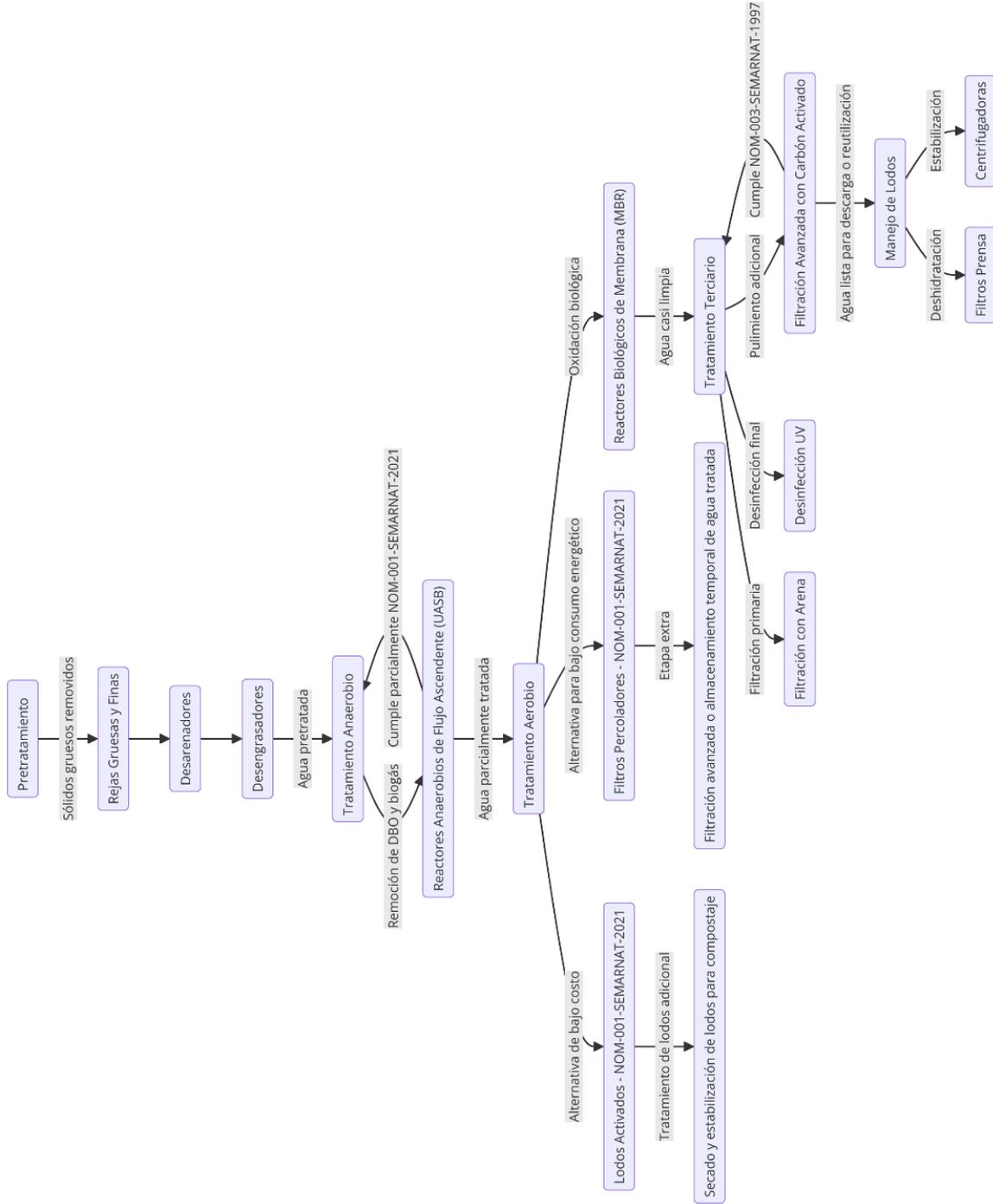


Figura 62. Diagrama 1: Proceso General

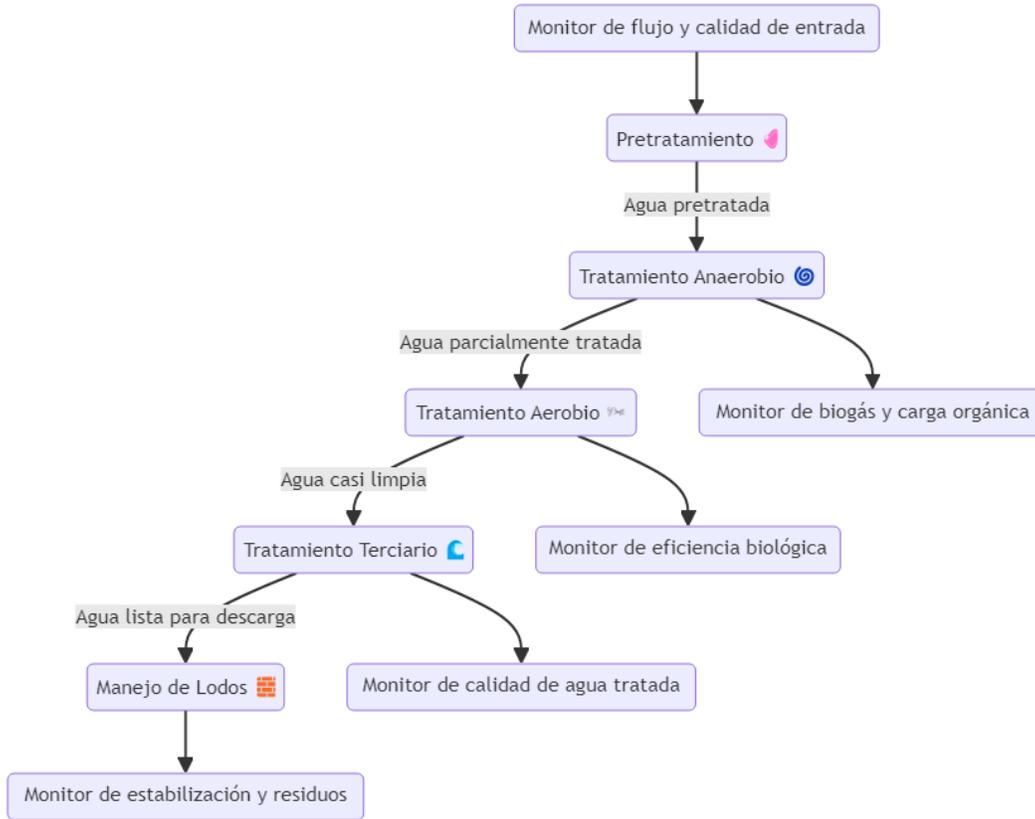


Figura 63. Diagrama 2: Sistemas de Monitoreo.

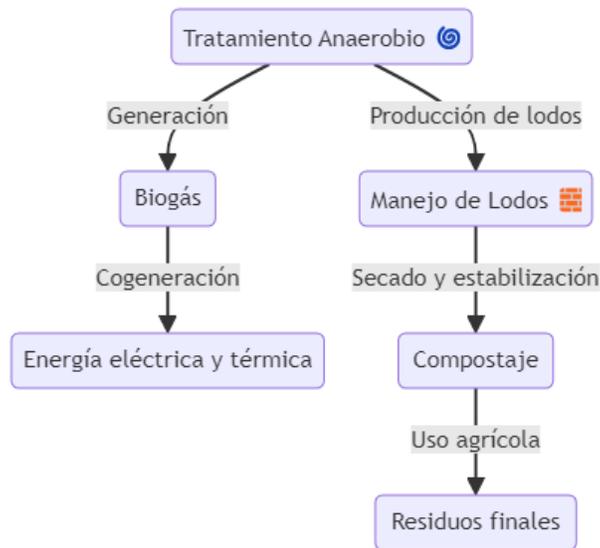


Figura 64. Diagrama 3: Flujos de Energía y Residuos.



4.3 Estrategia de Selección de Tecnologías

- **Análisis de Costo-Beneficio:** Comparación económica y técnica de las tecnologías anaerobias y aerobias.
- **Pruebas Piloto:** Evaluación local de eficiencia y adaptabilidad de cada tecnología.
- **Impacto Ambiental:** Selección de opciones con menor huella ecológica y mayores beneficios operativos.

4.4 Beneficios del Proyecto

1. **Cumplimiento Normativo:** Garantizar la calidad del agua tratada conforme a la **NOM-001-SEMARNAT-2021** y viabilidad para reúso bajo la **NOM-003-SEMARNAT-1997**.
2. **Flexibilidad Operativa:** Diseño modular que permite ampliaciones futuras según el crecimiento poblacional.
3. **Sostenibilidad:** Aprovechamiento del biogás generado en los UASB para reducir costos energéticos.
4. **Impacto Ambiental Positivo:** Mejora de la calidad del agua de la laguna y promoción de su restauración ecológica.
5. **Viabilidad Financiera:** Reducción de inversión inicial mediante una implementación escalonada.



Capítulo 6

Evaluación Geológica-Geotécnica



V. Evaluación Geológica-Geotécnica

5.1 Marco Físico

5.1.1 Fisiografía

El relieve es la forma física en que se presenta la superficie de la tierra, al respecto México es extraordinariamente variado, desde cadenas montañosas hasta grandes planicies pasando por valles, cañones, altiplanicies y depresiones entre otras formas, en este sentido, y con base en estas características el país se ha dividido en Provincias Fisiográficas las cuales se definen como: regiones donde el relieve es el resultado de la acción de un mismo conjunto de agentes modeladores del terreno, así como de un mismo origen geológico.

Bajo las consideraciones anteriores la zona de estudio, el municipio y una gran parte del Estado de México, forma parte del denominado Eje Neovolcánico; un espacio donde la corteza terrestre ha sufrido grandes esfuerzos tectónicos desde principios del periodo Terciario; los materiales que constituyen el subsuelo de esta provincia corresponden a intercalaciones de productos volcánicos tales como lavas, tobas y cenizas que incluyen materiales granulares provenientes de las partes topográficamente altas que circularon hacia los valles, caracterizados por el predominio de derrames basálticos Cuaternarios, derivados de numerosos volcanes existentes, cubriendo a dichos materiales (en espesores variables), se encuentran arcillas y arenas finas que son el producto de la alteración de rocas antiguas (figura 65).

Derivado de los procesos geológicos que dieron origen a esta provincia fisiográfica se puede determinar que los materiales que constituyen el subsuelo de esta zona son esencialmente intercalaciones de productos volcánicos tales como lavas, tobas y cenizas que incluyen materiales granulares transportados por ríos y arroyos provenientes de las partes topográficamente altas que circularon hacia los valles, cubriendo a dichos materiales, en espesores variables, se encuentran arcillas y arenas finas que son el producto del sedimento de los antiguos lagos.

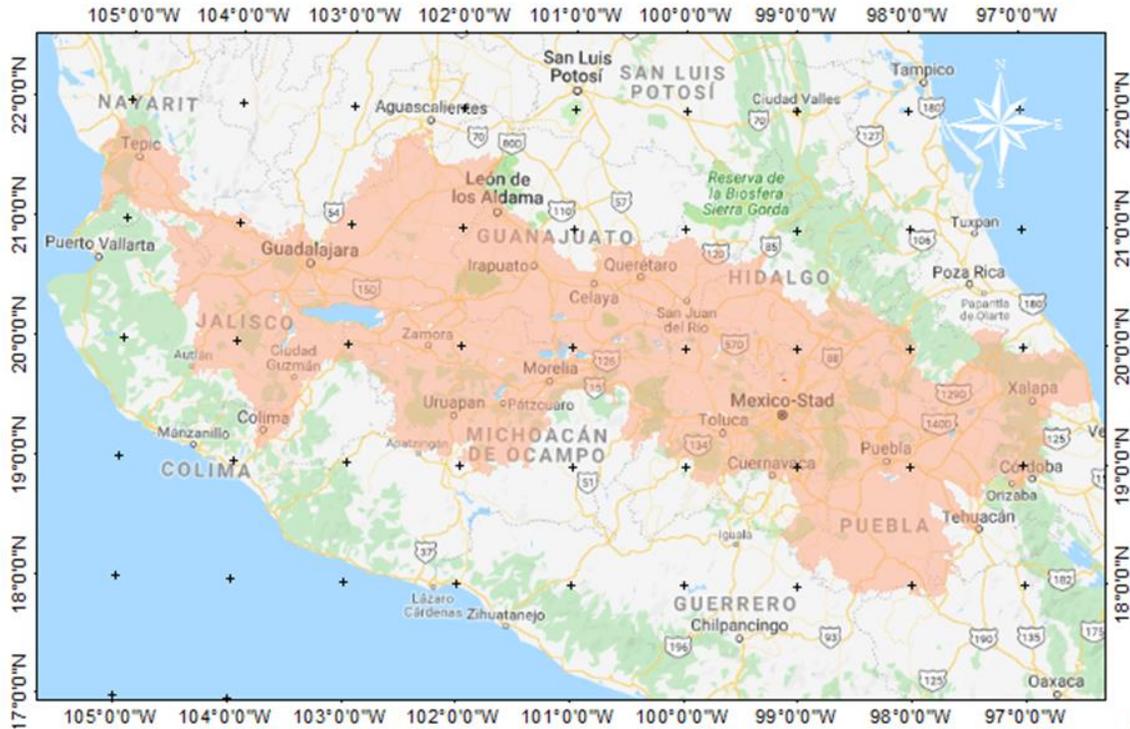


Figura 65. Localización y distribución de la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico.
Elaboración propia, base Google Earth, 2019.

