



**Proyecto de Aprovechamiento y Manejo
Ambiental
Del lago de Texcoco**

Informe Final

**Proyecto de Aprovechamiento y
Manejo Ambiental
Del lago de Texcoco**

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
Serafín 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 Lucía
Daniel Vargas
José Ricardo Ovando Ramirez
Lizbeth Anabel Laguna Leal
Regina Monroy Bustamante
Lucía 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. Sarai 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 propósito de este informe es presentar los resultados derivados de la recopilación y análisis de información existente, así como de la generada a través de la realización de estudios y trabajos de campo en la zona del Lago de Texcoco. Se llevó a cabo un análisis exhaustivo de las condiciones del agua salina y la identificación de las características físico-químicas necesarias para optimizar el cultivo de espirulina, un recurso biotecnológico de alto valor.

Se plantea el desarrollo de un tren de tratamiento de agua residual que transforme el recurso disponible en un medio adecuado para el cultivo de espirulina, maximizando su rendimiento y sostenibilidad.



Contenido

Glosario	16
I. Componente Social.....	20
1.1 Nuestra relación con el agua	20
1.2 Problemática Local	23
1.3 Cómo el Cambio de Paradigma Soluciona la Problemática	25
1.5 Visitas de Campo y Levantamiento Fotogramétrico	30
1.5.1 Fotogrametría	30
1.5.2 Lago de Texcoco, zona poniente	31
II. Propuesta Conceptual de Humedales para el Reúso de Agua Tratada a través del Lago de Texcoco.....	35
2.1 Humedal Artificial	35
2.2 Elementos ingenieriles	36
2.3 Especies vegetales.....	37
2.4 Tipos de humedales	38
2.4.1 Humedales Flotantes.....	38
2.4.2 Humedales de tratamiento de flujo horizontal (FTWS).....	39
2.4.3 Sistema de Macrófitas Sumergidas.....	40
2.4.4 Humedal tipo francés o de Flujo Vertical	40
2.4.5 Humedal de tratamiento superficial de agua libre	41
2.5.1 Especies vegetales para los humedales	45
III. Propuesta Conceptual de Tratamiento de Aguas Residuales a través del lago de Texcoco.....	48
3.1 Descripción General	48
3.2 Propuesta Tecnológica	49
3.2.1 Pretratamiento.....	49
3.2.2 Tratamiento Secundario.....	49
3.2.3 Tratamiento Avanzado.....	49
3.2.4 Control de Salinidad y Composición Iónica	49
3.2.5 Almacenamiento y Aireación.....	49
3.3 Beneficios del Proyecto.....	50
IV. Evaluación Geológica-Geotécnica	53
4.1 Marco Físico	53
4.1.1 Fisiografía	53
4.1.2 Geomorfología	54



4.1.3	Clima Regional	57
4.2	Marco Geológico	59
4.2.1	Estratigrafía	59
4.2.2	Litoestratigrafía de la zona de estudio	63
4.2.3	Reconocimiento geológico local	64
4.2.4	Estratigrafía de la zona de estudio	66
4.3	Marco Geofísico	70
4.3.1	Información geofísica de la zona de estudio	70
4.3.2	Interpretación estratigráfica	76
4.4	Marco Geotécnico	77
4.4.1	Regiones Sísmicas en México	77
4.4.2	Zonificación geotécnica de la zona de estudio	79
4.4.3	Información geotécnica de la zona de estudio	80
4.4	Diagnóstico	83
	Conclusión	87
	Referencias	88



Índice de figuras

Figura 1. Lago de Zumpango, detalle de mapa de Upsala c.a. 1550.....	20
Figura 2. Canal en San Nicolás Tlaminca construido sobre trazo prehispánico, Unidad de Riego “Barranca Temexco”.....	21
Figura 3. Pescador del Lago de Texcoco, circa.1900, Walter Lehman.....	22
Figura 4. Obras del NAICM en el Lago de Texcoco.....	24
Figura 5. Flujo de trabajo para el desarrollo de los proyectos conceptuales.....	27
Figura 6. Primer taller/faena en el Río Chapingo.....	27
Figura 7. Acercamiento con gente de la localidad para escuchar las principales problemáticas de la región.....	28
Figura 8. Ejercicio de cartografía colaborativa en Santa Catarina Acolman.....	28
Figura 9. Presentación del grupo de contraloría y grupo técnico, sobre la metodología de trabajo.....	29
Figura 10. Fotografía de los representantes del nodo Texcoco, Xochimilco, Tula y Zumpango.....	29
Figura 11. Vista panorámica del lago Texcoco desde del lado sur sobre el área de Casa Colorada, la zona urbana de Ciudad Nezahualcóyotl por el lado poniente.	31
Figura 12. Vista del lago Texcoco desde lado norte del lado derecho se observa la zona urbana de Ciudad Nezahualcóyotl.	31
Figura 13. Vista hacia Circuito Exterior Mexiquense hacia el lado sur, por la delimitación poniente del Parque Ecológico del Lago de Texcoco con el antiguo NAIM al fondo.....	32
Figura 14. Vista aérea hacia Casa Colorada.....	32
Figura 15. Vista del lago Texcoco desde lado poniente, se aprecia el proyecto del PELT y al sur la zona urbana de Ciudad Nezahualcóyotl.	33
Figura 16. Corte esquemático humedal flotante, componentes del humedal	39
Figura 17. Ejemplo de Islas flotantes en el Parque Ecológico de Xochimilco, Ciudad de México.....	39
Figura 18. Corte esquemático humedal flujo horizontal, componentes del humedal.....	40



Figura 19. Corte esquemático humedal de macrófitas sumergidas, componentes del humedal.	40
Figura 20. Corte esquemático humedal flujo vertical, componentes del humedal.	41
Figura 21. Corte esquemático humedal flujo superficial, componentes del humedal.....	42
Figura 22. Figura VIII.2.2.4 Propuesta de Ubicación macrohumedal Lago de Texcoco.....	42
Figura 23. Propuesta de configuración de las secciones del Humedal.....	43
Figura 24. Propuesta de ubicación de cuerpo de agua.	44
Figura 25. <i>Phragmites australis</i>	45
Figura 26. <i>Typha latifolia</i>	45
Figura 27. <i>Sagittaria macrophylla</i>	46
Figura 28. <i>Eloдея sp.</i>	46
Figura 29. <i>Ceratophyllum demersum</i>	46
Figura 30. <i>Najas minor</i>	46
Figura 31. Diagrama 1: Proceso General.....	48
Figura 32. Diagrama 2: Monitoreo de procesos.....	50
Figura 33. Diagrama 3: Flujos de energía y residuos.....	51
Figura 34. Localización y distribución de la provincia fisiografica Eje Neovolcanico	53
Figura 35. Localización morfológica regional de la zona de estudio.....	55
Figura 36. Distribución de unidades Morfológicas (UM).....	56
Figura 37. Localización y extensión de climas en la zona.	58
Figura 38. Carta Hidrológica de la República Mexicana.	58
Figura 39. Columna estratigráfica pozo 1, ramal Texcoco.....	59
Figura 40. Columna estratigráfica pozo 21, ramal Texcoco.....	61
Figura 41. Localización de pozos profundos y batería de pozos Peñón-Texcoco.....	62
Figura 42. Geología regional de la zona de estudio.	62
Figura 43. Estratigrafía presente en la zona de estudio.....	65
Figura 44. Sección estratigráfica esquemática.....	68



Figura 45. Sección de Calicateo Geo-eléctrico.	70
Figura 46. Localización de perforaciones para potenciales lumbreras.	71
Figura 47. Sección de Calicateo Geo-eléctrico.	76
Figura 48. Zonas Sísmicas de México.	78
Figura 49. Zonificación geotécnica.	79
Figura 50. Localización de perforaciones exploratorias.	80
Figura 51. Modelo geotécnico del tramo.	81
Figura 52. Propiedades del sondeo S23.	82
Figura 53. Valores medios (Murillo, et al).	82



Índice de cuadros.

Cuadro 1. Mantos y refractores determinados en la línea base.....66

Cuadro 2. Refracción sísmica realizada por la CFE en 1987.67

Cuadro 3. Resumen de resultados de Down- Hole72

Cuadro 4. Periodos dominantes..... 75



Acrónimos, Siglas y Unidades

Acrónimo, siglas y unidades	Significado
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CO ₂	Dióxido de carbono
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno, utilizando dicromato de potasio como agente oxidante
Fe	Hierro
MBBR	Reactor de Biopelícula de Lecho Móvil
OD	oxígeno disuelto
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)
Mg	Magnesio
SST	Sólidos Suspendidos Totales
Zn	Zinc



Glosario

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

Filtración biológica sobre carbón activado (BAC). Este proceso generalmente va precedido de la inyección de ozono, el cual oxida la materia orgánica convirtiendo los compuestos no biodegradables y lentamente biodegradables en biodegradables, consiguiendo que puedan ser posteriormente eliminados biológicamente en los filtros de carbón activo. Sin embargo, la inestabilidad del ozono en el agua hace que se produzcan ácidos carboxilos, alcoholes y aldehídos, conocidos como subproductos de la desinfección. Por lo tanto, en el filtro se adiciona un medio soporte (carbón activado granular) para que los microorganismos remuevan la materia orgánica biodegradable. Debido a que parte del ozono se convierte en oxígeno, el agua que llega al filtro de carbón activado tiene las condiciones ideales para que exista un desarrollo de bacterias aerobias. En el filtro se eliminan subproductos de la desinfección no deseados, y reduce los niveles de carbono orgánico disuelto biodegradable, asimilándolo a valores que consigan la bioestabilidad del agua producto, a fin de evitar recrecimiento de *biofilm* en las redes de distribución. Aunque la capacidad de eliminación de materia orgánica se reduce a medida que el filtro se satura y entra en la fase biológica, la biodegradación en esta fase se mantiene estable y perdura a lo largo de los meses sin preocupaciones por la regeneración del carbón.

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.

Oxígeno Disuelto. El oxígeno disuelto (OD) es la cantidad de oxígeno gaseoso que esta disuelto en el agua. El oxígeno libre es fundamental para la vida de los peces, plantas, algas, y otros organismos; por eso, desde siempre, se ha considerado como un indicador de la capacidad de un río para mantener la vida acuática.

Parámetro. Una propiedad que se mide o se observa.

Procesos de membrana. En general se pueden decir que los procesos de membranas usan una barrera permeable para filtrar componentes seleccionados de mezclas. Los sistemas de procesamiento con membranas pueden disminuir los costos de energía, eliminar emisiones y mejorar la calidad del producto en alguna aplicación.



Microfiltración. Elimina los sólidos en suspensión de tamaño superior a $0,1 - 1,0 \mu\text{m}$. Es efectiva eliminando los patógenos de gran tamaño como Giardia y Cryptosporidium. Se suele emplear la ultrafiltración cuando la concentración de STD (Sólidos Totales Disueltos) no es problemática, ya que los poros de la membrana son comparativamente grandes como para filtrar partículas muy pequeñas. Más usualmente se emplea como pretratamiento de sistemas con las membranas más delicadas, como la osmosis inversa o la nanofiltración.

Ultrafiltración. Puede emplearse para eliminar esencialmente todas las partículas coloidales y alguno de los contaminantes disueltos más grandes ($0,01 \text{ mm}$). Se utiliza la UF cuando deben eliminarse prácticamente todas las partículas coloidales (incluyendo la mayor parte de microorganismos patógenos). Estos sistemas, capaces de eliminar bacterias y virus se suelen utilizar como pretratamiento para sistemas de nanofiltración, hiperfiltración u osmosis inversa. Puesto que los coloides se eliminan, el agua tratada debe tener una turbidez prácticamente nula.

Nanofiltración. Elimina los contaminantes de tamaño superior al nanómetro ($0.001 \mu\text{m}$). Las membranas de NF se emplean cuando se requiere eliminar prácticamente, aunque no todos, los sólidos disueltos. La tecnología se llama también ablandamiento por membrana, ya que se eliminan del agua los iones de la dureza que tienen 2 cargas (calcio y magnesio) mejor que los que solo tienen una (sodio, potasio, cloro, entre otros).

Ósmosis inversa. Es una tecnología de membrana en la cual el solvente (agua) es transferido a través de una membrana densa diseñada para retener sales y solutos de bajo peso molecular. La OI elimina prácticamente todas las sales y los solutos de bajo peso molecular. Se considera una eliminación prácticamente total de todas las sales disueltas y total de los sólidos en suspensión. Debido a esto, las membranas de OI son la elección cuando se necesita agua muy pura o de bebida, especialmente si la fuente es agua salobre o agua de mar.



Proyecto de Aprovechamiento y Manejo Ambiental Del lago de Texcoco

Informe final



Capítulo 1

Componente Social



I. Componente Social

1.1 Nuestra relación con el agua

El Acolhuacan¹ se ubica en una latitud volcánica y lacustre, conocida como Sierra Nevada, Sierra de Tláloc o Sierra de Texcoco, y es parte del Eje Volcánico Transversal; lugar del nacimiento serpentino de los ríos de esta región, que son nueve afluentes principales: Coatepec, Santa Mónica, San Bernardino, Chapingo, Texcoco, Coxcacaco, Xalapango, Papalotla y San Juan. Están compuestos por una compleja red de barrancas, canales, caños, metepantles, terrazas y jagüeyes; los cuales crean una red interconectada que confluye hacia el Lago de Texcoco.



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

¹ Conformada en la actualidad por los municipios de Acolman, Otumba, San Martín de las Pirámides, San Juan Teotihuacán, Tezoyuca, Atenco, Chiconcuac, Chiauhtla, Papalotla, Tepetlaoxtoc y Texcoco.



Muchos de estos canales son obras hidráulicas que persisten desde la época prehispánica del posclásico tardío. En su momento, fueron elaborados para mejorar la producción agrícola, hortícola, forestal y anfibia; así como para crear infraestructura urbana y recreativa; como es el caso de la construcción de uno de los primeros jardines botánicos en Mesoamérica en el cerro Tetzcotzincó: que incluía una red de canales para alimentarlo, espacios de descanso y disfrute estético del agua. Representa un ejemplo a seguir en el presente de gestión hídrica sustentable.



Figura 2. Canal en San Nicolás Tlaminca construido sobre trazo prehispánico, Unidad de Riego “Barranca Temexco”.

Los canales están ligados a saberes y ciclos ambientales campesinos que se han configurado en relaciones de compartición y colaboración, recreadas a través de un proceso ritualizado del ciclo agrícola; encarnado en los fenómenos meteorológicos y astronómicos.

En tierras acolhuas, se ha tramado la vida transitando por los caminos de agua; éstos son huellas tangibles de la memoria colectiva en la vida cotidiana. Además, el Lago de Texcoco fue y es central en esta región y en la forma que ha adquirido la gran ciudad sobre los lagos. Su extrema salinidad, su estacionalidad, como vertiente más baja de la cuenca, le imprimieron su productividad económica y cultural para los pueblos lacustres,



incluso, con la presencia de especies endémicas. El axaiacatl, oculiztac, tecuitlatl, iztlatl, iztlacuitli, amoiotl, aneneztl, michpilli, acocil, atepocatl, cueiatl, amilotl xouli, cuitlapetotl, xalmichi, son ejemplos de algunos de los productos de “uno de los lugares más productivos del mundo” (Morett, L., en Primer Congreso de Espirulina Mexicana, 2024).



Figura 3. Pescador del Lago de Texcoco, circa.1900, Walter Lehman.

Las contradicciones y conflictos por la tierra y el agua tuvieron una nueva fuerza motriz con la colonización, las concesiones que daba la corona española, en calidad de mercedes reales de tierras fueron el motor para tomar partido y fracturar el territorio y sus relaciones simbióticas; así lo muestran los mapas de Platlachihqui y de Moyotepec de 1592 (Rojas 2020). Las tierras patrimoniales de la familia dinástica, de los antiguos gobernantes Acolhuas, fueron creciendo por la gran habilidad para fluir entre dos mundos: el de la labor y el del cultivo. Las tierras heredadas por Nezahualpilli fueron un argumento en contra de las mercedes reales; además, las comunidades expresaron su preocupación por la contaminación del agua y por el ingreso de ganado, en las partes altas, que acometieron los españoles.

Una segunda fuerza de transformación fue la colonización interna, ejercida por el Estado-nación; la monopolización de tierras y aguas en manos de hacendados, respondía al modelo industrializador de finales del siglo XIX e inicios del XX. La cantidad del vital líquido para resolver las necesidades de la Ciudad de México (la producción agrícola y lechera) impactó en todos los hábitos de la reproducción de la vida comunitaria en la micro-región.

Después del movimiento revolucionario, y el sucesivo reparto agrario y nacionalización de las aguas, se conformaron Juntas de Aguas intercomunitarias y agrarias, para la gestión de aguas; éstas dieron un aliento para la reorganización social de los pueblos. Las



aguas volvían a los lugareños y no al ayuntamiento, y aquella organización logró cierta autonomía para resolver problemas locales; los pueblos tomaron un nuevo protagonismo en la administración, conservación, distribución y vigilancia de los sistemas de agua de riego (González 2000).

Los acueductos (ríos y canales) y otros cuerpos de agua han sido las piezas, fundamentales de nuestra historia, pues permiten ensamblar el paisaje histórico, político, cultural y económico de la subcuenca de Texcoco, paisajes que se han ido transformando y desvaneciendo aceleradamente en los últimos años, a consecuencia de una modernidad capitalista que hunde sus raíces en la depredación agroindustrial, extractivista, taladora ilegal, e insosteniblemente urbanista.

1.2 Problemática Local

El problema del agua en la subcuenca de Texcoco, o Acolhuacan, es histórico y transversal, tiene como ejes centrales el extractivismo ampliado: un modelo económico y político hegemónico basado en la mercantilización de los territorios hídricos y un proceso de despojo y explotación de aquello que garantiza la reproducción de la vida en los mosaicos ecológicos de las comunidades que los habitan.

Al ser una región que tiene alta montaña, piedemonte y zona lacustre, hay problemáticas diferenciadas: la deforestación y tala ilegal de nuestros bosques de agua, afectan la recarga de los mantos freáticos. El piedemonte de la Sierra Nevada y muchos cerros de la Sierra de Patlachique se ven afectados por presencia de minería rapaz, exponenciada con el avance en la construcción del Nuevo Aeropuerto de la Ciudad de México (NAICM) en los terrenos federales del Lago de Texcoco. Los nueve ríos del oriente se han convertido en drenajes a cielo abierto y aún con ello, sus cauces proveen humedad y estabilidad a los suelos colindantes. La minería ha cortado algunos de sus cauces y también se encarpitaron varios en el contexto de las obras hidráulicas para garantizar que el NAICM no se inundara. El canal colector en la zona del lago desvía las aguas al Gran Canal del Desagüe y Túnel Emisor Oriente (TEO). Los municipios que se encuentran al norte de la región viven procesos de urbanización salvaje con la construcción masiva de viviendas y de la llegada de industrias, que ponen en riesgo el acceso al agua de la población y aumentan el riesgo de sufrir inundaciones al conectarse a los drenajes que no tienen capacidad para ello. Los Comités del Agua no tienen el reconocimiento y los gobiernos municipales los asedian para que acepten municipalizar el servicio de agua potable. Hay preocupación en la región del lago porque no hay certeza de que se realicen acciones para la recuperación de cuerpos de agua, y la existencia de un Plan Hídrico que lo garantice pues, en el Parque Ecológico Lago de Texcoco (PELT), se impulsan proyectos de gran impacto, bajo la idea de un “parque urbano” e incluso, se ha propuesto la construcción de una universidad en su interior.



