



INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
COORDINACIÓN DE SISTEMAS HÍDRICOS
COORDINACIÓN DE SEGURIDAD HÍDRICA
COORDINACIÓN DE CALIDAD Y ECOLOGÍA DEL AGUA

PROYECTO CH2308.1

PROGRAMA HÍDRICO LAGO DE TEXCOCO, FASE 1:
ESTUDIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS
PARA LA RECUPERACIÓN HÍDRICA

INFORME FINAL

DICIEMBRE 2023

DIRECTORIO

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

ADRIÁN PEDROZO ACUÑA

Director general

COORDINACIÓN DE SISTEMAS HÍDRICOS

JUAN PABLO RODRÍGUEZ RINCÓN

Subcoordinación de Aguas Superficiales y Oceánicas

JULIO CÉSAR SORIANO MONZALVO (Jefe de proyecto)

RODRIGO ROBLERO HIDALGO

JOSE AVIDAN BRAVO JACOME

HECTOR ALONSO BALLINAS GONZALEZ

Subcoordinación de Gestión de Aguas Subterráneas

EDGAR YURI MENDOZA CAZARES

MIGUEL ANGEL MEJIA GONZALEZ

LUIS GONZALEZ HITA

ROEL SIMUTA CHAMPO

MANUEL MARTINEZ MORALES

BLANCA DE JESUS CARTEÑO MARTINEZ

ANNE MARGRETHE HANSEN HANSEN

VANESSA GUADALUPE MORENO AYALA

DUSTIN SILVERIO MAÑÓN FLORES

RUBÉN DARÍO HERNÁNDEZ LÓPEZ

Subcoordinación de Experimentación Física e Innovación Tecnológica

FEDERICO JOAQUIN OCHOA ALVAREZ

ALBERTO CASTRO SALAZAR

JUAN GABRIEL GARCIA MALDONADO

Subcoordinación de Sistemas Hidráulicos e Infraestructura Verde

EDGAR EDUARDO LÓPEZ LÓPEZ

JUAN MANUEL FIGUEROA MENDIOLA

JOSE MANUEL RODRIGUEZ VARELA

EDGAR ANTUNEZ LEYVA

RAUL MEDINA MENDOZA

ARTURO LOPEZ ZUÑIGA

COORDINACIÓN DE SEGURIDAD HÍDRICA

Subcoordinación de Agua, Energía y Proyectos Productivos

ULISES DEHESA CARRASCO

BRAULIO DAVID ROBLES RUBIO

IRVING JUVENAL ALVAREZ CELSO

EDUARDO VENEGAS REYES

COORDINACIÓN DE CALIDAD Y ECOLOGÍA DEL AGUA

NORMA RAMIREZ SALINAS

Subcoordinación de Sistemas de Saneamiento y Reutilización de Aguas Residuales

CESAR GUILLERMO CALDERON MOLGORA

ARMANDO RIVAS HERNANDEZ

GABRIELA MANTILLA MORALES

CARL ANTHONY SERVIN JUNGENDORF

LUCIANO SANDOVAL YOVAL

ARELI GÓMEZ ROJAS

Subcoordinación de Ecohidrología y Rehabilitación

CAMILO VÁZQUEZ BUSTOS

JORGE LUIS IZURIETA DAVILA

MARCO ANTONIO MIJANGOS CARRO

Subcoordinación de Monitoreo y Evaluación de Calidad del Agua

JULIA ELENA PRINCE FLORES

JUAN LEODEGARIO GARCIA ROJAS

HUMBERTO GARCIA FICUNDO

GUILLERMO GALICIA SOBERANES

MINERVA SANCHEZ GUZMAN

MANUEL SANCHEZ ZARZA

GISSEL TRUJILLO DOMINGUEZ

LORENA CASTILLO RODRIGUEZ

LEOPOLDO MARTINEZ MONTES

UNIDAD DE VINCULACIÓN Y ASUNTOS INTERNACIONALES

LAURA COUTIÑO ROMAN

CECILIA TELLEZ QUINTANAR

JUAN CARLOS BUSTOS MONTES

JUAN CARLOS CENTENO ALVAREZ

LETIZIA ODETH SILVA ONTIVEROS

COLABORADORES

NADIA VIRIDIANA CRUZ VIVAR

Índice general

1	Introducción.....	1
2	Objetivos.....	7
3	Metodología.....	8
3.1	Recopilación de información.....	8
3.1.1	Subcuencas de aportación en el área de estudio.....	8
3.1.2	Geomorfología y litológica del subsuelo del área del lago de Texcoco.....	14
3.1.3	Uso de suelo.....	18
3.1.4	Tipo de suelo.....	21
3.1.5	Relieve.....	23
3.1.6	Clima.....	24
3.1.7	Barrancas, lagos, cauces y escurrimientos.....	26
3.1.8	Análisis hidrológico e hidráulico.....	31
3.1.9	Medición de caudal.....	64
3.1.10	Caudal.....	66
3.2	Caracterización geofísica, hidrogeológica, e hidrogeoquímica y modelación del flujo subterráneo.....	81
3.2.1	Fisiografía regional.....	81
3.2.2	Sistema hidrológico del Lago de Texcoco.....	83
3.2.3	Características de los suelos.....	83
3.2.4	Salinidad del acuitardo.....	89
3.2.5	Estratigrafía y permeabilidades.....	90
3.2.6	Evolución piezométrica en el acuitardo.....	92

3.2.7	Sistema de drenaje (Río de la Compañía).....	94
3.2.8	Metodología para la caracterización del agua subterránea.....	95
3.2.8.1	Toma de muestras.....	95
3.2.8.2	Parámetros de campo.....	100
3.2.8.3	Determinación de parámetros químicos e isotópicos en laboratorio.....	102
3.2.8.4	Nivelación de brocales.....	103
3.2.9	Resultados.....	105
3.2.9.1	Parámetros de campo.....	105
3.2.9.2	Parámetros de laboratorio.....	108
3.2.10	Análisis de resultados.....	111
3.2.10.1	Infiltraciones del Río de la Compañía.....	111
3.2.10.2	Isótopos Estables.....	112
3.2.10.3	Infiltraciones del Humedal.....	113
3.2.11	Modelo de perfil para la zona del humedal en Texcoco.....	115
3.2.12	Lago Nabor Carrillo: evaluación y caracterización de la problemática 120	
3.3	Valoración y propuesta de diseño de sistemas de humedales de tratamiento.....	134
3.3.1	Sistemas de Humedales de Tratamiento.....	134
3.3.1.1	Sistema de humedal de tratamiento prototipo que depure el agua del Dren Chimalhuacán I para el riego de cultivos de nopales.....	134
3.3.1.2	Sistema de humedal de tratamiento prototipo en el Parque Los Ahuehuetes.....	146
3.3.1.3	Sistema de humedal de tratamiento de Tocuila.....	154
3.4	Evaluación de las estructuras adicionales al PHLT.....	156

3.4.1	Bordos en Ciénega de San Juan.....	156
3.4.2	Asesoría técnica para la conservación de la Laguna Xalapango.....	172
3.5	Acompañamiento social del proyecto.....	190
4	Conclusiones	197
5	Referencias.....	199

Índice de figuras

Figura 1-1. Zona de estudio. Ubicación del Parque Ecológico Lago de Texcoco (rojo) y el actual Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM, en rosa).	___ 1
Figura 1-2. Red hidrográfica en la subcuenca hidrológica Lago de Texcoco.	_____ 3
Figura 1-3. Ubicación del acuífero de Texcoco.	_____ 4
Figura 3-1. Región hidrológica 26 Panuco	_____ 8
Figura 3-2. Localización de la zona de estudio y sus nueve subcuencas	_____ 9
Figura 3-3. Subcuencas de aportación	_____ 11
Figura 3-4. Funcionamiento hidráulico actual de los ríos que aportan a la zona de estudio (Conagua, 2018)	_____ 12
Figura 3-5. Ubicación de las estaciones hidrométricas que aforan las nueve cuencas que drenan al área de estudio	_____ 13
Figura 3-6. Reconstrucción del lago de Texcoco a la llegada de los españoles, donde se muestra el dique de Netzahualcóyotl. Carranza-Edwards A. 2018	___ 14
Figura 3-7. Uso de suelo Serie VI INEGI, en el área de estudio y las nueve cuencas que drenan hacia la misma	_____ 21
Figura 3-8. Tipo de Suelo las subcuencas y el área de estudio (INEGI, 2007)	___ 23
Figura 3-9. Relieve área de estudio y subcuencas de aportación (INEGI, 2010)	__ 24
Figura 3-10. Clima área de estudio y subcuencas de aportación (CONABIO, 2010)	_____ 25
Figura 3-11. Temperatura máxima media y mínima anual registrada	_____ 26
Figura 3-12. Ríos principales ubicados en la zona de estudio (INEGI, 2010a)	___ 28
Figura 3-13. Presa Nabor Carrillo	_____ 30
Figura 3-14. Cortina de la Presa Nabor Carrillo	_____ 30
Figura 3-15. Cuenca Rio Papalotla	_____ 33
Figura 3-16. Comportamiento en el tiempo de las estaciones ubicadas en la cuenca del rio Papalotla	_____ 34
Figura 3-17. Anomalías mensuales de las estaciones climatológicas ubicadas en la cuenca del rio Papalotla	_____ 37

Figura 3-18. Cuenca Río Coaxcoaco _____	38
Figura 3-19. Comportamiento en el tiempo de las estaciones 15083,1 5101,15125 y 15210 _____	39
Figura 3-20. Anomalías mensuales de las estaciones climatológicas de la cuenca del río Coaxcoaco _____	40
Figura 3-21. Cuenca Río Chapingo _____	41
Figura 3-22. Comportamiento en el tiempo de las estaciones 15017, 15021, 15083, 15101, 15125, 15145, 15150 y 15170 _____	43
Figura 3-23. Anomalías mensuales de las estaciones climatológicas ubicadas en la cuenca del río Chapingo _____	45
Figura 3-24. Volumen de escurrimiento medio anual registrado en las estaciones hidrométricas convencionales _____	48
Figura 3-25. Ubicación de estaciones hidrométricas _____	50
Figura 3-26. Hidrogramas unitarios adimensionales para cada estación hidrométrica _____	55
Figura 3-27. Hidrogramas estación hidrométrica, 26194. _____	56
Figura 3-28. Hidrogramas estación hidrométrica, 26193. _____	57
Figura 3-29. Hidrogramas estación hidrométrica, 26178. _____	58
Figura 3-30. Hidrogramas estación hidrométrica, 26184. _____	59
Figura 3-31. Hidrogramas estación hidrométrica, 26071. _____	60
Figura 3-32. Hidrogramas estación hidrométrica, 26183. _____	61
Figura 3-33. Hidrogramas estación hidrométrica, 26274. _____	62
Figura 3-34. Hidrogramas estación hidrométrica, 26195. _____	63
Figura 3-35. Hidrogramas estación hidrométrica, 26445. _____	64
Figura 3-36. Ubicación de sitios de aforo. _____	65
Figura 3-37. Equipo RiverSurveyor. _____	66
Figura 3-38. Medidor de flujo Hach FH950. _____	66
Figura 3-39. Sitio Dren Chimalhuacán 1b. _____	67

Figura 3-40. Aforos con perfilador en dren Chimalhuacán 1b _____	68
Figura 3-41. Sitio Dren general del Valle 2. _____	68
Figura 3-42. Aforo con perfilador en dren general del Valle 2. _____	69
Figura 3-43. Sitio Dren general del Valle 1. _____	70
Figura 3-44. Aforos con perfilador en dren general del Valle 1. _____	70
Figura 3-45. Sitio Dren Chimalhuacán 2b. _____	71
Figura 3-46. Aforos con perfilador en dren Chimalhuacán 2b. _____	72
Figura 3-47. Sitio río Coatepec. _____	73
Figura 3-48. Aforos con perfilador en río Coatepec. _____	73
Figura 3-49. Sitio río Chapingo. _____	74
Figura 3-50. Aforos con perfilador en río Chapingo. _____	75
Figura 3-51. Sitio río San Bernardino. _____	76
Figura 3-52. Aforos con perfilador en río San Bernardino. _____	76
Figura 3-53. Sitio río Santa Mónica. _____	77
Figura 3-54. Sección de aforo en Santa Mónica. _____	77
Figura 3-55. Dren Chimalhuacán 1a. _____	78
Figura 3-56. Aforos con perfilador en dren Chimalhuacán 1a. _____	79
Figura 3-57. Cuenca de México y planicie lacustre del Ex-Lago de Texcoco (Edmunds, et.al., 2002) _____	82
Figura 3-58. Sistema hidrológico del Lago de Texcoco (CONANP, 2021) _____	83
Figura 3-59. Clasificación del suelo de acuerdo con su edafología (Tarín, 1986) _	84
Figura 3-60. Clasificación del suelo de acuerdo con su sodicidad (Tarín, 1986) __	85
Figura 3-61. Clasificación del suelo de acuerdo con su salinidad (Tarín, 1986) ___	86
Figura 3-62. Isobatas de septiembre de 1983 (Tarín, 1986) _____	87
Figura 3-63. Clasificación del suelo de acuerdo con su conductividad (Tarín, 1986) _____	88

Figura 3-64. Antiguos lagos de la cuenca del Valle de México (Carranza-Edwards, 2018)	89
Figura 3-65. Cloruro versus Sodio del acuitardo Texcoco y Chalco (Ortega-Guerrero, 1997)	90
Figura 3-66. Estratigrafía del Ex-Lago de Texcoco (Juárez Velásquez, 2018)	91
Figura 3-67. Localización de la estación Piezométrica P-536-18	93
Figura 3-68. Río de la Compañía	95
Figura 3-69. Localización de los sitios de muestreo del agua superficial y subterránea.	96
Figura 3-70. Toma de muestras en el piezómetro 103	98
Figura 3-71. Toma de muestras en el piezómetro 33	99
Figura 3-72. Muestras del piezómetro 33	99
Figura 3-73. Equipo utilizado para medir parámetros en campo	100
Figura 3-74. Parámetros del piezómetro 103	101
Figura 3-75. Medición del nivel estático en el piezómetro 29	101
Figura 3-76. Analizador de isótopos de agua Picarro L2110-i	102
Figura 3-77. Equipo para nivelación de brocales	103
Figura 3-78. Nivelación del piezómetro 29	104
Figura 3-79. Nivelación del piezómetro 17	104
Figura 3-80. Valores de pH del agua de los aprovechamientos	105
Figura 3-81. Valores de conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) del agua de los aprovechamientos	106
Figura 3-82. Dirección del flujo subterráneo	107
Figura 3-83. Diagrama de Schoeller	108
Figura 3-84. Diagramas de Stiff	109
Figura 3-85. Diagrama de Gibbs	110
Figura 3-86. Cloruro versus Sodio de las muestras de agua	110

Figura 3-87. Interacción entre el agua del Río de la Compañía y el agua salina del acuitardo del Ex-Lago de Texcoco _____	111
Figura 3-88. Composición isotópica del agua superficial, del agua del acuitardo y del agua subterránea profunda. _____	112
Figura 3-89. Lente de agua dulce producida por la infiltración del humedal anualmente. _____	114
Figura 3-90. Distribución espacial del nivel de agua freática del acuitardo (IIUNAM, 2014) _____	114
Figura 3-91. Ubicación de la sección AA' sobre la que se diseñará el modelo de perfil _____	115
Figura 3-92. Malla del modelo y condiciones de frontera de carga constante asignados al modelo de perfil de la sección A-A' _____	116
Figura 3-93. Condición inicial asignada al modelo correspondiente al año 2023.	116
Figura 3-94. Lámina de recarga vertical diaria asignada al modelo de perfil ____	117
Figura 3-95. Lámina de evapotranspiración diaria asignada al modelo de perfil	117
Figura 3-96. Ubicación del humedal dentro del modelo de perfil. _____	118
Figura 3-97. Cargas piezométricas simuladas para los a) 10 años, b) 20 años, c) 30 años, d) 40 años y e) 50 años. _____	119
Figura 3-98. Imagen del Lago Nabor Carrillo _____	120
Figura 3-99. Localización del lago Nabor Carrillo (Cruz Vivar, 2023) _____	121
Figura 3-100. Estación e bombeo a la salida del tratamiento secundario PTAR II. _____	123
Figura 3-101. Comparación de valores medios de calidad del agua en el lago Nabor Carrillo con respecto a los límites máximos permisibles (Cruz Vivar, 2023) ____	124
Figura 3-102. Apariencia del agua en el Lago Nabor Carrillo. _____	125
Figura 3-103 Puntos de muestreo en lago Nabor Carrillo y en descargas de PTAR _____	126
Figura 3-104 Comparación de la calidad de la muestra combinada de agua del lago Nabor Carrillo con respecto a límites máximos permisibles _____	129
Figura 3-105 Comparación de las muestras de PTAR I y II con respecto a límites máximos permisibles _____	130

Figura 3-106 Velocidad de mineralización en reactores con agua y agua+sedimento (Cruz Vivar, 2023)	132
Figura 3-107 Variación de pH en los reactores experimentales con agua y agua+sedimento (Cruz Vivar, 2023)	132
Figura 3-108 Variación de Eh en sistemas experimentales de agua y agua-sedimento (Cruz Vivar, 2023)	133
Figura 3-109. Aspecto general del terreno asignado para la instalación del humedal de tratamiento.	135
Figura 3-110. Dren Chimalhuacán. Aspecto al momento de la vista.	135
Figura 3-111. Nueva visita al sitio.	136
Figura 3-112. Esquema general, planta y perfil, del sistema de tratamiento de aguas residuales.	143
Figura 3-113. Visita al área seleccionada para la implementación del humedal.	146
Figura 3-114. Ubicación del pozo de agua residual y del terreno para la instalación del sistema de humedales.	146
Figura 3-115. Toma de muestras en el pozo de agua residual.	147
Figura 3-116. Esquema general, planta y perfil, del sistema de tratamiento de aguas residuales.	153
Figura 3-117. Ubicación del sitio de muestreo.	154
Figura 3-118. Aspecto general del sitio de muestreo.	154
Figura 3-119. Delimitación de cuencas que drenan a la Ciénega de San Juan Teotihuacán	158
Figura 3-120. Superficies urbanas e impermeables de las cuencas de estudio	159
Figura 3-121. Isoyetas de precipitación para Tr de 10 y 100 años	161
Figura 3-122. Hietograma de diseño de la cuenca de la Termoeléctrica	163
Figura 3-123. Hietograma de diseño de la cuenca del río San Juan Teotihuacán	164
Figura 3-124. Hidrograma de diseño de la cuenca de la Termoeléctrica	165
Figura 3-125. Hidrograma de diseño de la cuenca del río San Juan Teotihuacán	165
Figura 3-126. Información Lidar y trazo de infraestructura existente	166

Figura 3-127. Información Lidar y trazo de infraestructura existente _____	167
Figura 3-128. Escenarios de bordos a modelar en Iber _____	168
Figura 3-129. Áreas de anegación en la Ciénega de San Juan Teotihuacán ____	169
Figura 3-130. Áreas de anegación en la Ciénega de San Juan Teotihuacán ____	170
Figura 3-131. Ubicación de la zona de estudio. _____	173
Figura 3-132. Modelo Digital del Terreno de la zona de estudio _____	174
Figura 3-133 Geometría para el análisis hidrodinámico _____	175
Figura 3-134 Tamaño de mallado para el análisis hidrodinámico _____	176
Figura 3-135 Malla discretizada para el análisis hidrodinámico _____	177
Figura 3-136 Superficie de modelación para el análisis hidrodinámico _____	178
Figura 3-137. Hidrogramas Río Papalotla E.H. 26193 _____	179
Figura 3-138. Hidrogramas Río Xalapango E.H. 26178 _____	179
Figura 3-139. Hidrogramas Río Coxcacacoaco E.H. 26184 _____	180
Figura 3-140 Asignación de las condiciones de frontera _____	181
Figura 3-141. Asignación de la rugosidad. _____	182
Figura 3-142. Tirantes para Tr 10 años _____	183
Figura 3-143. Tirantes para Tr 20 años. _____	184
Figura 3-144. Tirantes para Tr 100 años. _____	185
Figura 3-145. Superficie libre del agua para Tr 10 años. _____	186
Figura 3-146. Superficie libre del agua para Tr 20 años. _____	187
Figura 3-147. Superficie libre del agua para Tr 100 años. _____	188
Figura 3-148. Bienvenida a la delegación del Frente de los Pueblos en Defensa de la Tierra. _____	191
Figura 3-149. Vista aérea del sistema de tratamiento de la Exhacienda Panoaya. _____	192
Figura 3-150. Laguna de sedimentación y humedal de flujo subsuperficial. ____	193

Figura 3-151. Vista del humedal subsuperficial y la laguna y laguna para el control de microorganismos. _____ 194

Figura 3-152. Mesa de trabajo en el IMTA. _____ 195

Figura 3-153. Trabajos con vegetación endémica del Lago de Texcoco en el IMTA. _____ 196

Índice de tablas

Tabla 1-1 Cuadro resumen de valores de los términos que intervienen en el cálculo de la disponibilidad superficial en la cuenca de Texcoco. _____	3
Tabla 1-2. Cuadro resumen de valores de los términos que intervienen en el cálculo de la disponibilidad de agua subterránea en los acuíferos de la región. _____	4
Tabla 3-1. Caracterización de las nueve subcuencas que forman parte del área de estudio _____	10
Tabla 3-2. Estaciones hidrométricas que aforan las nueve subcuencas que forman parte del área de estudio _____	13
Tabla 3-3. Uso de suelo (Serie VI) del área de estudio _____	18
Tabla 3-4. Tipo de Suelo en el área de estudio _____	22
Tabla 3-5. Escala del índice estandarizado de sequía (SI) _____	32
Tabla 3-6. Anomalías mensuales de la precipitación. Climatológicas cuenca Río Papalotla _____	35
Tabla 3-7. Anomalías mensuales de la precipitación. Climatológicas cuenca Río Coaxcoaco _____	39
Tabla 3-8. Anomalías mensuales de la precipitación. Climatológicas cuenca Río Chapingo _____	43
Tabla 3-9. Estaciones hidrométricas convencionales que confluyen al lago de Texcoco _____	46
Tabla 3-10. Registro de escurrimiento anual de la estación hidrométrica 26274_ _____	47
Tabla 3-11. Periodos temporales húmedo, promedio y seco _____	49
Tabla 3-12. Estaciones hidrométricas de los nueve ríos. _____	50
Tabla 3-13. Gastos máximos anuales de las estaciones hidrométricas. _____	50
Tabla 3-14. Número de años usados para el análisis de frecuencia. _____	52
Tabla 3-15. Error estándar de ajuste para cada FDP y estación. _____	53
Tabla 3-16. Parámetros de FDP Gumbel Doble para las estaciones ajustadas. _____	53
Tabla 3-17. Parámetros de FDP Gumbel para la estación ajustada. _____	53

Tabla 3-18. Parámetros de FDP Gamma (2 Parámetros) para la estación ajustada.	54
Tabla 3-19. Parámetros de FDP Normal para la estación ajustada.	54
Tabla 3-20. Valores de gastos máximos obtenidos para los diferentes periodos de retorno para cada estación hidrométrica analizada	54
Tabla 3-21. Hidrogramas unitarios adimensionales, de cada estación hidrométrica.	55
Tabla 3-22. Hidrogramas estación hidrométrica, 26194.	56
Tabla 3-23. Hidrogramas estación hidrométrica, 26193.	56
Tabla 3-24. Hidrogramas estación hidrométrica, 26178.	57
Tabla 3-25. Hidrogramas estación hidrométrica, 26184.	58
Tabla 3-26. Hidrogramas estación hidrométrica, 26071.	59
Tabla 3-27. Hidrogramas estación hidrométrica, 26183.	60
Tabla 3-28. Hidrogramas estación hidrométrica, 26274.	61
Tabla 3-29. Hidrogramas estación hidrométrica, 26195.	62
Tabla 3-30. Hidrogramas estación hidrométrica, 26445.	63
Tabla 3-31. Sitios de aforo.	64
Tabla 3-32. Datos de aforos dren Chimalhuacán 1b.	67
Tabla 3-33. Datos de aforos dren general del Valle 2.	69
Tabla 3-34. Datos de aforos dren general del Valle 1.	70
Tabla 3-35. Datos de aforos dren Chimalhuacán 2b.	71
Tabla 3-36. Datos de aforos río Coatepec	73
Tabla 3-37. Datos de aforos río Chapingo.	74
Tabla 3-38. Datos de aforos río San Bernardino.	76
Tabla 3-39. Cálculo de caudal en sección Santa Mónica.	78
Tabla 3-40. Datos de aforos dren Chimalhuacán 1a.	79
Tabla 3-41. Resumen de caudales.	79

Tabla 3-42. Permeabilidades determinadas por Herrera et al. (1974)	91
Tabla 3-43. Permeabilidades medias determinadas por Rudolph et al. (1989)	92
Tabla 3-44. Permeabilidades determinadas por López Acosta et al (2016)	92
Tabla 3-45. Profundidad promedio del nivel estático en la estación P-536-18	93
Tabla 3-46. Parámetros medidos en campo	105
Tabla 3-47. Parámetros medidos en laboratorio	108
Tabla 3-48. Isótopos estables de las muestras de agua.	112
Tabla 3-49. Caudales de entrada y salida de agua del lago Nabor Carrillo (Cruz Vivar, 2023)	122
Tabla 3-50. Promedios y desviación estándar de parámetros de calidad del LNC (Cruz Vivar, 2023)	123
Tabla 3-51 Puntos de muestreo en lago Nabor Carrillo y en descargas de las PTAR (Cruz Vivar, 2023)	126
Tabla 3-52 Métodos de análisis para muestras de agua y sedimento (Cruz Vivar, 2023)	127
Tabla 3-53 Caracterización de muestras de agua del lago Nabor Carrillo (Cruz Vivar 2023)	128
Tabla 3-54 Caracterización de agua de la descarga PTAR I (lodos activados) que aporta al lago Nabor Carrillo (Cruz Vivar 2023)	129
Tabla 3-55 Caracterización de agua de la descarga PTAR II (lagunas facultativas) que aporta al lago Nabor Carrillo (Cruz Vivar 2023)	130
Tabla 3-56 Caracterización de muestras de sedimento del lago Nabor Carrillo	130
Tabla 3-57. Resultados de laboratorio.	136
Tabla 3-58. Parámetros de diseño del sistema de tratamiento.	138
Tabla 3-59. Parámetros de diseño (influyente) y calidad del agua esperada (efluente) del humedal de flujo vertical.	139
Tabla 3-60. Parámetros de diseño del humedal de flujo subsuperficial.	141
Tabla 3-61. Áreas por unidad de tratamiento y total del sistema de tratamiento.	142
Tabla 3-62. Parámetros de diseño del sistema de tratamiento.	147

Tabla 3-63. Parámetros de diseño del humedal de flujo subsuperficial 1. _____	149
Tabla 3-64. Parámetros de diseño del humedal de flujo subsuperficial 1. _____	151
Tabla 3-65. Áreas por unidad de tratamiento y total del sistema de tratamiento. _____	152
Tabla 3-66. Resultados de laboratorio de la muestra de aguas residuales del canal. _____	155
Tabla 3-67. Área, longitud y pendiente del cauce principal _____	158
Tabla 3-68. Tiempo de concentración de cada cuenca _____	159
Tabla 3-69. Áreas urbanas, no urbanas e impermeables de las cuencas _____	160
Tabla 3-70. Áreas totales, urbanas, no urbanas, Índice de urbanización y coeficientes de escurrimiento urbano, no urbano y ponderado _____	160
Tabla 3-71. Ecuación del Factor de Reducción por Área _____	161
Tabla 3-72. Ecuación del Factor de Reducción por Área _____	161
Tabla 3-73. Intensidades para diferentes tiempos de duración de lluvias _____	162
Tabla 3-74. Intensidades para diferentes tiempos de duración de lluvias _____	163

1 Introducción

El Lago de Texcoco históricamente ha sido siempre el cuerpo de agua más importante de la Cuenca de México. Además, de ser el único vaso regulador hídrico y climático que existe al Oriente del Estado de México, es parte de la identidad y la historia del país. En los últimos 100 años este humedal ha sufrido las más fuertes transformaciones por la intervención humana que han terminado desecándolo, principalmente en los últimos años por las obras alcanzadas a realizar en el proyecto retirado del Aeropuerto NAICM (Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México). Por su importancia, la recuperación del sistema Lago de Texcoco es prioridad para el gobierno federal como el local, esto implica un rescate ecológico que mejore la calidad del mismo y en general mejoren y preserven sus condiciones ambientales.

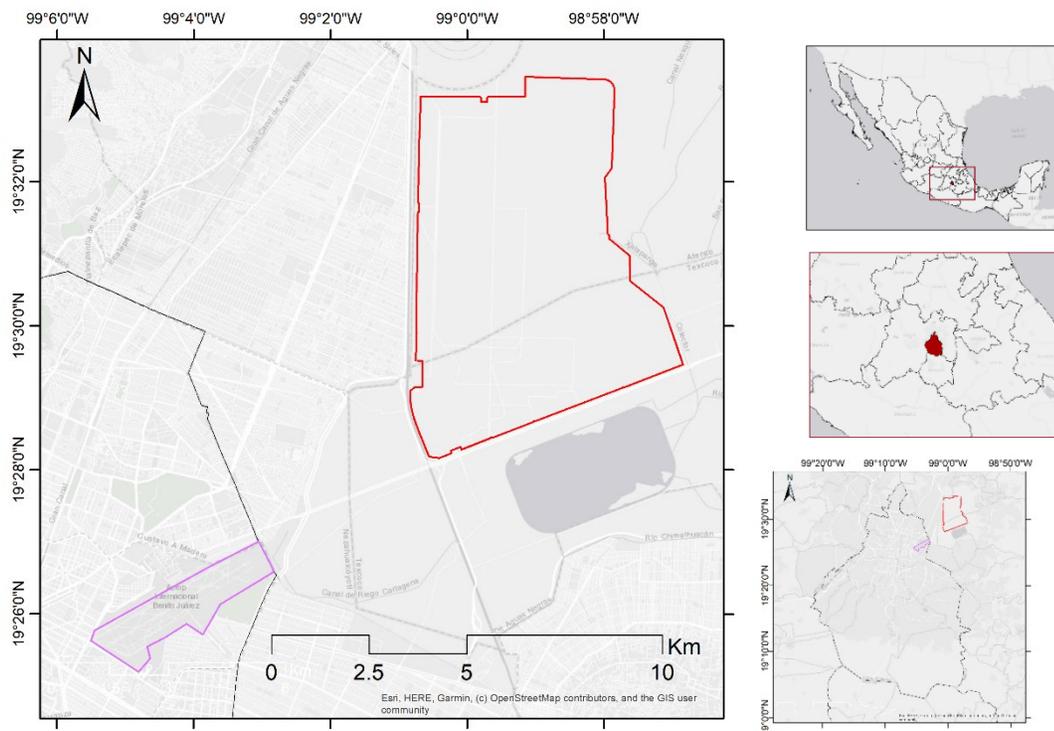


Figura 1-1. Zona de estudio. Ubicación del Parque Ecológico Lago de Texcoco (rojo) y el actual Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM, en rosa).

La preservación y recuperación del lago depende principalmente de la entrada de escorrentía de los Ríos del Oriente y su interacción con los diferentes cuerpos de agua y obras existentes. Por este motivo se requiere un diagnóstico hidrológico e hidráulico que determine su situación actual y a partir de esta información poder formular medidas para su mejoramiento. Este es el punto de partida para definir obras de ingeniería, servicios de mantenimiento y recuperación ambiental; que se encuentren a la par con las nuevas disposiciones y actividades entorno a él. Precisamente esta

zona requiere una recuperación como nueva Área Nacional Protegida, que esté en armonía con el Parque Ecológico del Lago de Texcoco que se construye en su interior.

Este estudio plantea continuar con el diagnóstico y formular medidas de infraestructura para cumplir con estos objetivos. Las obras planteadas resultado de este estudio responderán al interés del gobierno que busca recuperar y convertir nuevamente el lago de Texcoco en un importante cuerpo de agua en el valle de México, principalmente en dos vías:

- Ambiental: restaurar y proteger las porciones del Lago de Texcoco, que están altamente degradadas y contaminadas. Esto incluye agua tratamiento, restauración del hábitat y medidas de control de la contaminación.
- Preservación cultural: El Lago de Texcoco constituye una característica central de los antepasados precolombinos, y es considerado culturalmente sitio significativo para muchos mexicanos. Preservar el patrimonio cultural del lago y su circundante región, que incluye prácticas culturales tradicionales.

Descripción de la zona:

El lago de Texcoco se ubica en la Región Hidrológica denominada “Lago de Texcoco y Zumpango” RH26Dp, esto de acuerdo con la información digital disponible, correspondiente a la Red Hidrográfica INEGI (1:50,000) que se encuentra en el SIATL “Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas”. La subcuenca hidrológica Lago de Texcoco comprende nueve ríos vertientes del oriente del valle de México, a saber: San Juan Teotihuacán, Papalotla, Xalapango, Coxacoaco, Texcoco, Chapingo, San Bernardino, Santa Mónica y Coatepec, cuyas cuencas de aportación tienen en conjunto una extensión de 1250.94 km² (Figura 1-2).



Figura 1-2. Red hidrográfica en la subcuenca hidrológica Lago de Texcoco.

En correspondencia con las 757 cuencas en que se encuentra dividido el territorio nacional, la zona de estudio se encuentra comprendida dentro de la cuenca de Texcoco (2669), la cual tiene disponibilidad y veda vigente. Para el año 2020, la Conagua (DOF, 2020a) reporta los siguientes datos de la disponibilidad.

Tabla 1-1 Cuadro resumen de valores de los términos que intervienen en el cálculo de la disponibilidad superficial en la cuenca de Texcoco.

Nombre de la cuenca	Cp	Ar	Uc (a)	Uc (b)	R	Ev	Ab	Rxy	Ab - Rxy	D	Clasificación
Texcoco	85.771	0.000	12.553	0.114	43.264	12.871	103.498	103.440	0.058	0.058	Disponibilidad

Cifras en $hm^3/año$. Cp.- Volumen medio anual de escurrimiento natural; Ar.- Volumen medio anual de escurrimiento desde la cuenca aguas arriba; Uc(a).- Volumen anual de extracción de agua superficial mediante títulos inscritos/asignados actualmente en el REPD; Uc(b).- Volumen anual de extracción de agua superficial de títulos en proceso de inscripción en el REPD; Uc(c).- Volumen anual correspondiente a las reservas y las zonas reglamentadas; R.- Volumen anual de retornos; Im.- Volumen anual de importaciones; Ex.- Volumen anual de exportaciones; Ev.- Volumen medio anual de evaporación en embalses; Av.- Volumen medio anual de variación de almacenamiento en embalses; Ab.- Volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca hacia aguas abajo; Rxy.- Volumen anual actual comprometido aguas abajo, los volúmenes correspondientes a reservas, uso ambiental, reglamentos y programación hídrica.

Respecto de las aguas subterráneas, la zona correspondiente a las cuencas hidrográficas de los nueve ríos del oriente del valle de México se encuentra ubicada casi en su totalidad en el acuífero Texcoco (1507), y una pequeña parte en los acuíferos de la Zona Metropolitana de la Cd de México (0901) y Cuautitlán-Pachuca (1508), (Figura 2), los cuales no cuentan con disponibilidad y se encuentran en una condición de sobreexplotación. Para el año 2020, la Conagua (DOF, 2020b) reporta los siguientes datos de la disponibilidad.

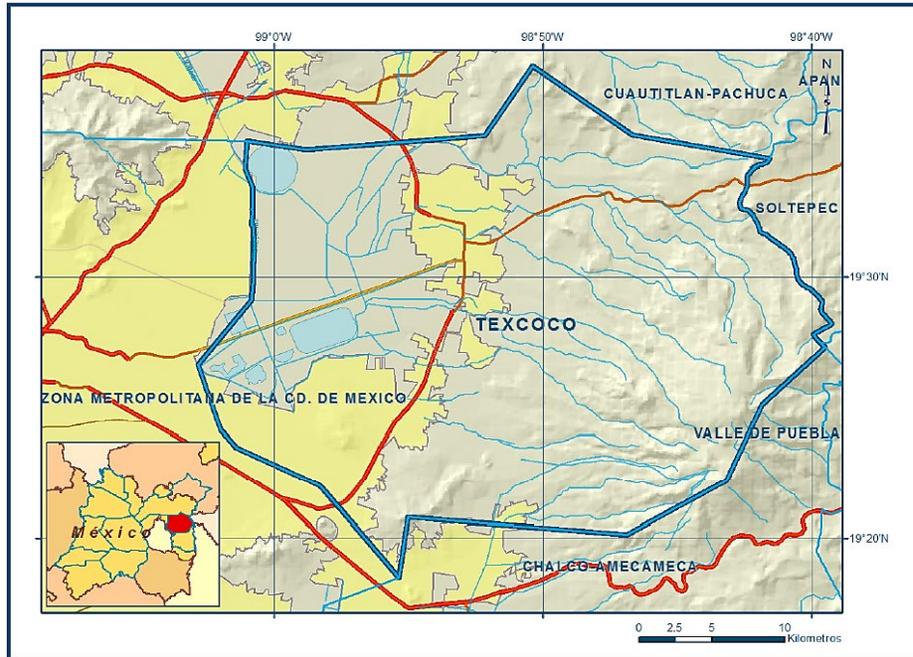


Figura 1-3. Ubicación del acuífero de Texcoco.

Tabla 1-2. Cuadro resumen de valores de los términos que intervienen en el cálculo de la disponibilidad de agua subterránea en los acuíferos de la región.

Clave	Acuífero	R	DNC	VCAS	VEALA	VAPTYR	VAPRH	DMA (-)
0901	ZONA METROPOLITANA DE LA CD. DE MÉXICO	512.8	0.0	979.762196	0.000000	1.709800	11.757919	-480.429914
1507	TEXCOCO	145.1	10.4	273.404707	0.000000	0.000000	11.100417	-149.805124
1508	CUAUTITLÁN-PACHUCA	356.7	0.0	551.075936	0.000000	9.163608	26.403093	-229.942637

Cifras en $\text{hm}^3/\text{año}$. R: recarga total media anual; DNC: descarga natural comprometida;; VCAS: volumen concesionado/asignado de aguas subterráneas; VEALA: volumen de extracción de agua en las zonas de suspensión provisional de libre alumbramiento y los inscritos en el Registro Nacional Permanente; VAPTYR: volumen de extracción de agua pendiente de titulación y/o registro en el REPDA; VAPRH: volumen de agua correspondiente a reservas, reglamentos y programación hídrica; DMA: disponibilidad media anual de agua del subsuelo.

La zona de estudio es referente mundial por su gran densidad demográfica, concentrar gran cantidad de servicios y ser centro del poder político y económico del país. Los problemas que han derivado de este crecimiento involucran los ecológicos, de abastecimiento y saneamiento, desecación de cuerpos de agua, lo que es exacerbado por el cambio climático.

La histórica gestión deficiente de los recursos hídricos en la zona, se han presentado diversos impactos en el ciclo del agua. Actualmente, los acuíferos del oriente del Valle de México son de los más sobreexplotados del país, asimismo para efectos prácticos no se cuenta con disponibilidad de aguas superficiales (CONAGUA, 2020a, 2020b). En esta zona, la capacidad de recarga del manto freático ha sido rebasada debido a la demanda de la gran cantidad de servicios para la subsistencia de la población y de las actividades económicas que se desarrollan; se tiene la contaminación de los cuerpos de agua superficiales ocasionada por la descarga de aguas residuales e industriales que son vertidas directamente a los ríos aportadores al lago de Texcoco. Además, la falta de integración social de las comunidades originarias en la toma de decisiones ambientales y el desconocimiento de la memoria histórica referente al manejo del agua. Las problemáticas antes mencionadas han mantenido un alto estrés hídrico en la región, derivadas de la imposición de políticas públicas basadas en el impulso del desarrollo poblacional y económico de la capital del país, que en conjunto han repercutido negativamente en la cantidad y calidad de los recursos hídricos, las actividades productivas de la zona, la economía local y la salud de la población.

Entre los antecedentes históricos que han ocurrido en la zona de estudio en los últimos años se pueden mencionar los siguientes:

- En 2014 inició la construcción del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM), en la parte conocida como la zona federal del Lago de Texcoco; se inició con el desarrollo del proyecto hidráulico zona oriente Valle de México que incluía una serie de colectores marginales para separar el agua residual y de los escurrimientos pluviales de los nueve ríos antes mencionados, además de la canalización de éstos con la remoción de vegetación riparia. Los impactos de la construcción del NAICM en la región se evidencian en la actual alteración del sistema hidrológico por la existencia de proyectos de infraestructura pendientes de resolver; la apertura y explotación de más de 200 bancos de materiales que modificaron la topografía regional; la expansión inmobiliaria e industrial y el correspondiente aumento en la presión sobre los recursos hídricos, así como la disminución en términos de su cantidad y calidad.
- En enero del 2019, se anunció la cancelación del NAICM por parte del Gobierno Federal tras una encuesta nacional y una decisión histórica para evitar un daño ambiental, social y económico mayor, irreversible y sin precedentes para México. Sin embargo, el desarrollo de las obras hasta ese momento y su abandono tras la cancelación del proyecto, implicaron un cambio en la

dinámica hídrica regional, ya que se afectaron el territorio, la calidad de vida y la seguridad alimentaria e hídrica de las comunidades. Fue así como comienza el desarrollo de las actividades para el establecimiento del Parque Ecológico Lago de Texcoco (PELT) a cargo de la CONAGUA, con el cual se busca crear un espacio para la restauración ambiental de la región convirtiendo a la zona en uno de los parques urbanos más grandes del mundo.

- En diciembre de 2021 las diversas instituciones del sector ambiental y con una gran participación del Frente de Pueblos en Defensa de la Tierra (FPDT) se sumaron esfuerzos para el establecimiento del Área Natural Protegida “Lago de Texcoco”, a través de la publicación del Estudio Previo Justificativo para el establecimiento del ANP, el cual representó un acto de justicia social y ambiental histórico con el que se busca preservar los ecosistemas que se habían adaptado a la zona lacustre.
- Durante el 2022, en el marco de los puntos antes mencionados, el IMTA se sumó a este importante proyecto mediante la conceptualización del Programa Hídrico del Lago de Texcoco (PHLT), que comprende el desarrollo de diversas obras hidráulicas y sanitarias distribuidas en cinco fases, las cuales tienen como objetivo lograr la reconexión hidrológica - hidráulica de los recursos hídricos, a efecto de alcanzar la restauración ecológica de la región.

2 Objetivos

- Desarrollar el diagnóstico teórico de las obras hidráulicas adicionales al Programa Hídrico del Lago de Texcoco (PHLT) las cuales consisten en 1) Bordos en Ciénega de San Juan para conducción de los escurrimientos del río San Juan Teotihuacan; y 2) Proyecto ejecutivo y asistencia técnica a CONANP para la instalación de un sistema de humedal de tratamiento prototipo que depure el agua del Dren Chimalhuacán I para el riego de cultivos de nopales y el diseño conceptual de los sistemas de humedales artificiales en el Parque Los Ahuehuetes y en el ejido Tocuila, con el fin contribuir en el desarrollo de las actividades de recuperación de los recursos hídricos en la región.
- Desarrollar el diagnóstico de las condiciones del agua subterránea en la zona identificada para el desarrollo de mega humedales, a través de la caracterización hidrogeológica, e hidrogeoquímica del acuífero, con el fin de generar un modelo de perfil que permitirá establecer escenarios que describan el funcionamiento hidrodinámico del agua subterránea.
- Realizar el análisis del proceso de tratamiento a través de sistemas naturales de humedales y asesoría técnica para la instalación de un sistema de humedal de tratamiento prototipo para la preservación de los recursos hídricos en calidad y cantidad.

3 Metodología

3.1 Recopilación de información

En este capítulo se describen las subcuencas de aportación al lago de Texcoco, la geomorfología y litológica del subsuelo, uso de suelo, tipo de suelo, relieve, clima, barrancas, lagos, cauces, escurrimientos y cuerpos de agua.

3.1.1 Subcuencas de aportación en el área de estudio

La Región Hidrológica Número 26 Pánuco tiene una superficie de 97,195.727 kilómetros cuadrados desde su nacimiento en el Valle de México hasta la desembocadura del cauce principal en el Golfo de México (DOF, 2018). La Región Hidrológica comprende principalmente parte de la Ciudad de México y los estados de Guanajuato, Hidalgo, México, Querétaro, San Luis Potosí, Tamaulipas y Veracruz, así como pequeñas porciones de los estados de Nuevo León, Puebla y Tlaxcala. Para fines de gestión del recurso hídrico superficial, la Región Hidrológica Número 26 Pánuco se ha dividido en 77 cuencas hidrológicas, cuyo escurrimiento medio anual es de 20,223.564 millones de metros cúbicos. El área de estudio se localiza en la cuenca del lago de Texcoco.

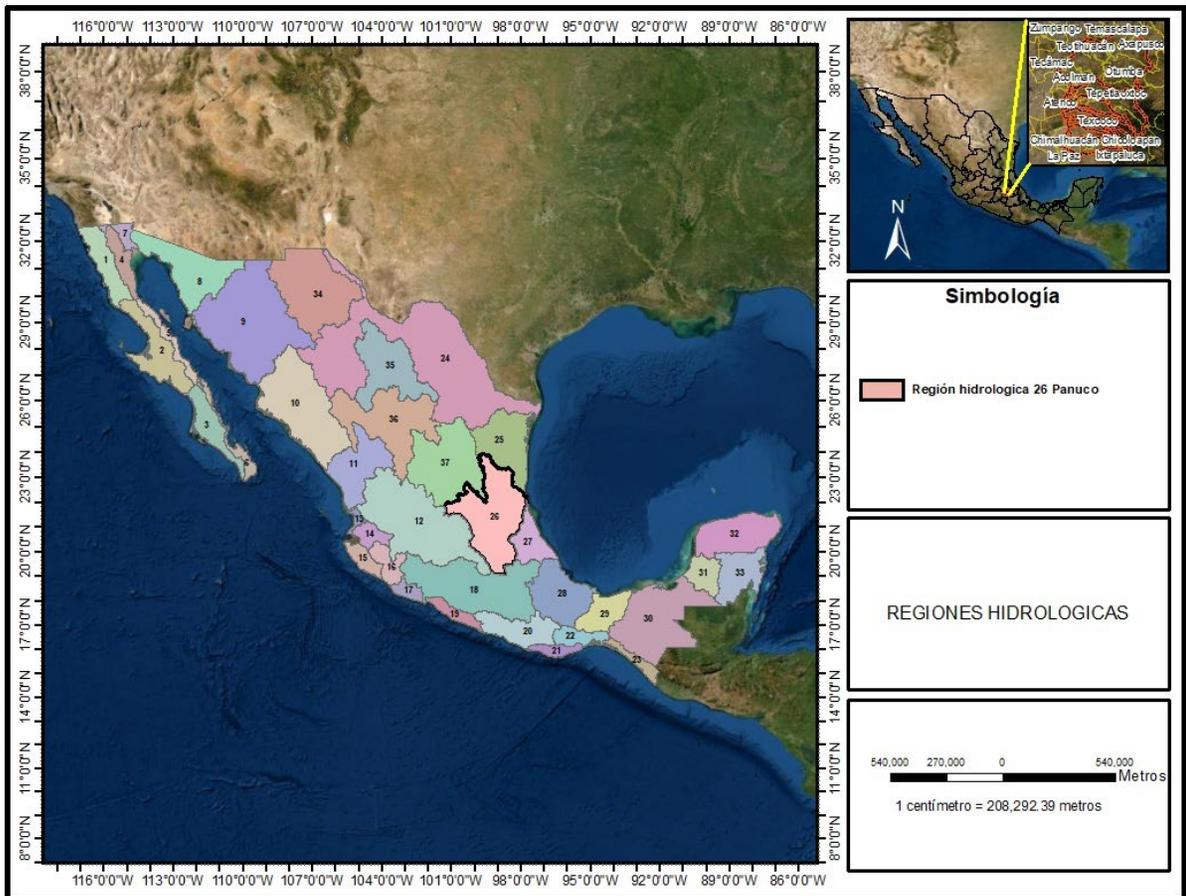


Figura 3-1. Región hidrológica 26 Pánuco

El Valle de México se localiza en una cuenca cerrada sin salidas naturales para los escurrimientos pluviales y en donde se presentan tormentas convectivas de alta intensidad y corta duración, las que provocan serios problemas para el desalojo y control de sus aguas. Aunado a esto, las áreas urbanas han crecido de forma acelerada y sin control, invadiendo laderas de cerros y antiguas zonas lacustres ahí se asienta la zona metropolitana de la ciudad de México (ZMCDMX) la cual es la más poblada del país, con más de 22 millones de personas asentadas en una superficie del orden de 7,000 kilómetros cuadrados, que incluyen a la Ciudad de México en forma total y parcialmente en los estados de México, Hidalgo, Tlaxcala y Puebla. La gran diferencia de desniveles entre lomeríos barrancas y hundimientos permite que los escurrimientos bajen de forma intempestiva acarreado basura, lodo y piedras a los sistemas de drenaje y azolvándolos. Mientras que, en las segundas, se caracterizan por hundimientos diferenciales de terreno, debido principalmente por la sobreexplotación de los mantos acuíferos. Dichos hundimientos provocan contrapendientes y dislocamientos de las redes de drenaje, ocasionando inundaciones y encharcamientos (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2021).

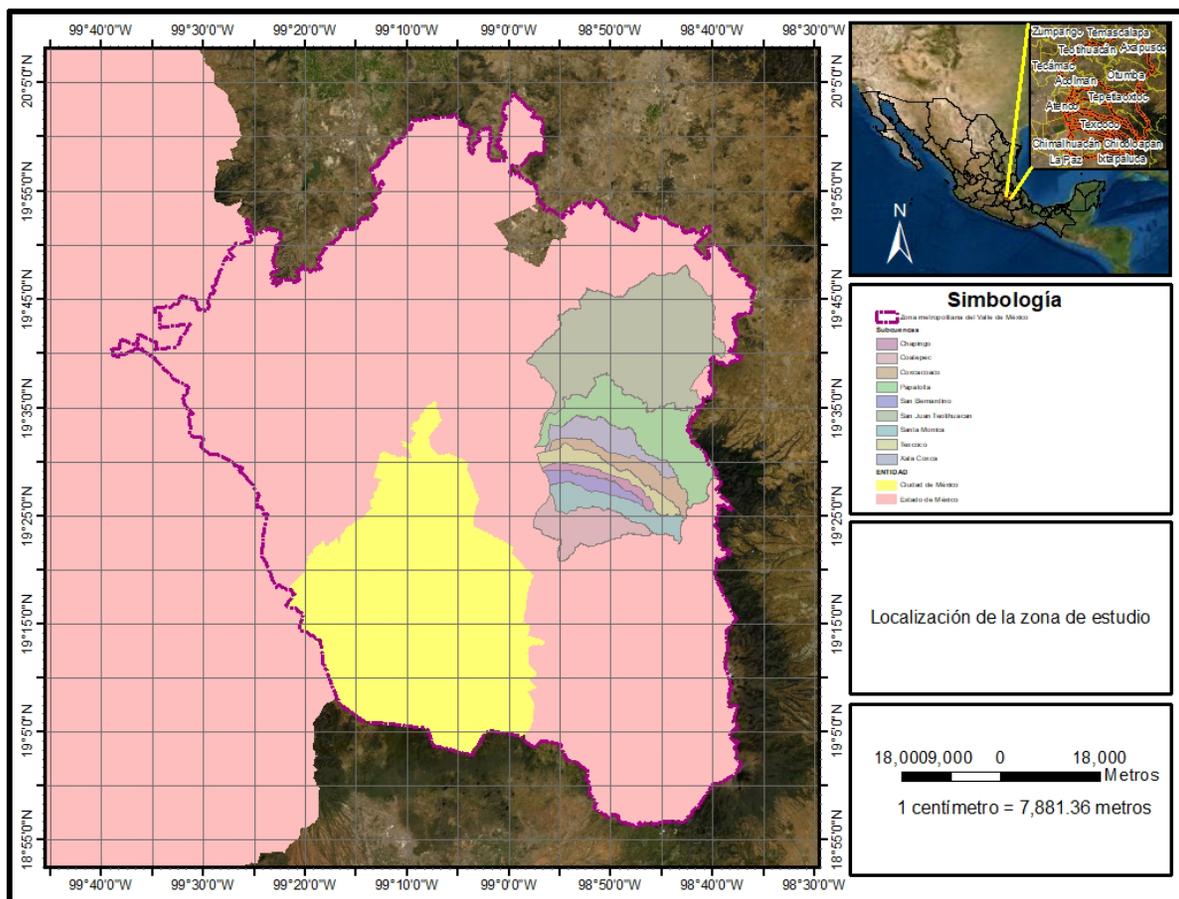


Figura 3-2. Localización de la zona de estudio y sus nueve subcuencas

Dado que la cuenca hidrológica se reconoce como una unidad estructural, funcional y de planificación en este apartado se definen pequeñas unidades de control llamadas subcuencas mediante las cuales se sintetizan e integran aquellos aspectos del medio físico, capaz de recoger los gradientes ambientales dentro del área de estudio y obtener resultados que permitan definir medidas particulares, tanto espacial como temporal, de las aguas superficiales del área de estudio y así evitar las inundaciones en la misma (Vidal Abarca, 1990).

La cuenca hidrográfica puede dividirse en espacios definidos por la relación entre el drenaje superficial y la importancia que tiene con el curso principal. El trazo de la red hídrica es fundamental para delimitar los espacios en que se puede dividir la cuenca. A un curso principal llega un afluente secundario, este comprende una subcuenca. Luego al curso principal de una subcuenca, llega un afluente terciario, este comprende una subcuenca. El manejo integral de las subcuencas, permite tener una mayor precisión sobre los aspectos hidrológicos en las mismas.

La zona de estudio forma parte de la conocida Zona Federal del Lago de Texcoco y terrenos adyacentes que se localizan al oriente del Estado de México. En ella confluyen nueve ríos en condiciones naturales; cinco en su porción norte (San Juan Teotihuacán, Papalotla, Xalapango, Coxcacoco, Texcoco) dos en la zona centro (Chapingo y San Bernardino) y dos en la porción sur (Santa Mónica y Coatepec). Además, en la zona baja, a través del Dren General del Valle confluyen las aguas provenientes de los ríos Ameca, La Compañía y San Francisco, Figura 3-4.

La subcuenca Río San Juan Teotihuacán es la de mayor área y cuenta con 578.28 km², está situada en la parte Noreste del área de estudio, la longitud del cauce es de 37.17 km, teniendo una elevación máxima de 2700 msnm siendo la menor de las nueve cuencas y una elevación mínima de 2243 msnm, siendo el desnivel entre ambos de 457 m. La elevación máxima del área de estudio se localiza en la subcuenca Río Xalapango con una elevación de 3,995 msnm. La zona con menor elevación se localiza en la subcuenca río Coatepec con una elevación de 229.9msnm y es parte del área que corresponde al Lago de Texcoco. En la Tabla 3-1. Se muestra la caracterización de siete de los ríos que descargan sus aguas pluviales a las lagunas Xalapango y Texcoco Norte para su regulación y 2 de los ríos (Santa Mónica y Coatepec) los cuales confluyen hacia los drenes Chimalhuacán I y Chimalhuacán II.

Tabla 3-1. Caracterización de las nueve subcuencas que forman parte del área de estudio

Subcuenca	Área cuenca km ²	Longitud del cauce ppal. (km)	S (pendiente del Cauce)
Río San Juan Teotihuacán	578.28	37.17	0.006
Río Papalotla	227.72	48.90	0.010
Río Xalapango	56.03	30.39	0.012
Río Coxcacoco	62.96	34.25	0.027
Río Texcoco	70.18	30.50	0.020
Río Chapingo	22.6	23.45	0.018
Río San Bernardino	44.25	21.40	0.015
Río Santa Mónica	61.03	32.25	0.027
Río Coatepec	127.89	22.30	0.015

El ex lago de Texcoco es alimentado por los ríos Churubusco, La Compañía, Los Remedios, San Juan Teotihuacán y Papalotla, y llegando a la zona federal por dos brazos, el Santa Rosa y el San Bartola, Xalapango, Coxcacoco, Texcoco (que actualmente funciona como desagüe y drenaje sanitario de la zona conurbada de Texcoco), San Bernardino, Chapingo, Coatepec y Santa Mónica.

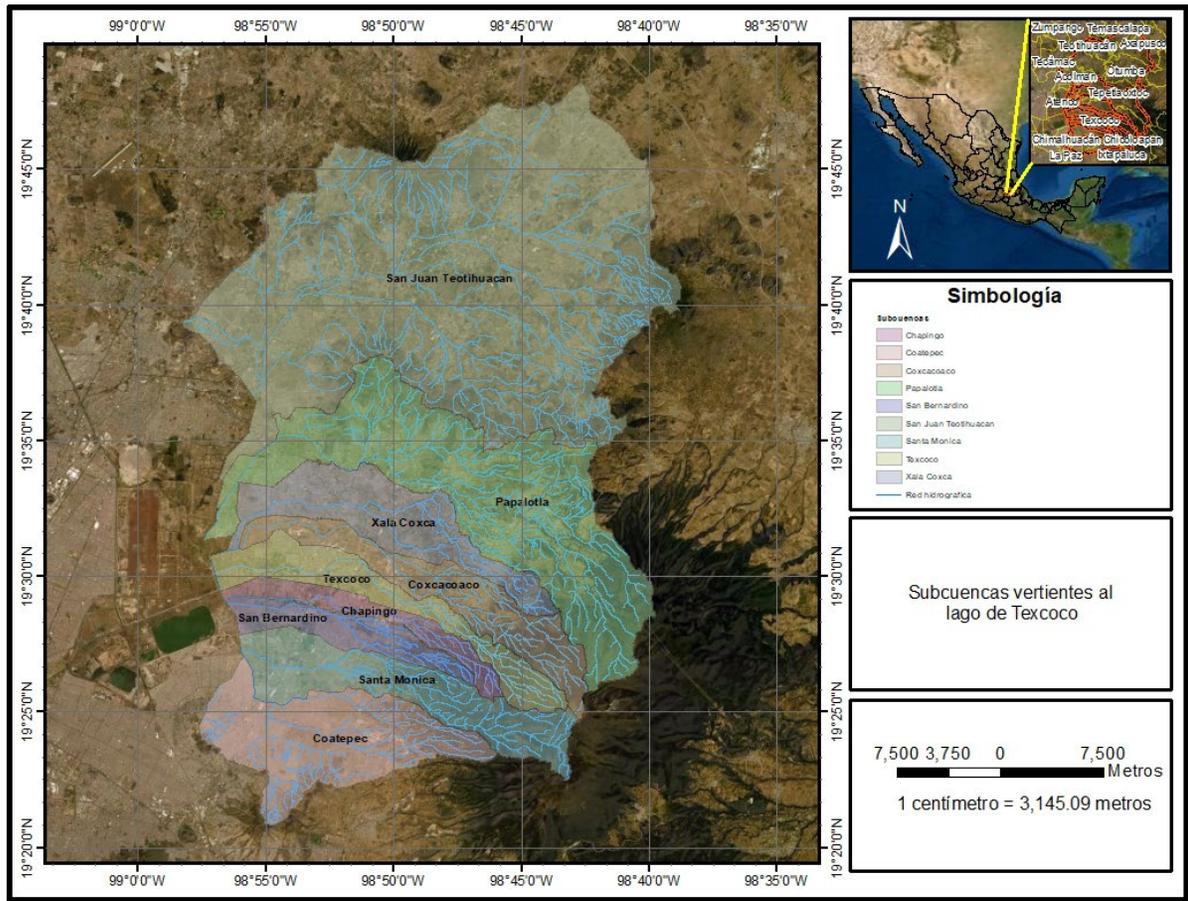


Figura 3-3. Subcuencas de aportación

Actualmente siete de las nueve corrientes que nacen al Nororiente de la cuenca del Valle de México dos de ellos llegan a la laguna de Xalapango, los otros cinco drenan a través del canal colector para después descargar en la presa Nabor Carrillo. Los ríos Santa Mónica y Coatepec drenan sus aguas hacia el Dren Chimalhuacan II, este funcionamiento hidráulico se observa en la figura siguiente:

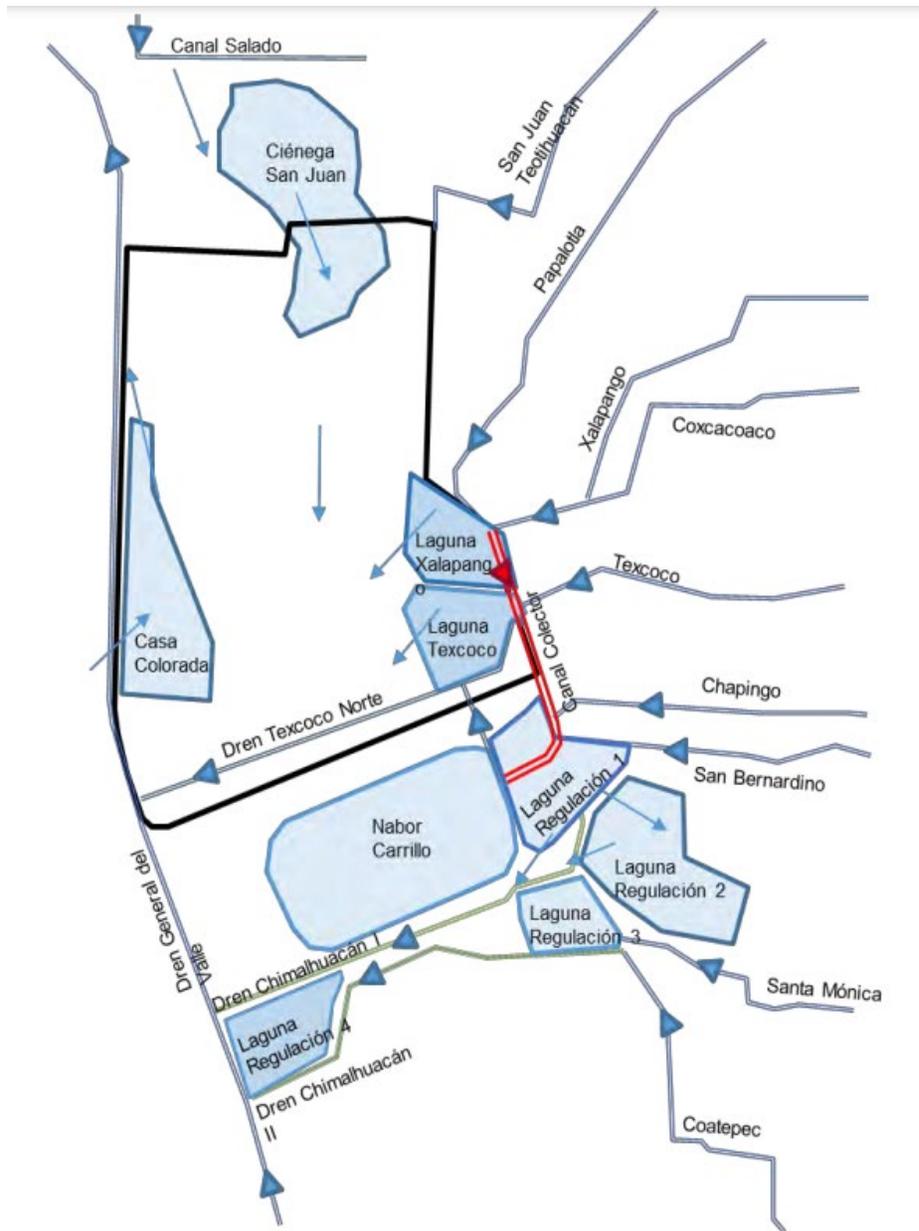


Figura 3-4. Funcionamiento hidráulico actual de los ríos que aportan a la zona de estudio (Conagua, 2018)

Para conocer los gastos que escurren por los ríos que confluyen a la zona de estudio se tienen nueve estaciones hidrométricas las cuales se listan a continuación:

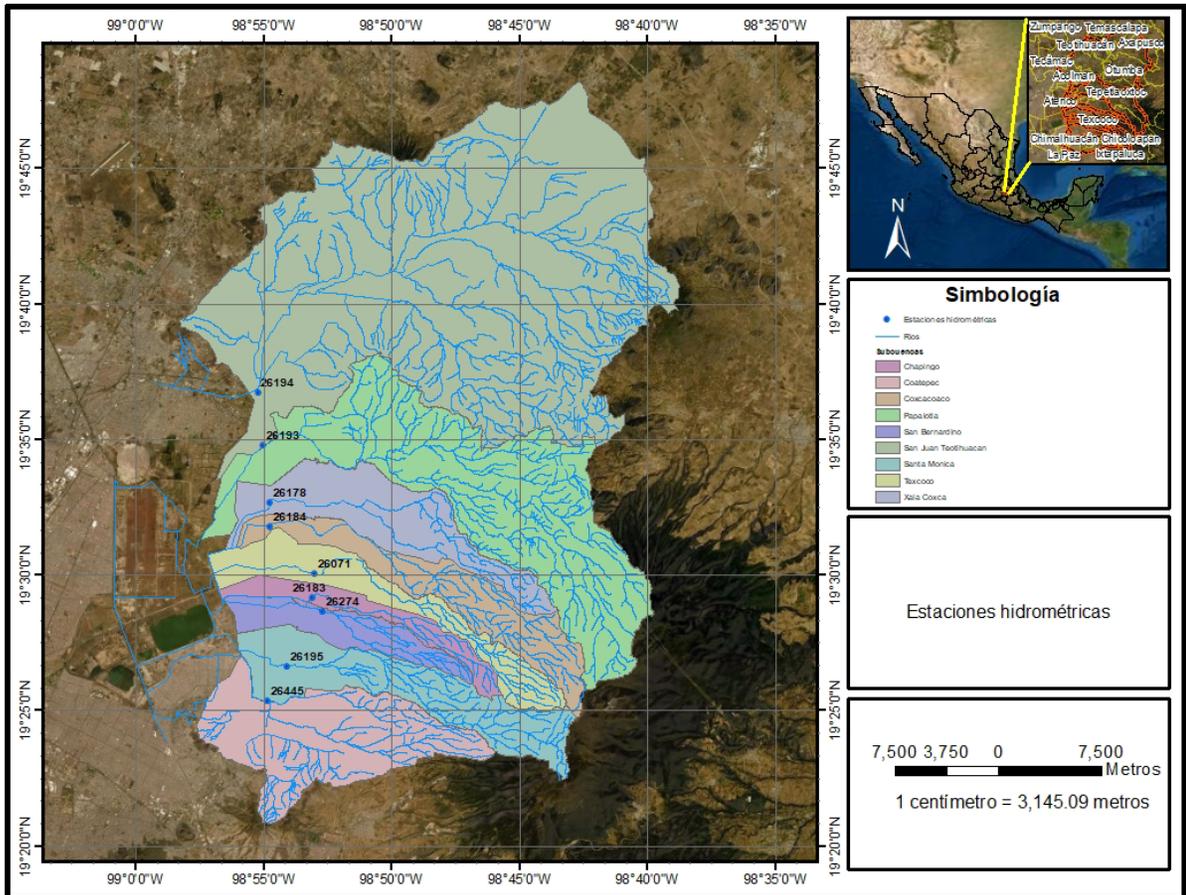


Figura 3-5. Ubicación de las estaciones hidrométricas que aforan las nueve cuencas que drenan al área de estudio

Tabla 3-2. Estaciones hidrométricas que aforan las nueve subcuencas que forman parte del área de estudio

CLAVE	SUBCUENCA	NOMBRE ESTACION	PERIODO
26194	Río San Juan Teotihuacán	Tepexpan	1945-2004
26193	Río Papalotla	La Grande	1945-2008
26178	Río Xalapango	Atenco	1944-2014
26184	Río Coxcacaco	San Andrés	1944-2014
26071	Río Texcoco	Texcoco	1941-2014
26183	Río Chapingo	Chapingo	1944-2014
26274	Río San Bernardino	San Mateo	1959-2003
26195	Río Santa Mónica	Tejocote	1945-1998
26445	Río Coatepec	Garces	1978-1990

3.1.2 Geomorfología y litológica del subsuelo del área del lago de Texcoco

La historia del lago de Texcoco se puede relacionar con el florecimiento del imperio Azteca, así como con su aniquilamiento por los soldados de Hernán Cortés. Como lo relata Díaz del Castillo (2012), traducido por Luis Rutiaga, Netzahualcóyotl tuvo la idea de que se construyese un dique que separara las aguas saladas del lago de Texcoco del resto de las aguas dulces de la cuenca de México (**Figura 3-6**) Este dique o albarradón se podría considerar un preludio al Antropoceno, que, de acuerdo con Crutzen & Stoermer, es el periodo geológico más reciente y se origina por los grandes cambios geológicos derivados de la actividad humana (Carranza-Edwards A. 2018).

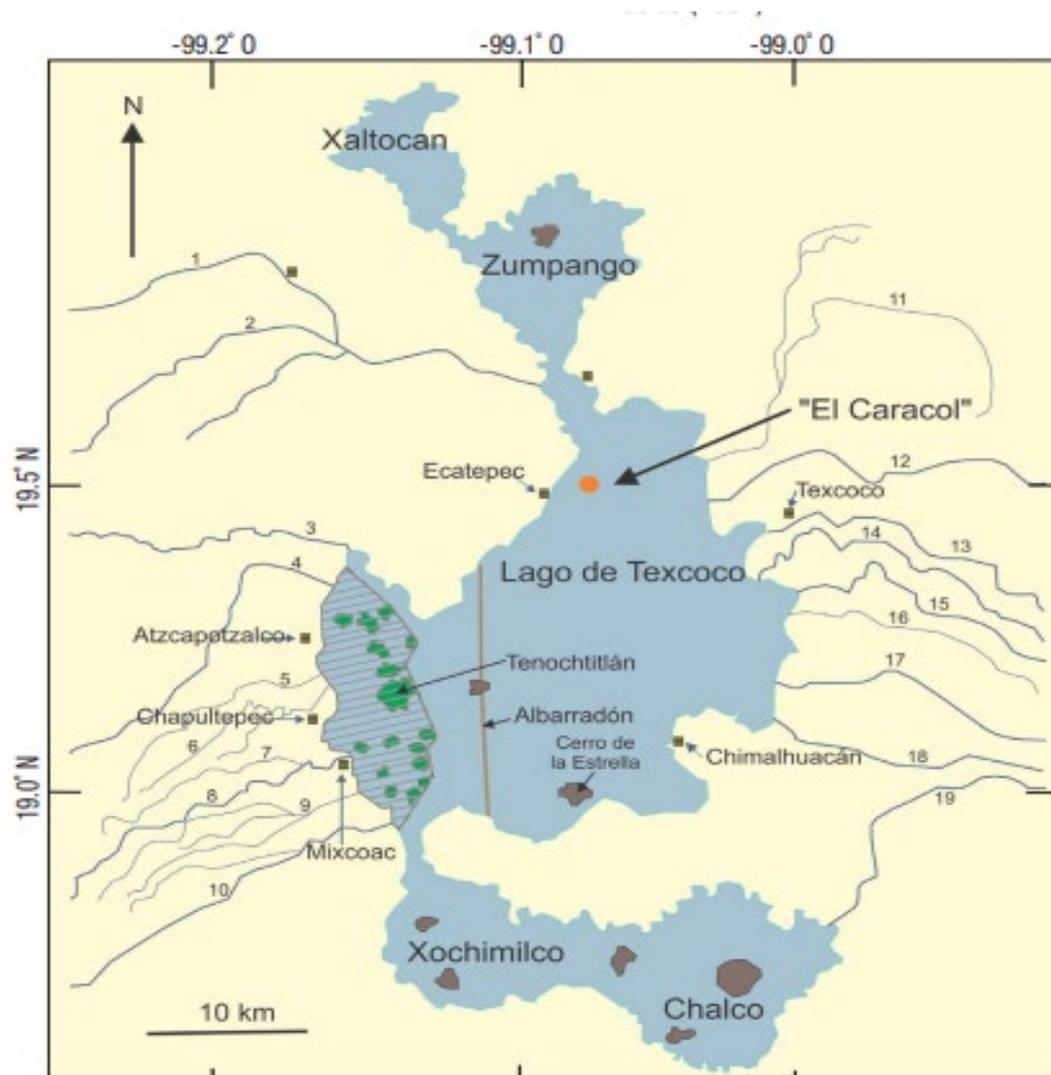


Figura 3-6. Reconstrucción del lago de Texcoco a la llegada de los españoles, donde se muestra el dique de Netzahualcóyotl. Carranza-Edwards A. 2018

Durante su último nivel más bajo por condiciones glaciales, los islotes pudieron ser parte de un traslape de diversos deltas (zona marcada con líneas horizontales) generados probablemente por los aportes de ríos procedentes de las sierras del occidente. Los ríos que desembocaban en el lago eran (**Figura 3-6**): 1) Tepetzotlán; 2)

Cuautitlán; 3) Tlalnepantla; 4) río de los Remedios; 5) San Joaquín; 6) Morales; 7) Tacubaya; 8) La Piedad; 9) Mixcoac; 10) Magdalena; 11) San Juan Teotihuacán; 12) Papalotla; 13) Xalapango; 14) Magdalena; 15) Texcoco; 16) Chapingo; 17) Santa Mónica; 18) Coatepec, y 19) San Francisco.