En términos generales se puede establecer que la actividad volcánica dentro de esta provincia ha dado lugar a un gran número de cuencas endorreicas y el consecuente desarrollo de lagos, lo que le da al paisaje geomorfológico una apariencia muy característica.

El régimen endorreico de la cuenca del Valle de México y la consecuente sedimentación lacustre del Pleistoceno-Holoceno se originó como resultado del intenso volcanismo que edificó la Sierra Chichinautzin, erupción que ocurrió hace aproximadamente 600,000 años, bloqueando lo que antes fue un drenaje hacia el sur y cerrando definitivamente la cuenca, dejando el área del Valle de México sin drenaje al exterior, generando la acumulación de agua en la parte central del valle, condiciones que favorecieron y dieron origen a la formación de los lagos de Zumpango, Texcoco, Xochimilco y Tláhuac, delimitados por las montañas que circundan la Cuenca de México, mismas que son de origen volcánico destacándose la Sierra Nevada que se encuentra hacia el este, mientras que la Sierra de las Cruces se localiza hacia el oeste y la Sierra Chichinautzin, en el sur.



Así mismo se caracteriza, por el desarrollo y la presencia de importantes lagos y laguna, cuya morfología, orientación y distribución superficial sugieren estar situados en fosas tectónicas, motivo por el cual algunos autores le asigna este último nombre a esta provincia fisiográfica.

La zona de estudio se ubica específicamente en la denominada subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac, la subprovincia se extiende de poniente a oriente, desde unos 35 kilómetros al occidente de la ciudad de Toluca, consta de sierras volcánicas o grandes aparatos volcánicos individuales que alternan con amplias llanuras formadas, en su mayoría, por vasos lacustres, conformado sistemas de topofomas características de planicies aluviales.

5.1.2 Geomorfología

La caracterización geomorfológica de una zona consiste en la descripción cualitativa de distintos parámetros morfológicos tales como; patrones de drenaje, grado de las pendientes, altitudes, perfiles, etc., con lo cual es posible determinar y establecer, ciertas características geológicas del terreno. Es claro que los procesos geomorfológicos ocurridos en la zona de estudio han modificado considerablemente el relieve superficial original del mismo; toda vez que se puede observar que la morfología de la zona es variada; donde se presentan diversos tipos de estructuras volcánicas bien conservadas, además de extensos derrames basálticos, sobre los que se han originado algunos lagos y Lagunas (Zumpango).

Para mostrar estas características del terreno se utilizó el modelo digital de elevación (MDE), perteneciente a la carta E14A29 y E14A19, editadas por INEGI en el año 2015, el cual se presenta en la figura 66.

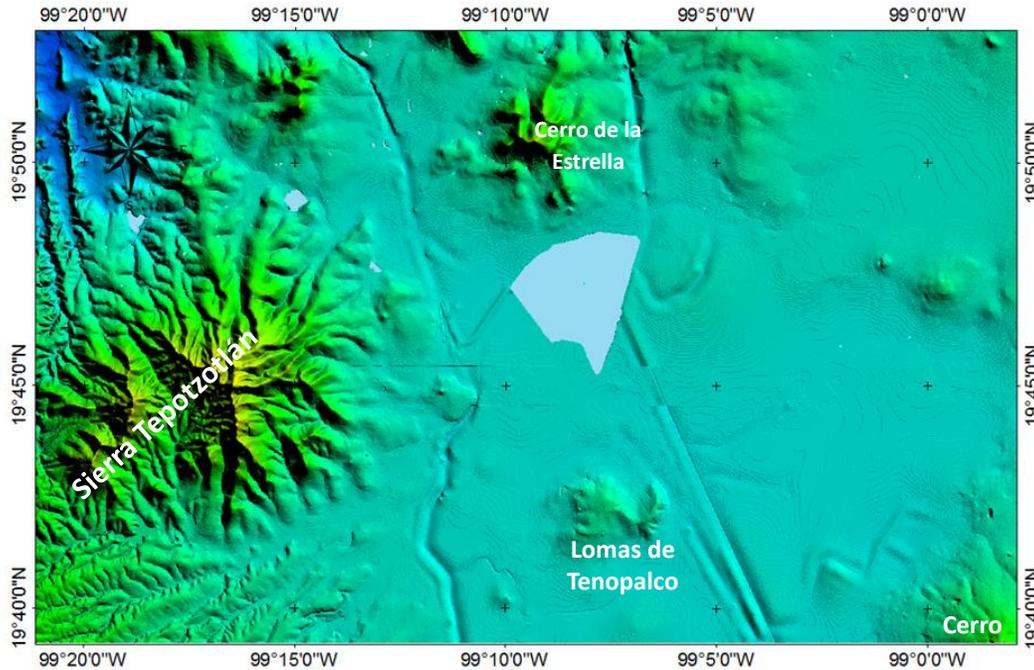


Figura 66. Localización morfológica regional de la zona de estudio

Uno de los aspectos físicos que caracterizan regionalmente la zona es su relieve básicamente suave, dominando por la presencia de llanuras aluviales y en menor proporción lacustres, con altitudes promedio de 2,240 msnm, que solo se ve interrumpida por la presencia de algunas elevaciones topográficas, de relativa altura, destacando en las inmediaciones de la zona de estudio hacia la porción sur del predio las denominadas lomas de Tenopalco, límite con el municipio de Tultepec, donde se presentan elevaciones topográficas del orden de 2,325 msnm, a una distancia en línea recta de la zona de estudio de 3.8 kilómetros. Mientras que al norte se presenta el cerro La estrella, con una altitud de 2,603 msnm, a una distancia de 4.3 kilómetros.

5.1.3 Clima Regional.

Según el sistema de clasificación propuesto por W. Köppen (1948) y modificado por Enriqueta García, el clima de gran parte de la cuenca del Valle de México es templado subhúmedo el cual es identificado con la clave (Cw); sin embargo, el decrecimiento de las lluvias hacia el centro de la cuenca es tan acentuado que el clima al oriente de la cuenca tiene ya, según dicha clasificación, características semiáridas (clima seco BS). En la zona de estudios se tienen identificados los siguientes tipos de clima (figura 67).



- C(w0)(w).- correspondiente a un clima templado subhúmedo con verano fresco, el más secos de los templados subhúmedos con régimen de lluvias en verano, canícula, un importante porcentaje de lluvia invernal y poca oscilación.
- BS1Kw.- Correspondiente a semiseco estepario, el más húmedo de los semisecos, templado con verano cálido con régimen de lluvias en verano y escaso porcentaje de lluvia invernal, extremoso y la temperatura del mes más cálido se presenta antes del solsticio de verano.

Como resultado de lo anterior, los sistemas meteorológicos predominantes definen claramente dos épocas climáticas con particularidades bien definidas: la época de “lluvias” de junio a octubre, caracterizada por aire marítimo tropical con alto contenido de humedad y la época de “secas” que se identifica con humedad relativa baja, debido a que la masa de aire correspondiente normalmente es de tipo polar continental. La época de secas puede ser subdividida en dos: Seca-Caliente (marzo-mayo), en la cual predomina aire con características tropicales pero seco, y la época Seca-Fría (noviembre-febrero) cuyos rasgos meteorológicos la definen como aire de tipo polar con bajo contenido de humedad.

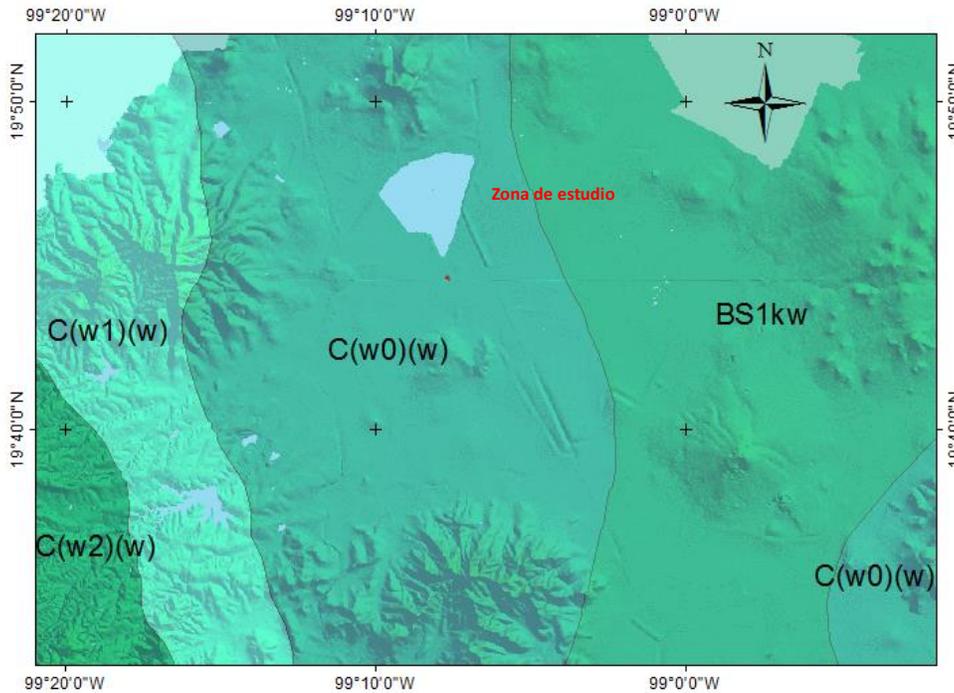


Figura 67. Localización y extensión de climas en la zona.
Elaboración propia, base MDE INEGI



Finalmente, tomando como referencia la Carta Hidrológica de la República Mexicana (figura 68) el área en estudio es considerada como Zona Húmeda (con precipitaciones pluviales producidas por lluvias orográficas y/o convectivas), por lo que es baja la presencia de lluvias ciclónicas en el lugar.

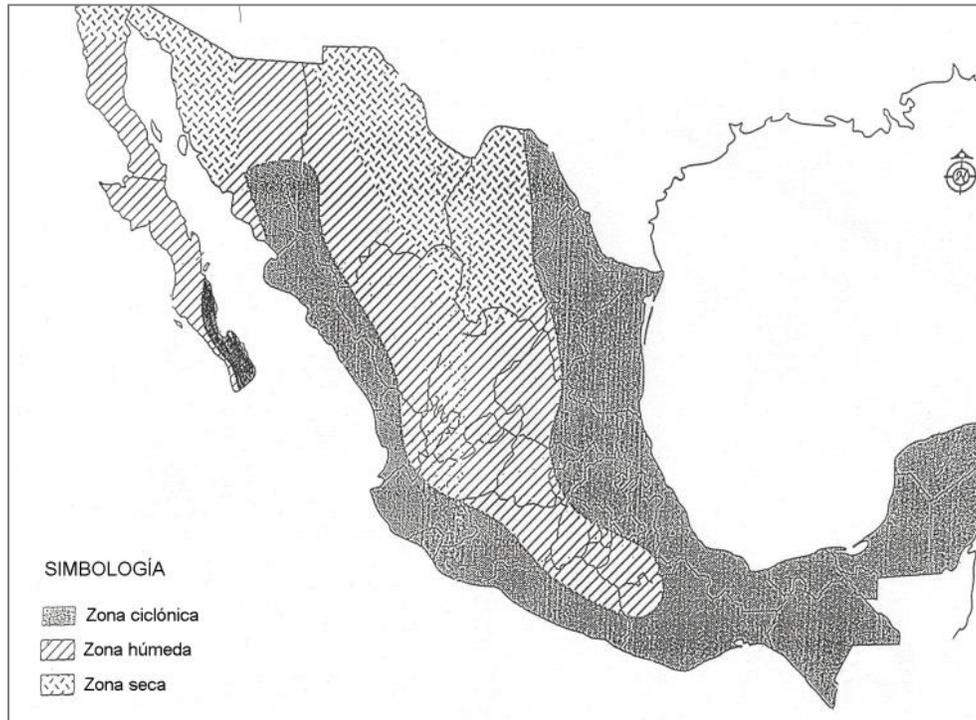


Figura 68. Carta Hidrológica de la República Mexicana.

5.2 Marco Geológico

5.2.1 Geología Regional

Desde el punto de vista geológico, la Faja Volcánica Transmexicana es una provincia donde predominan secuencias litológicas del Terciario-Cuaternario, y se caracteriza por tener cientos de aparatos volcánicos que incluyen enormes estratovolcanes poligenéticos, volcanes magmáticos, conos cineríticos de tamaños diversos, complejos de calderas, domos volcánicos, cráteres de explosión con volúmenes de flujo de lava y depósitos piroclásticos asociados. La posición geográfica de la zona la ubican en el extremo septentrional de la cuenca del valle de México, por lo que se hace una descripción de su formación y desarrollo geológico.