Figura 4. Obras del NAICM en el Lago de Texcoco.

El extractivismo inmobiliario, a través del cambio de uso de la tierra campesina hacia su uso suburbano, es preocupante, pues se impulsa desde los Planes de Desarrollo Municipales sin consultar a las comunidades. Ello ha implicado, entre otras cosas, la sobredemanda y saturación de servicios públicos urbanos; en específico del agua potable y drenaje de agua residual que afectan gravemente el Derecho Humano al Agua, al saneamiento y la creación de un ambiente sano para los pueblos originarios, barrios y colonias; en detrimento del beneficio económico privado de las empresas inmobiliarias, que reciben ayuda de instancias gubernamentales que les facilitan asignaciones de agua y los servicios de drenaje.

En el Foro Comunitario de la Región Oriente del Estado de México, realizado el 30 de agosto de 2024 en la Universidad Autónoma Chapingo, se ejemplificó esta situación en movilizaciones actuales: acciones en contra de la construcción de viviendas en Pentecostés, Texcoco; denuncias de venta ilegal de pipas de agua del pozo de San Andrés, Chiautla; movilizaciones en Santa Catarina Acolman “urbanización salvaje y porque se conforme un sistema hídrico sustentable”. También se señaló que la tala clandestina de las zonas de montaña alta representa un tipo de extractivismo forestal. Otro problema señalado, fueron las altas cuotas de energía eléctrica establecida a los Sistemas Comunitarios de agua potable que, después de la Reforma Energética del año 2013, ha representado un endeudamiento económico para las familias que conforman el padrón de usuarios de estos sistemas (generalmente constituidos por asambleas comunitarias de los pueblos originarios); lo cual significa un extractivismo financiero, con objetivos privatizadores. También se habló de que no se pueden obviar las afectaciones acumulativas del extractivismo pétreo en los cerros de la región, a causa de megaproyectos como el cancelado NAICM, que ponen en riesgo las principales zonas de recarga hídrica.



El modelo de desarrollo económico desigual, la segregación social y la fragmentación territorial, a consecuencia del crecimiento industrial y suburbano, acelera la contaminación y degradación de las aguas superficiales y sus nichos ecológicos asociados; siendo el acuífero de Texcoco uno de los cuatro más sobreexplotados de la región del Valle de México, con una extracción que excede en un 130% la magnitud de recarga (Escobar y Palacios 2012). Ligado a este problema se encuentran, al menos, 180 minas en 15 municipios de la región orienten del Valle de México, que no sólo han modificado el paisaje, también rompieron las capas superficiales y subterráneas de los sistemas hídricos de montaña: matorrales xerofíticos, terrazas, arroyos, barrancas, jagüeyes, e incluso, cauces de ríos.

Finalmente, es relevante destacar un problema transversal en torno a los cuerpos de agua en la región del Acolhuacan: el tema de la desigualdad de género, que implica:

la exclusión de las mujeres de las estructuras de deliberación, [que] ha instalado una noción de territorialidad basada en una visión masculina y letrada en tanto apoderados de tierras, la prevalencia de la representación pública por parte de los varones ha concretado relaciones de dominación hacia las mujeres, las infancias y la personas de la diversidad sexo-genérica (LGBTIQ+), bajo una noción de territorio privado y privatizable, ampliando la división sexual del trabajo, la explotación en una doble jornada laboral en las tareas domésticas de reproducción de la vida, de igual modo, muy poco se han tomado en cuenta las más silenciosas y cotidianas prácticas de resistencia de las mujeres y los riesgos que implica. Las consecuencias de la falta de acceso y control sobre la tierra por parte de las mujeres, tiene un impacto transversal en lo ambiental e hídrico (Red de Investigación e Incidencia de la Memoria Biocultural del Valle de Teotihuacán 2022).

1.3 Cómo el Cambio de Paradigma Soluciona la Problemática

Las adecuaciones que la Cuenca de México ha sufrido a lo largo de siglos la hacen un caso paradigmático. Los pobladores prehispánicos hicieron obras hidráulicas que cambiaron su dinámica; después, con el dominio colonial, se abrió la cuenca endorreica² artificialmente; este proyecto de desagüe siguió en los gobiernos independientes y se hizo realidad con Porfirio Díaz. La capital moderna mexicana se sigue sustentando en la expulsión de aguas pluviales y residuales a través de un sistema complejo de desagüe que implica también el despojo de agua de otras cuencas. Por tanto, no podemos decir que el agua se comporta aquí de forma “natural”.

La restauración del Lago de Texcoco es fundamental para el cambio de paradigma: el cierre del ciclo del agua, principalmente por su extensión no urbanizada. Debido a las dificultades que presenta el suelo de su lecho por contener salinidad altísima, la adecuación de este cuerpo de agua para consumo humano, sería, técnicamente, muy complejo. Pero, este espacio puede ser un termorregulador, ecosistema sujeto a la restauración y conservación, así como lugar de aprovechamiento de recursos lacustres. Podría ser receptor de picos de lluvia para prevenir inundaciones en los municipios aledaños y, sobre todo, en la vertiente del río Tula.

² Que no tiene salida al mar.



En la modernidad capitalista no 'líquida' en esta latitud; los caminos de agua se desvanecen en el fragmentado paisaje hidroagrícola del somontano y llanura aluvial del oriente de la Cuenca del Valle de México, desecando sus principales cuerpos de agua. Se trata de entender sus dinámicas, restaurar y crear nuevos cuerpos de agua y sobre todo pedir una moratoria a los proyectos inmobiliarios y corredores industriales que nos acechan.

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

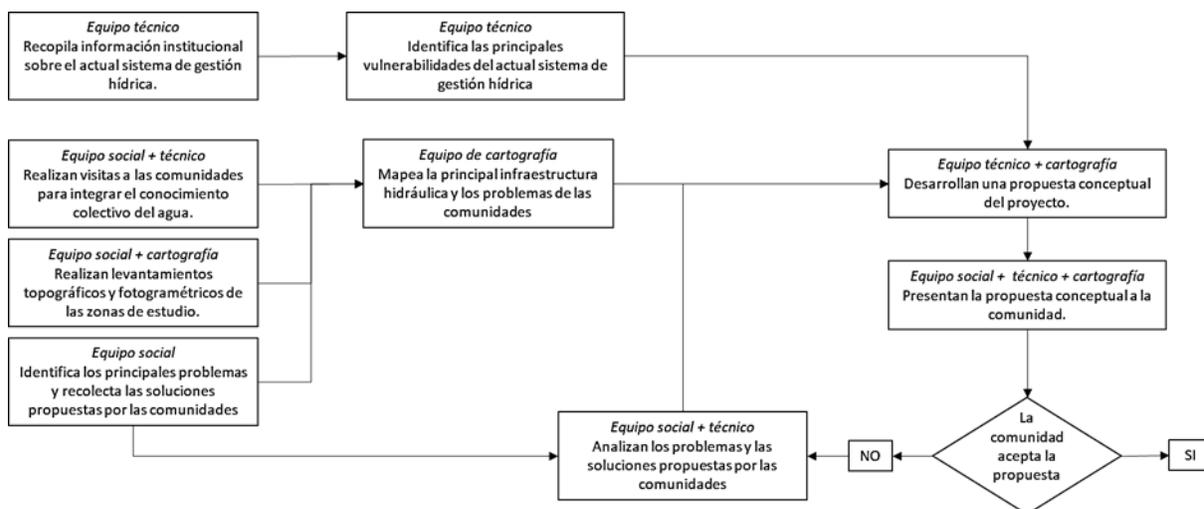


Figura 5. Flujo de trabajo para el desarrollo de los proyectos conceptuales.



Figura 6. Primer taller/faena en el Río Chapingo.



Figura 7. Acercamiento con gente de la localidad para escuchar las principales problemáticas de la región.



Figura 8. Ejercicio de cartografía colaborativa en Santa Catarina Acolman.



Figura 9. Presentación del grupo de contraloría y grupo técnico, sobre la metodología de trabajo.

Presentación del grupo de contraloría y grupo técnico, sobre la metodología de trabajo para realizar los anteproyectos de cambio de paradigma del manejo del agua en la zona, se tuvo una amplia participación de la comunidad donde también expusieron sus inquietudes acerca de los proyectos que se realizan en esta zona.



Figura 10. Fotografía de los representantes del nodo Texcoco, Xochimilco, Tula y Zumpango.



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 irá 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.



1.5.2 Lago de Texcoco, zona poniente

Los vuelos fueron realizados sobre el Circuito Exterior Mexiquense, se realizaron en dos puntos distintos sobre el circuito exterior, esto para poder obtener las imágenes completas del área de estudio, mediante estas imágenes se pueden apreciar los trabajos inconclusos del AICM, y los nuevos trabajos del Parque Ecológico Lago de Texcoco.

También se tomaron imágenes de la Planta de Bombeo Casa Colorado, así como del contexto inmediato, para tener un diagnóstico actual de la zona.

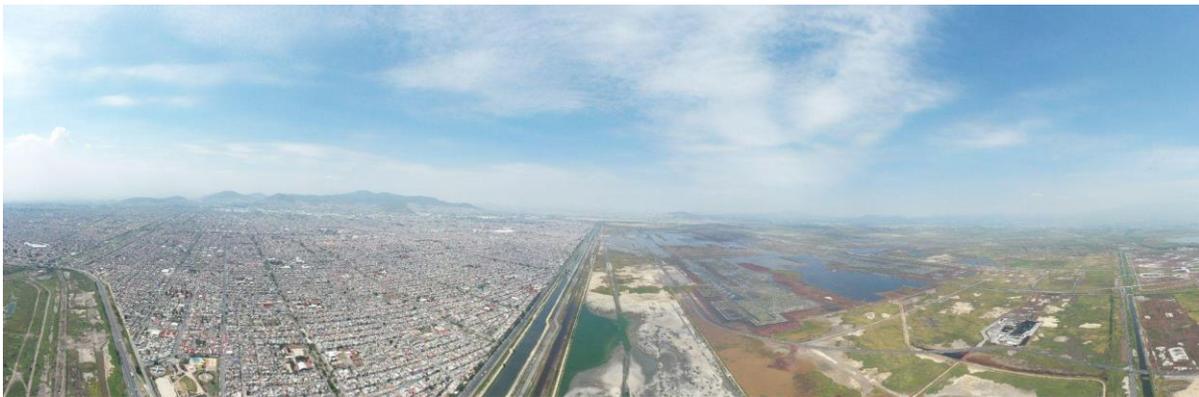


Figura 11. Vista panorámica del lago Texcoco desde del lado sur sobre el área de Casa Colorada, la zona urbana de Ciudad Nezahualcóyotl por el lado poniente.



Figura 12. Vista del lago Texcoco desde lado norte del lado derecho se observa la zona urbana de Ciudad Nezahualcóyotl.



Figura 13. Vista hacia Circuito Exterior Mexiquense hacia el lado sur, por la delimitación poniente del Parque Ecológico del Lago de Texcoco con el antiguo NAIM al fondo.

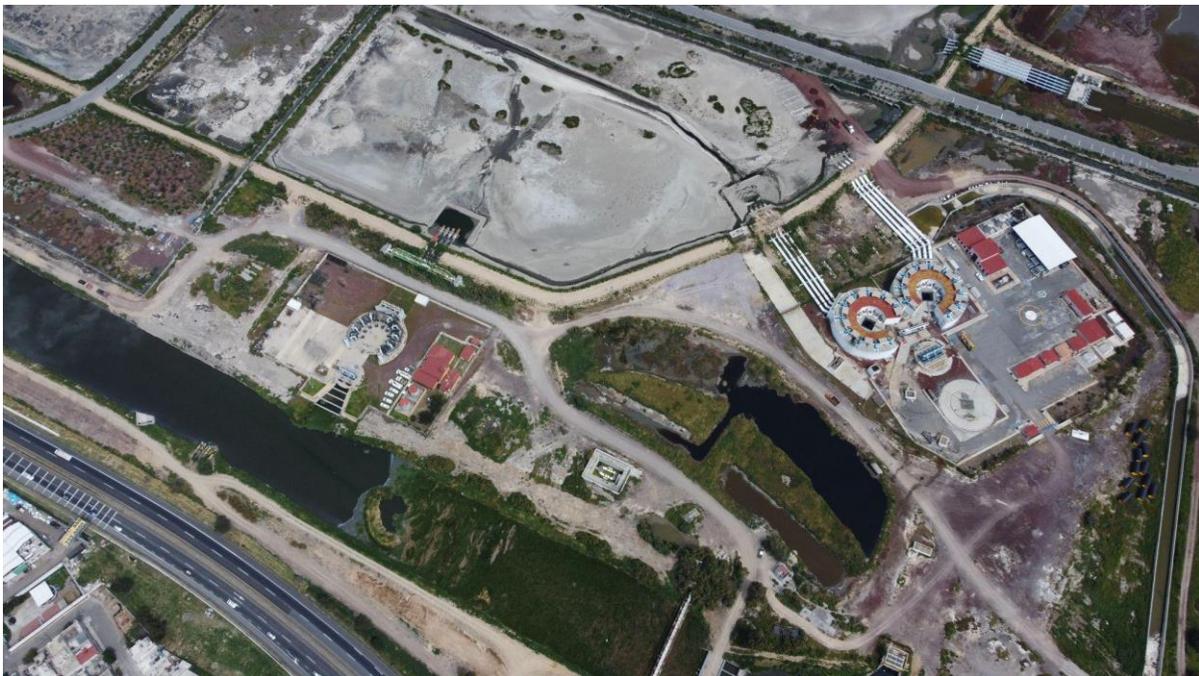


Figura 14. Vista aérea hacia Casa Colorada.



Figura 15. Vista del lago Texcoco desde lado poniente, se aprecia el proyecto del PELT y al sur la zona urbana de Ciudad Nezahualcóyotl.

Link de visualización de foto 360° Lago de Texcoco:

https://www.google.com.mx/maps/contrib/104286368711894418627/photos/@19.4915917,-98.9899898,3a,75y,90t/data=!3m7!1e1!3m5!1sAF1QipPU-PZyITWxVepWNKScyZCwxKlwqEg90cJ7KZjO!2e10!6s%2F%2FIh5.ggpht.com%2Fp%2FAFIQipPU-PZyITWxVepWNKScyZCwxKlwqEg90cJ7KZjO%3Dw900-h600-k-no-pi0-ya0-ro0-fo100!7i8192!8i4096!4m3!8m2!3m1!1e1?entry=ttu&g_ep=EgoyMDIOMTEyMy4xIjKXMDSoASAFQAw%3D%3D



Capítulo 2

Propuesta Conceptual de Humedales para el Reúso de Agua Tratada a través del lago de Texcoco



II. Propuesta Conceptual de Humedales para el Reúso de Agua Tratada a través del Lago de Texcoco

2.1 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.

2.2 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.

2.3 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.

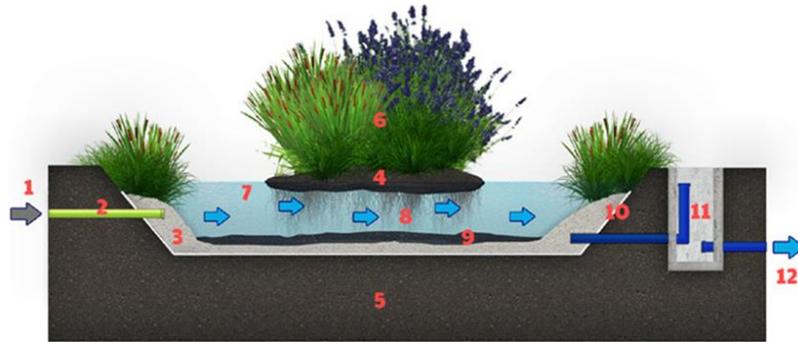
Teniendo en cuenta esto último, hay una amplia variedad de especies vegetales que se han utilizado para la construcción de humedales artificiales dentro de la Ciudad de México, los cuales tienen la finalidad no solo de fomentar las áreas verde-azules de este tipo para uso recreativo, si no para el mejoramiento de aguas residuales, por ejemplo: el humedal de Chapultepec, el bajo puente de Cuemanco, Humedal Cuitlahuac, 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*, *Nymphaea gracilis* y *Polygonum punctatum*.

2.4 Tipos de humedales

2.4.1 Humedales Flotantes

Los sistemas de humedales flotantes se realizan utilizando estructuras de soporte para macrófitas acuáticas (Fig. 16). 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).



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

Figura 16. Corte esquemático humedal flotante, componentes del humedal



Figura 17. Ejemplo de Islas flotantes en el Parque Ecológico de Xochimilco, Ciudad de México.

2.4.2 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.

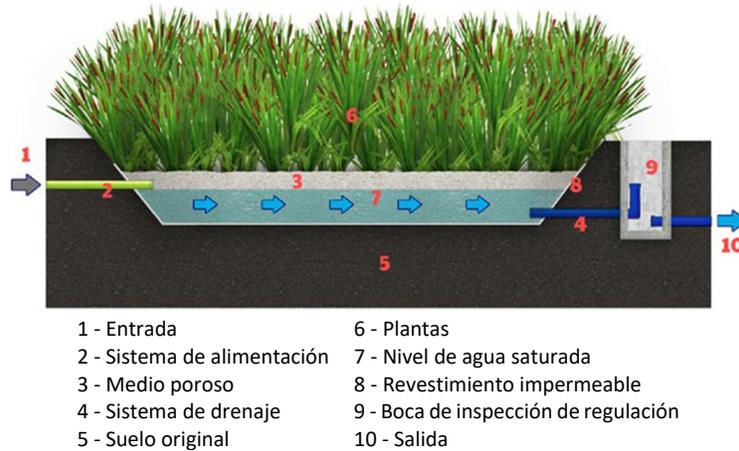


Figura 18. Corte esquemático humedal flujo horizontal, componentes del humedal.

2.4.3 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).

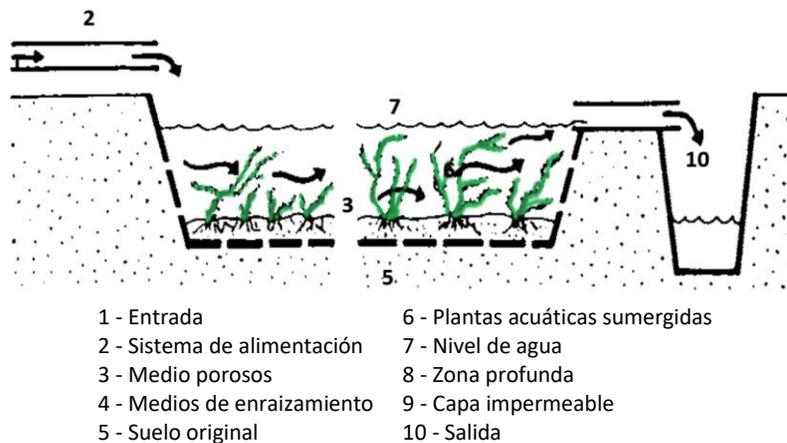


Figura 19. Corte esquemático humedal de macrófitas sumergidas, componentes del humedal.