La cuenca de México, desde el reinado de Moctezuma Ilhuicamina (1440-1469), ha sido afectada por grandes inundaciones. Para aliviar a la región de las grandes inundaciones se construyeron el canal de Huehuetoca, el tajo de Nochistongo, el Gran Canal y, más recientemente, hacia finales de la década de años sesenta del siglo XX, los colectores profundos.

Las aguas de desecho de la cuenca de México se vierten hasta el Golfo de México a través del río Pánuco. Con la finalidad de resolver el problema de la salinidad de suelos en la margen occidental del lago de Texcoco, durante los años cuarenta el ingeniero Hermión Larios Torres ideó la construcción de un evaporador solar, que en un principio recibía aguas de lavados de suelos alcalino-salinos con la intención de rescatarlos como suelos agrícolas, lo cual se logró con éxito. Posteriormente a este evaporador, conocido como El Caracol por su forma de espiral se enviaban a su vaso exterior salmueras (álcalis y cloruros de sodio) procedentes de pozos del lago. Las salmueras circulaban desde el vaso exterior del Caracol y de ahí hacia su vaso central; esto incrementaba por evaporación solar las concentraciones de salmueras. Desde el vaso central se enviaban las salmueras más concentradas hacia la planta de Sosa Texcoco S. A. para su posterior enriquecimiento y empleo en la producción de ceniza de sosa (soda ash) y cloruro de sodio. En la primera capa dura, en el centro del Lago, los valores más altos de isocloruros (cloruro de sodio) sumados a los isocarbonatos (carbonato de sodio) son de aproximadamente 15%; mientras que para la segunda capa dura los valores más altos de isocloruros sumados a los isocarbonatos en el centro del Lago son casi de 13%. Por otro lado, la presencia de bolsas de metano o gas de los pantanos hace también que el ambiente lacustre resulte riesgoso. Cuando una bomba de un pozo de producción de Sosa Texcoco era llevada a reparación, en ocasiones se escuchaba burbujeo en el pozo, el cual reaccionaba con flamazos bajo la acción de cerillos encendidos.

Respecto al grado de saturación de humedad, que los valores mayores, de acuerdo con los pozos de producción de Sosa Texcoco, correspondían con materiales arcillosos saturados en salmueras, en tanto que las capas areno-limosas o limo-arenosas presentaban valores de humedad mucho menores (variables entre 20 y 30%).

Así, las capas permeables (arenas y arenas limosas con huecos de raíces) eran las productoras de salmuera para la empresa Sosa Texcoco, por tratarse de acuíferos alcalino-salinos semiconfinados y con mayor permeabilidad. Keller menciona el caso del efecto de canalizaciones hechas para regadío de campos de algodón en el lago Mar Aral de la ex Unión Soviética (Carranza-Edwards A. 2018).

La gran desecación de ese lago fue irreversible a pesar del cierre de los canales. La causa fue que los materiales arcillosos formaron enormes fracturas al desecarse, y si

esos cuerpos arcillosos estaban subyacidos por cuerpos permeables, entonces la fuga de líquidos no se pudo detener.

Un caso similar, a menor escala, se presentó en el evaporador solar El Caracol, cuando a causa de una huelga se le dejó de surtir con salmueras y terminó por secarse completamente. A raíz de ello, se presentaron grandes fracturas, sobre todo en los grandes vasos externos del sur y, desde entonces, de un 100% de salmueras que llegaban a El Caracol, cerca del 30% se perdía hacia capas inferiores.

Diversos horizontes de sedimentos permitieron establecer que la capa productora de salmueras desaparecía hacia el centro del lago de Texcoco no por una falla, sino debido a facies sedimentarias que cambian de sedimentos arena limosos y limos arenosos al norte para terminar en facies arcillosas en la porción sur del lago.

A mayor profundidad, se encontró un segundo acuífero salino desde el norte hasta el sur del lago. El acuífero de la capa dura más somera presenta su mayor concentración de salmueras más al norte del sitio donde se presenta la mayor concentración de la capa dura inferior. Esto parece indicar que, al rellenarse la cuenca del lago de Texcoco, se hizo desde el sur hacia el norte, tal vez como un efecto del taponamiento de la sierra Chichinautzin, que se inició hace 700 000 años y separó finalmente la cuenca de México del valle de Cuernavaca.

Es posible que durante el Pleistoceno tardío debió cerrarse la cuenca de México lo cual se podría precisar con fechados de la base de la segunda capa dura, más profunda.

Parece ser que los primeros depósitos lacustres de la cuenca de México pudieron marcar el cierre final del represamiento natural de la sierra Chichinautzin, que separaba la cuenca de México del Valle de Cuernavaca, al formarse depósitos lacustres del Pleistoceno. En la síntesis de la descripción sedimentológica de los cinco núcleos de recuperación continua destaca la presencia de los acuíferos (o capas duras), por una dureza mayor que la de las arcillas, para su perforación con máquina de pulseta. Esas capas constituyen acuíferos cuya permeabilidad se debe a la presencia de arenas limosas o limos arenosos con porosidad móldica por raíces y en ocasiones por fracturas. Las mismas capas podrían asociarse con eventos de desecación máxima por periodos interglaciares, cuando el clima es frío y seco, en tanto que durante el Holoceno el nivel del lago asciende debido a un clima cálido y húmedo. Al ascender el lago, los ríos se frenan, y al depositar su carga, el perfil de equilibrio del río no sufre incrementos en su pendiente, esto hace que la capacidad de carga sea mayor que su competencia. Al aumentar la capacidad de carga, se asocian mayores aportes de sedimentos más finos que cuando se trata de ríos de mayor competencia, los que se caracterizan por aportar sedimentos más gruesos, como debió suceder durante parte del Pleistoceno. Cabe suponer que los ríos del occidente (sierra de las Cruces) pudieron formar deltas fangosos y arenosos que al inundarse durante el Holoceno dejaron por erosión diversos islotes que fueron poblados por los aztecas (Carranza-Edwards A. 2018).

En ese sentido, se reconocen principalmente tres grandes tipos de unidades sedimentológicas:

- a) horizontes volcánicos, los cuales se encuentran a diversas profundidades y con espesores variables, desde capas finas hasta cercanas a un metro;
- b) paquetes de arcillas de diversos colores, en los cuales a simple vista se observan ostrácodos desde muy abundantes hasta prácticamente ausentes, y cuyos colores verdosos podrían indicar condiciones reductoras asociadas posiblemente con actividad orgánica, mientras que los pardos y rojizos pueden deberse a condiciones oxidantes, y
- c) las capas más permeables, constituidas esencialmente por las capas duras de arenas, arenas limosas y limos arenosos.

Las mezclas de estos tipos de sedimentos arcillosos saturados en salmueras hacen que se trate de secuencias sedimentológicas vulnerables para eventos de terremotos, subsidencia y fracturamiento en el medio lacustre del ex lago de Texcoco. Un ejemplo de dicha vulnerabilidad sería la respuesta a eventos sísmicos, para la ciudad de México.

De manera concluyente se resume en los siguientes ocho puntos:

- a) la capa dura somera (llamada primera capa dura) y productora de salmueras no está afectada por una falla geológica, sino que se adelgaza por facies de sedimentos más finos hacia el sur;
- b) se descubre una segunda capa dura más profunda que también resulta productora de salmueras;
- c) algunas de las cenizas volcánicas facilitaron la correlación entre los pozos, pues no todas son de amplia distribución y su presencia dependerá de la dirección de los vientos, como se ha observado en erupciones recientes que alteran la transportación aérea;
- d) los sedimentos arcillosos son ricos en salmueras y su grado de humedad es alto, lo que los hace muy corrosivos;
- e) la heterogeneidad y la salinidad de los sedimentos lacustres hace que este ambiente sea muy complejo, pues las capas duras son muy delgadas y se ubican dentro de cuerpos altamente compresibles y, por tanto, sujetos a subsidencia;
- f) las secuencias sedimentológicas son más variables en las partes someras del lago que en las profundas, pues las últimas se encuentran menos sujetas a cambios. A pesar de ello, en la vertical, las secuencias profundas también son variables;
- g) las grandes variaciones sedimentológicas, junto con las variaciones en contenido de salmueras y diversos grados de humedad, hacen que el subsuelo heterogéneo de este ambiente lacustre sea vulnerable por sales corrosivas, fracturas y subsidencia, y que sus variaciones en saturación de humedad horizontal y vertical le hacen un medio lacustre no homogéneo, y
- h) las concentraciones altas de sedimentos lodosos en la porción central del lago hacen que los terrenos sean muy vulnerables a la amplificación de ondas sísmicas durante los grandes terremotos.

3.1.3 Uso de suelo

En la Tabla 3-3 se muestra el uso de suelo y su área respectiva los cuales fueron calculados con base en las cartas de uso de suelo de INEGI Serie VI. En la **Figura 3-7** donde se puede observar que el 45% de la superficie del área de estudio es zona habitacional y sus vialidades, la zona boscosa representa el 26%, se cuenta con una zona dedicada a la agricultura de temporal y pastizal inducido del 28%.

Tabla 3-3. Uso de suelo (Serie VI) del área de estudio

Cuenca	Uso de suelo	Área km ²
Chapingo	Agricultura de riego semipermanente	5.31
	Agricultura de temporal anual	4.74
	Agricultura de temporal semipermanente	0.01
	Bosque cultivado	1.72
	Bosque de oyamel	0.62
	Bosque de pino	2.43
	Bosque de pino-encino	0.77
	Pastizal inducido	0.19
	Sin vegetación aparente	0.19
	Urbano construido	4.06
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	2.57
Coatepec	Área desprovista de vegetación	1.72
	Agricultura de riego semipermanente	0.50
	Agricultura de temporal anual	25.61
	Agricultura de temporal permanente	4.26
	Bosque cultivado	2.50
	Bosque de encino	1.13
	Bosque de pino	2.23
	Bosque de pino-encino	0.07
	Pastizal inducido	10.50
	Sin vegetación aparente	7.38
	Urbano construido	62.17
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	9.85	
Coxcacoaco	Agricultura de riego anual	4.97
	Agricultura de riego anual y semipermanente	15.95
	Agricultura de riego semipermanente	0.79
	Agricultura de temporal anual	10.40
	Bosque de encino-pino	0.20
	Bosque de oyamel	4.55
	Bosque de pino	8.22
	Bosque de pino-encino	1.57
	Pastizal inducido	4.94
	Pradera de alta montaña	0.87
	Sin vegetación aparente	1.18
	Urbano construido	5.18
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	2.70
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino	1.42
Papalotla	Agricultura de riego anual	0.23

Cuenca	Uso de suelo	Área km²
	Agricultura de riego anual y semipermanente	24.53
	Agricultura de temporal anual	39.10
	Agricultura de temporal anual y permanente	25.53
	Agricultura de temporal permanente	1.10
	Bosque cultivado	4.65
	Bosque de encino-pino	3.78
	Bosque de oyamel	4.96
	Bosque de pino	39.91
	Bosque de pino-encino	2.72
	Matorral crasicaule	6.52
	Pastizal halófilo	3.64
	Pastizal inducido	32.99
	Sin vegetación aparente	0.05
	Tular	0.25
	Urbano construido	7.51
	Vegetación secundaria arbórea de bosque de táscate	4.67
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	21.00
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino	2.95
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino	1.54
San Bernardino	Agricultura de riego semipermanente	15.03
	Agricultura de temporal anual	11.33
	Bosque cultivado	4.50
	Bosque de pino	2.14
	Pastizal inducido	0.01
	Sin vegetación aparente	5.69
	Urbano construido	2.76
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	2.72	
San Juan Teotihuacán	Agricultura de riego anual y semipermanente	99.88
	Agricultura de temporal anual	189.84
	Agricultura de temporal anual y permanente	84.59
	Agricultura de temporal permanente	36.42
	Bosque cultivado	1.87
	Bosque de encino	0.01
	Bosque de pino	1.25
	Bosque de táscate	1.47
	Matorral crasicaule	36.61
	Pastizal halófilo	2.31
	Pastizal inducido	44.34
	Sin vegetación aparente	0.97
	Tular	0.68
	Urbano construido	48.98
	Vegetación halófila hidrófila	1.24
	Vegetación secundaria arbórea de bosque de táscate	0.23
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	20.73
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino	0.00	
Vegetación secundaria herbácea de bosque de encino	6.88	
Santa Mónica	Agricultura de riego semipermanente	12.25

Cuenca	Uso de suelo	Área km²
	Agricultura de temporal anual	8.42
	Bosque cultivado	2.27
	Bosque de encino-pino	1.05
	Bosque de oyamel	0.76
	Bosque de pino	16.85
	Bosque de pino-encino	1.45
	Pastizal inducido	2.57
	Pradera de alta montaña	0.26
	Sin vegetación aparente	4.33
	Urbano construido	4.72
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	5.45
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de oyamel	0.93
	Texcoco	Agricultura de riego anual y semipermanente
Agricultura de riego semipermanente		4.68
Agricultura de temporal anual		22.13
Agricultura de temporal semipermanente		0.59
Bosque de oyamel		10.41
Bosque de pino		10.47
Bosque de pino-encino		2.36
Pastizal inducido		2.86
Pradera de alta montaña		0.00
Urbano construido		13.33
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino		1.53
Xalapango	Agricultura de riego anual	1.96
	Agricultura de riego anual y semipermanente	22.30
	Agricultura de temporal anual	12.19
	Agricultura de temporal anual y permanente	0.39
	Bosque de encino-pino	1.27
	Bosque de oyamel	0.00
	Bosque de pino	0.94
	Bosque de pino-encino	0.01
	Matorral crasicaule	1.98
	Pastizal inducido	9.18
	Urbano construido	5.58
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	0.23

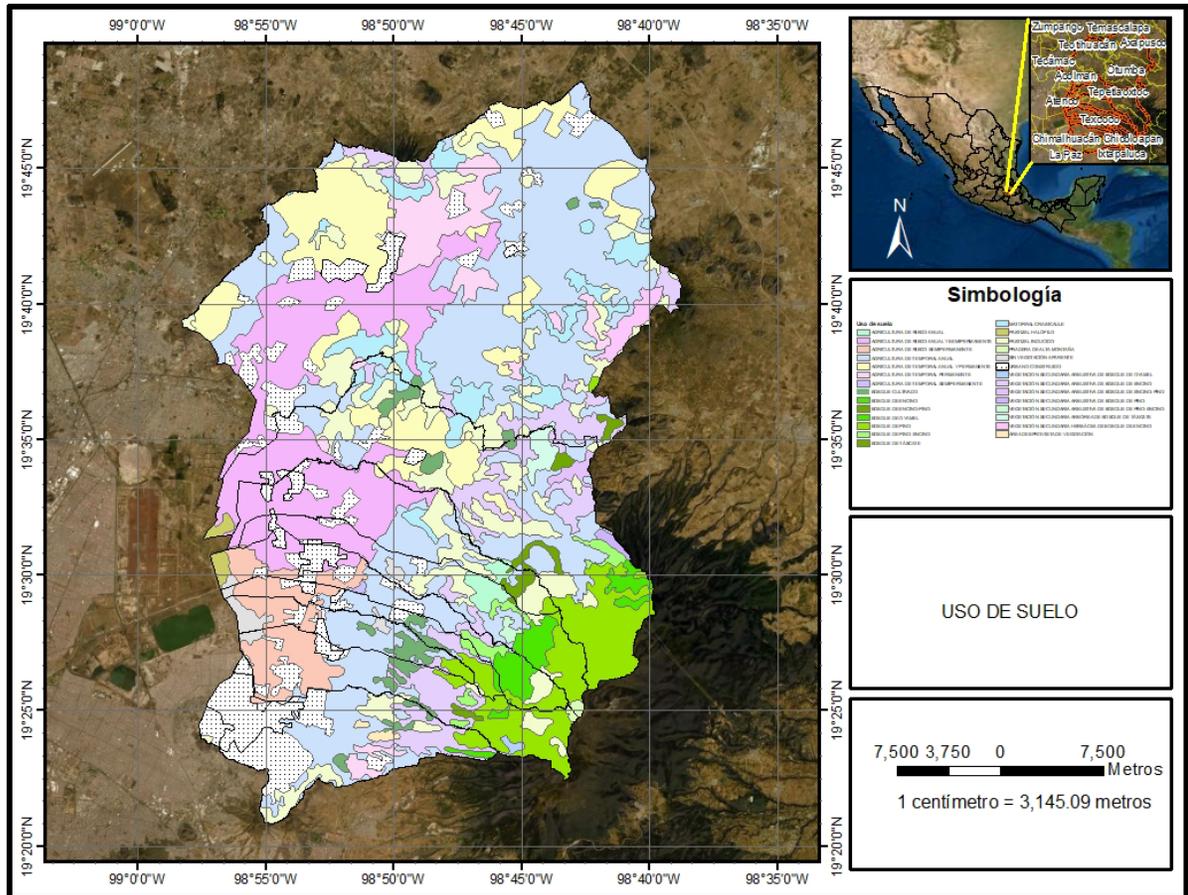


Figura 3-7. Uso de suelo Serie VI INEGI, en el área de estudio y las nueve cuencas que drenan hacia la misma

El uso del suelo actual, mostrado en la Figura 3-7. Se puede observar que el 55% de la superficie del área de estudio es uso agrícola, la zona boscosa representa solo el 11.27% del total del área las zonas desprovistas de vegetación junto con vegetación secundaria y pastizales representan el 21.50% del total del área. El cambio de uso del suelo y la pérdida de la cobertura vegetal es uno de los principales problemas que aquejan a la humanidad, ya que estos son la principal causa del cambio climático global, se relaciona directamente con la seguridad en la producción de alimentos, la salud humana, la urbanización, la biodiversidad, la migración transfronteriza, los refugios ambientales, la calidad del agua y del suelo. La reconversión del uso de suelo en el área de estudio, se muestra evidente en el cambio del mismo de zonas boscosas y/o áreas dedicadas a los pastizales o a la agricultura en zonas meramente urbanas (Pineda Pastrana 2011).

3.1.4 Tipo de suelo

En el área de estudio se presenta una asociación del tipo. Feozem con textura media y existe evidencia de procesos geomorfológicos acumulativos y erosivos en el suelo, así como procesos dominantes que son preferentemente de tipo fluvial concentrado, Los feozems son muy fértiles y aptos para el cultivo, pero son sumamente proclives a

la erosión. Con frecuencia son suelos profundos y ricos en materia orgánica. Se desarrollan sobre todo en climas templados y húmedos, por lo que se encuentran recubriendo el Eje Neovolcánico Transversal y porciones de la Sierra Madre Occidental, el segundo grupo predominante en la región son los vertisoles, los cuales son suelos sumamente arcillosos que se desarrollan en climas de subhúmedos a secos. Al igual que los feozems, son profundos, muy duros cuando están secos y lodosos al mojarse (debido a su alto contenido de arcillas), por lo que resulta difícil trabajarlos. Además, su fertilidad es intrínsecamente baja, el Feozem con textura media ocupa el 65% del área.

Tabla 3-4. Tipo de Suelo en el área de estudio

Cuenca	Tipo de Suelo	Textura	Área km²
Chapingo	Cambisol	Media	6.67
	Feozem	Media	12.17
	Solonchak	Fina	2.74
	Vertisol	Fina	1.03
Coatepec	Cambisol	Media	5.13
	Feozem	Media	100.20
	Solonchak	Fina	22.56
Coxcacoaco	Cambisol	Media	12.58
	Feozem	Media	12.88
	Regosol	Gruesa	9.94
	Vertisol	Fina	27.56
Papalotla	Cambisol	Media	28.71
	Feozem	Media	99.08
	Regosol	Gruesa	22.12
	Solonchak	Fina	2.21
	Vertisol	Fina	75.61
San Bernardino	Cambisol	Media	9.27
	Feozem	Media	27.62
	Solonchak	Fina	7.31
San Juan Teotihuacan	Cambisol	Media	4.85
	Feozem	Media	501.76
	Luvisol	Media	29.01
	Solonchak	Fina	17.33
	Vertisol	Fina	25.32
Santa Mónica	Cambisol	Media	18.81
	Feozem	Media	31.83
	Regosol	Gruesa	6.81
	Solonchak	Fina	3.50
Texcoco	Cambisol	Media	30.63
	Feozem	Media	16.04
	Regosol	Gruesa	8.80
	Solonchak	Fina	0.34
	Vertisol	Fina	14.37
Xalapango	Cambisol	Media	1.73
	Feozem	Media	12.18
	Vertisol	Fina	42.12
TOTAL			1,250.94

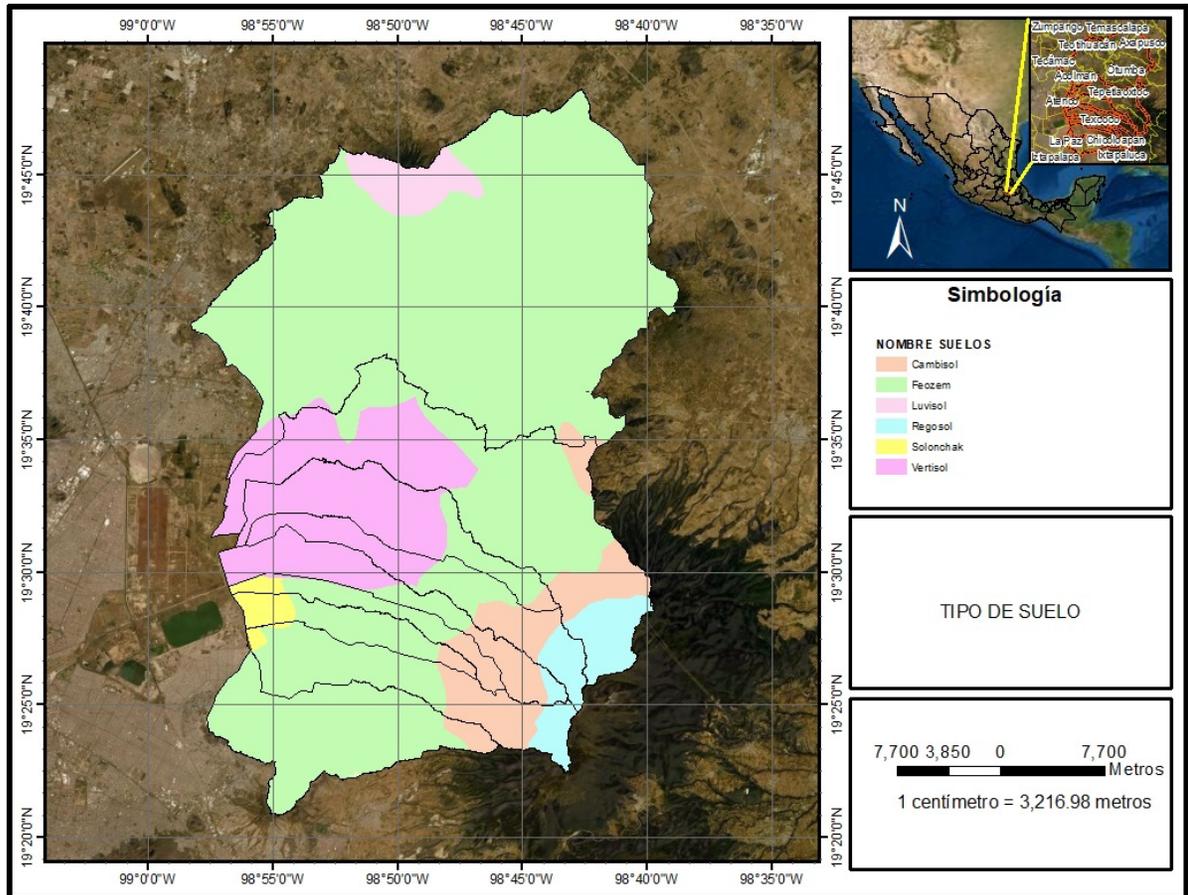


Figura 3-8. Tipo de Suelo las subcuencas y el área de estudio (INEGI, 2007)

3.1.5 Relieve

La cuenca del lago de Texcoco está limitada por distintas elevaciones el norte, de este a oeste por los cerros de Sincoque, San Sebastián, Xalpan, y Hueipoxtla, por el cerro de Acayucan y la sierras de Tezontlalpan y de Pachuca. Por el sur, de este a oeste, la limitan el Popocatepetl, las sierras de Chichinautzin y del Ajusco y el monte de las cruces. Por el este, de norte a sur, por la sierra de Pachuca, los cerros Tecajete, San Gabriel Xihuinco, Tlalzalán, Tláloc, Telapon, Papayo y los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl. Finalmente, por el oeste, de norte a sur, es limitada por la sierra de Tepetzotlán, el monte Bajo, el monte Alto y la Sierra de las cruces. También se encuentra dentro de una llanura lacustre producto de actividad volcánica (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2021).

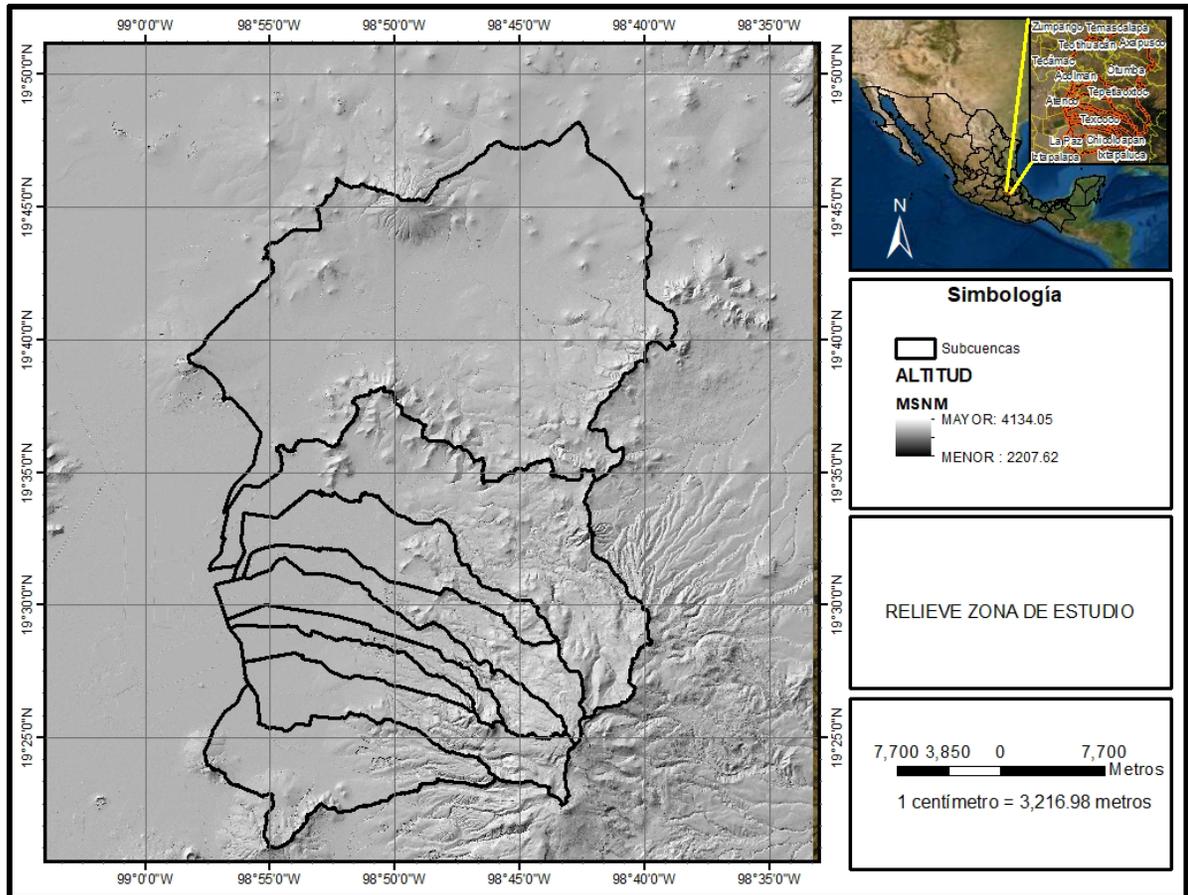


Figura 3-9. Relieve área de estudio y subcuencas de aportación (INEGI, 2010)

3.1.6 Clima

El clima predominante en el área estudiada corresponde a cinco claves según la clasificación de Köppen (García Enriqueta, 1964) :

- BSkw Semiárido, templado, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente menor de 22°C.
- C(w0) Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C.
- C(w1) Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C.
- C(w2) Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C.
- Cb'(w2) Semifrío, subhúmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente bajo 22°C.

La precipitación pluvial máxima acumulada anual fue de 793 mm en el año de 2014 y la mínima de 423 mm en el año de 1993.

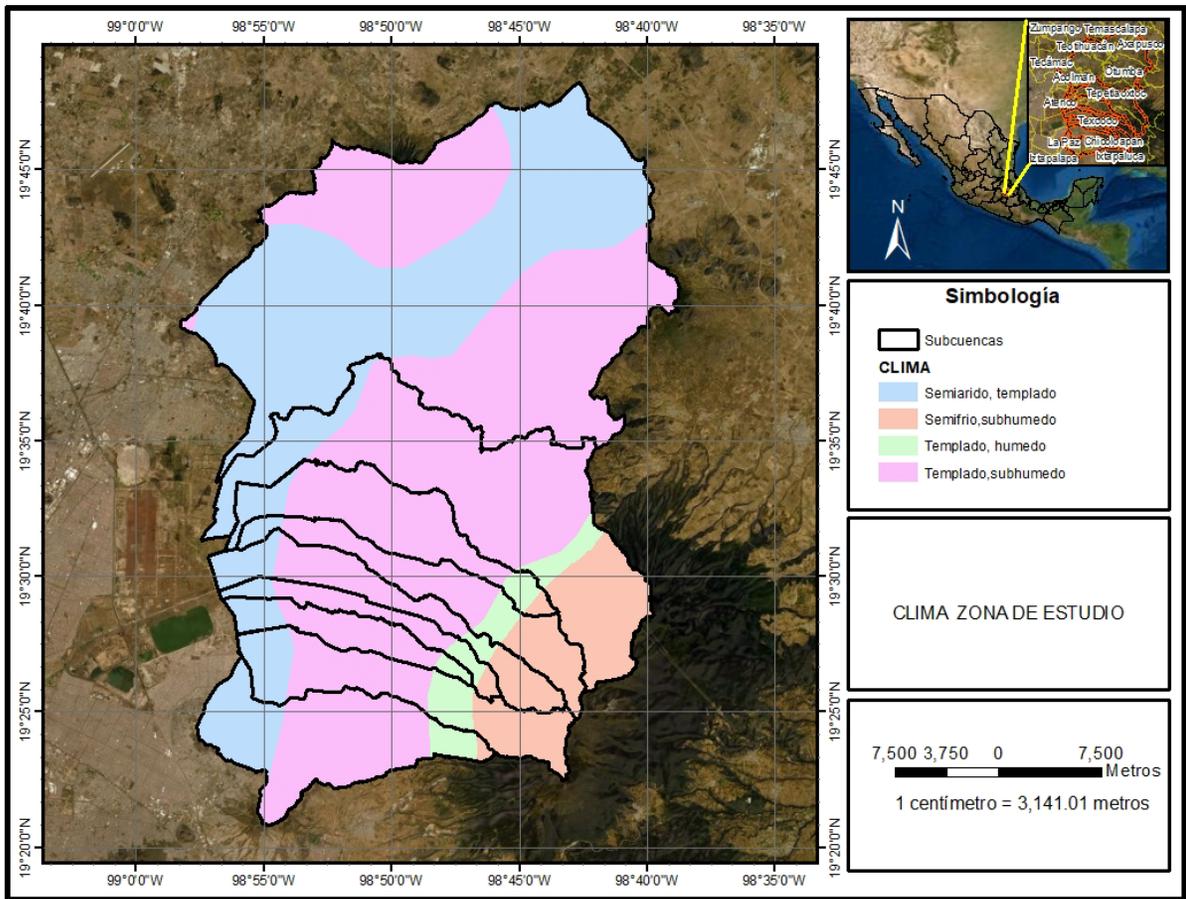


Figura 3-10. Clima área de estudio y subcuencas de aportación (CONABIO, 2010)

En cuanto a la temperatura máxima registrada, se tiene un valor de 24.8 °C registrado en el año de 1998, siendo el más alto del periodo. Lo que respecta a la temperatura mínima se tiene un registro 5.6 °C reportados en el año de 1989: siendo éste el registro más bajo del periodo.

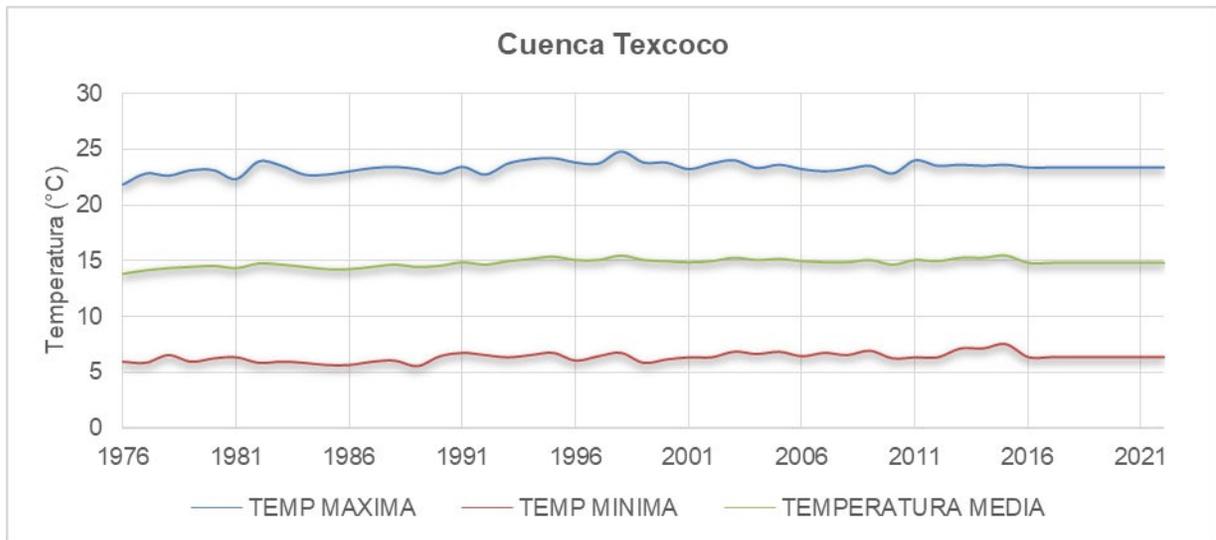


Figura 3-11. Temperatura máxima media y mínima anual registrada

Como se puede apreciar en la gráfica, se observa un leve incremento en las temperaturas máxima y mínima.

3.1.7 Barrancas, lagos, cauces y escurrimientos

A. Ríos

Existen nueve sistemas de corrientes que atraviesan la zona de estudio y tienen influencia en el lago de Texcoco.

Río San Juan Teotihuacán: Nace de la unión de los arroyos San Martín, Barranca de Atlamajac y Barranca de Tlalchichinamitl. Atraviesa el poblado de San Juan Teotihuacán, y continúa las poblaciones de Atlatongo, San Bartolo, Acolman y Tepexpan. Finalmente, el río descarga sus aguas en la zona del ex vaso de Texcoco, a la altura de Nexquipayac. Tiene una aportación media anual de 3.87 millones de metros cúbicos.

Río Papalotla: Al igual que el río Xalapango, se forma por la unión de dos vertientes, una que recoge los escurrimientos de las estribaciones montañosas situadas en el centro del municipio de Tepetlaoxtoc, y otra que proviene de la zona montañosa cercana al poblado de Santa Inés. La extensión aproximada de la ramificación norte (la más importante de las dos) es de 17.2 km. El río Papalotla atraviesa los municipios de Papalotla, San Andrés Chiautla, Tezoyuca y Atenco hasta llegar al Ex lago de Texcoco. Tiene una aportación media anual de 6.42 millones de metros cúbicos.

Río Xalapango: Nace entre las poblaciones de San Joaquín y Santa Inés, municipio de Texcoco, se forma por la unión de dos vertientes principales que recogen las corrientes que provienen de las partes montañosas del noreste del municipio y atraviesa los municipios de San Andrés Chiautla, Chiconcuac y Atenco, para desembocar en el vaso del ex lago de Texcoco. Su longitud aproximada es de 13.7 km. Tiene una aportación media anual de 3.26 millones de metros cúbicos.

Río Coxacoaco: Se origina a partir de la unión de dos vertientes que recogen las corrientes derivadas de la zona montañosa del Este del municipio de Texcoco. Una de ellas viene de las poblaciones de Nativitas y San Dieguito, y la otra de San Miguel Tlaixpan. Cruza por el municipio de Atenco, para continuar su recorrido y descargar en el vaso del ex lago de Texcoco. Su longitud aproximada es de 14.2 km. Tiene una aportación media anual de 4.17 millones de metros cúbicos.

Río Texcoco: Se forma de la unión de varias vertientes de la zona montañosa al Este del municipio de Texcoco, continúa por el poblado de Santa María Nativitas, rodea la población de Texcoco y descarga en el Ex lago de Texcoco. Tiene una longitud estimada de 14.4 km. Tiene una aportación media anual de 1.96 millones de metros cúbicos.

Río Chapingo: Tiene su origen en una serie de corrientes que provienen de los cerros Tearco y Tecorral. Cruza las poblaciones de Tequexquináhuac, San Luis Huexotla y San Xate Huexotla y continúa hasta descargar a la zona del ex vaso de Texcoco.

Río San Bernardino: Se forma por vertientes que provienen de la zona montañosa al Este del municipio de Texcoco. Cruza por los poblados de San Mateo Huexotla y San Bernardino, limitando los terrenos de la Universidad Autónoma de Chapingo. La longitud aproximada es de 8.3 km.

Río Santa Mónica: Nace a partir de la unión de tres vertientes: una proviene de la zona montañosa del este del municipio de Chicoloapan, y las otras dos de las estribaciones montañosas al sureste del municipio de Texcoco. Su punto de unión está al sur de Coatlinchán, en el municipio de Texcoco. Su longitud aproximada es de 6.5 km.

Río Coatepec: Tiene su origen en la Sierra Quetzaltepec, como resultado de la unión de varias corrientes. Cruza al Norte de la población de Coatepec y San Vicente Chicoloapan, donde se encuentra canalizado y confluye con el arroyo Manzano, para descargar a la zona del ex vaso de Texcoco, en la parte Norte del municipio de Chimalhuacán.

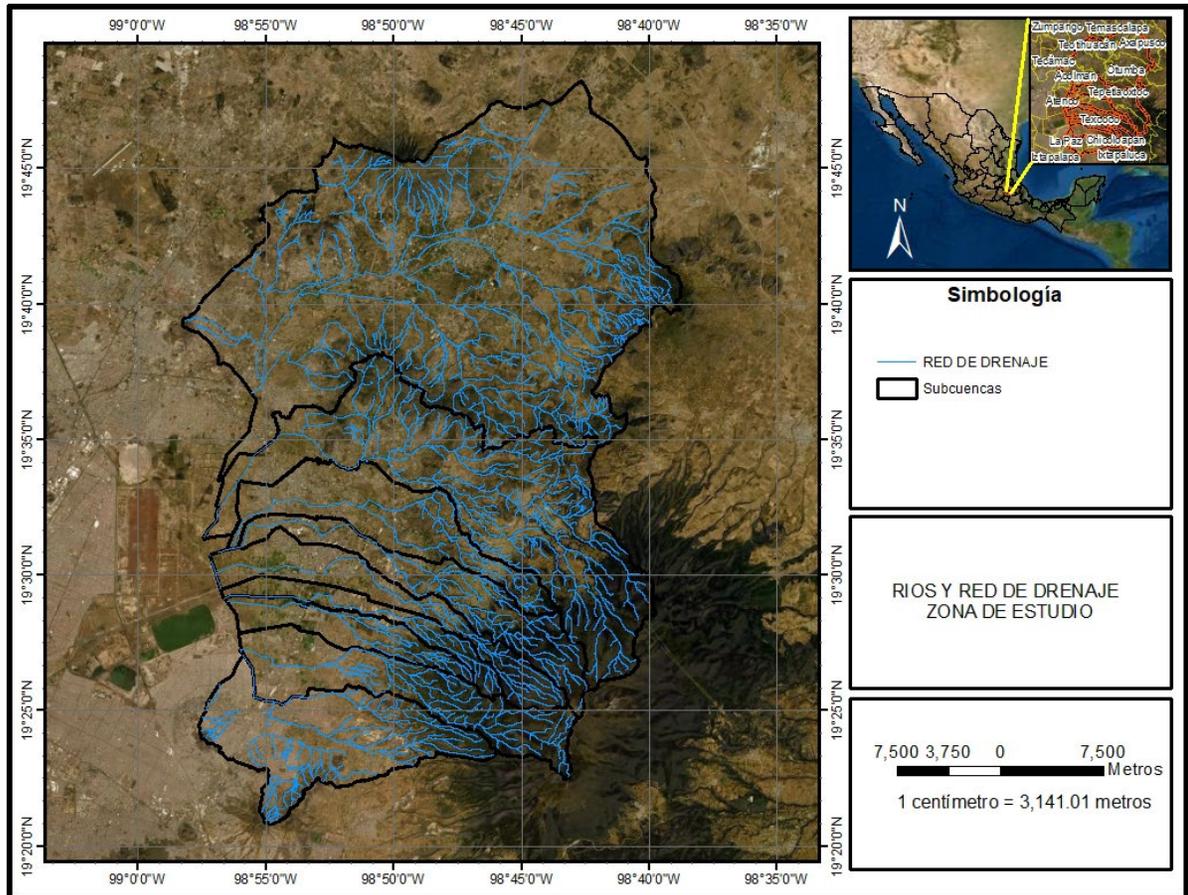


Figura 3-12. Ríos principales ubicados en la zona de estudio (INEGI, 2010a)

B. Cuerpos de Agua

En 1969, el doctor Nabor Carrillo Flores, eminente investigador geotecnista mexicano, propuso el Proyecto Texcoco (SHCP, 1969), en el cual se contempla la utilización de la zona federal del antiguo Lago de Texcoco como zona de regulación de las avenidas del Valle de México para evitar las afectaciones a la zona urbana. En esos años, el vaso era fuente de generación de frecuentes tolveneras con detritus de aguas negras y polvo de las arcillas desecadas que eran conducidas durante el estiaje hacia la Ciudad de México.

El lago artificial Nabor Carrillo, denominado originalmente lago Texcoco Sur, ha sido tema recurrente en los últimos años, por su rescate ambiental y su cercanía con el cancelado proyecto del NAIM; sin embargo, poco se ha comentado sobre su origen e importancia en el funcionamiento hidrológico del oriente del Valle de México, por lo cual es conveniente describirlos.

Además, el hundimiento regional de la metrópoli había provocado un desnivel de unos 6 metros entre el Lago de Texcoco y el centro de la ciudad, lo cual amenazaba a la población con una posible inundación en época de lluvias por falla de los bordos perimetrales del lago. El planteamiento fue la construcción de lagos artificiales de

regulación de avenidas y almacenamiento de las aguas de mejor calidad para diversos usos, la regulación y el almacenamiento de los escurrimientos de los ríos del oriente y el tratamiento de las aguas residuales para su intercambio con aguas subterráneas de buena calidad utilizadas en agricultura al oriente del vaso.

También se propuso la construcción de una planta nucleoelectrica y una desaladora para obtener agua de buena calidad para abastecimiento y los álcalis de las aguas subterráneas para la industria. Estas dos últimas instalaciones fueron desechadas debido al riesgo de tener una instalación nuclear cerca de la capital en una zona sujeta a sismos de importancia, y el intercambio de aguas no fue aceptado por los agricultores; sin embargo, la realización de obras de manejo de las aguas del oriente del valle tomó relevancia y se realizaron estudios para realizarla a través de la Comisión de Estudios del Lago de Texcoco (CELT), que analizó la viabilidad de construir los vasos artificiales y canales mediante excavaciones, consolidación por bombeo y licuación de las arcillas mediante explosivos. (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2021).

La zona federal del lago recibe los escurrimientos de las partes oriente, poniente y sur del Valle de México, entre ellas la totalidad de los escurrimientos que proceden del Iztaccíhuatl y llegan al lago a través del Río de la Compañía, así como en forma parcial, según el manejo que se haga en la zona urbana de la Ciudad de México, de las aguas que provienen del suroeste del valle desde Los Dinamos en la Magdalena Contreras, mediante el entubamiento del río Churubusco y a través de la desviación combinada o Río de los Remedios, se derivan aguas del poniente hasta su descarga en el antiguo vaso. Este manejo implica transitar caudales y volúmenes de importancia por la gran metrópoli, con los riesgos inherentes, por lo cual existen varias derivaciones de los escurrimientos de la región sureste, como son el sistema de presas de control de avenidas intercomunicadas del poniente de la ciudad y el interceptor de profundidad media de Iztapalapa. En años recientes, para aliviar la presión hidrológica del antiguo lago, se construyó el Túnel Interceptor Río de los Remedios, que permite descargar las aguas recibidas en Texcoco no sólo hacia el Gran Canal, sino también al Drenaje Profundo (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2021).

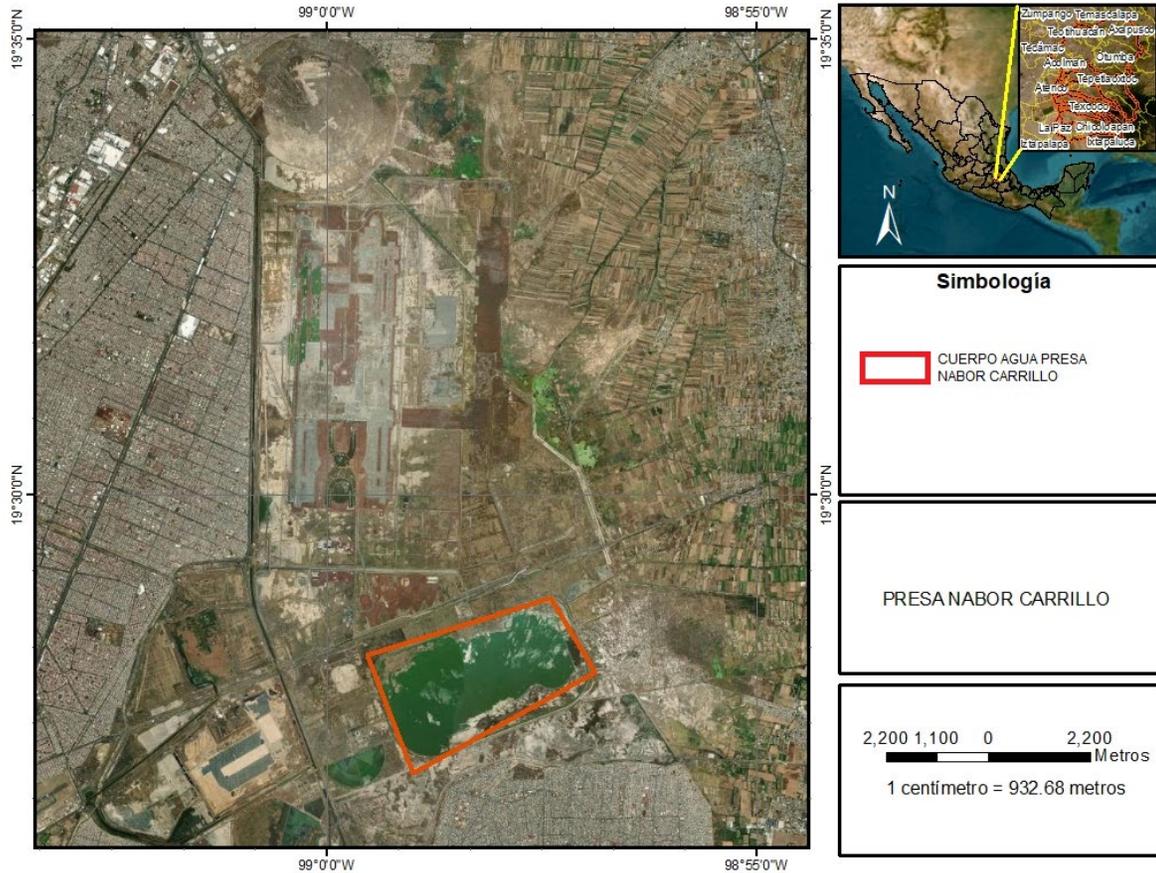


Figura 3-13. Presa Nabor Carrillo

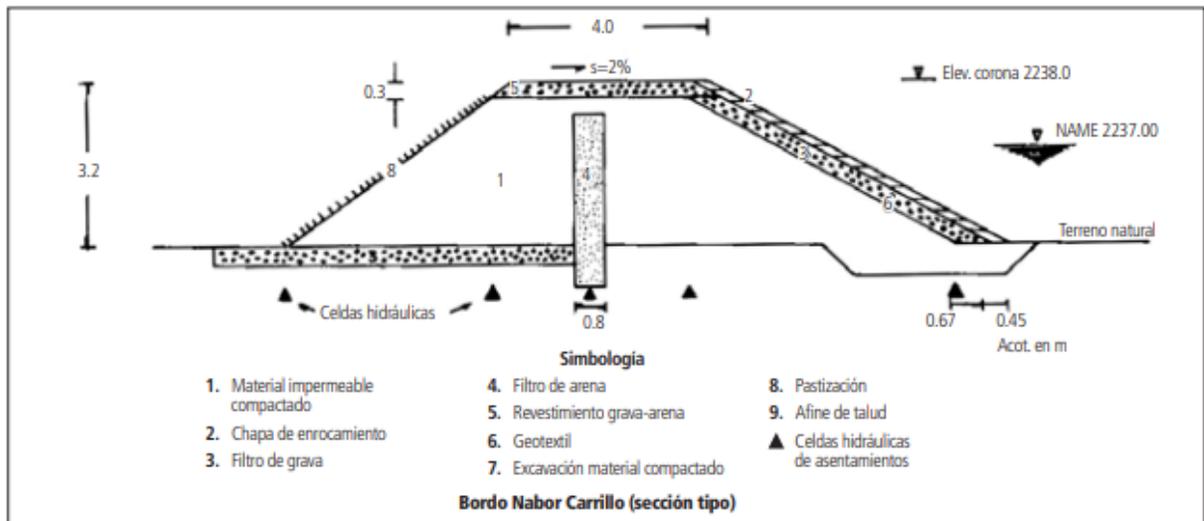


Figura 3-14. Cortina de la Presa Nabor Carrillo

3.1.8 Análisis hidrológico e hidráulico

En este capítulo, se analizan la variable de precipitación con el objetivo de revisar las anomalías que las estaciones meteorológicas convencionales han registrado a través del tiempo, después se describen los análisis de gastos medios y definición de los escenarios seco, húmedo y medio con gastos del promedio diario y se reportan las mediciones de caudal en la zona de estudio.

Análisis meteorológico

Conforme a lo establecido por la Organización Meteorológica Mundial, la Normal Climatológica o valor normal, se utiliza para definir y comparar el clima y generalmente está representado por el valor promedio de una serie continua de mediciones de una variable climatológica (precipitación, temperatura, viento, etc.) durante un período de por lo menos 30 años. A la diferencia entre el valor registrado de la variable y su valor normal se le conoce como anomalía. En términos generales, se puede afirmar que los datos hidrometeorológicos contienen una estructura tanto temporal como espacial, por ello, las metodologías estadísticas utilizadas en su análisis deberán considerar este tipo de estructuras.

En este análisis, se considera que la precipitación presenta variabilidad espacio-temporal. Este hecho, dificulta la determinación de un intervalo dentro del cual se puedan agrupar las anomalías que se presenten con mayor frecuencia, para considerarlas como alteraciones comunes y, por ende, como valores normales. A este rango o intervalo lo denominaremos en adelante, el Umbral de Normalidad. Las anomalías, para el caso de la precipitación, se calculan como el cociente entre el total registrado en un mes en particular y su valor promedio multianual y se expresa en porcentaje, de tal forma que el 100% indica que se registró un volumen de agua exactamente igual al de su promedio histórico. Que tanto se alejen los datos del 100% hacia arriba o hacia abajo, nos señala el grado de alteración por exceso o por defecto, respectivamente.

Existen dos aspectos muy importantes en la representación de las anomalías de la precipitación en las cuales se fundamenta esta propuesta de categorización de la sequía usando la estandarización de la anomalía de la precipitación.

- Reflejar la situación del evento en relación a la serie de datos pasados es tan importante como el mismo fenómeno en sí y
- Convertir el valor numérico en un índice que categorice el evento y este sea entendido con facilidad.

La anomalía estandarizada se calcula según el procedimiento utilizado por Ogallo (OMM, 2019), donde:

$$Z_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j}{s_j} \quad (1)$$

Donde:

X_{ij} el total acumulado del período de análisis de la estación j en el año i y X_j , S_j la media y la desviación standard de dicho período, respectivamente.

Bajo esta premisa se plantea que para el cálculo de la anomalía propuesta será de manera mensual por estación climatológica a la cual se propone la siguiente ecuación:

$$Anomalia = \frac{x_i - S_{o_i}}{S_o} \quad (2)$$

Donde x_i es la media del valor del mes i a lo largo del periodo, S_{o_i} es la desviación estándar de la media del mes i y S_o es la desviación promedio de todos los meses. Los índices estandarizados de sequía (SI), evalúan la diferencia que existe entre los valores de la variable analizada y la condición considerada como “normal” en una muestra normalizada. Así, los valores numéricos del índice SI representan anomalías de la variable de interés respecto a la media. En este trabajo se plantea que a partir de los resultados obtenidos se categorice de acuerdo a la gama indicada en la Tabla 3-5 ya que esto permite convertir el valor numérico en un índice que categorice el evento y este sea entendido con facilidad.

Tabla 3-5. Escala del índice estandarizado de sequía (SI)

Valor	Categoría
mayor que 2	Extremadamente lluvioso
entre 1.5 y 2	lluvioso
entre 1 y 1.5	Moderadamente lluvioso
entre 0.5 y 1.0	Ligeramente lluvioso
entre 0 y 0.5	Normal
entre 0 y -0.5	Normal
entre -0.5 y -1	Ligeramente seco
entre -1 y -1.5	Moderadamente seco
entre -1.5 y -2	Seco
menor que -2	Extremadamente seco

Aplicación de la metodología a las cuencas que conforman la cuenca del lago de Texcoco

Para el cálculo de la anomalía de la precipitación se seleccionaron tres subcuencas que forman parte de la cuenca del lago de Texcoco, con el objetivo de demostrar el proceso de cambio que ha sufrido la zona respecto a la variable precipitación:

- ✓ Papalotla
- ✓ Coxacoaco
- ✓ Y Chapingo

A. Cuenca Río Papalotla

Este afluente se forma por la unión de dos vertientes, una que recoge los escurrimientos de las estribaciones montañosas situadas en el centro del municipio de Tepetlaoxtoc, y otra que proviene de la zona montañosa cercana al poblado de Santa Inés. La extensión aproximada de la ramificación norte (la más importante de las dos) es de 17.2 km. El río Papalotla atraviesa los municipios de Papalotla, San

Andrés Chiauhtla, Tezoyuca y Atenco hasta llegar al Ex lago de Texcoco. Tiene una aportación media anual de 6.42 millones de metros cúbicos.

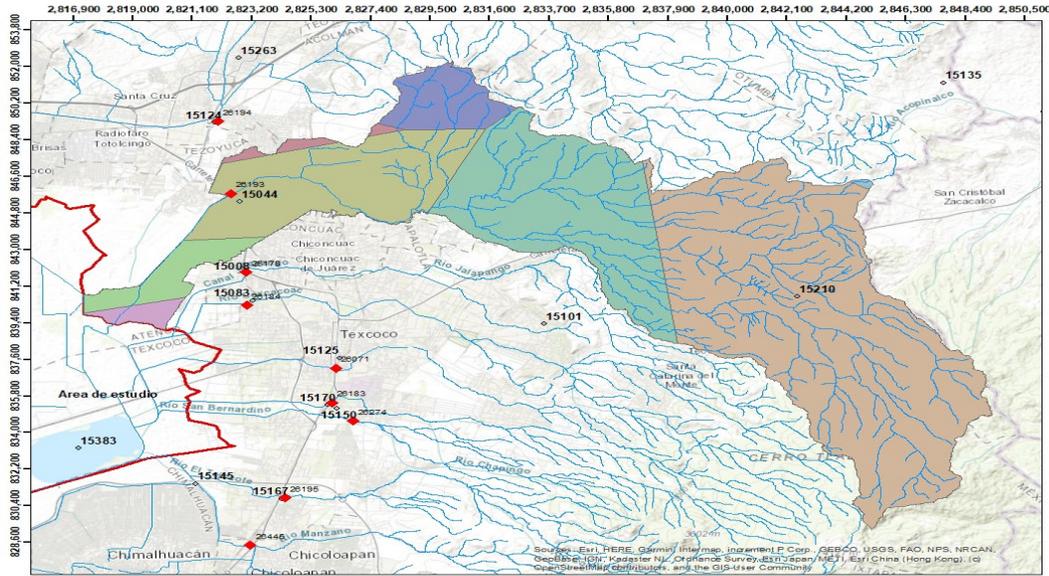
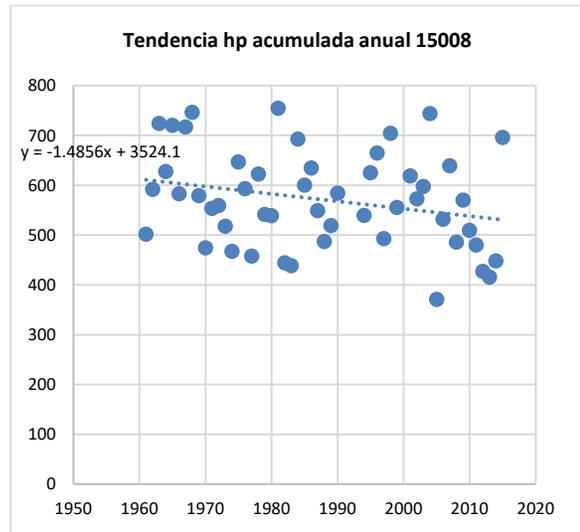
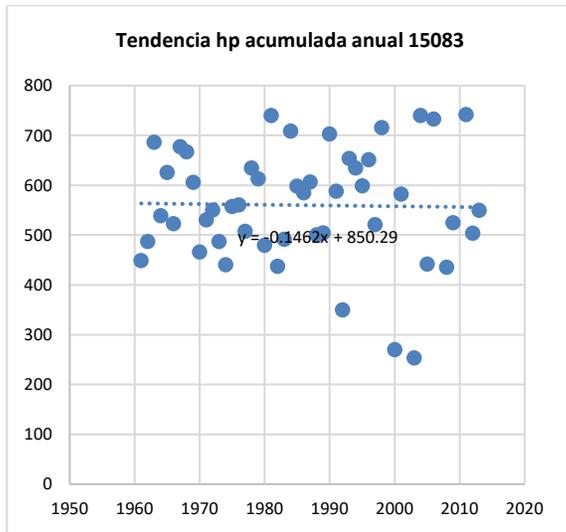


Figura 3-15. Cuenca Río Papalotla

Así mismo se hizo un análisis de las tendencias de los registros de precipitación acumulados anuales para cada una de las estaciones climatológicas las cuales se observan a continuación:



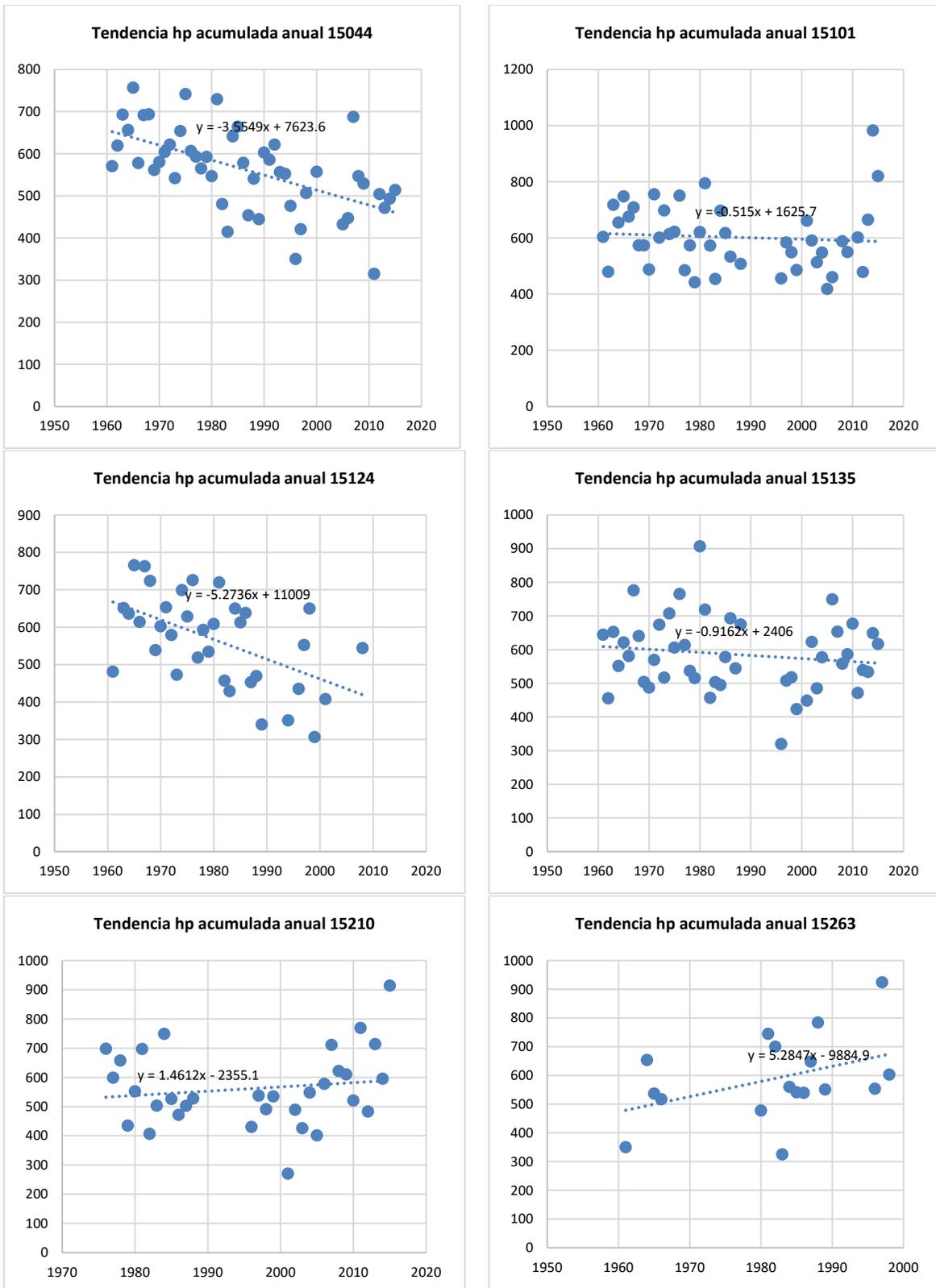


Figura 3-16. Comportamiento en el tiempo de las estaciones ubicadas en la cuenca del río Papalotla

La estación 15008 presenta una tendencia a la baja con 26 registros arriba de la media que es de 571.41 mm y 26 debajo de la media. La estación cuenta con un registro de 370 mm acumulado anual para el año 2005. La estación 15044 presenta una tendencia a la baja con un acumulado anual promedio de 562.98 mm registrando 30 datos arriba de la media y 20 por debajo de la media. El registro mínimo se presentó en el año 2011 con 315 mm acumulados anuales. La estación 15083 presenta una tendencia muy ligera hacia la baja con un promedio de 559.95 mm acumulados anuales siendo 24 registros arriba de la media y 25 por debajo de la media con 253.1 mm acumulados en el año 2000.

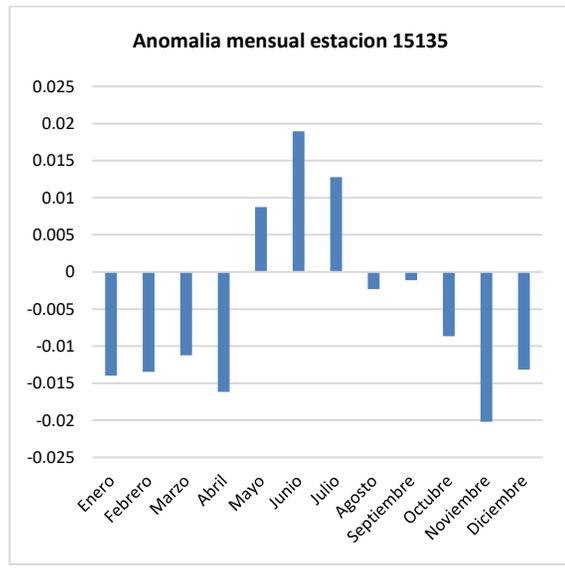
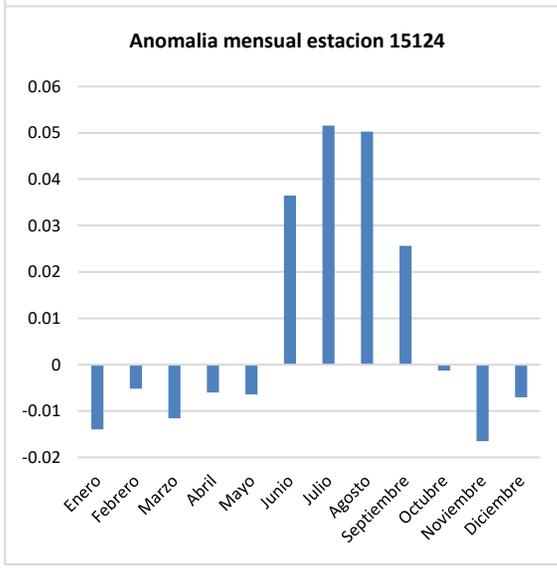
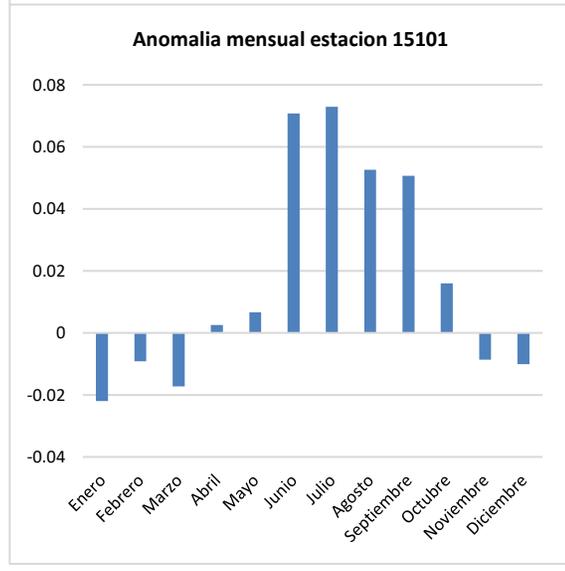
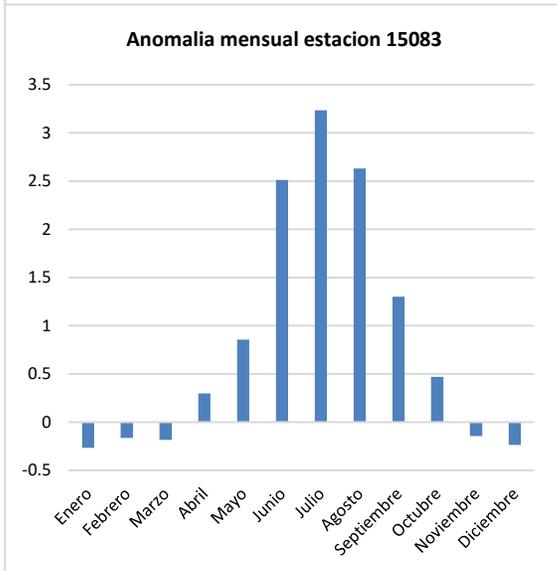
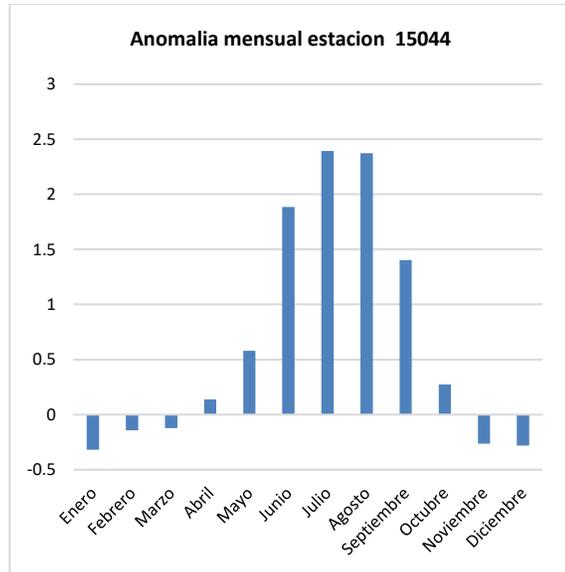
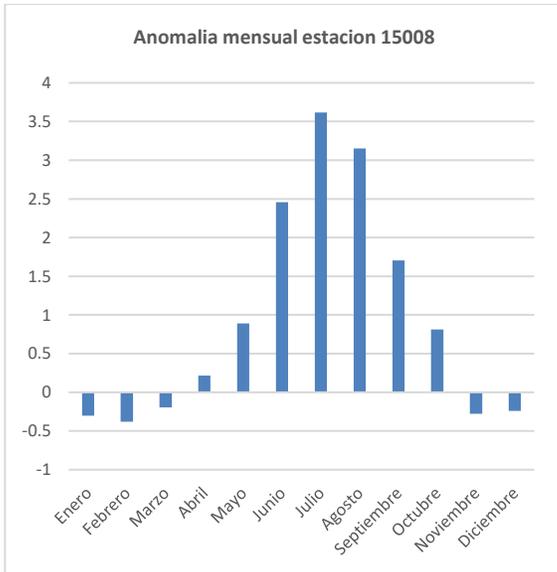
La estación 15101 presenta una ligera tendencia hacia la baja con 602.83 mm acumulados por año teniendo registrados 19 datos arriba de la media y 25 debajo de la media, todos los años acumularon registros mayores a los 400 mm siendo el menor el 2005 con 419 mm. La estación 15124 presenta una marcada tendencia a la baja con un promedio anual acumulado de lluvia de 566.28mm con 19 registros arriba de la media y 16 debajo de la media el menor valor registrado de lluvia acumulada fue el año de 1999 con 306.5 mm.

La estación 15135 presenta una tendencia a la baja con 21 registros por arriba del promedio que es 585.73 mm y 25 por abajo del promedio el menor valor registrado fue de 320 mm acumulados en el año 1996. La estación 15210 presenta una tendencia al alta con 26 registros por arriba del promedio que es 561.59mm y 6 por abajo del promedio el menor valor registrado fue de 270.6 mm en el año 2001.

La estación 15263 presenta una tendencia al alta con 7 registros por arriba del promedio que es 588.84mm y 10 por abajo del promedio el menor valor registrado fue de 324 mm en el año 1983. las estaciones 15008, 15044, 15083, 15101, 15124 y 15135 presentan una tendencia a la baja solo las estaciones 15210 y 15263 tienen una tendencia al alta.