La Cuenca de México debe su formación a procesos volcánicos y tectónicos que han acaecido desde Eoceno, en ese período se inició un conjunto de procesos eminentemente volcánicos, que con el tiempo produjo espesores de 2 km de lava, toba y brecha.

Para el Mioceno temprano predominaron erupciones del tipo ácido, con potentes espesores, la actividad magmática y tectónica generó rocas volcánicas y un fracturamiento de orientación W-E. Por otra parte, para el Plioceno Tardío y el Cuaternario se define la creación de fosas de rumbo preferentemente NNE como las Tláhuac-Apan y la fosa Cuauhtepac hacia la Sierra de Guadalupe, afectando a la Sierra Nevada y formando la fosa en el flanco poniente del Cerro Tláloc. Durante el Pleistoceno y Holoceno el vulcanismo es de tipo monogenético (conos cineríticos, domos volcánicos) y derrames de lava, asociados con materiales piroclásticos.

La Sierra del Chichinautzin es el área en la que se tiene la mayor extensión de rocas volcánicas cuaternarias al sur de la Cuenca de México. Otra de las áreas de mayor extensión de rocas volcánicas cuaternarias se localiza al oriente y nororiente de Tizayuca-Atzompa-Texcoco, y se extiende hasta Ciudad Sahagún-Singuilucan.

Las grandes depresiones formadas fueron rellenas por materiales clásticos, al oriente, hacia el Ex Lago de Texcoco se tienen depósitos aluviales que poseen una granulometría gruesa cerca de las serranías, que disminuye a medida que se acerca a la zona limítrofe del vaso lacustre (INEGI, 1983) y están constituidos por depósitos clásticos plioceno-cuaternarios de diversos tamaños. Su parte inferior consiste en material aluvial y lahárico, retrabajado (INEGI, 1983).

Se presentan intercalaciones de arenas, limos y dos horizontes de tobas líticas consolidadas (Vázquez y Palomera, 1989). El origen de los depósitos lacustres está relacionado con la obstrucción definitiva del drenaje de la Cuenca de México, causado por la intensa actividad volcánica que edificó la Sierra de Chichinautzin.

Estas depresiones (fosas) fueron cubiertas tanto por materiales producto de la erosión como por rocas provenientes de la actividad volcánica contemporánea, así en la parte inferior de las sierras mayores se encuentran extensos abanicos volcánicos. Mientras que sierras de menor tamaño, como la Sierra de Guadalupe se caracteriza por presentar abanicos aluviales menores. El estado caótico de los rellenos de las planicies es su característica principal, aparecen depositadas series clásticas intercaladas con materiales provenientes del vulcanismo del Pleistoceno.



Además de estar compuestas principalmente de materiales aluviales, las planicies aluviales presentan en parte otros tipos de depósitos, como los de ladera, originados por procesos gravitacionales y fluviales. También se presentan planicies con cobertura e intercalaciones de materiales coluviales, detritos rocosos acumulados al pie de las laderas empinadas, etc. Además, se presenta un cierto dominio de coberturas de materiales de textura fina, proluviales acumulativos, sobre todo en los abanicos formados en la desembocadura de los ríos montañosos.

Hacia las porciones limítrofes con las Sierras altas o piedemonte se encuentra estos materiales clásticos interdigitados con lavas, tobas, cenizas y depósitos epiclásticos y piroclásticos de flujo. En el Cuaternario continúa el vulcanismo de la etapa interior, sobresaliendo la andesita y basalto reconocidos en los cerros de Chimalhuacán, Gordo y El Pino y, por otro lado, las erupciones basálticas y andesítica entre Tizayuca y Apan.

Asimismo, las sierras mayores con grandes volcanes, como los de la Sierra Nevada, alcanzaron su máximo desarrollo, formándose extensos abanicos volcánicos. La complejidad de los procesos geológicos en el origen de la cuenca ha sido factor para que a la fecha existan varias nomenclaturas.

En algunas porciones de estas planicies presentan en su superficie costras de caliche, lo cual es evidencia de la presencia actual del nivel freático somero y de su relación con la antigua influencia lacustre en muchas de ellas.

De acuerdo con la geología recopilada, el valle de México contiene formaciones del Terciario Medio, Terciario superior y Cuaternario. Desde el punto de vista geológico, durante el Terciario hubo actividad volcánica y durante el Cuaternario el valle de cerró con la formación de la sierra Chichinautzin convirtiéndolo en una cuenca cerrada, la cual está constituida por rocas volcánicas generalmente extrusivas, tanto coladas de lava como materiales piroclásticos; los rellenos del valle contienen material volcánico y aluvial depositados en ambientes lacustres; el acuífero principal se encuentra en un medio granular el cual es explotado a través de pozos.

Básicamente la zona de estudio se encuentra rodea por estructuras volcánicas del Terciario; destacando la Sierra de Tepetzotlán que incluye el Cerro de La Estrella, Sierra Las Cruces y las denominadas Lomas de Tenopalco, litológicamente conformada por andesitas, basaltos, brechas volcánicas, tobas y en general de secuencias volcanoclásticas.



En este sentido y toda vez que las estructuras volcánicas son estructuras jóvenes, es muy fácil reconocerlas por sus rasgos morfológicos cónicos y dómicos. En la figura 69 se muestra la geología regional de la zona de estudio.

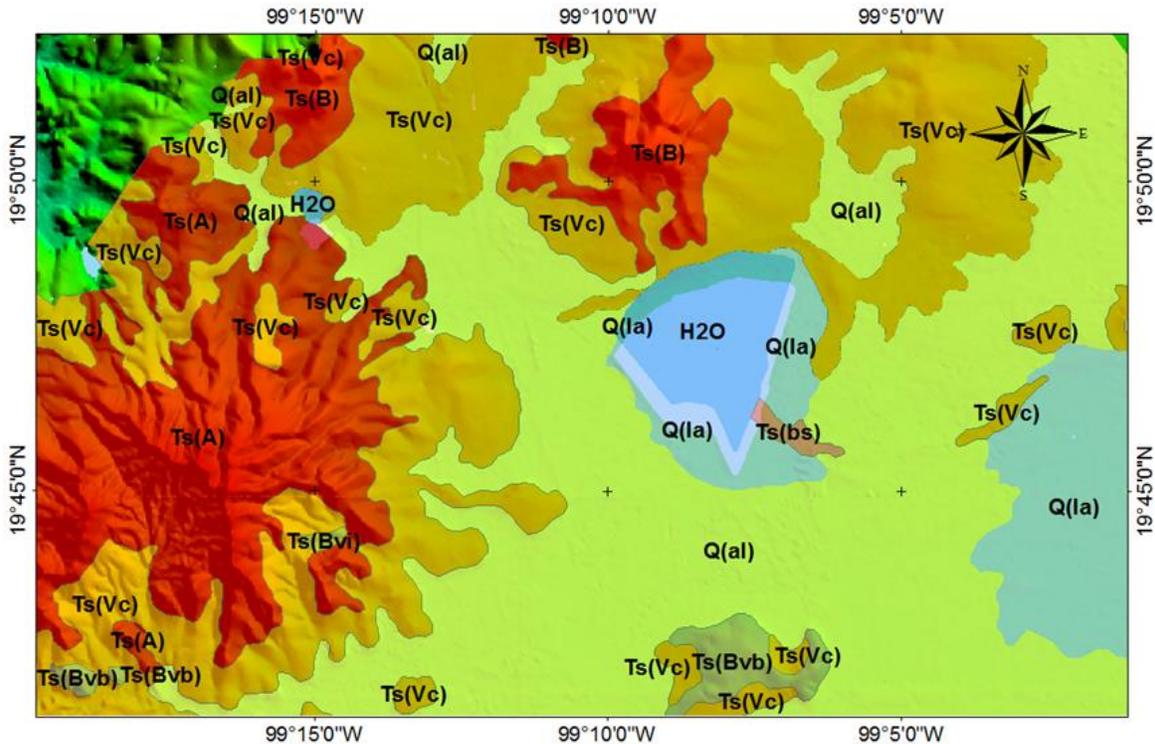


Figura 69. Geología regional

A una distancia de 15 kilómetros al oeste del predio en estudio se tiene la denominada Sierra de Tepozotlán con una altura máxima de 2,950 msnm, constituida por la presencia de rocas andesíticas y derrames de material volcanoclásticos, así como la presencia de coladas que descienden con dirección hacia el este, hasta la zona en la que actualmente se ubica el centro de la comunidad Teoloyucan, a partir de este punto y hasta la zona de estudio la secuencia litológica superficial corresponde a la presencia de material aluvial.

Geológicamente el sistema de la Sierra Tepozotlán debe su formación a procesos volcánicos y tectónicos ocurridos desde Eoceno, en ese período se inició un conjunto de procesos eminentemente volcánicos que con el tiempo produjo importantes espesores de lava, toba y brechas volcánicas. Para el Mioceno temprano predominaron erupciones del tipo ácido, la actividad magmática y tectónica generó rocas volcánicas y un fracturamiento de orientación W-E.



Hacia el norte de la zona de estudio a una distancia aproximada de 10 kilómetros se tiene la presencia de un cuerpo volcánico identificado localmente como “Cerro de la Estrella”, perteneciente a la denominada Sierra de Tepetzotlán, conformado por coladas basáltico, cubiertas por el depósito de potentes espesores de material volcanoclásticos, los cuales llegan a bordear la porción norte del Laguna de Zumpango.

Al sur del lago a una distancia de 5 kilómetros se localiza un alto topográfico, asociado a la presencia de secuencias volcánicas Terciarias, conformadas básicamente por la presencia de brechas volcánicas básicas y secuencia de materia volcanoclásticos, con una altura máxima de 2,350 msnm, localmente se le conoce a esta zona como “Lomas de Tenopalco”.

El marco geológico regional enmarca la zona de estudio dentro de un ambiente meramente volcánico, donde se aprecia diferentes eventos destacando la formación de la Sierra de Tepetzotlán y posiblemente por la presencia de la Sierra las Cruces, en su porción más septentrional. El basamento de la Sierra de las Cruces está conformado por una variedad de rocas. Hacia la parte norte, descansa sobre una serie de estructuras volcánicas del Mioceno Medio que corresponden con la Sierra de Guadalupe y Sierra de la Muerta, del Plioceno Tardío (Gutiérrez-Palomares, 2005).

Procesos estructurales desarrollados durante el Plioceno Tardío y Cuaternario, dieron origen a la formación de amplias fosas tectónicas con un rumbo preferentemente NNE, estas depresiones están limitadas por fracturamientos y fallas que provienen del poniente. Las grandes depresiones formadas fueron rellenas por material clástico, donde se tienen depósitos aluviales que poseen una granulometría gruesa cerca de las serranías, que disminuye a medida que se acerca hacia la zona limítrofe del vaso lacustre, los cuales están constituidos por depósitos clásticos Plioceno-Cuaternarios de diversos tamaños e inferiormente consisten en material aluvial y lahárico, retrabajado. Estas depresiones (fosas) fueron cubiertas tanto por materiales producto de la erosión como por rocas provenientes de la actividad volcánica contemporánea, así en la parte inferior de las sierras mayores se encuentran extensos abanicos volcánicos. A su vez el origen de los depósitos lacustres está relacionado con la obstrucción definitiva del drenaje de la Cuenca de México, causado por la intensa actividad volcánica que edificó la Sierra de Chichinautzin.

Específicamente la roca observada en la zona de estudio corresponde a secuencia de productos piroclásticos, las secuencias litológicas y aspectos estructurales presentes en las rocas que afloran en la zona de estudio evidencian distintos eventos de tipo orogénico,



volcánico y sedimentario al rellenar cuencas que se han desarrollado durante el transcurso del tiempo. Las rocas sedimentarias, existentes, corresponden esencialmente a una secuencia de lutitas-arenosas, conglomerados, areniscas, limonitas y depósitos aluviales y lacustres que abarcan desde el Cretácico hasta el Cuaternario, cuyo ambiente sedimentario incluye desde un ambiente lacustre hasta continental.

5.2.2 Litoestratigrafía de la zona de estudio

Debido a la diversidad de materiales y a la distribución de estos en la cuenca, se han propiciado gran cantidad de estudios, asignándose un sin fin de nombres formacionales y nomenclaturas de difícil aceptación, en el siguiente apartado se presenta la columna estratigráfica presente en la zona de estudio, describiendo de la unidad litológica más antigua a la más reciente.

La unidad más antigua que aflora en la zona de estudio está representada por una secuencia de rocas volcánicas de composición intermedia del Oligoceno-Mioceno con espesores aproximados de 1,000 a 1,500 metros, del cual solo afloran los elementos más elevados quedando el resto de estos cubiertos por secuencias volcánicas más recientes, en esta unidad predomina la composición andesítica y riodacítica en los derrames lávicos, esta unidad aflora al oriente del cerro Tepotzotlán y al poniente de la zona de estudio (Ts (A)).