2.4.4 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).

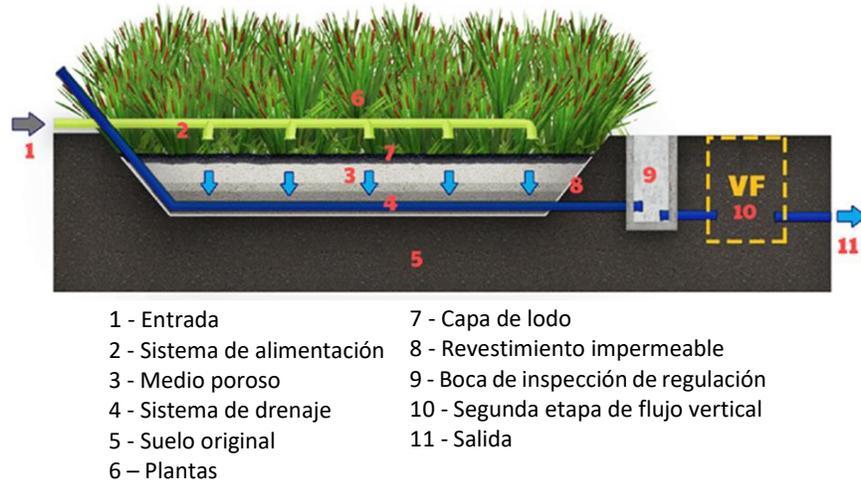
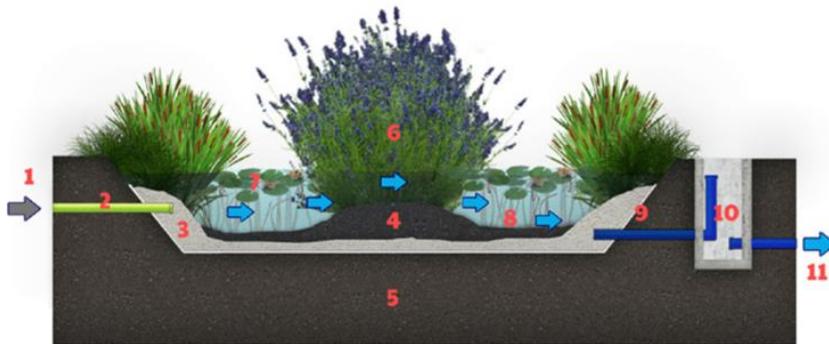


Figura 20. Corte esquemático humedal flujo vertical, componentes del humedal.

2.4.5 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 21. Corte esquemático humedal flujo superficial, componentes del humedal.

2.5 Propuesta de Humedales para lago de Texcoco

La propuesta del Humedal Artificial considera la construcción de un macro humedal dentro del vaso regulador en el Lago de Texcoco, a un costado del Parque Ecológico. Este macro humedal tiene como objetivo mejorar la calidad de agua proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales que se construirá como parte del proyecto.



Figura 22. Figura VIII.2.2.4 Propuesta de Ubicación macrohumedal Lago de Texcoco.

El macro Humedal Artificial tendrá una capacidad de tratamiento de 1m³/segundo, para lograrlo se plantea la formación de 3 secciones, las cuales se mantendrán separadas del



vaso de regulación mediante un bordo, de esta manera las aguas que pasan por los humedales tendrán una calidad diferente al vaso regulador, las secciones del humedal se dividirán en:

1. La primera sección consistirá en un humedal de flujo superficial, esta se encargará de una filtración primaria en la cual se removerán compuestos de fósforo y nitrógeno, a su vez se encargará de estabilizar sedimentos suspendidos al retenerlos en sus raíces y partes sumergidas.
2. Posteriormente existirá una sección media, en la cual se colocarán macrófitas sumergidas para una segunda etapa de estabilización de sedimentos además de oxigenar el medio, con esto el agua tendrá un color más claro y aspecto cristalino, a su vez, se continuará la remoción de contaminantes como nutrientes y metales pesados;
3. La tercera sección será un humedal de flujo vertical dividido en 5 celdas, cada una de las celdas tendrá 4 divisiones interconectadas con flujos consecutivos, con el objetivo de tener celdas en mantenimiento sin detener el sistema.



Figura 23. Propuesta de configuración de las secciones del Humedal.

El humedal artificial estará compuesto por varios trenes de tratamiento, compuestos con flujos horizontales y flujos verticales ascendentes para cumplir con las dinámicas de flujos. Con Humedales sumergidos intermedios (lagunas de oxidación con plantas acuáticas sumergidas) y en otras zonas para lograr una transparencia adecuada del agua.

El Humedal tendrá una superficie de 111 hectáreas, de los cuales 94.35 hectáreas son de tratamiento del agua, el gasto de tratamiento de este humedal se estimó a partir del volumen de retención que se tendrá dentro del mismo, este volumen de retención se determinó partir del área disponible, un tiempo de retención de 5 días y un tirante promedio de 0.50m para calcular el volumen de retención.



Volumen de retención (Vr)
Vr : $94.35 \times 10,000 \times 0.5$
Vr : 471,750 m³

Tiempo de retención (Tr)
Tr : 5 días

Volumen de tratamiento por día (Vt)
Vt : $471,750/5$
Vt : 94,350 m³/día

Gasto de tratamiento (Qt)
Qt : $94,350/86,400$
Qt : 1.092 m³/s
Qt : 1,092 lps

Como parte del humedal de tratamiento se propone la existencia de un cuerpo de agua, el cual funcionará como buffer de almacenamiento entre el humedal artificial y la planta potabilizadora, manteniendo el agua que ha pasado por el humedal separada del agua del vaso regulador.

El cuerpo de agua tendrá un volumen de almacenamiento aproximado de 370,500m³.

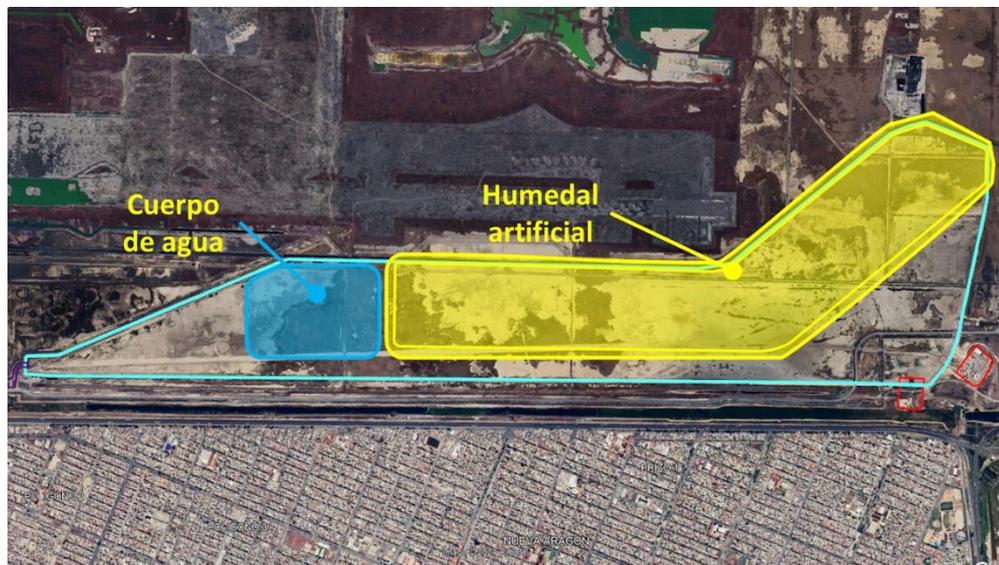


Figura 24. Propuesta de ubicación de cuerpo de agua.



2.5.1 Especies vegetales para los humedales

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

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 flujo vertical:

- Phragmites australis
- Typha latifolia
- Sagittaria macrófila
- Juncus efusus
- Schoenoplectus lacustris



Figura 25. Phragmites australis.



Figura 26. Typha latifolia.

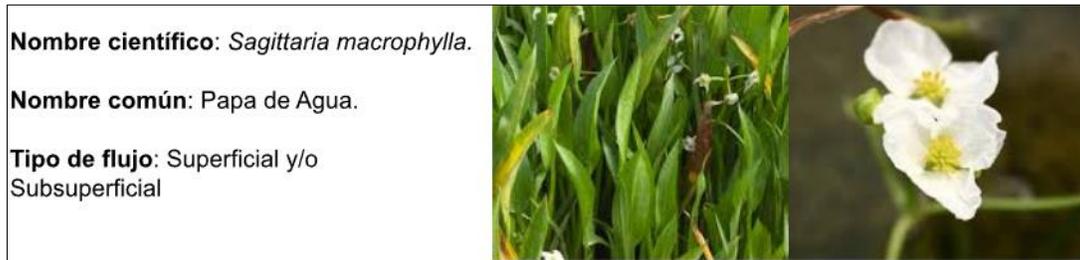


Figura 27 . *Sagittaria macrophylla*.



Figura 28. *Elodea sp.*

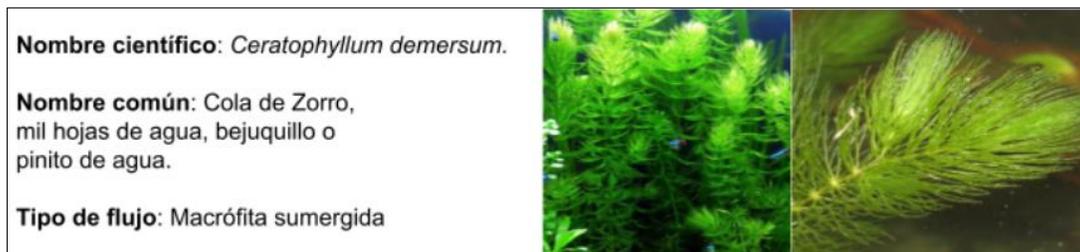


Figura 29. *Ceratophyllum demersum*.



Figura 30. *Najas minor*.



Capítulo 3

Propuesta Conceptual de Tratamiento de Aguas Residuales a través del lago de Texcoco Para el Saneamiento de los Canales de Xochimilco



III. Propuesta Conceptual de Tratamiento de Aguas Residuales a través del lago de Texcoco

3.1 Descripción General

La propuesta consiste en desarrollar un tren de tratamiento de agua residual que permita transformar el recurso disponible en un medio con las condiciones físico-químicas ideales para el cultivo de espirulina, maximizando su rendimiento y sostenibilidad.

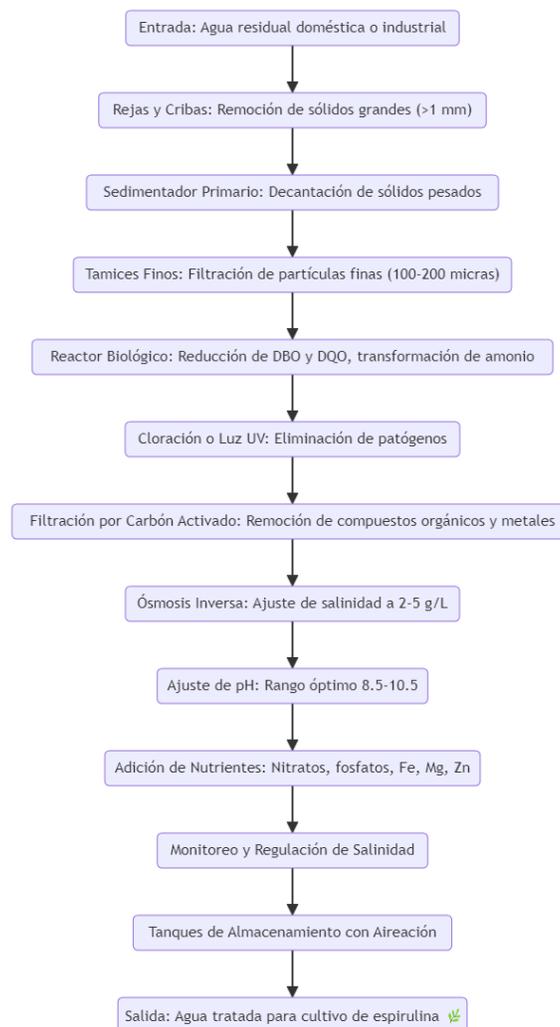


Figura 31. Diagrama 1: Proceso General



3.2 Propuesta Tecnológica

Esta propuesta transforma el reto de la salinidad y los contaminantes en una oportunidad innovadora para la biotecnología, generando beneficios ambientales, económicos y sociales en la región.

3.2.1 Pretratamiento

- **Rejas y Cribas:** Eliminación de sólidos grandes (>1 mm).
- **Sedimentador Primario:** Decantación de partículas pesadas.
- **Tamices Finos:** Filtración de partículas pequeñas (100-200 micras).

3.2.2 Tratamiento Secundario

- **Reactores Biológicos (Lodos Activados o MBBR):** Reducción eficiente de materia orgánica y transformación de amonio en nitratos.
- **Desinfección (Cloración o Luz UV):** Inactivación de microorganismos patógenos.

3.2.3 Tratamiento Avanzado

- **Filtración por Carbón Activado:** Eliminación de compuestos orgánicos residuales y metales pesados en trazas.
- **Ósmosis Inversa (Opcional):** Ajuste de salinidad para alcanzar un rango de 2-5 g/L.
- **Ajuste de pH:** Control mediante bicarbonato de sodio o carbonato de potasio (rango ideal: 8.5-10.5).
- **Aporte de Nutrientes:** Dosificación precisa de nitratos, fosfatos y micronutrientes esenciales (Fe, Mg, Zn).

3.2.4 Control de Salinidad y Composición Iónica

- **Monitoreo de Cloruros y Sulfatos:** Dilución controlada en caso de exceder niveles tolerables.
- **Ajuste Iónico:** Regulación de proporciones para asegurar la estabilidad del cultivo.

3.2.5 Almacenamiento y Aireación

- **Tanques de Almacenamiento:** Con sistemas de aireación para mantener oxígeno disuelto y concentraciones adecuadas de CO₂.
- **Difusores de Burbujeo:** Homogeneización de nutrientes y prevención de sedimentación.



3.3 Beneficios del Proyecto

1. **Aprovechamiento del Agua Local:** Uso eficiente de un recurso subutilizado en el Lago de Texcoco.
2. **Producción Sostenible de Espirulina:** Creación de un insumo biotecnológico de alto valor.
3. **Impacto Ambiental Positivo:** Reducción de la carga contaminante en el lago.
4. **Escalabilidad y Flexibilidad:** Sistema adaptable a diferentes volúmenes y necesidades del cultivo.
- 5.

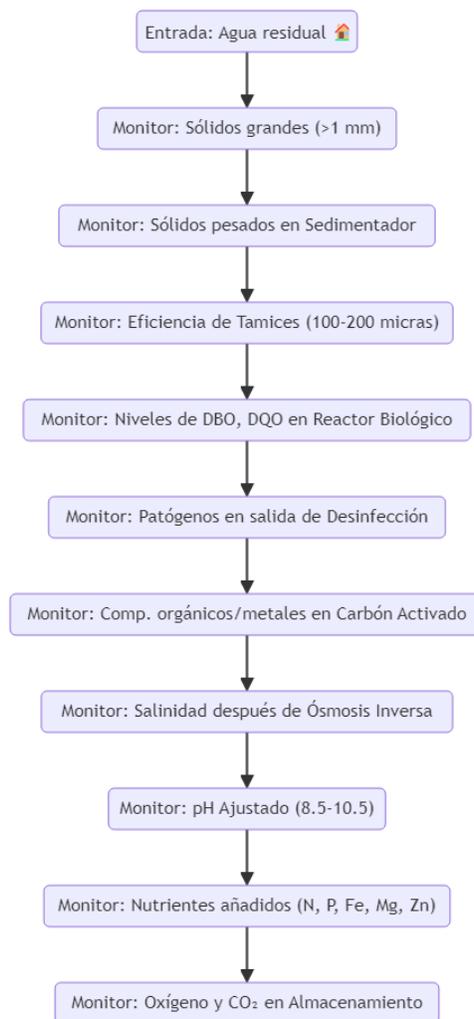


Figura 32. Diagrama 2: Monitoreo de procesos

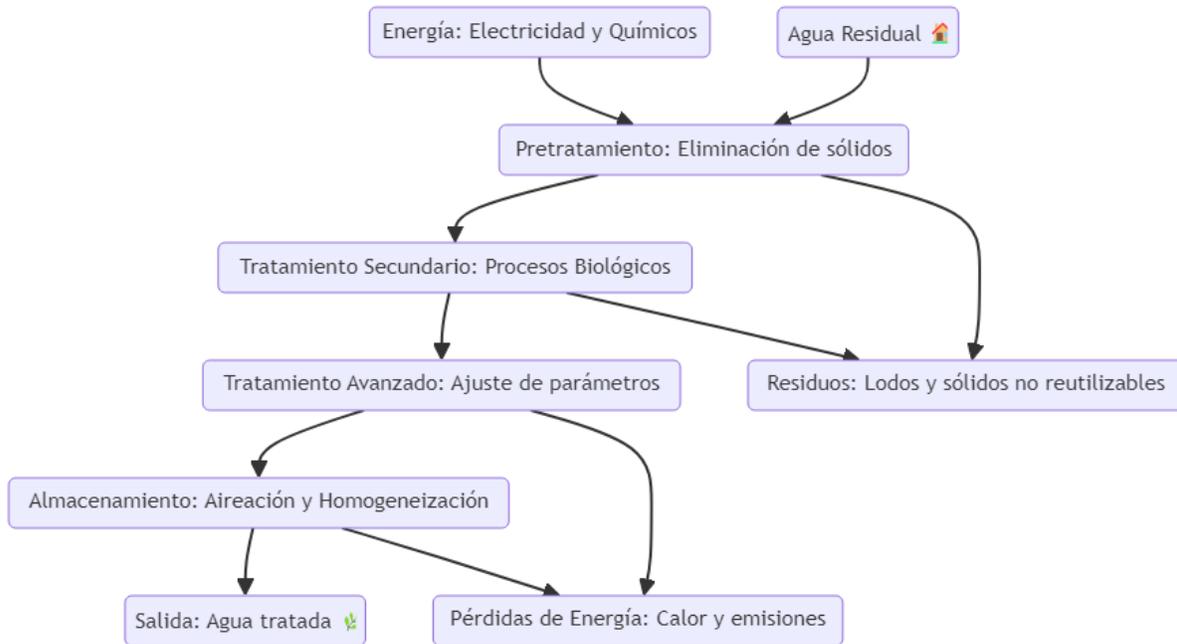


Figura 33. Diagrama 3: Flujos de energía y residuos



Capítulo 4

Evaluación

Geológica-Geotécnica



IV. Evaluación Geológica-Geotécnica

4.1 Marco Físico

4.1.1 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 34.