Tabla 3-6. Anomalías mensuales de la precipitación. Climatológicas cuenca Río Papalotla

Meses	15008	15044	15083	15101	15124	15135	15210	15263
Enero	-0.301	-0.319	-0.267	-0.022	-0.014	-0.014	-0.016	-0.012
Febrero	-0.382	-0.143	-0.164	-0.009	-0.005	-0.013	-0.035	-0.014
Marzo	-0.197	-0.123	-0.183	-0.017	-0.012	-0.011	-0.018	-0.015
Abril	0.218	0.139	0.298	0.003	-0.006	-0.016	0.003	-0.011
Mayo	0.893	0.581	0.855	0.007	-0.006	0.009	0.013	-0.034
Junio	2.457	1.886	2.512	0.071	0.036	0.019	0.047	-0.025
Julio	3.616	2.394	3.235	0.073	0.052	0.013	0.030	-0.037
Agosto	3.152	2.373	2.631	0.053	0.050	-0.002	0.053	-0.014
Septiembre	1.706	1.404	1.302	0.051	0.026	-0.001	0.022	-0.047
Octubre	0.814	0.272	0.468	0.016	-0.001	-0.009	0.008	-0.035
Noviembre	-0.277	-0.263	-0.143	-0.009	-0.016	-0.020	-0.011	-0.019
Diciembre	-0.242	-0.280	-0.237	-0.010	-0.007	-0.013	-0.009	-0.015



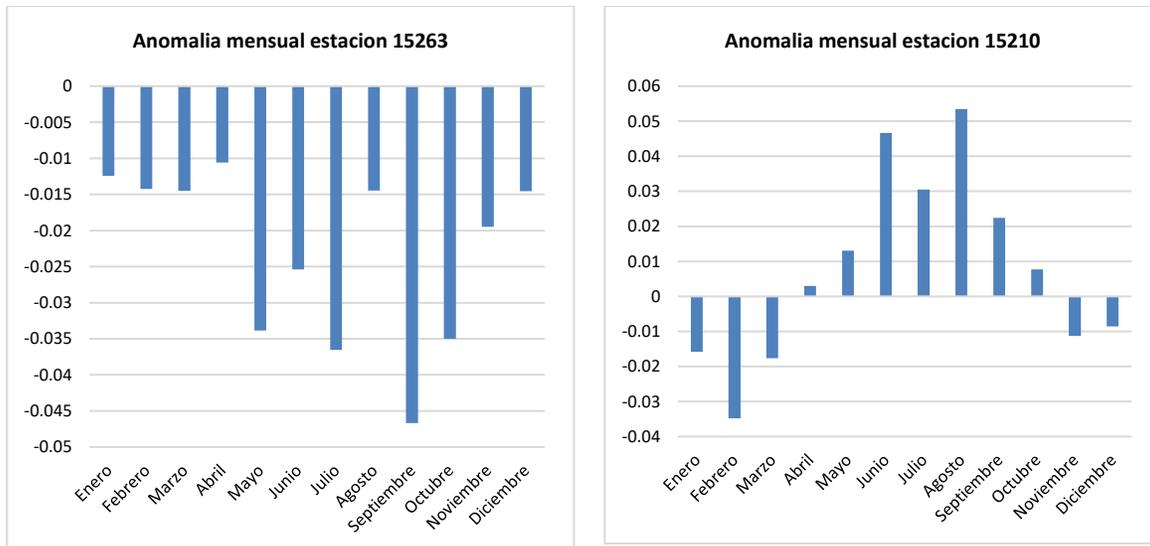


Figura 3-17. Anomalías mensuales de las estaciones climatológicas ubicadas en la cuenca del río Papalotla

De acuerdo a la anterior categorización se tiene que para las ocho estaciones climatológicas de la cuenca Río Papalotla, se alcanza la categoría ligeramente seca en los meses de estiaje noviembre a marzo para las estaciones 15008, 15044, 15083 y 15210 para la estación 15124 de octubre a mayo, para la estación 15135 desde agosto hasta abril y la estación 15263 está en ligeramente seco los 12 meses del año de acuerdo a la categorización antes descrita sin embargo de acuerdo a la tendencia está a presentado un comportamiento a la alza en cuanto a la cantidad de lluvia precipitada se tiene como datos significativo que en 1983 se registró una lluvia anual acumulada muy por debajo del promedio histórico de las cuencas que drenan hacia el PELT con 324 mm siendo el mes de septiembre el que presenta la mayor anomalía. Pero también se tienen que las estaciones 15008, 15044 y 15083 alcanzan la categoría extremadamente lluviosa en los meses de junio a agosto.

B. Cuenca Río Coxacoaco

Se origina a partir de la unión de dos vertientes que recogen las corrientes derivadas de la zona montañosa del Este del municipio de Texcoco. Una de ellas viene de las poblaciones de Nativitas y San Dieguito, y la otra de San Miguel Tlaixpan. Cruza por el municipio de Atenco, para continuar su recorrido y descargar en el vaso del ex lago de Texcoco. Su longitud aproximada es de 34.25 km. Tiene una aportación media anual de 4.17 millones de metros cúbicos. La ubicación de la Cuenca Río Coaxacoaco se aprecia en la Figura siguiente, así como sus estaciones climatológicas.

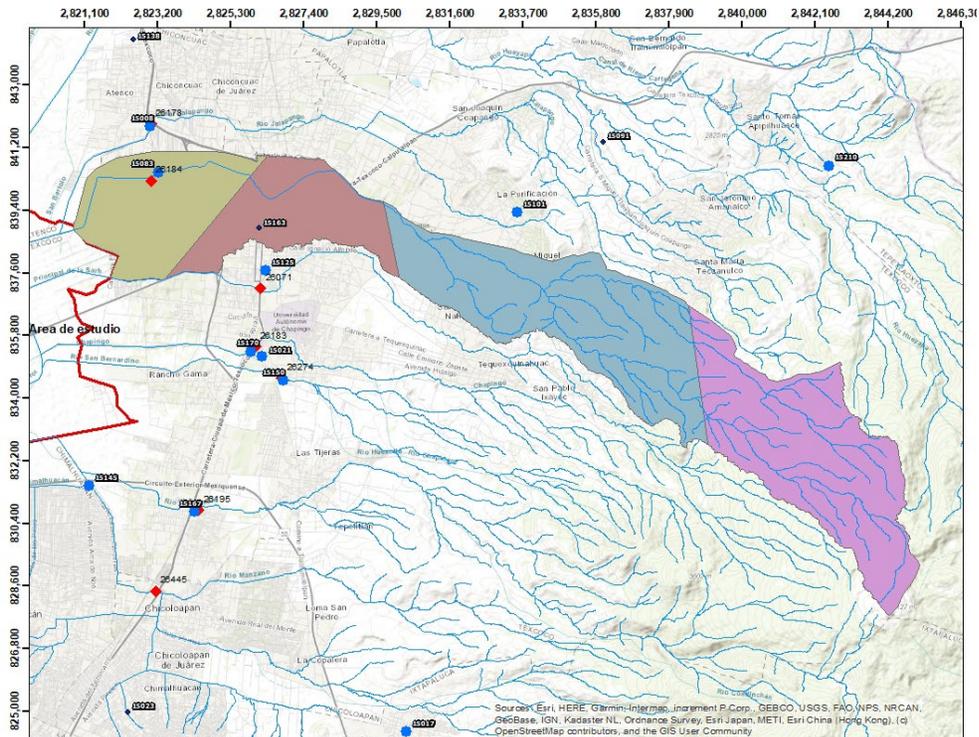


Figura 3-18. Cuenca Río Coaxaco

Así mismo se hizo un análisis de las tendencias de los registros de precipitación acumulados anuales para cada una de las estaciones climatológicas las cuales se muestran a continuación.

La estación 15083 presenta una tendencia muy ligera hacia la baja con un promedio de 559.95 mm acumulados anuales siendo 24 registros arriba de la media y 25 por debajo de la media con 253.1 mm acumulados en el año 2000. La estación 15101 presenta una ligera tendencia hacia la baja con 602.83 mm acumulados por año teniendo registrados 19 datos arriba de la media y 25 debajo de la media, todos los años acumularon registros mayores a los 400 mm siendo el menor el 2005 con 419 mm. La estación 15125 presenta una tendencia a la baja con 567.44 mm acumulados anuales en promedio, con 22 registros arriba de la media y 20 por debajo de la media el valor mínimo acumulado anual promedio es el 313 mm en el año 1991. La estación 15210 presenta una tendencia a la alta con 26 registros por arriba del promedio que es 561.59mm y 6 por abajo del promedio el menor valor registrado fue de 270.6 mm en el año 2001. La estación 15263 presenta una tendencia a la alta con 7 registros por arriba del promedio que es 588.84mm y 10 por abajo del promedio el menor valor registrado fue de 324 mm en el año 1983.

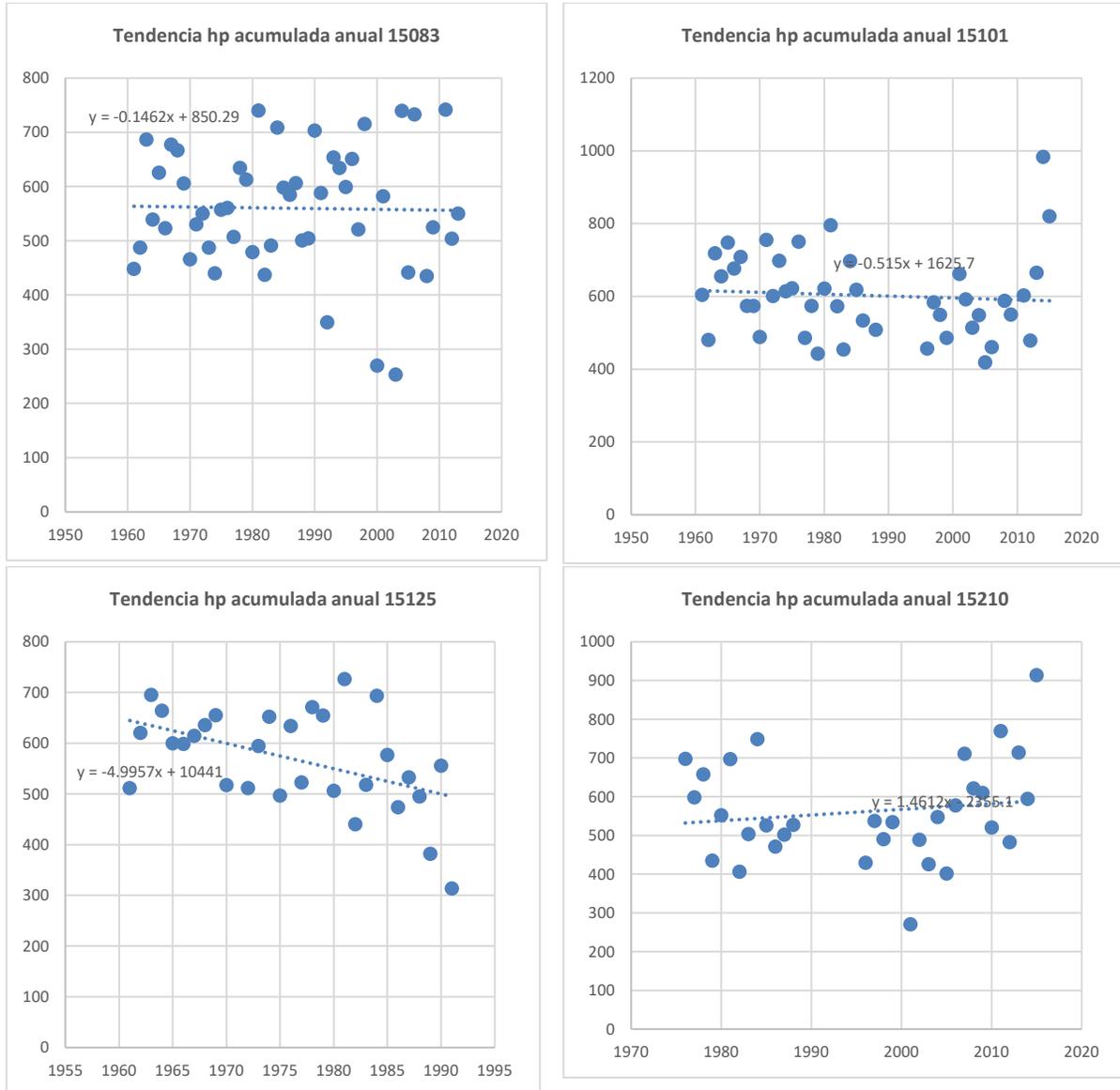


Figura 3-19. Comportamiento en el tiempo de las estaciones 15083, 15101, 15125 y 15210

A partir de los datos mensuales se llevó a cabo el cálculo de las anomalías para cada una de las estaciones climatológicas.

Tabla 3-7. Anomalías mensuales de la precipitación. Climatológicas cuenca Río Coaxcoaco

Meses	15083	15101	15125	15210
Enero	-0.267	-0.022	-0.015	-0.016
Febrero	-0.164	-0.009	-0.015	-0.035
Marzo	-0.183	-0.017	-0.018	-0.018
Abril	0.298	0.003	-0.004	0.003
Mayo	0.855	0.007	0.010	0.013
Junio	2.512	0.071	0.047	0.047
Julio	3.235	0.073	0.071	0.030
Agosto	2.631	0.053	0.046	0.053

Meses	15083	15101	15125	15210
Septiembre	1.302	0.051	0.020	0.022
Octubre	0.468	0.016	0.005	0.008
Noviembre	-0.143	-0.009	-0.009	-0.011
Diciembre	-0.237	-0.010	-0.013	-0.009

De acuerdo con la anterior categorización se tiene que para las 4 estaciones climatológicas de la cuenca Rio Coaxcoaco, se alcanza la categoría ligeramente seca en los meses estiaje noviembre a marzo para las estaciones, 15083, 15101 y 15210 para la estación 15125 es de noviembre a abril, la estación 15083 presenta la categoría extremadamente lluviosa para los meses de junio a agosto. La Figura 3-20 presenta las anomalías mensuales en cada estación.

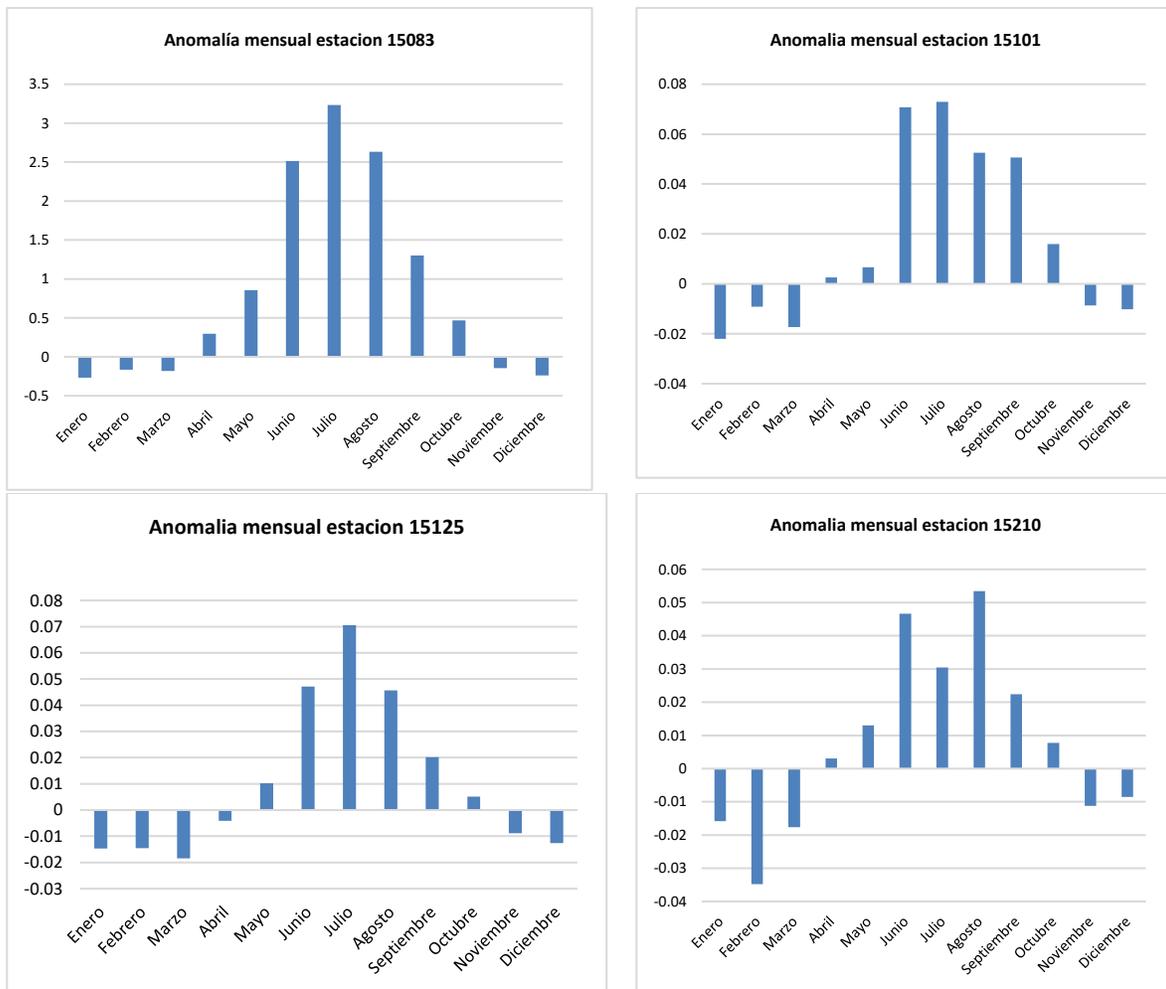


Figura 3-20. Anomalías mensuales de las estaciones climatológicas de la cuenca del río Coaxcoaco

C. Cuenca Río Chapingo

Tiene su origen en una serie de corrientes que provienen de los cerros Tearco y Tecorral. Cruza las poblaciones de Tequexquináhuac, San Luis Huexotla y San Xate Huexotla y continúa hasta descargar a la zona del ex vaso de Texcoco.

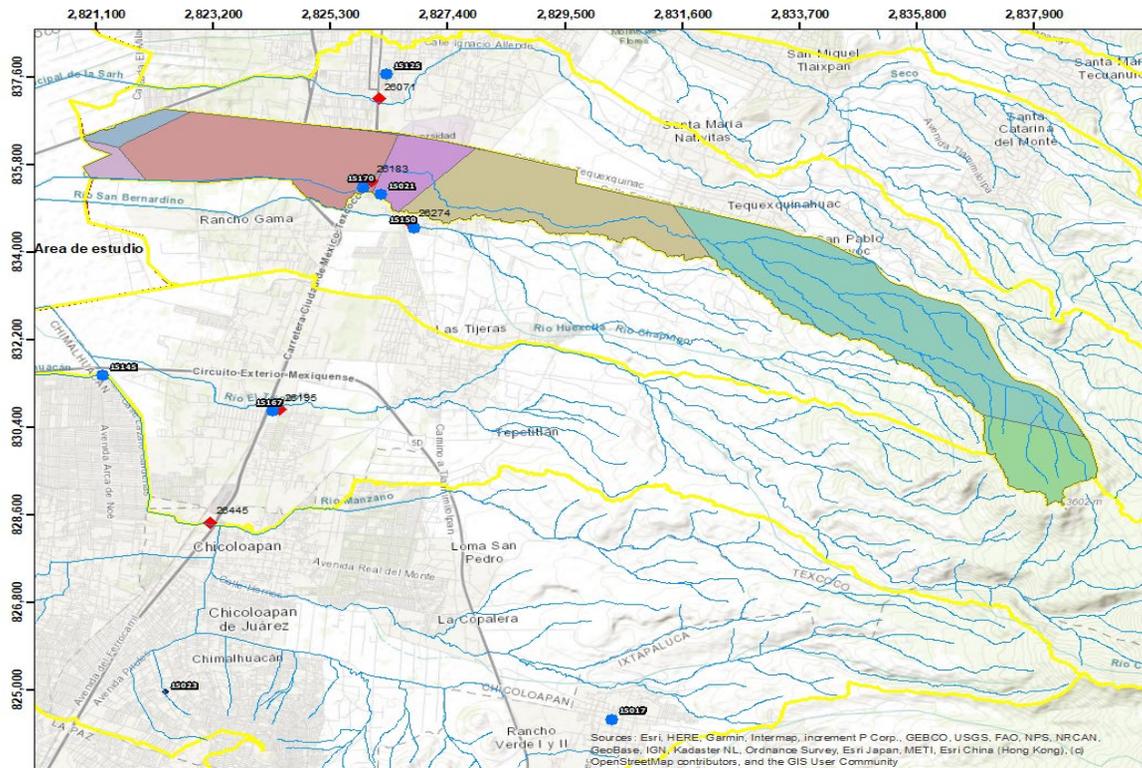
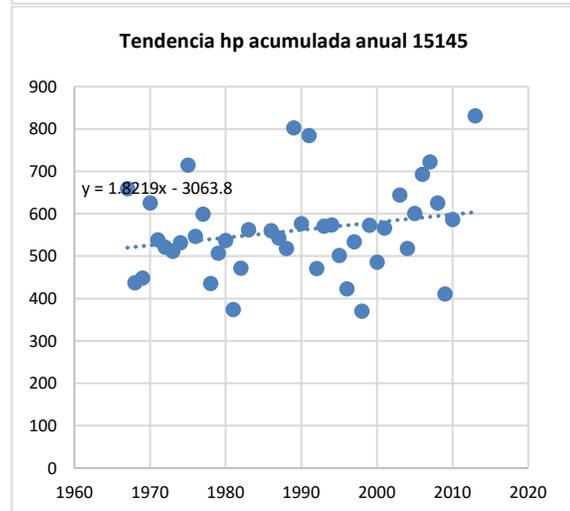
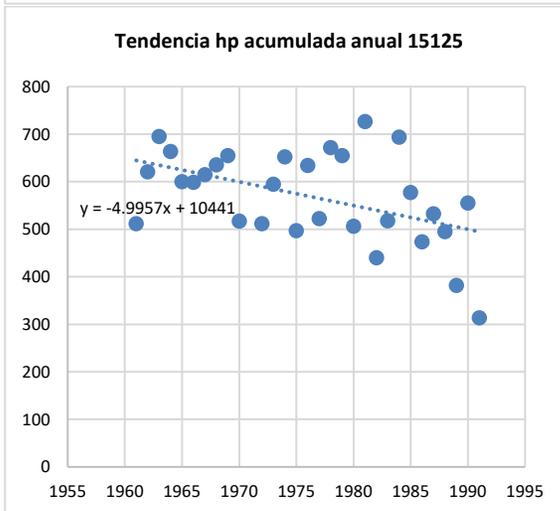
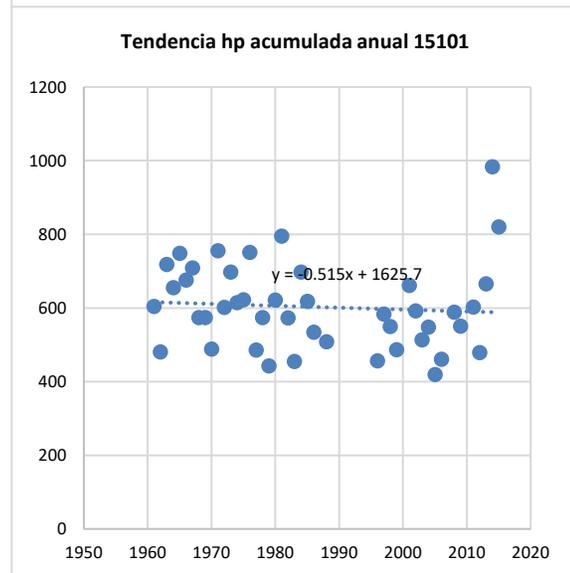
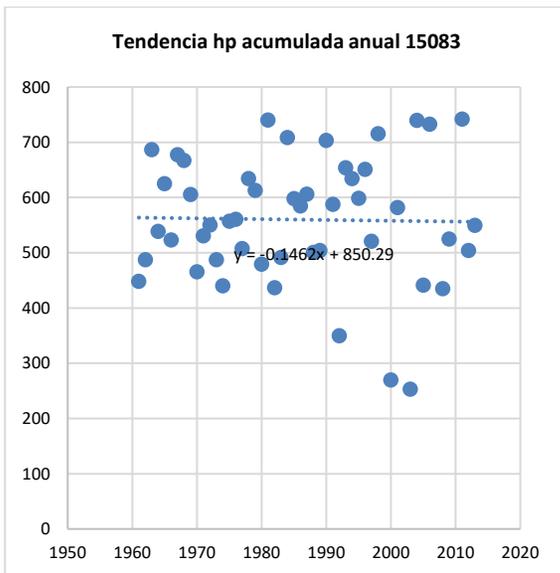
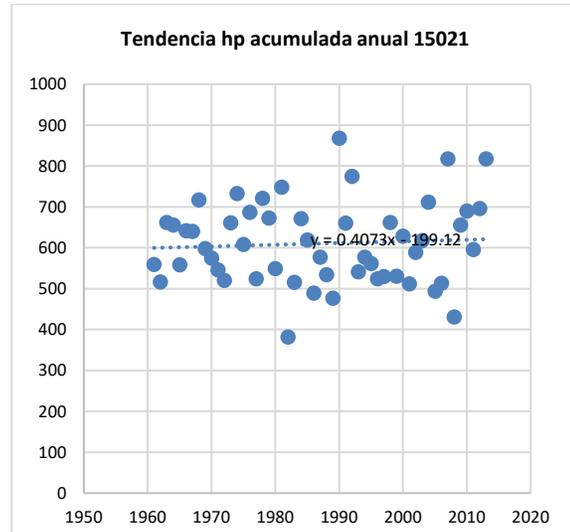
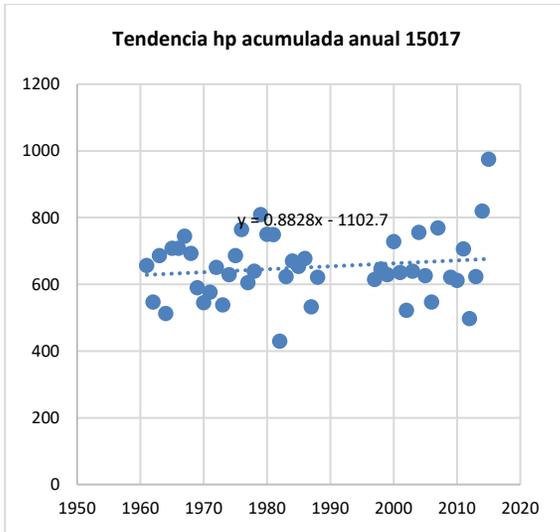


Figura 3-21. Cuenca Río Chapingo

Así mismo se hizo un análisis de las tendencias de los registros de precipitación acumulados anuales para cada una de las estaciones climatológicas las cuales se observan a continuación:

La estación 15017 tiene una tendencia ligeramente al alta con 651 mm de promedio acumulado anual y presenta 25 registros arriba de la media y 21 abajo del promedio, el valor más bajo para la estación 15017 es de 429 mm para el año de 1982, La estación 15021 tiene una tendencia al alta con un promedio de 610.17 mm acumulados anuales, con 25 registro arriba del promedio y 29 por debajo del promedio, el registro mínimo se presentó en el año de 1982 con 381.4 mm. La estación 15083 presenta una tendencia muy ligera hacia la baja con un promedio de 559.95 mm acumulados anuales siendo 24 registros arriba de la media y 25 por debajo de la media con 253.1 mm acumulados en el año 2000. La estación 15101 presenta una ligera tendencia hacia la baja con 602.83 mm acumulados por año teniendo registrados 19 datos arriba de la media y 25 debajo de la media, todos los años acumularon registros mayores a los 400 mm siendo el menor el 2005 con 419 mm.



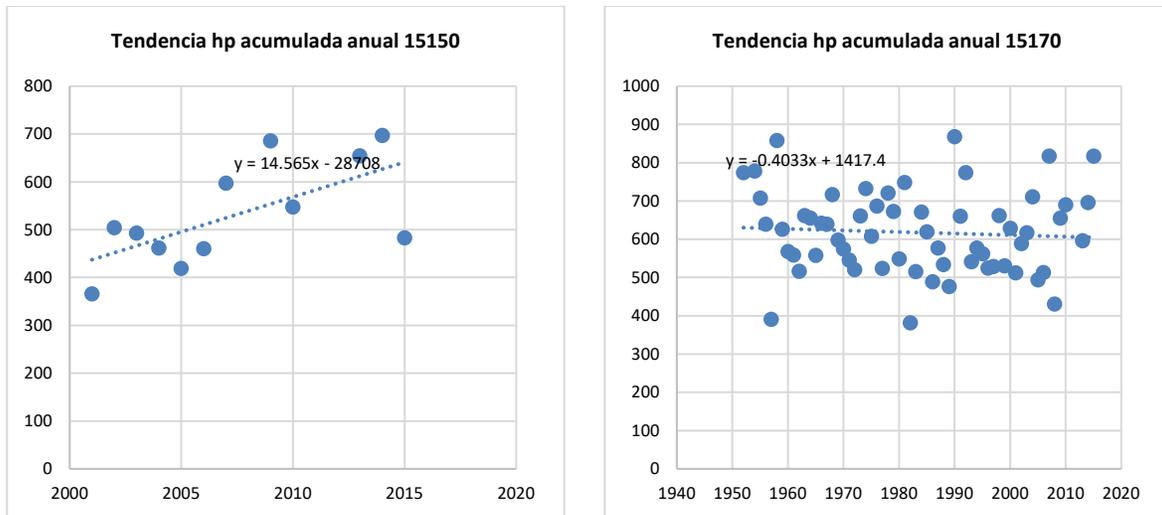


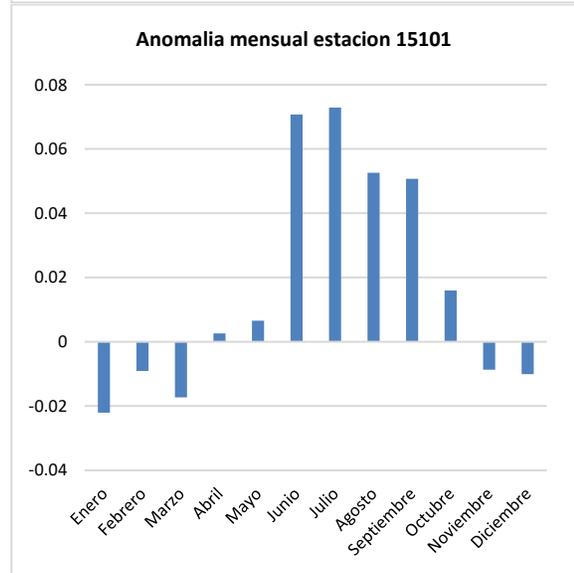
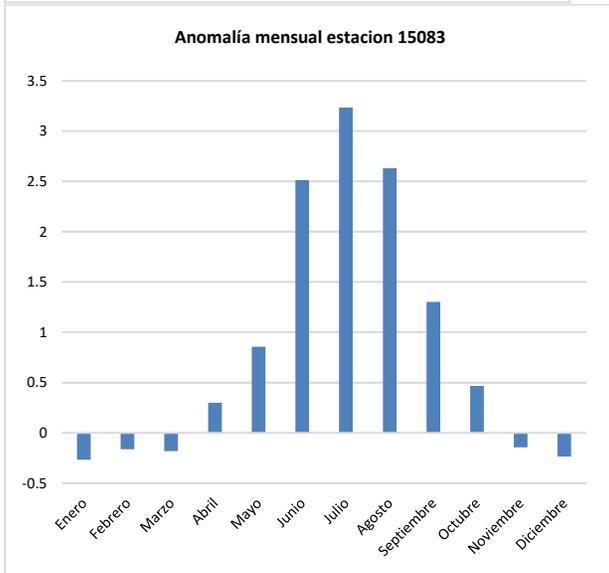
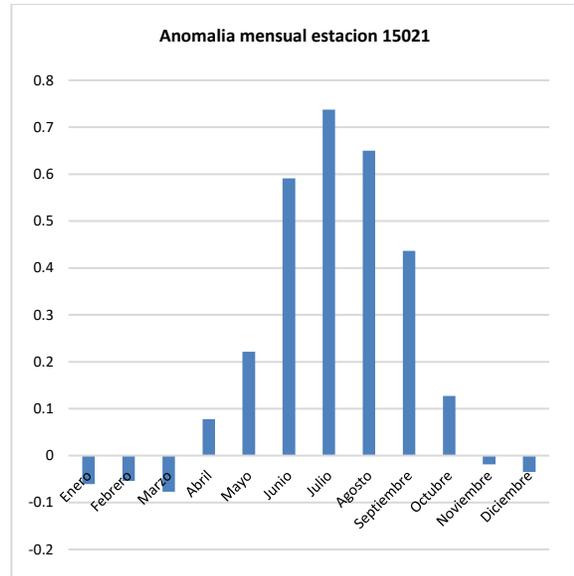
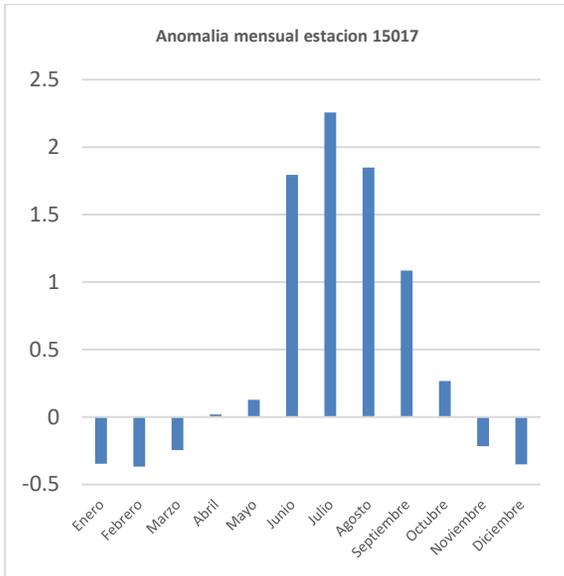
Figura 3-22. Comportamiento en el tiempo de las estaciones 15017, 15021, 15083, 15101, 15125, 15145, 15150 y 15170

La estación 15125 presenta una tendencia a la baja con 567.44 mm acumulados anuales en promedio, con 22 registros arriba de la media y 20 por debajo de la media el valor mínimo acumulado anual promedio es el 313 mm en el año 1991.

La estación 15145 presenta una tendencia al alta con 560 mm en promedio anual, el valor más bajo registrado es de 370.7mm en 1999 con 21 registros arriba del promedio y 22 abajo del promedio. La estación 15050 tiene pocos registros del 2001 al 2015 pero su promedio anual es de 530mm el valor más bajo es de 366 mm registrado en el año 2001, cuenta con 5 registros arriba de la media y 7 debajo de la media. La estación 15170 mantiene una constante ligeramente a la baja con 617 mm en promedio anual con 30 registros arriba de la media y 31 debajo de la media, el valor mínimo registrado en la estación es de 381.4 mm en el año de 1982.

Tabla 3-8. Anomalías mensuales de la precipitación. Climatológicas cuenca Río Chapingo

	15017	15021	15083	15101	15125	15145	15150	15170
Enero	-0.347	-0.061	-0.267	-0.022	-0.015	-0.012	-0.002	-0.061
Febrero	-0.366	-0.054	-0.164	-0.009	-0.015	-0.005	-0.047	-0.054
Marzo	-0.245	-0.077	-0.183	-0.017	-0.018	-0.005	-0.028	-0.077
Abril	0.019	0.077	0.298	0.003	-0.004	0.010	0.021	0.077
Mayo	0.127	0.221	0.855	0.007	0.010	0.023	0.014	0.221
Junio	1.795	0.591	2.512	0.071	0.047	0.085	0.146	0.591
Julio	2.257	0.738	3.235	0.073	0.071	0.097	0.071	0.738
Agosto	1.848	0.650	2.631	0.053	0.046	0.122	0.122	0.650
Septiembre	1.086	0.436	1.302	0.051	0.020	0.075	0.055	0.436
Octubre	0.266	0.127	0.468	0.016	0.005	0.027	0.038	0.127
Noviembre	-0.216	-0.019	-0.143	-0.009	-0.009	-0.021	-0.007	-0.019
Diciembre	-0.350	-0.035	-0.237	-0.010	-0.013	-0.016	-0.004	-0.035



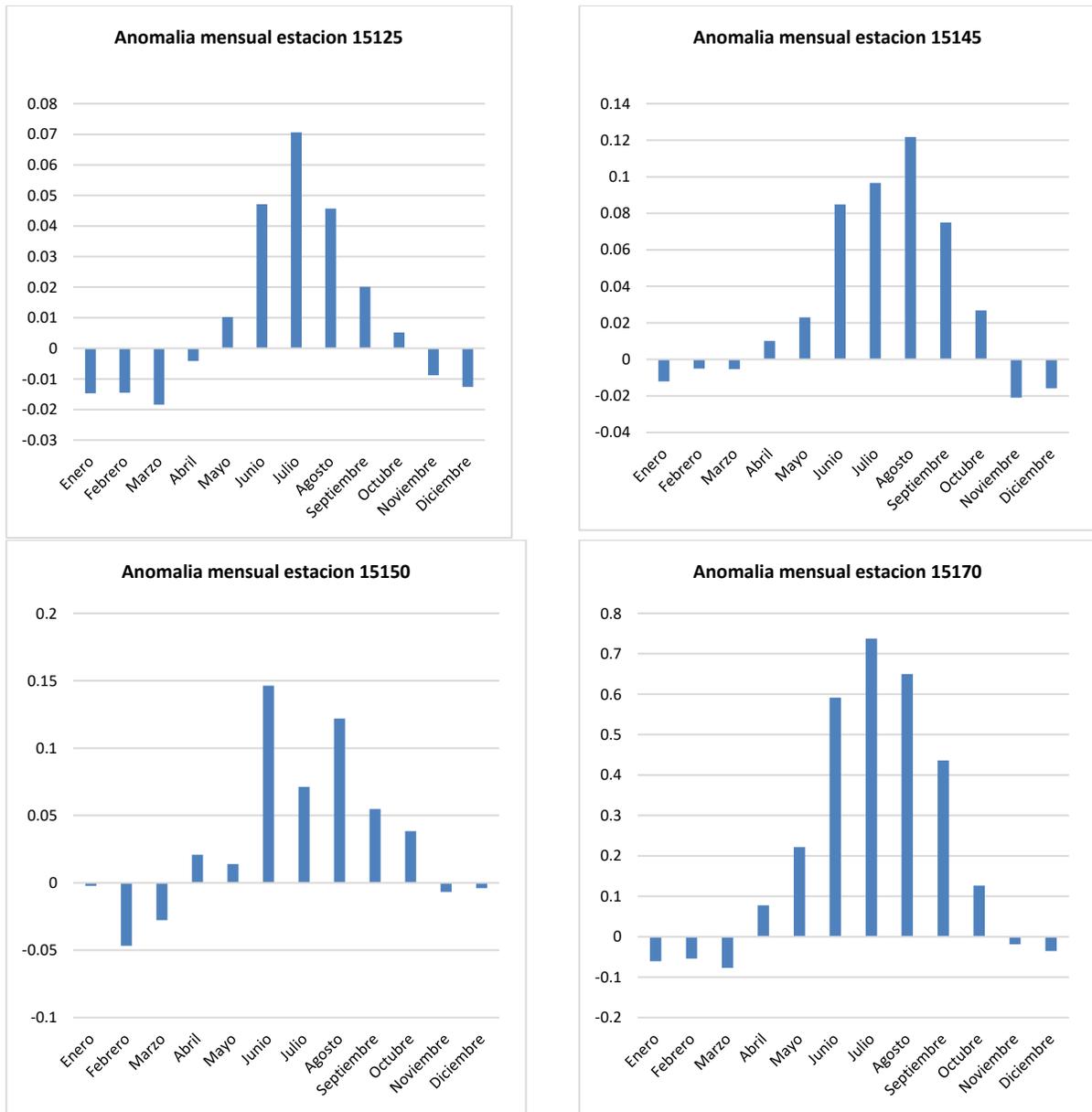


Figura 3-23. Anomalías mensuales de las estaciones climatológicas ubicadas en la cuenca del río Chapingo

De acuerdo a la anterior categorización se tiene que para las 8 estaciones climatológicas de la cuenca Texcoco, se alcanza la categoría ligeramente seca en los meses estiaje noviembre a marzo para las estaciones, 15017, 15021, 15083, 15101 15145, 15150, 15170 y 15210 para la estación 15125 es de noviembre a abril, las estaciones 15017 y 15083 presenta la categoría extremadamente lluviosa para los meses de junio a agosto. Para la cuenca Río Chapingo no existe una tendencia marcada hacia la sequía ya que la totalidad de las estaciones en el periodo de lluvias registran una categoría normal.

Análisis hidrométrico

El análisis hidrométrico se divide en dos partes, el correspondiente a gastos medios, para definición de escenarios y el análisis de frecuencia.

Análisis de gastos medios y definición de escenarios

Se revisaron los registros disponibles de las estaciones hidrométricas que se encuentran aforando las subcuencas que confluyen al lago de Texcoco, Tabla 3-9.

Tabla 3-9. Estaciones hidrométricas convencionales que confluyen al lago de Texcoco

Clave estación	Año inicio registro	Año fin registro
26071	1945	2014
26178	1944	2010
26183	1946	2014
26184	1946	2014
26193	1945	2008
26194	1945	2003
26195	1946	1999
26274	1961	2011
26445	1978	1990

Dentro de la revisión de las bases de datos se encontraron las siguientes características relevantes de los registros:

- Los registros de todas las estaciones presentan faltantes, como ejemplo se menciona la estación 26071, esta carece del registro del año 1990 al año 2005. Asimismo, en varios de sus años, su valor acumulado es pequeño a causa de muchos ceros, que bien pueden deberse a que no hubo registro o bien no se realizó dicho registro
- Lo señalado en el numeral anterior se presenta para los registros de todas las estaciones revisadas.
- La estación 26445 fue excluida del análisis por lo corto de su registro (9 años).

Por lo anterior, se estableció como criterio trabajar para esta primera caracterización de cada uno de los registros, utilizar la información existente, considerando solamente el periodo temporal que cuenta con información a fin de no agregar más incertidumbre a los cálculos que se presentan.

Para caracterizar cada registro se trabajó con la frecuencia anual, debido a que con ella es posible alcanzar el objetivo de establecer las “clases” de “año húmedo”, “año medio” y “año seco”.

En cada caso se halló que existen valores que caen en los extremos del registro, es decir valores muy grandes o bien muy pequeños. Los primeros pueden deberse a la

presencia de algún ciclón o tormenta singular en la zona, pero sabemos que su incidencia en el registro no solo depende de la distancia de la estación al meteoro. En tanto los registros con valores pequeños, una posible explicación de ello puede ser la falta de lectura de mediciones y se colocó cero en ella, o bien que efectivamente el registro fue cero.

Como es necesario más información para dilucidar estas circunstancias en cada caso, en primera instancia lo que se decidió fue eliminar los extremos considerando que son situaciones no habituales.

Y con el registro reducido, se procedió a dividirlo en cuatro partes o “clases”, con la consideración de que el espacio de los años húmedos corresponde a la cuarta parte más alta, los años medios a la mitad de esas “clases” y los años secos a la cuarta parte más baja.

Es evidente que no hay homogeneidad entre los valores de todos los registros de las estaciones, de ahí que no haya una total coincidencia en las “clases” al observar los años en que se presentan en cada uno de los registros de las diferentes estaciones.

Una mayor precisión en el establecimiento de estos límites, requiere de incorporar al análisis con otras variables.

Para mostrar el ejercicio realizado, se presenta la Tabla 3-10 que acompaña al presente texto, que corresponde al registro de la estación 26274.

Tabla 3-10. Registro de escurrimiento anual de la estación hidrométrica 26274

Estación	26274	Estación	26274	Estación	26274
Año	Escurrecimiento miles de m ³	Año	Escurrecimiento miles de m ³	Año	Escurrecimiento miles de m ³
1991	4322.96	1998	1194.52	1983	180.61
1966	3922.35	1962	1071.31	1988	127.16
1992	2514.9	1969	957.26	1996	119
1961	2143.32	1974	951.05	1982	109.67
1968	2098.19	1979	774.32	1986	79
1990	2046.82	1985	599.34	1980	55.11
1965	2005.86	1981	595.61	1987	26.58
1963	1846.28	1971	567.92	2001	20.95
1970	1771.79	1978	530.47	1999	0
2003	1727	1976	442.64	2006	0
1984	1711.46	1993	378.27	2007	0
1973	1698.39	1975	371.25	2008	0
1967	1587.28	1997	356.93	2009	0
1972	1323.63	1989	330.7	2010	0
1994	1301.63	1977	188.62	2011	0
1964	1261.13	1995	185.3	1959	

Estación	26274	Estación	26274
Año	Escorrentamiento miles de m ³	Año	Escorrentamiento miles de m ³
1960		2002	

En la parte más alta de ella aparece los valores más grandes, mismos que se consideran extraordinarios. En este caso son solo dos valores que corresponden a los años 1991 y 1966.

Posteriormente en color azul están indicados en color azul los años que se consideran “húmedos”, en color verde los años “medios” y en color marrón los años “secos”.

Lo anotado en color negro son valores pequeños, de los cuál ya se ha comentado.

De manera gráfica se muestra en el gráfico siguiente, los registros de las estaciones revisados, con sus valores acomodados de mayor a menor.

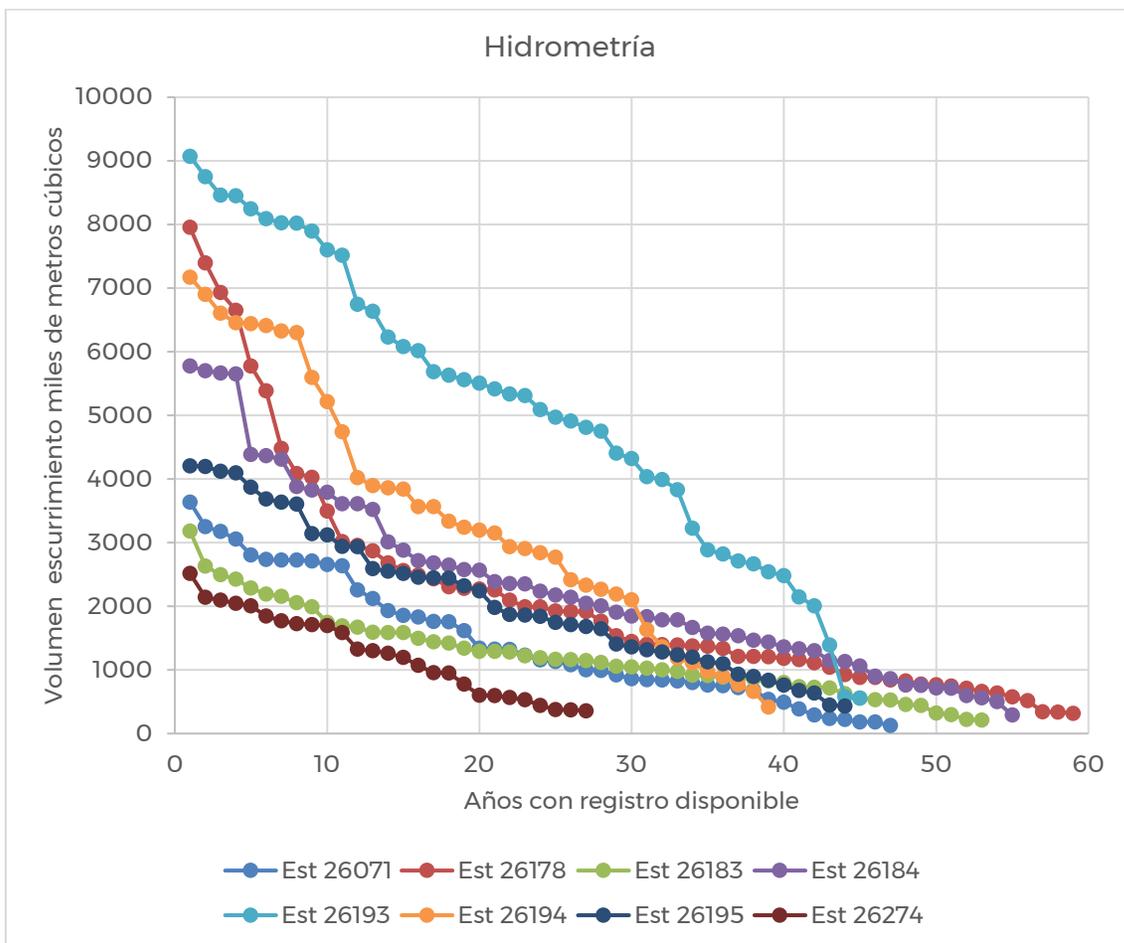


Figura 3-24. Volumen de escurrimiento medio anual registrado en las estaciones hidrométricas convencionales

Como rasgo significativo, está el cruce de las estaciones 26194 y 26193, con estaciones que registraron valores menores pasados 30 y 40 años respectivamente, así como el decaimiento importante de la estación 26178.

En la Figura 3-24, se observa que la mayor parte del registro se mueve entre los valores de 4000 y 300.

A. Selección de años comunes en las estaciones para clasificación hecha.

Para el ejercicio de modelación utilizando los registros como se encuentran, hecha la clasificación antes descrita, y tratando sea el mismo año para todas las estaciones, y cumpla además con el requisito de tener el registro completo durante todo el año a nivel diario; se establecen los siguientes periodos temporales para los denominados años “húmedo”, “promedio” y “seco”, Tabla 3-11.

Tabla 3-11. Periodos temporales húmedo, promedio y seco

Clase de año	Estación	Año	Estación	Año
Húmedo	26071	1955	26193	1955
	26178	1955	26194	1955
	26183	1955	26195	1955
	26184	1955	26274	-----
Medio	26071	1961	26193	1961
	26178	1961	26194	1961
	26183	1961	26195	1961
	26184	1961	26274	1961
Seco	26071	1978	26193	1978
	26178	1978	26194	1978
	26183	1978	26195	1978
	26184	1978	26274	1978

Tras lo antes descrito, se colocó el registro por año de cada estación en una columna para, agrupándolos según la tabla inmediata anterior, esto es, en Húmedo, Medio y Seco.

Análisis de frecuencia en los nueve ríos que vertiente al lago de Texcoco

El análisis de frecuencia de la zona de estudio se realiza evaluando diferentes distribuciones de probabilidad, para nueve estaciones hidrométricas identificadas (una estación por cada uno de los ríos). La información utilizada proviene del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS, 2016), publicado por la Comisión Nacional del Agua el 31 de julio de 2016. En la Tabla 3-12 y se muestra la ubicación de las estaciones hidrométricas localizadas.

Tabla 3-12. Estaciones hidrométricas de los nueve ríos.

Clave de estación hidrométrica	Subcuenca	Coordenadas UTM	
		x	y
26194	Río San Juan Teotihuacán	508326.74	2168548.64
26193	Río Papalotla	508707.67	2164983.67
26178	Río Xalapango	509175.23	2161080.28
26184	Río Coxacoaco	509147.26	2159451.18
26071	Río Texcoco	512238.45	2156287.32
26183	Río Chapingo	512064.96	2154596.68
26274	Río San Bernardino	512794.16	2153675.28
26195	Río Santa Mónica	510318.28	2149923.80
26445	Río Coatepec	509036.40	2147618.10

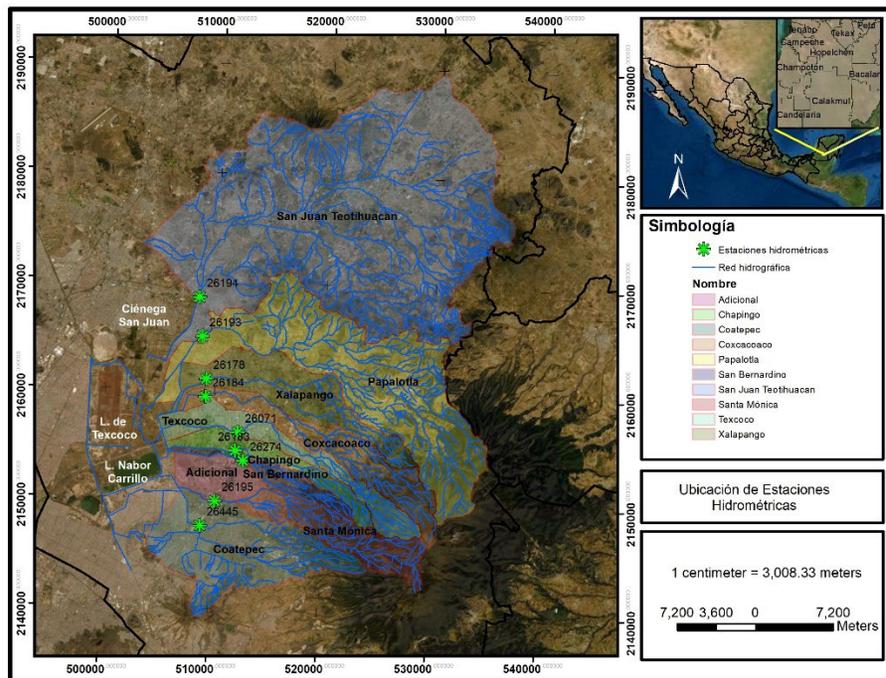


Figura 3-25. Ubicación de estaciones hidrométricas

En la tabla siguiente se muestran los registros de gastos máximos anuales de las nueve estaciones con datos que van desde el año de 1944 hasta 2014.

Tabla 3-13. Gastos máximos anuales de las estaciones hidrométricas.

Año	Estación hidrométrica								
	26194	26193	26178	26184	26071	26183	26274	26195	26445
Q, m ³ /s									
1944			7.42						
1945	25.6	9.22	13.2		19.7				
1946	9.36	19.4	9	14.3	60.1	22.5		27.2	
1947	45.4	48.7	6.34	21.2	35.5	54.1		50.2	
1948	13.1	53.7	19.3	39.233	53.4	30.9		30.8	
1949	10.2	78.7	15.1	39.9	27.7	11.9		15	
1950	10.8	53.3	15.7	42.4	22	21.8		25.6	
1951	12.4	60.9	10.1	40.1	30.03	22.4		44.9	
1952	12.6	55.6	28.7	36.8	24.5	22.8		63.1	
1953	10.3	55.7	8.4	32.6	28.6	12		29.3	

Año	Estación hidrométrica								
	26194	26193	26178	26184	26071	26183	26274	26195	26445
Q, m ³ /s									
1954	13	123	16.1	39.5	49.4	12.9		59.1	
1955	14.5	124	18.2	40.9	33.1	28.6		28.5	
1956	15.6	107	19.9	39.5	20.1	24.5		38.1	
1957	6.5	20.1	9.3	39.8	28.6	14.5		52.1	
1958	6.17	73.1	14.5	54.6	41.7	63.3		42.2	
1959	8.72	52	13.8	46.8	30.9	22.3		36	
1960	7.39	40.6	10.2	49.1	30.8	20.5		35.1	
1961	7.5	53.8	10.7	34.7	36.3	48.7	36.2	40.9	
1962	7.48	41.3	8.54	22.6	38.7	23.8	25.1	44.3	
1963	8.24	70.4	9.59	38.4	24.3	25.1	27	30.5	
1964	7.376	71	8.42	32.3	26.3	30.8	48	39.5	
1965	7.104	75.6	10.72	54.9	21.5	33.459	26.82	24	
1966	7.964	88.5	8.35	28.4	61.8	42.5	49.3	39.5	
1967	7.61	54.55	7.26	31.675	28.731	19.5	23.2	28.3	
1968	7.688	60	7.868	32.663	33.67	42.605	46.616	49.5	
1969	24.78	55.9	7.657	38.03	29.275	11.33	16.293	11.616	
1970	17.829	43.5	5.22	22.696	14.2	13.3	50	38	
1971	20.782	54.737	12.027	22.008	14.398	12.784	21.4	24.81	
1972	16.628	49	12.547	36.842	35	22.52	25.5	33.15	
1973	17.75	49.4	27.46	30.96	26.26	14.9	41.2	47.78	
1974	8.606	39	7.93	29.26	42.22	21.36	55.49	24.59	
1975	20.066	72.092	9.624	15.365	15.36	7.283	8.167	13.26	
1976	6.4	43.3	6.137	26.267	11.46	7.9	7.739	10.35	
1977	3.55	25.35	4.955	19.82	12.48	3.4	4.202	10.05	
1978	7.145	39.8	8.05	24.8	12.83	14.4	10.36	10.57	
1979	9.621	33.87	5.667	24.4	14.03	7.6	9.98	10.5	7.381
1980	5.5	31.65	4.327	15.24	2.02	2.656	13.17	6.67	9.345
1981	7.93	43	14	31.49	14.4	3.725	6.657	2.79	6.3
1982	13.59	37.28	8.7	3.9	9.9	1.178	4.391	1.864	2.447
1983	15.61	24.58	1.517	12.77	5.612	5.223	8.828	14.75	6.673
1984	21.233	44.33	4.98	22.3	8.32	2.832	7.445	8.867	
1985	4.713		9.489	25.97	0.687		4.675	7.17	2.386
1986	17.99	48	7.332	21.53	3.101	1.193	3.358	2.59	
1987	15.58	35.35	12.02	13.89	0.513	1.495	0.359	2.793	
1988	8.591		4.872	5.392	2.057	1.062	4.987	2.224	0.138
1989		10.09	3.943	9.534	1.432	1.171	3.024	1.284	0.224
1990		17.59	1.18	1.682		2.114	3.721	3.088	2.445
1991		3.001	1.55	13.919		3.446	3.682	4.831	
1992	0.21	2.644	3.263	13.069		1.928	4.054	4.62	
1993	0.125	2.471	29	2.386			2.166	8.207	
1994	0.355	2.265		2.86		0.954	2.235	2.18	
1995		4.061	5.504	3.437			0.277	11.243	
1996			5.962	11.985		3.31	4.044	3.288	
1997			0.958	1.336		1.961	0.368	4.626	
1998		17.609		5.381			3.535	4.818	
1999	4.698		9.433	9.615		2.284		0.001	
2000									
2001		23.424	5.826	3.171		1.198	0.197		
2002		1.57	2.378	3.091		1.623			
2003		1.419	6.446	5.942		2.477	1.826		
2004		22.514		2.487		2.743			
2005		7.195							
2006		1.409	1.19	2.003	3.983	2.75			

Año	Estación hidrométrica								
	26194	26193	26178	26184	26071	26183	26274	26195	26445
Q, m ³ /s									
2007		10.848	5.913	8.01	6.774	3.094			
2008		7.635	6.735						
2009			1.123		4.856	2.01			
2010			8.609	2.144	2.912	6.255			
2011					2.876	12.466			
2012				1.68	0.688				
2013				1.719	0.714	0.03			
2014				2.177	3.923	0.084			

De acuerdo con la tabla anterior, se analizan todas las estaciones que cuenten cuando menos con 30 años de registros de gastos máximos anuales. En la Tabla 3-14 se muestran las nueve estaciones, así como la cantidad de años usados para el análisis de frecuencia. Es importante mencionar que, aunque la estación 26445 (Río Coatepec) cuenta con nueve años de registros, esta fue analizada. Así mismo en algunos casos se eliminaron valores de gastos menores a 0.5 m³/s debido que eran cercanos a cero.

Tabla 3-14. Número de años usados para el análisis de frecuencia.

Clave de estación hidrométrica	Subcuenca	Número de años usados
26194	Río San Juan Teotihuacán	45
26193	Río Papalotla	58
26178	Río Xalapango	62
26184	Río Coxacoaco	64
26071	Río Texcoco	53
26183	Río Chapingo	59
26274	Río San Bernardino	36
26195	Río Santa Mónica	53
26445	Río Coatepec	9

El enfoque matemático para el análisis de frecuencias se basa en la suposición de una descripción matemática específica, conocida como distribución de probabilidades. Los parámetros de la distribución de probabilidades se definen como funciones de las estadísticas de las observaciones. El análisis de frecuencias de los datos de gastos máximos anuales, para para ocho estaciones hidrométricas, se realizó con el software AFA v.1.1, el cual fue desarrollado por el IMTA. Para esto se utilizaron las funciones de distribución de probabilidad (FDP) Normal, Exponencial de 1 y 2 parámetros, Lognormal de 2 y 3 parámetros, Gamma 2 y 3 parámetros, Log-Pearson 3 parámetro, General de Valores Extremos y Gumbel; la función Gumbel doble se calculó con el software Ax v.2.0, desarrollado por CENAPRED, así como la estación 26445 debido a la cantidad de datos (los resultados obtenidos de esta estación deben ser tomados con reserva).

En la Tabla siguiente, se muestran los resultados del error estándar de ajuste el cual nos indica la a FDP con mejor ajuste a los datos observados. En general la FDP Gumbel Doble fue seleccionada para las estaciones 26194, 26178, 26184, 26071, 26274 y 26195; la FDP Gumbel para la estación 26193; la FDP Gamma (2Parámetros) para la estación 26183 y la FDP Normal para la estación 26445.

Tabla 3-15. Error estándar de ajuste para cada FDP y estación.

FDP	Error Estándar de Ajuste																	
	26194		26193		26178		26184		26071		26183		26274		26195		26445	
	M	M. V.	M	M. V.	M	M. V.	M	M. V.	M	M. V.	M	M. V.	M	M. V.	M	M. V.	M	M. V.
Distribución Normal	3.56		7.28		2.20		3.63		3.88		5.91		7.19		4.81		1.2	
Distribución Exponencial (1 Parámetro)	4.04		11.61		2.64		7.87		5.07		2.32		4.37		6.41			
Distribución Exponencial (2 Parámetros)	1.99	1.98	8.04	11.24	1.28	2.02	5.8	7.34	4.25	5.06	2.32	2.78	4.52	4.99	5.54	6.08	1.53	1.46
Distribución Log Normal (2 Parámetros)	2.45		36.16		1.66		17.42		20.22		6.88		6.31		14.22		1.9	
Distribución Log Normal (3 Parámetros)	2.06	2.07	5.29	5.04	1.22	1.24	3.44	4.03	2.79	3.78	3.1	17.88	5.26	11.04	4.08	12.69	1.27	1.51
Distribución Gamma (2 Parámetros)	2.37	2.78			1.22	1.21	4.46	5.92			2.41	2.19					1.55	4.08
Distribución Gamma (3 Parámetros)	2.01	3.5	5.23	7.02	1.21	2.14	3.43	3.52	2.73	3.71	2.74	5.72	5.02	7.04	4.04	4.64	7.02	
Distribución Log Pearson Tipo III	2.45		100.1	38.19			34.73	18.21					7.59	6.57	24.91	14.99		
Distribución General de Valores Extremo	2.14		5.55		1.38		3.27		2.79		3.72		11.74		3.95			
Distribución Gumbel	2.47	3.03	5.28	4.98	1.30	1.49	4.02	4.00	2.79	2.72	3.42	4.47	5.2	6.36	4.15	4.16	1.28	1.46
Distribución Gumbel Doble	1.37		5.7		0.93		2.3		2.47		2.22		2.74		2.59		infinito	
Valor mínimo EEA	1.37		4.98		0.93		2.3		2.47		2.19		2.74		2.59		1.2	

M, método de momento.
M. V., método de máxima verosimilitud.

De acuerdo con lo anterior, en la Tabla 3-16 se muestran los parámetros de la FDP Gumbel Doble, para cada una de las estaciones (26194, 26178, 26184, 26071, 26274 y 26195).

Tabla 3-16. Parámetros de FDP Gumbel Doble para las estaciones ajustadas.

Parámetros	26194	26178	26184	26071	26274	26195
Alfa 1	0.258	0.300	0.087	0.096	0.139	0.085
Beta 1	8.597	5.986	10.616	9.715	6.256	10.008
Alfa 2	0.079	0.181	0.218	0.099	0.198	0.148
Beta 2	23.464	21.112	39.282	38.102	45.825	43.918
P	0.900	0.900	0.800	0.800	0.820	0.800

En la Tabla 3-18 se muestra los parámetros de la FDP Gumbel, para la estación 26193.

Tabla 3-17. Parámetros de FDP Gumbel para la estación ajustada.

Parámetros	26193
Alfa	23.90283
Beta	27.61701

En la Tabla 3-18 se muestran los parámetros de la FDP Gamma (2 Parámetros), para la estación 26183.

Tabla 3-18. Parámetros de FDP Gamma (2 Parámetros) para la estación ajustada.

Parámetros	26193
Alfa	15.32851
Beta	0.9601641

En la Tabla 3-19 se muestra los parámetros de la FDP Normal, para la estación 26445.

Tabla 3-19. Parámetros de FDP Normal para la estación ajustada.

Parámetros	26193
Mu	3.8889
Sigma	3.3706

En la Tabla 3-20 se muestran los valores de gastos máximos para diferentes periodos de retorno, y de acuerdo con la función de ajuste aplicada y cada una de las nueve estaciones hidrométricas.

Tabla 3-20. Valores de gastos máximos obtenidos para los diferentes periodos de retorno para cada estación hidrométrica analizada

Gasto en m ³ /s									
Tr	Río San Juan Teotihuacán	Río Papalotla	Río Xalapango	Río Coxcacacoaco	Río Texcoco	Río Chapingo	Río San Bernardino	Río Santa Mónica	Río Coatepec
	26194	26193	26178	26184	26071	26183	26274	26195	26445
2	10.6	36.4	7.8	19.3	17.6	10.2	11.3	18.9	3.9
5	16.2	63.5	13.1	38.8	36.3	23.6	32.9	41.9	6.7
10	21.5	81.4	18.6	44.2	45.7	33.9	47.1	49.3	8.2
20	29.6	98.6	23.8	49.1	53.7	44.3	51.7	55.4	9.4
50	42.5	120.9	29.7	56.2	63.6	58.4	56.8	63.1	10.8
100	51.9	137.6	33.7	62.6	70.8	69.3	60.5	69.1	11.7
200	61.0	154.2	37.6	69.7	77.9	80.3	64.1	75.3	12.6
500	72.7	176.1	42.8	79.8	87.3	95.2	68.8	84.1	13.6
1000	81.6	192.7	46.6	87.7	94.3	106.7	72.4	91.1	14.3
2000	90.2	209.3	50.5	95.7	101.4	118.4	76.0	98.5	15.0
5000	101.9	231.2	55.6	106.2	110.5	134.1	80.7	108.7	15.8
10000	111.1	247.8	59.4	113.8	117.4	146.2	84.6	116.2	16.4

A. Obtención de hidrogramas para diferentes periodos de retorno

Una vez obtenidos los gastos máximos para diferentes periodos de retorno se procedió a determinar la forma del hidrograma. El procedimiento aplicado consistió en seleccionar, del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS, 2016), hidrogramas a cada hora de 10 eventos que corresponde a los gastos máximos anuales registrado, en cada estación hidrométrica. Estos tienen duración de 12 horas, centrando el pico máximo a las 6 horas. En la Tabla 3-21 y Figura 3-26 se muestran los hidrogramas unitarios adimensionales obtenidos.

Tabla 3-21. Hidrogramas unitarios adimensionales, de cada estación hidrométrica.

Gasto unitario adimensional									
Horas	Río San Juan Teotihuacán	Río Papalotla	Río Xalapango	Río Coxacoaco	Río Texcoco	Río Chapingo	Río San Bernardino	Río Santa Mónica	Río Coatepec
	26194	26193	26178	26184	26071	26183	26274	26195	26445
1	0.048	0.012	0.104	0.012	0.006	0.002	0.010	0.051	0.025
2	0.085	0.012	0.189	0.012	0.005	0.002	0.010	0.051	0.025
3	0.153	0.012	0.160	0.012	0.004	0.002	0.010	0.051	0.025
4	0.857	0.152	0.176	0.012	0.004	0.002	0.010	0.051	0.144
5	0.934	0.270	0.409	0.183	0.004	0.423	0.010	0.376	0.483
6	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
7	0.531	0.597	0.467	0.785	0.654	0.499	0.348	0.447	0.751
8	0.475	0.270	0.334	0.399	0.471	0.270	0.138	0.127	0.338
9	0.419	0.201	0.152	0.124	0.131	0.107	0.091	0.042	0.297
10	0.363	0.154	0.108	0.108	0.097	0.089	0.136	0.039	0.260
11	0.309	0.116	0.148	0.092	0.065	0.087	0.051	0.039	0.395
12	0.257	0.075	0.096	0.079	0.011	0.085	0.030	0.039	0.315

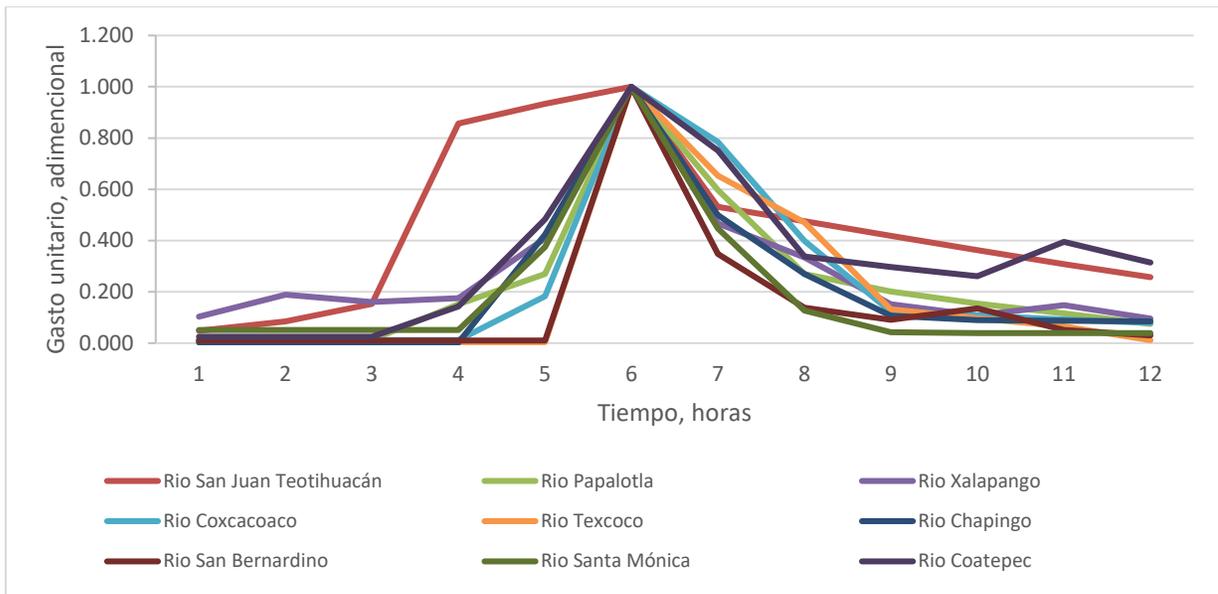


Figura 3-26 Hidrogramas unitarios adimensionales para cada estación hidrométrica

Una vez obtenido los hidrogramas unitarios adimensionales se procede a multiplicar los valores de cada curva por los gastos máximos de los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años de cada estación hidrométrica correspondiente.

En la Tabla 3-22 y Figura 3-27 se muestran los hidrogramas obtenidos para cada periodo de retorno de la estación 26194 (Río San Juan Teotihuacán).

Tabla 3-22. Hidrogramas estación hidrométrica, 26194.

Q, m ³ /s						
Horas	Tr 2	Tr5	Tr 10	Tr 20	Tr 50	Tr100
1	0.51	0.78	1.04	1.43	2.05	2.51
2	0.90	1.38	1.83	2.52	3.62	4.42
3	1.62	2.47	3.28	4.52	6.49	7.92
4	9.08	13.88	18.42	25.36	36.42	44.47
5	9.90	15.13	20.08	27.64	39.69	48.47
6	10.60	16.20	21.50	29.60	42.50	51.90
7	5.63	8.61	11.42	15.73	22.58	27.57
8	5.04	7.70	10.21	14.06	20.19	24.66
9	4.44	6.79	9.01	12.40	17.80	21.74
10	3.84	5.87	7.80	10.73	15.41	18.82
11	3.27	5.00	6.64	9.14	13.12	16.02
12	2.73	4.17	5.53	7.62	10.93	13.35

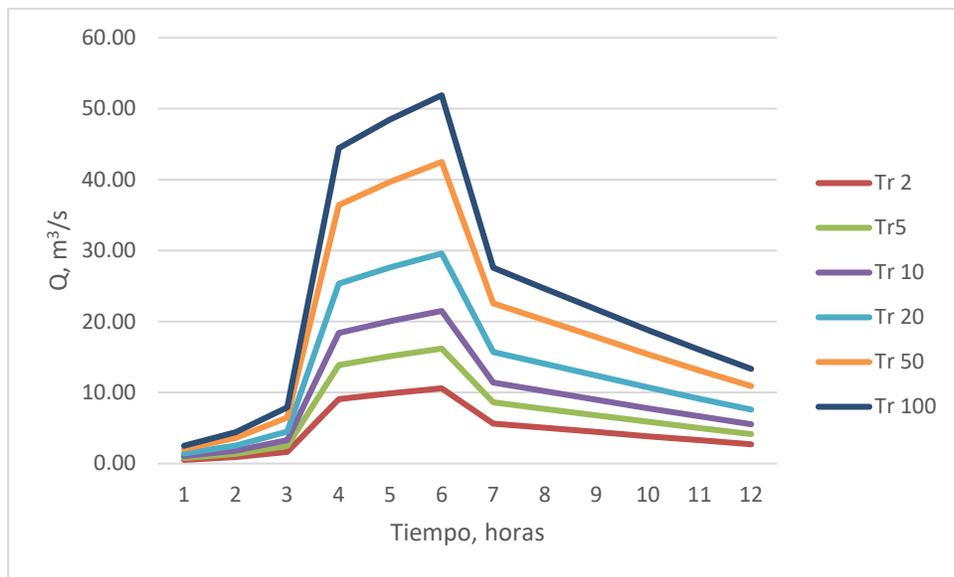


Figura 3-27. Hidrogramas estación hidrométrica, 26194.

En la siguiente tabla y figura se muestran los hidrogramas obtenidos para cada periodo de retorno de la estación 26193 (Río Papalotla).

Tabla 3-23. Hidrogramas estación hidrométrica, 26193.