Sobre esta unidad se encuentra un paquete volcánico correspondiente al Mioceno Medio Tardío, la cual se encuentra conformada por una secuencia de tobas, brechas volcánicas y lavas andesíticas que en algunos lugares se encuentran interestratificados con horizontes de tobas, aunque esta unidad no se encuentra aflorando en la zona de estudio se han reportado espesores de hasta 1,000 metros de espesor.

La unidad que cubre a la secuencia anterior son materiales lacustres del Plioceno (Ts Vc), estos depósitos cubren a toda la secuencia anterior rellenando amplios valles delimitados por rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno, constituidos por una secuencia de tobas líticas areno-arcillosas intercaladas con eventos volcánicos de carácter andesítico con la presencia de horizontes de conglomerados, arenas y arcillas su espesor máximo medido es del orden de los 750 metros en el centro de estos valles y se adelgaza hacia las márgenes. Debido a la naturaleza de estos depósitos su área de afloramiento se limita a las partes topográficamente más bajas donde antiguamente existían lagos. En las zonas bajas y planas se encuentran cubiertas discordantemente por aluvión del Cuaternario.



En cambio, en las partes más altas corresponden a aparatos volcánicos, estas últimas rocas corresponden a derrames de lavas interestratificadas de composición ácida e intermedia, se les ha determinado una edad correspondiente al Plioceno Tardío.

El último evento volcánico acaecido en la zona se encuentra definido por la presencia de domos y coladas de composición ácida a intermedia de composición basáltica-andesítica la cual corresponde al evento volcánico pleistocénico y holocénico, dando origen a la formación de varios conos cineríticos, domos volcánicos y derrames de lavas asociados, esta unidad se encuentra representada en el Cerro de la Estrella al norte de la zona de estudio (Ts B).

Finalmente se encuentran depósitos de materiales aluviales y lacustres (Qal) que cubren toda la secuencia volcánica anteriormente descrita, en las zonas norte y sur incluyen material poco consolidado, compuesto por fragmentos con tamaño de grava, arena, limo y arcilla.

5.2.3 Reconocimiento geológico local

Por su posición geográfica y características litológicas las formaciones existentes en la zona de estudio se han asociado al origen y formación de las Sierras del Terciario Medio-Superior (Sierra Tepetzotlán y Las Cruces) constituidas por una serie de eventos volcánicos principalmente de composición andesítica, que se presentan como depósitos piroclásticos, tobas areno-limosas y limo arcillosas, representadas localmente por una secuencia estratificada de material volcanoclásticos con espesores que van de regulares a irregular y hasta de forma lenticular, ligeramente inclinado al oriente, compuesto de los siguientes elementos litológicos:

- Suelo.
- Depósitos fluviales y aluviales.
- Tobas (horizontes de cenizas volcánicas de muy distintas granulometrías).

Derivado de su desarrollo geológico se puede determinar que los materiales que constituyen el subsuelo, en la zona de estudio, son intercalaciones de productos volcánicos tales como lavas, tobas y cenizas, e incluyen materiales granulares transportados por ríos y arroyos provenientes de las partes topográficamente altas que circularon hacia el valle. Cubriendo a dichos materiales y en espesores variables, se encuentran arcillas y arenas finas que son el producto del depósito de sedimento de los antiguos lagos, que cubrieron la cuenca del valle de México.



Se realizó la verificación geológica local y semiregional, con objetivo de identificar la secuencia de rocas existentes y sus relaciones de campo con el fin de conocer el marco geológico local de la zona. A nivel superficial dentro del predio se presentan una capa irregular de suelos residuales, con espesores que van de 0.60 a 0.90 metros (figura 70).



a) Antiguas zonas de cultivo

b) Desarrollo y formación de suelo

Figura 70. Suelos residuales en la zona de estudio

De forma natural subyaciendo a la secuencia anterior, se observa un paquete de productos piroclásticos; asociadas a la presencia de tobas limo-arenosa y limo-arcillosas, cuyos aspectos estructurales evidencian distintos eventos de tipo orogénico, volcánico y sedimentario, que se han desarrollado durante el transcurso del tiempo geológico.

Sobre los cortes de la excavación se observa la presencia de una secuencia de material limo arcillo-arenoso a limo-arenoso, de forma homogénea y una pseudo-estratificación horizontal, con espesores de apenas unos cuantos centímetros. Dicha unidad litológica se ha correlacionado con la emisión y formación de tobas limo-arenosas, emitidas durante las últimas etapas de la formación de las sierras Tepetzotlán y Las Cruces, depositadas sobre ambientes acuosos.

La secuencia litológica presenta rasgos estructurales característicos de ambientes sedimentarios lacustres, mostrando una pseudoestratificación horizontal concordante. Los afloramientos de esta secuencia litológica se pueden observar directamente en las excavaciones existentes en las mediciones de la zona (figura 71).

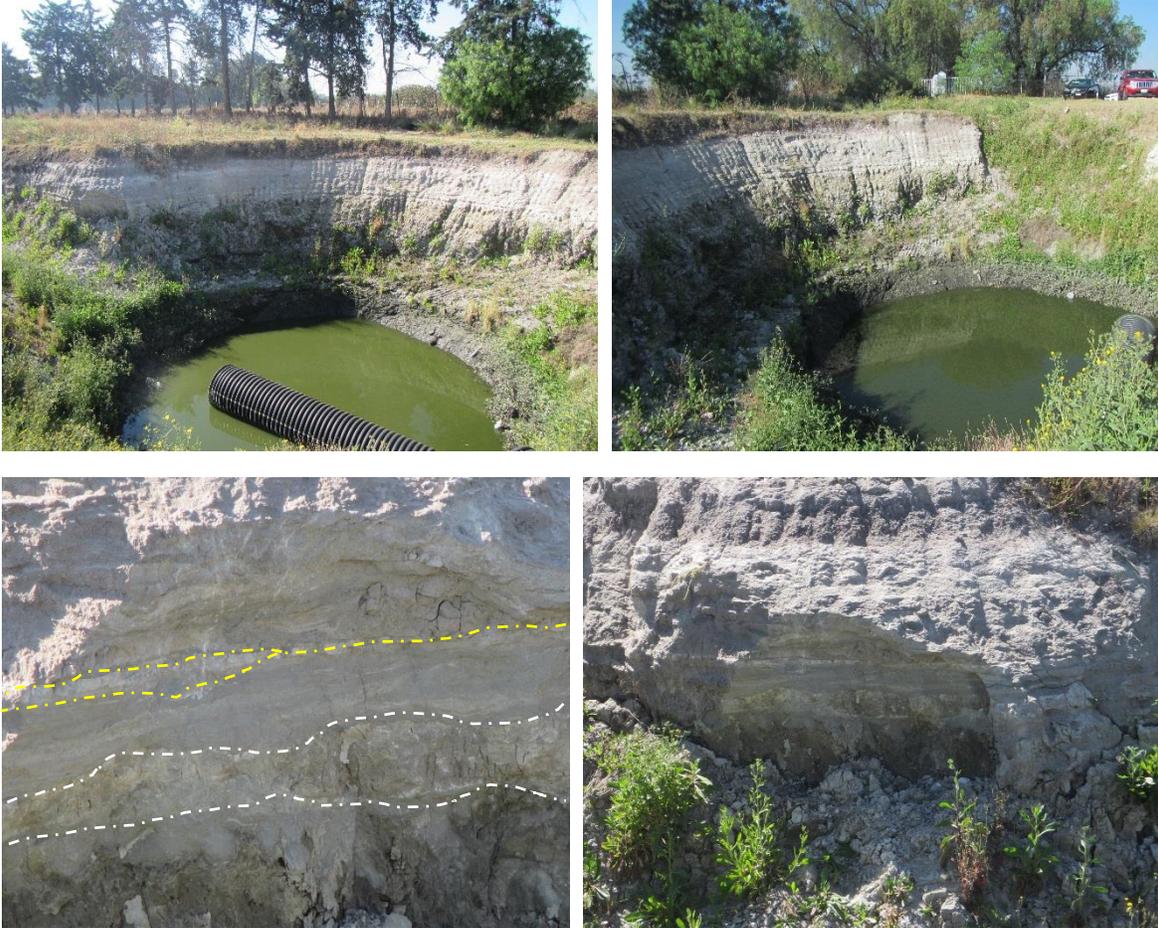


Figura 71. Estratigrafía presente en excavación en la zona de estudio

5.2.4 Estratigrafía de la zona de estudio

Debido a que la zona se encuentra totalmente enmascarada por la presencia de suelos de cultivo, y por zonas urbanizadas, se consideró tomar como referencia estratigrafía la información obtenida durante la perforación de las lumbreras 14, 15 y 16 del Túnel Emisor Oriente (TEO), las cuales se localizan en la porción oriental de la laguna, como se puede observar en la figura 72.

El perfil estratigráfico de las lumbreras en esta zona alcanza una profundidad de 100 metros, el corte litológico se muestra en la figura 73 y la descripción de las unidades es la siguiente:

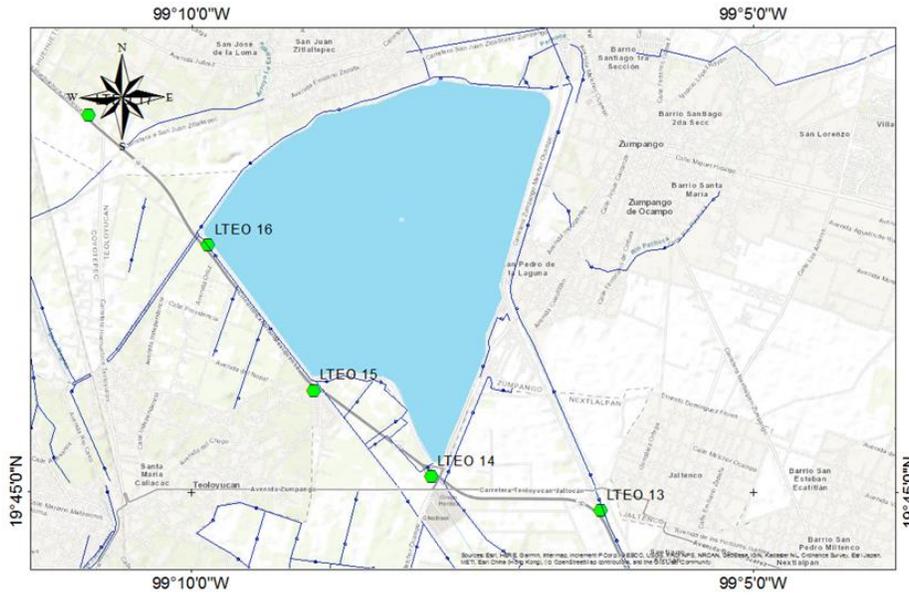
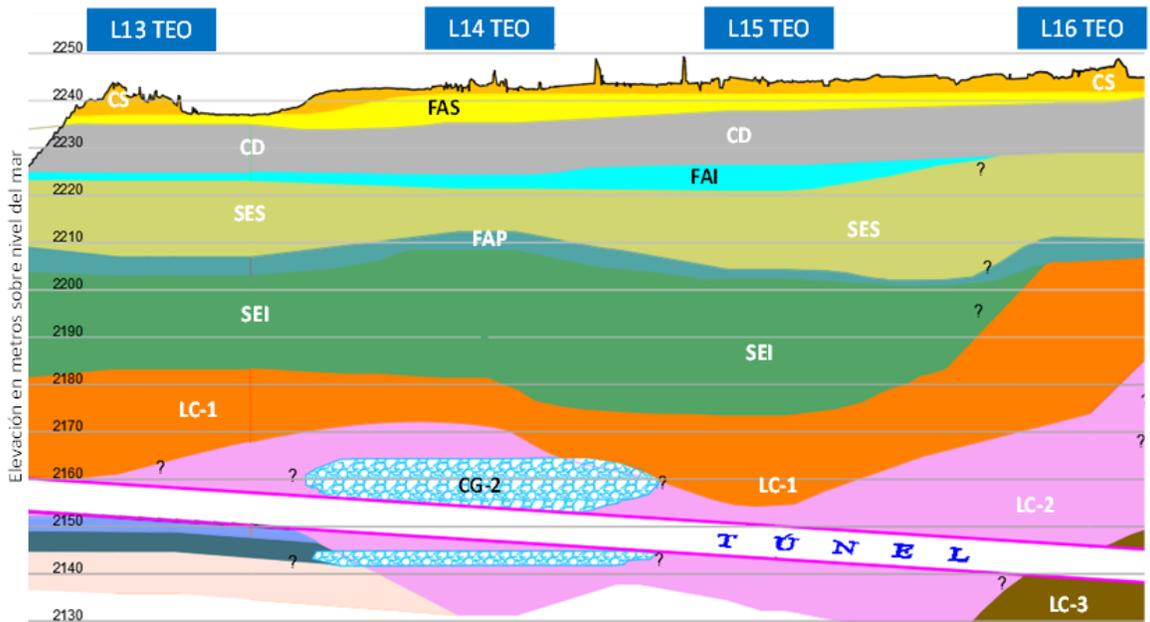


Figura 72. Localización de lumbreras del TEO cercanas a la laguna de Zumpango



Simbología: CS Costra superficial FAS Formación arcillosa superior CD Capa dura FAI Formación arcillosa inferior
 SES Serie estratificada superior FAP Formación arcillosa profunda SEI Serie estratificada inferior CG-2 Conglomerado
 LC-1 Limos arenosos de origen lacustre LC-2 Limos arenosos de origen lacustre LC-3 Limos arenosos de origen piroclástico

Figura 73. Sección estratigráfica lumbreras L13, L14, L15 y L16 TEO

Fuente: CONAGUA, 2019.