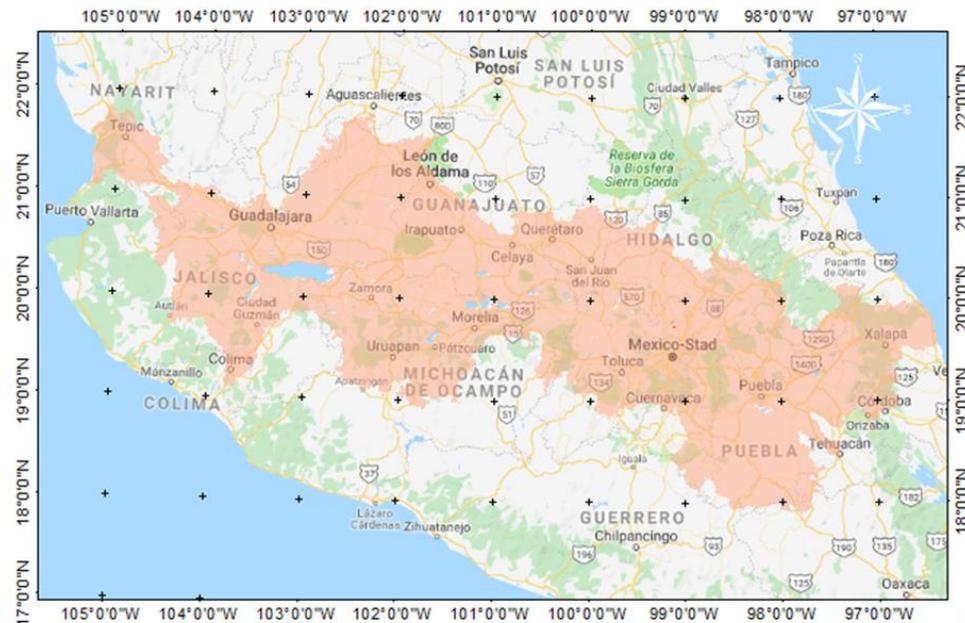


Figura 34. Localización y distribución de la provincia fisiografica Eje Neovolcanico



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.

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, conformando sistemas de topofomas características de planicies aluviales.

4.1.2 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. Para mostrar estas características del terreno se utilizó el modelo digital de elevación (MDE), perteneciente a la carta E14A29 y E14A39, editadas por INEGI en el año 2015, el cual se presenta en la Figura 35.

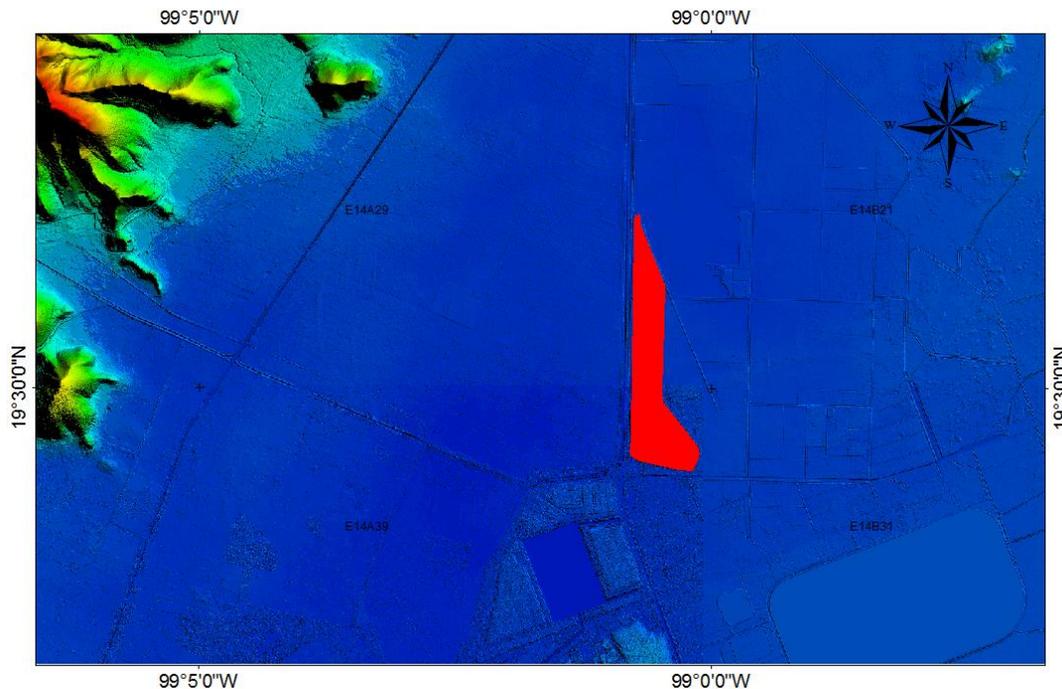


Figura 35. Localización morfológica regional de la zona de estudio

Los procesos geomorfológicos ocurridos dentro de la cuenca del Valle de México han modificado considerablemente el relieve superficial original del mismo; se puede observar que la morfología de esta cuenca es variada; donde se presentan diversos tipos de estructuras volcánicas bien conservadas, como son: conos cineríticos, volcanes compuestos y volcanes escudo, además de extensos derrames basálticos, sobre los que se han originado algunos lagos, debido al cierre de la cuenca.

La presencia de las sierras perimetrales es uno de los aspectos físicos que caracterizan y limitan a la cuenca del Valle de México; sin embargo, en su interior el relieve es básicamente suave, dominando las llanuras lacustre con altitudes promedio de 2,240 msnm, que solo se ve interrumpida por la presencia de algunas elevaciones topográficas, de relativa altura, entre las que destacan las Sierras de Guadalupe y Santa Catarina, el Cerro de La Estrella, el Peñón de los Baños, el Peñón del Marques y el Cerro de Chimalhuacán, siendo estos dos últimos los más cercanos a la zona del proyecto.

Las Unidades Morfológicas definidas se presentan en la Figura 36; muestra que el 100% del área de estudio corresponde a las planicies aluviales con origen exógeno acumulativo del Cuaternario (Pleistoceno y Holoceno), están distribuidas ampliamente y se componen de material acumulativo aluvial y por otros depósitos de ladera, originados por procesos gravitacionales y fluviales. Asimismo, algunas de ellas se caracterizan por estar formadas por depósitos de lahar retrabajados, y por secuencias piroclásticas de caída y de flujo, así como de tobas eólicas y brechas de pómez.

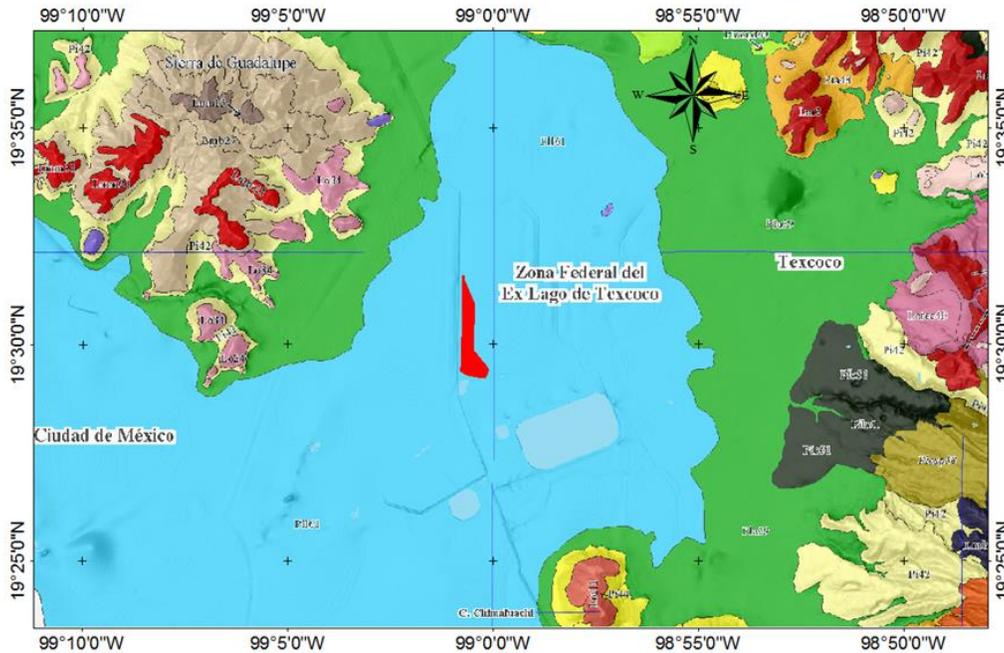


Figura 36. Distribución de unidades Morfológicas (UM).

Planicies proluviales lacustres

Se caracterizan por presentar una pendiente que no supera los cinco grados de inclinación; están constituidas por materiales proluviales (transportado por ríos que aparecen en estación lluviosa), que son acarreados principalmente desde el piedemonte para ser depositados en las riberas lacustres, en cuerpos de agua poco profundos o en llanuras de inundación temporal. Las gravillas y las arenas (muy gruesas, gruesas medias, finas y muy finas) son las texturas que predominan en los amplios abanicos que se desarrollan en esta superficie de transición, entre el piedemonte y la planicie lacustre.

La expresión morfológica de las planicies proluviales-lacustres en la cuenca de México es muy sutil e incluye superficies sub-horizontales, inclinadas, onduladas, cóncavas y escalonadas. En la actualidad, estas características han sido modificadas, sobre el trazo del proyecto, toda vez que la mayor parte de esta superficie esta urbanizada.

Planicie lacustre

Ocupa el nivel altitudinal más bajo de la cuenca, se trata de una superficie casi horizontal, cuya pendiente es inferior a los dos grados de inclinación y presenta una altitud promedio de 2,240 msnm. Su origen se explica a partir de un continuo



relleno de todo este territorio, motivado por la aparición de la sierra volcánica Chichinautzin, que fungió como una represa natural. Dicho vaso se azolvó intercalando distintos tipos de materiales, entre los que destacan los proluviales (limos y arenas), los lacustres (arcillas y limos), así como arenas y cenizas volcánicas, que al intemperizar generan arcillas altamente compresibles.

Desde el punto de vista morfológico, la zona Federal del Lago de Texcoco es una planicie sensiblemente ondulada, su altitud promedio es 2,234 msnm, las elevaciones más cercanas que influyeron en su evolución geomorfológica son: Sierra de Río Frío, Sierra de Guadalupe, Cerros Chimalhuacán, Peñón de los Baños y Peñón del Marqués, y se localizan hacia el este, al noroeste, al sureste y al suroeste, respectivamente (Ver Figura 36).

4.1.3 Clima Regional.

Los tipos climáticos con mayor cobertura en el área son; primeramente el Templado Semiseco localizado en las partes bajas (planicie lacustre de Texcoco) con una temperatura media anual de 14° C a 18° C; el Templado Subhúmedo localizado en las planicies aluviales, en las porciones inferiores extremas de los piedemontes con una temperatura media anual de 12° C a 16° C; el muy frío localizado en la cumbre del volcán Iztaccíhuatl; donde la temperatura media anual es inferior a los -2° C, y en el mes más cálido inferior a 0° C.

Específicamente y de forma local de acuerdo con la clasificación de climas de Köppen y modificado por Enriqueta García, el clima de la zona, Figura 37, presenta varios tipos entre ellos:

- C(w2) (w)b(i') g que corresponde a un clima templado, subhúmedo con verano fresco, el más húmedo de los templados subhúmedos con régimen de lluvias en verano y escaso porcentaje de lluvia invernal, poca oscilación y la temperatura del mes más cálido se tiene antes del solsticio de verano.
- C(w1) (w)b(i') que identifica a un clima templado subhúmedo con verano fresco, intermedio entre el Cw0 y Cw2, régimen de lluvias en verano, escaso porcentaje de lluvia invernal y poca oscilación.
- BSkw(w)(e) g el cual es 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.

Finalmente, tomando como referencia la Carta Hidrológica de la República Mexicana (Figura 38) 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.

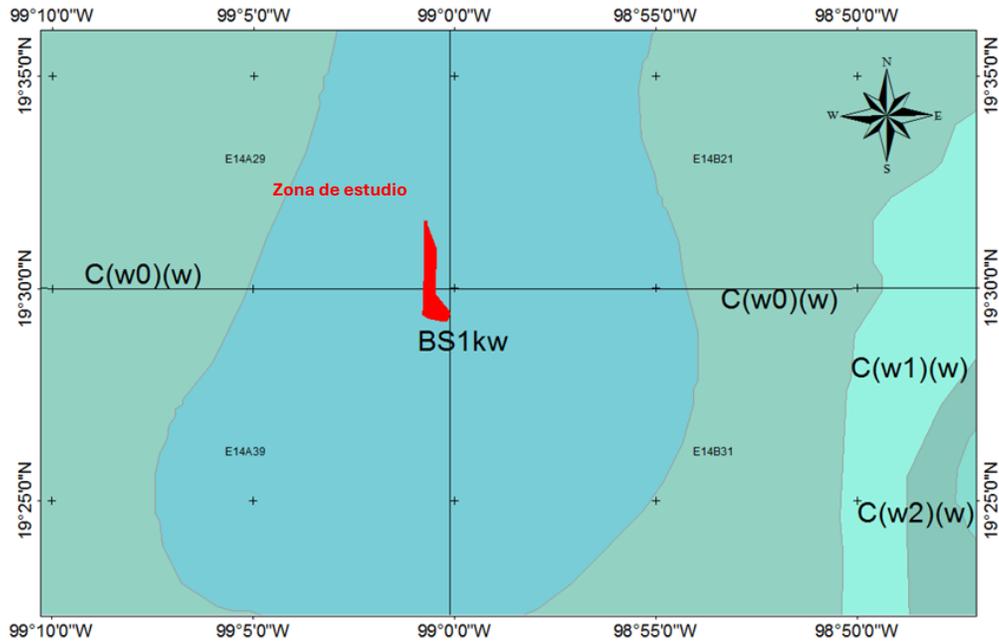


Figura 37. Localización y extensión de climas en la zona.

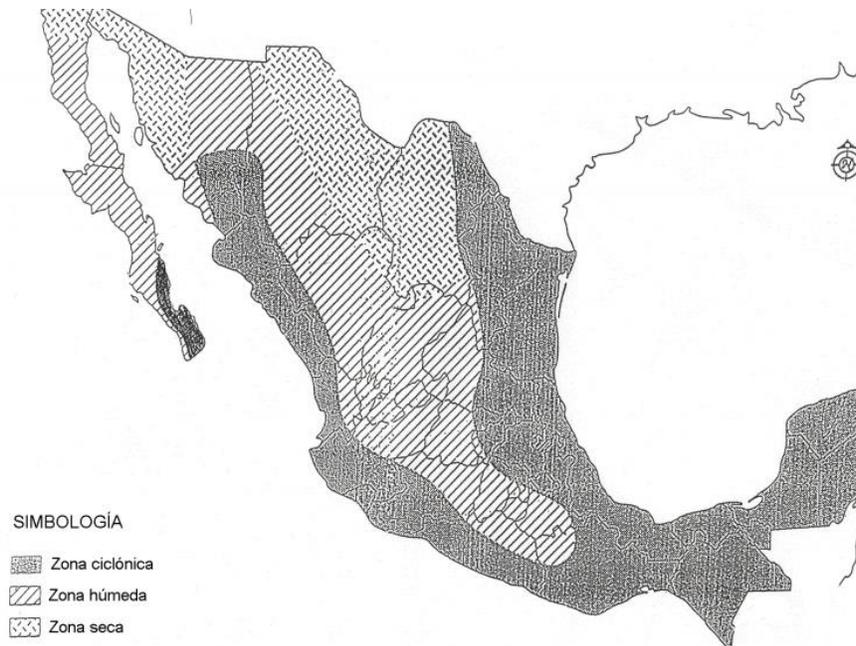


Figura 38. Carta Hidrológica de la República Mexicana.

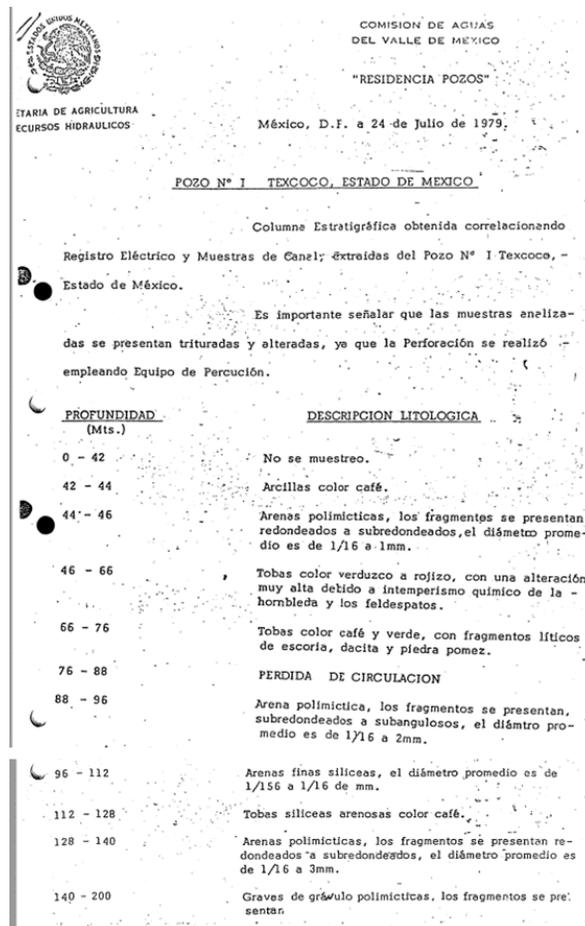


4.2 Marco Geológico

4.2.1 Estratigrafía

Son varios los estudios que definen la estratigrafía de la Cuenca del Valle de México, y dada la compleja geología de la Cuenca del valle de México, se optó por describir de forma general la estratigrafía completa de la zona, con base a los cortes estratigráficos del pozo profundo (PP1) denominado Texcoco-1, realizado por PEMEX en el año 1986 y de los pozos de extracción correspondientes a la batería Peñón- Texcoco, cuya ubicación se presenta en la Figura 41.

En el corte litológico del Pozo Profundo 1 (PP1), denominado "Texcoco-1", se localiza en el centro del Lago de Texcoco, en este pozo se obtuvieron muestras litológicas a partir de 170 metros de profundidad; el material predominante está constituido por intercalaciones de tobas, arcillas areniscas y gravas hasta 1,400 metros de profundidad; subyaciendo a este material, se encontró roca ígnea hasta 2,065 metros.



COMISION DE AGUAS
DEL VALLE DE MEXICO
"RESIDENCIA POZOS"
México, D.F. a 24 de Julio de 1979.
POZO N° 1 TEXCOCO, ESTADO DE MEXICO

Columna Estratigráfica obtenida correlacionando
Registro Eléctrico y Muestras de Canel; extraídas del Pozo N° 1 Texcoco, -
Estado de México.