Q, m ³ /s						
Horas	Tr 2	Tr5	Tr 10	Tr 20	Tr 50	Tr100
1	0.43	0.75	0.96	1.17	1.43	1.63
2	0.45	0.79	1.01	1.22	1.50	1.70
3	0.45	0.79	1.01	1.22	1.50	1.70
4	5.52	9.62	12.34	14.95	18.33	20.86

5	9.82	17.14	21.98	26.63	32.64	37.14
6	36.38	63.47	81.41	98.61	120.88	137.57
7	21.71	37.88	48.58	58.85	72.14	82.10
8	9.82	17.14	21.98	26.63	32.64	37.14
9	7.31	12.76	16.36	19.82	24.29	27.65
10	5.61	9.79	12.55	15.21	18.64	21.21
11	4.22	7.36	9.43	11.43	14.01	15.94
12	2.71	4.73	6.07	7.35	9.01	10.25

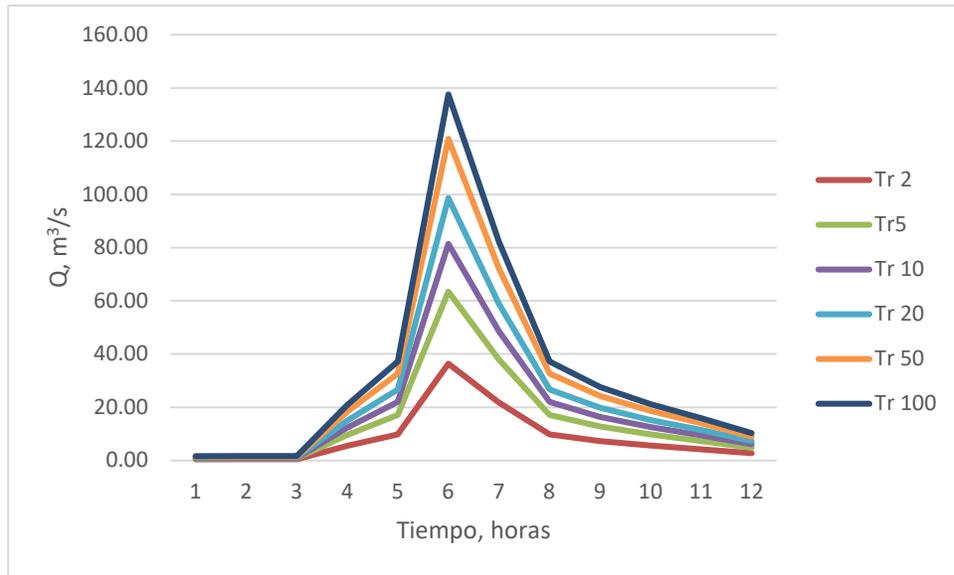


Figura 3-28. Hidrogramas estación hidrométrica, 26193.

En la siguiente tabla y figura se muestran los hidrogramas obtenidos para cada periodo de retorno de la estación 26178 (Río Xalapango).

Tabla 3-24. Hidrogramas estación hidrométrica, 26178.

Q, m³/s						
Horas	Tr 2	Tr 5	Tr 10	Tr 20	Tr 50	Tr 100
1	0.81	1.36	1.93	2.47	3.08	3.50
2	1.47	2.47	3.51	4.49	5.60	6.35
3	1.25	2.10	2.97	3.81	4.75	5.39
4	1.37	2.31	3.27	4.19	5.23	5.93
5	3.19	5.36	7.61	9.74	12.15	13.79
6	7.80	13.10	18.60	23.80	29.70	33.70
7	3.64	6.12	8.68	11.11	13.87	15.73
8	2.61	4.38	6.22	7.96	9.93	11.27
9	1.18	1.99	2.83	3.62	4.51	5.12
10	0.84	1.41	2.01	2.57	3.20	3.63
11	1.15	1.94	2.75	3.52	4.39	4.98

Q, m ³ /s						
Horas	Tr 2	Tr5	Tr 10	Tr 20	Tr 50	Tr100
12	0.75	1.26	1.78	2.28	2.85	3.23

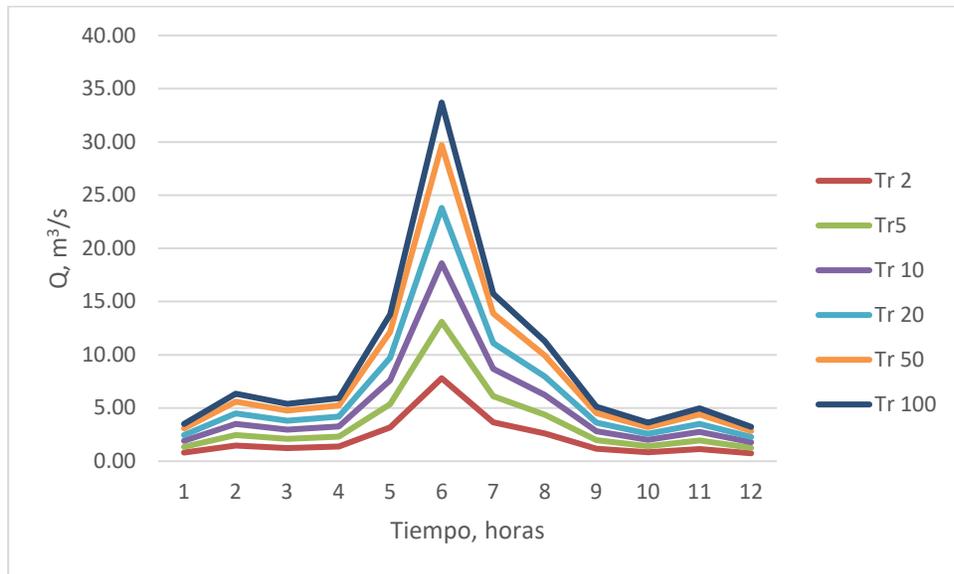


Figura 3-29. Hidrogramas estación hidrométrica, 26178.

En la siguiente tabla y figura se muestran los hidrogramas obtenidos para cada periodo de retorno de la estación 26184 (Río Coxacoaco).

Tabla 3-25. Hidrogramas estación hidrométrica, 26184.

Q, m ³ /s						
Horas	Tr 2	Tr5	Tr 10	Tr 20	Tr 50	Tr100
1	0.23	0.47	0.53	0.59	0.68	0.75
2	0.23	0.47	0.53	0.59	0.68	0.75
3	0.23	0.47	0.53	0.59	0.68	0.75
4	0.23	0.47	0.53	0.59	0.68	0.75
5	3.54	7.11	8.10	9.00	10.30	11.47
6	19.30	38.80	44.20	49.10	56.20	62.60
7	15.14	30.45	34.68	38.53	44.10	49.12
8	7.71	15.49	17.65	19.60	22.44	24.99
9	2.39	4.81	5.47	6.08	6.96	7.75
10	2.08	4.18	4.77	5.29	6.06	6.75
11	1.77	3.56	4.06	4.51	5.16	5.75
12	1.52	3.05	3.48	3.86	4.42	4.93

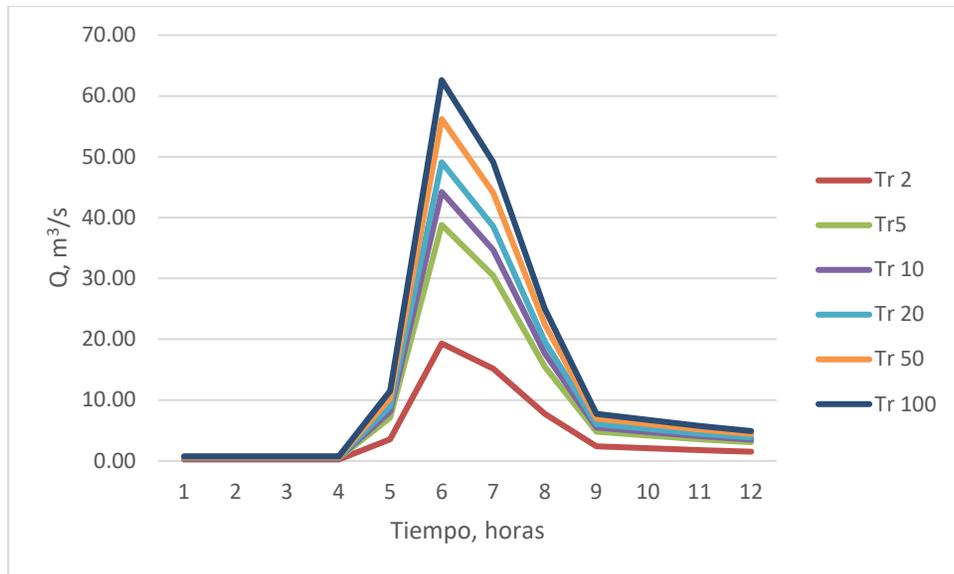


Figura 3-30. Hidrogramas estación hidrométrica, 26184.

En la siguiente tabla y figura se muestran los hidrogramas obtenidos para cada periodo de retorno de la estación 26071 (Río Texcoco).

Tabla 3-26. Hidrogramas estación hidrométrica, 26071.

Q, m ³ /s						
Horas	Tr 2	Tr 5	Tr 10	Tr 20	Tr 50	Tr 100
1	0.10	0.21	0.27	0.32	0.37	0.42
2	0.08	0.17	0.21	0.25	0.29	0.33
3	0.07	0.15	0.18	0.22	0.26	0.29
4	0.07	0.15	0.18	0.22	0.26	0.29
5	0.07	0.15	0.18	0.22	0.26	0.29
6	17.60	36.30	45.70	53.70	63.60	70.80
7	11.51	23.73	29.88	35.10	41.58	46.28
8	8.29	17.09	21.52	25.29	29.95	33.34
9	2.31	4.77	6.00	7.06	8.36	9.30
10	1.71	3.52	4.44	5.21	6.17	6.87
11	1.15	2.37	2.99	3.51	4.16	4.63
12	0.20	0.41	0.52	0.61	0.72	0.80

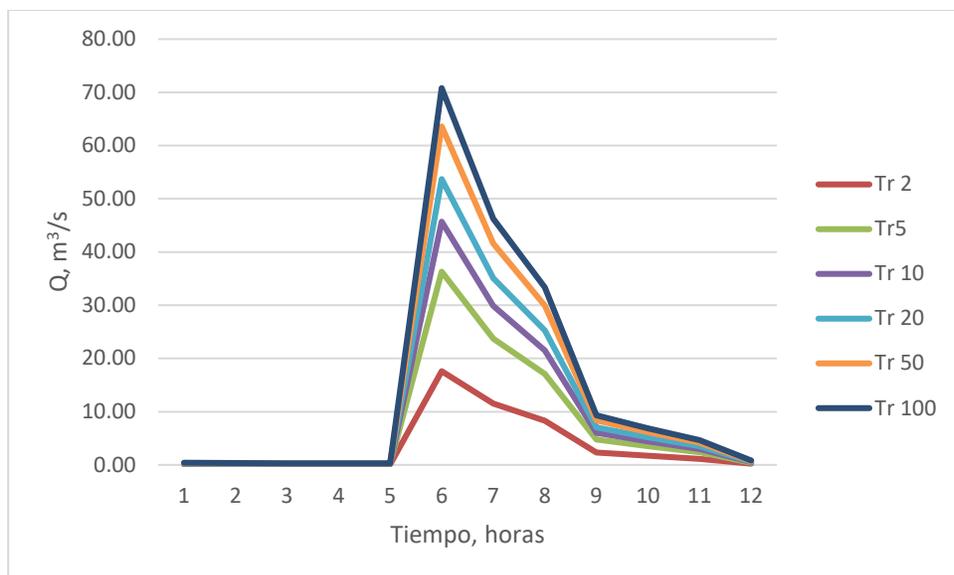


Figura 3-31. Hidrogramas estación hidrométrica, 26071.

En la siguiente tabla y figura se muestran los hidrogramas obtenidos para cada periodo de retorno de la estación 26183 (Río Chapingo).

Tabla 3-27. Hidrogramas estación hidrométrica, 26183.

Q, m³/s						
Horas	Tr 2	Tr 5	Tr 10	Tr 20	Tr 50	Tr 100
1	0.02	0.06	0.08	0.11	0.14	0.17
2	0.02	0.06	0.08	0.11	0.14	0.17
3	0.02	0.06	0.08	0.11	0.14	0.17
4	0.02	0.06	0.08	0.11	0.14	0.17
5	4.31	9.99	14.34	18.76	24.72	29.33
6	10.18	23.60	33.87	44.31	58.39	69.27
7	5.08	11.78	16.91	22.12	29.15	34.58
8	2.75	6.37	9.14	11.96	15.76	18.69
9	1.09	2.54	3.64	4.76	6.27	7.44
10	0.91	2.11	3.03	3.96	5.22	6.19
11	0.89	2.06	2.96	3.87	5.10	6.05
12	0.87	2.02	2.89	3.78	4.99	5.91

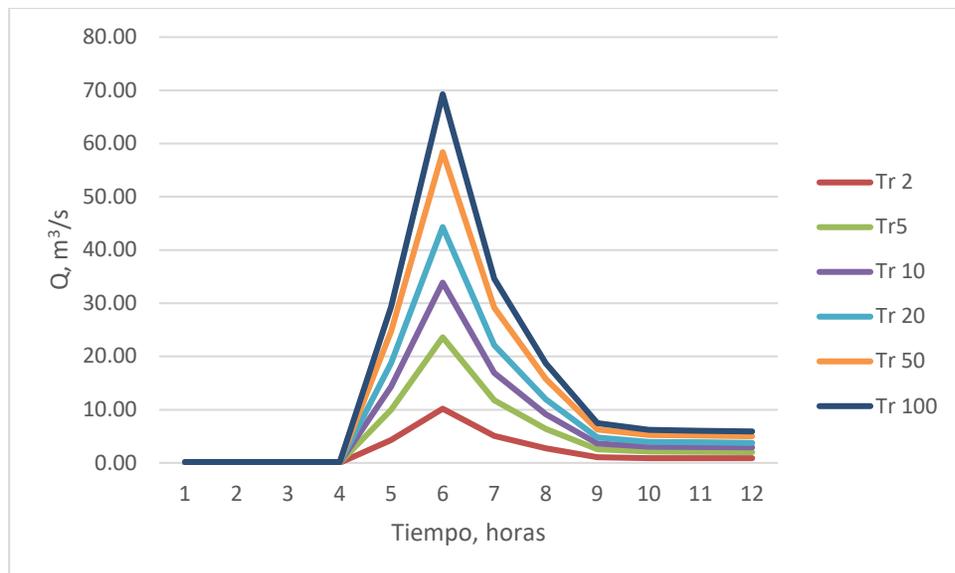


Figura 3-32. Hidrogramas estación hidrométrica, 26183.

En la siguiente tabla y figura se muestran los hidrogramas obtenidos para cada periodo de retorno de la estación 26274 (Río San Bernardino).

Tabla 3-28. Hidrogramas estación hidrométrica, 26274.

Q, m ³ /s						
Horas	Tr 2	Tr 5	Tr 10	Tr 20	Tr 50	Tr 100
1	0.12	0.34	0.48	0.53	0.58	0.62
2	0.12	0.34	0.48	0.53	0.58	0.62
3	0.12	0.34	0.48	0.53	0.58	0.62
4	0.12	0.34	0.48	0.53	0.58	0.62
5	0.12	0.34	0.48	0.53	0.58	0.62
6	11.30	32.90	47.10	51.70	56.80	60.50
7	3.93	11.45	16.40	18.00	19.78	21.06
8	1.56	4.54	6.49	7.13	7.83	8.34
9	1.02	2.98	4.27	4.68	5.14	5.48
10	1.54	4.48	6.41	7.03	7.73	8.23
11	0.58	1.68	2.41	2.65	2.91	3.10
12	0.34	0.99	1.42	1.56	1.71	1.82

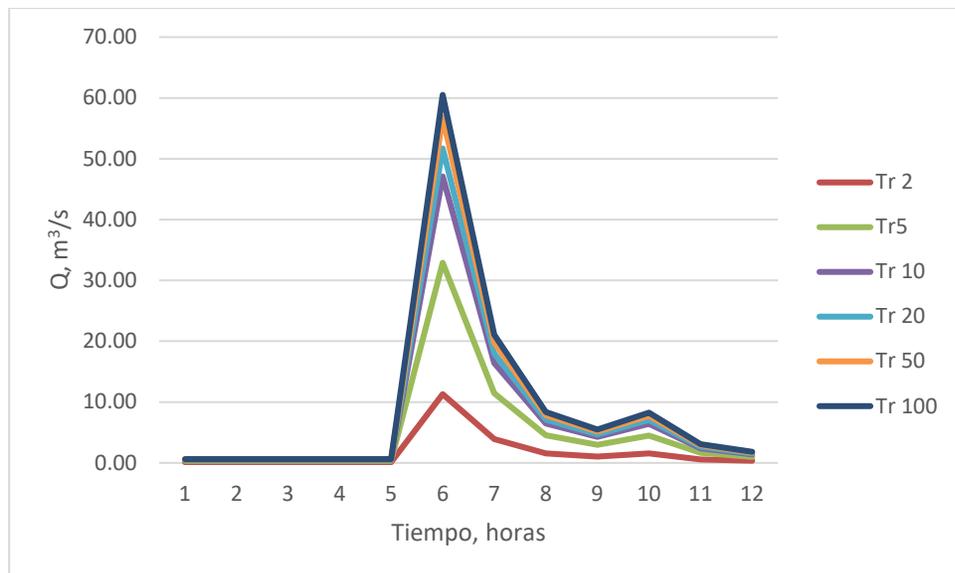


Figura 3-33. Hidrogramas estación hidrométrica, 26274.

En la siguiente tabla y figura se muestran los hidrogramas obtenidos para cada periodo de retorno de la estación 26195 (Río Santa Mónica).

Tabla 3-29. Hidrogramas estación hidrométrica, 26195.

Q, m³/s						
Horas	Tr 2	Tr 5	Tr 10	Tr 20	Tr 50	Tr 100
1	0.96	2.13	2.51	2.82	3.21	3.51
2	0.96	2.13	2.51	2.82	3.21	3.51
3	0.96	2.13	2.51	2.82	3.21	3.51
4	0.96	2.13	2.51	2.82	3.21	3.51
5	7.10	15.74	18.52	20.81	23.70	25.96
6	18.90	41.90	49.30	55.40	63.10	69.10
7	8.45	18.73	22.04	24.77	28.21	30.89
8	2.40	5.32	6.26	7.03	8.01	8.77
9	0.80	1.77	2.09	2.34	2.67	2.92
10	0.74	1.64	1.93	2.17	2.47	2.70
11	0.74	1.64	1.93	2.17	2.47	2.70
12	0.74	1.64	1.93	2.17	2.47	2.70

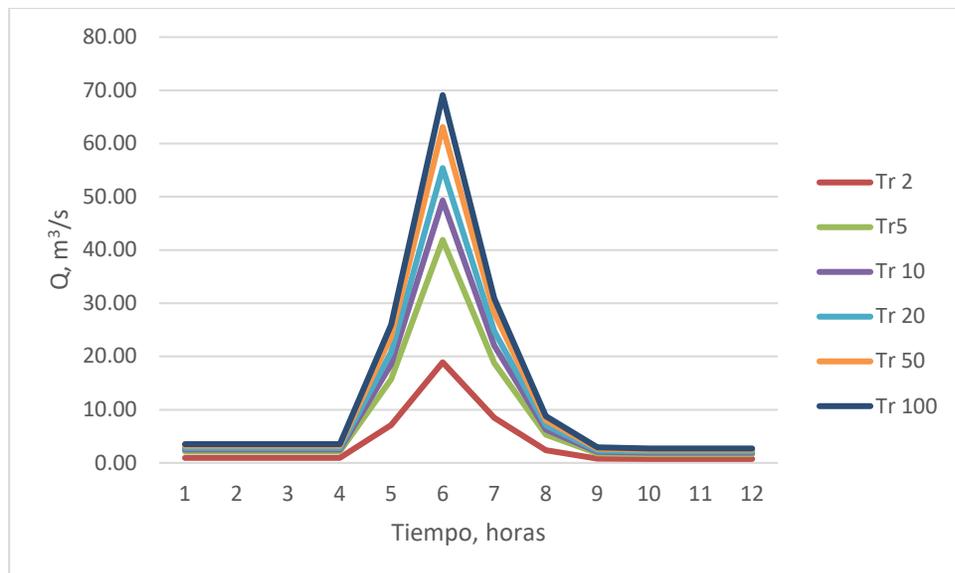


Figura 3-34. Hidrogramas estación hidrométrica, 26195.

En la siguiente tabla y figura se muestran los hidrogramas obtenidos para cada periodo de retorno de la estación 26445 (Río Coatepec).

Tabla 3-30. Hidrogramas estación hidrométrica, 26445.

Q, m ³ /s						
Horas	Tr 2	Tr 5	Tr 10	Tr 20	Tr 50	Tr 100
1	0.10	0.17	0.21	0.24	0.27	0.29
2	0.10	0.17	0.21	0.24	0.27	0.29
3	0.10	0.17	0.21	0.24	0.27	0.29
4	0.56	0.96	1.18	1.35	1.55	1.68
5	1.88	3.24	3.96	4.54	5.22	5.65
6	3.90	6.70	8.20	9.40	10.80	11.70
7	2.93	5.03	6.16	7.06	8.11	8.79
8	1.32	2.26	2.77	3.18	3.65	3.95
9	1.16	1.99	2.44	2.79	3.21	3.48
10	1.02	1.74	2.14	2.45	2.81	3.05
11	1.54	2.65	3.24	3.71	4.27	4.62
12	1.23	2.11	2.58	2.96	3.40	3.68

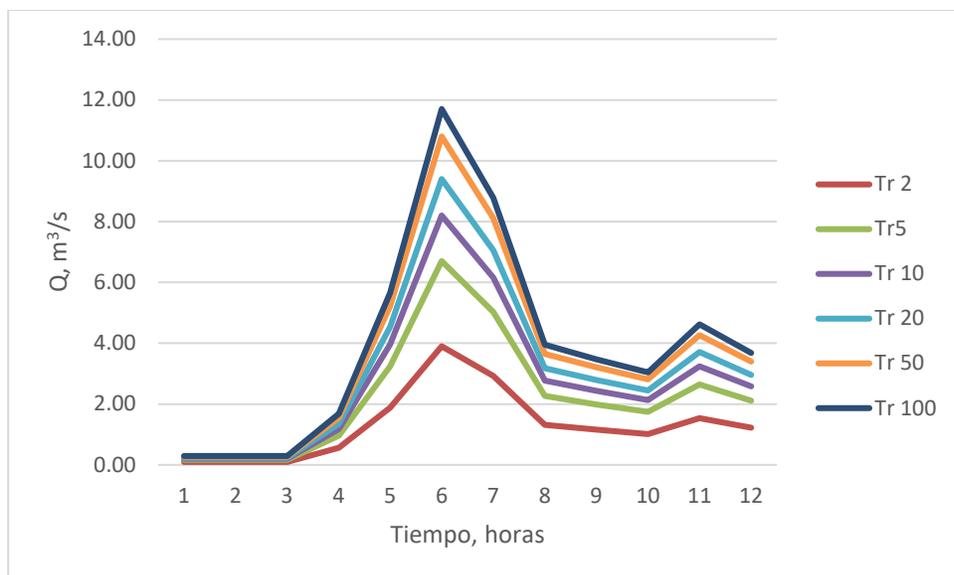


Figura 3-35. Hidrogramas estación hidrométrica, 26445.

Los hidrogramas asociados a diferentes periodos de retorno correspondientes a cada estación hidrométrica serán utilizados para realizar la modelación hidrodinámica de la zona de estudio.

3.1.9 Medición de caudal

Sitios de aforo

Se llevó a cabo una serie de mediciones de caudal en drenes y ríos que se ubican en la cuenca del Lago de Texcoco. Los sitios de interés se listan en la Tabla 3-31. Las coordenadas de los sitios fueron registradas con un GPS Garmin Montana 650. En el sitio “Dren Chimalhuacán 2a”, se determinó obtener su caudal por diferencia entre los caudales obtenidos en “Dren Chimalhuacán 1a” y “Río Coatepec”.

Tabla 3-31. Sitios de aforo.

Sitio	Ubicación	Punto GPS	Latitud	Longitud
1	Dren Chimalhuacán 1b	371	19.444290°	-98.998468°
2	Dren general del Valle 2	372	19.524099°	-99.013866°
3	Dren general del Valle 1	373	19.449623°	-99.002129°
4	Dren Chimalhuacán 2b	374	19.429950°	-98.989547°
5	Río Coatepec	375	19.432574°	-98.924764°
6	Río Chapingo	376	19.484763°	-98.944494°
7	Río San Bernardino	377	19.483331°	-98.937922°
8	Río Santa Mónica	379	19.454265°	-98.933547°
9	Dren Chimalhuacán 1a	378	19.453104°	-98.932835°
10	Dren Chimalhuacán 2a	--	19.450763°	-98.932738°

En la Figura 3-36, se presenta el plano de ubicación con los sitios que se aforaron.

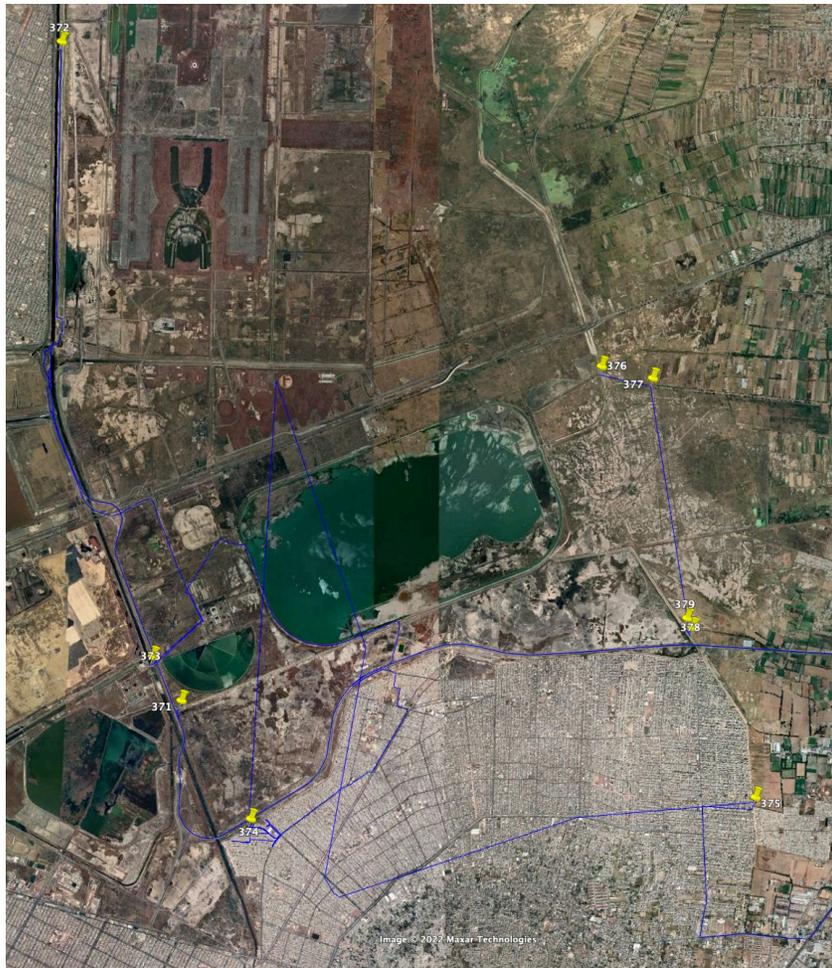


Figura 3-36. Ubicación de sitios de aforo.

Equipos

Se utilizó un equipo SonTek RiverSurveyor S5, el cual es un perfilador acústico basado en el efecto Doppler, el cual se monta en una plataforma de flotación. Es usado normalmente en ríos y canales para medir la velocidad del agua, calcular la descarga y forma de fondo. Utiliza un haz acústico para mediciones batimétricas de precisión, permitiendo obtener el detalle del contorno de fondo y tiene un alcance de hasta 5 metros de profundidad, Figura 3-37.



Figura 3-37. Equipo RiverSurveyor.

Para el aforo por vadeo se utilizó un equipo Hach modelo FH950 con sensor electromagnético. Presenta una exactitud de $\pm 2\%$ de la lectura ± 0.015 m/s (± 0.05 pies/s) a través del rango de 0 - 3.04 m/s (0 -10 pies/s); $\pm 4\%$ de la lectura de 3.04 - 4.87 m/s (10 -16 pies/s), ver Figura 3-38.



Figura 3-38. Medidor de flujo Hach FH950.

3.1.10 Caudal

Las mediciones de caudal se efectuaron en drenes y ríos que desalojan las aguas residuales de la cuenca del lago de Texcoco. La mayor parte de los drenes son de sección trapezoidal excepto los ríos Chapingo y Santa Mónica. Se efectuaron en cada sección al menos dos mediciones y el caudal total se calculó como el promedio de las mediciones realizadas. Ninguna de los drenes excedía los 5 metros de profundidad, y la sección máxima fue de 40 metros de ancho en el dren general del Valle 1 y 2. La ubicación del Dren General del Valle 2 se cambió, ya que, en el sitio propuesto inicialmente, las condiciones de flujo eran cero, y se eligió un sitio al norte de este a una distancia de 3,960 metros en una estructura de control. No se efectuó mediciones de caudal en el Dren Chimalhuacán 2a, y el caudal se calculó de la

diferencia del caudal medido en los sitios 9 y 5. El canal San Bernardino no presentó flujo.

Dren Chimalhuacán 1b

La medición de caudal se presentó en el puente de acceso que cruza el dren Chimalhuacán 1b. Se usó el perfilador acústico RiverSurveyor S5.



Figura 3-39. Sitio Dren Chimalhuacán 1b.

Tabla 3-32. Datos de aforos dren Chimalhuacán 1b.

Aforo	Caudal (m ³ /s)	Caudal (L/s)
1	1.274	1,274
2	1.244	1,244
Promedio	1.259	1,259

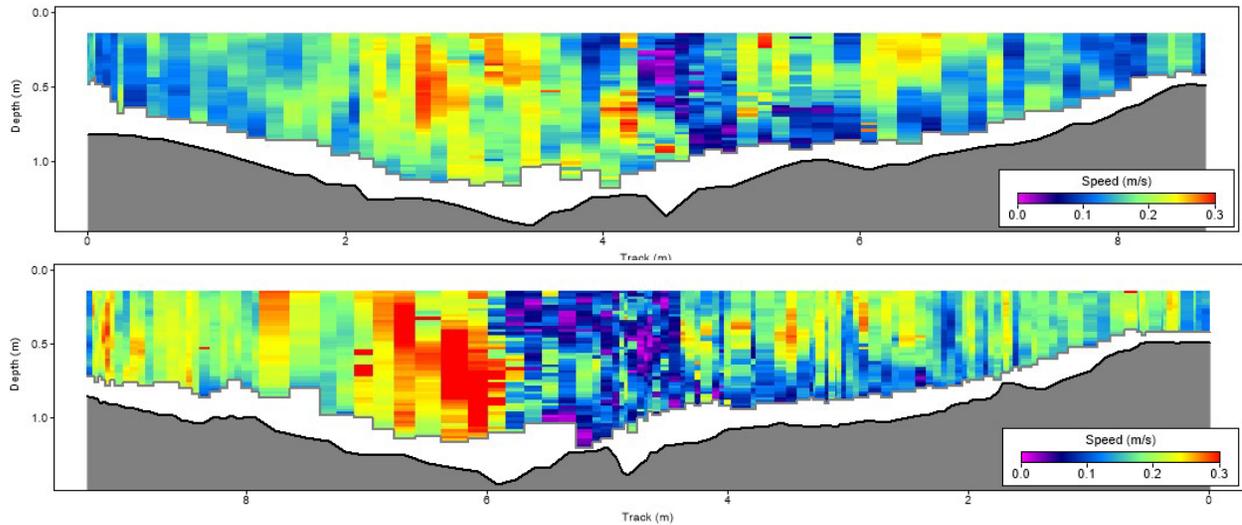


Figura 3-40. Aforos con perfilador en dren Chimalhuacán 1b

Dren general del Valle 2

El aforo se reportó en la salida de la estructura de control con el perfilador acústico RiverSurveyor S5.



Figura 3-41. Sitio Dren general del Valle 2.

Tabla 3-33. Datos de aforos dren general del Valle 2.

Aforo	Caudal (m ³ /s)	Caudal (L/s)
1	0.834	834
2	(1)	(1)
Promedio	0.834	834

(1) Error en archivo del equipo.

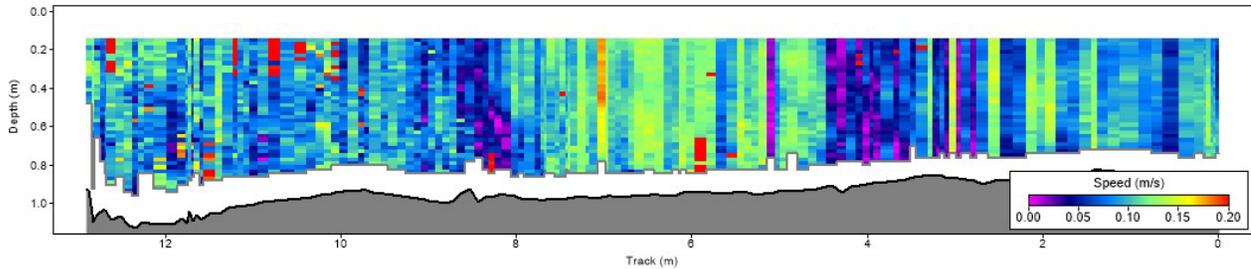


Figura 3-42. Aforo con perfilador en dren general del Valle 2.

Dren general del Valle 1

Se efectuó el aforo en la salida de la estructura de control con el perfilador acústico RiverSurveyor S5.





Figura 3-43. Sitio Dren general del Valle 1.

Tabla 3-34. Datos de aforos dren general del Valle 1.

Aforo	Caudal (m ³ /s)	Caudal (L/s)
1	5.552	5,552
2	5.417	5,417
Promedio	5.484	5,484

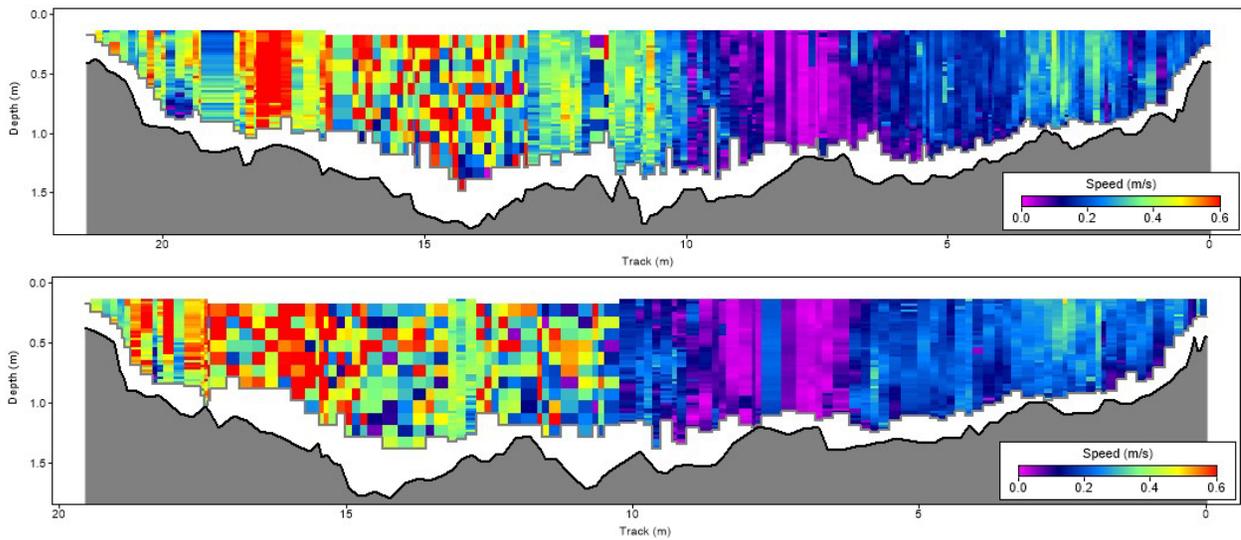


Figura 3-44. Aforos con perfilador en dren general del Valle 1.

Dren Chimalhuacán 2b

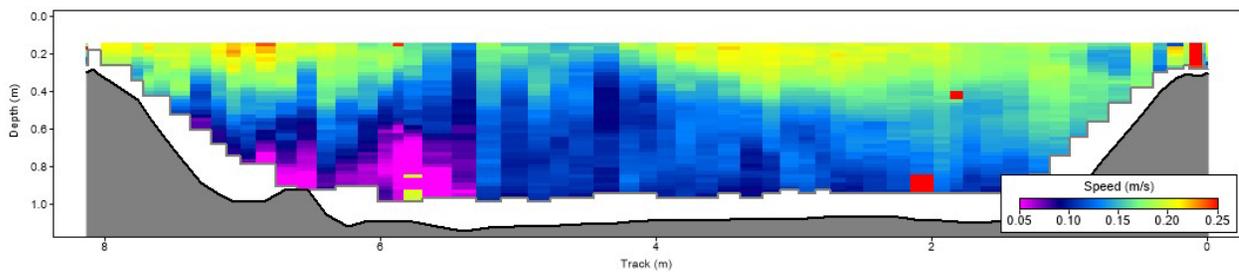
El sitio se ubica a 440 metros antes de su incorporación con el dren general del Valle. El acceso fue en Chimalhuacán y se usó el perfilador acústico RiverSurveyor S5.



Figura 3-45. Sitio Dren Chimalhuacán 2b.

Tabla 3-35. Datos de aforos dren Chimalhuacán 2b.

Aforo	Caudal (m³/s)	Caudal (L/s)
1	1.000	1,000
2	1.054	1,054
3	1.070	1,070
Promedio	1.041	1,041



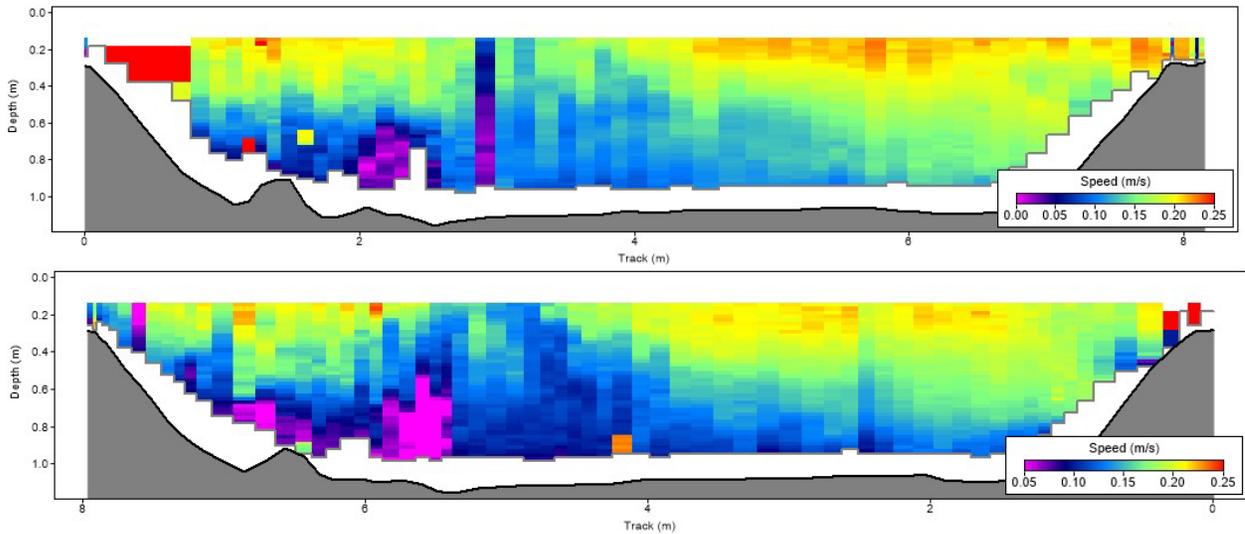


Figura 3-46. Aforos con perfilador en dren Chimalhuacán 2b.

Río Coatepec

Se efectuó en una estructura de cruce la cual se localizó a 2,100 aguas arriba del sitio originalmente seleccionado. A partir de este sitio el río Coatepec se encauza a través de un canal rectangular recubierto. El acceso fue en Chimalhuacán y se usó el perfilador acústico RiverSurveyor S5.





Figura 3-47. Sitio río Coatepec.

Tabla 3-36. Datos de aforos río Coatepec

Aforo	Caudal (m ³ /s)	Caudal (L/s)
1	0.607	607
2	0.684	684
3	0.683	683
Promedio	0.658	658

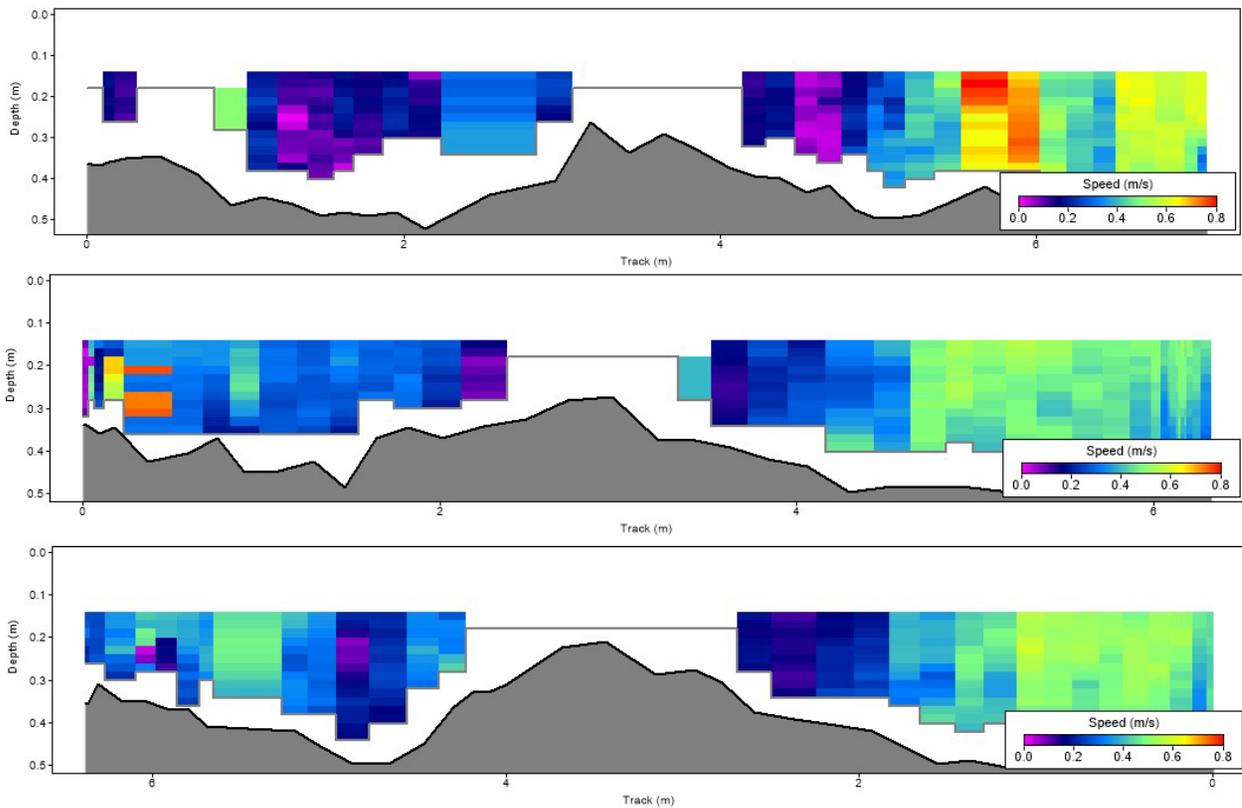


Figura 3-48. Aforos con perfilador en río Coatepec.

Río Chapingo

El sitio se ubica en la zona del lago Nabor Carrillo. Es un cauce natural cuyos escurrimientos llegan al Nabor Carrillo. El sitio de aforo se seleccionó en una sección antes de tres colectores circulares que se ubican debajo de un paso vehicular. Se usó el perfilador acústico RiverSurveyor S5.



Figura 3-49. Sitio río Chapingo.

Tabla 3-37. Datos de aforos río Chapingo.

Aforo	Caudal (m ³ /s)	Caudal (L/s)
1	0.263	263
2	0.282	282
3	0.249	249
4	0.237	237
Promedio	0.258	258

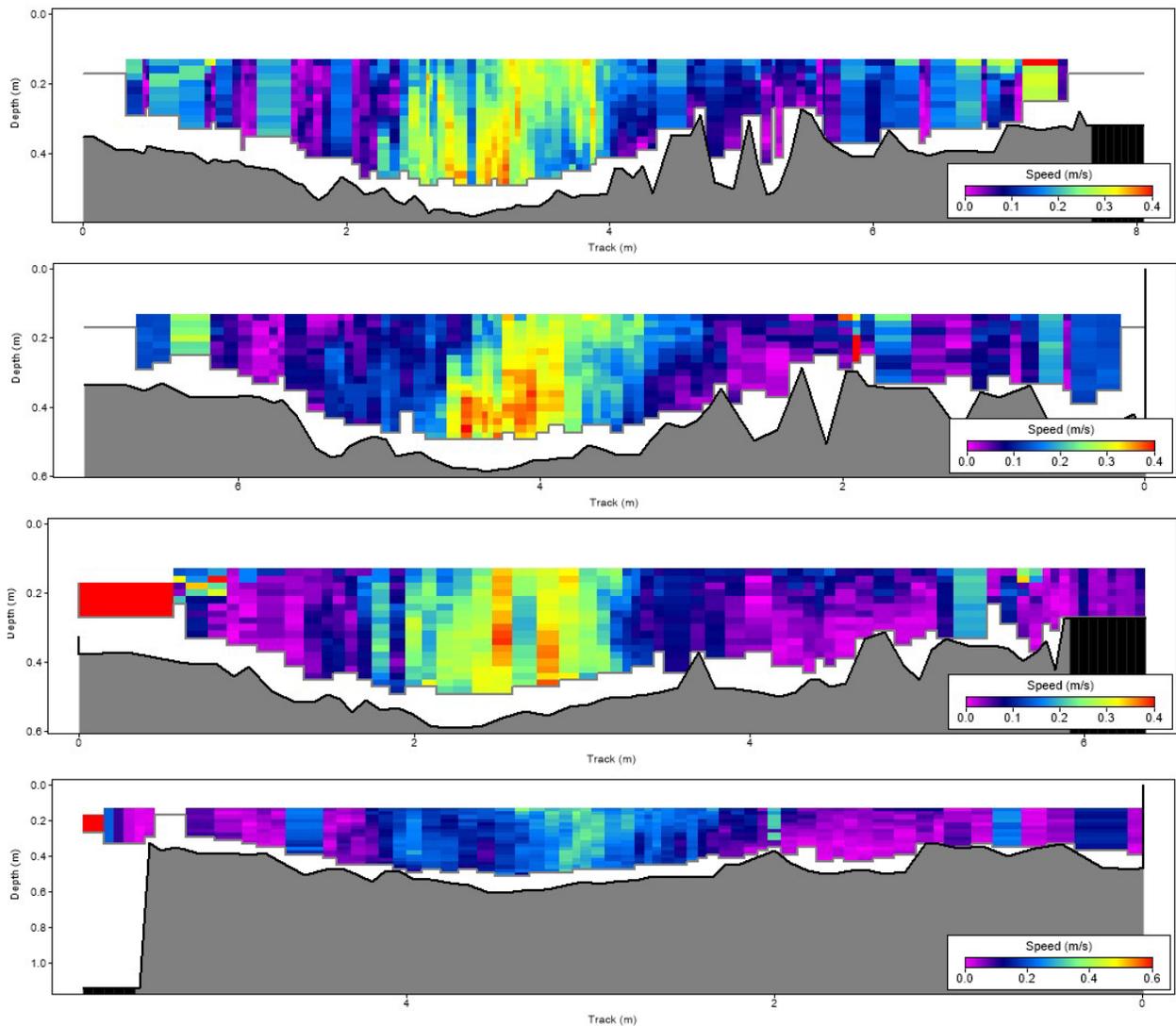


Figura 3-50. Aforos con perfilador en río Chapingo.

Río San Bernardino

El sitio se ubica en la zona del lago Nabor Carrillo y corre paralelo al río Chapingo. Es un cauce revestido con sección trapezoidal con presencia de vegetación en el mismo. Se seleccionó el sitio de aforo aguas abajo de estructura de control, pero no se detectó flujo alguno. Se usó el perfilador acústico RiverSurveyor S5.



Figura 3-51. Sitio río San Bernardino.

Tabla 3-38. Datos de aforos río San Bernardino.

Aforo	Caudal (m ³ /s)	Caudal (L/s)
1	0.000	0
Promedio	0.000	0

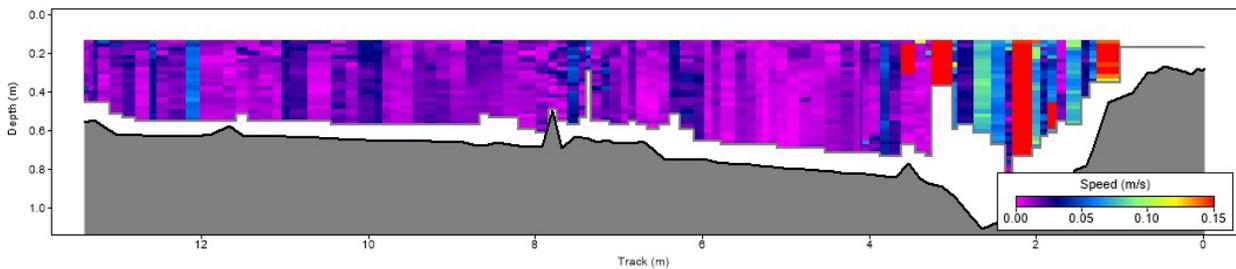


Figura 3-52. Aforos con perfilador en río San Bernardino.

Río Santa Mónica

Es un cauce natural que se incorpora después al dren Chimalhuacán 1a mediante un canal revestido con sección rectangular, estructura en donde se realizó el aforo. Se usó el medidor de caudal Hach FH950.



Figura 3-53. Sitio río Santa Mónica.

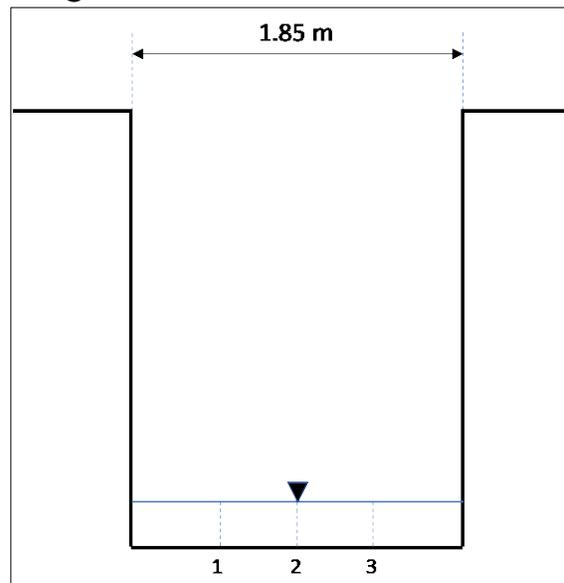


Figura 3-54. Sección de aforo en Santa Mónica.

Tabla 3-39. Cálculo de caudal en sección Santa Mónica.

Punto	1	2	3
Distancia (m)	0.462	0.925	1.387
Tirante (m)	0.020	0.030	0.030
	Velocidades (m/s)		
1	0.741	0.786	0.320
2	0.747	0.784	0.316
3	0.745	0.789	0.313
4	0.741	0.798	0.320
5	0.743	0.788	0.339
Velocidad promedio	0.743	0.789	0.322
Área (m ²)	0.0139	0.0139	0.0208
Caudal parcial (m ³ /s)	0.0103	0.0110	0.0067
Caudal (m ³ /s)	0.0280 (28 L/s)		

Dren Chimalhuacán 1a

Es un cauce revestido con sección trapezoidal y es continuación del río Coatepec. La medición se efectuó a 160 metros aguas arriba del ingreso del río Santa Mónica al dren Chimalhuacán. Se usó el perfilador acústico RiverSurveyor S5.



Figura 3-55. Dren Chimalhuacán 1a.

Tabla 3-40. Datos de aforos dren Chimalhuacán 1a.

Aforo	Caudal (m ³ /s)	Caudal (L/s)
2	1.012	1,012
3	1.020	1,020
4	1.099	1,099
Promedio	1.044	1,044

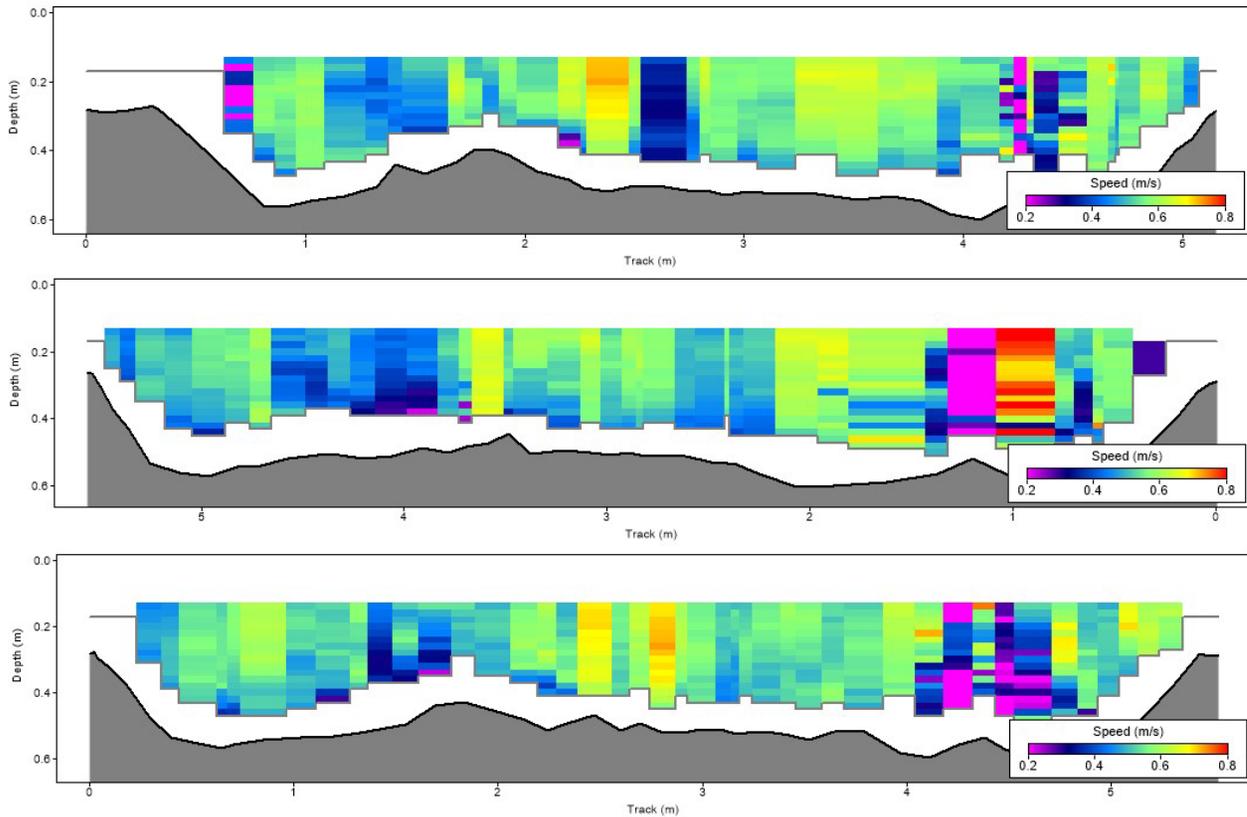


Figura 3-56. Aforos con perfilador en dren Chimalhuacán 1a.

Resumen

En la Tabla 3-41, se presenta un resumen de los caudales aforados en los nueve sitios en orden de menor a mayor.

Tabla 3-41. Resumen de caudales.

Sitio	Ubicación	Caudal en m ³ /s	Caudal en L/s
1	Río San Bernardino	0	0
2	Río Santa Mónica	0.028	28
3	Río Chapingo	0.258	258
4 ⁽ⁿ⁾	Dren Chimalhuacán 2a	0.386	386
5	Río Coatepec	0.658	658
6	Dren general del Valle 2	0.834	834
7	Dren Chimalhuacán 2b	1.041	1,041
8	Dren Chimalhuacán 1a	1.044	1,044
9	Dren Chimalhuacán 1b	1.259	1,259

Sitio	Ubicación	Caudal en m ³ /s	Caudal en L/s
10	Dren general del Valle 1	5.484	5,484

(1) Se obtuvo por diferencia de caudales en Dren Chimalhuacán 1a (8) y río Coatepec (5).

$$Q_{10} = Q_9 - Q_5 = 1.044 - 0.658 = 0.386 \frac{m^3}{s}$$

3.2 Caracterización geofísica, hidrogeológica, e hidrogeoquímica y modelación del flujo subterráneo.

3.2.1 Fisiografía regional

El área de estudio se localiza dentro de La Cuenca del Valle de México que forma parte del Eje Neovolcánico o Faja Volcánica Transmexicana, la cual se extiende en dirección este-oeste atravesando la República Mexicana (Enciso-de la Vega, 1992). También es denominada como provincia de Zona de Fosas Tectónicas y Vulcanismo Reciente. En la Cuenca predominan derrames basálticos, numerosos volcanes y lagos, cuya morfología, orientación y distribución sugieren estar situados en fosas tectónicas y de ahí se le asigna este último nombre.

La Cuenca del Valle de México está limitada (Figura 5-1) por la Sierra de las Cruces al oeste (Osete *et al.*, 2000; Mejía *et al.*, 2005; Arce *et al.*, 2008), la Sierra Chichinautzin al sur (Siebe *et al.*, 2004; Meriggi *et al.*, 2008), Sierra Nevada al este (Cadoux *et al.*, 2011) y Sierra de Pachuca y Campo Volcánico Apan-Tezontepic al norte (López-Hernández, 2009; García-Palomo *et al.*, 2002), constituidas por diversas estructuras volcánicas de distintas edades.

Lo que ahora constituye el Valle de México, antiguamente drenaba hacia el sur. Las corrientes superficiales que circulaban en dicha dirección fueron interrumpidas por el afloramiento volcánico a través de conos que dieron origen a la Sierra de Chichinautzin, dejando al Valle de México sin drenaje al exterior y convirtiéndolo en una cuenca cerrada, razón por lo que se acumularon materiales vulcanosedimentarios que progresivamente almacenaron agua tanto superficial como subterránea, y formaron en la parte central del valle los lagos de Zumpango, Texcoco, Xochimilco y Tláhuac.

Los materiales que rellenaron el Valle de México y que constituyen el subsuelo corresponden a intercalaciones de productos volcánicos tales como lavas, tobas y cenizas que incluyen materiales granulares transportados por ríos y arroyos provenientes de las partes topográficamente más altas que circularon hacia los valles. Cubriendo a dichos materiales y en espesores variables, se encuentran arcillas y arenas finas que son el producto del sedimento de los antiguos lagos.

Al sur del valle se encuentra la Sierra Chichinautzin de edad cuaternaria, que divide geográficamente al estado de Morelos con la Ciudad de México, constituida por derrames lávicos vesiculares muy extensos, masivos o lajeados de composición andesítica y basáltica de textura fina a media, que pertenece a la Formación Chichinautzin, (Fries, 1960).

La Sierra de las Cruces ubicada al poniente del valle de México divide al Estado de México con la Ciudad de México, siendo constituida principalmente por extensos derrames de lava y domos de composición andesítica-dacítica y afinidad calci-alcalina, alternándose con flujos piroclásticos de bloques y cenizas, flujos de piedra pómez, oleadas piroclásticas, depósitos de caída, flujos de detritos y lodo, así como colapsos que originaron depósitos de avalanchas de escombros.

En la parte este de la Cuenca de Chalco se localiza la Sierra de Río Frío, con orientación N-S y conformada en su mayor parte por derrames riódacíticos, hacia el sur esta prominencia se conoce como Sierra Nevada, con estructuras importantes como el volcán Iztaccíhuatl y Popocatépetl, (Schlaepfer, 1968).

Hacia el límite oeste se ubica el área chinampera de Tláhuac sobre depósitos lacustres y aluviales, constituidos por cenizas volcánicas, material piroclástico, tobas, brechas y arcillas.

En la parte central del valle se encuentra el área del ex lago de Texcoco que corresponde a una planicie cubierta por arcillas lacustres que sobre yacen a materiales aluviales del Cuaternario. Bajo estos materiales se llegan a encontrar horizontes o capas de rocas ígneas del Terciario de las cuales llegan a aflorar en las elevaciones topográficas que circundan al Ex-Lago de Texcoco.

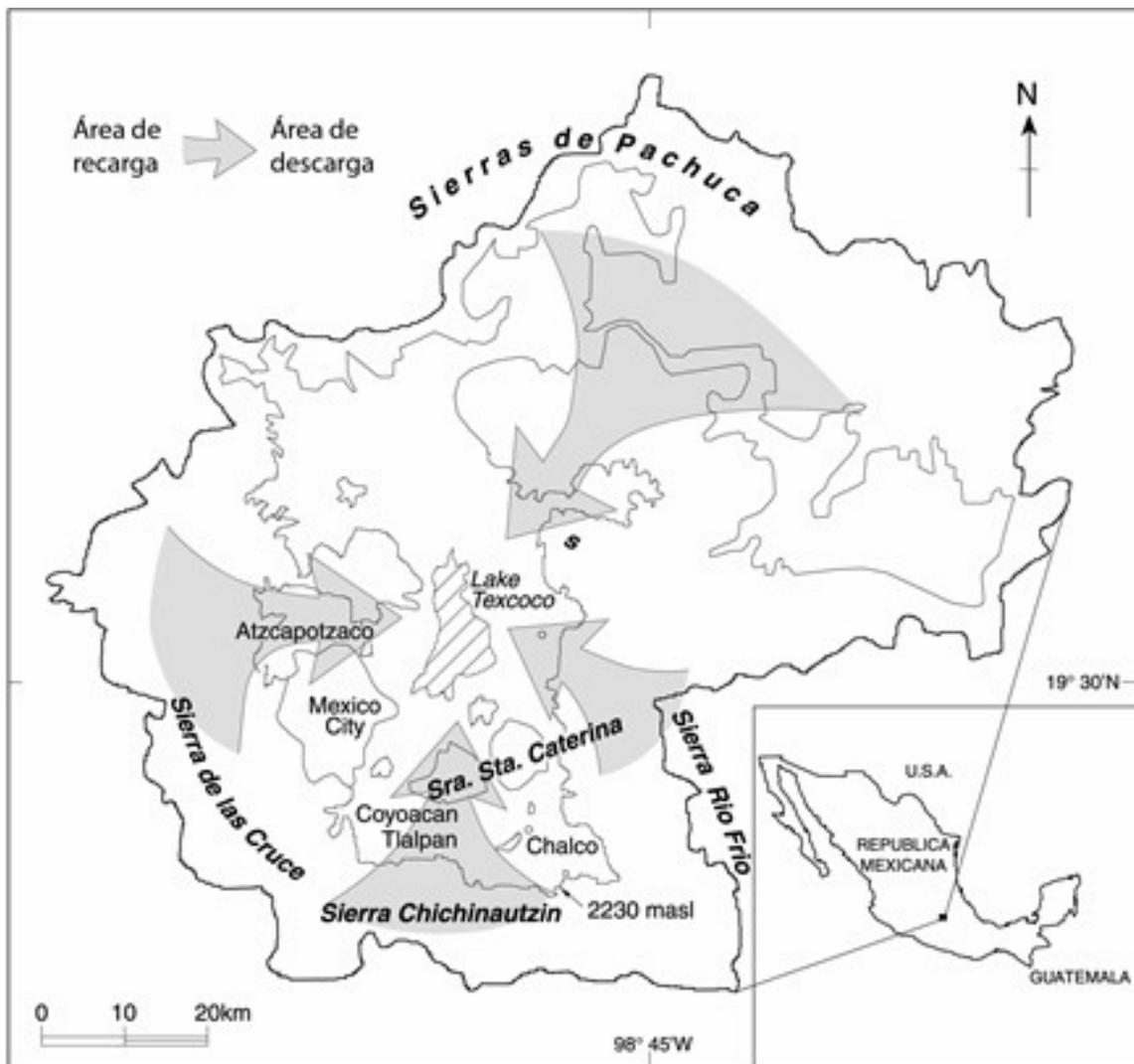


Figura 3-57. Cuenca de México y planicie lacustre del Ex-Lago de Texcoco (Edmunds, et.al., 2002)

3.2.2 Sistema hidrológico del Lago de Texcoco

El sistema hidrológico del Lago de Texcoco (Figura 3-58) regula las aguas pluviales de los nueve ríos del oriente del Valle de México, del Río de la Compañía proveniente del Estado de México y del Río Churubusco proveniente de la Ciudad de México.



Figura 3-58. Sistema hidrológico del Lago de Texcoco (CONANP, 2021)

3.2.3 Características de los suelos

Detenal (1976) clasificó los suelos del lago desde el punto de vista edafológico como solonchak gléyico, clase fina-sódica. De acuerdo con el sistema de clasificación norteamericano (Soil Taxonomy), Velázquez et al (1981, 1982, 1984) delimitó 17 series de suelos (Figura 3-59), comprendidas en los órdenes Inceptisol, Entisol y Mollisol. De acuerdo con Velázquez (1981, 1982, y 1984) son suelos sódicos (Figura 3-60) o salinos (Figura 3-61) y tienen mantos freáticos superficiales (Figura 3-62). Su desarrollo surge a partir de sedimentos del Pleistoceno y Holoceno; la vegetación dominante en ellos son los arbustos que toleran las sales. La mayor parte del área se clasifica en las clases VII y VIII de salinidad, ya que presenta un PSI de más de 90 y CE mayores de 40 mmhos/cm. En 1984, Velázquez et al. Efectuaron un estudio de conductividad hidráulica de los suelos del Ex-Lago de Texcoco. Utilizaron la metodología del pozo barrenado para hacer muestreos de la recuperación del manto freático y calcularon la conductividad hidráulica que varió desde muy lenta hasta moderadamente lenta (Figura 3-63).