- 1.- Costra superficial (CS): Suelos limos arcillosos café claro de consistencia firme, con arena fina (depósitos lacustres, de suelo residual y relleno).
- 2.- Formación arcillosa superior (FAS): Arcillas de alta plasticidad color gris verdoso, de consistencia muy blanda a blanda. Dentro de esta información se encuentran estratos de suelos limo arenosos y arenas, de consistencia y compacidad variables (depósitos lacustres).
- 3.- Capa dura (CD): Suelos Limo arenosos de color gris verdosos de consistencia dura y arena volcánica color negro muy compactos (depósitos lacustres).
- 4.- Formación arcillosa inferior (FAI): Arcillas de alta plasticidad gris verdosos, de consistencia muy blanda a media. Dentro de esta formación se encuentran estratos de limos arenosos y arenas, de consistencia y compacidad variables (depósitos lacustres).
- 5.- Serie estratificada superior (SES): Limos arenosos de consistencia dura y arena limosos en estado compacto. En esta formación se presentan intercalaciones arcillosas de espesor menor de 1.5m, de consistencia firme a dura y poco compresible.
- 6.- Formación arcillosa profunda (FAP): Arcillas de alta plasticidad gris verdosos, consistencia de blanda a dura (depósitos lacustres).
- 7.- Serie estratificada inferior (SEI): Serie errática de suelos arenosos en los que el factor común es la alta variabilidad de consistencia, compacidad y compresibilidad (depósitos lacustres).
- 8.- LC-1: Intercalaciones de materiales con una mayor consolidación, de origen lacustre (destacan los suelos arenosos, limosos, arenolimosos, así como cenizas con arcillas escasas).
- 9.- LC-2: Limo arenoso cementado color gris rojizo, de consistencia muy dura de origen aluvial y ocasionalmente materiales pumíticos.
- 10.- LC-3: Limo arenosos cementado color café rojizo, de consistencia muy dura de origen piroclástico (toba) intercalados con suelos aluviales de color gris a café. color gris rojizo, de consistencia muy dura de origen aluvial y ocasionalmente materiales pumíticos.



De forma superficial se tiene la secuencia estratigráfica somera de la zona mediante la presencia de perforaciones de carácter geotécnico realizadas al norte de las inmediaciones de la zona de Zumpango, en los límites con la comunidad San Juan Zitlaltepec. Cuyos resultados de muestran en la figura 74.

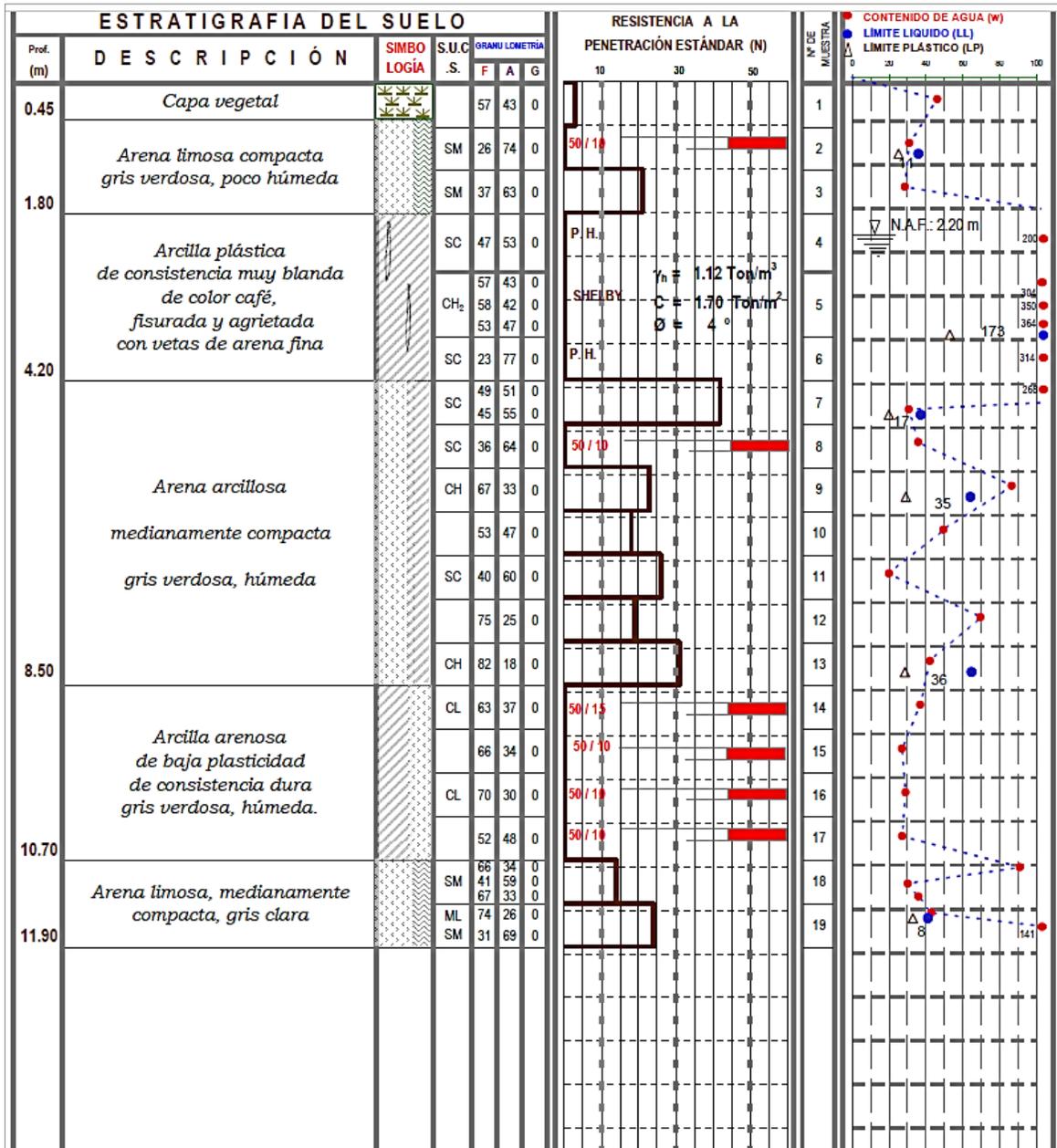


Figura 74. Columna estratigráfica somera en la localidad de San Juan Zitlaltepec



Esta secuencia estratigráfica se confirmó en los primeros metros mediante los resultados obtenidos durante la campaña geotécnica, donde se confirmó la presencia de una capa vegetal, compuesta por material arcilloso café oscuro de 30 cm hasta 45 cm en algunas zonas del predio. De 0.45 hasta los 12 metros de profundidad, se confirmó la presencia de material limo-arcilloso y arenas arcillosas a limosa.

Con base en la información recopilada y recorridos de campo efectuados, se concluye que la secuencia estratigráfica presente en la zona de estudio está conformada por una potente secuencia de material sedimentarios con granulometrías que van desde arenas limosas hasta materiales limo-arcillosos, conformando una estratigrafía homogénea con contactos transicionales concordantes, clasificados en algunos puntos como depósitos lacustres.

5.3 Marco Geofísico

5.3.1 Información geofísica de la zona de estudio

Dentro de la información recopilada se cuenta con datos de trabajos realizados en la porción sur de la Laguna en las inmediaciones de la lumbrera 14, propiamente dentro de la zona industrial, donde se identificaron 4 rangos de resistividad.

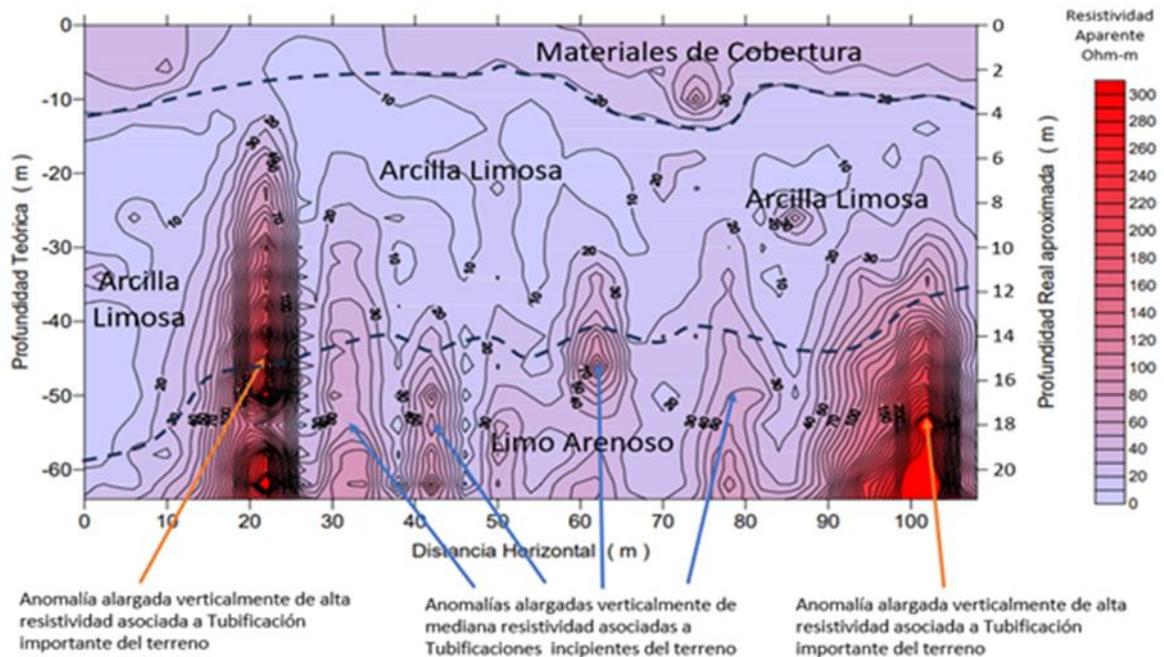


Figura 75. Sección de Resistividad Aparente



1. Superficialmente se registran resistividades del 9 a 21 ohm-m, asociados a depósitos aluviales de forma continua y rellenos heterogéneos aislados de geometría irregular con un espesor máximo de 1 a 2 metros, la continuidad de la secuencia superficial es interrumpida en la porción norte del predio, donde se registraron valores que van de 100 a 900 ohm-m, que pueden corresponder con depósitos heterogéneos, originados por excavaciones o cascajo, son de escasa distribución en el área, registrando el espesor máximo de 15 m, en la zona NE del área de estudio.
2. Por debajo de la unidad anterior se presentan valores que van de 5 a 20 ohm-m, secuencia que se ha asociado a la presencia de depósitos areno-arcillosos, los cuales conforme su respuesta eléctrica es posible que presenten algún contenido de humedad, esta secuencia conforma un paquete de geometría irregular ampliamente distribuido en el área de estudio.
3. Contenido en el paquete anterior, se registraron resistividades de 20 a 100 ohm-m, las que configuran lentes dispersos, se considera corresponde a zonas con mayor contenido de arenas y gravas y/o zonas con mayor compactación, este tipo de estructuras se encuentran ampliamente distribuidas en la zona de estudio.
4. Finalmente, por debajo de los 20 m de profundidad se tienen resistividades de 300 a 500 ohm-m, que fueron registrados solo en la línea 5, en la zona NE de predio, sobre su cadenamamiento 150 a 180, que conforman potentes lentes, se han correlacionado con la presencia de zonas con mayor contenido de arenas y gravas y/o zonas con mayor compactación, este tipo de estructuras solo se identificaron en este punto.

A la par se realizó la integración de las imágenes de resistividad, a partir de las cuales se realizó la configuración que muestra la distribución de resistividades a diferentes profundidades (figura 75).