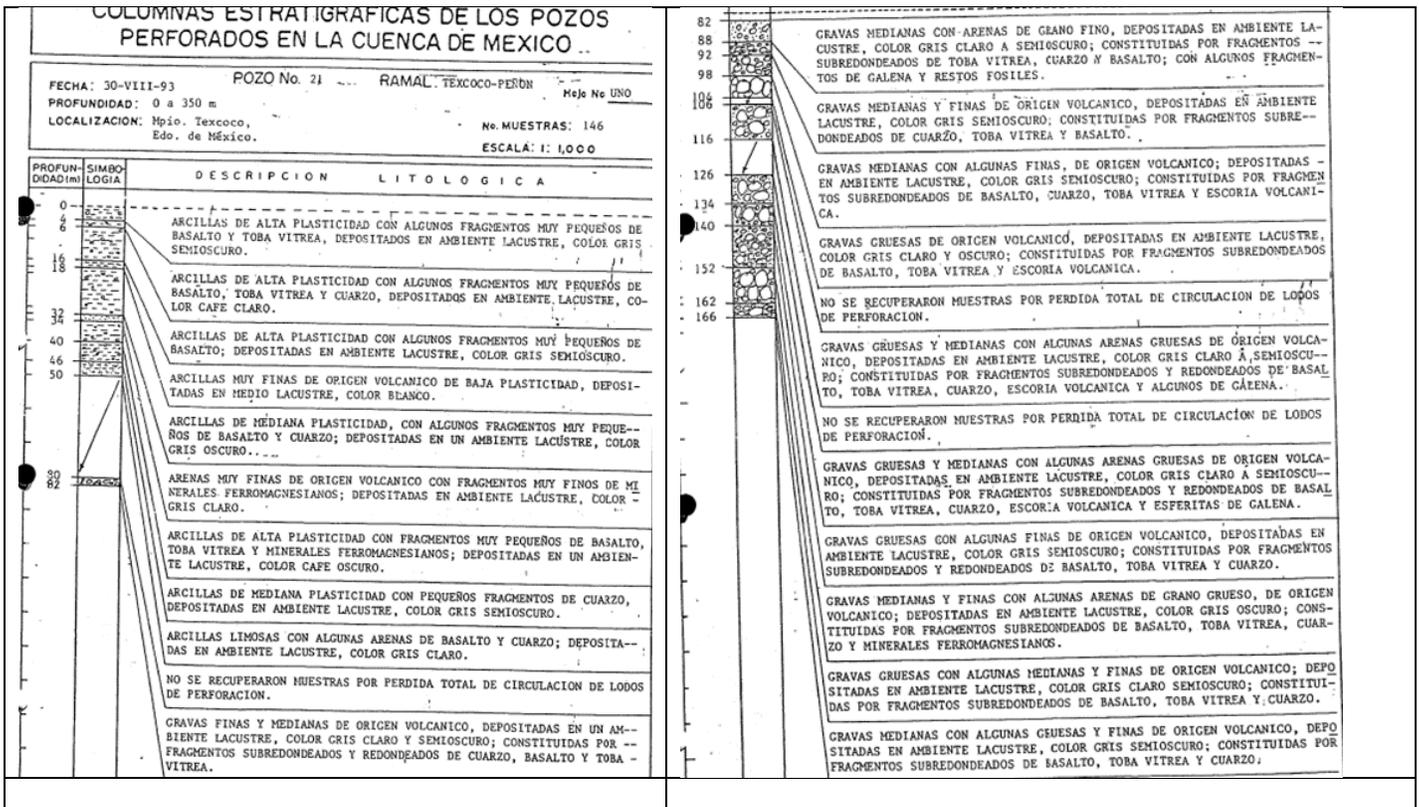
Es importante señalar que las muestras analizadas se presentan trituradas y alteradas, ya que la Perforación se realizó empleando Equipo de Percusión.

PROFUNDIDAD (Mts.)	DESCRIPCION LITOLOGICA
0 - 42	No se muestreo.
42 - 44	Arcillas color café.
44 - 46	Arenas polimicticas, los fragmentos se presentan redondeados a subredondeados, el diámetro promedio es de 1/16 a 1mm.
46 - 66	Tobas color verdusco a rojizo, con una alteración muy alta debido a intemperismo químico de la hornblenda y los feldespatos.
66 - 76	Tobas color café y verde, con fragmentos líticos de escoria, dacita y piedra pomez.
76 - 88	PERDIDA DE CIRCULACION
88 - 96	Arena polimictica, los fragmentos se presentan, subredondeados a subangulosos, el diámetro promedio es de 1/16 a 2mm.
96 - 112	Arenas finas silíceas, el diámetro promedio es de 1/156 a 1/16 de mm.
112 - 128	Tobas silíceas arenosas color café.
128 - 140	Arenas polimicticas, los fragmentos se presentan redondeados a subredondeados, el diámetro promedio es de 1/16 a 3mm.
140 - 200	Gravas de gráwulo polimicticas, los fragmentos se presentan.

Figura 39. Columna estratigráfica pozo 1, ramal Texcoco



De acuerdo con los cortes litológicos de los pozos pertenecientes al Ramal Texcoco (Pozos 1 y 21), el material predominante en el subsuelo de la zona está constituido por arcillas impermeables en los primeros 40 metros de profundidad; subyacen a este material intercalaciones de arenas, tobas y gravas de los abanicos aluviales hasta la profundidad de 200 y 350 metros. En la figura 39 y 40 se presenta el corte estratigráfico de los pozos señalados.



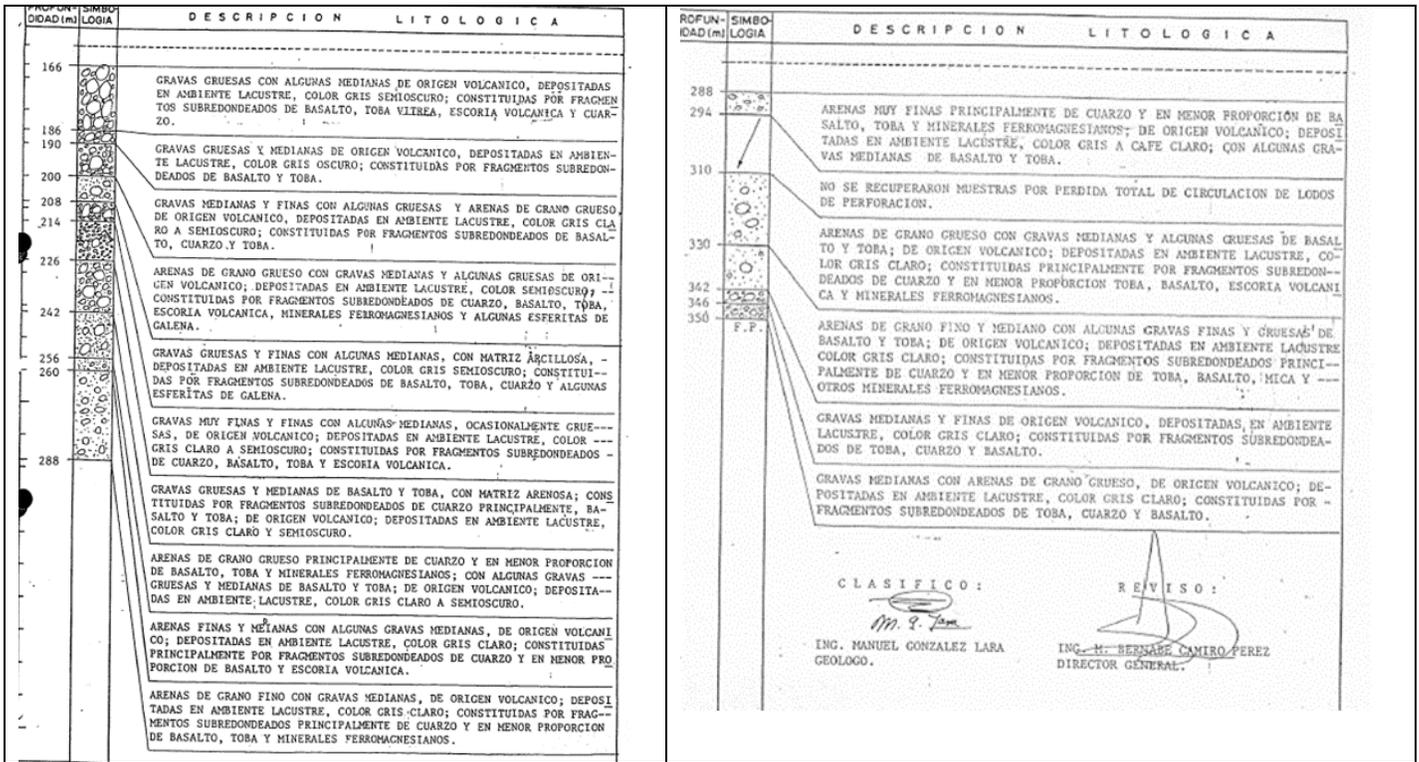


Figura 40. Columna estratigráfica pozo 21, ramal Texcoco

Con base en lo anterior, las rocas más antiguas dentro del Valle de México corresponden a una secuencia de rocas Mesozoicas correlacionables con las Formaciones Morelos, Cuautla y Mezcala, las cuales fueron identificadas durante las perforaciones realizadas por PEMEX en el año 1988, estas a su vez se encuentran parcialmente cubiertas por materiales clásticos continentales del Terciario Inferior pertenecientes al Grupo Balsas.

Las grandes depresiones formadas fueron rellenas y cubiertas por materiales clásticos, al oriente, hacia el Ex Lago de Texcoco. 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. 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.

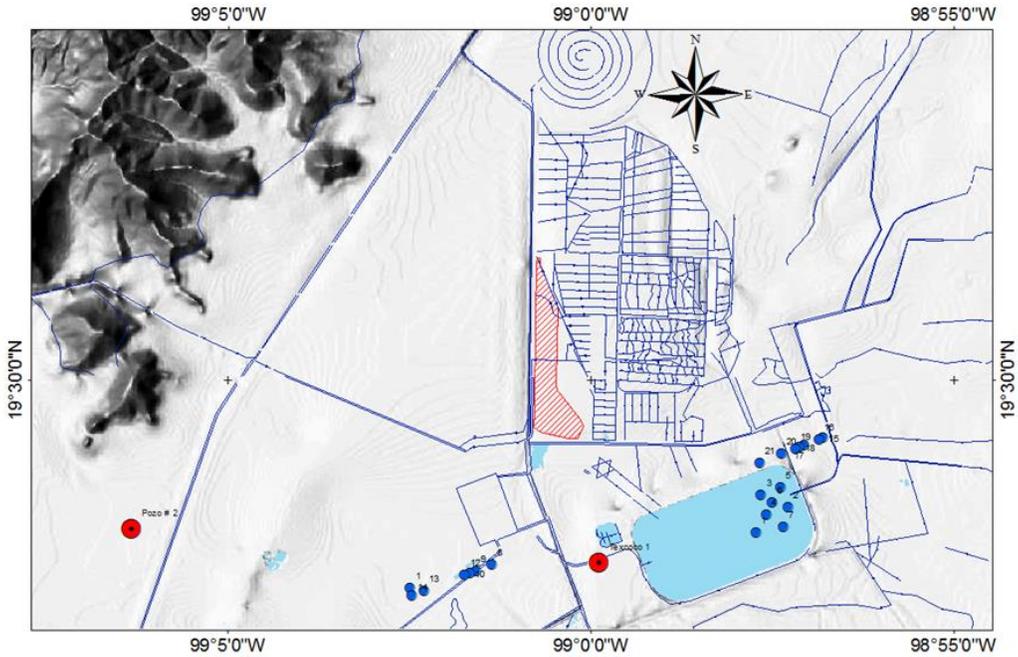


Figura 41. Localización de pozos profundos y batería de pozos Peñón-Tezcoco.

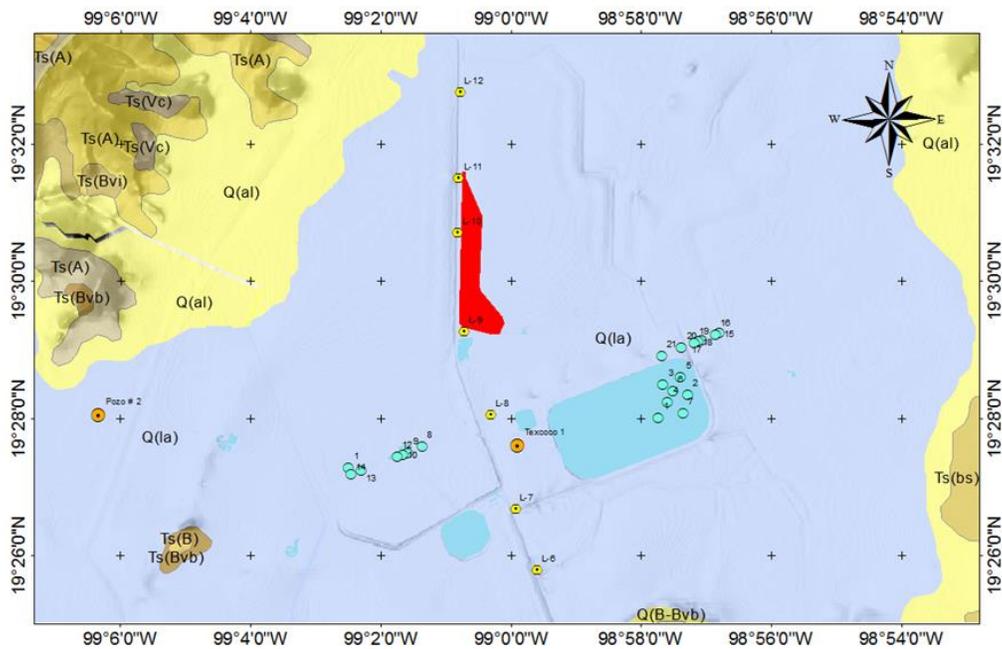


Figura 42. Geología regional de la zona de estudio.



4.2.2 Litoestratigrafía de la zona de estudio

A continuación, se describen las unidades litoestratigráficas que afloran en la zona de estudio, iniciando de la más antigua a la más reciente.

Del Terciario. Rocas Extrusivas del Mioceno Medio y Tardío (Tmv)

Con este nombre, se agruparon a “las rocas volcánicas que difieren en composición litológica y posición estratigráfica con respecto a las rocas volcánicas del Oligoceno-Tardío-Mioceno Temprano (Vázquez y Jaimes). Estas rocas, se encuentran asociadas a tres aparatos volcánicos tipo estratovolcán, de grandes dimensiones, el mayor de estos se localiza al norponiente, en la Sierra de Guadalupe. Estas rocas, se encuentran constituidas por secuencias de tobas, brechas volcánicas y lavas que en algunos lugares se encuentran interestratificadas con brechas volcánicas, cuya composición varía de andesítica a dacítica. En el subsuelo del lago de Texcoco, se interpretan como pertenecientes a esta unidad, las secuencias que se encuentran entre los 490 y los 1,125 metros de profundidad, esta interpretación se fundamenta con los fechamientos realizados con el método Potasio-Argón. Desde el punto de vista de este estudio, se considera a esta unidad el basamento hidrogeológico del acuífero del lago de Texcoco.

Del Terciario. Depósitos piroclásticos y clásicos aluviales del Plioceno (Tppc)

Se designa con este nombre a los depósitos no diferenciados, relacionados genéticamente con la actividad piroclásticas, fluvial y lacustre de todo el Plioceno. Su espesor máximo en el subsuelo es del orden de 300 metros. En las descripciones de los pozos perforados durante el Proyecto Texcoco, se describen arcillas, arenas, tobas, margas y calizas lacustres, que se han encontrado hasta una profundidad de 517 metros. Su edad de acuerdo con sus relaciones estratigráficas corresponde al Plioceno.

Del Cuaternario. Formación Tláloc (Qt)

Definida por Schalaepfer (1968) para referirse únicamente a las coladas lávicas que forman parte de la Sierra Río Frío, no obstante, éstas secuencias están relacionadas con tefra caracterizada por flujos piroclásticos lobulados, en forma de mesetas inclinadas; secciones de referencia se pueden observar en los bancos de material localizados en el flanco poniente de la sierra, así como en las cañadas El Muerto, El Partidor y los Pilares. Esta formación está compuesta principalmente por flujos de piroclásticos en las partes bajas de los volcanes Tláloc y Telapón, mientras que, en las partes altas de dichos volcanes, se presentan secuencias de lavas y piroclásticos, la composición de las lavas es andesítica a dacítica. Cerca del área de estudio al este y noreste de San Miguel Coatlinchan aflora esta formación constituida por brechas volcánicas y lavas andesíticas.



Del Cuaternario. Formación El Pino (Qpp)

Esta unidad agrupa las rocas volcánicas que forman los cerros La Estrella, El Pino, Chimalhuacán, Chiconautla, Gordo y otras estructuras aisladas. Las secciones tipo se encuentran en las cañadas del volcán El Pino; los espesores máximos medidos son del orden de los 700 m, y se presentan en los centros eruptivos acuñándose hacia la periferia. Las coladas lávicas de los volcanes pertenecientes a esta unidad se extienden en ocasiones en el subsuelo, e intercalada con depósitos aluviales. Le sobreyace a los depósitos aluviales y sobre piroclásticos de la denominada Formación Tláloc, por su parte se encuentra cubierta por los estratos más recientes de aluvión y por depósitos lacustres. Esta formación se localiza en la porción sur del trazo de proyecto.

Del Cuaternario. Depósitos aluviales (Qal)

Los depósitos aluviales, son los materiales de origen fluvial, acumulados en el Valle de Texcoco, principalmente como relleno del valle antes de la existencia del lago, y posteriormente, cuando el lago ya existía, en las márgenes de las sierras que rodean al lago de Texcoco. El espesor del aluvión es del orden de 350 a 400 m. Sin embargo, se aprecia que, en las capas inferiores, a partir de los 180 metros, se encuentra interestratificado con tobas vítreas, que se asocian a la Formación Tláloc. En su parte superior está conformado por secuencias de arenas, limos y gravas interestratificadas, capas que actúan como una frágil protección a la infiltración de las aguas saladas de los lentes acuíferos superiores. Por sus relaciones estratigráficas y determinaciones radiométricas, se sitúa al aluvión en un rango de edad del Pleistoceno al Reciente.

Del Cuaternario. Depósitos Lacustres (Qla)

Se agrupan dentro de esta unidad, todos los depósitos granulares depositados en ambiente lacustre que se encuentran en el lago de Texcoco, incluidos los estratos arenosos permeables, denominados como capas duras. Estos depósitos para fines prácticos, en la zona de Texcoco y en la Ciudad de México, se han dividido en: Formación Arcillosa Superior y Formación Arcillosa Inferior a los estratos que quedan debajo de la segunda capa dura, estos estratos en la zona de Texcoco presentan una edad superior a los 40,000 años, es decir, pertenecen al Pleistoceno Temprano.