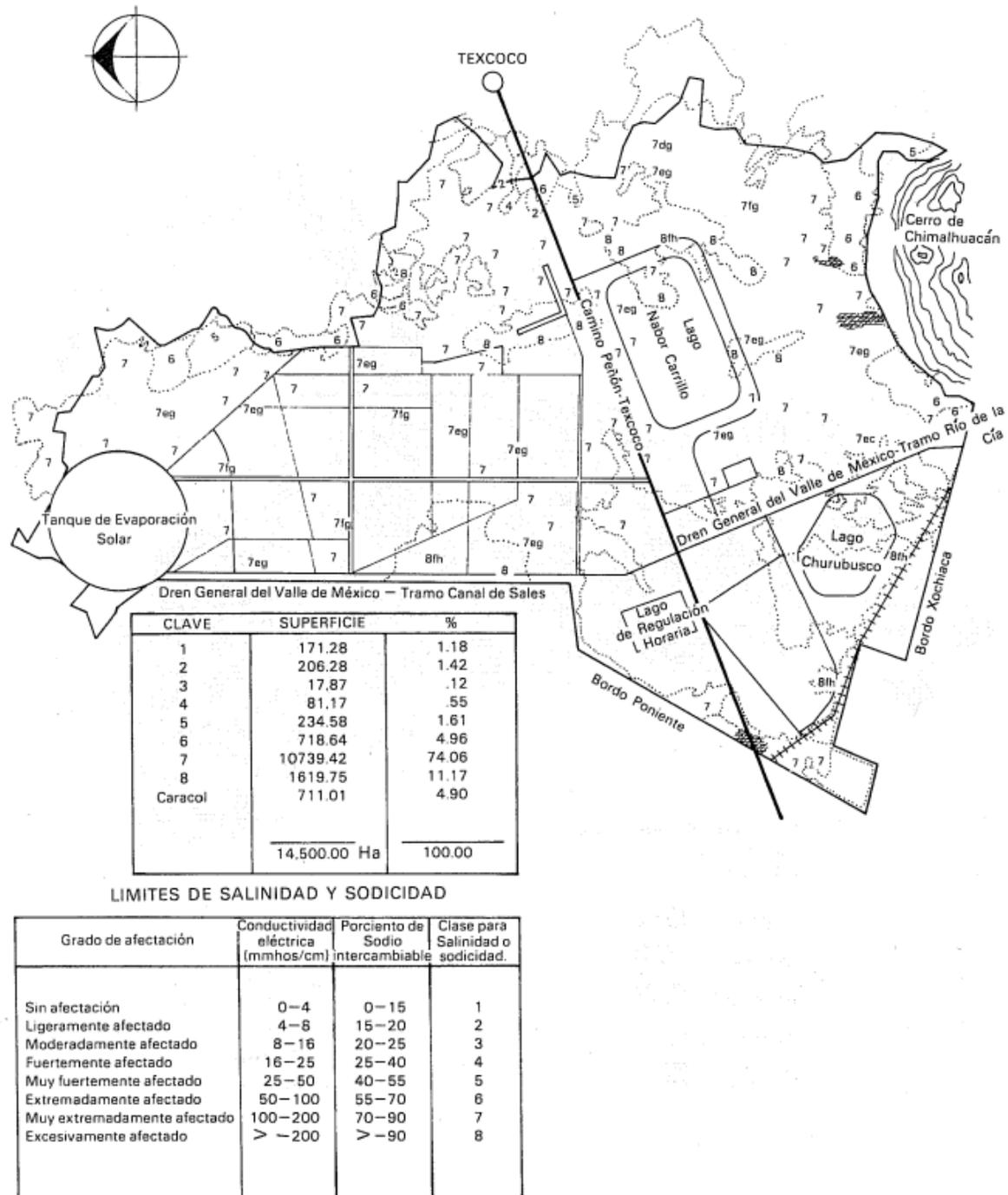


Figura 3-60. Clasificación del suelo de acuerdo con su sodicidad (Tarin, 1986)

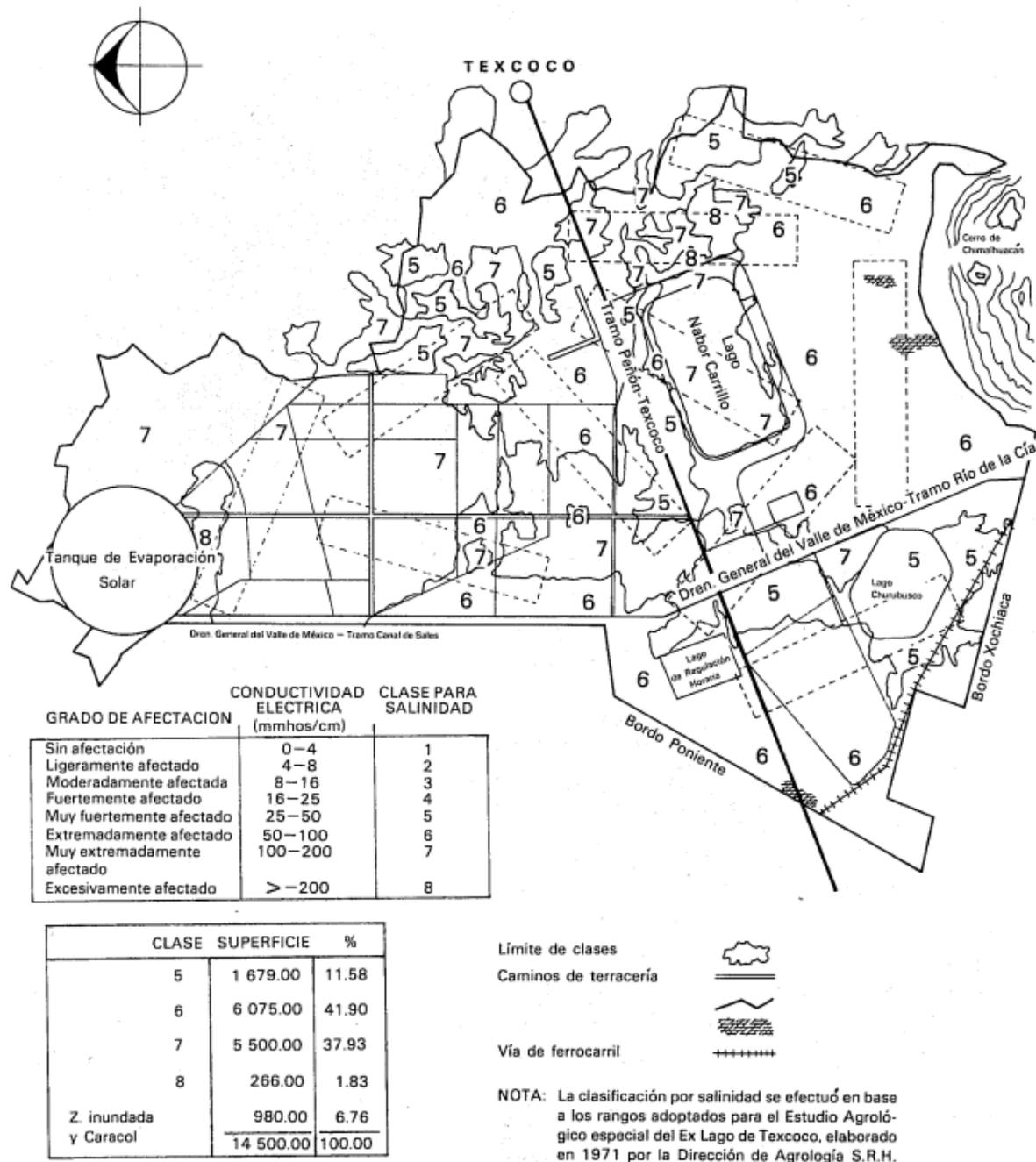


Figura 3-61. Clasificación del suelo de acuerdo con su salinidad (Tarín, 1986)

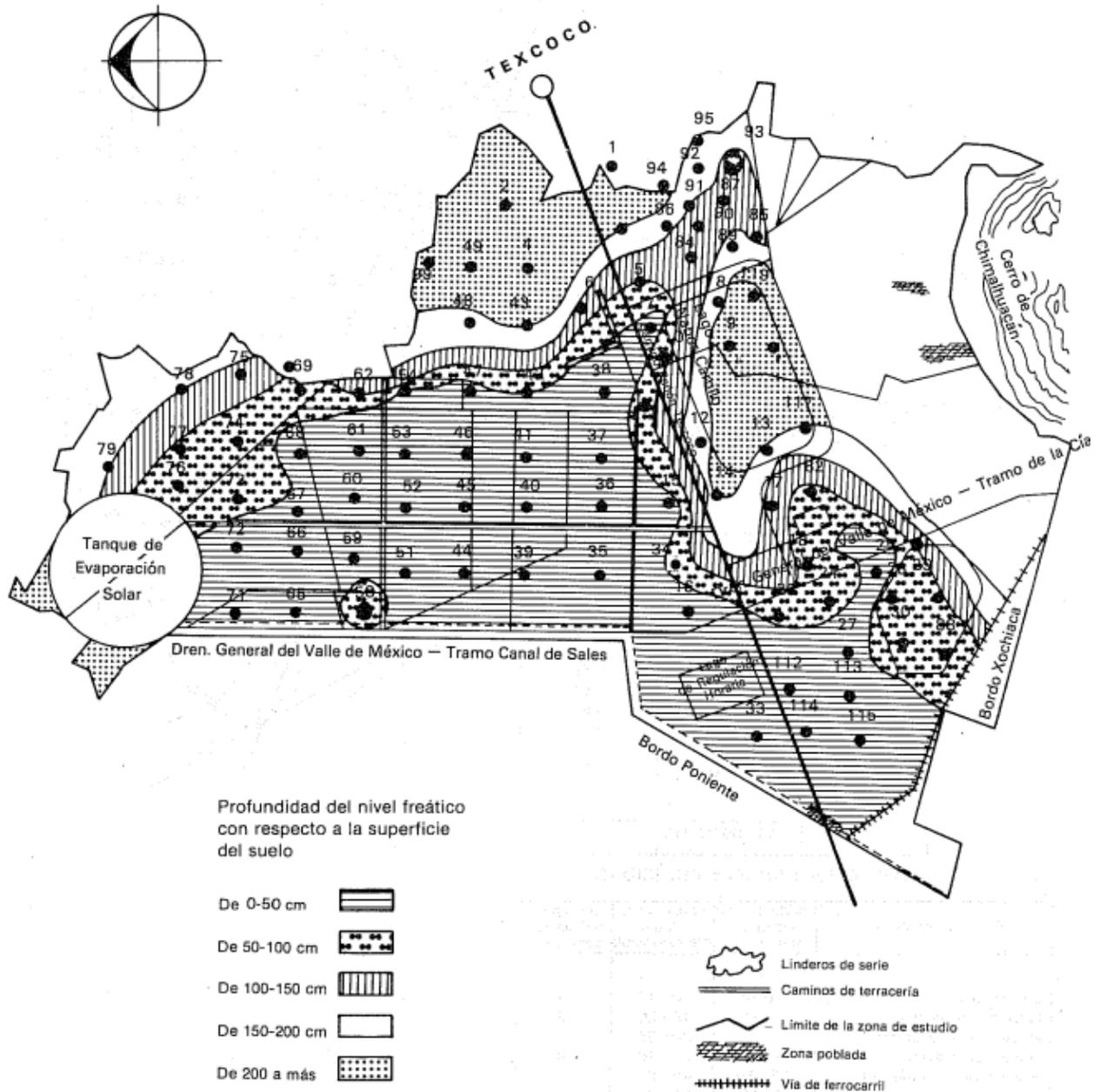


Figura 3-62. Isobatas de septiembre de 1983 (Tarín, 1986)

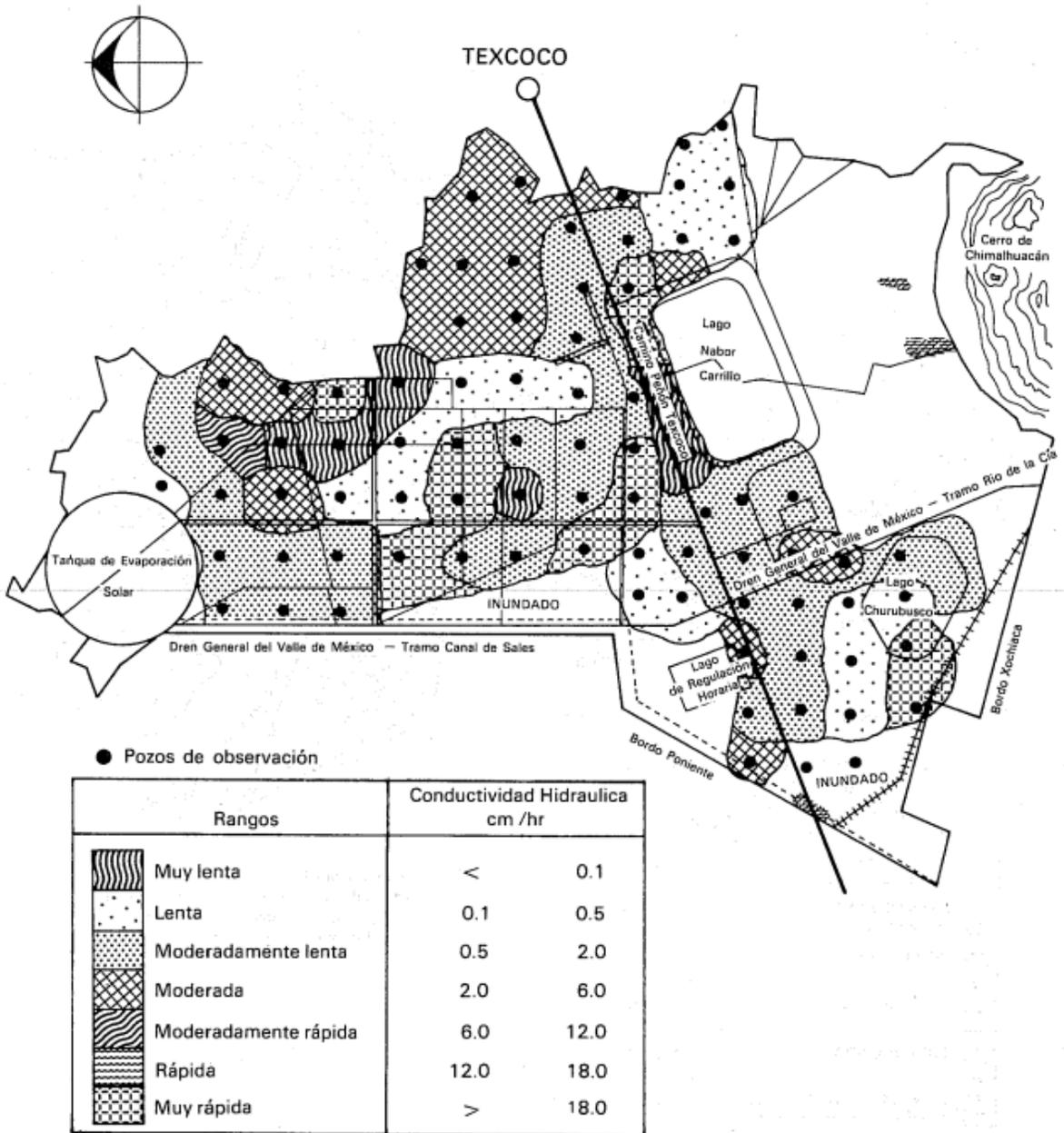


Figura 3-63. Clasificación del suelo de acuerdo con su conductividad (Tarín, 1986)

3.2.4 Salinidad del acuitardo

Una serie de lagos interconectados que ocupaban la vasta planicie de la cuenca del Valle de México (Figura 3-64), no tenían salida superficial antes de la construcción de un canal a cielo abierto en 1789 (Bribiesca, 1960). La salinidad era variable de lago a lago; Los Lagos Zumpango y Texcoco, en la parte más baja de la cuenca, eran salinos (Peñafiel, 1884). La evaporación del agua de estos lagos causó concentración de las sales disueltas y enriquecimiento de los isótopos pesados. Las sales disueltas en estos antiguos lagos, en la actualidad se manifiestan como agua de poro de alta salinidad en los sedimentos lacustres (Ortega-Guerrero, 1997). El incremento en la salinidad debido a evaporación se observa con claridad en el comportamiento del cloruro versus sodio del acuitardo (Figura 3-65). Los datos se ajustan a una línea de evaporación con una pendiente de 1 (Ortega-Guerrero, 1997).

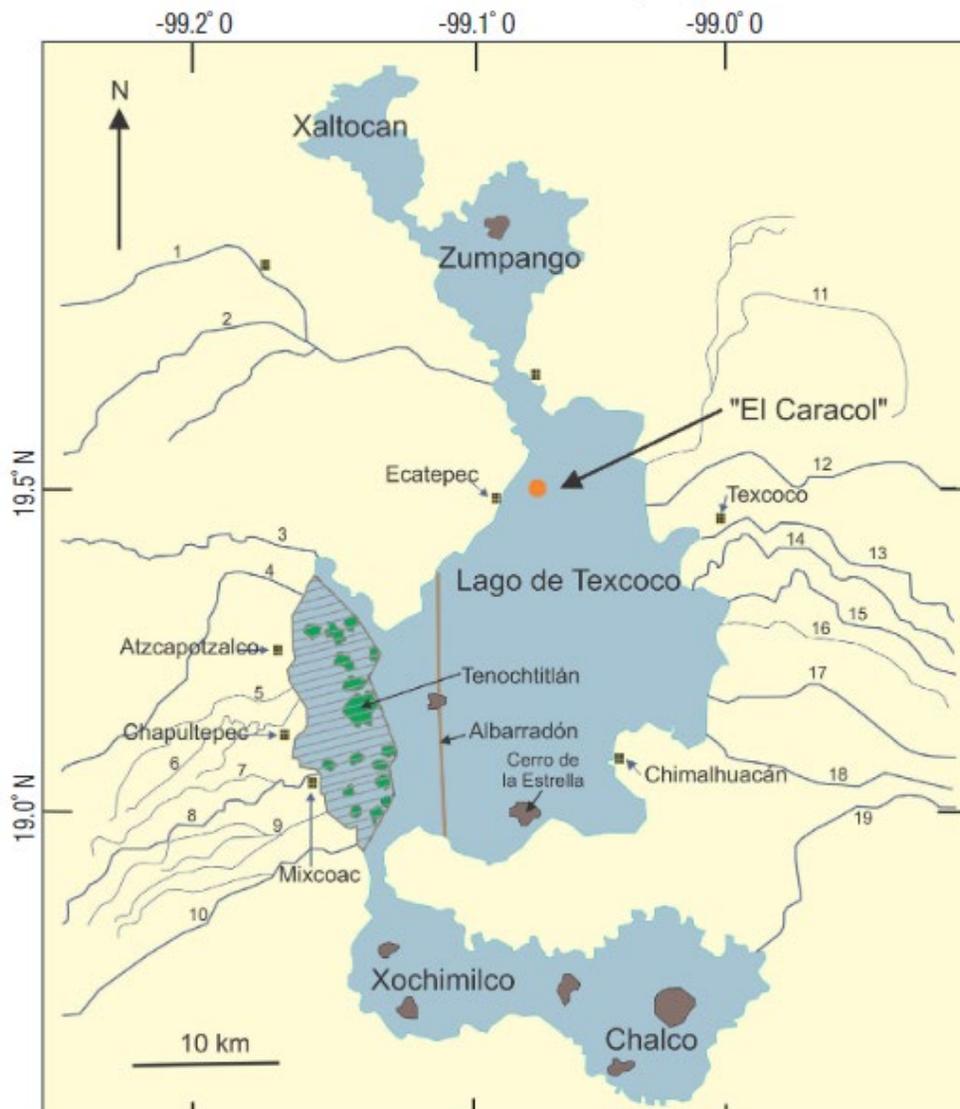


Figura 3-64. Antiguos lagos de la cuenca del Valle de México (Carranza-Edwards, 2018)

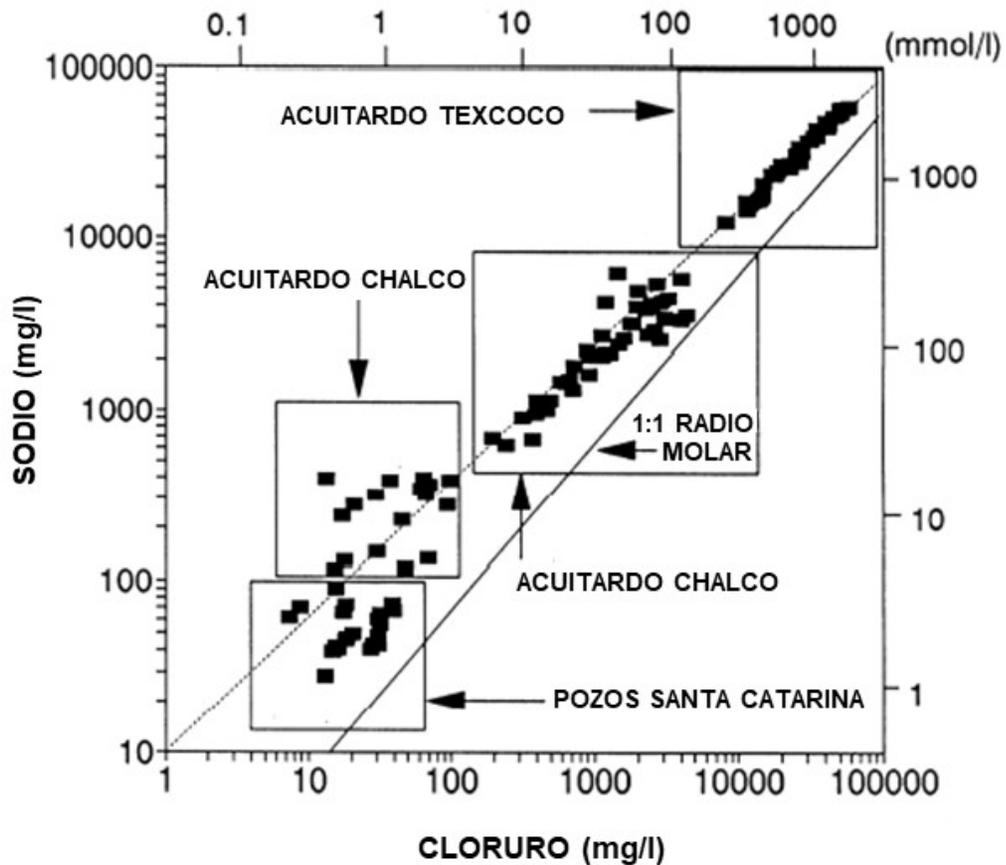


Figura 3-65. Cloruro versus Sodio del acuitardo Texcoco y Chalco (Ortega-Guerrero, 1997)

3.2.5 Estratigrafía y permeabilidades

Desde el punto de vista geológico, la zona del Lago de Texcoco forma parte de los denominados rellenos de vaso de la cuenca de México. Están constituidos en su parte superior por arcillas lacustres subyacidas por clásticos derivados de la acción de ríos, arroyos, glaciares y volcanes (Tamez et al., 1987). Una de las características de esta zona es la presencia de una costra superficial de hasta 1.5 m de espesor (Parra, 2012), subyacida por dos horizontes de arcilla lacustre separados por una capa dura (Figura 3-66). La capa dura está compuesta por materiales limo arenosos ligeramente cementados.

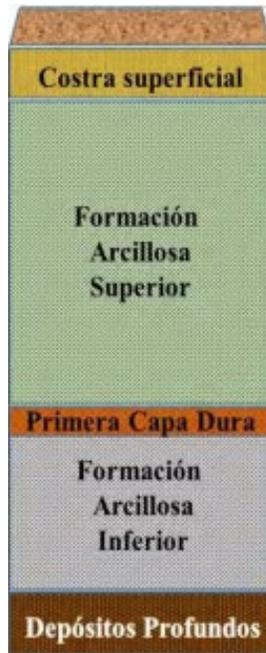


Figura 3-66. Estratigrafía del Ex-Lago de Texcoco (Juárez Velásquez, 2018)

Para determinar las permeabilidades de los materiales que conformaban el modelo geológico-geotécnico del proyecto Lago Texcoco, Herrera et al., utilizaron pruebas de consolidación para estimar las permeabilidades de las formaciones arcillosas superior (FAS) e inferior (FAI), y pruebas de bombeo para determinar las permeabilidades de las formaciones permeables, es decir de la capa dura (CD) y de los depósitos profundos (DP). Las pruebas se realizaron en el sitio del actual Lago Recreativo, al oeste del Lago Nabor Carrillo. En la Tabla 3-42 se presentan las permeabilidades de los materiales que conforman la zona de estudio con base en los resultados de las pruebas de laboratorio y de campo mencionadas.

Tabla 3-42. Permeabilidades determinadas por Herrera et al. (1974)

Estrato	k (m/día)	k (cm/s)
FAS	4.70×10^{-04}	5.44×10^{-07}
CD	6.00	6.94×10^{-03}
FAI	1.44×10^{-05}	1.67×10^{-08}
DP	7.80	9.03×10^{-03}

donde: FAS= Formación Arcillosa Superior; CD= Capa Dura; FAI= Formación Arcillosa Inferior; y DP= Depósitos Profundos.

La permeabilidad de los acuíferos (capa dura CD y depósitos profundos DP) se determinó mediante una serie de pruebas de bombeo realizadas por Zacaula (1977). La permeabilidad de los acuitardos (formaciones arcillosas superior e inferior, FAS y FAI) se estimó a partir de las investigaciones geotécnicas realizadas por Marsal y Mazari (1959), Marsal (1969), Marsal y Graue (1969) y Herrera et al. (1974). En la Tabla 3-43 se resumen las permeabilidades medias determinadas por Rudolph et al. (1989).

Tabla 3-43. Permeabilidades medias determinadas por Rudolph et al. (1989)

Estrato	k (m/día)	k (cm/s)
FAS	4.32×10^{-04}	5.00×10^{-07}
CD	6.91	8.00×10^{-03}
FAI	4.32×10^{-04}	5.00×10^{-07}
DP	8.64	1.00×10^{-02}

donde: FAS= Formación Arcillosa Superior; CD= Capa Dura; FAI= Formación Arcillosa Inferior; y DP= Depósitos Profundos.

López Acosta et al (2016)

López et al, ejecutaron nueve pruebas tipo USBR para determinar la permeabilidad de los materiales más superficiales (costra seca y formación arcillosa superior), nueve pruebas Lefranc para los materiales permeables (lentes en las formaciones arcillosas, capa dura y depósitos profundos), y cuatro pruebas de disipación de presión de poro para los materiales más impermeables (formaciones arcillosas superior e inferior).

En la Tabla 3-44 se presenta una interpretación de los resultados de las pruebas de permeabilidad anteriores, mediante una estratigrafía detallada de las propiedades hidráulicas en la que la formación arcillosa superior (FAS) se divide en cuatro substratos.

Tabla 3-44. Permeabilidades determinadas por López Acosta et al (2016)

Estrato	Profundidad (m)		k	
	de	a	(m/día)	(cm/s)
CS	0.0	0.8	8.0×10^{-03}	9.26×10^{-06}
FAS 1	0.8	9.3	4.0×10^{-05}	4.63×10^{-08}
Lente 1	9.3	9.8	9.2×10^{-04}	1.06×10^{-06}
FAS 2a	9.8	19.0	1.7×10^{-04}	1.97×10^{-07}
FAS 2b	19.0	23.2	1.7×10^{-04}	1.97×10^{-07}
Lente 2	23.2	23.7	9.2×10^{-04}	1.06×10^{-06}
FAS 3	23.7	25.2	1.7×10^{-04}	1.97×10^{-07}
Lente 3	25.2	25.7	9.2×10^{-04}	1.06×10^{-06}
FAS 4	25.7	30.5	1.7×10^{-04}	1.97×10^{-07}
CD	30.5	32.0	2.2×10^{-03}	2.55×10^{-06}
FAI	32.0	44.4	5.0×10^{-05}	5.79×10^{-08}
DP	44.4	50.0	2.8×10^{-03}	3.24×10^{-06}
FAP	50.0	63.0	5.0×10^{-05}	5.79×10^{-08}

donde: CS= Costra Superficial; FAS= Formación Arcillosa Superior; CD= Capa Dura; FAI= Formación Arcillosa Inferior; DP= Depósitos Profundos; y FAP= Formación Arcillosa Profunda.

3.2.6 Evolución piezométrica en el acuitardo

La CONAGUA cuenta con una estación piezométrica (P-536-18) equipada con sondas a diferentes profundidades, la cual tiene registros de lecturas piezométricas del año

1969 al año 2000. Se localiza en la Autopista Peñón -Texcoco km. 5.5, entrada a caballerizas, Municipio de Atenco, Estado de México (Figura 3-67). En la Tabla 3-45 se muestran las profundidades promedio del nivel estático.

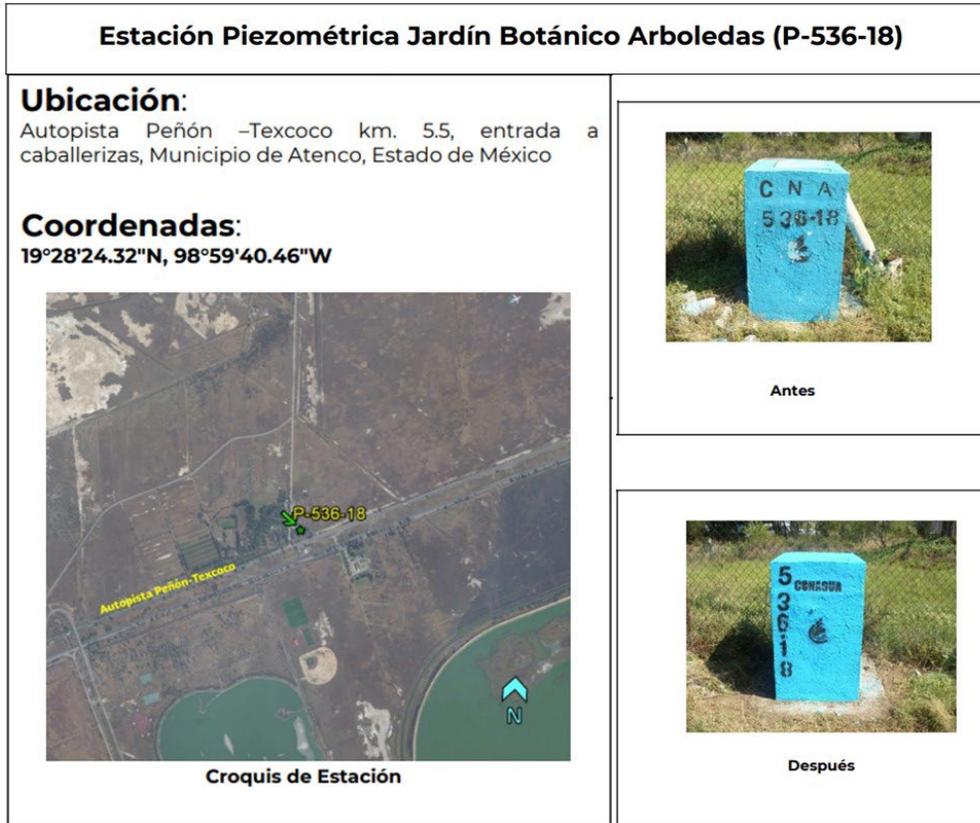


Figura 3-67. Localización de la estación Piezométrica P-536-18

Tabla 3-45. Profundidad promedio del nivel estático en la estación P-536-18

Estación piezométrica P-536-18	
Profundidad promedio nivel estático de los años 1969-2000	
Profundidad de la sonda (m)	Profundidad nivel estático (m)
6	1,58
25	2,13
56	2,71
60	3,00
84	3,53
95	4,37

Se observa en todos los niveles flujos descendentes. Con base en estos datos y la conductividad hidráulica (Tabla 5.2), el goteo vertical del acuitardo hacia el acuífero profundo es de aproximadamente 13.69 mm/año. Palma et al (2019) calcularon que

se infiltra una lámina de 15.8 mm/año del acuitardo hacia el acuífero del Valle de México.

3.2.7 Sistema de drenaje (Río de la Compañía)

Las aguas residuales de las zonas conurbadas y las aguas pluviales precipitadas en la cuenca del Valle de México, son evacuadas por medio de un sistema de drenaje de gran complejidad (Aragón, 2006). En 1992 el sistema estaba constituido por 111.3 km de canales a cielo abierto, 42.65 km entubados, 6 km de túneles semiprofundos y 112.8 km de túneles profundos. Estas cifras se han continuado incrementando durante los últimos años expandiendo la capacidad de drenaje de la red. Los principales canales y ductos del sistema localizados total o parcialmente en el Estado de México incluyen el Río de la Compañía, el Drenaje General del Valle, el Río de Los Remedios, el Gran Canal de Desagüe, el Emisor del Poniente, el Canal Castera, el río Cuautitlán y los sistemas de drenaje profundo y semiprofundo, además de otras obras y cursos menores.

El torrente pluvial de la Sierra Nevada que da origen al Río de La Compañía nace en la vertiente oeste del Iztaccíhuatl y lo constituyen pequeñas cuencas de escurrimiento localizadas al norte del municipio de Chalco, y durante la época de lluvia llega a tener de 4 a 5 metros de anchura y 1.5 metros de profundidad. Dicho torrente baja hacia la planicie con dirección predominante hacia el norponiente hasta Texcoco y se conforma de varios afluentes como los ríos San Rafael, Santo Domingo y San Francisco. En la parte baja, a partir de la carretera a Chalco se le conoce también como Río Miraflores; cruza la Autopista México-Puebla y más adelante la Carretera Federal México-Puebla. En su parte baja cruza por el lecho del antiguo lago de Xochimilco-Chalco, sometido a hundimiento y agrietamiento. Por último, después de la Carretera Federal continua su escurrimiento hacia el ex vaso de Texcoco. En su trayectoria cruza con los municipios de Chalco, Ixtapaluca y Valle de Chalco. El Río es un canal que drena en el sureste del Valle, tanto las aguas residuales de las zonas urbanas de Chalco, Amecameca y alrededores, como las tributarias provenientes de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl. Recibe aguas negras y pluviales de Ixtapaluca, Valle de Chalco, Chicoloapan, Chalco, La Paz, Chimalhuacán y Nezahualcóyotl, a través de cárcamos de rebombeo bajo responsabilidad de organismos descentralizados o de la Comisión del Agua del Estado de México, sirviendo además de límite natural entre los municipios de Chalco e Ixtapaluca. Las aguas ahí recogidas por una red de cursos naturales y canales, es conducida hacia el Norte-noreste en la dirección del vaso de Texcoco. El sistema de drenaje de los municipios conurbados de la zona oriente del estado de México tiene como eje de desagüe el río de La Compañía (Figura 3-68), sobre el cual descargan los canales y arroyos de las zonas urbanas e industriales que atraviesan las cabeceras municipales. Existen zonas habitacionales localizadas sobre cauces de escurrimientos pluviales lo que provoca un riesgo permanente y aunque se han hecho muchas acciones, como aumentar los bordos y represas, la cantidad de azolve que baja es excesiva y se terminan por saturar los cauces, provocando los desbordamientos.



Figura 3-68. Río de la Compañía

3.2.8 Metodología para la caracterización del agua subterránea

3.2.8.1 Toma de muestras

Se recolectaron muestras de agua en seis piezómetros (acuitardo), una de un pozo del Ramal Peñón-Texcoco y una del Río de la Compañía, durante el mes de febrero de 2023 (Figura 3-69 a Figura 3-71). Las muestras se envasaron en botellas de polietileno de alta densidad con tapas de inserciones cónicas y poliseal (Figura 3-72). Las muestras para aniones e isótopos estables se preservaron a 4°C. Las muestras para metales y cationes, se acidificaron a $\text{pH} < 2$ con ácido nítrico de ultra alta pureza.

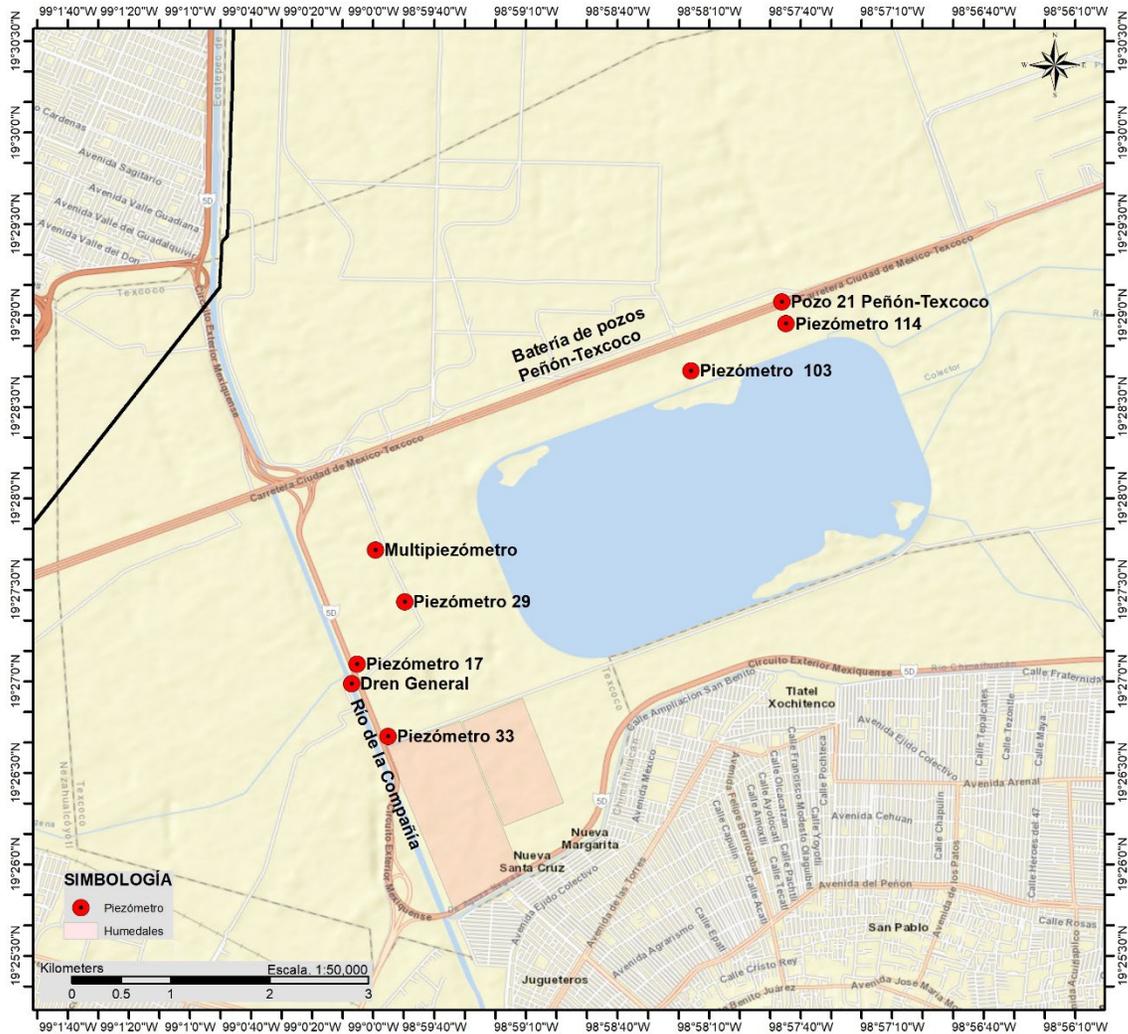


Figura 3-69. Localización de los sitios de muestreo del agua superficial y subterránea.

Para la toma de muestras se utilizó un muestreador SEBA KLL-S. Con estos equipos es posible tomar muestras de fluidos de la profundidad deseada con precisión de centímetros. Para este propósito, un tubo de revestimiento está suspendido por encima del pistón. Al llegar a la profundidad de muestreo un mecanismo de obturación provocada una caída de peso que empuja la cubierta por encima de los pistones. La muestra de líquido se puede recuperar fácilmente a continuación con la manivela en el KLL-S y se retira con un toque.

Especificaciones

Parámetro:

Nivel del agua [cm]

Carcasa

Material:

Punta de latón niquelado de acero inoxidable

Dimensiones:

Ø14mm, longitud: 175 mm, Opcional: Ø 10 mm, longitud: 320 mm

Bastidor de soporte:

Superficie revestida de aluminio

Tambor de cable:

Plástico resistente a las temperaturas y los impactos

Cable

Longitudes:

0-15/30/50/80/100/150/200/300/500m

Material:

Cable plano de 2 conductores, polietileno con cuerdas de acero y núcleo de cobre

Escala:

División cm negra, numeración dm, cifras rojas del medidor

Precisión:

<1 cm (KLL 100m)

Temperatura de funcionamiento:

De -15 °C a 50 °C

Muestreador

Material:

Carcasa:

Aluminio, acero inoxidable, POM

Tubo envolvente:

Aluminio anodizado o transparente de PVC

Dimensiones:

KLL-S 2" Ø49mm, longitud: 1750 mm, capacidad de 0,5 litros



Figura 3-70. Toma de muestras en el piezómetro 103

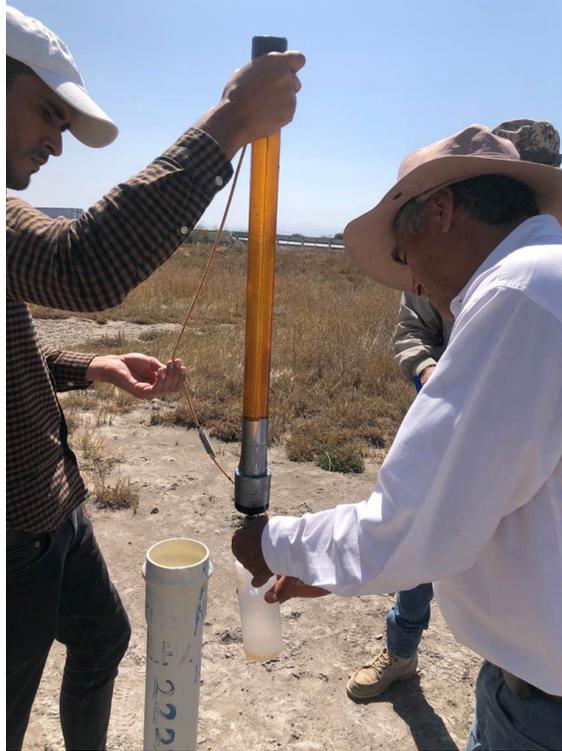


Figura 3-71. Toma de muestras en el piezómetro 33



Figura 3-72. Muestras del piezómetro 33

3.2.8.2 Parámetros de campo

Los parámetros medidos en campo fueron: potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD), temperatura del agua y temperatura ambiente (T). Las metodologías utilizadas se describen a continuación: 1) La medición de la actividad de los iones hidrógeno en el agua subterránea se efectuó por medio de un potenciómetro. La calibración del equipo se realizó utilizando la técnica de calibración en tres puntos, a partir de soluciones *buffer* de pH conocido. En esta técnica, el pH a registrar debe ubicarse entre tales valores extremos. En la calibración del equipo se utilizaron soluciones de 4.0, 7.0 y 10.0 unidades de pH, 2) La conductividad eléctrica se midió por medio de un conductivímetro portátil con compensación por temperatura. La calibración del equipo se realizó utilizando una solución estándar de cloruro de potasio (KCl) de 1,412 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25 °C, 3) La medición de la cantidad de oxígeno disuelto en el agua subterránea se llevó a cabo utilizando un electrodo con sensor de membrana galvánica recubierta, con compensación de temperatura. El electrodo de oxígeno disuelto se calibró de acuerdo con las condiciones atmosféricas del lugar, es decir en equilibrio con el aire a la elevación sobre el nivel medio del mar del sitio, 4) La temperatura ambiente y del agua se midieron con electrodos previamente calibrados en laboratorio y verificados en campo. En las figuras 5-17 a 5-19 se muestra el equipo que se utilizó para medir los parámetros de campo.



Figura 3-73. Equipo utilizado para medir parámetros en campo



Figura 3-74. Parámetros del piezómetro 103



Figura 3-75. Medición del nivel estático en el piezómetro 29

3.2.8.3 Determinación de parámetros químicos e isotópicos en laboratorio

Los análisis de isótopos estables se realizaron en el laboratorio de hidrología isotópica del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), utilizando un analizador de isótopos de agua de espectroscopia de anillo de cavidad (cavity ring-down) Picarro L2110-i (Figura 3-76). La precisión analítica es de $\pm 0.5 \text{ ‰}$ para $\delta^2\text{H}$ y $\pm 0.13 \text{ ‰}$ para $\delta^{18}\text{O}$.



Figura 3-76. Analizador de isótopos de agua Picarro L2110-i

Los análisis químicos de las muestras de agua subterránea, se realizaron por medio de inducción de plasma acoplado a espectroscopia óptica (cationes) y cromatografía de líquidos (aniones).

El Laboratorio cuenta con el siguiente equipo e instalaciones para la preparación y análisis de muestras.

- Espectrómetro de emisión óptica con plasma acoplado por inducción Thermo iCAP 6500 Duo View.
- Espectrofotómetro de Absorción Atómica Perkin Elmer Analyst 300 con flama y sistema de inyección de flujo FIAS 100.
- Cromatógrafo de líquidos de alta resolución Dionex IC1100 con bomba isocrática y detector de conductividad.
- Potenciómetro ORION950.
- Sistema de digestión con microondas CEM MarxXpress con controlador de temperatura.
- Campana de flujo laminar y campana de extracción de polipropileno.

3.2.8.4 Nivelación de brocales

Los trabajos de nivelación de brocales se llevaron a cabo mediante una estación total Sokkia SET 330 RK3. Con esta Estación Total se obtiene una precisión laser en distancias y una precisión digital en los ángulos. Además, a partir de ambas variables (ángulos y distancias verticales y horizontales) más la ubicación actual la Estación Total calcula y almacena las coordenadas geográficas de cada punto observado (N, E, Z).

El sistema consiste (Figura 3-77) en las siguientes partes:

TRIPODE: Es la estructura sobre la que se monta el aparato en el terreno.

BASE NIVELADORA: Es una plataforma que usualmente va enganchada al aparato, sirve para acoplar la Estación Total sobre el Trípode y para nivelarla horizontalmente. Posee 3 tornillos de nivelación y un nivel circular.

ESTACION TOTAL: Es el aparato como tal, y básicamente está formado por un lente telescópico con objetivo laser, un teclado, una pantalla y un procesador interno para cálculo y almacenamiento de datos. Funciona con baterías de litio recargables.

PRISMA: Es conocido como objetivo (target) que al ubicarse sobre un punto desconocido y ser observado por la Estación Total capta el láser y hace que rebote de regreso hacia el aparato. Un levantamiento se puede realizar con un solo prisma, pero para mejorar el rendimiento se usan al menos dos de ellos.

BASTON PORTA PRISMA: Es una especie de bastón metálico con altura ajustable, sobre el que se coloca el prisma. Posee un nivel circular para ubicarlo con precisión sobre un punto en el terreno. Se requiere un bastón por cada prisma en uso.



Figura 3-77. Equipo para nivelación de brocales

En la Figura 3-78 y Figura 3-79 se muestra la nivelación de los piezómetros 17 y 29.

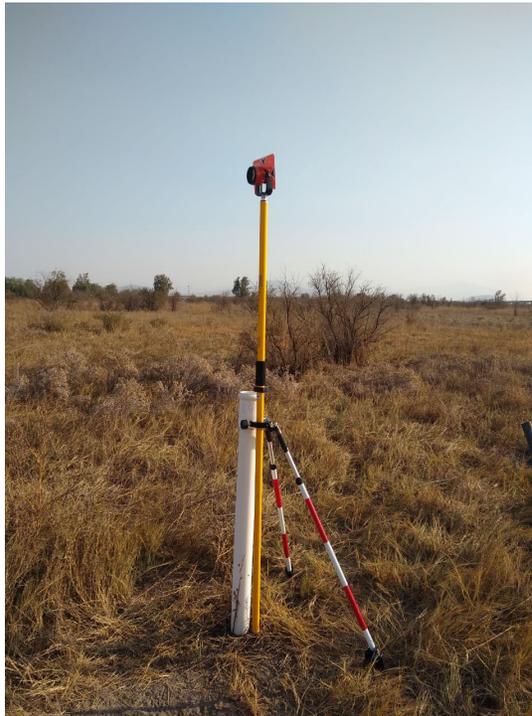


Figura 3-78. Nivelación del piezómetro 29



Figura 3-79. Nivelación del piezómetro 17

3.2.9 Resultados

3.2.9.1 Parámetros de campo

En la Tabla 3-46 se presentan los valores de los parámetros físico-químicos medidos en campo, del agua de los aprovechamientos subterráneos y superficiales, la profundidad del nivel estático y la elevación de los piezómetros 17 y 29.

El rango de la temperatura del agua va de 15 °C a 24.9 °C, el oxígeno disuelto de 1.7 mg/l a 3.7 mg/l, el pH de 7.36 a 9.69 (Figura 3-80), y la conductividad eléctrica de 1840 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 55700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 3-81). La menor conductividad corresponde al agua del Río de la Compañía, y la mayor a las muestras de los piezómetros. En la Figura 3-82 se presenta la dirección del flujo subterráneo.

Tabla 3-46. Parámetros medidos en campo

Identificación	Fecha	Coordenadas			Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura de la Muestra (°C)	pH	Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	OD (mg/L)	Profundidad Nivel estático (m)	Elevación del Nivel estático (msnm)
		Latitud	Longitud	Altitud							
Piezómetro 103	15/02/2023	19. 478292	98. 971062		23.5	19.0	9.63	35900	1.7	3.6	
Piezómetro 33	15/02/2023	19. 444962	98. 998612		32.0	21.0	9.6	53300	2.8	1.75	
Piezómetro 17	15/02/2023	19. 451570	99. 001433	2,229.271	29.5	19.2	9.69	50300	2.4	1.47	2,227.801
Dren General	15/02/2023	19. 449762	99. 001953		31.0	21.9	7.63	1840	1.8		
Multipiezómetro	16/02/2023	19. 461958	98. 999763		20.2	15.5	9.49	55700	2.4	1.31	
Piezómetro 29	16/02/2023	19. 457230	98. 997117	2,228.965	29.4	15.0	9.34	51200	2.7	1.63	2,227.335
Piezómetro 114	16/02/2023	19. 482575	98. 962403		32.3	15.6	9.05	21400	1.8	3.8	
Pozo 21 Peñón- Texcoco	17/02/2023	19. 484570	98. 962805		29.5	24.9	7.36	3670	3.7	72.5	

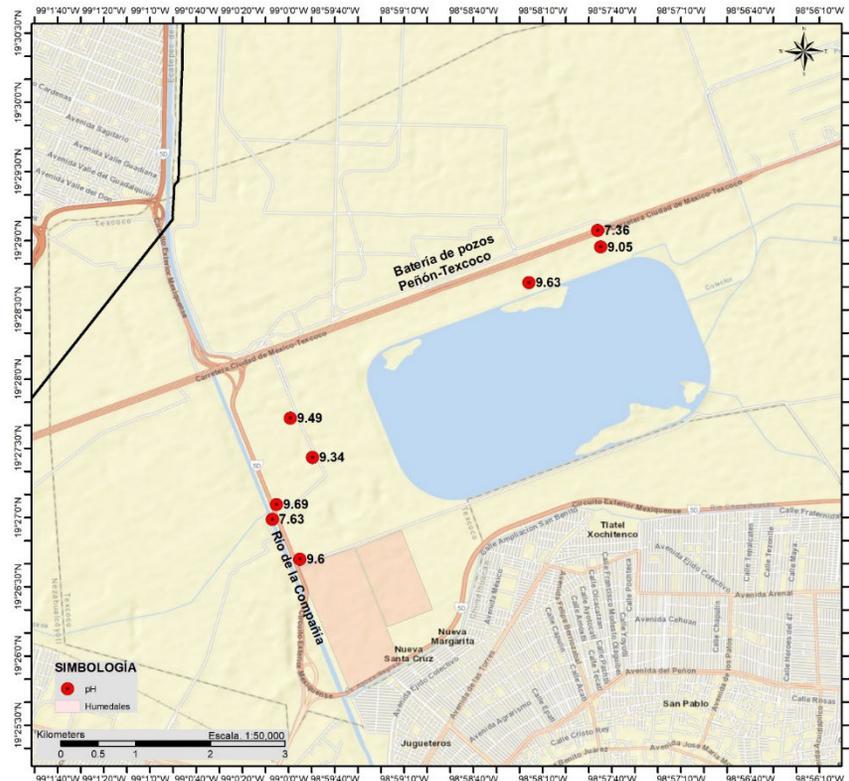


Figura 3-80. Valores de pH del agua de los aprovechamientos

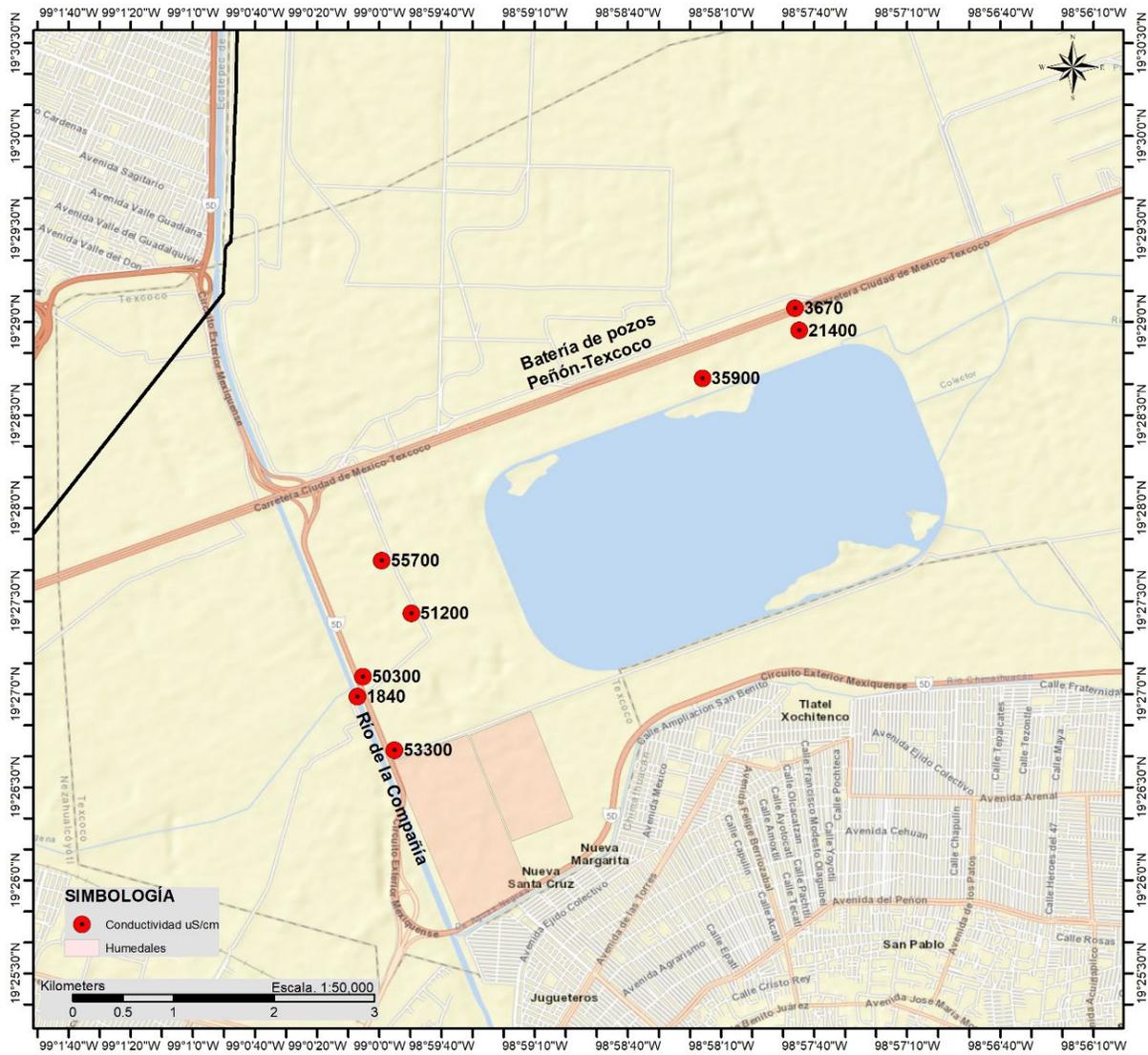


Figura 3-81. Valores de conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) del agua de los aprovechamientos



Figura 3-82. Dirección del flujo subterráneo

3.2.9.2 Parámetros de laboratorio

En la Tabla 3-47 se presentan los valores de los parámetros químicos medidos en laboratorio del agua subterránea y superficial.

Tabla 3-47. Parámetros medidos en laboratorio

Identificación	Na	Ca	Mg	K	SO4	HCO ₃	Cl	SDT
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	ppm
Piezómetro 103	8736	4	4	1135	647	5271	7152	24053
Piezómetro 33	14135	3	1	1802	466	8228	11898	35711
Piezómetro 17	13483	29	62	1573	261	9000	11213	33701
Río La Compañía	229	36	30	40	77	819	153	1233
Multipiezómetro	14292	8	18	1716	496	10542	13140	37319
Piezómetro 29	13536	6	12	1742	843	12771	10968	34304
Piezómetro 114	5078	9	23	727	1668	2571	3879	14338
Pozo 21 Peñón-Texcoco	336	222	114	37	7	704	943	2459

En cuanto a los piezómetros, el principal catión es el Na⁺, con el siguiente orden de abundancia Na⁺» K⁺» Mg²⁺» Ca²⁺ (Figura 3-83 y Figura 3-84). El principal anión es el Cl⁻, con el siguiente orden de abundancia Cl⁻» HCO₃⁻» SO₄²⁻ (Figura 3-83 y Figura 3-84). Con respecto al pozo profundo, el principal catión es el Na⁺, con el siguiente orden de abundancia Na⁺» Ca²⁺» Mg²⁺» K⁺ (Figura 3-83 y Figura 3-84). El principal anión es el Cl⁻, con el siguiente orden de abundancia Cl⁻» HCO₃⁻» SO₄²⁻ (Figura 3-83 y Figura 3-84). Con relación al Río de los Remedios, el principal catión es el Na⁺, con el siguiente orden de abundancia Na⁺» Mg²⁺» Ca²⁺»K⁺ (Figura 3-83 y Figura 3-84). El principal anión es el HCO₃⁻, con el siguiente orden de abundancia HCO₃⁻» Cl⁻»SO₄²⁻ (Figura 3-83 y Figura 3-84).

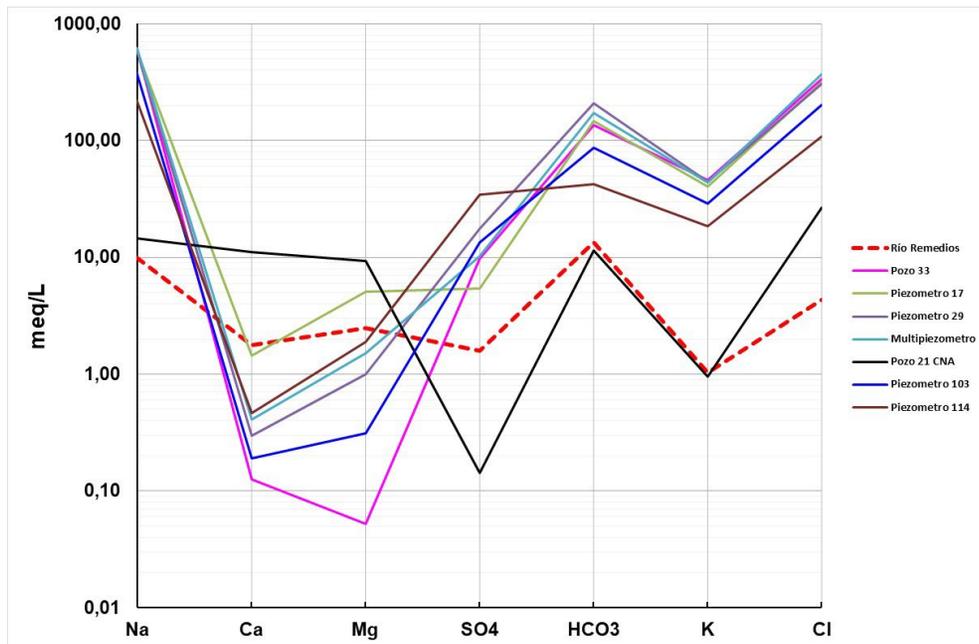


Figura 3-83. Diagrama de Schoeller

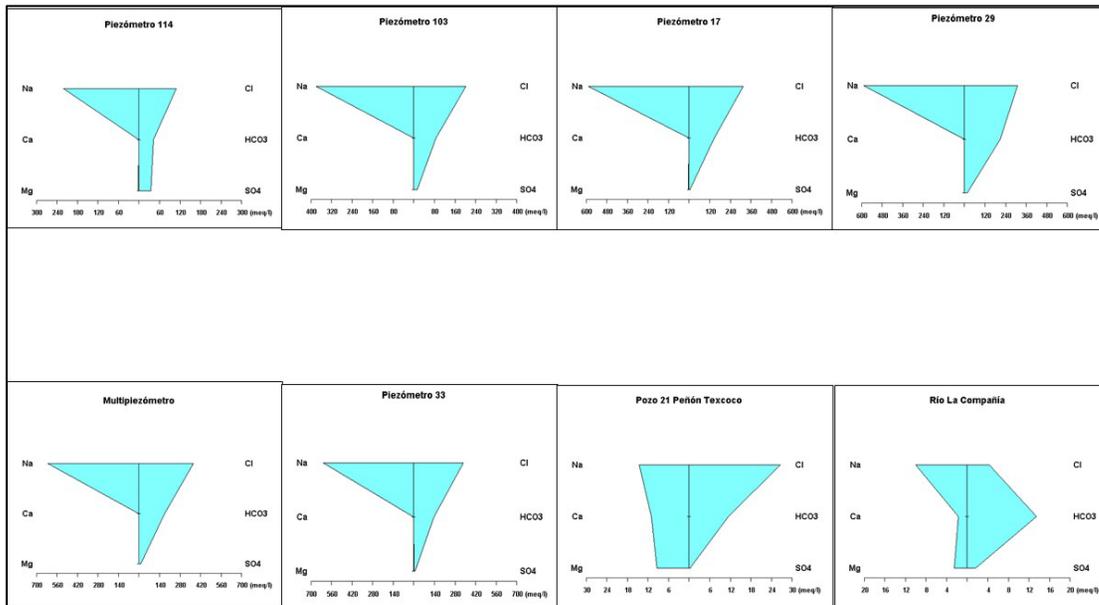


Figura 3-84. Diagramas de Stiff

La superficie de las arcillas presenta cargas negativas, las cuales atraen cationes en una capa exterior, difusa, en equilibrio dinámico con la solución. Los cationes adsorbidos están débilmente unidos y pueden llegar a intercambiarse con otros cationes de la solución. El cambio se producirá cuando un catión en el agua tenga más fuerza de adsorción y desplace a otros que estaban adheridos a las arcillas. Los divalentes son adsorbidos más fuerte que los monovalentes, y dentro de cada grupo, tienen mayor fuerza los de menor radio iónico hidratado. La secuencia de mayor a menor fuerza es: $Ba^{2+} > Sr^{2+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+ > Li^+$. Este proceso se conoce como intercambio catiónico, donde el calcio y el magnesio del agua del acuitardo se intercambian con el sodio de las arcillas. Es decir, el calcio y el magnesio se adsorben a las arcillas, mientras que el sodio y el potasio se desadsorben incorporándose al agua subterránea. Esta es la razón del orden de abundancia de los cationes en los piezómetros $Na^+ \gg K^+ \gg Mg^{2+} \gg Ca^{2+}$.

Los procesos geoquímicos que controlan la composición química del agua, se pueden dilucidar utilizando el diagrama de Gibbs (Gibbs, 1970). En este diagrama se grafican los sólidos disueltos totales (SDT) en función de la relación aniónica $Cl^- / (Cl^- + HCO_3^-)$. En la Figura 3-85 se distinguen dos grupos. En el agua superficial, Río de la Compañía, el proceso dominante es la meteorización del material geológico. En el agua subterránea, acuitardo, el proceso dominante es la evaporación.

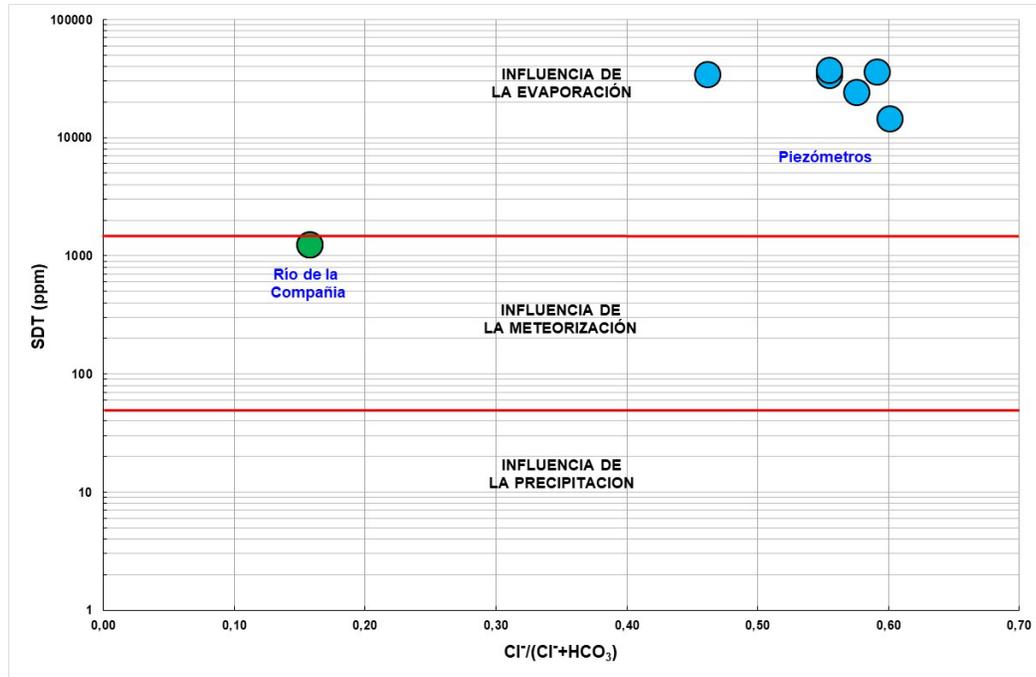


Figura 3-85. Diagrama de Gibbs

El incremento en la salinidad debido a evaporación se observa con claridad en el comportamiento del cloruro versus sodio (Figura 3-86). Los datos se ajustan a una línea de evaporación con una pendiente de 1.

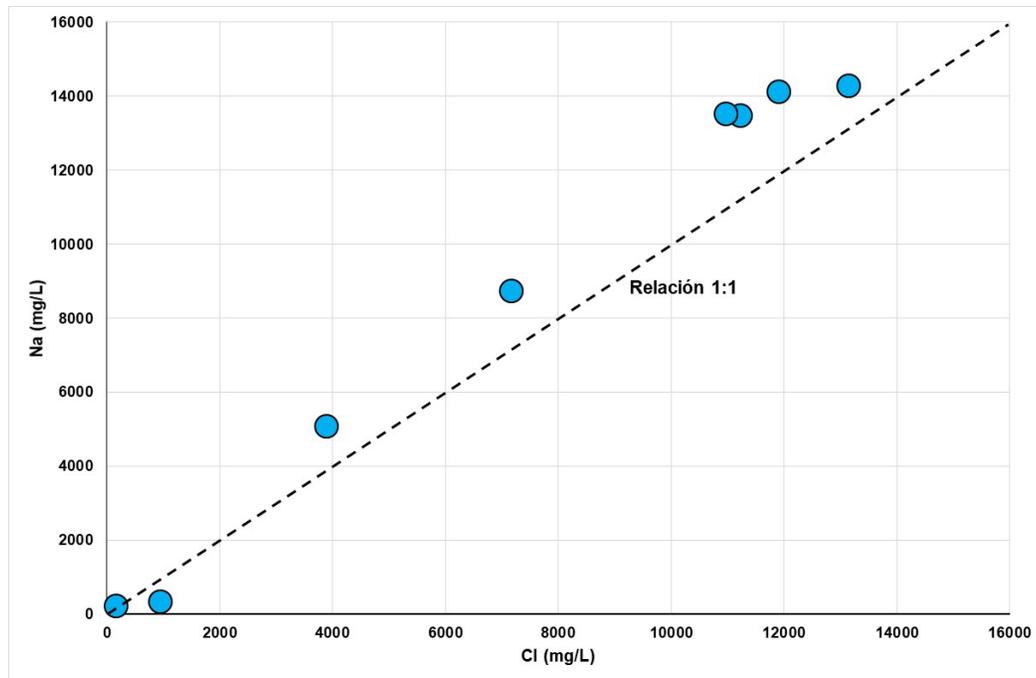


Figura 3-86. Cloruro versus Sodio de las muestras de agua

3.2.10 Análisis de resultados

3.2.10.1 Infiltraciones del Río de la Compañía

La diferencia de conductividad entre el agua del Río de la Compañía y el agua del acuitardo, producirá una condición de densidad variable donde el agua dulce se acumula sobre el agua subterránea salina (Rotz, 2019). Este fenómeno es descrito por la ecuación de Dupuit-Ghyben-Herzberg (Bear, 1979). La formación de una lente de agua dulce (espesor y longitud), en general depende de las condiciones climáticas (lluvia y evapotranspiración) y de las condiciones geomorfológicas (depresión topográfica y conductividad hidráulica del medio poroso). En el caso de estudio, de la fuente que es el río y la conductividad hidráulica del acuitardo. En la Figura 3-87 se muestra el esquema de la interacción entre el agua del Río de la Compañía y el agua salina del acuitardo del Lago de Texcoco. Se puede observar que la conductividad del agua del piezómetro 17 (50300 $\mu\text{S}/\text{cm}$) es similar a la del piezómetro 29 (51200 $\mu\text{S}/\text{cm}$), y sensiblemente mayor que la del Río de la Compañía (1840 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Se infiere que la conductividad hidráulica de la Formación Arcillosa Superior es tan baja que no ha permitido la formación de una lente de agua dulce, o la lente es tan pequeña que no se detectó aún en los piezómetros aledaños ($\approx 100\text{m}$) al Río de la Compañía. Por lo tanto, se concluye que la infiltración del agua de los humedales hacia el acuitardo será mínima y nula hacia el acuífero profundo del Valle de México

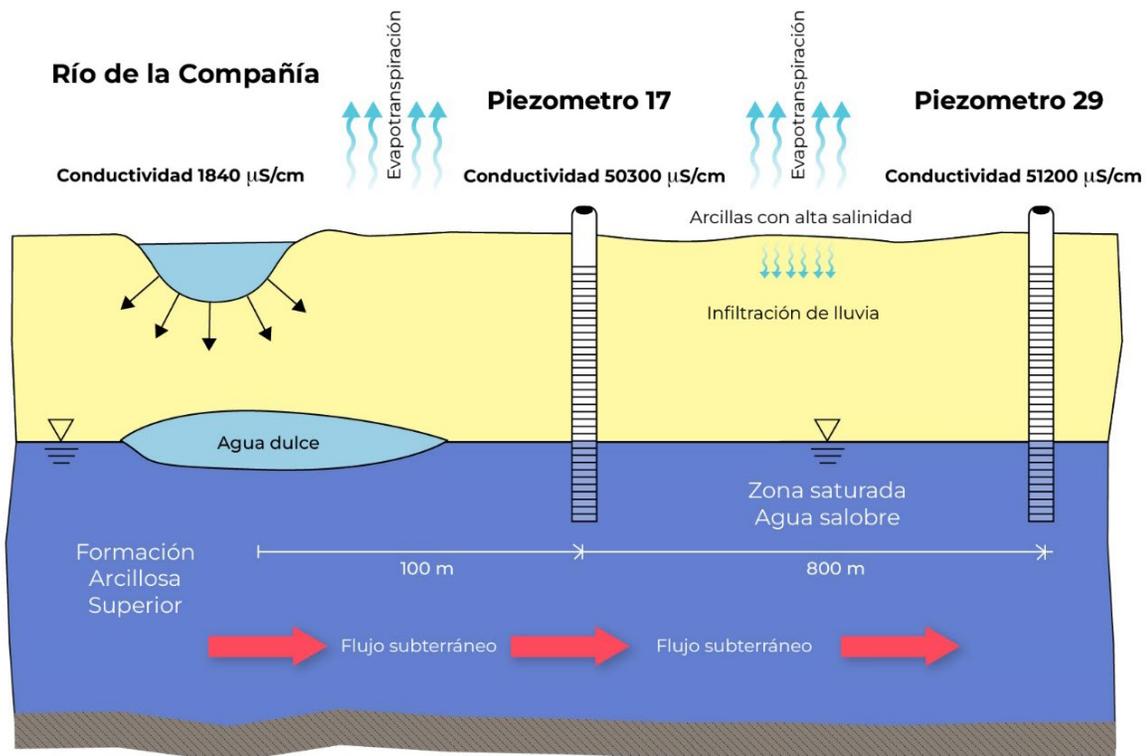


Figura 3-87. Interacción entre el agua del Río de la Compañía y el agua salina del acuitardo del Ex-Lago de Texcoco

3.2.10.2 Isótopos Estables

En la Tabla 3-48 y la Figura 3-88 se presentan los valores de los isótopos estables medidos en laboratorio, del agua de los piezómetros, del Río de la Compañía y del pozo profundo CNA 21 (Ramal Peñón-Textcoco).

Tabla 3-48. Isótopos estables de las muestras de agua.

Muestra	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
Piezómetro 33	-3,81	-35,7
Piezómetro 103	-3,06	-31,8
Piezómetro 17	-3,19	-34,3
Piezómetro 29	-3,53	-38,6
Multipiezómetro	-2,65	-32,5
Pozo 21 CNA (Peñón-Textcoco)	-9,33	-62,5
Río de la Compañía	-9,63	-68,1
Piezómetro 14	-4,15	-40,7

La muestra de agua del pozo CNA 21 que pertenece al Ramal Peñón-Textcoco, cae sobre la Línea Meteórica del Valle de México, lo cual indica que es agua de precipitación pluvial que no sufrió evaporación antes de infiltrarse. La muestra del Río de la Compañía está ligeramente corrida a la derecha de la Línea Meteórica, lo cual indica agua de precipitación pluvial ligeramente evaporada, normal en un canal a cielo abierto. Las muestras de los piezómetros están muy enriquecidas en isótopos estables pesados, lo cual indica que sufrieron evaporación intensa antes de infiltrarse al subsuelo. La diferencia de la composición isotópica entre el agua del acuitardo y el agua superficial, indica que el Río de la Compañía no recarga a los Piezómetros. Por lo tanto, se confirma la conclusión que la infiltración del agua de los humedales hacia el acuitardo será mínima y nula hacia el acuífero profundo del Valle de México.

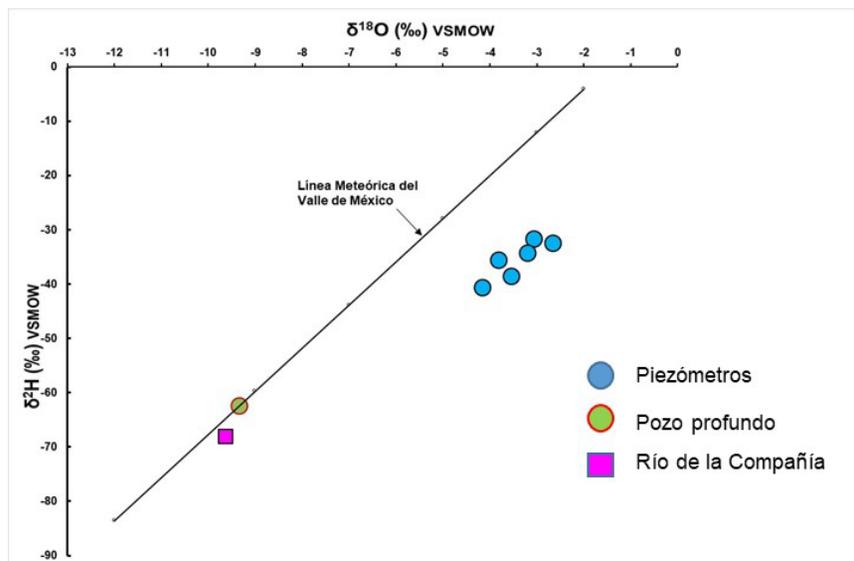


Figura 3-88. Composición isotópica del agua superficial, del agua del acuitardo y del agua subterránea profunda.

3.2.10.3 Infiltraciones del Humedal

La filtración del agua hacia el suelo desde un embalse puede ser descrita por la teoría de Green-Ampt (Bouwer, 1986), la cual considera que el agua infiltrada desciende en el suelo como flujo pistón. Aplicando la ecuación de Darcy a este sistema de flujo se obtiene (Bouwer, 1986),

$$q = K [(H+L)/L]$$

q = Tasa de infiltración (Longitud/Tiempo)

K = Conductividad hidráulica del subsuelo (Longitud/Tiempo)

H = Tirante de agua en el embalse (Longitud)

L = Profundidad entre el lecho del embalse y el nivel freático.

Para nuestro caso de estudio (Figura 3-89);

K = 0.00004 m/día (López Acosta et al., 2016)

H = 1 m (tirante en el humedal)

L = 2 m (profundidad a la zona saturada)

q = 0.00004 m/día $\{(1 \text{ m} + 2\text{m})/2\text{m}\}$

q = 0.00006 m/día

q = 0.0219 m/año

q = 2.19 cm/año

Palma et al (2019) calculan que se infiltra una lámina de 1.58 cm/año del acuitardo hacia el acuífero del Valle de México.

De acuerdo con la distribución espacial del nivel de agua freática del acuitardo (Figura 3-90), que determinaron investigadores del instituto de ingeniería de la UNAM (IIUNAM, 2014), el humedal se localizará en una zona de gradiente hidráulico muy pequeño, por lo que la lente de agua permanecerá en la zona del humedal.

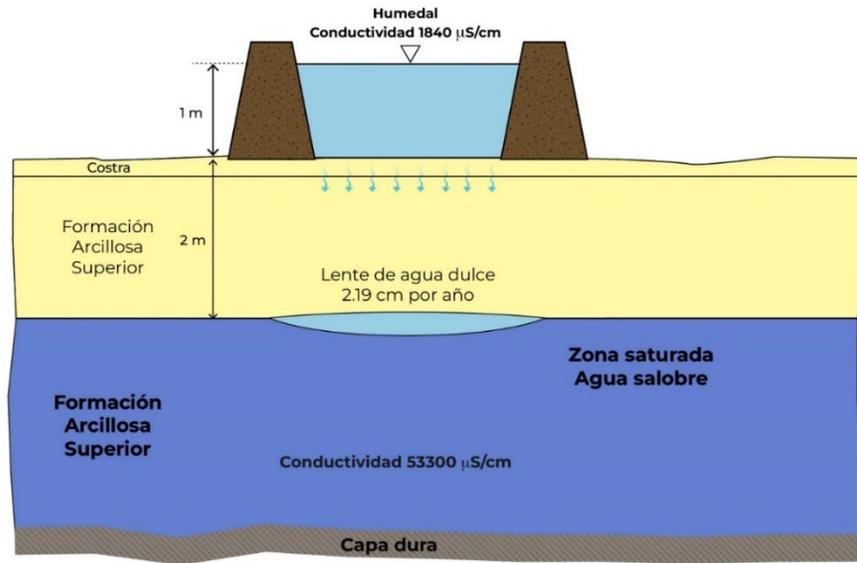


Figura 3-89. Lente de agua dulce producida por la infiltración del humedal anualmente.