5.3.2 Interpretación estratigráfica.

A partir del reconocimiento físico de la zona y con la información derivada de los sondeos realizados, se definió el perfil estratigráfico que se describe brevemente a continuación:



- **Relleno.** De 0.00 a la profundidad media de 0.9 m. Constituido por una arena fina, media, cuarzosa, pumítica, andesítica, angulosa, con limo café amarillento y café olivo, gravas medias y finas, andesíticas y angulosas, algunas raicillas y tezontle; en estado semicompacto. El número de golpes (N) registrados en la prueba de penetración estándar varía entre 9 y 21, el contenido natural de agua varía entre 11 y 25%.
- **Limo-arenoso.** De 0.9 a 1.90 m. Limo color café oscuro, con arena fina, media, cuarzosa, poco pumítica, andesítica y angulosa, algunas raicillas; de consistencia rígida a muy dura. El número de golpes varía entre 9 y 35, el contenido de agua varía entre 25 y 35 %.
- **Limo arcilloso.** De 1.90 a 2.20 m. Se tiene un limo arcilloso café oscuro, con arena fina, media, cuarzosa; de consistencia rígida. El número de golpes es de 9 y el contenido natural de agua de 40%.
- **Arenas.** De 2.20 a 3.70 m. Es una arena fina, media y gruesa, cuarzosa, pumítica, andesítica y angulosa, con limo gris verdoso; en estado suelto a semicompacto. Los golpes varían entre 16 y 22, el contenido de agua va de 25 a 50%.
- **Arcilla.** De 3.70 a 5.10 m. Arcilla limosa gris verdoso y verde amarillento; con bolsas de arcilla café rojizo; de consistencia muy suave a suave. El número de golpes en la penetración estándar va desde el peso propio de herramientas a 9; el contenido de agua varía entre 200 a más de 300%.
- **Limos.** De 5.10 hasta la profundidad máxima explorada de 17.55 m, se tienen limos de color verde azulado, gris verdoso y café verdoso, con arena fina, cuarzosa, pumítica, poco andesítica, de consistencia rígida a muy dura; presenta intercalaciones de arena fina y finísima, cuarzosa y pumítica, con limo verde azulado, en estado muy compacto, también lentes de ceniza y vidrio volcánicos. El número de golpes registrados en los limos va de 10 a más de 200, mientras que en las arenas varía entre 20y 110; el contenido de agua en general varía entre 25 y 45%.

5.3.3 Líneas de calicatas.

Al sureste de la laguna específicamente en la unidad habitacional La Providencia, se identificaron trabajos de geofísica, correspondientes a líneas de calicateo. Los resultados obtenidos de estos trabajos se presentan en la figura 76.

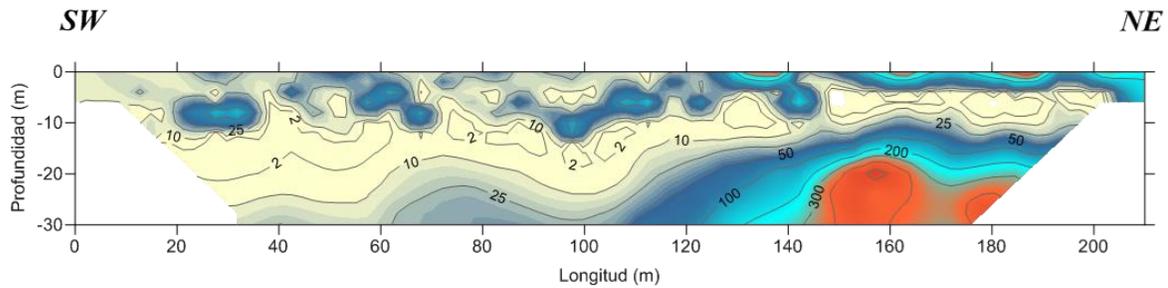


Figura 76. Sección de Calicateo Geo-eléctrico en La Providencia

Como se puede observar, con esta técnica se alcanzaron profundidades de investigación de 20 m (que equivalen aproximadamente a la tercera parte de las profundidades teóricas determinadas en el arreglo Polo-Dipolo), por lo que fue factible detallar en los siguientes 2 paquetes litológicos:

- 1) El primero de ellos y más superficial, presenta espesor de 2 a 4 m (6 a 12 m de profundidad teórica) con resistividades aparentes de **20 a 50 Ohm-m**, pertenecientes a Suelos Limo Arenosos. Cabe señalar que dentro de este primer paquete NO se observan anomalías alargadas verticalmente de alto gradiente con resistividades aparentes mayores a **200 Ohm-m**, que rompan la continuidad estratigráfica y que pudieran estar asociados a posibles planos de debilidad del subsuelo.
- 2) Subyaciendo al paquete anterior y con espesor variable de 8 m a indefinido, se presenta el segundo paquete litológico conformado por Arcilla Limosa, con resistividades aparentes de **10 a 40 Ohm-m**, correspondiendo las resistividades de **10 a 20 Ohm-m** a un predominio de arcillas y limos; mientras que las resistividades aparentes de **20 a 40 Ohm-m** indican un predominio de limos y arenas. Es importante señalar que dentro de este paquete litológico, se observan anomalías alargadas verticalmente que rompen la continuidad estratigráfica, indicativas de planos de debilidad asociados con Tubificaciones de desarrollo importante, (Figura 16).



5.4 Marco Geotécnico

5.4.1 Regiones Sísmicas en México.

Se puede establecer que un sismo son sacudidas o movimientos bruscos del terreno, generalmente producidos por disturbios tectónicos (ocasionado por fuerzas que tienen su origen en el interior de la Tierra) o volcánicos (producido por la extrusión de magma hacia la superficie). En ambos casos hay una liberación de energía acumulada que se transmite en forma de ondas elásticas, causando vibraciones y oscilaciones a su paso a través de las rocas sólidas del manto y la litosfera hasta alcanzar la superficie terrestre.

Los sismos no pueden predecirse, es decir, no existe un procedimiento confiable que establezca con claridad la fecha y el sitio de su ocurrencia, así como el tamaño del evento. Sin embargo, los sismos se presentan en regiones bastante bien definidas a nivel regional y se cuenta con una estimación de las magnitudes máximas, en función de los antecedentes históricos y estudios geofísicos.



Figura 77. Zonas Sísmicas de México

Figura tomada de: Manual de diseño de Obras Civiles (Diseño por Sismo) de la Comisión Federal de Electricidad.



El análisis de sismicidad, en la república mexicana, se basa en la Regionalización Sísmica que se presenta en el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 1993), así como en la recopilación e interpretación de registros históricos de sismos obtenidos de la base de datos del Servicio Sismológico Nacional (SSN). Con fines de diseño antisísmico, la República Mexicana se dividió en cuatro zonas sísmicas, utilizándose los catálogos de sismos del país desde inicios de siglo, de tal forma se estableció la siguiente clasificación (figura 77).

1. La zona A es una zona donde no se tienen registros históricos de sismos, no se han reportado sismos en los últimos 80 años y no se esperan aceleraciones del suelo mayores a un 10% de la aceleración de la gravedad a causa de temblores.
2. Las zonas B y C son zonas intermedias, donde se registran sismos no tan frecuentemente o son zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración de la gravedad.
3. La zona D es una zona donde se han reportado grandes sismos históricos, donde la ocurrencia de sismos es muy frecuente y las aceleraciones del suelo pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad.

Con base al análisis e interpretación de lo anterior, prácticamente toda la porción central del país; el estado de México y la zona de estudio se ubica dentro de la zona clasificada como zonas intermedias “B” de la Regionalización Sísmica de CFE, donde los registros históricos indican que no se han reportado sismos de gran intensidad y las aceleraciones del terreno que se podrían esperar serían menores al 70% del valor de la gravedad (g).

5.4.2 Registro sísmico en la zona de estudio

Con información recabada en el Servicio Sismológico Nacional (SSN) desde el día primero de enero de 1990 hasta abril del 2019, en la figura 78 se presenta la ubicación de epicentros sísmicos localizados en las inmediaciones de la zona de estudio, así como la magnitud de estos, (el número superior indica la magnitud y el inferior la profundidad). Los cuales presentan magnitudes inferiores a 3.5 y superiores a 2.1 grados en la escala de Richter, con hipocentros que van de 2 a 3.8 kilómetros. Destacan dos sismos ubicados en la porción oriental con profundidades superiores a los 10 kilómetros, uno de ellos en la zona de la base área Santa Lucía. El sismo más cercano a la zona de estudio se localizó a una profundidad de 2 kilómetros con una magnitud de 2.1 grados.

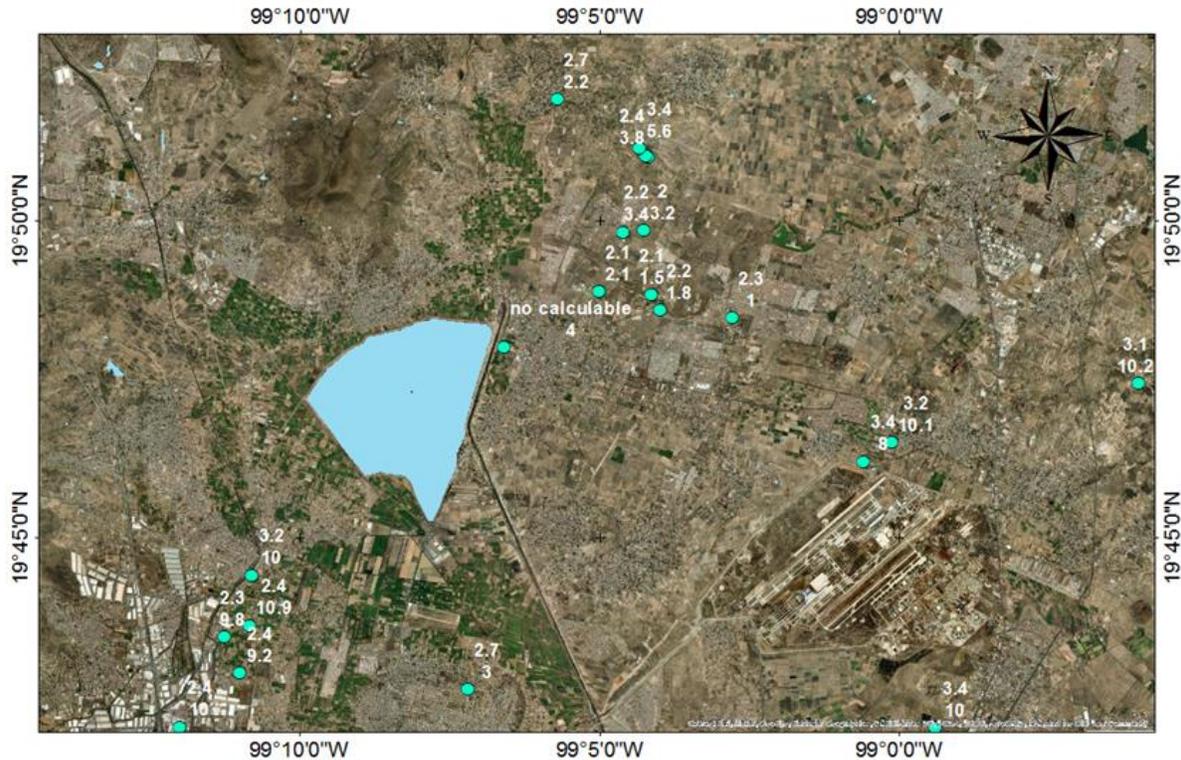


Figura 78. Localización de epicentros de sismos en la zona de estudio

El Servicio Sismológico Nacional (SSN) considera estos movimientos como leves, adicionalmente por la posición geografía del pedio y dadas las características geológicas de la zona y las magnitudes registrados en estos sismos no se tienen reportes de daños estructurales en los inmuebles de la zona. En términos generales, el riesgo sísmico en la Ciudad de México varía mucho de una zona a otra debido a la heterogeneidad y comportamiento de los suelos, así como a la diversidad de los asentamientos humanos. En este sentido cabe señalar que, durante los últimos eventos sísmicos registrados dentro de la zona metropolitana de la ciudad de México, fue claro que en la zona de estudio existe un menor efecto sísmico, toda vez que no se han registrado reporte de daños estructurales, sobre los inmuebles.

No obstante, se ha observado que la distribución de daños por sismos en áreas urbanas presenta fuertes variaciones en función del tipo de suelo. Los daños se acentúan en aquellas zonas con sedimentos poco consolidados, normalmente con grandes espesores en depósitos aluviales, como es la parte central de la ciudad de México, así como en las zonas de transición, donde se presenta pequeños espesores de sedimentos granulares y la presencia de rocas a una profundidad somera.



5.4.3 Información geotécnicas en la zona de estudio

Aunque la zona de estudio se encuentra ubicada en la zona B, debido a las condiciones de su formación geológica (zonas volcánicas y de lagos), se puede tratar como una zona sísmica caracterizada por la presencia de condiciones de Lago. El tipo de suelo consiste en depósitos lacustres muy blandos y compresibles con altos contenidos de agua, lo que favorece la amplificación de las ondas sísmicas.

Dentro de la información recopilada se tiene que en la zona donde se localiza la unidad habitacional la Providencia, al suroeste de la laguna de Zumpango, la realización de sondeos de carácter geotécnico, sin embargo, estos no presentan su ubicación exacta, en la figura 79 se presenta el resultado de estos trabajos con una profundidad de 18 metros.