4.2.3 Reconocimiento geológico local

Como parte de este trabajo se realizaron reconocimientos geológicos, sobre todo el trazo del proyecto e inmediaciones de este, con el fin de conocer el marco geológico de forma particular.

La mayoría de los depósitos son de constitución arcillosa con horizontes limo-arenosos. Geológicamente el relleno de la Cuenca del Valle de México, están asociados a un



transporte y depósito de diversas maneras, la distribución de estos es variable, lo mismo que su textura, dando como resultado que la secuencia estratigráfica sea complicada. Fotografías 1 a 4.

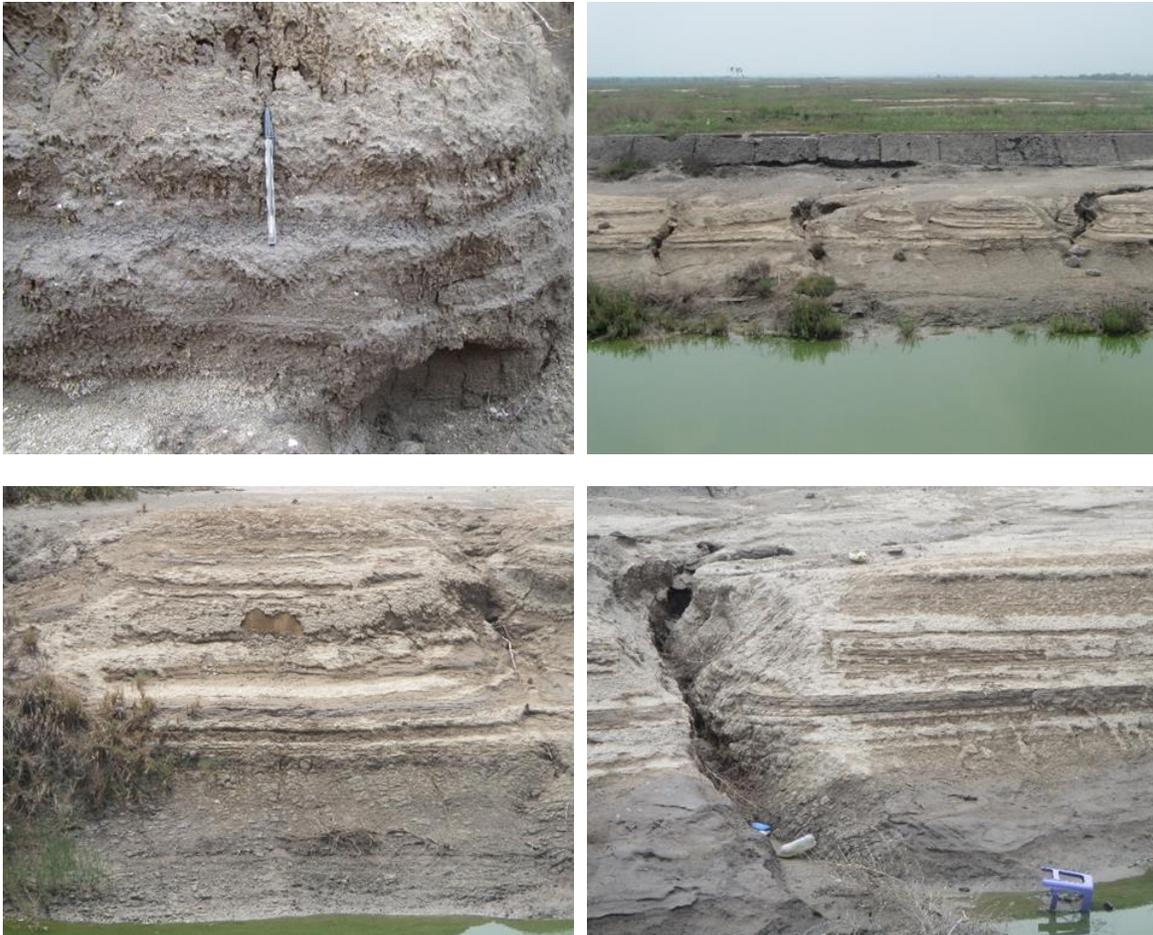


Figura 43. Estratigrafía presente en la zona de estudio.

La secuencia se ha confirmado mediante las perforaciones realizadas, ya que la sedimentación está controlada por parámetros variados, lo que dio lugar a que el depósito no fuera uniforme en el tiempo ni en el espacio, por lo cual se desarrollaron acúñamientos entre los materiales, a veces de forma gradual o abrupta en otros, así como la formación de lentes de arena y limo, principalmente. Estas características se han detectado en la mayoría de los cortes de pozos, por lo que no es fácil hacer una correlación a detalle de la litología. Para explicar su formación, es necesario tomar en cuenta los cambios climáticos ocurridos durante el Cuaternario.



4.2.4 Estratigrafía de la zona de estudio

Con el fin de complementar el conocimiento que se tiene de la estratigrafía del subsuelo, se analizaron los trabajos de geofísica que se han realizado en el Ex Lago de Texcoco, a lo largo del tiempo.

Los estudios geofísicos se remontan a los años de 1952-1953, en que se realizó gravimetría, sísmica de refracción y geoelectrica (Carrillo N., 1969). El levantamiento gravimétrico regional efectuada en la parte plana del valle y sólo fue una interpretación cualitativa del subsuelo, ya que no se conocía la estratigrafía subterránea, ni las densidades de las rocas. De este levantamiento se determinaron cuatro subcuencas subterráneas: Texcoco, Teotihuacán, Ciudad de México y Chalco.

Con la anomalía gravimétrica, se concluye que en la cercanía del cerro Chimalhuacán, existe un valle sepultado en dirección noreste-suroeste, que probablemente sea indicio del espesor potente de sedimentos en el área. Los resultados de la sismología de refracción determinaron cuatro mantos, caracterizados por las distintas velocidades de propagación de las ondas sísmicas y cuyas características se muestran en el cuadro 1:

Cuadro 1. Mantos y refractores determinados en la línea base

Manto	Profundidad estimada	Características de la Formación
Superficial	0 a 30	Formación de arcilla muy compresible y saturada de agua
Primero	30 a 520	Formación arcillo-arenosa poco compacta y saturada de agua
Refractor "A"	52	-
Segundo	520 a 1,445	Tobas compactas con intercalaciones de horizonte arenosos
Refractor "B"	1,445	-
Tercero	1,445 en adelante	Rocas muy compactas, posiblemente ígneas

Tomado de Arredondo, 2007.

Los resultados obtenidos de las líneas sísmicas de refracción permitieron concluir que los derrames de roca ígnea y material piroclástico en el subsuelo del Ex Lago de Texcoco provinieron de tres aparatos volcánicos:

- El primero, del volcán Huatepec cuyas emisiones más profundas llegaron hasta el cerro de Chimalhuacán.
- El segundo lo conforman los cerros Gordo y Peñón de los Baños
- El tercer aparato corresponde al volcán Chimalhuacán, cuyas emisiones descansan sobre las rocas profundas del volcán Huatepec.



Para el año de 1987, el Departamento de Geofísica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), como consecuencia del sismo ocurrido en 1985, realizó una serie de estudios en el subsuelo de la Ciudad de México, a fin de investigar los depósitos someros, parte de los estudios se extendieron a la zona del Ex Lago de Texcoco.

Los estudios realizados por la CFE fueron de sísmica de refracción y sondeos eléctricos verticales (SEV) y la profundidad aproximada de investigación fue de 500 m. Los estudios de refracción sísmica realizados por la CFE también dieron cuatro mantos con características que se observan en el cuadro 2.

Cuadro 2. Refracción sísmica realizada por la CFE en 1987.

Manto	Velocidad media	Profundidad estimada (m)	Características de la formación
1	250 a 1,100	25	Capa superficial constituida por depósitos arcillosos de origen lacustre
2	850 a 1,500	70	Depósitos arcillosos ligeramente más compactados
3	1,700 – 2,000	300	Depósitos aluviales
4	2,000 – 3,000	-	Sólo se localiza en los tendidos

Tomado de CFE, 1987

Como se puede observar, la refracción sísmica realizada en 1966 y en 1987, dieron cuatro mantos de las siguientes características:

- El manto superficial, la profundidad es de 25 m a 30 m.
- En el primer manto, se registró un espesor de 30 m a 520 m. En 1987 la CFE reportó una velocidad de 850 m/s a 1,500 m/s, pero sólo hasta los 70 metros de profundidad; en ambos casos lo relacionan con materiales arcillo-arenosos, poco compactos y saturados con agua.
- La CFE detectó otro horizonte de los 70 m a 300 m, considerados como depósitos aluviales de regular compactación, asociados a derrames lávicos; esta capa queda dentro del primer manto de la geofísica de 1966 (Carrillo). Ambas capas corresponden a los mismos materiales, sólo que se les interpretó con diferente granulometría.
- El último horizonte encontrado por CFE está a profundidades mayores a los 300 metros y tiene velocidades de 2,000 m/s a 3,000 m/s y aún 4,000 m/s, asociadas a tobas y derrames lávicos y corresponden con el manto segundo de la línea base, con una diferencia en la profundidad, ya que el segundo se ubica a más de 520 metros.

De lo anterior se puede concluir que la primera capa es arcillosa poco compactada, con un espesor de 25 m a 30 m. Existe una segunda capa más areno-arcillosa, con saturación de agua a 70 m de profundidad, la cual es de origen lacustre. Después de los 70 metros de profundidad, los materiales que predominan son arenosos con moderada compactación, probablemente asociados a algunos derrames lávicos, también con



presencia de agua, cuya profundidad llega a los 300 metros y en algunos sitios a 520 metros (Zona de Chimalhuacán a Cerro Gordo).

A partir de esas profundidades (300 m - 500 m) se encontraron rocas ígneas compactas, que pueden ser el basamento de los materiales granulares aluvial-lacustres que rellenaron el Lago de Texcoco.

La Figura 55, expone de manera general la estratigrafía de la zona mediante la construcción de una sección que corta la línea del trazo en la parte sur.

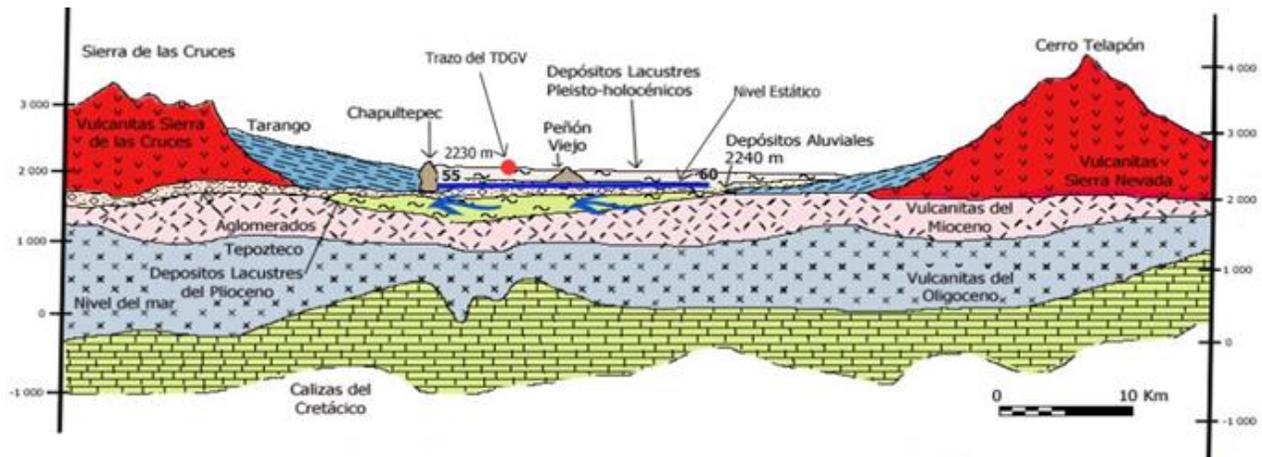


Figura 44. Sección estratigráfica esquemática

1.- Capa Superior o Manto Superficial (CS): Formada por arcillas afectadas por secado, limo-arcillosas y arenas limosas. Su espesor aproximado es de 1.5 metros, aumentando éste hacia la Sierra de Guadalupe; estos materiales están surcados por grietas rellenas con materiales eólicos, en la intersección del Bordo Poniente con el camino Peñón- Texcoco y en la zona del Aeropuerto. Esta capa descansa sobre la formación arcillosa superior.

2.- Formación Arcillosa Superior (FAS): La constituyen arcillas blandas altamente plásticas, con espesores variables de acuerdo con el lugar; 18 metros en la zona de El Caracol, 40 metros en el Bordo de Xochiaca; 6 metros en la cercanía de la Sierra de Guadalupe; 25 metros en la zona centro de la Ciudad de México, de 39 a 17 metros en el tramo comprendido del Km 3 al 13 del camino Peñón- Texcoco. Las arcillas que componen esta unidad son de origen volcánico lacustre, con intercalaciones y lentes de arena, limos y de vidrio volcánico. Sobreyace a la llamada capa dura.



3.- Capa dura (CD): Compuesta por materiales limo-arenosos cementados por carbonato de calcio y con rasgos de desecación; presenta un espesor variable de entre 2.0 y 3.5 metros, tendiendo a desaparecer hacia el oriente, en las inmediaciones de Ciudad Nezahualcóyotl. Esta capa se formó en la etapa interglaciar (Mooser 1992), que en el valle se caracterizó por ser un período de intensa sequía, lo que provocó el secado de suelos y por lo tanto su endurecimiento. La capa tiene intercalaciones de arcilla que corresponden a los ciclos húmedos de este período.

4.- Formación Arcillosa Inferior (FAI): Conocida también como capa arcillo-arenosa, son una serie de estratos de arcilla de elevada plasticidad con lentes y estratos limo-arenosos y de vidrio volcánico; es diferente de la Formación Arcillosa Superior únicamente por su menor contenido de agua. Su espesor medio en el Centro del Lago es de 20 metros, disminuyendo hacia el oriente y al norte. Esta formación tiende a desaparecer en la Sierra de Guadalupe.

5.- Depósitos Profundos (DP): Están constituidos por limos compactos, gravas y arcillas menos plásticas que las de la Formación Arcillosa Superior. Los materiales están interestratificados con capas de arenas finas y lentes de materiales volcánico y aluvial. Los espesores no se definen, ya que esta formación se profundiza en el subsuelo. Algunos autores como Murillo (1978) y Torres G. (1992) utilizan esta terminología y a su vez denominan a los depósitos profundos como “Segunda capa dura”; estos mismos autores y Morales (1991), establecen una tercera Formación Arcillosa dentro de los depósitos profundos, con un espesor de más de 6 metros y a profundidades de 52 metros en el centro del Ex Lago y a 64 metros de profundidad en Bordo Poniente. A su vez denominan Depósitos Profundos Interiores o Cuarta Formación Arcillosa al conjunto de estratos arenosos, limosos y limo-arenosos que en ocasiones contienen arcilla y gravas; se encuentran a profundidades de entre 145 y 160 metros.

Localmente en la zona de Bordo Poniente se realizaron estudios de mecánica de suelos, sondeos y pruebas de laboratorio (Murillo y Laboratorios Tlalli, 1993), para conocer la estratigrafía del subsuelo del sitio. De dichos estudios se comprobó la existencia de un paquete masivo de arcillas (FAS) con intercalaciones de arena y ceniza volcánica, encontrados a los 9 m, 14 m, 20 m, 34 m y 36 m de profundidad.

A una profundidad variable de 38 m y 42 m se detectó un paquete de material limo-arenoso con mayor compactación, con un espesor aproximado de 1.50 m, considerado como la primera capa dura.

Posteriormente en estudios realizados por TGC en 1992, determinaron las profundidades a las cuales se encuentran los sedimentos descritos anteriormente; las FAS se localiza de



1 m a 36 m de profundidad, la CD de 36 m a 38 m, la FAI de 38 m a 53 m y los DP a más de 53 m.

Por otra parte, del análisis de cortes litológicos, se observó un paquete arcilloso de espesor promedio de entre 80 m y 90 m. Dentro de este paquete se observaron lentes de arena fina a partir de los 9 metros con espesores de hasta 1 metro.

4.3 Marco Geofísico

4.3.1 Información geofísica de la zona de estudio

Dentro de la información recopilada se cuenta con datos del trabajo “Proyecto de construcción del Túnel Dren General del Valle (TDGV) con un desarrollo de aproximadamente 30+670 m que parte a 23.50 m de profundidad de la Lumbraera Cerro (LO), situada 1 Km al SE del Cerro La Caldera en el Municipio La Paz, y termina a 50 m de profundidad en su entronque con la Lumbraera 6 del Túnel Emisor Oriente (TEO) situada en el Municipio de Ecatepec.

En la figura 60 se presenta la ubicación de los sondeos geofísicos realizados en el trabajo señalado, donde se observa que los Tems-14 al 19, se realizaron propiamente en las inmediaciones de la zona de estudio.

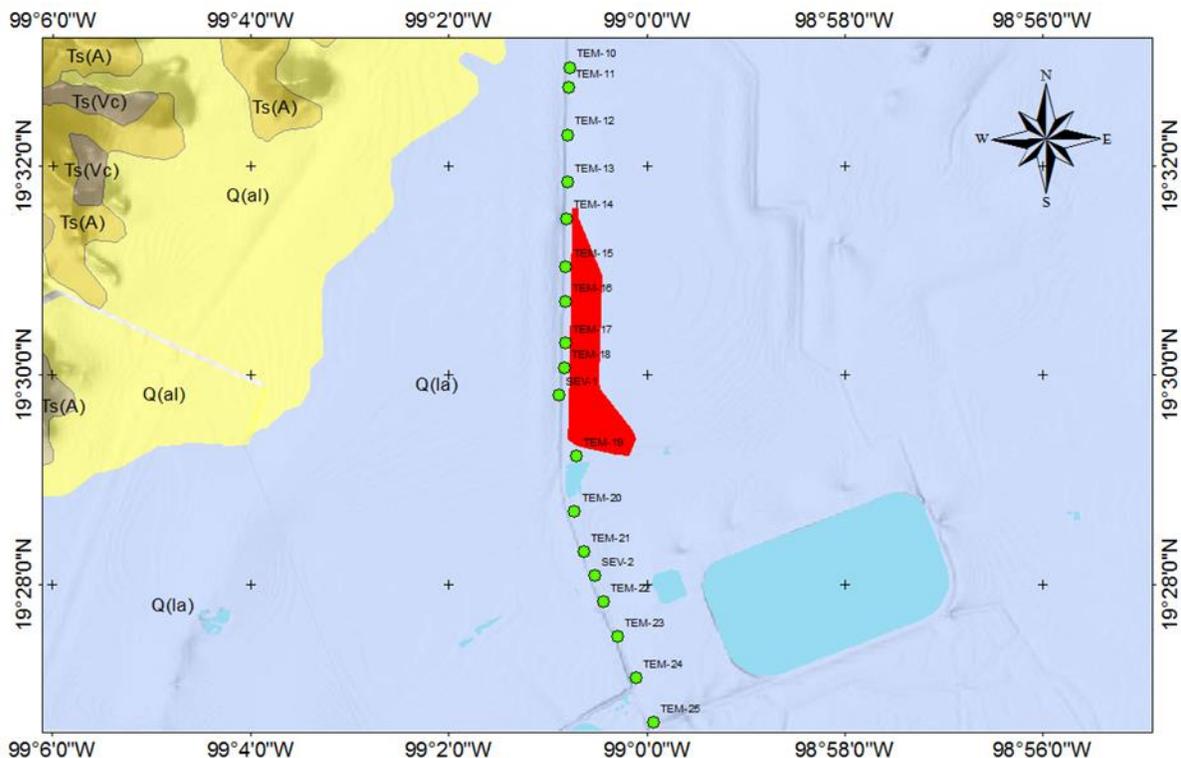


Figura 45. Sección de Calicateo Geo-eléctrico.