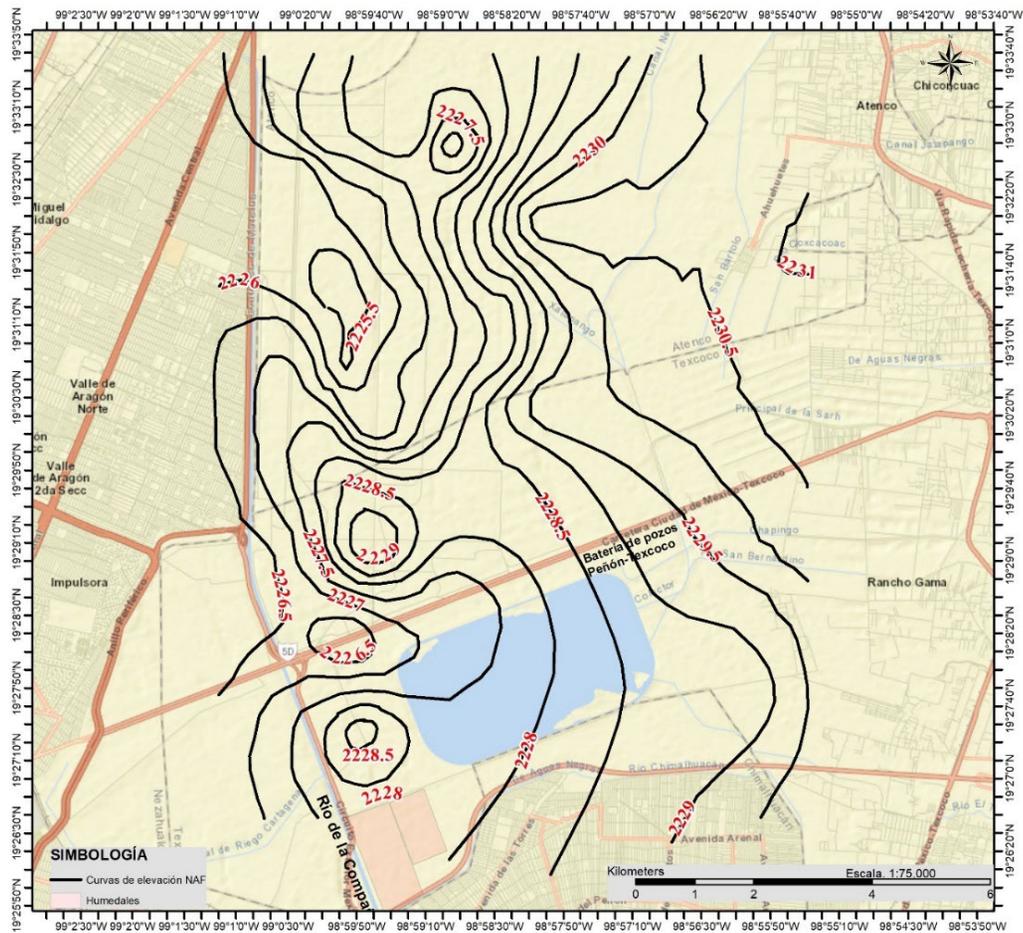


Figura 3-90. Distribución espacial del nivel de agua freática del acuitardo (IIUNAM, 2014)

3.2.11 Modelo de perfil para la zona del humedal en Texcoco

Los modelos de sección transversal o de perfil son útiles cuando el flujo vertical es importante pero no se justifica o no es posible el diseño de un modelo tridimensional completo, también son útiles para probar la validez del modelo conceptual del sistema antes de diseñar un modelo tridimensional completo, se han utilizado con frecuencia en un sentido interpretativo para estudiar patrones en sistemas de flujo regionales. Un modelo de perfil asume que todo el flujo ocurre paralelo y en el plano del perfil. Por esta razón, los modelos de perfil estándar no son útiles para simular sumideros puntuales o fuentes de agua (por ejemplo, pozos) incrustados en el perfil. Sin embargo, se pueden utilizar perfiles axisimétricos para incluir sumideros en la simulación (Anderson y Woessner, 1992).

Para el caso del Lago de Texcoco se utilizará un modelo de perfil para validar el comportamiento del modelo conceptual del sistema de flujo local bajo el humedal.

Diseño del modelo de perfil

Para el diseño del modelo de perfil, tomando en cuenta las mediciones en tres piezómetros instalados próximos a la zona propuesta para la construcción de los humedales, se definió una línea de flujo y se propuso la sección transversal A-A' que se muestra en la Figura 3-91.

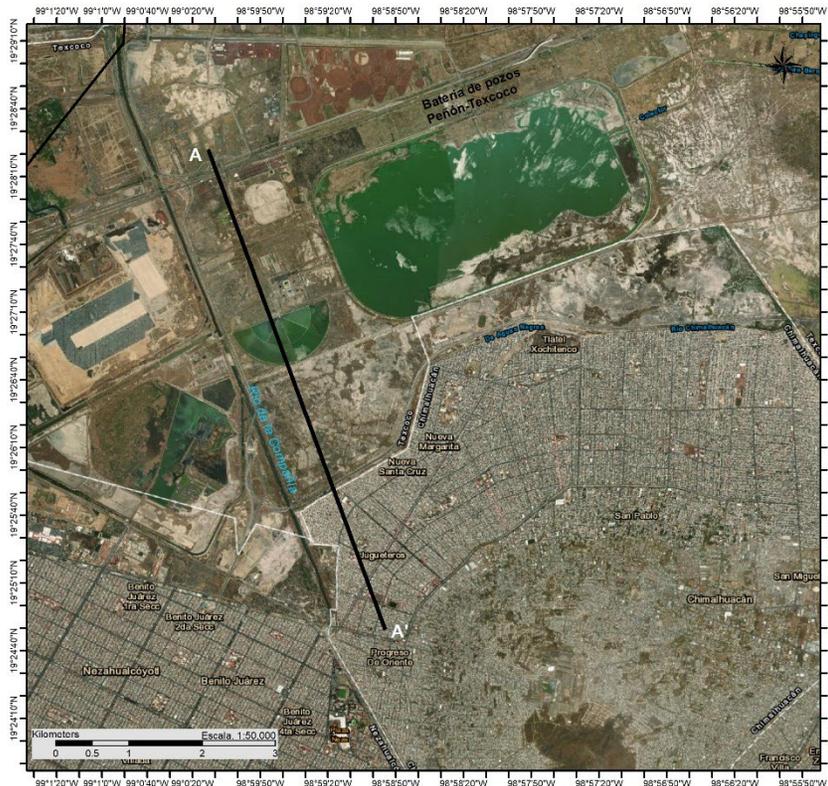


Figura 3-91. Ubicación de la sección AA' sobre la que se diseñará el modelo de perfil

Se diseñó una malla que consta de 611 columnas y 21 filas que constituyen un total de 12831 celdas, de la cuales 10522 son celdas activas. En la Figura 3-92 se muestra el diseño de la malla del modelo.

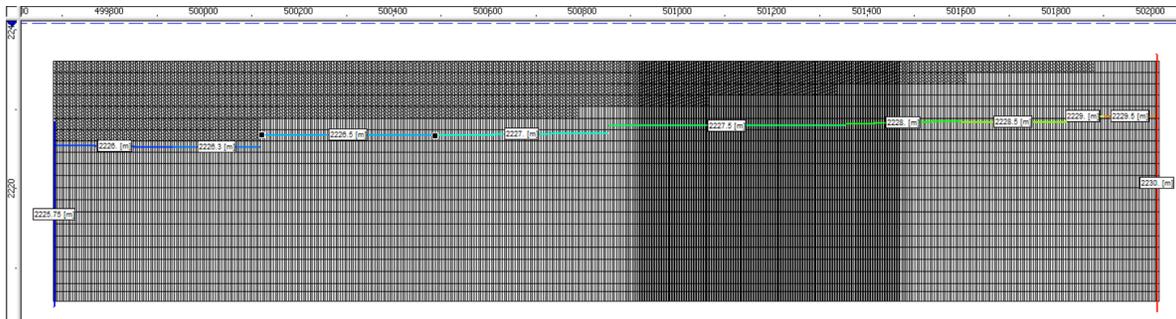


Figura 3-92. Malla del modelo y condiciones de frontera de carga constante asignados al modelo de perfil de la sección A-A'

Condiciones de frontera.

Como se sugiere en los modelos de perfil se asignaron condiciones de frontera de carga asignada para el nivel freático del acuífero, niveles que se presentan en la parte superior de la Figura 3-92, así como condiciones de carga asignada para las celda ubicadas en los extremos de cada sección del perfil (Figura 3-92). En la Figura 3-92 se presentan los valores de las condiciones de frontera de carga constante asignadas al modelo.

Condición inicial

Para la condición inicial se obtuvo a partir de las mediciones de los niveles estáticos en tres piezómetros ubicados en la zona de estudio y próximos a la ubicación del humedal y alineados con el perfil A-A'. En la Figura 3-93 se presenta la condición inicial asignada al modelo correspondiente al año 2023.

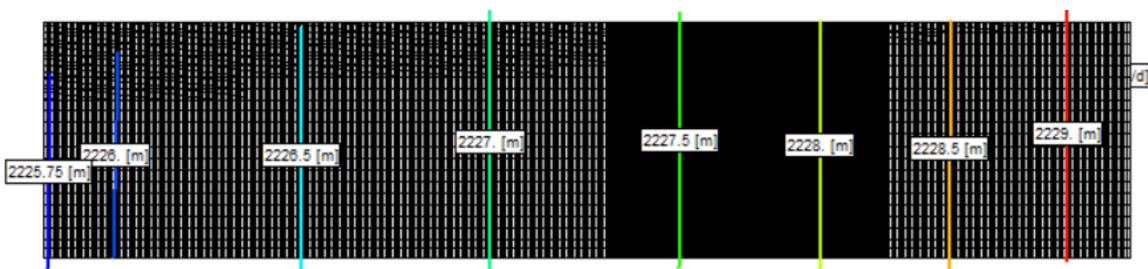


Figura 3-93. Condición inicial asignada al modelo correspondiente al año 2023.

Conductividad hidráulica y rendimiento específico

La conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento se supusieron homogéneos en el dominio del modelo. La conductividad hidráulica tiene un valor de 0.000432 m/d y el rendimiento específico de 0.06, para la asignación de ambos valores se consideró un medio poroso constituido por arcillas de baja permeabilidad y porosidad.

Recarga vertical

De acuerdo con el estudio de disponibilidad de Conagua (2020) la precipitación media anual de la zona de estudio es de 750 mm. Si se considera para el modelo que recarga el 10 % de la precipitación media anual, se tendría una lámina de recarga media anual de 75 mm. Dado lo anterior para el modelo se consideró una lámina de recarga diaria de 0.00021 m/d. En la Figura 3-94 se presenta las celdas en donde se asignó la recarga vertical.

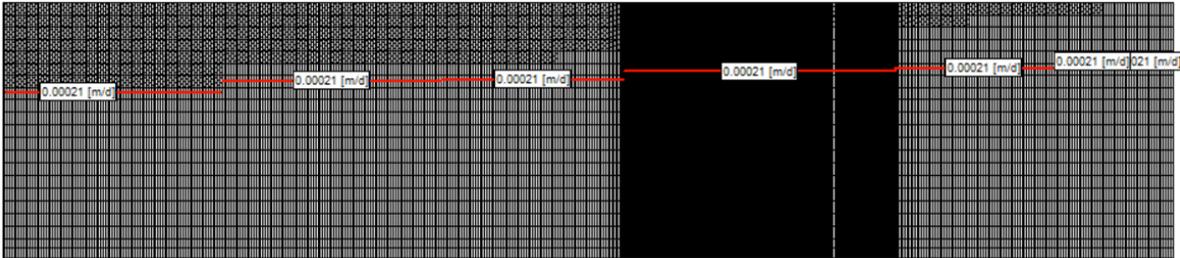


Figura 3-94. Lámina de recarga vertical diaria asignada al modelo de perfil

Evapotranspiración real

Se consideró para el modelo una evapotranspiración real del 60 % con respecto a la precipitación media anual reportada en CONAGUA (2020), lo que representa una lámina de 450 mm anuales, si se considera que el nivel freático en la zona de estudio está a tres metros de profundidad, la radiación solar incidiría en una evapotranspiración del manto freático con una lámina aproximada de 315 m por año. Al modelo se le asignó una lámina de evapotranspiración diaria de 0.00086 m/d. En la Figura 3-95 se presentan las celdas a las que se le asignó la evapotranspiración diaria.

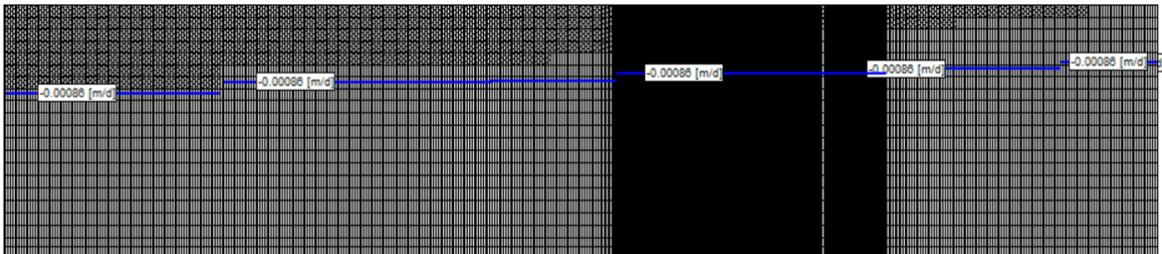


Figura 3-95. Lámina de evapotranspiración diaria asignada al modelo de perfil

Asignación del humedal al modelo

Para la asignación del humedal en el modelo de perfil se consideró la opción del paquete río. Al modelo se le asignó una elevación del nivel de agua en el humedal de 2228.5 m y una conductancia de 0.000432 1/d. En la Figura 3-96 se presenta la ubicación del humedal en el modelo de perfil.

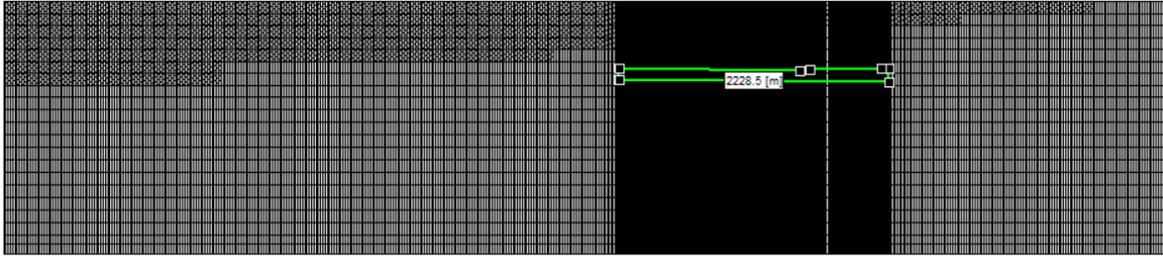
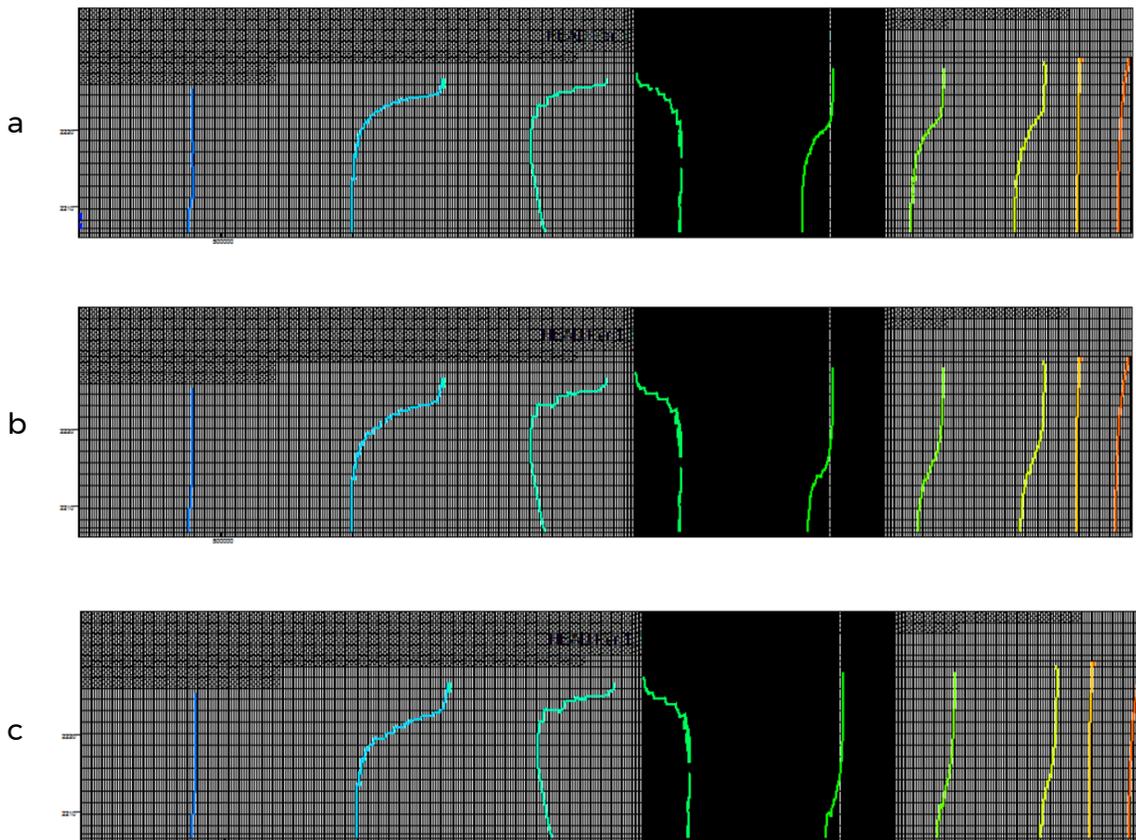


Figura 3-96. Ubicación del humedal dentro del modelo de perfil.

Resultados

Una vez diseñado el modelo se realizó la simulación para un tiempo de 50 años. Para los resultados de la simulación se presentan las cargas hidráulicas simuladas a cada diez años para apreciar el efecto que el humedal tendría sobre el acuífero. En la Figura 3-97 se presentan las cargas piezométricas simuladas para 10, 20, 30, 40 y 50 años.



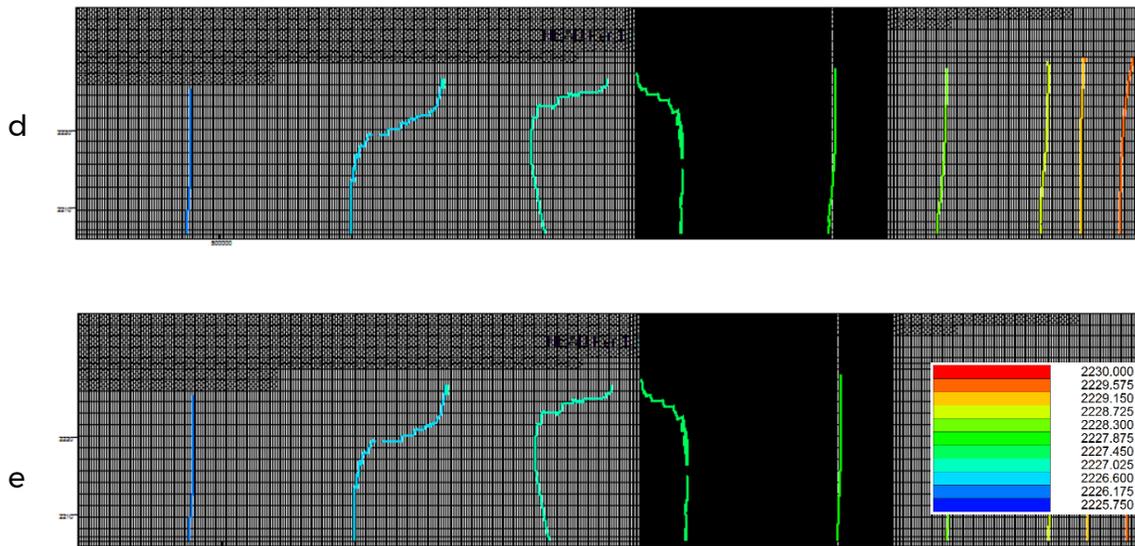


Figura 3-97. Cargas piezométricas simuladas para los a) 10 años, b) 20 años, c) 30 años, d) 40 años y e) 50 años.

Conclusiones

De acuerdo con lo observado en los resultados de la simulación, después de 50 años de simulación se observa poco efecto del humedal sobre el acuífero, observándose únicamente un efecto local sobre la equipotencial con valor de 2227.875 m, que indica una pequeña sobre elevación de la carga hidráulica sobre la zona del humedal. No se observan efectos en los niveles aguas abajo o aguas arriba de la ubicación del humedal.

Es importante considerar que el diseño del modelo de perfil se realizó para efectos interpretativos y no se considera un modelo calibrado, se requiere generar u obtener más información de la zona de estudio para poder realizar un modelo bidimensional calibrado que permita obtener mayor certidumbre en el comportamiento de la dinámica de flujo en la zona de estudio.

3.2.12 Lago Nabor Carrillo: evaluación y caracterización de la problemática

Como parte de los cuerpos de agua que conforman el área que contempla el programa hídrico lago de Texcoco, se sitúa el lago Nabor Carrillo (LNC). Este cuerpo de agua léntico es un lago artificial, cuya construcción finalizó en el año 1982, y que consistió en el bombeo de agua en 180 pozos, formando una depresión. Posteriormente, se amplió la capacidad de almacenamiento al construir el bordo perimetral con una longitud de 12 km (Cruickshank, 1995). El lago cubre un área cerca de 10 km² (CONANP, 2021) y su capacidad de almacenamiento actual es de 23 hm³ (SMIG, 2021).



Figura 3-98. Imagen del Lago Nabor Carrillo

Siendo un sitio RAMSAR (SISR, 2022), Nabor Carrillo es un lago de importancia a nivel internacional, por cumplir con el criterio de humedal representativo “raro” o “único” (SISR, 2022), ya que es un vaso regulador hídrico, que controla inundaciones en algunas zonas del Valle de México y reabastece el Dren Chimalhuacán I, cuando se requiere enviar mayor volumen de agua a través del Dren General del Valle (Figura 3.2.1.1). Al mismo tiempo, el servicio ecosistémico que aporta valor y lo distingue como un lugar de significativa importancia ecológica, radica en su condición de hábitat para aves, tanto residentes como migratorias, que viajan a través de la ruta migratoria del centro (SISR, 2022). Este reconocimiento se ve respaldado por la inclusión en el programa de Áreas de Importancia para la Conservación de Aves, conocidas como AICAs (CONABIO, 2015). Además, es hábitat de peces endémicos como el mexcalpique (*Girardinichthys viviparus*), que se encuentra en la categoría de especie en peligro de



extinción, según la NOM-059-SEMARNAT-2010 (CONANP, 2021).

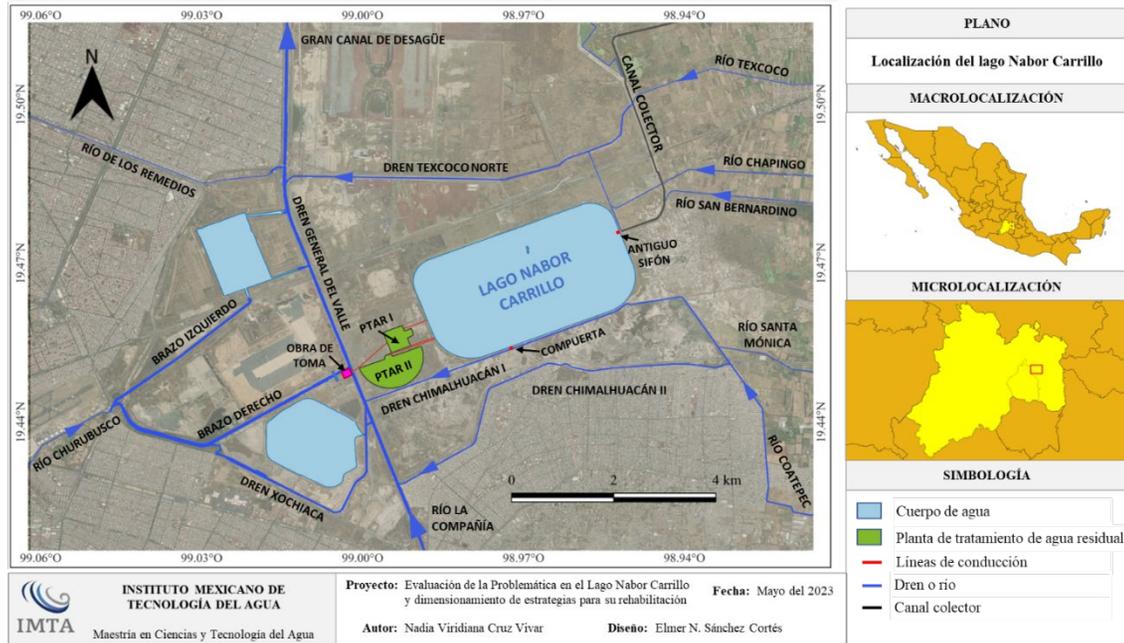


Figura 3-99. Localización del lago Nabor Carrillo (Cruz Vivar, 2023)

El LNC forma parte integral del Área Natural Protegida Lago de Texcoco, cuya declaración fue oficializada en marzo de 2022 (SEGOB, 2022), lo que debe tenerlo en cuenta para cualquier acción o proyecto que se realice dentro del área.

En el laboratorio de Hidrogeoquímica del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, se encuentra en desarrollo la tesis de maestría de la Ing. Nadia Viridiana Cruz Vivar intitulada “Evaluación de la problemática en el lago Nabor Carrillo y dimensionamiento de las estrategias para su rehabilitación”, bajo la dirección de la Dra. Anne M. Hansen (Cruz Vivar, 2023). Esta tesis contempla la caracterización de la problemática, la parametrización del balance de cargas contaminantes y la evaluación de escenarios para el saneamiento del LNC. A continuación, se presenta un extracto de esta investigación y los resultados del análisis de información generada sobre caudales y caracterización de muestras de agua y sedimento del LNC.

Estimación de caudales de entrada y salida

Originalmente, ingresaban al LNC el agua residual tratada de las dos plantas de tratamiento “Lago de Texcoco I” (PTAR I) y “Lago de Texcoco II Ing. Ramón Grijalva Ruiz” (PTAR II), el agua de escurrimiento de los ríos Papalotla, Xalapango, Coxacoaco, Texcoco, Chapingo y San Bernardino, que se juntaban en un canal colector con encauzamiento hacia el lago (Figura 3.2.1.1), así como la precipitación directa al lago. Sin embargo, con las modificaciones realizadas como parte del proyecto del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, se interrumpió el ingreso de agua por el canal que coletaba agua de los ríos (SMIG, 2021). Actualmente, alimentan al

lago sólo el agua de las descargas de las PTAR y la precipitación pluvial (CONAGUA, 2021b).

La obra de toma de estas PTAR se encuentra en el brazo derecho del río Churubusco (Figura 3.2.1.1). Un dique en dicho brazo separa el agua del Dren General de Valle, por lo que el agua residual que ingresa a las PTAR es solo la que proviene del río la Compañía y el Dren Chimalhuacán I, a lo que se le nombra Dren General del Valle.

Anteriormente, la salida de agua se realizaba a través de un sifón que se encuentra del lado oeste, donde llegaban los escurrimientos por el canal colector. Actualmente, este sifón se encuentra en desuso, y el agua del lago se extrae mediante una compuerta que se conecta al Dren Chimalhuacán I (Figura 3.2.1.1). Es importante señalar que esta compuerta solo se abre de forma intermitente, dependiendo de la cantidad de agua que se necesita enviar a través del Gran Canal de Desagüe. Para evitar que se recircule nuevamente el agua ya tratada, durante el tiempo que se abre esta compuerta se cierra los efluentes de las PTAR.

Se realizó el balance hídrico del LNC (Cruz Vivar, 2023), encontrando ó que, del caudal de entrada, las descargas de las PTAR representan 75 %; y la precipitación pluvial, 25 %. El caudal de salida se compone por extracción (15 %); y, el agua evaporada, 85 % (Tabla 3-50). De esta manera, los caudales promedio de descarga de las PTAR se estima en 247 L/s para la PTAR I y 279 L/s para la PTAR II, lo cual es inferior a su capacidad de tratamiento de 500 y 400 L/s, respectivamente (CONAGUA, 2021b).

Tabla 3-49. Caudales de entrada y salida de agua del lago Nabor Carrillo (Cruz Vivar, 2023)

Entrada o salida	Caudal (hm³/año)	Calculado con información de
Descarga PTAR I	7.8	OCAVM (2022)
Descarga PTAR II	8.8	OCAVM (2022)
Precipitación	5.6	SMN, (2023)
Evaporación	18.8	SMN, (2023)
Extracción	3.4	Estimada por diferencia



Figura 3-100. Estación e bombeo a la salida del tratamiento secundario PTAR II.

Evaluación ecotoxicológica de la calidad de agua

Se llevó a cabo un análisis de los parámetros de calidad del agua reportados por (CONAGUA, 2021a), que permiten detectar problemas relacionados con la contaminación por materia orgánica (SST, DQO, DBO, OD), eutroficación (P, N, clorofila a, OD), contaminación por patógenos, así como contaminación por metal(oid)es (Cd, Cr, Hg, Ni y As). La información analizada fue la reportada para el periodo 2013-2020 para los sitios OCAVM2696 y OCAVM2698 (CONAGUA *up cit.*). Para la evaluación toxicológica de los parámetros reportados se obtuvieron los promedios y desviación estándar (Tabla 3-51) y se compararon con los límites para protección de la vida acuática, establecidos en la Ley Federal de Derechos (CONAGUA, 2021c), en los Criterios Ecológicos de Calidad de Agua (SEDUE, 1989), así como con los indicadores de materia orgánica (CONAGUA, 2021a) y de estado trófico (CEPIS, 2001).

Tabla 3-50. Promedios y desviación estándar de parámetros de calidad del LNC (Cruz Vivar, 2023)

Parámetro	Valor CONAGUA (2021a)	Límite	
As (mg/L)	0.05 ± 0.00 (n=28)	0.2	CONAGUA, 2021c
Cd (mg/L)	0.0015 ± 0.0000 (n=28)	0.004	
Cr (mg/L)	0.0025 ± 0.0000 (n=28)	0.05	
Hg (mg/L)	0.00025 ± 0.00000 (n=25)	0.0005	
Ni (mg/L)	0.00025 ± 0.00079 (n=28)	0.6	
Pb (mg/L)	0.0025 ± 0.0000 (n=28)	0.03	
Coliformes fecales (NMP/100mL)	531 ± 1 102 (n=24)	1000	
SST (mg/L)	188 ± 56 (n=25)	30	

Parámetro	Valor CONAGUA (2021a)	Límite	
		Valor	Referencia
N-NH ₃ (mg/L)	0.5 ± 0.4 (n=23)	0.06	CONAGUA, 2019
DQO (mg/L)	551 ± 118 (n=26)	20	
DBO (mg/L)	91 ± 52 (n=26)	6	
OD (mg/L)	4.9 ± 2.1 (n=13)	5	SEDUE, 1989; CONAGUA, 2021c
PT (mg/L)	11.7 ± 4.3 (n=26)	0.05	CEPIS, 2001; CONAGUA, 2021c
P-PO ₄ (mg/L)	4.8 ± 3.0 (n=22)	0.025	SEDUE, 1989; CONAGUA, 2021c
Clorofila a (mg/m ³)	178 ± 160 (n=19)	8	CEPIS, 2001

Los resultados de esta evaluación muestran, que las concentraciones de los metal(oid)es analizados no representan una amenaza para la vida acuática, mientras que las concentraciones de los demás parámetros rebasan sus respectivos límites (Figura 3-101).

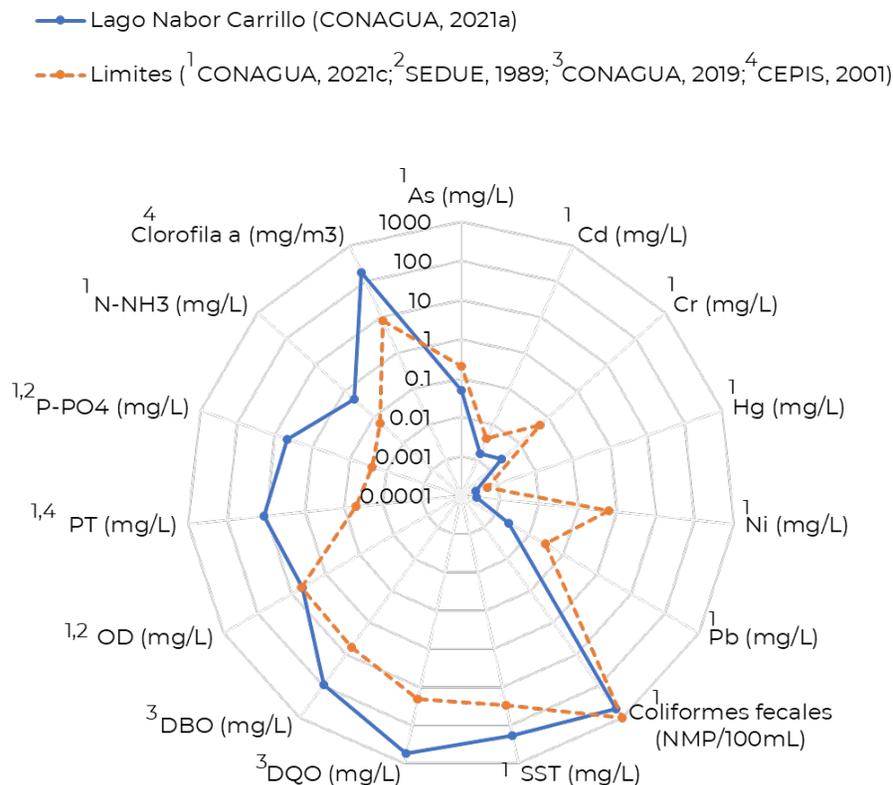


Figura 3-101. Comparación de valores medios de calidad del agua en el lago Nabor Carrillo con respecto a los límites máximos permisibles (Cruz Vivar, 2023)

Los sólidos suspendidos totales superan en más de 6 veces los límites recomendados para la protección de la vida acuática. Además, tanto la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) como la demanda química de oxígeno (DQO) superan en promedio en 18 y 28 veces los indicadores de materia orgánica para agua de buena calidad, lo que clasifica el agua como contaminada según los indicadores de CONAGUA (2019). Estos resultados muestran la presencia de problemas de contaminación por exceso de materia orgánica en el cuerpo de agua.

Por otro lado, los parámetros que indican el estado trófico del cuerpo de agua, como el fósforo y la clorofila a, exceden notoriamente los límites para estado (hiper)eutrófico y la protección de la vida acuática. El valor medio de fósforo total es 200 veces superior al umbral para condiciones mesotróficas, que serían las deseadas para protección de la vida acuática, mientras que el de nitrógeno amoniacal supera en 8 veces los límites para la protección de la vida acuática. El valor medio de clorofila a, que está relacionada con la biomasa algal, es 22 veces mayor que el límite para el estado mesotrófico (8 mg/L). El oxígeno disuelto varía entre concentraciones subóxicas y óxicas, debido a la excesiva productividad primaria en el LNC.



Figura 3-102. Apariencia del agua en el Lago Nabor Carrillo.

Muestreo y caracterización de agua y sedimento en el lago y de descargas de las PTAR I y PTAR II

Se realizó un muestreo de agua, sedimento y descargas el 21 de junio, 2023, obteniendo muestras de agua a dos profundidades en tres sitios (Tabla 3-52 y Figura 3-103). Se obtuvieron también muestras de las descargas PTAR I y II.

Con multiparamétrico (Hanna HI9829) se midió temperatura (T), pH, oxígeno disuelto (OD) y conductividad eléctrica (EC) en cada sitio de muestreo en LNC (Tabla 3-52). Las muestras de agua fueron obtenidas con botella van Dorn horizontal y las muestras de sedimento, con draga van Veen. Todas las muestras fueron almacenadas en recipientes de polietileno y transportadas al laboratorio en refrigeración sobre hielo. En el laboratorio, las muestras se conservaron en refrigeración a 4 °C hasta su análisis.



Puntos de muestreo

LAGO:

- L-P1:** 19°28'13.6" N, 98°58'5.6" W
- L-P2:** 19°28'17.8" N, 98°57'43.9" W
- L-P3:** 19°28'19.5" N, 98°58'15.4" W

DESCARGAS:

- PTAR I:** 19°27'33.4" N, 98°59'16.4" W
- PTAR II:** 19°27'20.3" N, 98°59'10.8" W

Figura 3-103 Puntos de muestreo en lago Nabor Carrillo y en descargas de PTAR

Se observan valores de pH de campo superiores a los reportados por CONAGUA (2021a), de $\text{pH} = 9.2 \pm 0.5$. Los valores de EC medidas fluctúan alrededor del medio de los valores reportados por dicha comisión ($\text{EC} = 3\,576 \pm 1\,860 \mu\text{S}/\text{cm}$). En cuanto a OD, en los tres puntos de muestreo, se observaron condiciones subóxicas en el fondo y de sobresaturación en la zona fótica (12 cm de profundidad), atribuida a la actividad fotosintética de productores primarios.

Tabla 3-51 Puntos de muestreo en lago Nabor Carrillo y en descargas de las PTAR (Cruz Vivar, 2023)

Punto de muestreo	L-P1		L-P2		L-P3	
	Fondo	Superficie	Fondo	Superficie	Fondo	Superficie
AGUA						
T (°C)	18	22	19	21	21	20
pH	9.7	10.9	10.7	10.7	10.0	10.6
OD (mg/L)	1.2	15.4	1.3	8.0	1.5	25.2
OD (%)	17	231	19	117	25	340
EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	6 123	ND	2 508	2 351	6 351	7 035
Color	Verde		Verde		Verde	
Apariencia	Turbio		Turbio		Turbio	
Prof. Máx. (m)	1.5		0.5		0.5	
SEDIMENTO						
Color	Negro		Negro		Negro	
Olor	Sulfuroso		Sulfuroso		Sulfuroso	
Textura	Fino		Fino		Fino	
CLIMA						

Nubosidad	Despejado	Nublado (8 %)	Nublado (15-20 %)
Intensidad de viento	Calmado	Calmado	Moderado

ND No determinado



Draga con sedimento del LNC, por N. Cruz Vivar



Muestreo en descarga de PTAR II, por A. Hansen

Se prepararon muestras combinadas con volúmenes iguales de agua y sedimento, respectivamente, de los tres sitios de muestreo.

En el laboratorio, se llevó a cabo la caracterización de las muestras con el fin de evaluar su calidad en relación con los parámetros asociados a las principales problemáticas previamente identificadas; es decir, la contaminación por materia orgánica y la eutroficación. Los métodos de análisis se enlistan a continuación.

Tabla 3-52 Métodos de análisis para muestras de agua y sedimento (Cruz Vivar, 2023)

Parámetro	Método	
DBO (Demanda bioquímica de oxígeno)	Electrométrico	APHA 5210B
DQO (Demanda química de oxígeno)	Fotométrico	Merck 11454
GPP (Productividad primaria bruta)	Electrométrico	APHA 10200J
NT (nitrógeno total)	Fotométrico	Merck 114537
PT (fósforo total)	Fotométrico	Merck 114543
SST (sólidos suspendidos totales)	Gravimétrico	APHA 2540E
pH	Electrométrico	NMX-AA-008-SCFI-2016
COT (carbono orgánico total) en agua	Fotométrico	Merck 114879
CIT en agua (carbono in orgánico total) en agua	Fotométrico	Merck 111109

Parámetro	Método	
COT en sedimento	Gravimétrico	ASTM D2974
CIT en sedimento	Gravimétrico	AS-29 de NOM-021-RECNAT-2000

Los resultados del análisis de la muestra de agua del lago mostraron que los niveles de DBO y DQO son mayores a 6 mg/L y 20 mg/L, respectivamente, que son los valores límite establecidos para agua de buena calidad (CONAGUA, 2019). Aunque en este trabajo se encontraron valores más elevados, la clasificación coincide con la reportada por (CONAGUA, 2021a), indicando agua “fuertemente contaminada” (CONAGUA, 2019). Al comparar con los límites para protección de la vida acuática establecidos en la Ley Federal de Derechos (CONAGUA, 2021c), se encontró que los sólidos suspendidos totales superan nueve veces el límite, mientras que el fósforo, que es un nutriente importante para controlar el crecimiento algal, superan hasta 156 veces el valor que se establece para protección de la vida acuática.

La GPP evalúa la cantidad de carbono orgánico fijada mediante fotosíntesis durante un periodo determinado. El valor depende de factores como la zona climática, los nutrientes y la estación del año, pero en promedio los lagos con agua mesotrófica, fluctúan entre 1.3 y 2.4 gC/m³/d y lagos con agua (hiper)eutrófica, fluctúan entre 3.0 y hasta 6.0 gC/m³/d, considerando el volumen de agua correspondiente a la profundidad fótica (Cruz Vivar, 2023). Se observa que el agua del LNC con GPP de 4.5 ± 1.9 se puede clasificar como (hiper)eutrófica.

Tabla 3-53 Caracterización de muestras de agua del lago Nabor Carrillo (Cruz Vivar 2023)

Parámetro	Lago	Límite LFD: protección de la vida acuática	# de veces que supera el límite
COT (mg/L)	232 ± 19 (n=2)	-	-
CIT (mg/L)	179 ± 3 (n=2)	-	-
DBO (mg/L)	206 ± 103 (n=3)	6	34.3
DQO (mg/L)	797 ± 216 (n=2)	20	39.9
GPP (gC/m ³ /d)	4.5 ± 1.9 (n=3)	-	-
NT (mg/L)	153 (n=1)	-	-
PT (mg/L)	7.8 (n=1)	0.05	156.0
SST (mg/L)	270 ± 118 (n=2)	30	9.0

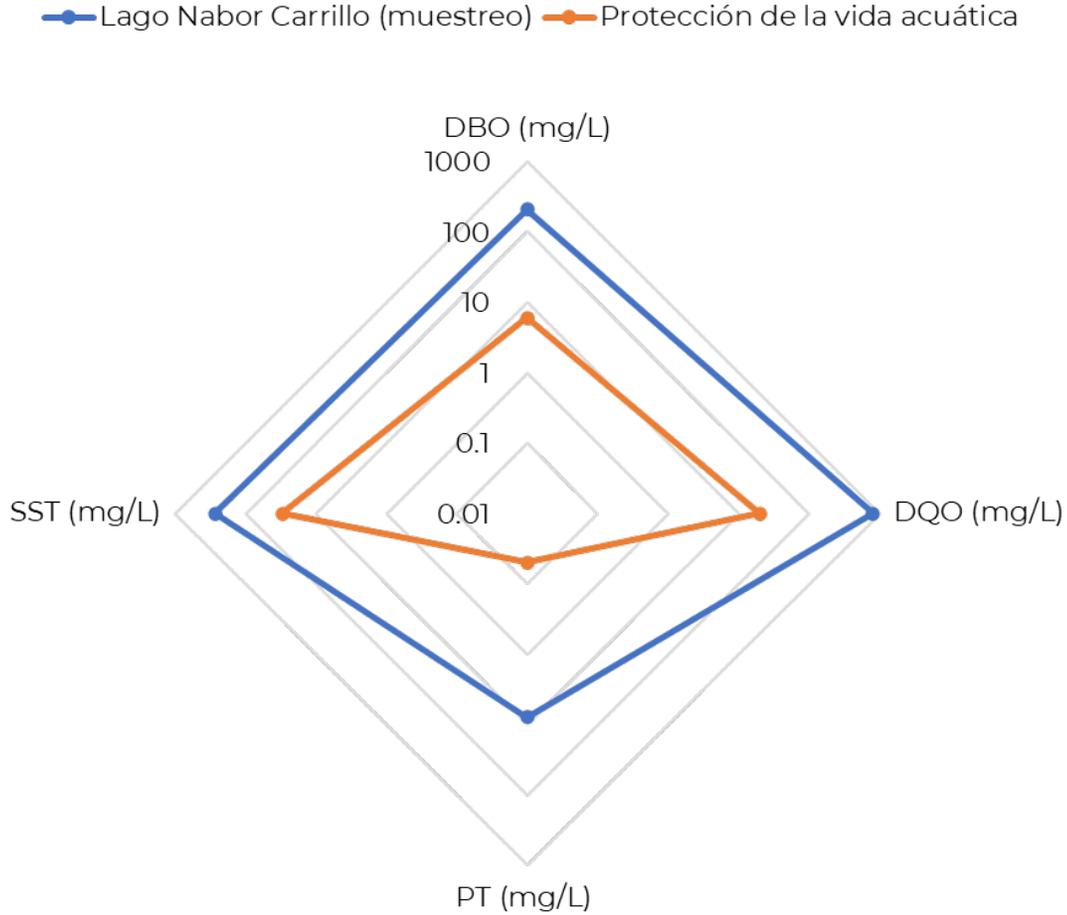


Figura 3-104 Comparación de la calidad de la muestra combinada de agua del lago Nabor Carrillo con respecto a límites máximos permisibles

Por otra parte, la caracterización de las descargas de las PTAR I y II indicó, que estas no cumplen con la NOM-001-SEMARNAT-1996/2021, que establecen los límites permisibles de contaminantes en descargas (Tabla 3-55 y Tabla 3-56).

Tabla 3-54 Caracterización de agua de la descarga PTAR I (lodos activados) que aporta al lago Nabor Carrillo (Cruz Vivar 2023)

Parámetro	PTAR I	Límite NOM-001-SEMARNAT- 1996/2021	# de veces que supera el límite
DBO (mg/L)	183 ± 62 (n=3)	150	1.2
DQO (mg/L)	595 ± 23 (n=2)	100	6.0
NT (mg/L)	63 (n=1)	15	4.2
PT (mg/L)	9.6 (n=1)	5	1.9
SST (mg/L)	260 ± 28 (n=2)	20	10.3

Tabla 3-55 Caracterización de agua de la descarga PTAR II (lagunas facultativas) que aporta al lago Nabor Carrillo (Cruz Vivar 2023)

Parámetro	PTAR II	Límite NOM-001-SEMARNAT- 1996/2021	# de veces que supera el límite
DBO (mg/L)	138 ± 76 (n=3)	150	0.9
DQO (mg/L)	474 ± 59 (n=2)	100	4.7
NT (mg/L)	63 (n=1)	15	4.2
PT (mg/L)	9.6 (n=1)	5	1.9
SST (mg/L)	150 ± 14 (n=2)	20	7.5

—●— PTAR I —●— PTAR II —●— NOM-001-SEMARNAT

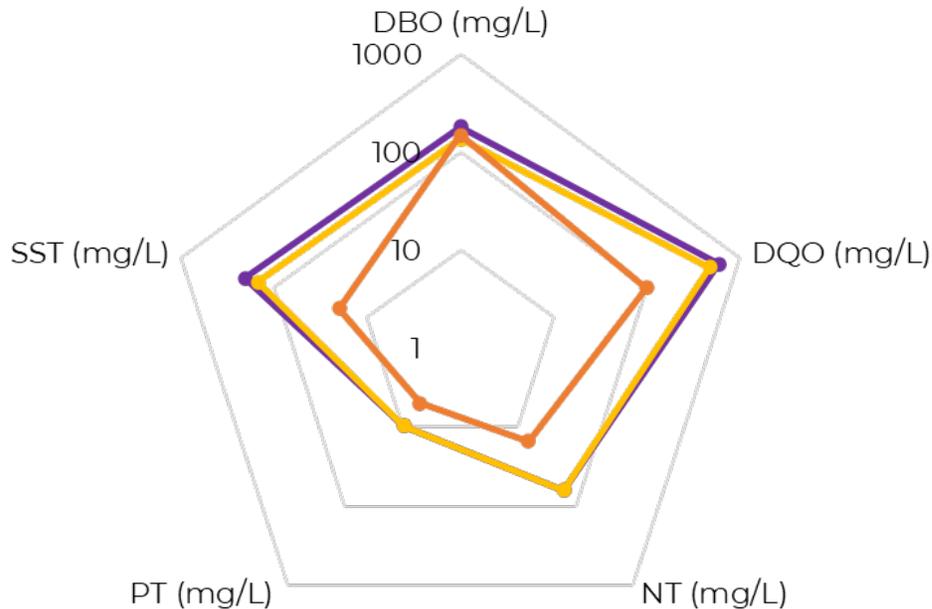


Figura 3-105 Comparación de las muestras de PTAR I y II con respecto a límites máximos permisibles

Los resultados de análisis de la muestra combinada de sedimento indican, que 6.8 mg/g de CIT y 17.0% de materia orgánica, lo que corresponde a 68.2 mg/g COT.

Tabla 3-56 Caracterización de muestras de sedimento del lago Nabor Carrillo

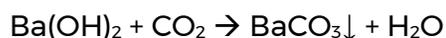
Parámetro	Sedimento
pH	8.15 (n=1)
Materia orgánica (%)	17.0 ± 0.1 (n=3)
COT (mg/g)	68.2 ± 0.4 (n=3)

CIT (mg/g)	6.8 ± 0.9 (n=3)
------------	-----------------

Mineralización de materia orgánica en agua y sedimento

Se realizaron experimentos de biodegradación de la materia orgánica en agua y sedimento del LNC. Para ello, se colocaron la submuestra combinada de agua en un reactor y submuestras combinadas de agua y sedimento en el otro. Los reactores estaban equipados en electrodos de Eh, pH, suministro esporádico de N₂(g) y trampas alcalinas a la salida del reactor para captura de CO₂(g) producto de la degradación aerobia de materia orgánica en agua y sedimento. Estas trampas, a su vez, estaban equipadas con electrodos de CE y T.

Se evaluó la velocidad de mineralización de materia orgánica en ambos reactores mediante respirometría y determinación de la emisión de dióxido de carbono (CO₂) capturada en las trampas alcalinas, por cambio en la conductividad eléctrica por la precipitación como carbonato (Van Afferden et al., 2006):



En ambos reactores se observó un tiempo de aclimatación de aproximadamente cinco días. Posteriormente se observó un aumento en la velocidad de mineralización de materia orgánica, que en agua alcanzó 0.14 mmol/d, para después disminuir gradualmente y alcanzar valores de aproximadamente en 0.07 mmol/d (Figura 3-106).

En el reactor con agua y sedimento, el valor máximo alcanzado después de la aclimatación, fue de 0.27 mmol/d. Posterior a este periodo fue disminuyendo y se estabilizó en 0.13 mmol/d.

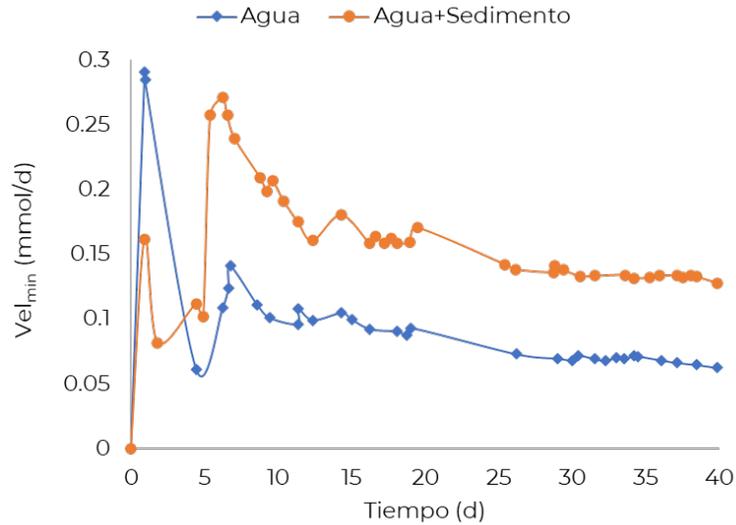


Figura 3-106 Velocidad de mineralización en reactores con agua y agua+sedimento (Cruz Vivar, 2023)

A la velocidad de mineralización en el reactor agua+sedimento se le restó lo degradado en el agua, obteniendo lo que se mineralizó en el sedimento. De esta manera, se determinó una velocidad de mineralización de 0.016 mmol/L/d en agua y 2.98 mmol/m²/d en sedimento.

A lo largo del experimento, se observó una disminución del pH en ambos reactores, pasando aproximadamente de 10.0 a un rango entre 8.0 y 8.5. Estos valores son consistentes con los pH registradas en el lago durante el período 2013-2020, que varían entre 8.2 y 10 (CONAGUA, 2021a).

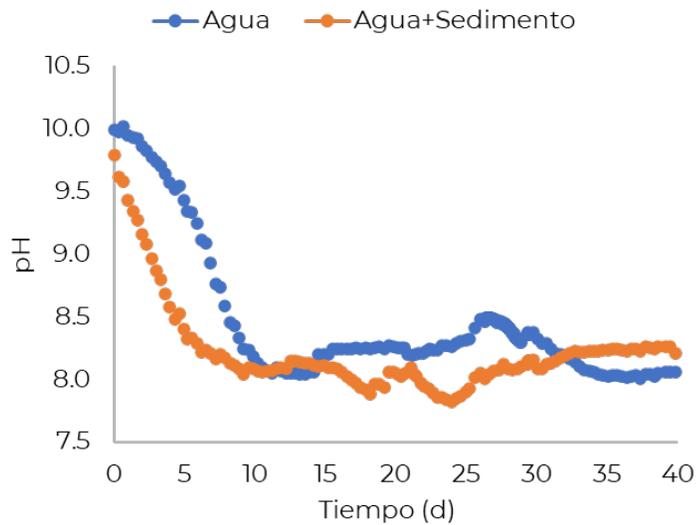


Figura 3-107 Variación de pH en los reactores experimentales con agua y agua+sedimento (Cruz Vivar, 2023)

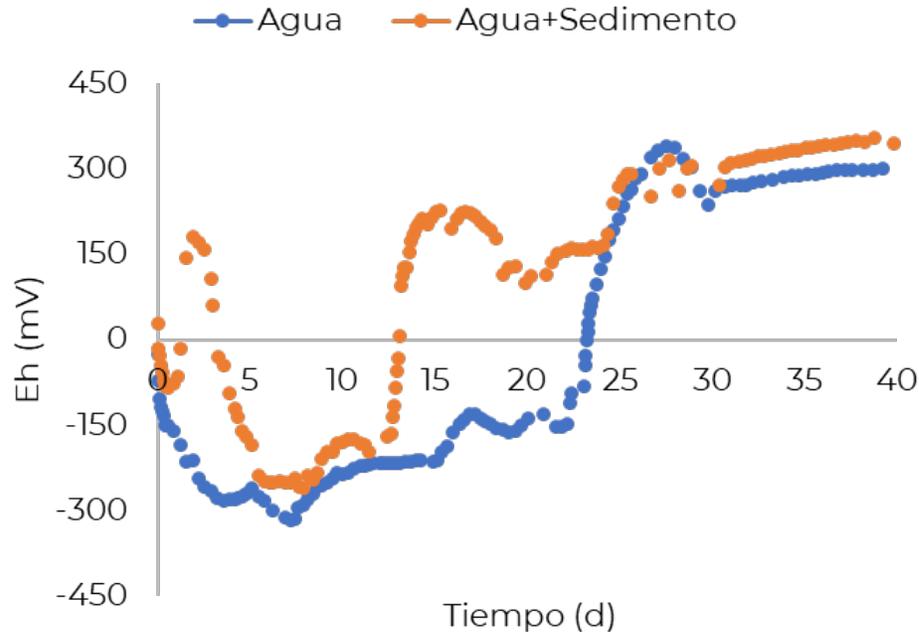


Figura 3-108 Variación de Eh en sistemas experimentales de agua y agua-sedimento (Cruz Vivar, 2023)

Comentarios finales

Con base en la recopilación y análisis de información, así como la caracterización de muestras de agua y sedimento, se parametriza la ecuación de balance de cargas contaminantes, misma que se utiliza para evaluar escenarios y proponer estrategias para rehabilitación del cuerpo de agua. Este enfoque integrado, que combina información bibliográfica relevante con datos recabados in situ, fortalece la robustez y confiabilidad de los resultados obtenidos, contribuyendo a la formulación de estrategias efectivas la propuesta de soluciones a la problemática particular de este cuerpo de agua.

La práctica de llenar a cuerpos de agua con calidad de la NOM-001-Semarnat 1996/2021 no es correctamente percibida. El resultado es que más de 70% de los cuerpos de agua lénticos monitoreados por la CONAGUA (2021a) se encuentran en estado (hiper)eutrófico. Es necesario cambiar este paradigma y empezar a analizar las cargas contaminantes que pueden asimilar los cuerpos de agua.

Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada a NVCV (CVU 1228784) y al grupo del laboratorio de HGQ por el apoyo recibido y la discusión constructiva de los resultados.

3.3 Valoración y propuesta de diseño de sistemas de humedales de tratamiento.

3.3.1 Sistemas de Humedales de Tratamiento

Los humedales de tratamiento corresponden a una eficiente tecnología, en la que se emulan los procesos de purificación existentes en los humedales naturales, como son ciénegas, pantanos, marismas, etc., mediante los cuales los contaminantes presentes en el agua residual son transformados en gases, agua, y biomasa microbiana y vegetal, a partir de un minucioso diseño de ingeniería, una meticulosa construcción y de una eficiente operación y mantenimiento.

El sistema está integrado por uno o varios estanques que contienen especies vegetales, las cuales proporcionan el oxígeno requerido por los microorganismos para efectuar la biodegradación. Al fluir el agua residual se desarrollan varios procesos físicos, químicos y biológicos, que en su conjunto generan un agua tratada factible para ser reutilizada en diversos tipos de riego conforme a la normativa vigente; o bien, para proteger la calidad del agua de los cuerpos receptores (áreas de riego, ríos, lagos y océanos). Durante los últimos 30 años han desarrollado importancia a nivel internacional, básicamente por la diversidad de casos en que encuentran aplicación, por la sencillez y sus bajos costos de operación y mantenimiento, además de ser amigables con el ambiente, son estéticos y cuando son bien dimensionados y operados no generan malos olores.

La calidad del agua esperada de las aguas residuales a tratar, existentes en los drenes y colectores de la región del lago de Texcoco permite determinar el uso de la tecnología de los humedales de tratamiento, con el fin de reutilizar el agua tratada para la protección de la calidad del agua de los cuerpos receptores, conforme a la normativa mexicana vigente (NOM-001-SEMARNAT-2021), en su modalidad de embalses, lagos y lagunas y para el reúso del agua tratada en riego.

3.3.1.1 Sistema de humedal de tratamiento prototipo que depure el agua del Dren Chimalhuacán I para el riego de cultivos de nopales.

Primeramente, el 27 de abril de 2023 se realizó un recorrido (Figura 3-109) en el predio que fue señalado por personal del OCAVM para la elaboración del proyecto. El objetivo del tratamiento del agua residual es con el fin de riego de la nopalera, que se observa en el fondo de la imagen.



Figura 3-109. Aspecto general del terreno asignado para la instalación del humedal de tratamiento.

Dicho terreno se ubica junto al dren Chimalhuacán (Figura 3-110), a partir del cual se obtendría el agua a tratar. En esta foto se muestra la ubicación (coordenadas) del sitio desde donde se extraería el agua residual



Figura 3-110. Dren Chimalhuacán. Aspecto al momento de la vista.

El 08 de mayo nuevamente se visitó el sitio para especificar el sitio para la instalación del sistema de tratamiento (Figura 3-111).



Figura 3-111. Nueva visita al sitio.

Posteriormente, los días 17 y 18 de mayo de 2023 (en condiciones de estiaje), se realizaron los muestreos, a partir de los cuales se realizaron los análisis en el laboratorio del IMTA.

Los resultados de laboratorio se muestran en la Tabla 3-58.

Tabla 3-57. Resultados de laboratorio.

No.	Nombre	Hora de muestreo	Fecha de muestreo	Conductividad eléctrica	Potencial de hidrógeno
				µS/cm	U de pH
074/2023-1	Dren de Chimalhuacán	11:30	17/05/2023	1194	7
074/2023-2	Dren de Chimalhuacán	15:30	17/05/2023	1058	7.5
074/2023-3	Dren de Chimalhuacán	19:30	17/05/2023	1112	7.3
074/2023-4	Dren de Chimalhuacán	23:30	17/05/2023	1332	7.4
074/2023-5	Dren de Chimalhuacán	03:30	18/05/2023	1055	7.3
074/2023-6	Dren de Chimalhuacán	07:30	18/05/2023	1492	6.6
074/2023-7	Compuesta	09:00	18/05/2023	*	*

No.	Caudal	Materia flotante	ESCHERICHIA COLI
-----	--------	------------------	------------------

	L/s	Ausencia/Presencia	NMP/100mL
074/2023-1	459	Presencia	110000000
074/2023-2	406.6	Presencia	110000000
074/2023-3	257	Presencia	210000000
074/2023-4	174.1	Presencia	110000000
074/2023-5	168	Presencia	110000000
074/2023-6	168	Presencia	110000000
074/2023-7	*	*	*

No.	COLOR VERDADERO MÉTODO DE COEFICIENTES DE ABSORCIÓN ESPECTRAL (m-1)			DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO5)	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO
	a 436 nm	a 525 nm	a 620 nm	mg/L	mg/L
074/2023-1	*	*	*	*	*
074/2023-2	*	*	*	*	*
074/2023-3	*	*	*	*	*
074/2023-4	*	*	*	*	*
074/2023-5	*	*	*	*	*
074/2023-6	*	*	*	*	*
074/2023-7	3	1.3	0.8	394	755

No.	FÓSFORO TOTAL	GRASAS Y ACEITES	NITRÓGENO COMO NITRÓGENO AMONIACAL	NITRÓGENO COMO NITRÓGENO TOTAL	SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
074/2023-1	*	82.3	*	*	*
074/2023-2	*	143	*	*	*
074/2023-3	*	35.9	*	*	*
074/2023-4	*	29.2	*	*	*
074/2023-5	*	54.2	*	*	*
074/2023-6	*	98.9	*	*	*
074/2023-7	7.26	*	43.1	58.4	113

* Análisis no solicitado

Con base en los resultados de laboratorio se determinó el tren de tratamiento el cual consiste de: Cárcamo de bombeo, tanque séptico, humedal de lodos, humedal de flujo vertical, humedal de flujo subsuperficial y tanque de desinfección (cloración). Cabe señalar que el pretratamiento (rejillas y desarenador) debe efectuarse desde el cárcamo de bombeo, el que se ubica junto al Dren Chimalhuacán.

De igual modo se determinaron los parámetros de diseño del sistema de humedales, los cuales son los siguientes (Tabla 3-59).

Tabla 3-58. Parámetros de diseño del sistema de tratamiento.

Parámetro	Concentración influente,	% reducción en el Tanque séptico	Efluente Tanque séptico	Efluente final
DBO, mg/L	394	50	197	20
SST, mg/L	113	40	67	20
NT, mg/L	58	10	52	15
PT, mg/L	7	2	7	5
CF, NMP7100ml	10,000,000	90	1,000,000	1,000

Cabe señalar que el porcentaje estimado de reducción en el tanque séptico, para cada uno de los parámetros de diseño, se obtuvo a partir de múltiples evaluaciones de esta alternativa de tratamiento realizadas por el IMTA en experiencias anteriores, para condiciones ambientales, sociales y de calidad del agua similares a las existentes en el presente proyecto. La calidad esperada en el agua tratada se fijó conforme a la NOM-001-SEMARNAT-2021, para fines de riego.

El caudal de diseño se determinó en 10.0 m³/d. La temperatura de diseño fue de 6.42 °C, que se obtuvo con base en los datos promedio del mes más frío informada en el Inventario de Registros por Década Año, de la CONAGUA, a partir de la estación 15383. Durante el verano incrementa la cinética del sistema (velocidad de reacciones bioquímicas), por lo que aumenta la eficiencia de remoción de contaminantes.

Con base en la evaporación por día, que para la zona de estudio es de 5.53 mm/d, se calculan las pérdidas por evapotranspiración del primer humedal, lo que se toma en cuenta para el cálculo del segundo humedal.

Cabe señalar que durante la temporada de lluvias el agua presenta el fenómeno de dilución, lo cual no afecta el funcionamiento del humedal, siempre y cuando no ingrese al sistema agua superficial o subterránea en cantidades que afecten de manera extrema el balance hidráulico.

Diseño del tanque séptico

El tiempo de retención hidráulico se determinó en una duración de 24 Hr, por lo que con base en el caudal de diseño de 10 m³/d, el volumen del tanque séptico es de 10 m³.

Para calcular el volumen total del tanque séptico se requiere estimar la producción de lodos, así como la población servida, para lo cual se asignó una aportación de 160 L/hab/d, a partir del caudal de diseño (0.1157 L/s), se obtiene una población de 63 habitantes. Se planteó una producción de lodos per cápita de 25 L/hab.año. Proyectando la extracción de lodos cada año, se tendría una acumulación de lodos de 1.56 m³ anual, los que sumados al volumen de tratamiento de 10.0 m³, se obtiene un volumen total de 11.56 m³. Cabe señalar que este volumen puede incrementar en

función de la carga hidráulica que requerirá el sistema de sifones que alimentará el humedal de flujo vertical.

Cabe señalar que el caudal de diseño, que corresponde al caudal de operación, es de 10.0 m³/d, equivalentes a 0.1157 L/s.

Humedal de lodos

Con base en el caudal de diseño y una concentración de sólidos de 113.00 mg/L se obtiene una concentración de 1.1 kg/d (flujo de sólidos en el influente).

El área per cápita recomendada para el dimensionamiento del humedal de lodos, con base en la concentración de sólidos de 113. Mg/L es de 0.087 m²/hab, por lo que para una población de 63 habitantes el área de esta unidad de tratamiento es de 5.44 m².

Humedal de flujo vertical

A partir de la tabla Tabla 3-59 se determinan los parámetros de diseño del humedal de flujo vertical, los cuales se muestran en la Tabla 3-60.

Tabla 3-59. Parámetros de diseño (influyente) y calidad del agua esperada (efluente) del humedal de flujo vertical.

Parámetro	Concentración influente	% estimado de	
		reducción	Efluente
DBO, mg/L	197.00	80.00	39.40
SST, mg/L	67.80	86.00	9.49
NT, mg/L	52.56	60.00	21.02
PT; mg/l	7.11	30.00	4.98
CF, NMP/100 mL	1,000,000	80.00	200,000

La eficiencia de reducción se obtuvo como el promedio de los resultados promedio existentes en la bibliografía.

La fórmula utilizada para calcular el área de este proceso de tratamiento, que aplica para la emoción de DBO, es la siguiente:

$$A = \frac{PQ \left[\left| \left[\frac{C_i - C^*}{C_f - C^*} \right]^{\frac{1}{P}} - 1 \right| \right]}{K}$$

Donde:

A (m ²)	93.68
P	2.00
Q (m ³ /año)	3,650.00
C _i (mg/L)	197.00
C _f (mg/L) (40%)	39.40
C* (mg/L)	2.00
KA (m/año)	100.00

Los valores de P, C* y KA son recomendados en la bibliografía para un agua residual con DBO cercana a 200 mg/L. Considerando un factor de riesgo de 1.33 se obtiene un área de 125 m². El área de los parámetros de diseño restantes, como fue previamente citado, se calculan con base en porcentajes promedio existentes en la bibliografía. Se ha proyectado que este humedal tenga una geometría cuadrada, donde el largo y ancho son de 11.18 m, respectivamente.

Considerando una profundidad de 1.2 el volumen de tratamiento es de 1,677 m³.

El medio filtrante incluirá tres capas de tezontle de 0.4 m de profundidad. Su granulometría, desde el fondo hacia la superficie será de 2.0 a 2.5 pulgadas de diámetro, 1.0 a 2.0 pulgadas en el centro y de 0.5 a 1.0 pulgadas en la superficie. La porosidad promedio estimada para el medio filtrante es del 40%, por lo que el volumen de vacíos es de 670.8 m³.

La evaporación de este humedal se obtiene con la siguiente fórmula: $e/1000A$.

Donde:

e es la evaporación (5.53 mm/d).

A es el área (125 m²).

La evaporación diaria es de 0.69 m³/d. Restando este volumen al caudal diario de diseño, que es de 10 m³/d, se obtiene un caudal de salida de este humedal de 9.31 m³/d (0.1074 lps), que corresponde al caudal de diseño del humedal de flujo superficial.

El agua será distribuida mediante pulsos controlados por un sistema de bombeo sobre la superficie del humedal, mediante una parrilla de tubería ranurada de CPVC, de 2.0" de diámetro.

La especie vegetal a utilizarse en este humedal es *Typha latifolia* (tule), sembrada a una distancia equidistante no mayor a 1.0 m.

Humedal de flujo subsuperficial

Mediante la siguiente ecuación se calculan las áreas de este humedal.

Donde:

$$A = \frac{Q(\ln C_i - \ln C_e)}{K_t dn}$$

- A_s = Área superficial del humedal subsuperficial, (112 m²).
 C_i = Concentración del parámetro en el afluente, (39.4 mg/L).
 C_e = Concentración del parámetro en el efluente, (20 mg/L).
 Q = Caudal medio, (9.28 m³/d).
 K_t = $0.75(1.06)^{(T-20)}$ Constante cinética de biodegradación, d⁻¹.
 T = 6.42 °C
 d = Profundidad del lecho filtrante, (0.5 m).
 n = Porosidad del medio filtrante (40%).

La DBO corresponde al parámetro base para los cálculos. Con el área obtenida para este parámetro se calcula la calidad esperada (concentración) para el resto de los parámetros en el agua tratada.

Los parámetros de diseño y las áreas calculadas de los diferentes contaminantes se muestran en la Tabla 3-61.

Tabla 3-60. Parámetros de diseño del humedal de flujo subsuperficial.

Parámetro	Entrada (C _i)	Salida (C _e)	% de reducción	Área, m ²
DBO, mg/L	39.40	17.32	56.05	111.87
SST, mg/L	9.49	4.17	56.05	111.87
NT, mg/L	21.02	9.24	56.05	111.87
PT, mg/L	4.98	2.19	56.05	111.87
CF, NMP/100ml	200,000	87,910	56.05	111.87

El área de este humedal de flujo subsuperficial es de 112 m². La profundidad seleccionada es de 0.5 m, y una porosidad del 40%, por lo que el volumen de vacíos (profundidad inundada) es de 22.34 m³. La profundidad del lecho filtrante es de 0.6 m, y la profundidad de operación es de 0.5 m, por lo que 0.1 m de la superficie permanecerá seco.

El tiempo de retención hidráulico de este humedal se obtiene dividiendo el volumen de vacíos (22.4 m³), entre el caudal (9.28 m³/d), por lo que se obtiene un tiempo de residencia de 2.41 d.

El medio filtrante incluirá tres capas de tezontle de 0.2 m de profundidad. La granulometría, desde el fondo hacia la superficie, será de 2.0 a 2.5 pulgadas de diámetro, 1.0 a 2.0 pulgadas en el centro y de 0.5 a 1.0 pulgadas en la superficie. Durante la construcción deberá colocarse en el fondo del estanque una capa de arcilla de 0.1 m. Este material forma parte de los procesos de tratamiento.

La evaporación de este humedal se obtiene con la fórmula previamente citada para este fin ($e/1000A$), donde: e es la evaporación (5.53 mm/d) y el área es de 112 m².

La evaporación diaria resultante es de 0.62 m³/d. Restando este volumen al caudal de diseño, que es de 9.28 m³/d, se obtiene un caudal de salida de este humedal de 8.66 m³/d (0.1003 lps).

El agua fluirá por gravedad desde el humedal de flujo vertical, ingresará al estanque de flujo subsuperficial mediante una tubería de distribución, de CPVC, de 3.0" de diámetro. Ya dentro del humedal el tubo de distribución deberá estar ranurado y colocarse a lo ancho del canal de ingreso, formado por la colocación de una mampara. En total se colocarán dos mamparas dentro de este humedal con objeto de reducir la formación de flujos preferenciales y de incrementar la eficiencia de remoción de contaminantes.

La especie vegetal a utilizarse en este humedal es *Typha latifolia* (tule), sembrada a una distancia equidistante no mayor a 1.0 m.

Tanque de cloración

Como se observa en la Tabla 3-61, se tiene un valor de coliformes fecales en el agua tratada de 87, 910 CF NMP/100 ml, el permitido por la norma es de 250 CF NMP/100 ml, para riego de cultivos, razón por la que se requiere de una unidad de desinfección, en este caso un tanque de cloración.

El tiempo de contacto (θ) entre el cloro y el agua tratada es de 30 minutos, el caudal (Q) es de 0.1003 lps. El volumen (V) de la cámara de contacto con cloro se obtiene multiplicando $\theta \cdot Q \cdot 60/1000$. El valor resultante es 0.1806 m³. Considerando una profundidad del agua (h) de 0.3 m, el área (A= V/h) de esta unidad de contacto con cloro es de 0.60 m². Con la raíz cuadrada de este valor se obtiene el largo (L) y el ancho (W) de este estanque (0.78 m para cada lado). Se recomienda el uso de dos mamparas con objeto de reducir la dispersión y aumentar la eficiencia de desinfección. Es aconsejable una dosis normal de 1.5 mg/L de cloro.

El área total de tratamiento es de 253 m², como se muestra en la Tabla 3-62.

Tabla 3-61. Áreas por unidad de tratamiento y total del sistema de tratamiento.

UNIDAD DE TRATAMIENTO	Áreas, m ²
Tanque séptico	12.25
Humedal de lodos	4.35
Humedal de flujo vertical	125.00
Humedal de flujo horizontal	111.87
Desinfección	0.61
Área del sistema	253.46

En la Figura 3-112 se esquematiza el aspecto general del sistema de tratamiento, en planta y perfil, con algunos detalles de los diversos componentes la ubicación de las tuberías (distribución, recolección y vaciado de los estanques, registros, mamparas, especies vegetales, área inundada, área seca y capas del medio filtrante). En el **Anexo 5** se muestran los planos del arreglo general del sistema.