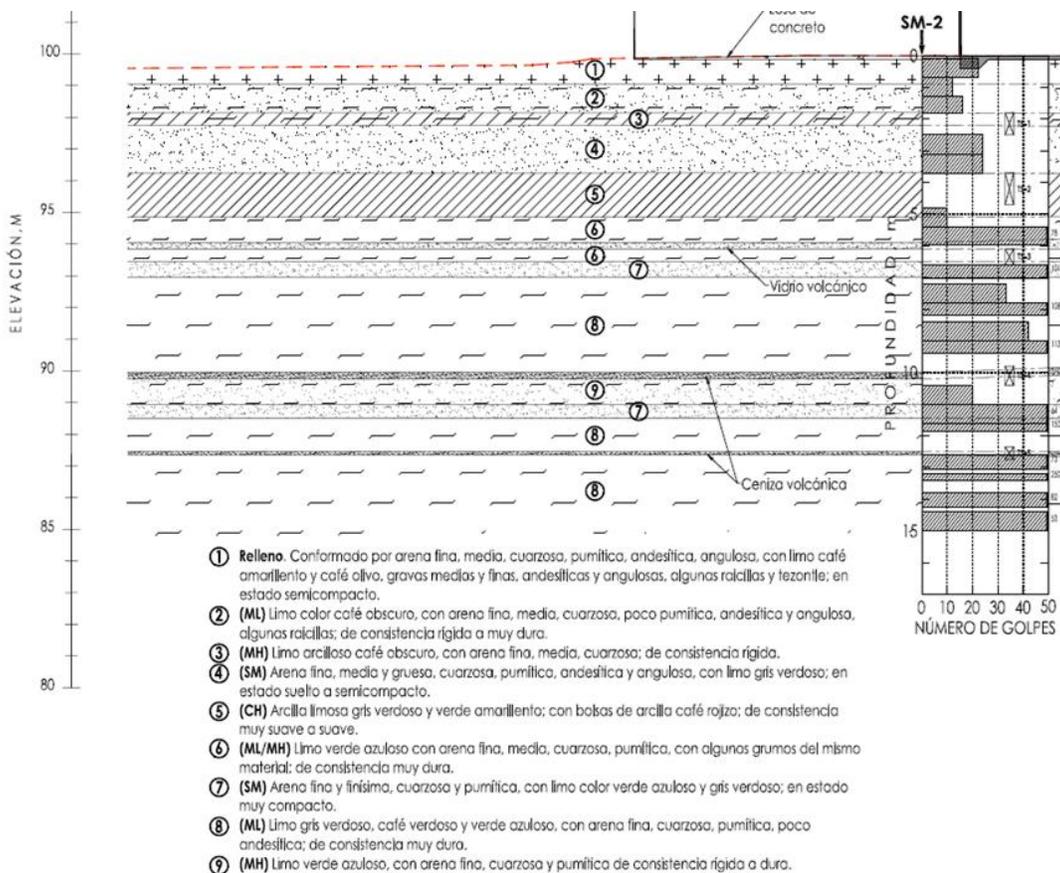


Figura 79. Secuencia estratigráfica en la Providencia



Dentro de la información geotécnica recopilada también se cuenta con datos de trabajos realizados en la porción sur de la laguna en las inmediaciones de la zona industrial “Centro de distribución Zumpango” (CDIS Zumpango), donde se realizaron PCA’s, en la zona, donde se identificaron, las siguientes características litológicas hasta una profundidad de 2 metros (cuadro 8). En esta misma zona se realizaron perforaciones exploratorias hasta una profundidad de 20 metros cuyos resultados se presentan en el cuadro 9.

Cuadro 8. Resultados de la prueba PCAs en el CDIS Zumpango

Sondeo	Estrato	Humedad, %	Límites, %		C. lineal, %	Granulometría			SUCS	CBR, %	Expansion, %
			Líquido	Plástico		Gravas	Arenas	Finos			
V1	A	45.8	56	27	7.3	0.1	32.6	67.3	MH	5.70	3.70
	B	24.4	25	19	0.0	0.0	66.3	33.6	SM	6.60	1.10
V2	A	45.2	55	26	7.3	1.0	32.7	66.3	MH	3.60	3.04
	B	17.9	21	NP	0.0	0.0	80.9	19.1	SM	6.67	1.25
V3	A	25.8	52	28	6.6	0.8	33.8	65.4	MH	5.92	3.58
	B	21.9	24	19	0.0	0.2	63.2	36.7	CL-ML	7.50	2.83
V4	A	39.1	55	26	6.9	2.9	47.3	49.8	SM	3.67	2.91
	B	12.4	22	NP	0.0	0.0	70.1	29.9	SM	7.72	2.97
V5	A	40.3	48	33	6.8	0.0	32.1	67.9	ML	2.55	3.01
	B	20	24	18	2.1	0.0	73.0	27.0	SM	6.67	0.45
V6	A	34.1	34	27	2.5	0.0	62.5	37.5	SM	4.72	1.48
	B	12.6	27	NP	1.6	0.0	82.6	17.4	SM	3.45	0.23
V7	A	25.2	50	23	11.1	0.0	19.5	80.5	CH	1.00	5.21
	B	35.8	47	31	6.3	0.0	30.6	69.4	ML	2.25	2.26
V8	A	22.5	56	30	9.8	0.0	19.6	80.4	MH	2.17	5.09
	B	44.6	35	22	4.9	0.0	40.6	59.4	CL	2.55	1.24
V9	A	47	62	29	10.1	0.0	20.4	79.6	CH	1.42	6.43
	B	13.4	22	NP	0.0	0.1	81.6	18.3	SM	7.50	0.04



Cuadro 9. Resumen de perforación geotécnica en el CDIs Zumpango

REGISTRO DE EXPLORACION				OBRA: CEDIS CHEDRAUI			LOCALIZACION:			
BRIGADA:				SONDEO: 01			TIPO: MIXTO			
				FECHA DE INICIO: 03 DE ABRIL DE 2019			PERFORADORA: LONGYEAR 34			
							BOMBA:			
							FECHA DE TERMINACION: 04 DE ABRIL DE 2019			
MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)		LONGITUD DE AVANCE (m)	RECUPERACION		No. DE GOLPES			TIPO DE HERRAMIENTA DE MUESTREO	CLASIFICACIÓN EN CAMPO Y OBSERVACIONES
	No.	DE		A	(m)	%	15 cm	30 cm		
1	0.00	0.60		35		11	40	22	TP	ARCILLA PLASTICA C/ARENA FINA CAFÉ OSCURO Y RELLENO
2	0.60	1.20		40		10	24	45	TP	LIMO ARENOSO CAFÉ VERDOSO C/ARENA FINA CAFÉ OSCURO
3	1.20	1.65		10		15	50/30		TP	ARENA FINA CAFÉ CLARO
-	1.65	1.80		SR		AVANCE			BT	
4	1.80	2.25		38		2	50/30		TP	ARENA FINA CAFÉ VERDOSO
-	2.25	2.40		SR		AVANCE			BT	
5	2.40	3.00		50		1	1	1	TP	ARCILLA CAFÉ CLARO
6	3.00	3.90		90		PRESION			SHELBY	ARCILLA CAFÉ OSCURO
7	3.90	4.50		40		1	3	1	TP	ARENA FINA VERDOSA CAFÉ C/ARCILLA VERDOSA CAFÉ
8	4.50	5.10		38		18	32	26	TP	LIMO ARENOSO VERDOSO
9	5.10	5.70		42		5	19	17	TP	LIMO ARENOSO VERDOSO C/ARENA FINA CAFÉ CLARO
10	5.70	6.10		30		10	50/25		TP	ARENA LIMOSA VERDOSA
-	6.10	6.30		SR		AVANCE			BT	
11	6.30	7.20		60		PRESION			SHELBY	LIMO ARENOSO VERDOSO
12	7.20	7.35		15		50/15			TP	LIMO ARENOSO VERDOSO
-	7.35	7.80		SR		AVANCE			BT	
13	7.80	7.95		15		50/15			TP	LIMO ARENOSO VERDOSO
-	7.95	8.40		SR		AVANCE			BT	
14	8.40	8.53		13		50/13			TP	LIMO ARENOSO VERDOSO
-	8.53	9.00		SR		AVANCE			BT	
15	9.00	9.90		40		PRESION C/ROT			SHELBY	ARENA FINA BLANQUIZA C/LIMO VERDOSO
16	9.90	10.50		30		16	15	15	TP	LIMO ARCILLOSO VERDOSO ARENOSO FINO BLANQUIZO
17	10.50	11.10		27		20	30	20	TP	LIMO ARCILLOSO VERDOSO
18	11.10	11.70		25		18	38	27	TP	LIMO ARCILLOSO VERDOSO
19	11.70	12.60		75		ROTACION			DENISON	LIMO ARENOSO VERDOSO
20	12.60	12.85		25		20	50/10		TP	LIMO ARENOSO GRIS VERDOSO
-	12.85	13.20		SR		AVANCE			BT	
21	13.20	13.35		15		50/15			TP	LIMO ARENOSO GRIS VERDOSO
-	13.35	13.80		SR		AVANCE			BT	
22	13.80	14.70		30		ROTACION			DENISON	LIMO ARENOSO GRIS VERDOSO
23	14.70	15.00		25		40	50/10		TP	LIMO ARENOSO GRIS VERDOSO
OBSERVACIONES:										PROF. DE PROYECTO: _____ PROF. REAL: _____ ADEME(m): _____ N.A.F.: _____ OPERADOR: EDGAR IVAN VACI SUPERVISOR: _____

5.4.4 Diseño sísmico

El sistema PRODISIS (PROgrama de Diseño SÍsmico) fue desarrollado como una herramienta de ayuda para la aplicación de las nuevas recomendaciones de diseño sísmico contenidas en el Capítulo de Diseño por Sismo del Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE (CDS-MDOC 2015).

Originalmente, fue diseñado para obtener el valor de la aceleración a nivel del terreno rocoso, considerando que este varía a lo largo de todo el país, y para la construcción de espectros de diseño. Sin embargo, se incluyen módulos para facilitar la aplicación de algunos criterios contenidos en el Manual de Diseño de Obras Civiles, capítulo Diseño por Sismo 2015 (figura 80).

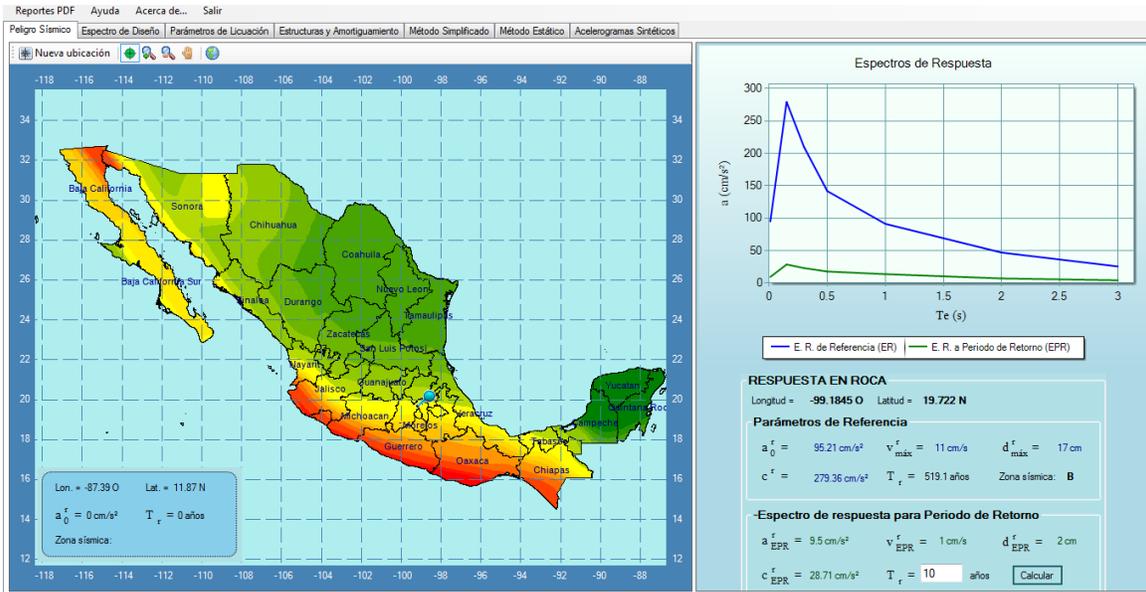


Figura 80. Aceleración a nivel del terreno

Dentro de la información recopilada se tiene una prueba de Down-Hole (DH), el más cercano a la zona de estudio se ubica en la porción sur de la zona de la laguna de Zumpango, específicamente en la zona industrial CEDIS Zumpango, donde se perforo un pozo hasta 30 m de profundidad en el sitio.

De la lectura de los sismogramas y análisis de las dromocrónicas construidas a partir de los tiempos de arribo reducidos a la vertical en este DH, se determinaron las velocidades de intervalo, tanto longitudinal como transversal, de los diferentes estratos o paquetes litológicos presentes en este sitio, las cuales son correlacionables con las características y distribución de los materiales presentes en el subsuelo, determinadas geotécnicamente.