Con esta técnica se alcanzaron profundidades de investigación de 500 m, lo cual permitió explorar en el paquete de sedimentos lacustres superficial y en el basamento firme e indeformable conformado por tobas limo arenosas y limo arcillosas de la Formación Tarango del Terciario Superior.

Con datos del trabajo “Proyecto de construcción del Túnel Dren General del Valle (TDGV), se realizaron varias pruebas de Down-Hole (DH), el más cercano a la zona de estudio se ubica donde se proyectaba construir la lumbrera L10, se realizó desde superficie y hasta 66 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. Figura 46.

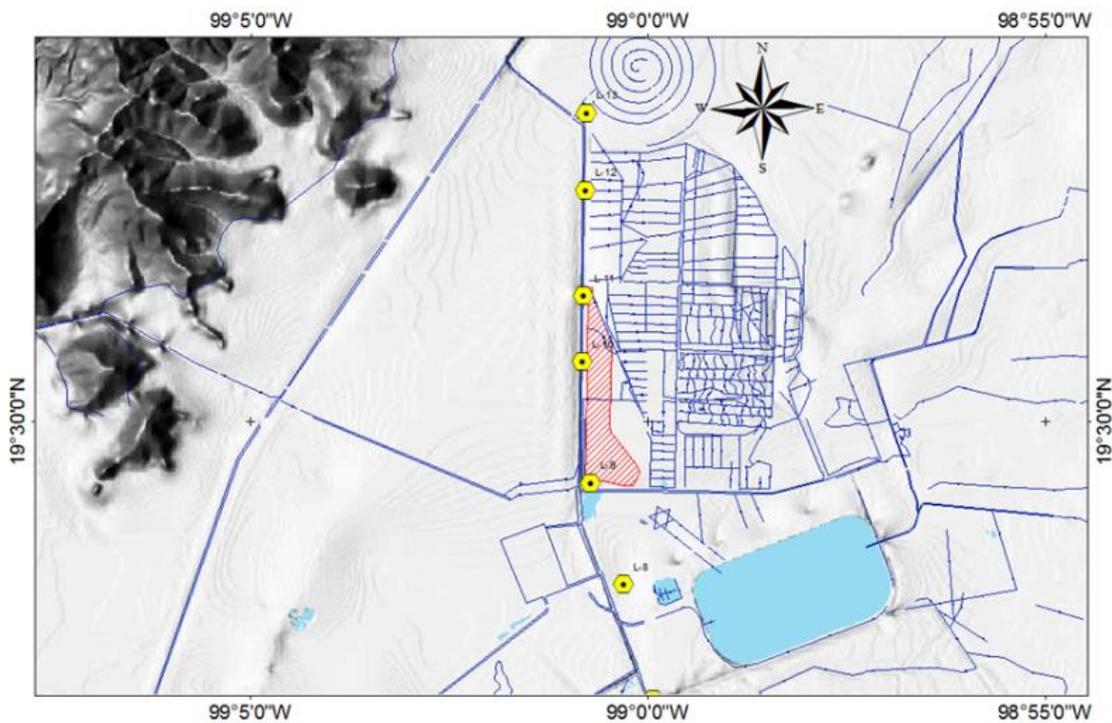


Figura 46. Localización de perforaciones para potenciales lumbreras.

La siguiente tabla 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, determinadas a partir del DH-L10 y del SM-84.



Cuadro 3. Resumen de resultados de Down- Hole

Prof. (m)	Material Tipo	Vp (m/s)	Vs (m/s)	γ (Ton/m ³)
0.00 - 3.00	MATERIAL DE RELLENO 0 < N < 3	305	51	1.160
3.00 - 6.60	LIMO PLASTICO LACUSTRE 0 < N < 1	303	56	1.150
6.60 - 14.00	LIMO PLASTICO ARENOSO N = 0	1016	50	1.300
14.00 - 22.50	LIMO PLASTICO ARENOSO N = 0	1229	52	1.250
22.50 - 27.40	LIMO PLASTICO ARENOSO N = 0	1262	56	1.240
27.40 - 29.50	LIMO CEMENTADO N > 50	1356	139	1.260
29.50 - 31.00	LIMO ARENOSO 7 < N > 50	1277	140	1.260
31.00 - 33.20	LIMO GRIS VERDOSO 0 < N < 4	793	140	1.220
33.20 - 33.80	LIMO ARENOSO N > 50	1726	140	1.220
33.80 - 38.40	LIMO PLÁSTICO ARENOSO 0 < N < 9	1731	141	1.200
38.40 - 39.40	LIMO ARENOSO 11 < N > 50	1734	141	1.200
39.40 - 54.30	LIMO CEMENTADO N > 50	1741	175	1.250
54.30 - 58.20	ARENA FINA A MEDIA 35 < N > 50	1755	214	1.201
58.20 - 66.00	LIMO PLÁSTICO VERDOSO 18 < N > 50	1563	164	1.230



La Tabla 4 consigna 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 donde se proyecta construir la Lumbreira 10, los cuales se describen brevemente a continuación:

- 1) El primero de ellos y superficial presenta espesor promedio de 3 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 3.60 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 6.60 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 8.50 m, 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 22.50 a 27.40 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 2.10 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 1356 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.
- 7) Subyaciendo al anterior y con espesor de 1.50 m, se presenta limo arenoso, con número de golpes a la penetración estándar de 7 a mayor de 50, peso volumétrico de 1.26 Ton/m³, velocidad longitudinal de 1,277 m/s y velocidad transversal de 140 m/s; Presenta Coeficiente de Poisson de 0.49, Módulo de Young de 752 Kg/cm² y Módulo de Cortante de 252 Kg/cm²; parámetros indicativos de su mediana rigidez dinámica. La amplificación de los movimientos sísmicos que inciden en su base es pequeña debido a su espesor reducido.
- 8) Por debajo del anterior y con espesor de 2.20 m, se presenta limo gris verdoso en estado blando con número de golpes a la penetración estándar de 0 a 4, peso volumétrico de 1.22 Ton/m³, velocidad longitudinal de 793 m/s y velocidad transversal de 140 m/s. Presenta Coeficiente de Poisson de 0.48, Módulo de Young de 723 Kg/cm² y Módulo de Cortante de 244 Kg/cm²; indicativos de su baja rigidez dinámica. La amplificación de los movimientos sísmicos que inciden en su base es pequeña debido a su poco espesor.
- 9) De 33.20 a 33.80 m de profundidad, se presenta limo arenoso con número de golpes mayor de 50, estado firme, peso volumétrico de 1.22 Ton/m³, velocidad longitudinal de 1726 m/s y velocidad transversal de 140 m/s. Presenta Coeficiente de Poisson de 0.50, Módulo de Young de 730 Kg/cm² y Módulo de Cortante de 244 Kg/cm²; parámetros indicativos de su mediana rigidez dinámica. La amplificación de los movimientos sísmicos que inciden en su base es pequeña debido a su poco espesor.
- 10) Por debajo del anterior y con espesor de 5.60 m, se presenta limo arenoso parcialmente cementado, con número de golpes de 0 a mayor de 50, peso volumétrico de 1.20 Ton/m³, velocidad longitudinal de 1,731 a 1,734 m/s y velocidad transversal de 141 m/s. Presenta Coeficiente de Poisson de 0.50 (indicativo de su alta deformabilidad), Módulo de Young de 728 Kg/cm² y Módulo de Cortante de 243 Kg/cm²; parámetros indicativos de su baja a mediana rigidez dinámica que repercute de manera importante en la amplificación de los movimientos sísmicos que inciden en su base.
- 11) De 39.40 a 66.00 m de profundidad, se presenta el basamento local o Capa Dura constituida por limo arenoso cementado en estado firme a duro con número de golpes a la penetración estándar mayor de 50, peso volumétrico de 1.25 Ton/m³, velocidad longitudinal de 1,741 m/s y velocidad transversal de 175 m/s. Presenta Coeficiente de Poisson de 0.49 (indicativo de su alta deformabilidad), Módulo de Young de 1,167 Kg/cm² y Módulo de Cortante de 390 Kg/cm²; parámetros indicativos de su alta rigidez dinámica. La amplificación de los movimientos sísmicos en su base es pequeña.



- 12) Por último, se infiere que las Tobas arenos limosas en estado muy compacto pertenecientes a la Formación Tarango y que constituyen el basamento geosísmico de la Ciudad de México se encuentran a 92 m de profundidad.

A partir de las velocidades de propagación de onda de cortante, determinadas por el DHL10, asociadas con los espesores encontrados en el sondeo geotécnico (SM-84), se calculó el período dominante del sitio “Ts” mediante el uso de la ecuación propuesta por los Manuales de Diseño de Obras Civiles de C.F.E. Diseño por Sismo publicados en 1993, 2008 y 12015.

$$T_s = 4 H_s / V_{sp}$$

Donde:

H_s = Profundidad del basamento local.

V_{sp} = Velocidad de cortante promedio

Como se puede observar, el período dominante es función directamente de la profundidad a la que se encuentra el basamento local o indeformable. El período dominante de un sitio depende de la posición del estrato firme, o material incompresible, el cual, en la Ciudad de México y Zona Metropolitana, está conformado por los denominados Depósitos Profundos, o bien por la Capa Dura cuando el espesor de la Formación Arcillosa Inferior es reducido.

De acuerdo con lo anterior, el período dominante del subsuelo del sitio de la Lumbra 10 es de **2.80 segundos**, considerando que la profundidad del paquete basal se encuentra **a 92 m** y por consiguiente la velocidad de cortante promedio de los paquetes suprayacentes es de **132 m/s**. El cuadro 5 muestra la relación empírica y adoptada por algunos reglamentos de construcciones para definir el Tipo de Suelo en función del período dominante del terreno:

Cuadro 4. Periodos dominantes

Período Dominante T_s (segundos)	Tipo de Suelo
$T_s < 0.50$	I
$0.50 < T_s < 1.00$	II
$T_s > 1.00$	III

De acuerdo con esta tabla y tomando en cuenta que el período fundamental del terreno es de **2.80 segundos**, resulta que el terreno corresponde a **Tipo III**.



4.3.2 Interpretación estratigráfica.

Cinco son los estratos o paquetes litológicos principales interpretados en los cortes o perfiles electro-estratigráficos mostrados en las Figuras 47, los cuales se describen a continuación:

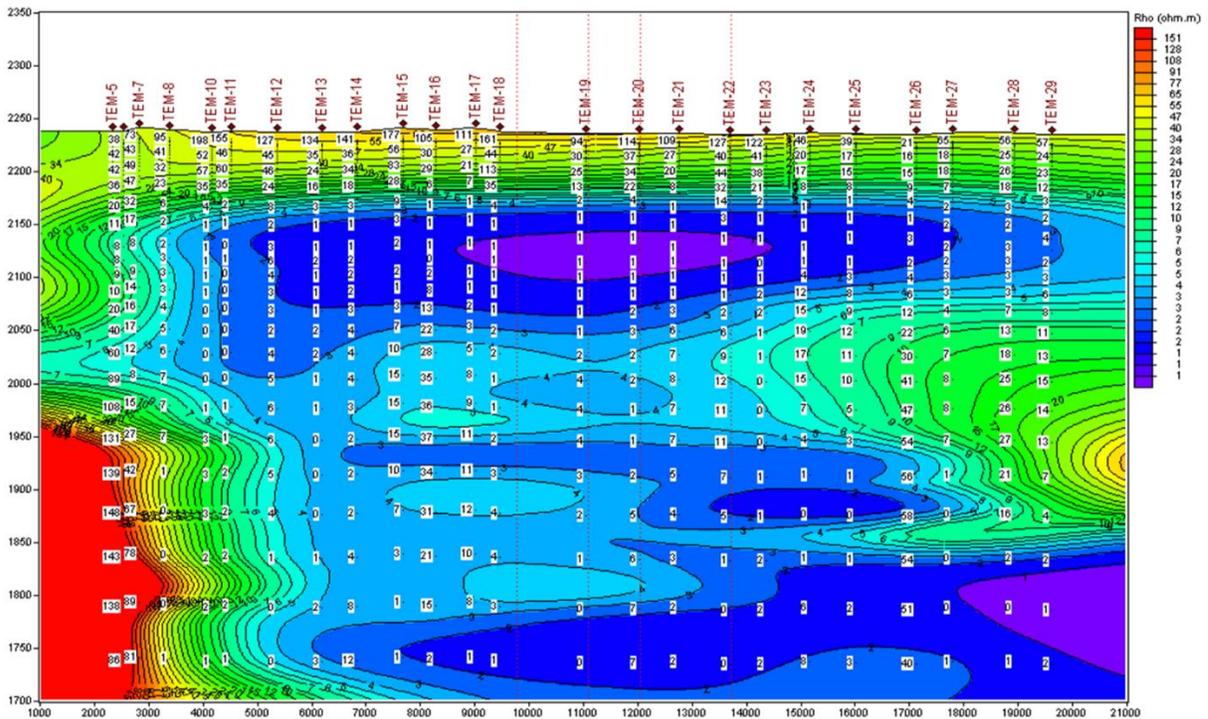


Figura 47. Sección de Calicateo Geo-eléctrico.

1. En superficie, de manera discontinua y solo en determinados tramos, se presentan materiales de relleno con espesor reducido (máximo de 2 m) y derrames volcánicos recientes con espesor máximo de 25 m, que en conjunto conforman la Costra Superficial (CS) en estado suelto a medianamente compacto con resistividades variables de 1 a 476 Ohm-m (colores azules, verde, amarillo, naranja y rojo), indicativas de su heterogeneidad, variaciones granulométricas y permeabilidad. En la base de este primer paquete se presenta el Nivel de Aguas Freáticas (NAF).
2. Por debajo del anterior y aflorando en extensas áreas del extinto Lago de Texcoco, se presenta un importante paquete con resistividades bajas e intermedias de 1 a 157 Ohm-m (colores morado, azules y verde) y espesor variable de 35 a 90 m, perteneciente a Sedimentos Lacustres Someros (SLS), constituidos por arcillas plásticas y saturadas de baja permeabilidad con intercalaciones de capas delgadas constituidas por arenas limosas, limos arenosos y cenizas volcánicas que le confieren mayor resistencia mecánica.
3. Subyaciendo al anterior y rellenando la fosa del extinto Lago de Texcoco, se presenta



un paquete con resistividades bajas de 1 a 15 Ohm-m (colores morado y azules) y espesor máximo de 140 m en el sitio donde se realizó el PP-1, que se adelgaza gradualmente hacia sus extremos, perteneciente a Sedimentos Lacustres Profundos (SLP), constituidos por arcillas plásticas y saturadas de baja permeabilidad y posiblemente baja resistencia mecánica, por lo que resulta muy deformable ante posibles fenómenos de subsidencia.

4. Por debajo de los anteriores, a partir de los 35 a 190 m de profundidad y con espesor variable de 60 a 300 m, se presentan Tobas areno limosas con resistividades intermedias de 6 a 148 Ohm-m (color verde) y Tobas Limo arcillosas con resistividades bajas de 1 a 18 Ohm-m (colores morados y azules) pertenecientes a la Formación Tarango (FT) que constituyen la roca basal e indeformable del sitio en estudio. Su espesor máximo de 300 m se ubica en el sitio donde se realizó el PP-1.
5. Por último, se presentan resistividades intermedias a altas de 21 a 220 Ohm-m (colores verde olivo, amarillo naranja y rojo), posiblemente pertenecientes a Roca Volcánica (RV) fracturada y parcialmente argilitizada, constituida por basaltos, andesitas y materiales piroclásticos de los Cerros La Caldera y Chimalhuacán que delimitan la Fosa Texcoco al Sur.

4.4 Marco Geotécnico

4.4.1 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.

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 63.



Figura 48. Zonas Sísmicas de México.

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

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).



4.4.2 Zonificación geotécnica de la zona de estudio

Aunque la zona metropolitana de la Ciudad de México 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 tres zonas de acuerdo con el tipo de suelo, Figura 64.



Figura 49. Zonificación geotécnica.

1. **Zona I**, firme o de lomas: localizada en las partes más altas de la cuenca del valle, está formada por suelos de alta resistencia y poco compresibles.
2. **Zona II** o de transición: presenta características intermedias entre la Zonas I y III.
3. **Zona III** o de Lago: localizada en las regiones donde antiguamente se encontraban lagos (lago de Texcoco, Lago de Xochimilco y Chalco). 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. Zonificación del Valle de México.

Las características geológicas y la ubicación geográfica del predio en estudio lo ubican dentro de la Zona de Loma (Zona III), es decir se localizada en las partes más baja de la cuenca del valle, donde el subsuelo está formado propiamente por sedimentos lacustres.



4.4.3 Información geotécnica de la zona de estudio

Con datos del trabajo “Proyecto de construcción del Túnel Dren General del Valle (TDGV), dentro de la información geotécnica recopilada se cuenta con datos de trabajos en las inmediaciones de la zona correspondiente al proyecto Texcoco, donde se realizaron perforaciones a profundidades que van de 40 hasta 66 metros en la zona, la distribución de las perforaciones señaladas se presenta en la figura 50.



Figura 50. Localización de perforaciones exploratorias.

De los resultados obtenido se tiene la siguiente sección geotécnica de la zona.

Con base a los registros obtenidos del ensaye de piezocono, se determinó la distribución geotécnica del sitio, en el cual se registró, aproximadamente, del nivel de terreno natural hasta una profundidad de 1.80 m en promedio, se encuentra un relleno, a partir de allí hasta la profundidad de 32.42m un depósito importante de arcilla de consistencia muy blanda y baja resistencia al corte, con un contenido de agua promedio igual a 187%. Así también, de manera intercalada en el depósito arcilloso, se reportó la presencia de un trazador de arena fina (ceniza volcánica), con un contenido de agua reportado aproximadamente del 60%. Entre las profundidades de 32.42 y 33.78 m se reportó un estrato Ceniza volcánica con arcilla gris verdosa. Se reporta un número promedio de golpes igual a $N_{spt} > 50$. Contenido de agua promedio: 55%



A partir de la profundidad de 33.78 m se registró una serie estratificada de arcillas y capas de arcilla con arena o arena fina; donde los estratos arcillosos presentan alta plasticidad y consistencia blanda, con un contenido de agua promedio de 180 %. En el caso de los estratos arenosos se reportaron capas de arena fina de color negro (ceniza). Se reporta un número promedio de golpes igual a $N_{sp} = 10$ a 30. Contenido de agua promedio: 90%.