ESQUEMA DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

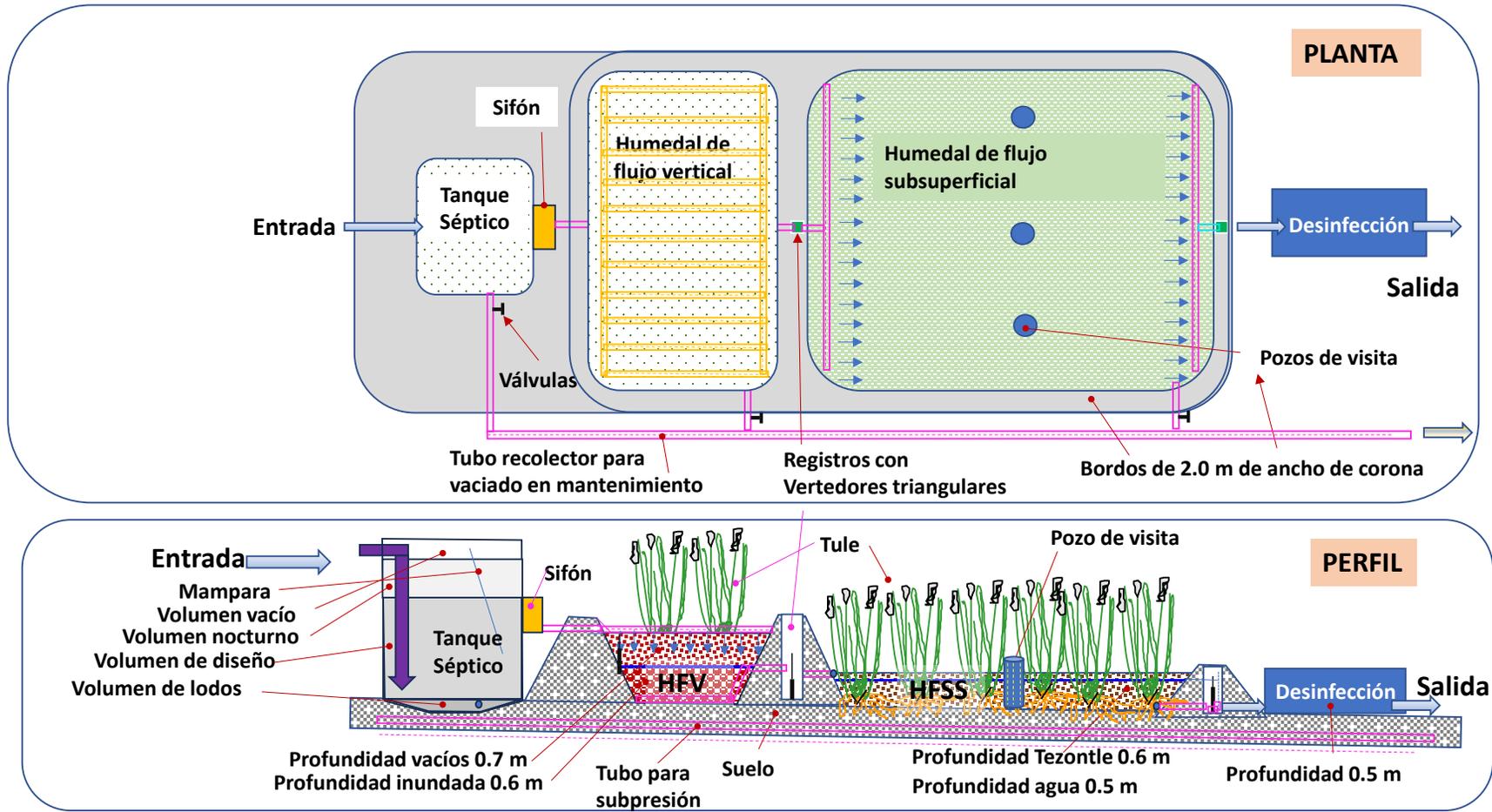


Figura 3-112. Esquema general, planta y perfil, del sistema de tratamiento de aguas residuales.

Catálogo de conceptos

Una vez definidos los planos correspondientes al proyecto ejecutivo, se procede a integrar el catálogo de conceptos de obra perteneciente al humedal artificial “La Nopalera”.

Como primer paso, se definen las partidas que en conjunto conforman el humedal, identificando a grandes rasgos, las que se enlistan a continuación:

- I. Construcción de bordos para conformar humedales.
- II. Instalación hidráulica (sistema de tuberías).
- III. Construcción de tanque séptico (sedimentador).
- IV. Construcción de caja de lodos.
- V. Cajas de sifón.
- VI. Construcción de cajas de registro del humedal.
- VII. Construcción de tanque de cloración.
- VIII. Material filtrante en lagunas.
- IX. Instalación de plantas acuáticas.

Las cuales para su ejecución se constituyen de múltiples conceptos, los cuales engloban trabajos preliminares, movimientos de tierras, obra civil, fontanería, actividades especializadas, estudios, etc.

El catálogo de conceptos, puede consultarse con mayor detalle en el **Anexo 6** del presente documento.

Costos

Después de conformado el catálogo de conceptos que integran al humedal artificial, se procede a definir el costo de cada uno de estos por unidad, lo cual se realiza principalmente empleando como base el CATÁLOGO GENERAL DE PRECIOS UNITARIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO (CONAGUA, 2023). Sin embargo, el “Catálogo de Precios Unitarios” de CONAGUA no abarca todos los conceptos que intervienen en la construcción del humedal, dado el nivel de trabajos especializados que en este se requieren, por lo que aquellos conceptos que no se encontraron en dicho “Catálogo”, se obtuvieron mediante la realización de sus respectivas matrices de precios unitarios.

Las matrices de precios unitarios se elaboraron a partir de la investigación de mercado de materiales e insumos que intervienen en los trabajos de sus respectivos conceptos, por lo que se consultaron los costos de estos directamente en tiendas o en sitios web especializados. También, para conformar las matrices de precios unitarios, se añadió el costo de la mano de obra con base en los rendimientos de los trabajos, así como que en algunos casos se añadió un monto correspondiente al uso de herramienta menor y equipo de seguridad.

Los costos de cada concepto de obra del humedal, pueden consultarse en el **Anexo 6**.

Presupuesto

Definidos los conceptos que intervienen en la construcción del humedal y obtenidos sus respectivos costos, se integra el presupuesto siguiendo el orden de las partidas establecido en la conformación del catálogo. Aparte de emplear los costos obtenidos de los conceptos, es indispensable cuantificar los volúmenes de obra de cada uno de estos, cuidando que las unidades de la cuantificación sean correspondientes con las unidades en que se establecieron sus respectivos precios. Dependiendo el concepto de obra, es que se define su respectiva unidad, entre las cuales pueden estar metros lineales, metros cuadrados, hectáreas, metros cúbicos, piezas, lotes, estudios, etc.

El presupuesto del humedal artificial “La Nopalera” se integra al presente documento en el **Anexo 6**.

Procedimiento constructivo

Dentro de los archivos que integran al proyecto ejecutivo para la construcción del humedal artificial “La Nopalera”, se encuentra el “Procedimiento constructivo”, que como su nombre lo indica, trata de un documento explicativo de los procesos y actividades necesarias para llevar a cabo la construcción de este.

Dicho documento se divide en congruencia con las partidas que componen la construcción de la obra y se redacta de acuerdo con el orden establecido en el catálogo de conceptos del humedal.

El documento correspondiente al “Proceso constructivo”, puede consultarse en el **Anexo 7** integrado al presente informe.

3.3.1.2 Sistema de humedal de tratamiento prototipo en el Parque Los Ahuehuetes.

El 6 de septiembre de 2023, conjuntamente con personal de la SEMARNAT, autoridades municipales e IMTA se efectuó una visita técnica (Figura 3-113) al Parque Ahuehuetes con el propósito tratar dentro de estas instalaciones las aguas residuales ahí generadas mediante sistemas de humedales, cuya agua tratada se reutilice en riego de una cancha de fútbol. Esta última forma parte de un proyecto, por lo que aún no está construida.



Figura 3-113. Visita al área seleccionada para la implementación del humedal.

Durante la visita se ubicó el pozo desde el cual se obtendrá mediante un sistema de bombeo el agua residual, así como el terreno para la instalación del humedal (Figura 3-114).

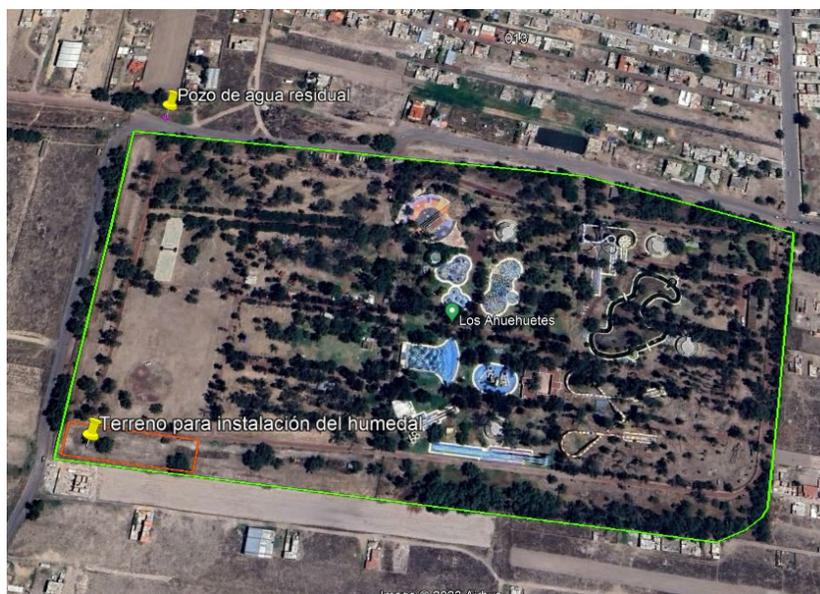


Figura 3-114. Ubicación del pozo de agua residual y del terreno para la instalación del sistema de humedales.

En esta misma fecha se realizó la toma de muestras (Figura 3-115). Se muestran en esta imagen las coordenadas del sitio y la hora en que se efectuó el muestreo.



Figura 3-115. Toma de muestras en el pozo de agua residual.

Posterior al muestreo se requieren de varias semanas para obtener los resultados de laboratorio; sin embargo, debido a que precisaba generar el dimensionamiento y el anteproyecto del humedal en el parque Ahuehuetes, se utilizaron para el dimensionamiento los mismos datos con los que se diseñó el humedal junto al dren Chimalhuacán, citado en el inciso anterior.

Se tiene como objetivo el reúso del agua tratada para el riego de una cancha de futbol, por lo que el sistema fue dimensionado para dar cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021, en su variante de riego de áreas verdes.

El tren de tratamiento establecido para este sistema consiste en: Cárcamo de bombeo, tanque séptico, humedal de lodos, dos humedales en serie de flujo subsuperficial y su tanque de desinfección (cloración). Cabe señalar que el pretratamiento (rejillas y desarenador) debe efectuarse desde el cárcamo de bombeo.

Los parámetros de diseño de este sistema de humedales se muestran en la Tabla 3-63).

Tabla 3-62. Parámetros de diseño del sistema de tratamiento.

Parámetro	Concentración influente,	% reducción en el Tanque séptico	Efluente Tanque séptico	Efluente final
DBO, mg/L	394	50	197	20
SST, mg/L	113	40	67	20
NT, mg/L	58	10	52	15
PT, mg/L	7	2	7	5
CF, NMP7100ml	10,000,000	90	1,000,000	1,000

El porcentaje estimado de reducción de contaminantes en el tanque séptico se obtuvo a partir de evaluaciones realizadas por el IMTA a diversos tanques sépticos, para condiciones ambientales, sociales y de calidad del agua similares a las existentes en el dimensionamiento del sistema de tratamiento aquí propuesto.

Otros parámetros utilizados en el dimensionamiento son los siguientes:

Caudal de diseño (Q): 86.4 m³/d (1.0 lps).

Temperatura de diseño (T): 6.42 °C.

Evaporación diaria (e): 5.53 mm/d.

Diseño del tanque séptico

El tiempo de retención hidráulico se determinó en una duración de 24 Hr, por lo que con base en el caudal de diseño de 86.4 m³/d (1.0 L/s), el volumen del tanque séptico es de 86.4 m³.

Para calcular el volumen total del tanque séptico se requiere estimar la producción de lodos, para lo cual se asignó una aportación de 200 L/hab/d, con lo que se obtiene una población de 432 habitantes. Se planteó una producción de lodos per cápita de 25 L/hab.año. Proyectando la extracción de lodos cada medio año, se tendría una acumulación de lodos de 5.4 m³ cada seis meses, los que sumados al volumen de tratamiento de 86.4 m³, se obtiene un volumen total de 95.4 m³. Con base en este volumen se obtiene un área superficial de 64.8 m², y considerando una relación largo/ancho de 2/1, el largo es de 11.4 m y el ancho de 5.7 m.

Cabe señalar que volumen de este tanque podría ajustarse en función de la topografía del sitio, con objeto de obtener la carga hidráulica necesaria para que el sistema funcione por gravedad o bien rellenar y levantar el área de esta unidad de tratamiento. Se determinó un bordo libre de 0.3 m.

Humedal de lodos

Con base en el caudal de diseño y una concentración de sólidos de 113.00 mg/L se obtiene una concentración de 1.1 kg/d (flujo de sólidos en el influente). A partir del caudal de diseño (1.0 L/s), se obtiene una población de 432 habitantes.

El área per cápita recomendada para el dimensionamiento del humedal de lodos, con base en la concentración de sólidos de 113. Mg/L es de 0.87 m²/hab, por lo que para una población de 432 habitantes el área de esta unidad de tratamiento es de 37.5 m². Es recomendable que la geometría de esta variante de humedal sea cuadrada, por lo que al aplicar la raíz cuadrada al área ya citada se obtiene un largo y un ancho de 6.13 m.

Humedal de flujo subsuperficial 1

Mediante la siguiente ecuación se calculan las áreas de este humedal.

$$A = \frac{Q(\ln C_i - \ln C_e)}{K_t dn}$$

Donde:

- A_s = Área superficial del humedal subsuperficial, m².
 C_i = Concentración del parámetro en el afluente, (197.0 mg/L).
 C_e = Concentración del parámetro en el efluente, (20 mg/L).
 Q = Caudal medio, (86.4 m³/d).
 K_t = $0.75(1.06)^{(T-20)}$ Constante cinética de biodegradación, d⁻¹.
 T = 6.42 °C
 d = Profundidad del lecho filtrante, (0.5 m).
 n = Porosidad del medio filtrante (40%)

La DBO corresponde al parámetro base para los cálculos. Con el área obtenida para este parámetro se calcula la calidad esperada (concentración) para el resto de los parámetros en el agua tratada.

Los parámetros de diseño y las áreas calculadas de los diferentes contaminantes se muestran en la Tabla 3-64.

Tabla 3-63. Parámetros de diseño del humedal de flujo subsuperficial 1.

Parámetro	Entrada (C _i)	Salida (C _e)	% de reducción	Área, m ²
DBO, mg/L	197.0.	60.61	69.23	1,492
SST, mg/L	67.80	20.86	69.23	1,492
NT, mg/L	52.56	16.17	69.23	1,492
PT, mg/L	7.11	2.19	69.23	1,492
CF, NMP/100ml	1,000,000	307,684	69.23	1,492

El área de este humedal de flujo subsuperficial es de 1,492 m². La profundidad seleccionada es de 0.5 m, y una porosidad del 40%, por lo que el volumen de vacíos (profundidad inundada) es de 298 m³. La profundidad del lecho filtrante es de 0.6 m, y la profundidad de operación es de 0.5 m, por lo que 10 cm de la superficie permanecerá seco.

El tiempo de retención hidráulico de este humedal se obtiene dividiendo el volumen de vacíos (22.4 m³), entre el caudal (86.4 m³/d), por lo que se obtiene un tiempo de residencia de 3.45 d.

El medio filtrante incluirá tres capas de tezontle de 20 cm de profundidad. La granulometría, desde el fondo hacia la superficie, será de 2.0 a 2.5 pulgadas de diámetro, 1.0 a 2.0 pulgadas en el centro y de 0.5 a 1.0 pulgadas en la superficie. Durante la construcción deberá colocarse en el fondo del estanque una capa de arcilla de 10 cm. Este material forma parte de los procesos de tratamiento.

La evaporación de este humedal se obtiene con la fórmula $e/1000A$, donde: e es la evaporación (5.53 mm/d) y el área es de 1,492 m². La evaporación diaria resultante es de 8.24 m³/d. Restando este volumen al caudal de diseño, que es de 86.4 m³/d, se obtiene un caudal de salida de este humedal de 78.1 m³/d (0.9 lps).

El agua fluirá por gravedad desde este humedal hacia el siguiente humedal de flujo subsuperficial. La conducción del agua se realizará mediante una tubería de distribución, de CPVC, de 3.0" de diámetro. Ya dentro del humedal el tubo de distribución deberá estar ranurado y colocarse a lo ancho del canal de ingreso, formado por la colocación de una mampara. En total se colocarán dos mamparas dentro de este humedal con objeto de reducir la formación de flujos preferenciales y de incrementar la eficiencia de remoción de contaminantes.

La especie vegetal a utilizarse en este humedal es *Typha latifolia* (tule), sembrada a una distancia equidistante no mayor a 1.0 m.

Humedal de flujo subsuperficial 2

Este humedal se calcula a partir de los datos de calidad del agua del efluente del humedal anterior, de igual modo se utiliza el mismo procedimiento para el cálculo de las áreas.

Por tanto, la fórmula es:

$$A = \frac{Q(\ln C_i - \ln C_e)}{K_t d n}$$

Donde:

- A_s = Área superficial del humedal subsuperficial, (1,326 m²).
- C_i = Concentración del parámetro en el afluente, (60.61 mg/L).
- C_e = Concentración del parámetro en el efluente, (20 mg/L).
- Q = Caudal medio, (81.63 m³/d).
- K_t = $0.75(1.06)^{(T-20)}$ Constante cinética de biodegradación, d⁻¹.
- T = 6.42 °C
- d = Profundidad del lecho filtrante, (0.5 m).
- n = Porosidad del medio filtrante (40%)

La DBO corresponde al parámetro base para los cálculos. Con el área obtenida para este parámetro se calcula la calidad esperada (concentración) para el resto de los parámetros en el agua tratada.

Los parámetros de diseño y las áreas calculadas de los diferentes contaminantes se muestran en la Tabla 3-65.

Tabla 3-64. Parámetros de diseño del humedal de flujo subsuperficial 1.

Parámetro	Entrada (Ci)	Salida (Ce)	% de reducción	Área, m ²
DBO, mg/L	60.61	20.00	67.0	1,327
SST, mg/L	20.86	6.88	67.0	1,327
NT, mg/L	16.17	5.34	67.0	1,327
PT, mg/L	2.19	0.72	67.0	1,327
CF, NMP/100ml	307,684	101,523	67.0	1,327

El área de este humedal de flujo subsuperficial es de 1,327 m². La profundidad seleccionada es de 0.5 m, y una porosidad del 40%, por lo que el volumen de vacíos (profundidad inundada) es de 265.3 m³. La profundidad del lecho filtrante es de 0.6 m, y la profundidad de operación es de 0.5 m, por lo que 10 cm de la superficie permanecerá seco.

El tiempo de retención hidráulico de este humedal se obtiene dividiendo el volumen de vacíos (265.3 m³), entre el caudal (81.62 m³/d), por lo que se obtiene un tiempo de residencia de 3.25 d.

El medio filtrante incluirá tres capas de tezontle de 20 cm de profundidad. La granulometría, desde el fondo hacia la superficie, será de 2.0 a 2.5 pulgadas de diámetro, 1.0 a 2.0 pulgadas en el centro y de 0.5 a 1.0 pulgadas en la superficie. Durante la construcción deberá colocarse en el fondo del estanque una capa de arcilla de 10 cm. Este material forma parte de los procesos de tratamiento.

La evaporación de este humedal se obtiene con la fórmula $e/1000A$, donde: e es la evaporación (5.53 mm/d) y el área es de 1,327 m². La evaporación diaria resultante es de 7.32 m³/d. Restando este volumen al caudal de diseño, que es de 81.62 m³/d, se obtiene un caudal de salida de este humedal de 74.29 m³/d (0.86 lps).

El agua fluirá por gravedad desde este humedal hacia el siguiente humedal de flujo subsuperficial. La conducción del agua se realizará mediante una tubería de distribución, de CPVC, de 3.0" de diámetro. Ya dentro del humedal el tubo de distribución deberá estar ranurado y colocarse a lo ancho del canal de ingreso, formado por la colocación de una mampara. En total se colocarán dos mamparas dentro de este humedal con objeto de reducir la formación de flujos preferenciales y de incrementar la eficiencia de remoción de contaminantes.

La especie vegetal a utilizarse en este humedal es *Schoenoplectus californicus* (junco) sembrada a una distancia equidistante no mayor a 1.0 m.

Tanque de cloración

Como se observa en la Tabla 3-65, se tiene un valor de coliformes fecales en el agua tratada de 101,523 CF NMP/100 ml, el permitido por la norma es de 250 CF NMP/100 ml, para riego de cultivos, razón por la que se requiere de una unidad de desinfección, en este caso un tanque de cloración.

El tiempo de contacto (θ) entre el cloro y el agua tratada es de 30 minutos, el caudal (Q) es de 0.86 lps. El volumen (V) de la cámara de contacto con cloro se obtiene multiplicando $\theta \cdot Q \cdot 60 / 1000$. El valor resultante es 1.55 m³. Considerando una profundidad del agua (h) de 0.3 m, el área (A= V/h) de esta unidad de contacto con cloro es de 5.16 m². Con la raíz cuadrada de este valor se obtiene el largo (L) y el ancho (W) de este estanque (2.27 m para cada lado). Se recomienda el uso de dos mamparas con objeto de reducir la dispersión y aumentar la eficiencia de desinfección. Es aconsejable una dosis normal de 1.5 mg/L de cloro.

El área total de tratamiento es de 253 m², como se muestra en la Tabla 3-66.

Tabla 3-65. Áreas por unidad de tratamiento y total del sistema de tratamiento.

UNIDAD DE TRATAMIENTO	Áreas, m ²
Tanque séptico	64.80
Humedal de lodos	37.55
Humedal de flujo subsuperficial 1	1,492.59
Humedal de flujo subsuperficial 2	1,326.51
Desinfección	5.16
Área del sistema	2,921

En la Figura 3-116 se esquematiza el aspecto general del sistema de tratamiento, en planta y perfil, con algunos detalles de los diversos componentes la ubicación de las tuberías (distribución, recolección y vaciado de los estanques, registros, mamparas, especies vegetales, área inundada, área seca y capas del medio filtrante). En el **Anexo 7** se muestran los planos del arreglo general del sistema.

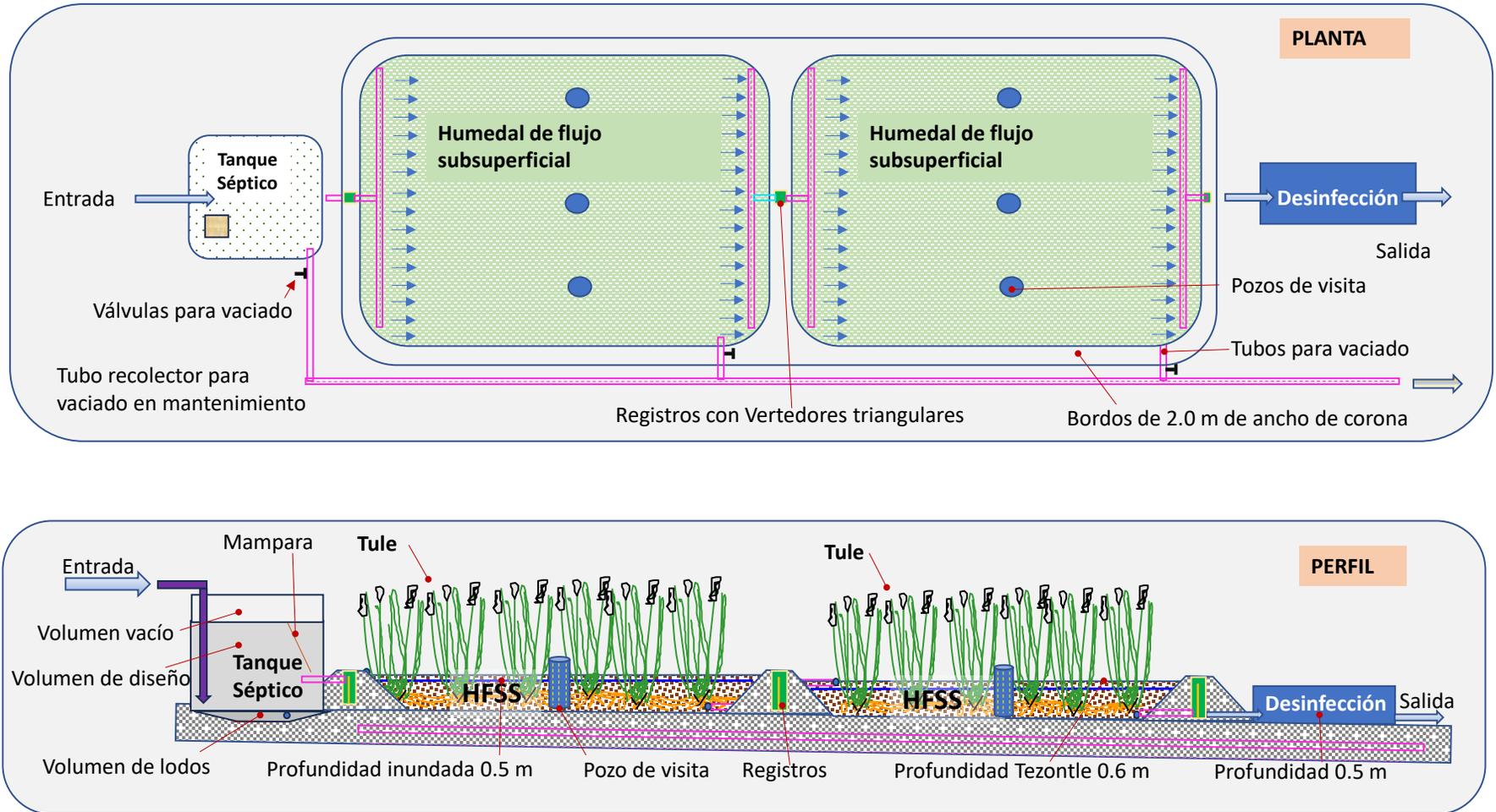


Figura 3-116. Esquema general, planta y perfil, del sistema de tratamiento de aguas residuales.

3.3.1.3 Sistema de humedal de tratamiento de Tocuila.

El 6 de septiembre de 2023 se efectuó una visita al sitio donde se tomó la muestra de aguas residuales, junto al canal (Figura 3-117 y Figura 3-118).

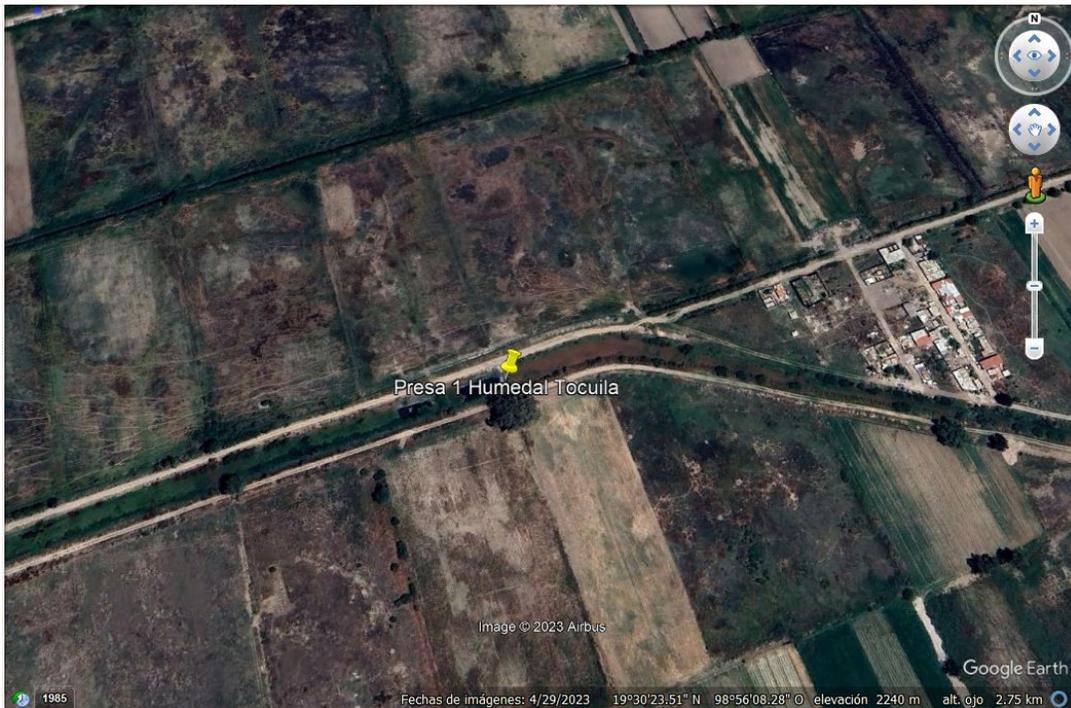


Figura 3-117. Ubicación del sitio de muestreo.



Figura 3-118. Aspecto general del sitio de muestreo.

Los resultados de laboratorio son los siguientes:

Tabla 3-66. Resultados de laboratorio de la muestra de aguas residuales del canal.

DQO	DBO₅	NT	NO₂	NO₃	PT
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
877	442		<0.01	0.194	10.76
456	-----	-----	-----	-----	-----
243	205.5		<0.01	0.1	7.84

Grasas y aceites	SST	Turbiedad	Coliformes fecales	E. Coli	HH
mg/L	mg/L	UNT	NMP/100 mL	NMP/100 mL	No. Huevos/L
45.4	68	66	1.10E+08	1.10E+08	0
-----	-----	-----	-----	-----	-----
35.2	128	73	1.50E+07	1.50E+07	2

Cabe señalar que no se ha dimensionado el sistema debido a que a la fecha no se ha especificado el terreno sobre el que se implementará el sistema de tratamiento mediante humedales. De igual modo no se ha definido el sitio donde se reutilizará el agua tratada ni el tipo de reúso que se espera efectuar, La falta de información del área disponible no permite determinar el tren de tratamiento ni las áreas requeridas para cada una de las unidades de tratamiento, por lo que una vez que se cuente con esta información se procederá a realizar el dimensionamiento, la topografía, así como los planos, conceptos y costos de construcción.

3.4 Evaluación de las estructuras adicionales al PHLT.

3.4.1 Bordos en Ciénega de San Juan

Con la finalidad de recuperar los cuerpos de agua que fueron desecados con las obras de construcción del Nuevo Aeropuerto Internacional de México (NAIM) mediante drenes y obras de desvío, dentro del Programa Hídrico del Lago de Texcoco (PHLT) surge el proyecto de construcción y reconfiguración de bordos de tierra con los que se busca generar espejos someros de agua (entre 30 y 50 cm de profundidad) que sean aprovechables como hábitat de aves, especies vegetales, terrestres y acuáticas que permitan la concepción de un mejor microclima para la región.

El proyecto de bordos se ubica en la zona norte del Área de Protección de Recursos Naturales Lago de Texcoco (APRN LT) en el municipio de San Salvador Atenco, en los parajes de la Ciénega de San Juan, actualmente en la zona destinada a anegar, se tiene presencia de especies vegetales como pastos salados y juncos, la comunidad ha conformado algunos bordos que inundan pequeñas áreas en las que se observa una gran variedad de aves endémica y migratorias.

La construcción de bordos busca aprovechar la retención y manejo de escurrimientos de agua provenientes del río San Juan Teotihuacán al oriente y del Canal de la Termoeléctrica de Acolman (Canal Salado) en la zona norte, mediante la interconexión de áreas de inundación establecidas con la ubicación de pasos de agua que permitan la regulación y almacenamiento, dependiendo de los volúmenes de agua que arriben según la época del año y las condiciones meteorológicas.

Los bordos se han concebido de sección trapezoidal buscando tener dos aprovechamientos diferentes, por una parte, la retención de agua para conformar espejos someros y por otra parte fungir como andadores para que la gente pueda caminar sobre la corona de estos con fines recreativos, visualizar el paisaje, flora y fauna, además de poder permitir el desplazamiento para realizar acciones de mantenimiento y aprovechamiento de recurso.

El material con el que se pretende conforma los bordos será tierra producto del despalme de una sección del mismo terreno mezclado con material de banco tezontle y/o tepetate para brindar la capacidad de carga adecuada en función de los requerimientos de los esfuerzos a los que serán sometidos. Dicho suelo será apilado de tal manera que permita generar una oquedad y un montículo al cual se le dará la conformación requerida en lo ancho y alto.

Para evaluar el funcionamiento de los bordos a continuación se describe el procedimiento seguido para su modelación hidráulica de tal forma de contar con información espacial que permita cuantificar el aprovechamiento que se espera lograr con la construcción de los bordos. Se precisa, que para su revisión se actualizó el estudio hidrológico al considerar solo el área de influencia a la Ciénega de San Juan Teotihuacán, la metodología seleccionada corresponde al método de regionalización, ampliamente usada en el Valle de México, los insumos topográficos

corresponden a modelos digitales de terreno actuales y el programa de simulación hidráulica bidimensional elegido es Iber.

Modelo digital de elevación

La representación de la geometría de la superficie del terreno de la zona de estudio se obtuvo a través de la tecnología Lidar, método completamente automático que permite hacer mediciones con láser de la topografía de una zona desde una aeronave, proporcionando información tridimensional acerca de la forma de la superficie terrestre.

El modelo digital de elevación (DEM) utilizado en el presente trabajo fue un Lidar de tipo terreno de INEGI en formato cartográfico 1:10 000, zona UTM 14 con resolución horizontal de 5 x 5 metros y resolución vertical 1 m. El modelo fue generado a partir de la nube de puntos ajustada al terreno en el año 2007.

La conformación de información Lidar de las cartas con clave E14B21D1 y E14B21D3, permitió representar de manera simplificada las formas que tiene la corteza terrestre en la superficie de la zona de estudio (planicies y depresiones) y conocer aspectos tales como alturas, pendientes secciones, desniveles, áreas sujetas a inundación y la delimitación de cuencas que drenan a la zona de la Ciénega de San Juan Teotihuacán. Lo anterior forma parte de los insumos fisiográficos indispensables para la caracterización de la o las cuencas de influencia para la determinación de los caudales de diseño, así como la base o soporte geométrico en la modelación hidrodinámica para evaluar el funcionamiento de bordos y calcular el área de inundación

Características fisiográficas de las cuencas de estudio

Con base al DEM construido a partir de la información Lidar, se trazó el parteaguas de las cuencas de estudio al considerar información base como: curvas de nivel, infraestructura urbana y el confinamiento de la red hidrográfica que drena a la Ciénega de San Juan Teotihuacán, comprendiendo como hidrografía las líneas virtuales que describen el drenaje de la lluvia al caer sobre la superficie terrestre determinando hacia donde fluye el agua y que es representada por líneas que unen puntos situados en la red de afluentes.

En la Figura 3-119 se presenta la configuración del parteaguas que define las dos áreas de aportación de escurrimientos pluviales a la Ciénega de San Juan Teotihuacán, en color naranja se delimitó la cuenca correspondiente al Canal Salado que capta y conduce los escurrimientos provenientes de la Termoeléctrica de Acolman y en color rojo y con una superficie de mayor dimensión se definió la cuenca del río San Juan Teotihuacán que nace de la unión de los arroyos San Martín, Barranca de Atlamajac y Barranca de Tlalchichinamitl, atraviesa el poblado de San Juan Teotihuacán y continúa hacia las poblaciones de Atlatongo, San Bartolo, Acolman y Tepexpan; finalmente, el río descarga sus aguas en la zona del ex vaso de Texcoco, a la altura de Nexquipayac.

El cauce principal de ambas cuencas se determinó apoyado en la red hidrográfica escala 1:50 000 de INEGI con clave RH26Dp “L. Texcoco y Zumpango. Cuenca R. Moctezuma. RH Pánuco”, que representa el comportamiento de drenaje superficial e incluye indicadores de hidromorfometría como la magnitud de orden y nivel de corrientes, al interior de la zona urbana, particularmente en el caso de la cuenca de la Termoeléctrica de Acolman el trazo del cauce principal se determinó apoyado en imágenes satelitales y recorridos en Google Street siguiendo el trazo de los encauzamientos.

La pendiente del cauce principal se calculó bajo el método de Taylor - Schwartz, al considerar un valor ponderado de las diferentes pendientes por tramos que existen a lo largo de las corrientes principales de ambas cuencas. La Tabla 3-67 presenta los valores determinados del área de las cuencas analizadas, longitudes y pendientes del cauce principal.

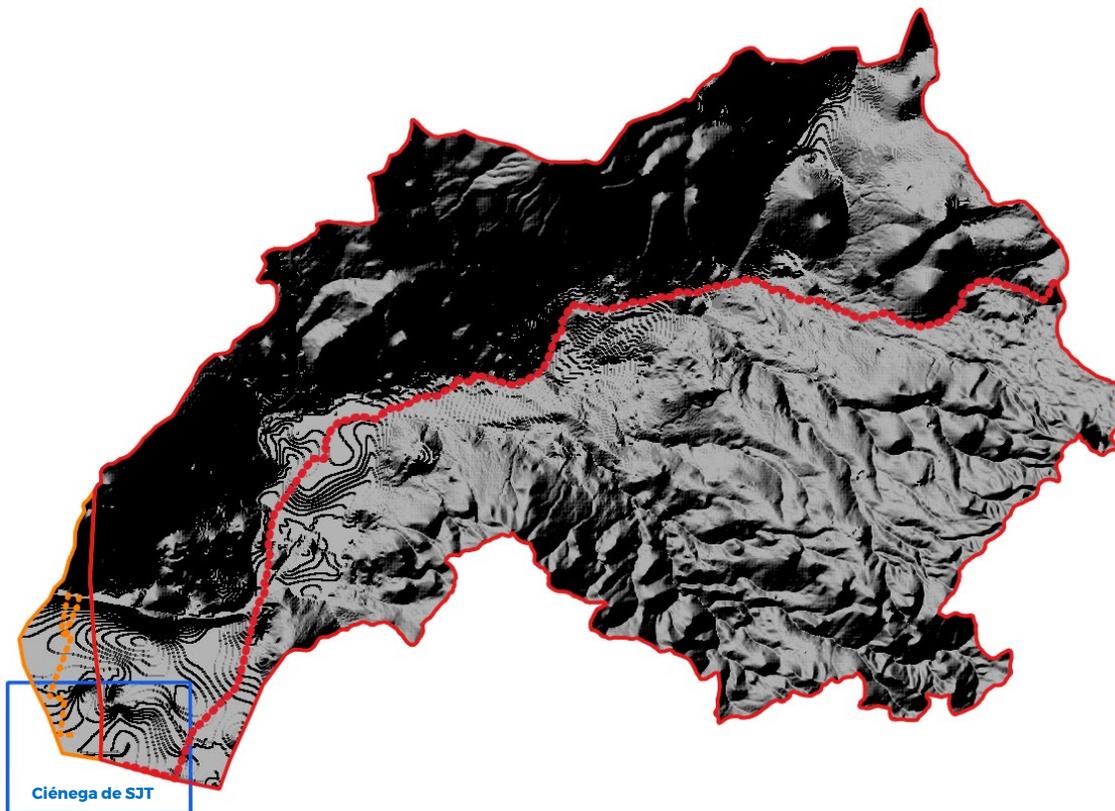


Figura 3-119. Delimitación de cuencas que drenan a la Ciénega de San Juan Teotihuacán

Tabla 3-67. Área, longitud y pendiente del cauce principal

ID	Cuenca	Área Total, km ²	L, km	So
1	Cuenca de la Termoeléctrica	13.56	6.05	0.0006
2	Cuenca del RSJT	544.46	45.42	0.0026

Tiempo de Concentración

El tiempo de concentración de los escurrimientos superficiales se calculó mediante la ecuación de Kirpich; el tiempo de concentración define el lapso mínimo para que toda la cuenca aporte agua producto de una precipitación hacia el punto de salida del parteaguas; a partir de dicho tiempo si la magnitud de la lluvia y su intensidad no cambian, el caudal de escurrimiento es constante.

$$t_c = 0.000325 * \left(L^{0.77} / S_0^{0.385} \right)$$

Donde:

- t_c: tiempo de concentración, horas
- L: longitud del cauce principal sobre la superficie, m
- So: pendiente del terreno, adimensional

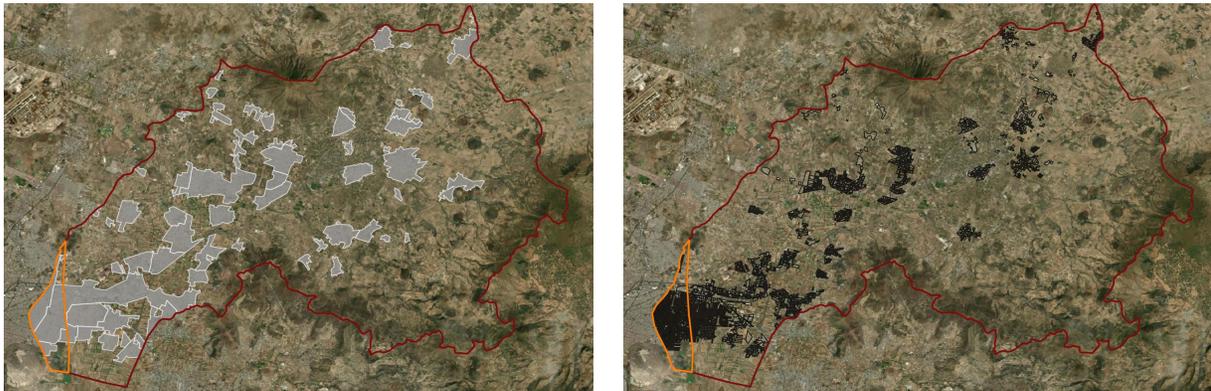
En la Tabla 3-68 se muestran los tiempos de concentración obtenidos para las cuencas de interés. Es importante señalar que el tiempo de concentración es menor en cuencas predominantemente urbanas debido al grado de impermeabilidad que aumenta la velocidad en los escurrimientos; lo anterior ocasiona que los picos de las avenidas se concentren más rápido, siendo la cuenca muy sensible a lluvias intensas y de corta duración.

Tabla 3-68. Tiempo de concentración de cada cuenca

ID	Cuenca	t _c , h	t _c , min
1	Cuenca de la Termoeléctrica	4.48	268.91
2	Cuenca del RSJT	12.39	743.12

Áreas urbanas, no urbanas, permeables e impermeables

El análisis y cuantificación de las áreas urbanas, no urbanas, permeables e impermeables atiende a determinar los escurrimientos que potencialmente puede generar una cuenca, para ello se empleó información geográfica de INEGI respecto a la delimitación urbana de las localidades al interior de las cuencas de estudio, así como de la traza de manzanas del Inventario Nacional de Viviendas 2020.



Áreas urbanas

Áreas Impermeables

Figura 3-120. Superficies urbanas e impermeables de las cuencas de estudio

La Tabla 3-69 presenta los valores obtenidos de la cuantificación de las áreas urbanas, no urbanas, permeables e impermeables de las cuencas analizadas.

Tabla 3-69. Áreas urbanas, no urbanas e impermeables de las cuencas

ID	Cuenca	Área no urbana, km ²	Área urbana, km ²	Área permeable, km ²	Área impermeable, km ²	Área Total, km ²
1	Cuenca de la Termoeléctrica	3.82	9.74	7.462	6.098	13.56
2	Cuenca del RSJT	453.815	90.645	507.847	36.613	544.46

Coefficiente de Escurrimiento Ce

Con la finalidad de conocer la relación que existe entre el volumen que escurre por la superficie de una cuenca con respecto al volumen total producto de la precipitación se calculó el coeficiente de escurrimiento ponderado para cuencas urbanas y no urbanas.

$$C_p = \frac{(C_u * A_u + C_{nu} * A_{nu})}{A_t}$$

Donde:

- CP: Coeficiente de escurrimiento ponderado. Adimensional
- Cu: Coeficiente de escurrimiento urbano. Adimensional
- Au: Área urbana de la cuenca, km².
- Cnu: Coeficiente de escurrimiento no urbano. Adimensional
- Anu: Área no urbana de la cuenca, km².
- At: Área total de la cuenca delimitada por el parteaguas, km².

Los resultados del coeficiente de escurrimiento ponderado para las cuencas de estudio se presentan en la Tabla 3-70.

Tabla 3-70. Áreas totales, urbanas, no urbanas, Índice de urbanización y coeficientes de escurrimiento urbano, no urbano y ponderado

ID	Cuenca	Área no urbana, km ²	Área urbana, km ²	Área Total, km ²	IU	CU	CnU	Cp
1	Cuenca de la Termoeléctrica	3.82	9.74	13.56	0.6	0.27	0.15	0.24
2	Cuenca del RSJT	453.815	90.645	544.46	0.6	0.27	0.02	0.06

Lluvia de Diseño

La precipitación media en las cuencas de estudio se determinó con base a las Isoyetas de diseño de la SCT para los periodos de retorno (Tr) de 10 años y 100 años para una duración de 24 h y las isoyetas asociadas a un Tr de 10 años y duración de 1 hora.

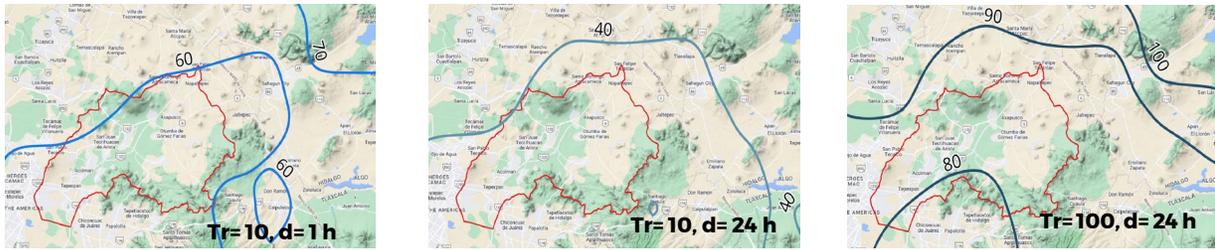


Figura 3-121. Isoyetas de precipitación para Tr de 10 y 100 años

Con la finalidad de no sobre estimar la lluvia de diseño dado que los eventos hidrometeorológicos extremos no se presentan de la misma forma, simultánea en todas las cuencas, se aplicó un factor de reducción por área (FRA) a la precipitación media, que es un coeficiente que convierte precipitaciones puntuales en precipitaciones para un área específica mayor (ver Tabla 3-71).

Tabla 3-71. Ecuación del Factor de Reducción por Área

Zona	Ecuación	R ²
Valle de México	$FRA = -0.052 \cdot \ln(A) + 0.9782$	0.915

En la Tabla 3-72 se presenta las precipitaciones para la cuenca de la Termoeléctrica y del río San Juan Teotihuacán.

Tabla 3-72. Ecuación del Factor de Reducción por Área

Cuenca de la Termoeléctrica			Cuenca del RSJT		
$P_{m(1,10)}$	32.86	mm	$P_{m(1,10)}$	25.37	mm
$P_{m(24,10)}$	50.56	mm	$P_{m(24,10)}$	39.04	mm
$P_{m(24,100)}$	71.62	mm	$P_{m(24,100)}$	55.30	mm

Hietogramas de Precipitación de Diseño

Para considerar el tiempo de distribución de la precipitación (el hietograma de precipitación) y estimar el gasto para una duración de tormenta menor a un día se calcularon las curvas intensidad - duración - periodo de retorno (i-d-Tr) aplicando la fórmula de Chen:

$$P_t^T = \frac{a_1 P_1^{10} \log(10^{2-x} T^{x-1})}{(t + b)^c} \left(\frac{t}{60} \right)$$

Dónde: P_t^T es la altura de precipitación en milímetros para una duración t en minutos y un periodo de retorno Tr en años; a_1 , b_1 y c_1 son parámetros de la tormenta que se determinan según el factor de la relación $R = (P_1^T) / (P_{24}^T)$; t es la duración en minutos;

$x=(P_1^{100}) / (P_1^{10})$, es la relación de lluvias P_1^{100} y P_1^{10} , correspondientes a una duración igual a 1 h y periodos de retorno igual a 100 y 10 años, respectivamente.

Los valores a, b y c, se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$a = -2.297536 + 100.0389R - 432.5438R^2 + 1256.228R^3 - 1028.902R^4$$

$$b = -9.845761 + 96.94864R - 341.4349R^2 + 757.9172R^3 - 598.7461R^4$$

$$c = -0.06498345 + 5.069294R - 16.08111R^2 + 29.09596R^3 - 20.06288R^4$$

Donde:

R: Cociente lluvia - duración con valor de 0.65 para la zona de estudio

La intensidad de precipitación se puede definir como la cantidad de lluvia que cae en una cuenca en una unidad de tiempo, es decir:

$$I = \frac{hp}{t}$$

Donde:

- l: Intensidad de lluvia, mm/h
- hp: Lamina de precipitación, mm
- t: tiempo de duración, h

A continuación, se presentan la Tabla 3-73 y Tabla 3-74 con los valores de intensidades de lluvia para diferentes tiempos de duración de lluvias, de la cuenca de la Termoeléctrica y del río San Juan Teotihuacán, respectivamente.

Tabla 3-73. Intensidades para diferentes tiempos de duración de lluvias (Cuenca de la Termoeléctrica)

d, h	d, min	Periodo de retorno (Tr) en años							
		2	5	10	25	50	100	500	1000
0.083	5	96.64	119.25	136.36	158.96	176.07	193.17	232.88	249.99
0.167	10	75.98	93.75	107.20	124.97	138.42	151.86	183.08	196.53
0.333	20	54.07	66.72	76.29	88.94	98.51	108.08	130.30	139.87
0.500	30	42.46	52.39	59.90	69.84	77.35	84.86	102.31	109.83
1	60	26.50	32.70	37.39	43.60	48.29	52.98	63.87	68.56
2	120	15.72	19.40	22.19	25.87	28.65	31.43	37.89	40.68
3	180	11.42	14.09	16.11	18.78	20.80	22.82	27.51	29.53
4	240	9.05	11.17	12.78	14.89	16.50	18.10	21.82	23.42
5	300	7.55	9.32	10.65	12.42	13.76	15.09	18.20	19.53
6	360	6.50	8.02	9.17	10.70	11.85	13.00	15.67	16.82
8	480	5.13	6.33	7.24	8.44	9.34	10.25	12.36	13.27
12	720	3.66	4.52	5.17	6.03	6.67	7.32	8.83	9.47
18	1080	2.61	3.22	3.68	4.29	4.76	5.22	6.29	6.75
24	1440	2.05	2.53	2.89	3.37	3.74	4.10	4.94	5.31

Tabla 3-74. Intensidades para diferentes tiempos de duración de lluvias (Cuenca del río San Juan Teotihuacán)

d, h	d, min	Periodo de retorno (Tr) en años							
		2	5	10	25	50	100	500	1000
0.083	5	74.62	92.08	105.28	122.74	135.95	149.15	179.81	193.02
0.167	10	58.66	72.39	82.77	96.49	106.88	117.26	141.36	151.74
0.333	20	41.75	51.52	58.91	68.67	76.06	83.45	100.61	108.00
0.500	30	32.78	40.45	46.25	53.92	59.72	65.53	79.00	84.80
1	60	20.46	25.25	28.87	33.66	37.28	40.90	49.31	52.93
2	120	12.14	14.98	17.13	19.97	22.12	24.27	29.26	31.41
3	180	8.81	10.88	12.44	14.50	16.06	17.62	21.24	22.80
4	240	6.99	8.63	9.86	11.50	12.74	13.97	16.85	18.08
5	300	5.83	7.19	8.23	9.59	10.62	11.65	14.05	15.08
6	360	5.02	6.20	7.08	8.26	9.15	10.04	12.10	12.99
8	480	3.96	4.89	5.59	6.51	7.22	7.92	9.54	10.24
12	720	2.83	3.49	3.99	4.65	5.15	5.65	6.82	7.32
18	1080	2.02	2.49	2.84	3.32	3.67	4.03	4.86	5.21
24	1440	1.58	1.95	2.23	2.61	2.89	3.17	3.82	4.10

Hietograma calculado por el método de bloques alternos

El método de bloque alterno es una forma simple para desarrollar un hietograma de diseño utilizando una curva de intensidad - duración - periodo de retorno ($i - d - Tr$) y conocer la distribución temporal de la lluvia durante un evento dado. Para el análisis de este proyecto se eligió un periodo de retorno de 10 años, una duración de tormenta de 4 horas e intervalos de tiempo de 20 min al considerar las dimensiones de la cuenca de aportación y funcionamiento hidráulico del sistema de bordos que se analizará. En la Figura 3-122 y Figura 3-123 se presenta el hietograma de la tormenta de diseño que representa la distribución de la lámina de lluvia asociada a un periodo de retorno de 10 años acumulada en una duración de 4 horas para las cuencas de la Termoeléctrica y del río San Juan Teotihuacán, respectivamente.

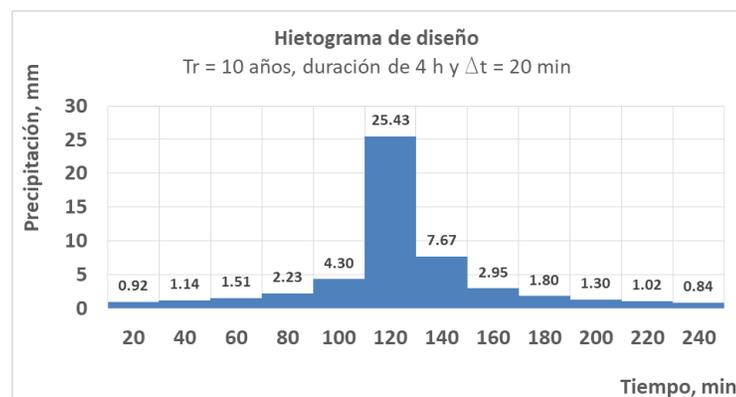


Figura 3-122. Hietograma de diseño de la cuenca de la Termoeléctrica

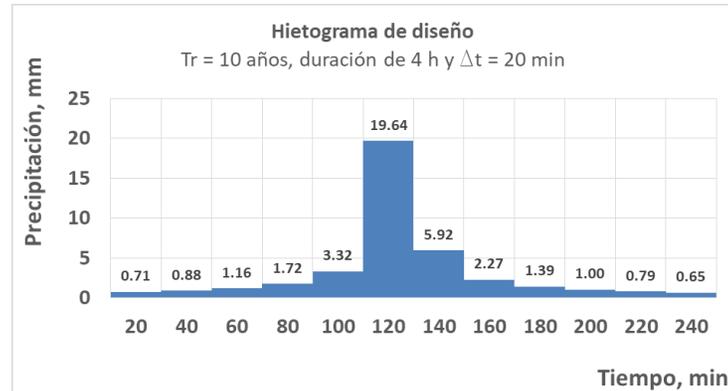


Figura 3-123. Hietograma de diseño de la cuenca del río San Juan Teotihuacán

Método del hidrograma trapecial

Los hidrogramas de las cuencas en análisis se obtuvieron al aplicar el método del hidrograma unitario trapecial al considera aspectos fundamentales en el proceso lluvia-escorrimento, como es el caso de respetar el volumen del escurrimiento directo independientemente de la forma o pico del hidrograma. Este método permite considerar la distribución temporal de la lluvia y tiene sensibilidad a todos los parámetros hidrológicos y fisiográficos como: el coeficiente de escurrimiento ponderado, la pendiente media de la cuenca, la longitud de recorrido y tiempo de concentración.

Para las cuencas en estudio dado que el tiempo de concentración es mayor al intervalo de tiempo seleccionado en la construcción de los hietogramas la formula con la que se obtiene gasto pico del hidrograma es la que se presenta a continuación:

$$Q_p = \frac{V_e}{(T_c + 0.25 * \Delta t) * 60}$$

Donde:

- Ve: volumen de escurrimiento directo, m³
- Δt: incremento de tiempo considerado, min
- Tc: tiempo de concentración, min
- Qp: gasto de pico del hidrograma, m³/s

La Figura 3-124 y Figura 3-125 se muestra el hidrograma total para la cuenca de la Termoeléctrica y del río San Juan Teotihuacán siguiendo la metodología del hidrograma trapecial descrita.

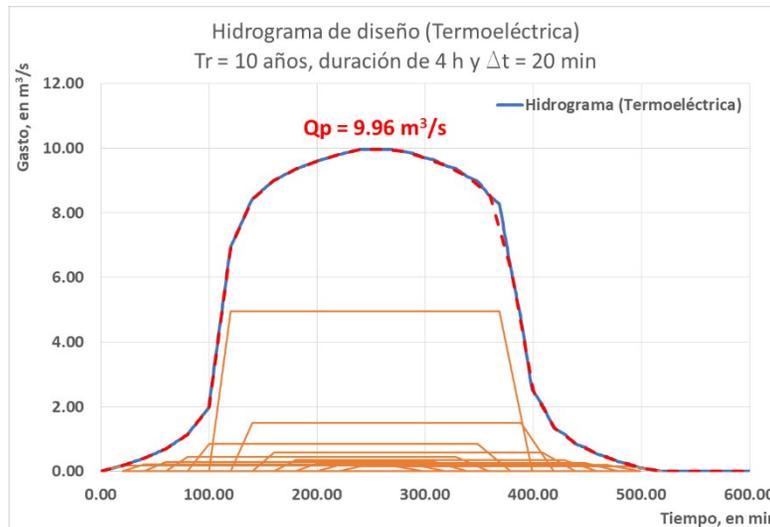


Figura 3-124. Hidrograma de diseño de la cuenca de la Termoeléctrica

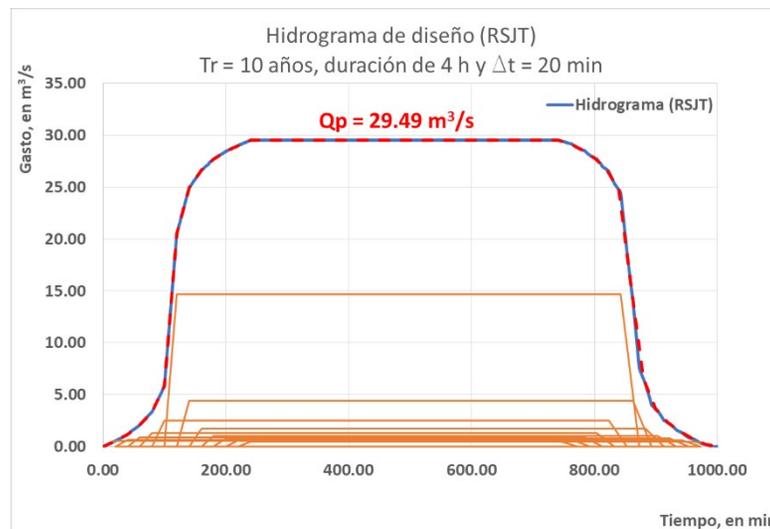


Figura 3-125. Hidrograma de diseño de la cuenca del río San Juan Teotihuacán

Modelo hidrodinámico IBER

El análisis del funcionamiento hidráulico del sistema de bordos en la Ciénega de San Juan Teotihuacán se realizó en el programa Iber. Iber es un modelo numérico bidimensional de simulación de flujo turbulento de lámina libre en régimen no permanente y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. El modelo de la zona de estudio se alimentó con información superficial Lidar con resolución de 5x5 m en el plano horizontal, sobre él se definió la infraestructura existente y de influencia hidráulica en la Ciénega tal y como lo es: el cauce del río San Juan Teotihuacán, el Canal Salado, la barda perimetral del actual Parque Ecológico Lago de Texcoco (PELT) y bordos que en parte trabajan actualmente no sólo con motivos de retención del flujo superficial, sino que también son usados para transitar dentro de la Ciénega. En la Figura 3-126 se presenta en planta el modelo Lidar en su representación de

sombras para visualizar las características topográficas existentes, así como el trazo de estructuras definidas.

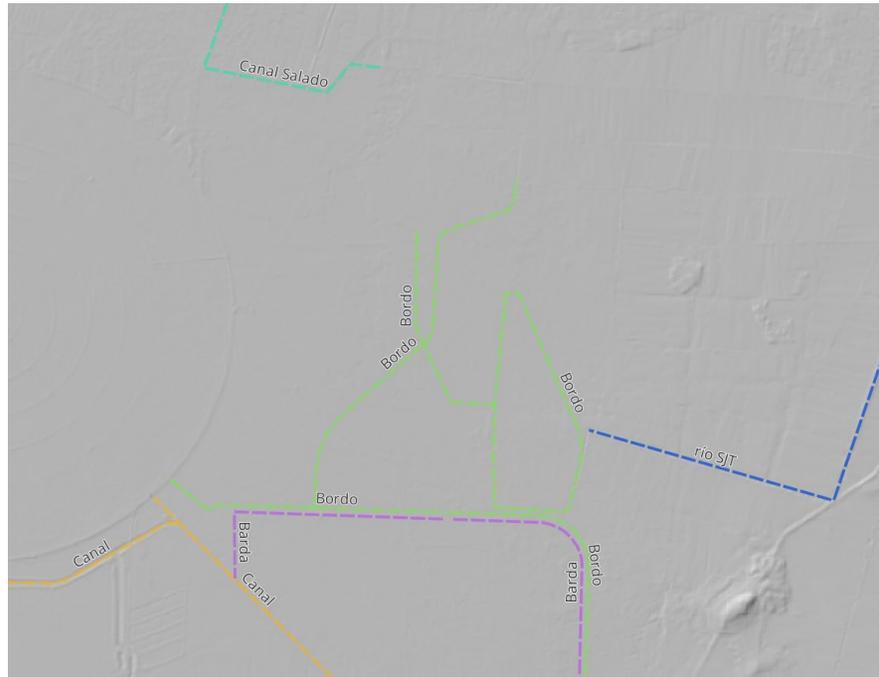


Figura 3-126. Información Lidar y trazo de infraestructura existente

Previo a definir la malla sobre la cual el modelo numérico en cada nodo de intersección realiza el análisis de las variables hidráulicas tales como tirante, calado y velocidad, entre otras, se definieron las características de rugosidad en las áreas dentro el plano de estudio. Con base en la imagen satelital se distinguieron cinco usos de suelo distintos: Canales, Urbano, Agrícola, Humedales y Matorrales, el valor del coeficiente de Manning asociado a cada uso de suelo se presenta en la Figura 3-127.

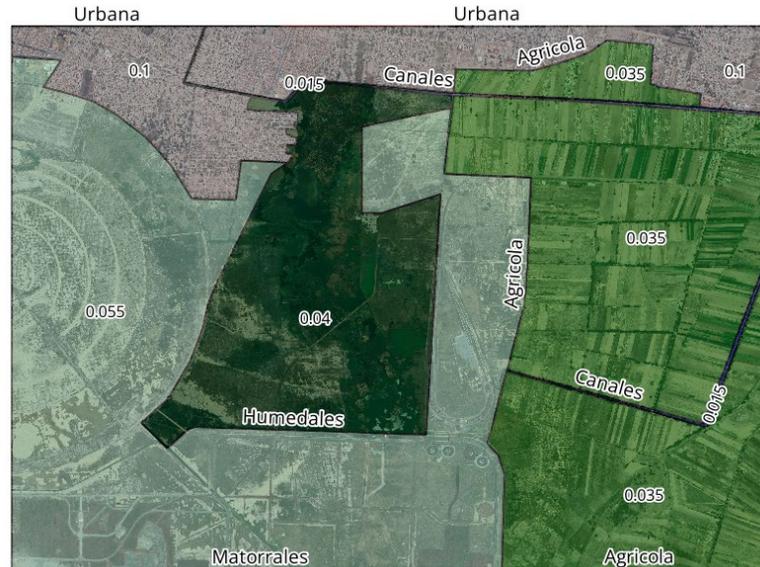


Figura 3-127. Información Lidar y trazo de infraestructura existente

La malla del modelo se generó con la herramienta RTIN la cual crea una geometría irregular de triángulos y rectángulos en función de la variación del terreno y restricciones tales como longitud mínima y máxima de lado de los triángulos que se forman, así como de una tolerancia que debe ser del orden de la precisión altimétrica del modelo digital de terreno. Sobre el contorno de la malla se definieron las fronteras de entrada y salida de flujo, particularmente se tienen dos entradas, una al noroeste correspondiente al Canal Salado del que provienen los escurrimientos de la Termoeléctrica y la segunda al oriente que incorpora el caudal proveniente del río San Juan Teotihuacán.

Los dos hidrogramas de entrada corresponden a una tormenta con duración de 4 horas y asociada a un evento con periodo de retorno de 10 años. Puesto que por el Canal Salado se tiene un ingreso de flujo constante producto de la generación en la Termoeléctrica y no se cuenta con el registro del caudal promedio descargado, además de requerir la inducción del llenado actual de la Ciénega de San Juan, se determinó un valor constante de 500 lps. La simulación hidráulica se realizó para una duración de 7 días de los cuales durante los primeros 4 sólo se presentarían ingresos producto de la generación en la Termoeléctrica (gasto base) y el día 4 ingresarían los gastos tanto por el Canal Salado como por el río San Juan Teotihuacán provenientes del evento de lluvia definido, una vez transitada esta avenida continuarían los ingresos de gasto base hasta llegar al día 7.

El escenario de modelación de bordos, corresponde al trazo de 23 bordos con una longitud total acumulada de 12.8 km, cuya trayectoria atiende a una propuesta realizada por las comunidades de la región (ver Figura 3-128), éstos se pretende estén intercomunicados por medio de vertedores que permitan la comunicación entre celdas confinadas.



Figura 3-128. Escenarios de bordos a modelar en Iber

Los bordos modelados atienden a las siguientes características:

- Bordos 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22 y 23, con altura de corona de 60 cm.
- Bordos 1, 2, 3 y 4, con altura de corona de 90 cm.
- Vertedores A y B con longitud de cresta de 20 m y altura de cresta de 60 cm
- Vertedores C, D, E, F y G con longitud de cresta de 20 m y altura de cresta de 40 cm.
- Vertedores H, I, J, K, L y M con longitud de cresta de 10 m y altura de cresta de 40 cm.

Cabe señalar que la altura de la corona de los bordos se considera desde el nivel de terreno natural hasta la altura correspondiente para dicha corona.

En la Figura 3-129 se presentan los resultados de calado obtenidos al realizar la simulación hidráulica con el programa Iber, en ella se puede observar que los vertedor H, I, J, L y M no trabajan ya que particularmente en el vertedor I el espejo de agua no alcanza un tirante superior a los 40 cm, los otros vertedores no trabajan puesto que no se alcanza a almacenar agua en las celdas que controlan.

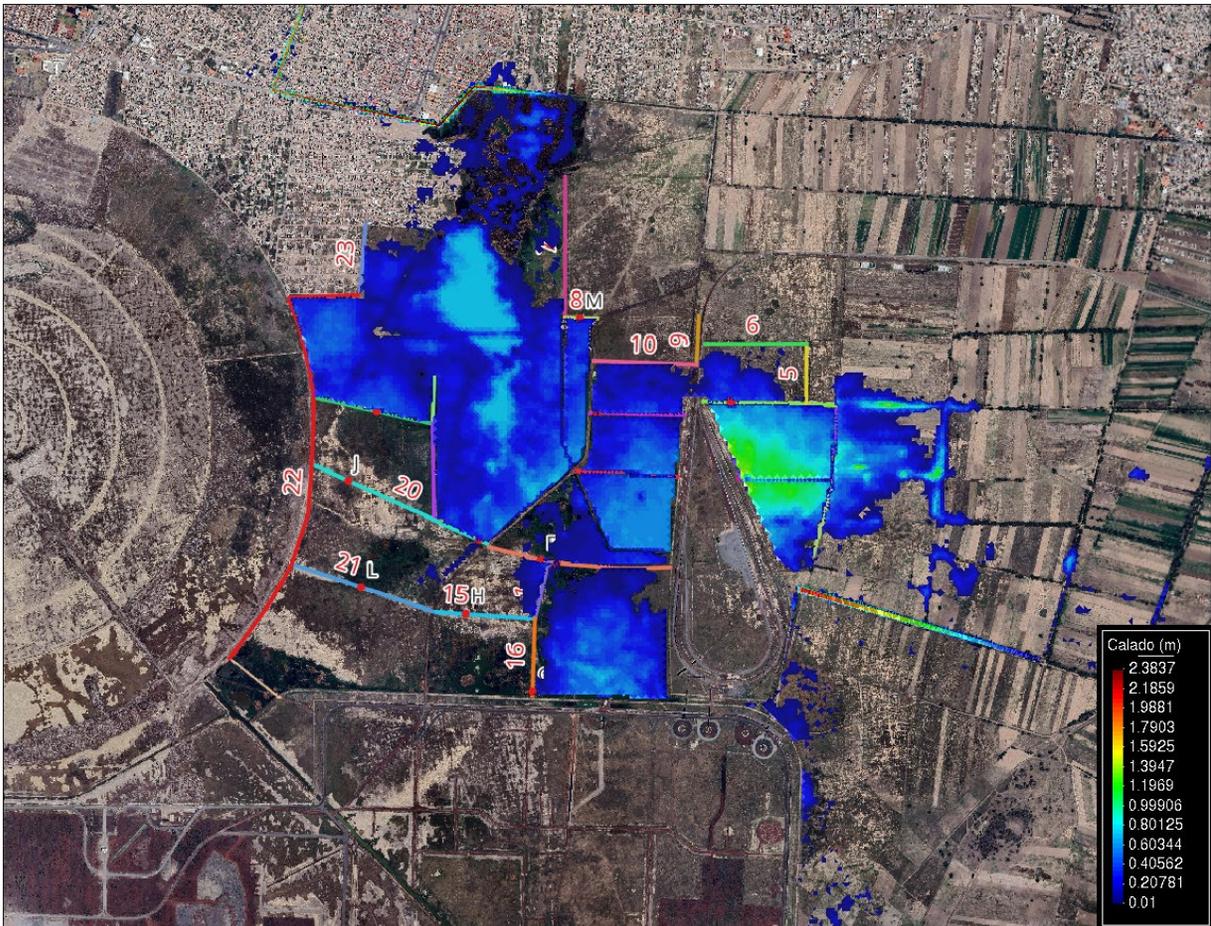


Figura 3-129. Áreas de anegación en la Ciénega de San Juan Teotihuacán

Con el propósito de optimizar el área de anegación en la Ciénega producto del escurrimiento base que llega de la Termoeléctrica y disminuir la cantidad de bordos se analizó un escenario en el que se considera la construcción de 9 bordos y 7 vertedores con las siguientes características:

- Bordos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9 con altura de corona de 60 cm.
- Vertedores A, B, C, D y E con longitud de cresta de 20 m y altura de cresta de 40 cm.
- Vertedores F y G con longitud de cresta de 10 m y altura de cresta de 40 cm.

En la Figura 3-130 se presentan los resultados de calado obtenidos al realizar la simulación hidráulica con el programa Iber, en esta simulación se puede observar que se genera un espejo de agua de mayor extensión y la longitud total de bordos es de 6.8 km.

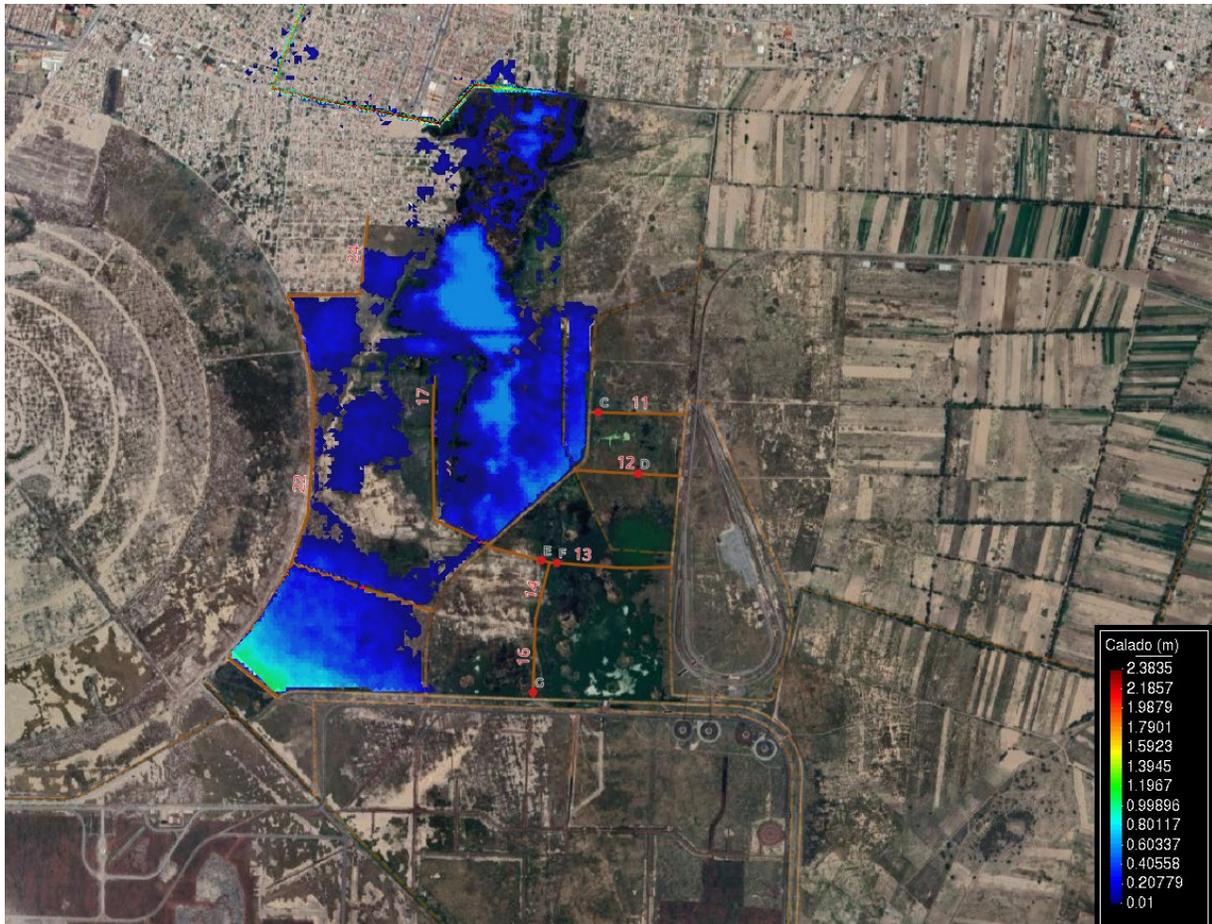


Figura 3-130. Áreas de anegación en la Ciénega de San Juan Teotihuacán

Recomendaciones en el diseño y construcción de bordos

Con el objetivo de coadyuvar en disminuir el riesgo de un funcionamiento inadecuado y complicaciones antes, durante y después de la construcción de los bordos, se requiere contar con los estudios preliminares, topográficos y geotécnicos para elaborar el diseño de los bordos mediante la determinación de las siguientes características: tipo de material, ancho y espesor de la capa base, talud óptimo, elevación de la corona, ancho de la corona, espesor de las capas para realizar la compactación, equipos y procedimientos constructivos.