En el cuadro 10 se muestra en forma resumida la estratigrafía del sitio y propiedades físicas de cada uno de los estratos o paquetes litológicos principales que constituyen el subsuelo. En este se consignan las velocidades de propagación longitudinales y transversales, así como los módulos elásticos dinámicos de los estratos o paquetes litológicos principales que constituyen el subsuelo del sitio, los cuales se describen brevemente a continuación:



Cuadro 10. Resumen estratigráfico y velocidades en el CDIs Zumpango

Prof. (m)	Material Tipo	Vp (m/s)	Vs (m/s)	γ (Ton/m ³)
0.00 - 2.200	MATERIAL DE RELLENO 0 < N < 3	305	51	1.160
2.20 - 8.60	LIMO PLASTICO LACUSTRE 0 < N < 1	303	56	1.150
8.60 - 14.00	LIMO PLASTICO ARENOSO N = 0	1016	50	1.300
14.00 - 20.60	LIMO PLASTICO ARENOSO N = 0	1229	52	1.250
20.60 - 26.20	LIMO PLASTICO ARENOSO N = 0	1262	56	1.240
26.20 - 30.50	LIMO CEMENTADO N > 50	1356	139	1.260

- 1) El primero de ellos y superficial presenta espesor promedio de 2.2 m, número de golpes a la penetración estándar de 0 a 3, peso volumétrico de 1.16 Ton/m³, NAF a 1.60 m de profundidad, velocidad longitudinal de 305 m/s y velocidad transversal de 51 m/s, correspondientes a materiales de relleno con arcilla que resultan fácilmente removibles con cualquier tipo de maquinaria. Presenta Coeficiente de Poisson de 0.49 (indicativo de su alta deformabilidad), Módulo de Young de 91 Kg/cm² y Módulo de Cortante de 31 Kg/cm²; parámetros indicativos de su baja rigidez dinámica que repercute significativamente en la amplificación de los movimientos sísmicos que inciden en su base.
- 2) Por debajo del anterior y con espesor de 6.10 m, se presenta el segundo paquete litológico conformado por limo plástico lacustre en estado blando, con número de golpes a la penetración estándar de 0 a 1, peso volumétrico de 1.15 Ton/m³, velocidad longitudinal de 303 m/s y velocidad transversal de 56 m/s. Presenta Coeficiente de Poisson de 0.48, indicativo de su alta deformabilidad, Módulo de Young de 109 Kg/cm² y Módulo de Cortante de 37 Kg/cm²; parámetros indicativos de su baja rigidez dinámica que repercute significativamente en la amplificación de los movimientos sísmicos.



- 3) De 8.60 a 14.00 m de profundidad, se presenta limo plástico arenoso en estado blando con número de golpes a la penetración estándar de 0, peso volumétrico de 1.30 Ton/m³, velocidad longitudinal de 1016 m/s y velocidad transversal de 50 m/s. Presenta Coeficiente de Poisson de 0.50, indicativo de su alta deformabilidad, Módulo de Young de 99 Kg/cm² y Módulo de Cortante de 33 Kg/cm²; parámetros indicativos de su baja rigidez dinámica. La amplificación de los movimientos sísmicos que inciden en su base es importante.
- 4) Subyaciendo al anterior y con espesor de 6.60 m, de 14.0 a 20.60, continua el limo plástico arenoso en estado blando, con número de golpes a la penetración estándar de 0, peso volumétrico de 1.25 Ton/m³, velocidad longitudinal de 1,229 m/s y velocidad transversal de 52 m/s. Presenta Coeficiente de Poisson de 0.50 (indicativo de su alta deformabilidad), Módulo de Young de 103 Kg/cm² y Módulo de Cortante de 34 Kg/cm²; parámetros indicativos de su baja rigidez dinámica. La amplificación de los movimientos sísmicos que inciden en su base es alta.
- 5) De 20.60 a 26.20 m de profundidad, continua el limo plástico arenoso en estado blando, con número de golpes a la penetración estándar de 0, peso volumétrico de 1.24 Ton/m³, velocidad longitudinal de 1262 m/s y velocidad transversal de 56 m/s; arable con cualquier tipo de maquinaria obteniéndose altos rendimientos estimativamente de 90 a 100 %. Presenta Coeficiente de Poisson de 0.50, indicativo de su alta deformabilidad, Módulo de Young de 119 Kg/cm² y Módulo de Cortante de 40 Kg/cm²; parámetros indicativos de su baja rigidez dinámica. La amplificación de los movimientos sísmicos que inciden en su base es alta.
- 6) Subyaciendo al anterior y con espesor de 4.30 m, se presenta limo cementado, con número de golpes a la penetración estándar mayor de 50, peso volumétrico de 1.26 Ton/m³, velocidad longitudinal de 1,356 m/s y velocidad transversal de 139 m/s. Presenta Coeficiente de Poisson de 0.49 (indicativo de su alta deformabilidad), Módulo de Young de 742 Kg/cm² y Módulo de Cortante de 248 Kg/cm²; parámetros indicativos de su mediana rigidez dinámica que repercute de manera importante en la amplificación de los movimientos sísmicos que inciden en su base.



5.5 Diagnóstico

Regionalmente la ubicación de la zona de estudio la enmarca en el denominado Eje Neovolcánico, un espacio donde la corteza terrestre ha sufrido grandes esfuerzos tectónicos desde principios del periodo Terciario y es caracterizado por el predominio de derrames basálticos, incluyendo básicamente material volcánico del Cuaternario, así como la presencia de depósitos litológicos de antiguas zona de lagos.

La formación y origen geológico de la zona de estudio se encuentra entre dos ambientes propiamente volcánicos; el primero de ellos, enmarcado por la presencia de la Sierra Las Cruces y un segundo ambiente más antiguo corresponde a la Sierra Tepetzotlán.

La secuencia estratigráfica identificada muestra a nivel superficial un espesor de 0 a 2 metros de formación de suelos residual, subyaciendo a esta unidad se presenta una secuencia interestratificada de material clasificado como tobas arcillo, con la presencia de lentes de arenas finas, con espesores variables hasta metros de espesor, alcanzando una profundidad identificada hasta 35 metros. Le subyacen, a la secuencia anterior, un paquete de tobas arenosas de espesor indeterminado, de acuerdo con datos de estudios geofísicos realizados en la zona.

A nivel superficial no existe la presencia de lineamientos estructurales que pudieran ser correlacionados y/o interpretados como fallas o fracturas, en la zona ni en las inmediaciones del predio, básicamente **la secuencia estratigráfica se comporta de forma homogénea, sin la presencia de discontinuidades geológico-estructurales verticales.**

Toda vez que se observa una secuencia estratigráfica horizontal y homogénea, **por lo que no se perciben riesgo de carácter estratigráfico, ni la presencia de oquedades y/o cavernas.**

El contacto entre las secuencias litológicas señaladas es concordante de acuerdo con registros litológicos de pozos cercanos al predio, esto conforma una relación de paralelismo entre los conjuntos de litologías identificadas, las cuales se presenta de forma semi- horizontal, disminuyendo la presencia de planos de debilidad geológico-estructural y planos de deslizamiento.

A nivel semi regional se detectó la presencia de un lineamiento a nivel superficial, a una distancia de 2.8 kilómetros localizada en las inmediaciones de la comunidad de Jaltenco, dicha discontinuidad presenta una dirección preferencia NE-SW, con una longitud estimada de 800 metros.



Dado que la zona de estudio se encuentra dentro de un ambiente volcánico, por la juventud de todas las unidades volcánicas señaladas, con edades datadas inferiores a 3.7 millones de años, no se puede descartar que puedan ser activas. Sin embargo, **en fechas recientes no se ha encontrado ningún vestigio de actividad volcánica, por lo que no se considera que representen algún tipo de peligro ni a corto ni mediano plazo para la zona.**

Con información recabada en el Servicio Sismológico Nacional (SSN) desde el día primero de enero del año 1990 hasta el 15 de octubre del año 2024, en las inmediaciones de la zona de ese han presentado 4 epicentros de los sismos localizados en las inmediaciones de la zona estudió, los cuales presentan magnitudes inferiores a 3.1 y superiores a 2.1 grados en la escala de Richter, con hipocentros que van de 2 a 4 kilómetros.

Dadas las características geológicas de la zona y las magnitudes registrados en estos sismos no se tienen reportes de daños estructurales en los inmuebles de la zona. Adicionalmente durante los últimos eventos sísmicos, superiores a los 7 grados, registrados dentro de la zona metropolitana de la ciudad de México, es claro que en esta zona existe un menor efecto sísmico, toda vez que no se han registrado reporte de daños estructurales, sobre los inmuebles.

Dadas las características litológicas y espesor de la secuencia granular identificada y considerando que el nivel de explotación del acuífero está más allá de los 85 metros de profundidad, es de esperar que la consolidación de los sedimentos sea de baja a nula, derivada básicamente por la pérdida de humedad de la secuencia granular.

Por otra parte, como resultado de las características topográficas y su posición respecto a la circulación local y regional de los vientos, la lluvia se presenta en forma de chubascos y en las épocas de frentes cálidos (ciclones) y fríos (nortes) las lluvias son más de tipo estacionario.

Finalmente, tomando como referencia la Carta Hidrológica de la República Mexicana el área en estudio es considerada como Zona Húmeda por lo que es baja la presencia de lluvias ciclónicas en el lugar. Aunado a lo anterior y por las características topográficas prevalecientes en el predio de estudio se descarta la posibilidad de inundación.



Conclusión

El proyecto de la laguna de Zumpango representa un cambio de paradigma en los usos del agua. Este involucra cuerpos de agua, humedales y regeneración ambiental lo cual contribuye a reducir el riesgo de desastres de origen natural y antropogénico, además de mitigar los efectos causados por el cambio climático.



Referencias

- (S/f). Recuperado el 19 de septiembre de 2024, de http://chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://sil.gobernacion.gob.mx/Archivos/Documentos/2005/04/asun_1850464_20050414_1113594645.pdf
- (S/f-b). Recuperado el 19 de septiembre de 2024, de <http://chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www4.hcdn.gob.ar/dependencias/dsecretaria/Periodo2024/PDF2024/TP2024/0965-D-2024.pdf>
- AYALA-CARCEDO, F.J. Análisis de los conceptos fundamentales de riesgos y aplicación a la definición de tipos de mapas de riesgos geológicos. Boletín Geológico y Minero, 1990, vol. 101-3, p. 456-467.
- Armando García-Palomo (2008). El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México. Central Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 25, núm. 1.
- Atlas nacional de riesgo, CENAPRED, 2016.
- Borin, M., Maucieri, C., Mietto, A., Pavan, F., Politeo, M., Salvato, M., Tamiazzo, J. y Tocchetto, D. (2012). La fitodepurazione per il trattamento di acque di origine Agricola e di reflui zootecnici. In Veneto Agricoltura, Azienda Regionale per I settori Agricolo, Forestale e Agro-Alimentare.
- CENAPRED (2001). “Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México”, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México D.F. Versión Electrónica 2014
- CONAGUA, 2019. Sistema de Información Hidrológica. Base de datos histórica del SIH de estaciones climatológicas, hidrométricas y presas. Disponible en: <https://sih.conagua.gob.mx/>
- Comisión Nacional del Agua, 1996. Diseño de redes de monitoreo de los acuíferos de los valles de Pachuca-Tizayuca, Texcoco, Chalco-Amecameca y la Ciudad de México. Realizado por Lesser y Asociados S.A. de C.V.
- Custodio, Emilio y Llamas, Manuel Ramón. Tomos I y II. 1976. Hidrología Subterránea. Primera edición. Ediciones Omega.
- Dante J. Moran, INEGI México, 1984. Geología de la República Mexicana.
- De Cserna Z., M. De la Fuente-Duch, M., L. Triay, L.M. Mitre-Salazar, R. Mota-Palomino Palacios-Nieto (1987). Estructura Geológica-Gravimetría, Sismicidad y relaciones geotectónicas regionales de la Cuenca de México. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Bull. 104, 71.
- Instituto de Ingeniería, UNAM-CENAPRED (2003) “Guía Metodológica para el Análisis del Peligro, Vulnerabilidad, Riesgo y Pérdidas Causadas por Desastres Naturales o Antropogénicos y su Reducción y Prevención”
- López Ramos, Ernesto: Geología de México, 2da. Ed. 1980.
- Eckhardt K., 2005. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. Hydrological Processes, 19, 507 - 515. DOI: 10.1002/hyp.5675



- NASA, 2024. NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER). NASA Langley Research Center (LaRC). Disponible en: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Nimptsch, J.et al. (2008) Cyanobacterial toxin elimination via bioaccumulation of MC-LR in aquatic macrophytes: An application of the “Green Liver Concept”. *Environ. Sci. Technol.* 42 (22), 8552-8557. doi:10.1021/es8010404. • Moshiri, G. A. (1993). *Constructed wetlands for water quality improvement*. CRC Press.
- Ortega G., A., J.A. Cherry and Rudolph D.L. (1993). Large-scale aquitard consolidation near Mexico City. *Ground Water* 31, 708-718.
- Ordaz M. (mayo 1996), “Algunos Conceptos del Análisis de Riesgos”. *Revista Prevención*. CENAPRED, número 14, p.p. 6-11.
- Pitre, C.V. (1994). Analysis of induced recharge from a waste water canal through fractured clays in Mexico City. M.Sc. Thesis, University of Waterloo, 224 p.
<http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/> ; <http://www.inegi.org.mx/>
- Servicio Geológico Mexicano, 2002. Carta Geológico-Minera “Ciudad de México” E14-2. Escala 1:250,000.