En resumen, el modelo geotécnico del tramo se presenta en la Figura 51.

MODELO GEOTÉCNICO																				
LUMBRERA L-9A L-10																				
PROYECTO:		Túnel Dren General de Valle (TDGV)						X			Y			PROFUNDIDAD (m)						
FECHA DE ELABORACIÓN:	13-sep-16							CPTU-TDGV-78			498,607.00			2,133,912.00			44.56			
REVISIÓN NO.:	1							CPTU-TDGV-80			498,596.00			2,136,344.00			44.22			
FECHA DE REVISIÓN:	14-sep-16							CPTU-TDGV-84			498,590.00			2,137,453.00			65.46			
NAF (m)		1.89																		
Nota: se utilizaron todos los sondeos del tramo que comprende L-09 A L-10 para definir un solo modelo geotécnico, sin embargo los que aportan masa efectiva son del 78, 80 y 84																				
ESTRATO	DESCRIPCIÓN	Profundidad (m)		W%	e	γ (kN/m³)	No-drenados			Drenados										
		de	a				Cu (kPa)	φ' (°)	v	c' (kPa)	φ' (°)	v'	E (kPa)	k (cm/d)	μ _s	K=σ _v /σ _{v'}	OCR	Cc	Cr	
1	RELLENO. Profundidad: 0 a 1.78 m. Estrato conformado por material heterogéneo, principalmente por mezcla de limos y arenas de color gris verdoso y cañal, de consistencia muy blanda. De acuerdo con los registros del ensayo de penetración estándar, $N_{sp} = 5$	0.00	1.78	78.84	-	12.75	19.62	25	3884	0.30	19.62	25	0.30	3348	1.00E-03	0.57	0.81	N/A	N/A	N/A
2	FAS A. Profundidad: 1.78 a 4.24 m. Arcilla de alta plasticidad y consistencia muy blanda. Color cañal grisáceo. Contenido de agua promedio: 121 %, $c_w = 0.5$ kPa.	1.78	4.24	121.89	3.21	11.50	3.72	0	465	0.45	0	40	0.33	93	1.00E-07	0.36	0.81	1.00	1.95	0.15
3	FAS B. Profundidad: 4.24 a 12.46 m. Arcilla de alta plasticidad y consistencia muy blanda. Color cañal grisáceo y rojizo. Contenido de agua promedio: 221 %, $c_w = 1.8$ kPa.	4.24	12.46	221.48	5.82	11.77	12.42	0	1678	0.45	0	40	0.33	336	1.00E-07	0.36	0.81	1.00	3.54	0.27
4	FAS C. Profundidad: 12.46 a 19.34 m. Arcilla de alta plasticidad y consistencia muy blanda. Color verde olivo. Contenido de agua promedio: 224 %, $c_w = 2.3$ kPa.	12.46	19.34	204.93	5.39	12.01	24.37	0	3046	0.45	0	40	0.33	609	1.00E-07	0.36	0.81	1.00	3.28	0.25
5	FAS D. Profundidad: 19.34 a 25.74 m. Arcilla de alta plasticidad y consistencia muy blanda. Color verde olivo. Contenido de agua promedio: 184 %, $c_w = 4.51$ kPa.	19.34	25.74	184.32	4.85	12.26	32.89	0	4111	0.45	0	40	0.33	822	1.00E-07	0.36	0.81	1.00	2.95	0.22
6	FAS F. Profundidad: 25.74 a 30.56 m. Arcilla de alta plasticidad y consistencia muy blanda, con arena fina. Color cañal grisáceo y rojizo. Contenido de agua promedio: 196 %, $c_w = 7.6$ kPa.	25.74	30.56	196.29	5.16	12.26	40.29	0	5411	0.45	0	40	0.33	1082	1.00E-07	0.36	0.81	1.00	3.14	0.24
7	FAS G. Profundidad: 30.56 a 32.42 m. Arcilla de alta plasticidad y consistencia muy blanda. Color verde olivo. Contenido de agua promedio: 195 %, $c_w = 7.6$ kPa.	30.56	32.42	195.17	5.13	12.33	55.35	0	8919	0.45	0	40	0.33	1384	1.00E-07	0.36	0.81	1.10	3.12	0.23
8	CAPA DURA. Profundidad: 32.42 a 33.78 m. Capa volcánica con arcilla gris verdosa. Se reporta un número promedio de golpes igual a $N_{sp} = 10$. Contenido de agua promedio: 93 %	32.42	33.78	93.60	-	17.66	19.62	32	7976	0.35	96.1	32	0.30	6912	1.00E-03	0.47	0.81	N/A	N/A	N/A
9	FAI A. Profundidad: 33.78 a 36.06 m. Arcilla de alta plasticidad y consistencia blanda. Color verde olivo. Contenido de agua promedio: 179 %, $c_w = 11$ kPa.	33.78	36.06	179.79	4.73	12.46	59.17	0	7997	0.45	0	40	0.33	1479	1.00E-07	0.36	0.81	1.00	2.88	0.22
10	LENTE. Profundidad: 36.06 a 36.36 m. Trascor de arena fina de color negro. Se reporta un número promedio de golpes igual a $N_{sp} = 12$. Contenido de agua promedio: 93 %	36.06	36.36	93.69	-	14.72	19.62	25	3693	0.35	96.1	25	0.30	3200	1.00E-03	0.58	0.81	N/A	N/A	N/A
11	FAI B. Profundidad: 36.36 a 37.38 m. Arcilla de alta plasticidad y consistencia blanda. Color verde olivo. Contenido de agua promedio: 184 %, $c_w = 10$ kPa.	36.36	37.38	184.37	4.85	12.46	71.27	0	9159	0.45	0	40	0.33	1832	1.00E-07	0.36	0.81	1.20	2.95	0.22
12	LENTE. Profundidad: 37.38 a 38.14 m. Trascor de arena fina de color negro. Se reporta un número promedio de golpes igual a $N_{sp} = 10$. Contenido de agua promedio: 93 %	37.38	38.14	93.69	-	14.72	19.62	29	6444	0.35	96.1	29	0.30	5584	1.00E-03	0.51	0.81	N/A	N/A	N/A
13	FAI C. Profundidad: 38.14 a 40.96 m. Arcilla de alta plasticidad y consistencia blanda. Color verde olivo. Contenido de agua promedio: 174 %, $c_w = 11$ kPa.	38.14	40.96	174.92	4.60	12.70	80.11	0	10014	0.45	0	40	0.33	2003	1.00E-07	0.36	0.81	1.25	2.80	0.21
14	LENTE. Profundidad: 37.38 a 38.14 m. Trascor de arena fina de color negro. Se reporta un número promedio de golpes igual a $N_{sp} = 10$. Contenido de agua promedio: 90 %	40.96	41.88	90.00	-	14.72	19.62	23	3220	0.35	96.1	23	0.30	2790	1.00E-03	0.60	0.81	N/A	N/A	N/A
15	FAI D. Profundidad: 41.88 a 44.56 m. Arcilla de alta plasticidad y consistencia blanda. Color verde olivo. Contenido de agua promedio: 130 %, $c_w = 15.6$ kPa.	41.88	44.56	130.79	3.44	13.25	113.92	0	14240	0.40	0	40	0.33	2848	1.00E-07	0.36	0.81	1.29	2.09	0.16

Figura 51. Modelo geotécnico del tramo.

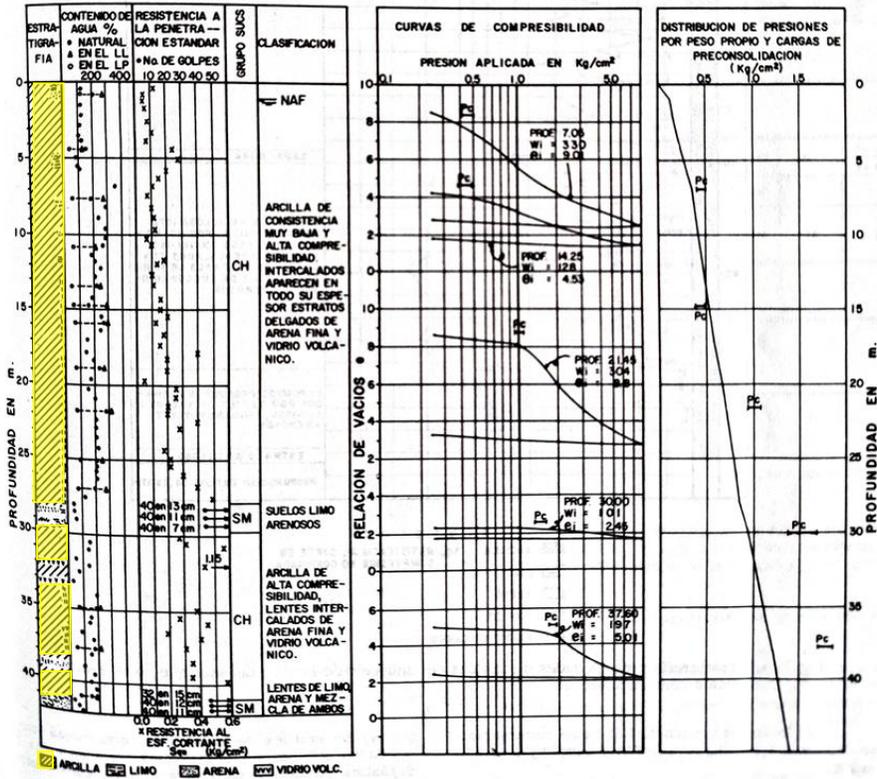


Figura 52. Propiedades del sondeo S23.

En cuanto a las propiedades de la zona del lago de Texcoco, se tiene la siguiente información. Figura 53.

PROPIEDADES	CONTENIDO NATURAL DE AGUA W (%)		LIMITE LIQUIDO LL (%)		LIMITE PLASTICO LP (%)		DENSIDAD DE SOLIDOS S _g		RELACION DE VACIOS		RESIS. AL CORTE S _{qu} (Kg/cm ²)	
	VALOR MEDIO	n	VALOR MEDIO	n	VALOR MEDIO	n	VALOR MEDIO	n	VALOR MEDIO	n	VALOR MEDIO	n
FORMACION SUPERFICIAL	61	112	99	15	44	15	2.50	24	1.7	23	0.15	23
FORMACION ARCILLOSA SUPERIOR	303	3355	301	624	71	624	2.46	2479	7.3	2466	0.13	1707
CAPA DURA	59	109	71	24	37	24	2.53	9	1.2	9	0.88	8
FORMACION ARCILLOSA INFERIOR	255	950	242	188	66	179	2.45	604	5.9	604	0.32	271
DEPOSITOS PROFUNDOS SUPERIORES	49	476	94	54	47	54	2.42	8	1.5	8	0.54	2
TERCERA FORMACION ARCILLOSA	147	227	182	50	68	50	2.27	6	3.5	6	0.48	5
DEPOSITOS PROFUNDOS INFERIORES	37	298	48	26	25	26						

— NUMERO DE DETERMINACIONES

Figura 53. Valores medios (Murillo, et al).



4.4 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 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 lacustre, aluvial con la presencia de horizontes de tobas arcillo-arenosas, con espesores variables hasta metros de espesor, alcanzando una profundidad identificada hasta 100 metros.

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.

Las unidades definidas por diversos autores se han modificado a través del tiempo; sin embargo, la mayoría coincide con las definiciones que a continuación se describen brevemente.

Capa Superior o Manto Superficial (CS): Formada por arcillas afectadas por secado, limo-arcillosas y arenas limosas. Su espesor aproximado es de 1.5 metros, aumentando éste hacia la Sierra de Guadalupe; estos materiales están surcados por grietas rellenas con materiales eólicos, en la intersección del Bordo Poniente con el camino Peñón- Texcoco y en la zona del Aeropuerto. Esta capa descansa sobre la formación arcillosa superior.

Formación Arcillosa Superior (FAS): La constituyen arcillas blandas altamente plásticas, con espesores variables de acuerdo con el lugar; 18 metros en la zona de El Caracol, 40 metros en el Bordo de Xochiaca; 6 metros en la cercanía de la Sierra de Guadalupe; 25 metros en la zona centro de la Ciudad de México, de 39 a 17 metros en el tramo comprendido del Km 3 al 13 del camino Peñón- Texcoco. Las arcillas que componen esta unidad son de origen volcánico lacustre, con intercalaciones y lentes de arena, limos y de vidrio volcánico. Sobreyace a la llamada capa dura.



Capa dura (CD): Compuesta por materiales limo-arenosos cementados por carbonato de calcio y con rasgos de desecación; presenta un espesor variable de entre 2.0 y 3.5 metros, tendiendo a desaparecer hacia el oriente, en las inmediaciones de Ciudad Nezahualcóyotl. Esta capa se formó en la etapa interglaciar (Mooser 1992), que en el valle se caracterizó por ser un período de intensa sequía, lo que provocó el secado de suelos y por lo tanto su endurecimiento. La capa tiene intercalaciones de arcilla que corresponden a los ciclos húmedos de este período.

Formación Arcillosa Inferior (FAI): Conocida también como capa arcillo-arenosa, son una serie de estratos de arcilla de elevada plasticidad con lentes y estratos limo-arenosos y de vidrio volcánico; es diferente de la Formación Arcillosa Superior únicamente por su menor contenido de agua. Su espesor medio en el Centro del Lago es de 20 metros, disminuyendo hacia el oriente y al norte. Esta formación tiende a desaparecer en la Sierra de Guadalupe.

Depósitos Profundos (DP): Están constituidos por limos compactos, gravas y arcillas menos plásticas que las de la Formación Arcillosa Superior. Los materiales están interestratificados con capas de arenas finas y lentes de materiales volcánico y aluvial. Los espesores no se definen, ya que esta formación se profundiza en el subsuelo. Algunos autores como Murillo (1978) y Torres G. (1992) utilizan esta terminología y a su vez denominan a los depósitos profundos como “Segunda capa dura”; estos mismos autores y Morales (1991), establecen una tercera Formación Arcillosa dentro de los depósitos profundos, con un espesor de más de 6 metros y a profundidades de 52 metros en el centro del Ex Lago y a 64 metros de profundidad en Bordo Poniente. A su vez denominan Depósitos Profundos Interiores o Cuarta Formación Arcillosa al conjunto de estratos arenosos, limosos y limo-arenosos que en ocasiones contienen arcilla y gravas; se encuentran a profundidades de entre 145 y 160 metros.

De acuerdo con las velocidades de propagación longitudinales y transversales, así como los módulos elásticos dinámicos de los estratos o paquetes litológicos principales que constituyen el subsuelo, se clasifico los materiales mismos que se describen brevemente a continuación:

- 1) El primero de ellos y superficial presenta espesor promedio de 3 m, número de golpes a la penetración estándar de 0 a 3, peso volumétrico de 1.16 Ton/m^3 , 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/cm^2 y Módulo de Cortante de 31 Kg/cm^2 ; 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 3.60 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 6.60 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 8.50 m, 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 22.50 a 27.40 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 2.10 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 1356 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.
- 7) Subyaciendo al anterior y con espesor de 1.50 m, se presenta limo arenoso, con número de golpes a la penetración estándar de 7 a mayor de 50, peso volumétrico de 1.26 Ton/m³, velocidad longitudinal de 1,277 m/s y velocidad transversal de 140 m/s; Presenta Coeficiente de Poisson de 0.49, Módulo de Young de 752 Kg/cm² y Módulo de Cortante de 252 Kg/cm²; parámetros indicativos de su mediana rigidez dinámica. La amplificación de los movimientos sísmicos que inciden en su base es pequeña debido a su espesor reducido.
- 8) Por debajo del anterior y con espesor de 2.20 m, se presenta limo gris verdoso en estado blando con número de golpes a la penetración estándar de 0 a 4, peso



volumétrico de 1.22 Ton/m³, velocidad longitudinal de 793 m/s y velocidad transversal de 140 m/s. Presenta Coeficiente de Poisson de 0.48, Módulo de Young de 723 Kg/cm² y Módulo de Cortante de 244 Kg/cm²; indicativos de su baja rigidez dinámica. La amplificación de los movimientos sísmicos que inciden en su base es pequeña debido a su poco espesor.

- 9) De 33.20 a 33.80 m de profundidad, se presenta limo arenoso con número de golpes mayor de 50, estado firme, peso volumétrico de 1.22 Ton/m³, velocidad longitudinal de 1726 m/s y velocidad transversal de 140 m/s. Presenta Coeficiente de Poisson de 0.50, Módulo de Young de 730 Kg/cm² y Módulo de Cortante de 244 Kg/cm²; parámetros indicativos de su mediana rigidez dinámica. La amplificación de los movimientos sísmicos que inciden en su base es pequeña debido a su poco espesor.
- 10) Por debajo del anterior y con espesor de 5.60 m, se presenta limo arenoso parcialmente cementado, con número de golpes de 0 a mayor de 50, peso volumétrico de 1.20 Ton/m³, velocidad longitudinal de 1,731 a 1,734 m/s y velocidad transversal de 141m/s. Presenta Coeficiente de Poisson de 0.50 (indicativo de su alta deformabilidad), Módulo de Young de 728 Kg/cm² y Módulo de Cortante de 243 Kg/cm²; parámetros indicativos de su baja a mediana rigidez dinámica que repercute de manera importante en la amplificación de los movimientos sísmicos que inciden en su base.
- 11) De 39.40 a 66.00 m de profundidad, se presenta el basamento local o Capa Dura constituida por limo arenoso cementado en estado firme a duro con número de golpes a la penetración estándar mayor de 50, peso volumétrico de 1.25 Ton/m³, velocidad longitudinal de 1,741 m/s y velocidad transversal de 175 m/s. Presenta Coeficiente de Poisson de 0.49 (indicativo de su alta deformabilidad), Módulo de Young de 1,167 Kg/cm² y Módulo de Cortante de 390 Kg/cm²; parámetros indicativos de su alta rigidez dinámica. La amplificación de los movimientos sísmicos en su base es pequeña.
- 12) Por último, se infiere que las Tobas areno limosas en estado muy compacto pertenecientes a la Formación Tarango y que constituyen el basamento geosísmico de la Ciudad de México se encuentran a 92 m de profundidad.



Conclusión

El proyecto del lago de Texcoco 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
- 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.
- 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/>
- Pflugmacher, S. et al. (2015) Green Liver Systems® for water purification: Using the phytoremediation potential of aquatic macrophytes for the removal of different cyanobacterial toxins from water. AJPS 06 (09), 1607-1618. doi:10.4236/ajps.2015.69161.
- Servicio Geológico Mexicano, 2002. Carta Geológico-Minera "Ciudad de México" E14-2. Escala 1:250,000.



Tondera K., A. Rizzo, I. Srl y P. Molle, Cross, K.,2021. French vertical-flow treatment wetlands Tondera en: K., Rizzo, A., Andrews, L., Pucher, B., Istenič, D., Karres, N. y Mcdonald, R. Nature-Based Solutions for Wastewater Treatment. IWA Publishing.