Además, una vez realizada la topografía de detalle se deberá actualizar el modelo hidráulico para definir la ubicación, elevación y la longitud de las crestas vertedoras para el correcto funcionamiento de los bordos y sus respectivas celdas.

A continuación, se enlistan para su consideración, de forma enunciativa más no limitativa los estudios requeridos y sus correspondientes descripciones:

Estudios preliminares de las condiciones del sitio

Definir la logística de accesibilidad y seguridad al sitio de ejecución de los trabajos, así como, identificar bancos de materiales, estabilidad y conformación del suelo de desplante.

Estudios topográficos

Realizar un levantamiento topográfico de detalle que abarque ampliamente las estructuras o infraestructuras como caminos, alcantarillas y pasos de agua presentes en el área comprendida del proyecto.

Considerar los niveles recabados como variable que determine el dimensionamiento de los bordos y vertedores al considerar el confinamiento del agua y no provocar derrames y afectaciones a la infraestructura existente.

Estudios geotécnicos

Conocer las condiciones geológicas del terreno mediante la realización de campañas de campo para identificar los posibles problemas de compresibilidad, estabilidad y permeabilidad a considerar durante la etapa de diseño.

Ejecución de pruebas de laboratorio de esfuerzo, consolidación, compresión, contenido de agua e identificación de materiales para una mejor construcción operación y mantenimiento.

Definir de manera precisa el perfil estratigráfico del subsuelo por donde será desplantado el bordo, además de proporcionar información referente a las áreas de préstamo.

La información recabada deberá ser considerada en el diseño de bordos buscando garantizar su funcionamiento y disminuir al mínimo la probabilidad de fallas por erosión, inestabilidad, sobrecarga, deslizamiento, asentamientos, agrietamientos (transversal o longitudinal), tubificación, subpresión y licuación.

Diseño de bordos

Adicionalmente, se recomienda considerar en la etapa de diseño de bordos los siguientes aspectos:

Evitar filtraciones al nivel de desplante mediante la realización de despalme en la etapa de construcción y la consideración de un dentellón de ser necesario.

Evitar la erosión interna de los materiales del bordo evitando usar materiales limosos en el cuerpo del bordo, ni arcillas dispersivas, incorporar filtro en la sección (horizontal/chimenea) de ser necesario.

Evitar asentamientos excesivos que conduzcan a pérdidas de bordo libre al considerar una sección y composición del bordo acorde a la capacidad de carga del sitio de desplante.

Evitar la erosión al pie del talud al considerar la protección marginal en ambos taludes.

3.4.2 Asesoría técnica para la conservación de la Laguna Xalapango.

A partir del interés de coadyuvar a la conservación de la Laguna Xalapango y brindar una asesoría técnica, se realiza el análisis bidimensional de los escurrimientos que convergen a este cuerpo de agua. Esto es, con la finalidad de precisar el comportamiento del flujo bajo diferentes avenidas de diseño y determinar a partir de los resultados las mejores estrategias para su preservación.

Para el estudio de la zona de interés, se han considerado debido a su proximidad los escurrimientos de los cauces: río Papalotla, río Xalapango, y río Coxcaoco.

- Río Papalotla

Este afluente se forma por la unión de dos vertientes, una que recoge los escurrimientos de las estribaciones montañosas situadas en el centro del municipio de Tepetlaoxtoc, y otra que proviene de la zona montañosa cercana al poblado de Santa Inés. La extensión aproximada de la ramificación norte (la más importante de las dos) es de 17.2 km. Tiene una aportación media anual de 6.42 millones de metros cúbicos.

La estación hidrométrica que se encuentra midiendo los escurrimientos es identificada como 26193 La Grande.

- Río Xalapango

Nace entre las poblaciones de San Joaquín y Santa Inés, municipio de Texcoco, se forma por la unión de dos vertientes principales que recogen las corrientes que provienen de las partes montañosas del noreste del municipio y atraviesa los municipios de San Andrés Chiautla, Chiconcuac y Atenco, para desembocar en el vaso del ex lago de Texcoco. Su longitud aproximada es de 13.7 km. Tiene una aportación media anual de 3.26 millones de metros cúbicos.

La estación hidrométrica que se encuentra midiendo los escurrimientos es identificada como 26178 Atenco.

- Río Coxcaoco

Se origina a partir de la unión de dos vertientes que recogen las corrientes derivadas de la zona montañosa del Este del municipio de Texcoco. Una de ellas viene de las poblaciones de Nativitas y San Dieguito, y la otra de San Miguel Tlaixpan. Cruza por el municipio de Atenco, para continuar su recorrido y descargar en el vaso del ex lago

de Texcoco. Su longitud aproximada es de 34.25 km, y tiene una aportación media anual de 4.17 millones de metros cúbicos.

La estación hidrométrica que se encuentra midiendo los escurrimientos es identificada como 26184 San Andrés.

Para la realización de este estudio se han considerado los resultados del estudio hidrológico realizado por especialistas del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y que se encuentra contenido en el informe "DIAGNÓSTICO Y ALTERNATIVAS PARA LA GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LAS SUBCUENCAS DE LOS NUEVE RÍOS VERTIENTES AL LAGO DE TEXCOCO".

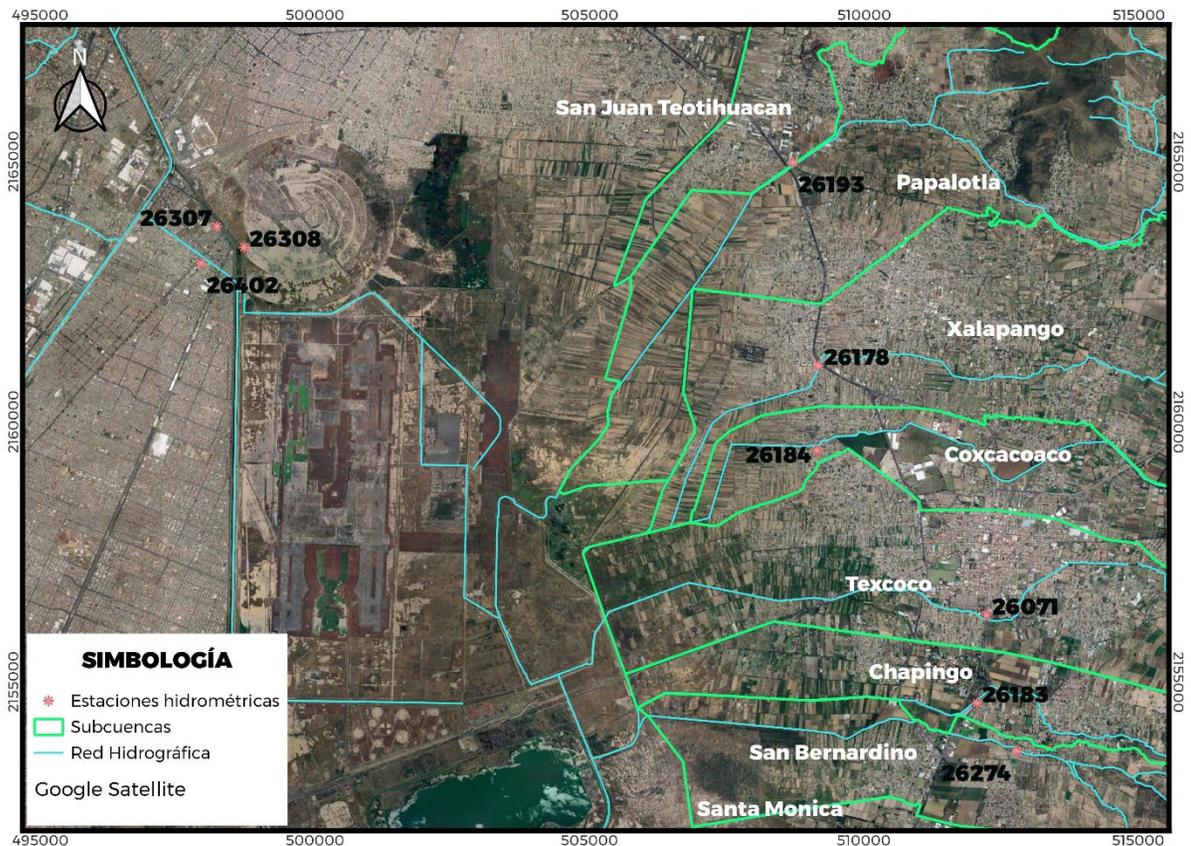


Figura 3-131. Ubicación de la zona de estudio.

Dentro de los alcances para coadyuvar a la conservación de la laguna Xalapango se contempla lo siguiente.

Fase 1.

- Bordos para retención y recuperación del espejo de agua en la laguna Xalapango.
- Plan de prevención, manejo y control del lirio

Fase 2.

Humedal artificial de recuperación laguna 1.

Pretratamiento

Dentro de las alternativas de trabajo que ofrecen los modelos bidimensionales, se tiene la posibilidad de asignar la elevación del área o zona de interés a partir de los modelos digitales de elevación (MDE), los cuales permiten representar la topografía terrestre.

Para la construcción del modelo digital de elevación, se ocupó la información recopilada siguiente.

- Modelo LIDAR. Topografía y percepción remota, que ha sido contribución de la SEDENA.

En las figuras siguientes puede verse parte de dicho material.

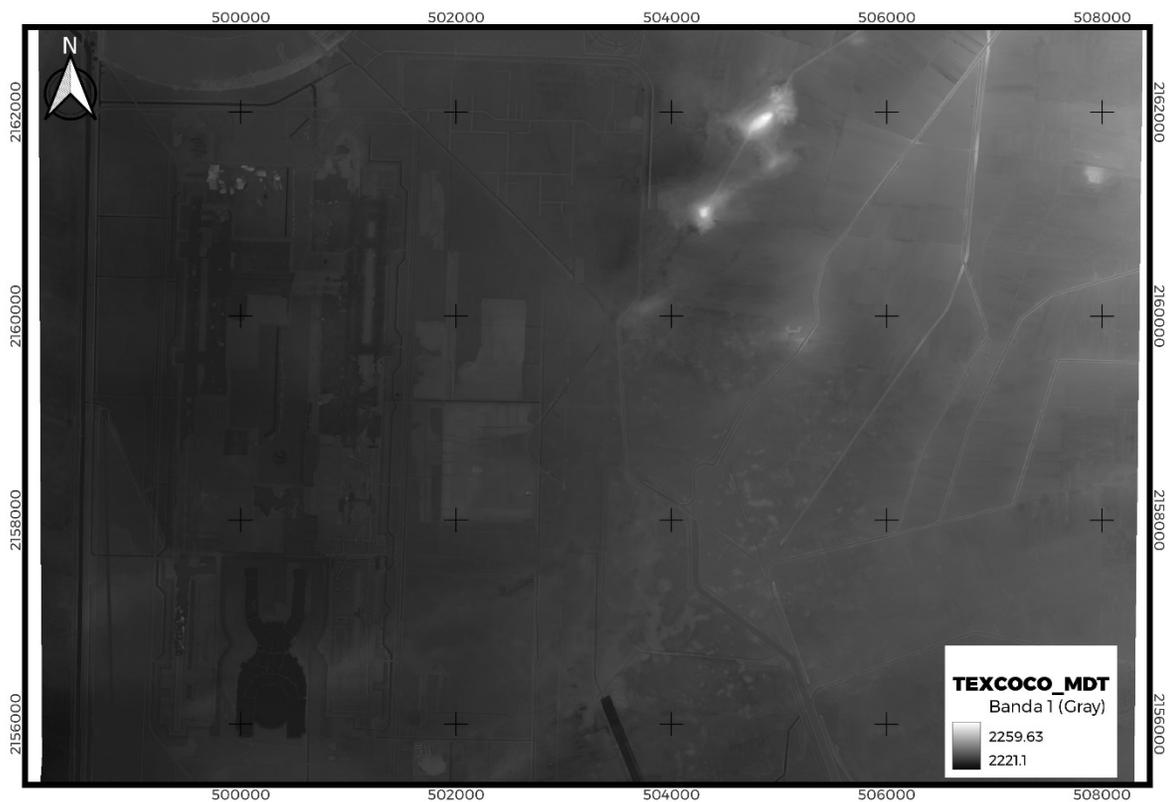


Figura 3-132. Modelo Digital del Terreno de la zona de estudio

Preproceso

En esta fase de la modelación se crean la geometría y el mallado, se definen las condiciones de frontera e iniciales para cada análisis a procesar, y se asignan diferentes parámetros a considerar.

A continuación, se presenta el preproceso establecido para la modelación de la zona de estudio.

Geometría

En la Figura 3-133 se observa el conjunto de superficies en color magenta, mientras que las líneas y puntos se encuentran representados en azul y negro respectivamente.

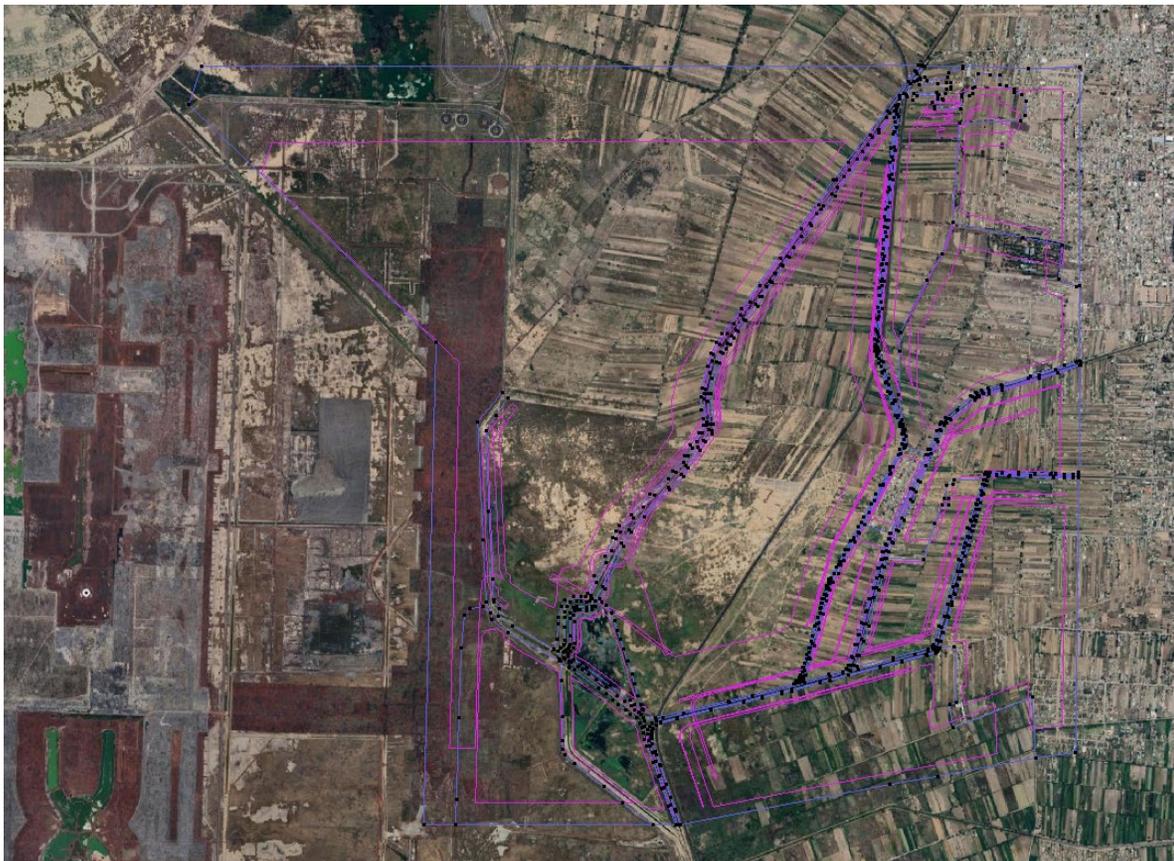


Figura 3-133 Geometría para el análisis hidrodinámico

Mallado

De acuerdo con la estructuración de la geometría, se trabaja con un mallado no estructurado e irregular, integrado por elementos triangulares.

En la Figura 3-134 se observan los diferentes tamaños de malla utilizados, los cuales son de 20 m en las zonas poco o no inundables, 0.5 m en el cauce, 0.7 m en las

márgenes y zonas contiguas al cauce, y de 1 m en zonas inundables próximas a los canales.

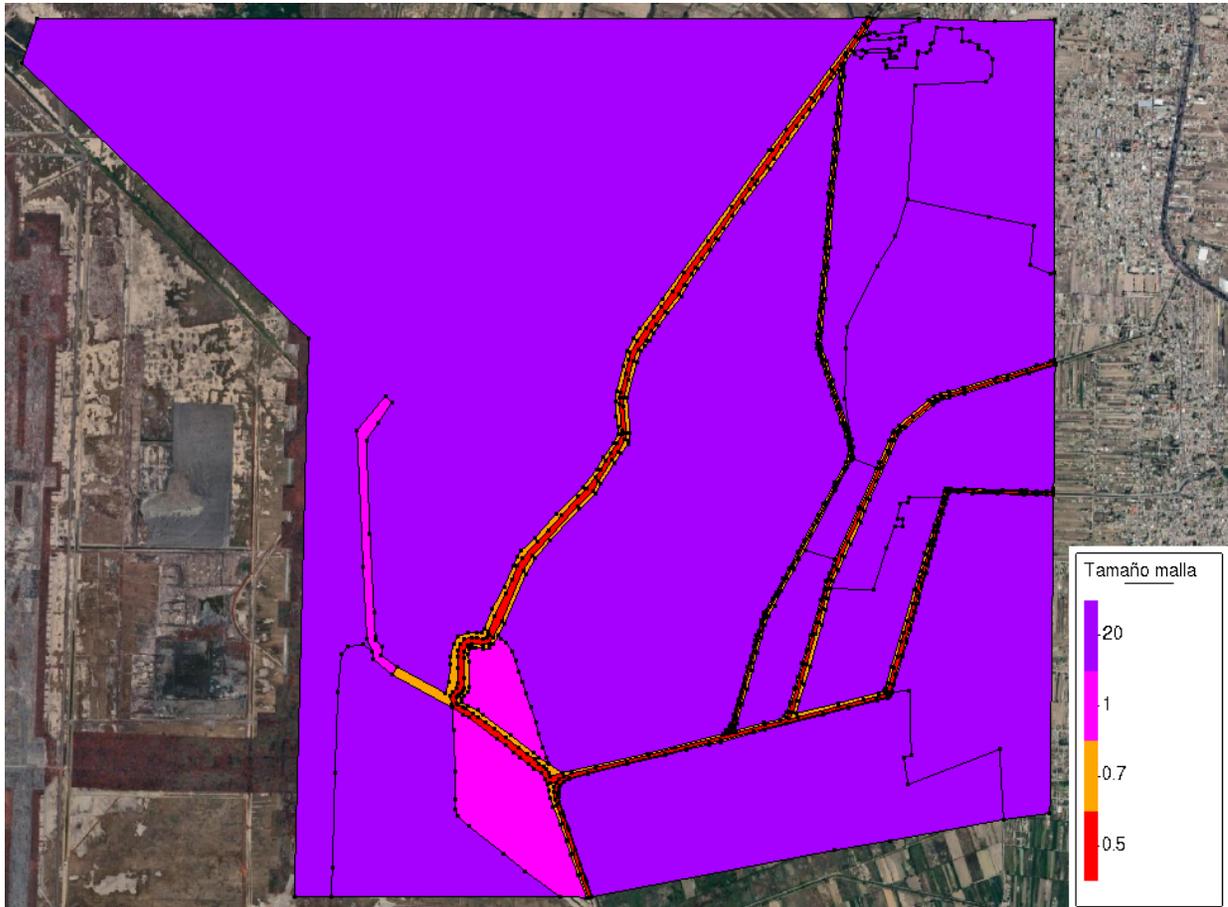


Figura 3-134 Tamaño de mallado para el análisis hidrodinámico

En la Figura 3-135 se presenta la malla, la cual está conformada por 10,498,804 elementos triangulares.

Por último, a la malla se le asignaron las elevaciones del modelo digital de elevaciones, con lo que se obtuvo una nueva superficie, la cual es la base de la modelación como se observa en la Figura 3-136.

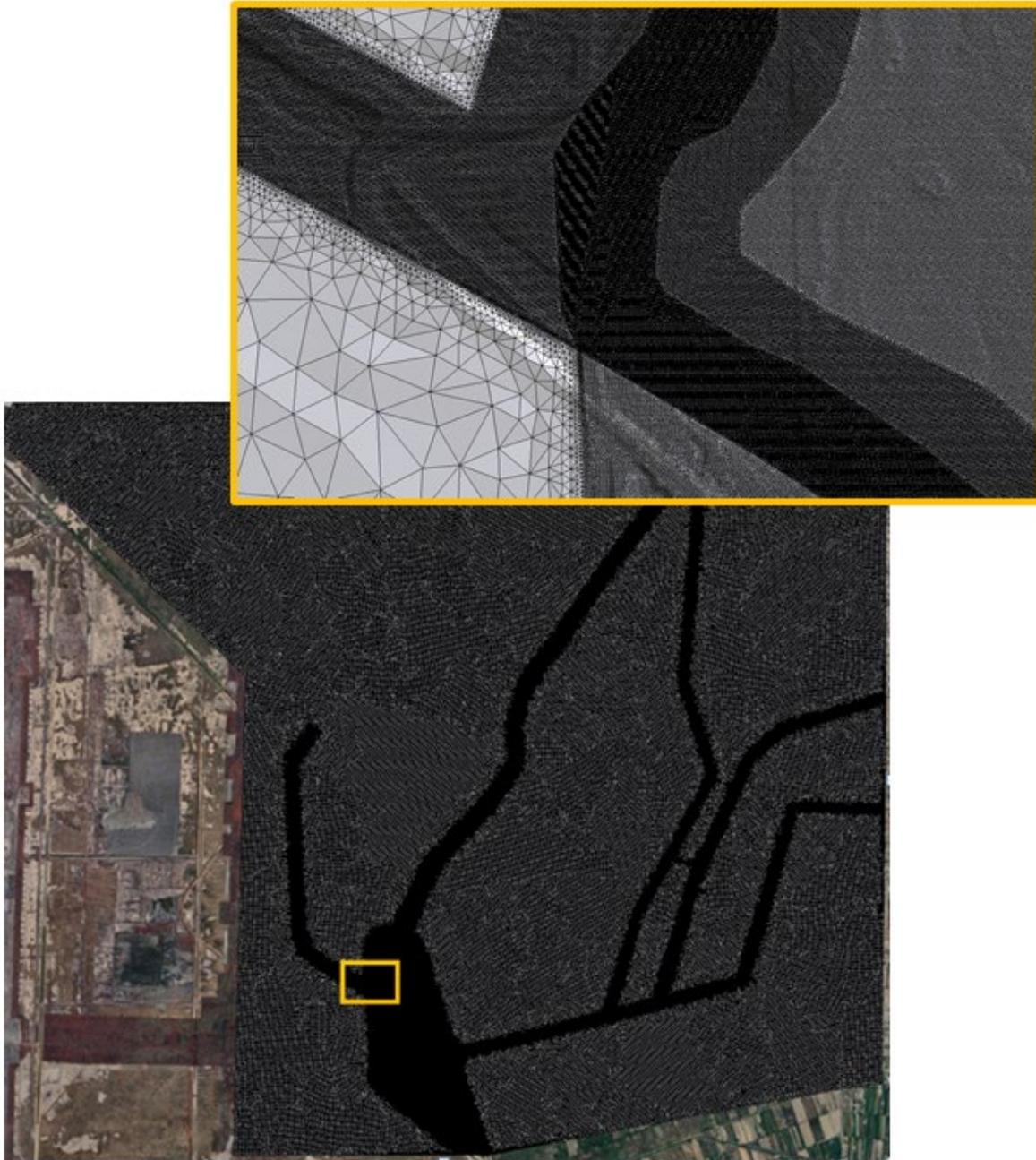


Figura 3-135 Malla discretizada para el análisis hidrodinámico

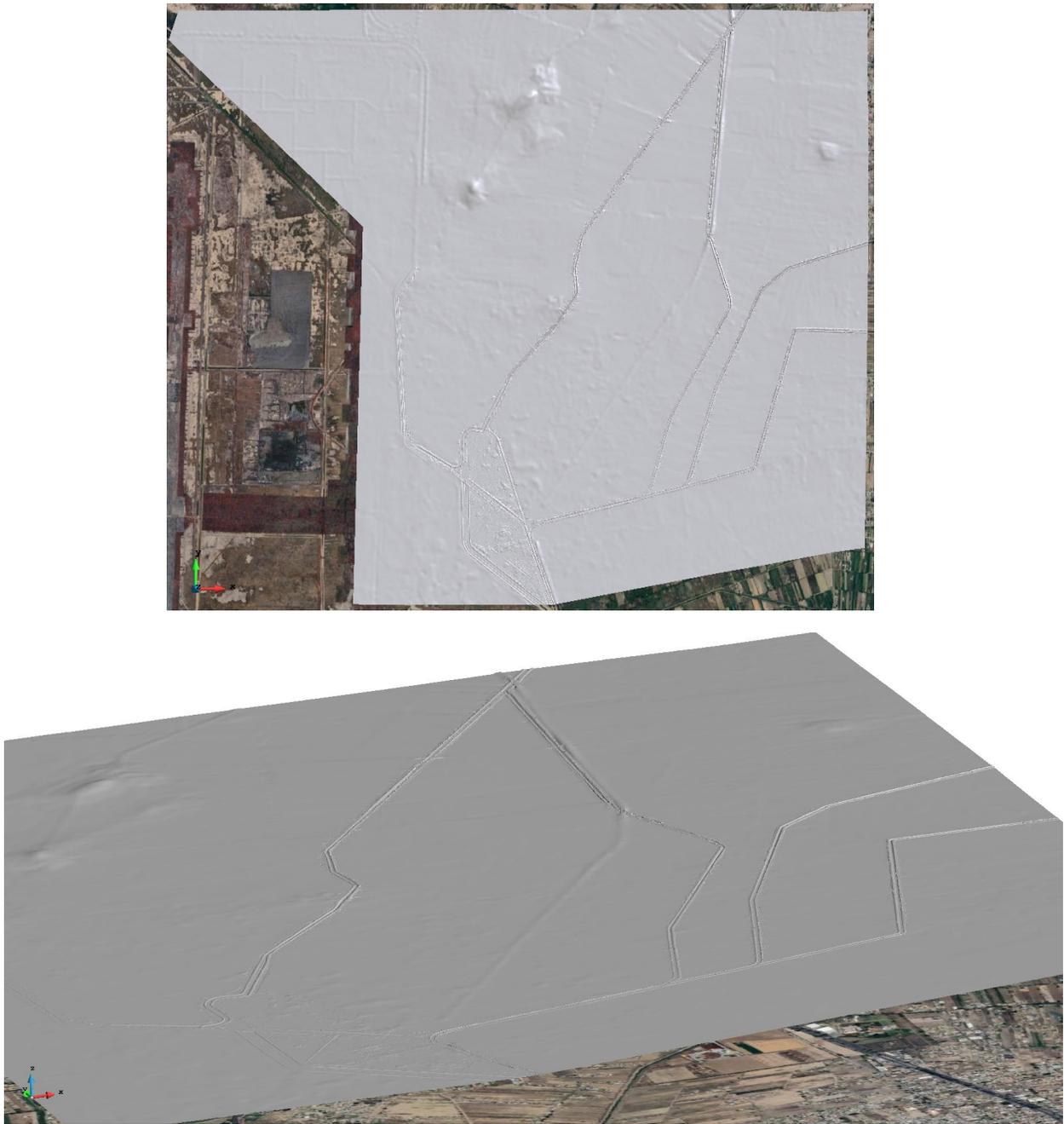


Figura 3-136 Superficie de modelación para el análisis hidrodinámico

Condiciones de frontera e iniciales

Para el funcionamiento del modelo numérico se requiere contar con condiciones de frontera, para este caso se consideraron dos condiciones: una a la entrada y otra a la salida.

A la entrada se consideraron los hidrogramas asociados a un periodo de retorno de 10 años, 20 años y 100 años, mientras que la condición de salida se consideró una descarga libre.

Cabe mencionar que los hidrogramas considerados fueron obtenidos de los resultados del estudio hidrológico realizado por especialistas del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y que se encuentra contenido en el informe "DIAGNÓSTICO Y ALTERNATIVAS PARA LA GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LAS SUBCUENCAS DE LOS NUEVE RÍOS VERTIENTES AL LAGO DE TEXCOCO".

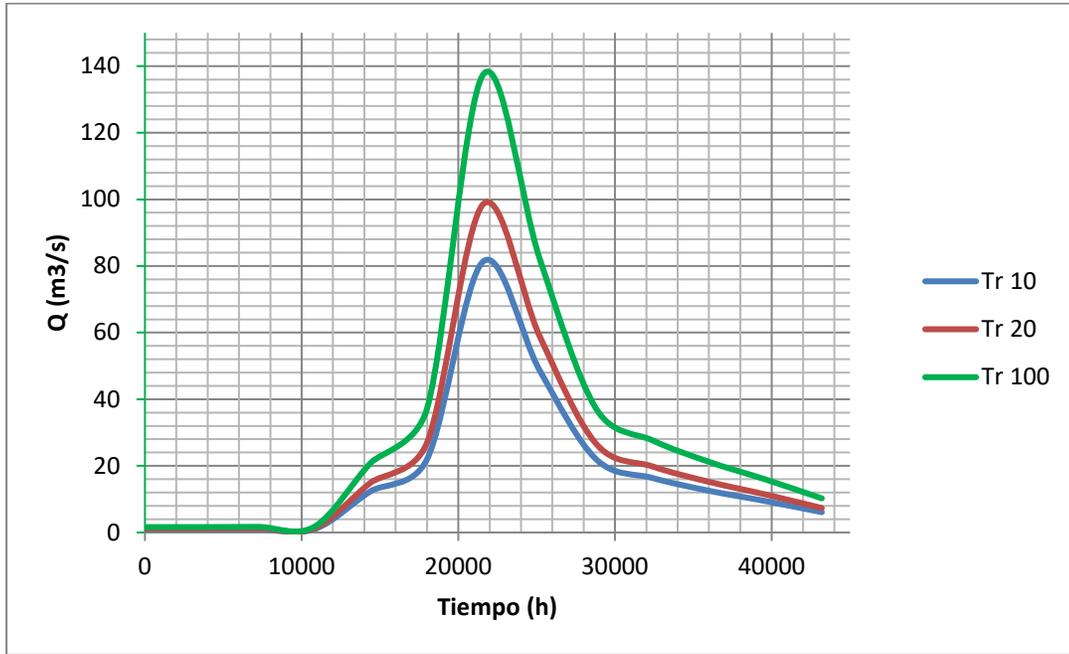


Figura 3-137. Hidrogramas Río Papalotla E.H. 26193

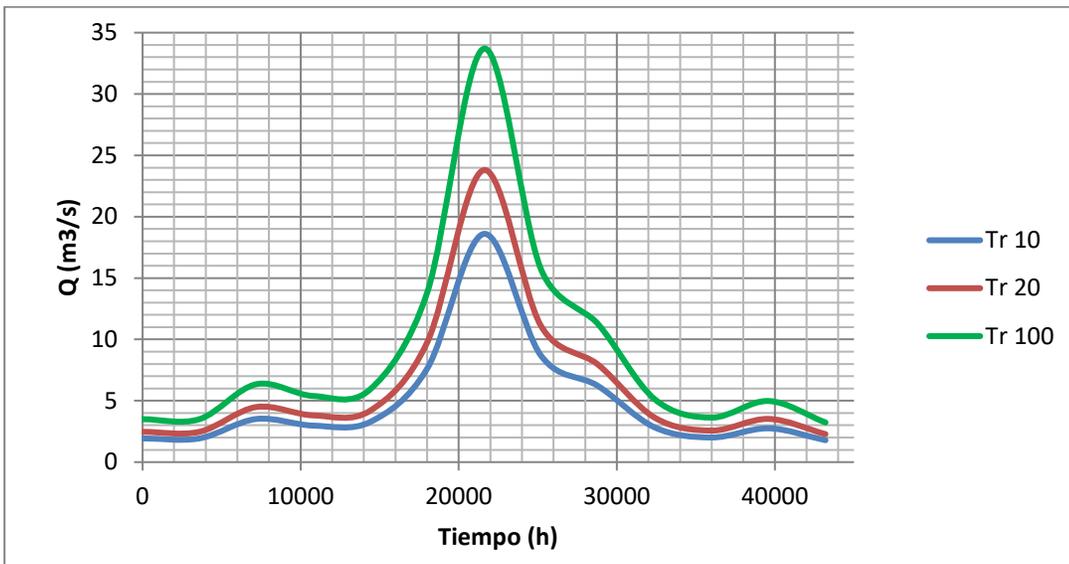


Figura 3-138. Hidrogramas Río Xalapango E.H. 26178

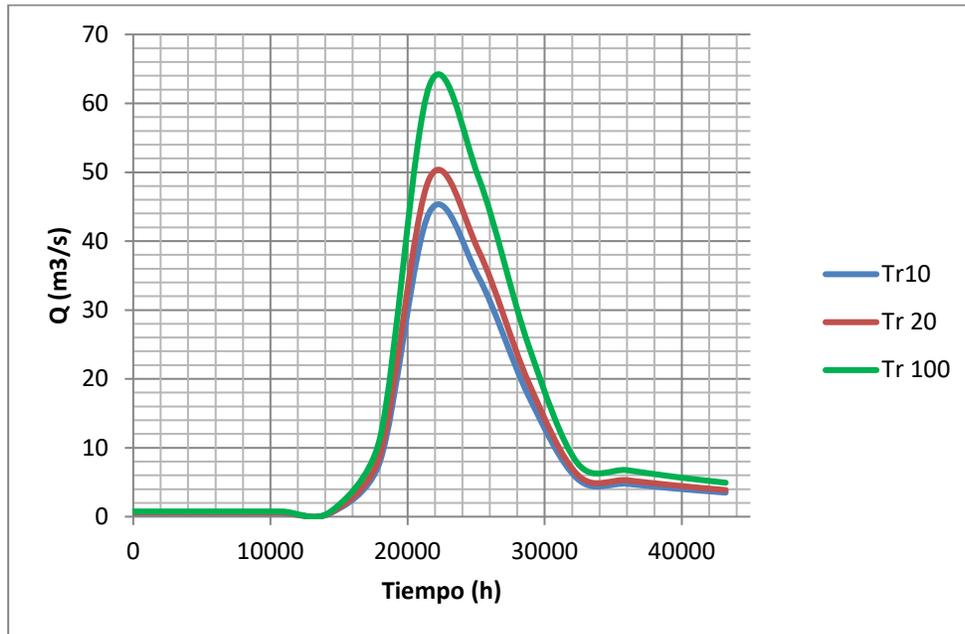
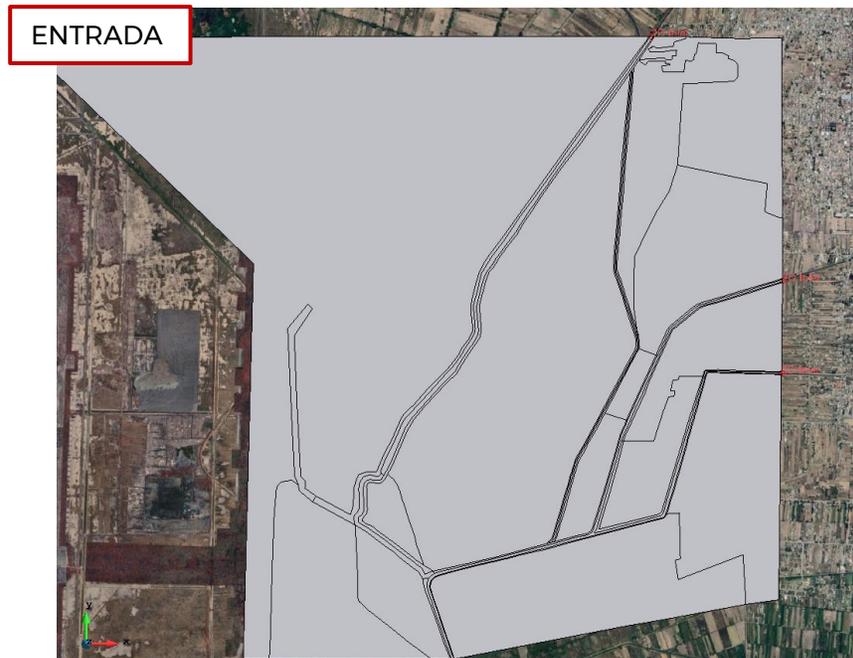


Figura 3-139. Hidrogramas Río Coxcacoco E.H. 26184



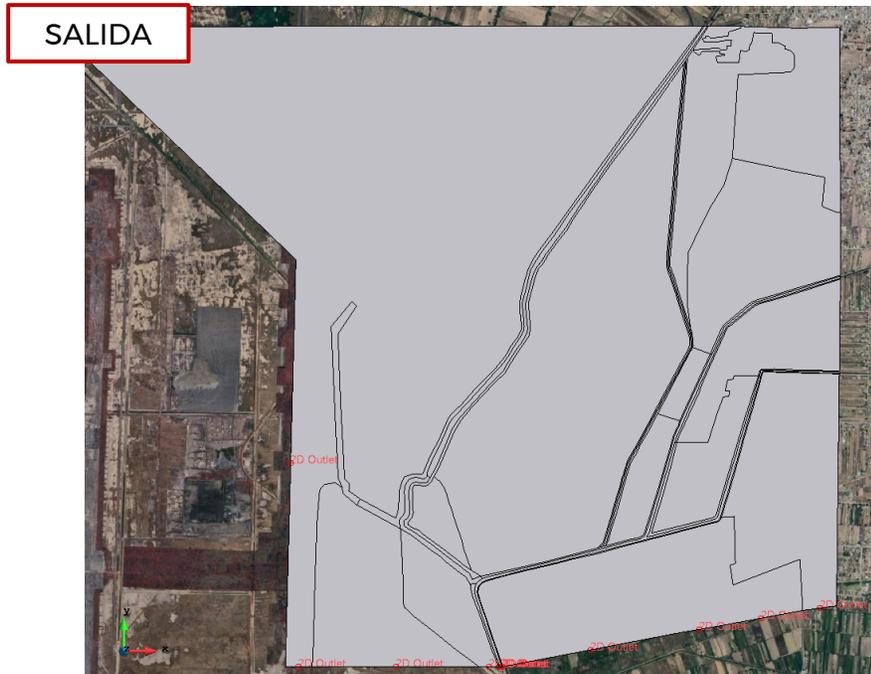


Figura 3-140 Asignación de las condiciones de frontera

Rugosidad

En *IBER* la rugosidad se establece a través del coeficiente de Manning, el cual se puede definir dependiendo del uso de suelo que se tenga en la zona en cuestión. Para la zona del embalse y el río la rugosidad se obtuvo a partir de imágenes satelitales para ver el tipo de suelo, en la región. En la Figura 3-141 se observa la distribución de las diferentes rugosidades.

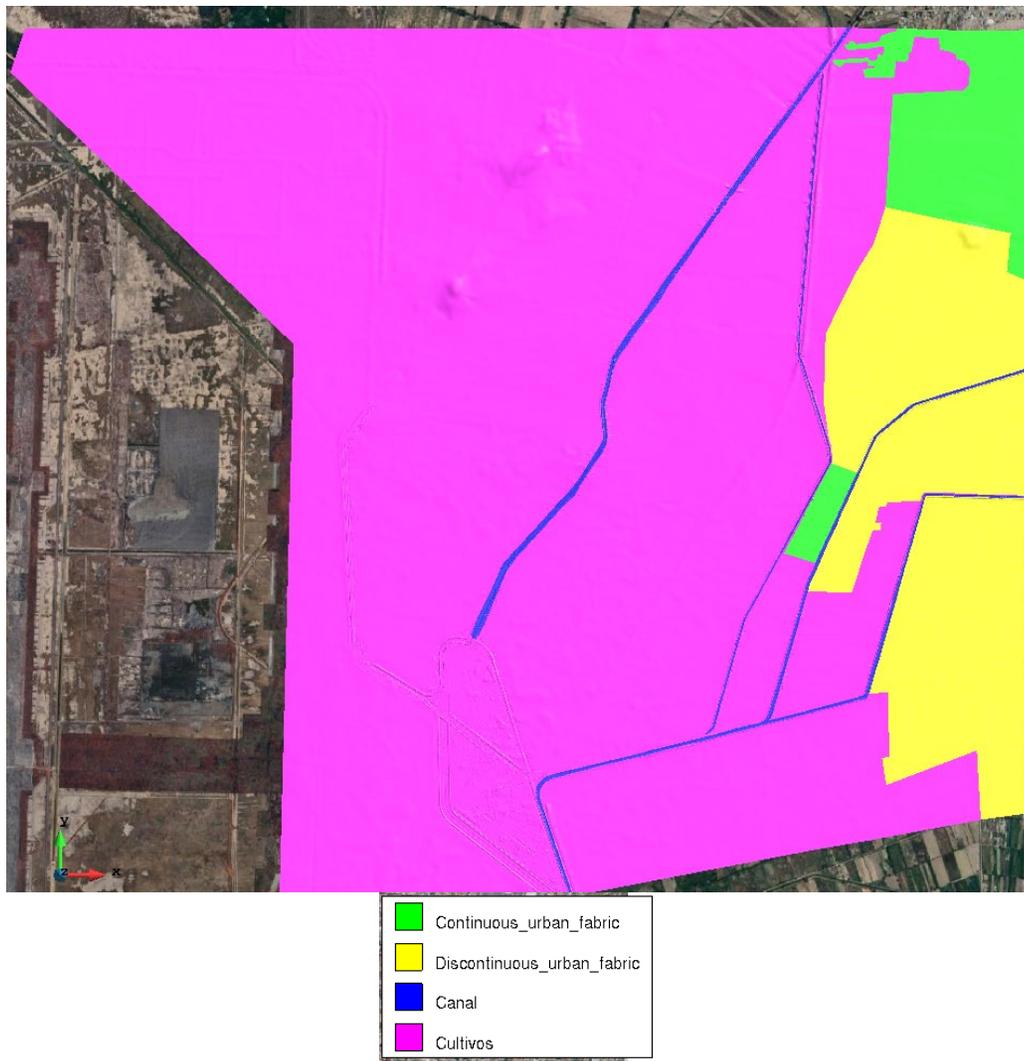


Figura 3-141. Asignación de la rugosidad.

RESULTADOS

Una vez fijados los datos anteriores, se realizó el cálculo considerando un tiempo de 12 horas. Durante esta etapa se observó, a través de la ventana de información de salida, la estabilidad del modelo para conocer el desempeño de los cálculos realizados por el programa.

A continuación, se muestran los resultados de los tirantes y niveles de superficie libres de agua obtenidos para los tres escenarios propuestos.

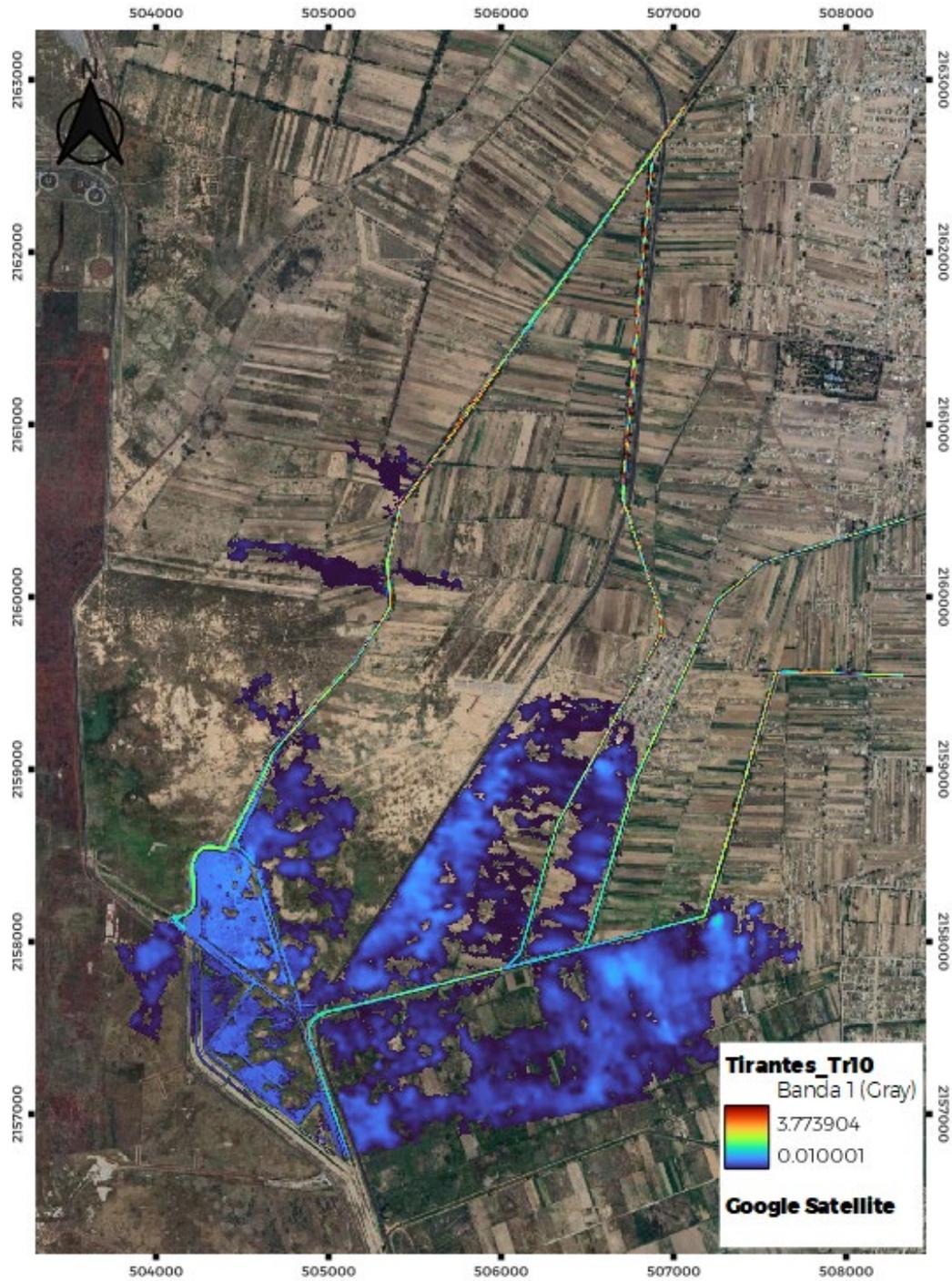


Figura 3-142. Tirantes para Tr 10 años

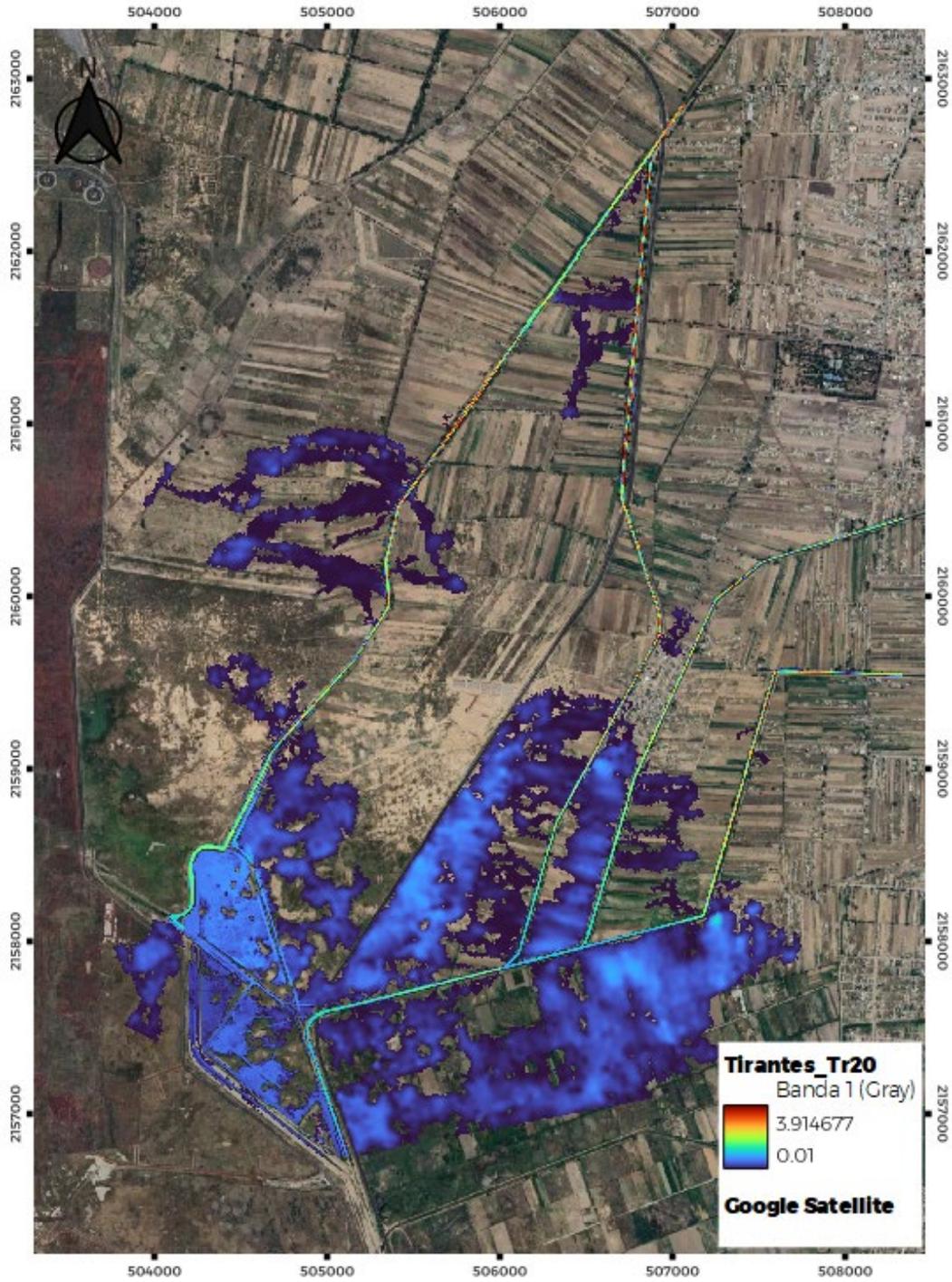


Figura 3-143. Tirantes para Tr 20 años.

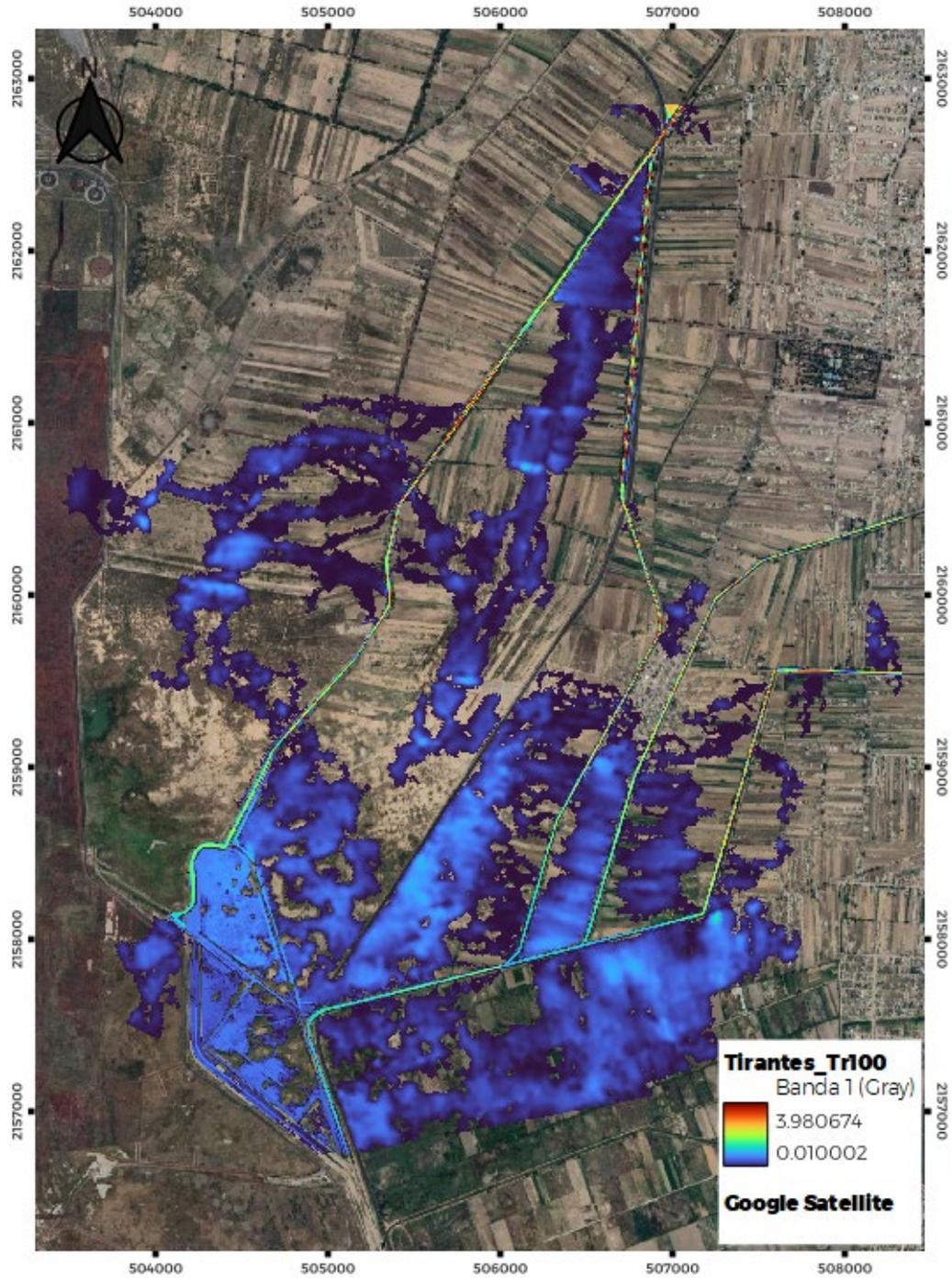


Figura 3-144. Tirantes para Tr 100 años.

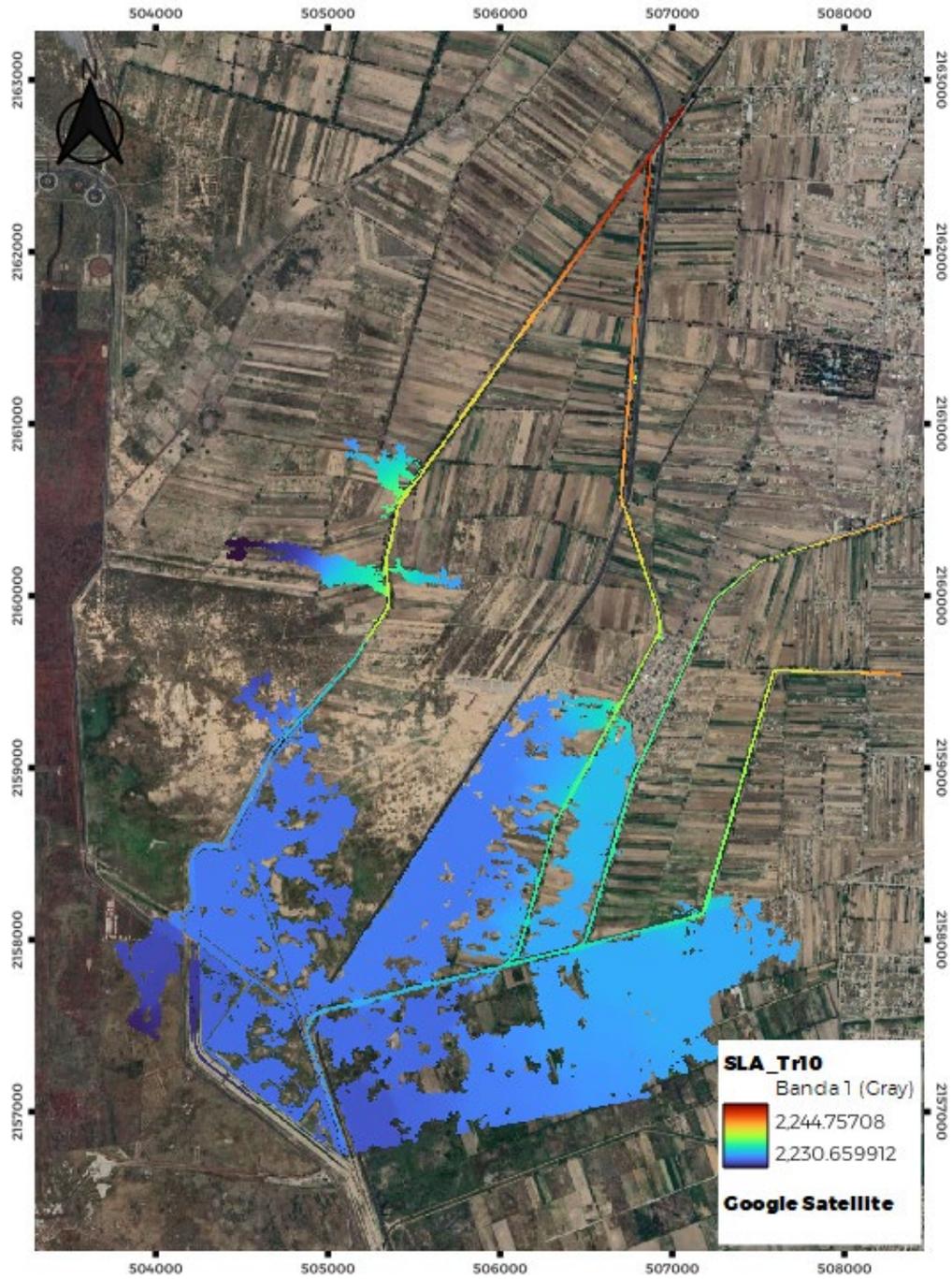


Figura 3-145. Superficie libre del agua para Tr 10 años.

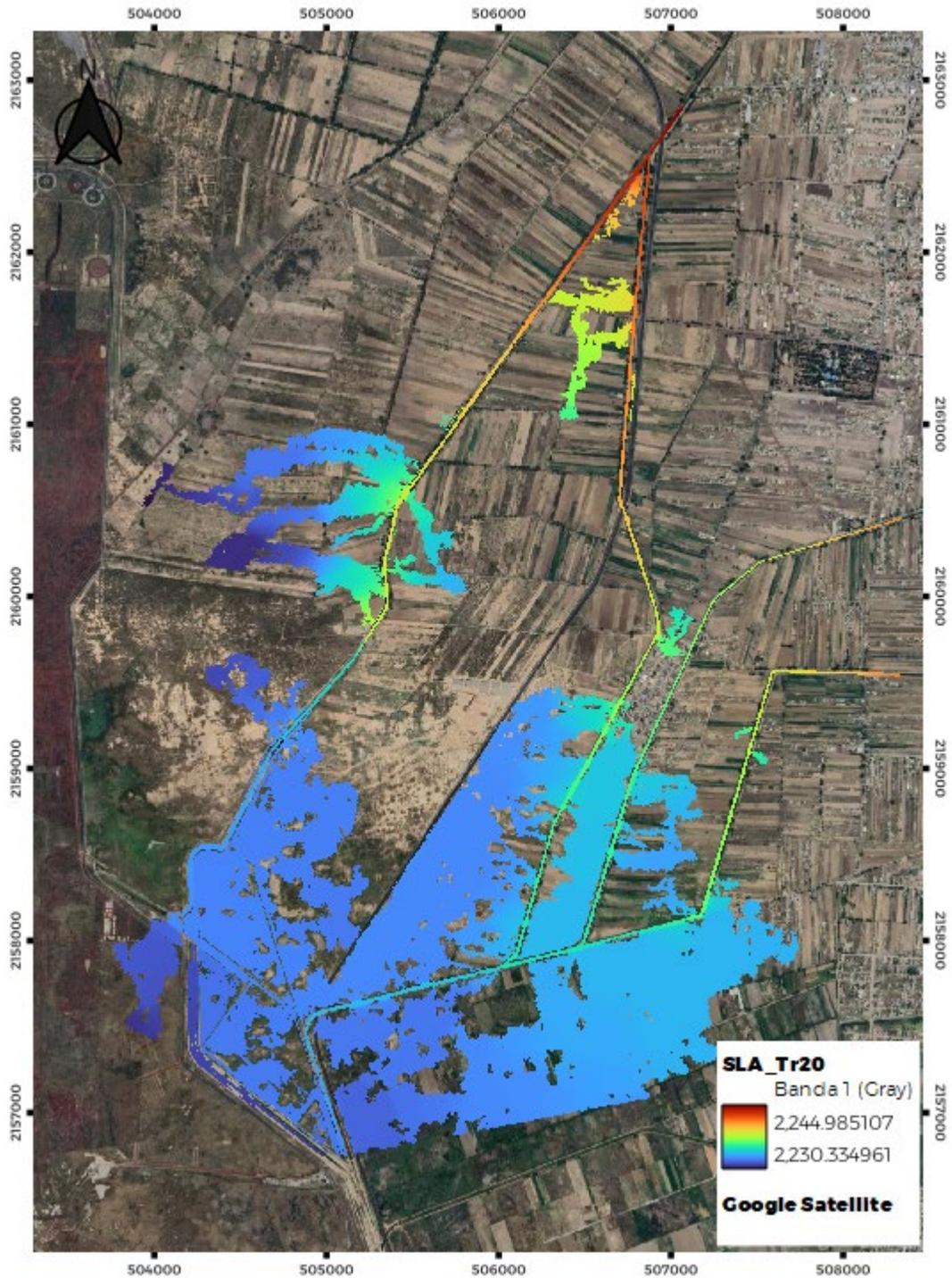


Figura 3-146. Superficie libre del agua para Tr 20 años.

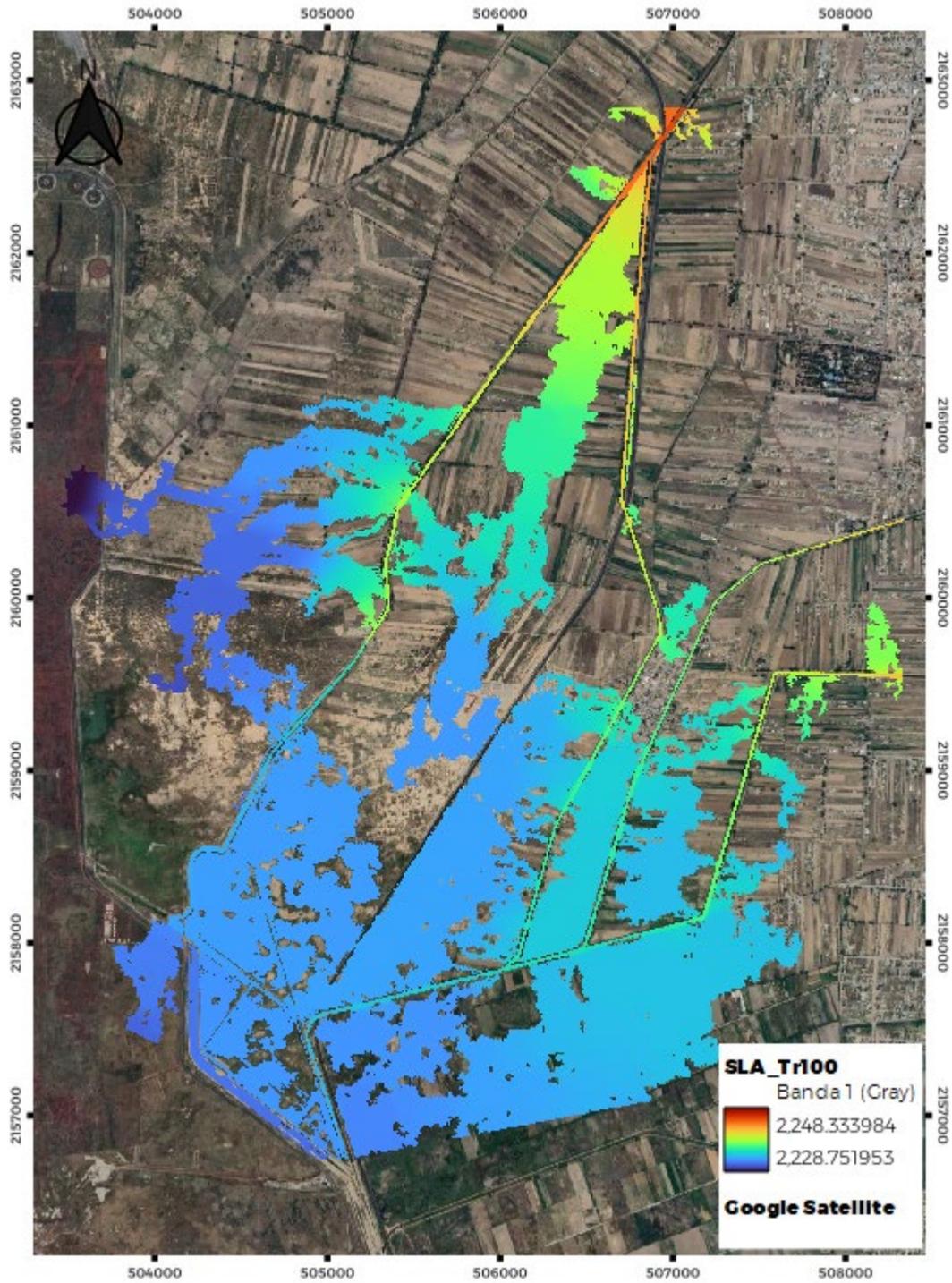


Figura 3-147. Superficie libre del agua para Tr 100 años.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- De acuerdo con el modelo LIDAR (contribución de la SEDENA) se obtuvieron los tirantes y la superficie libre del agua.
- En la zona próxima a la propuesta de bordos, para el periodo de retorno correspondiente 10 años los tirantes máximos son próximos a 0.85 m, y el nivel de superficie libre de agua alcanzado ronda en 2232.69 msnm.
- En la zona próxima a la propuesta de bordos, para el periodo de retorno correspondiente 20 años los tirantes máximos son próximos a 0.89 m, y el nivel de superficie libre de agua alcanzado ronda en 2232.73 msnm.
- En la zona próxima a la propuesta de bordos, para el periodo de retorno correspondiente 100 años los tirantes máximos son próximos a 0.96 m, y el nivel de superficie libre de agua alcanzado ronda en 2232.77 msnm.
- Se recomienda realizar un levantamiento de las estructuras hidráulicas existentes en la zona para concatenarla a la información del modelo LIDAR.

3.5 Acompañamiento social del proyecto.

En cumplimiento con los objetivos planteados de trabajo con la población, el IMTA realizó un taller sobre humedales para la comunidad de Atenco. El taller realizado el 19 de diciembre del 2023, asistieron 14 personas de la comunidad y 4 personas de la Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP). El taller inicia con un recorrido por el humedal Panoaya y termina en las instalaciones del IMTA. El objetivo de este taller fue presentar tipos y generalidades de funcionamiento del proceso de depuración por medio de humedales de flujo subsuperficial horizontal y vertical, así como la metodología adecuada para su conservación y mantenimiento.

El taller inició con el recorrido explicativo del humedal de tratamiento ubicado en la Exhacienda de Panoaya (EHP), en Amecameca, Estado de México. Este humedal simula un ecosistema natural, con el fin de depurar aguas sucias provenientes de industrias o residencias. Es decir, esta ecotecnía aprovecha recursos de la naturaleza para limpiar residuos del agua. Básicamente, consisten en un terreno sobre el cual se coloca un material impermeable para evitar que el líquido se filtre en el subsuelo. Sobre esta herramienta se pone una mezcla de sustrato formada por arena, grava, piedra y otros componentes. Finalmente, se utilizan plantas acuáticas que flotan sobre el agua.

Dicho humedal fue implementado a través de una colaboración con el IMTA en el año 2008. Originalmente el sistema de tratamiento de aguas residuales de la ex hacienda de Panoaya se trataba de una laguna facultativa que debería de satisfacer los requisitos de la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-003-SEMARNAT-1997 ya que el agua tratada se quería utilizar para riego de áreas verdes, específicamente Servicios al público con contacto directo. Por ello, debería satisfacer los requisitos establecidos en la Tabla 1 de la NOM-003 en los que se señala que los coliformes fecales deben ser menores que 240 NMP/100 ml, huevos de helminto ≤ 1 HH/l, grasas y aceites 15 mg/l, DBO5 20 mg/l y SST 20 mg/l. La laguna de estabilización no estaba entregando un efluente que cumpliera con todos estos límites, por ello fue que se propuso transformarla, o al menos una parte, en un sistema de tratamiento que incluyera un humedal de flujo subsuperficial y conservar una parte de la laguna original para el aprovechamiento del agua residual tratada en el riego de áreas verdes de la zona recreativa que es con contacto directo del público.

La delegación del Frente de los Pueblos en Defensa de la Tierra llegó puntualmente a la cita en la Exhacienda Panoaya, en donde fueron recibidos por personal del IMTA y personal de Relaciones Culturales y de Mantenimiento de la Exhacienda Panoaya (Figura 3-148).



Figura 3-148. Bienvenida a la delegación del Frente de los Pueblos en Defensa de la Tierra.

En el recorrido desde la entrada a la zona recreativa de la EHP hasta el sitio en que se encuentra el sistema de tratamiento humedal-laguna, pudieron observar el estado de conservación de las áreas verdes del lugar y que, en buena medida, es regado con el agua tratada en el sistema humedal-laguna.

Ya en el sitio, se les narró la historia de cómo fue construido el humedal y pudieron observar desde todos los ángulos como está conformado el sistema de tratamiento (Figura 3-149, Figura 3-150 y Figura 3-151), incluyendo la obra de captación de agua residual proveniente de la cabecera municipal de Amecameca, el cárcamo de bombeo, la laguna de sedimentación, el humedal de flujo subsuperficial y la laguna para el control de microorganismos.

La población tuvo la oportunidad de consultar temas con el personal encargado principalmente sobre la operación y mantenimiento del humedal y de plantear dudas con respecto al sistema. Esto es importante debido a que la población que asistió al taller se encuentra impulsando y trabajando en la realización y posterior mantenimiento de humedales de saneamiento en el sistema del Área protegida del Lago de Texcoco.





Figura 3-150. Laguna de sedimentación y humedal de flujo subsuperficial.



Figura 3-151. Vista del humedal subsuperficial y la laguna y laguna para el control de microorganismos.

Posteriormente la delegación se trasladó al IMTA en donde se les presentaron otros aspectos relacionados con los humedales. Principalmente el trabajo realizado en plantas de depuración de humedales. Trabajo que se realiza en el IMTA con vegetación endémica del Lago de Texcoco. Además de una capacitación de los elementos y generalidades de los humedales.

Posteriormente, se realizó la interacción con los participantes contestando preguntas relacionadas al tema y la respuesta a dudas de humedales artificiales de remediación.



Figura 3-152. Mesa de trabajo en el IMTA.



Figura 3-153. Trabajos con vegetación endémica del Lago de Texcoco en el IMTA.

4 Conclusiones

Se realizó la recopilación de información de la zona de las nueve subcuencas que vierten al lago de Texcoco, referente a la definición de las subcuencas que aportan agua al lago de Texcoco, se revisó la geomorfología, litología, usos de suelo y vegetación, tipo de suelo, relieve, clima y cuerpos de agua. Se generó un análisis hidrológico e hidráulico de información de precipitación e hidrometría en las cuencas.

Con respecto a la medición de caudal, de los 9 sitios aforados, el que presento un mayor caudal fue el Dren general del Valle 1 con un valor de 5.484 m³/s, seguido por el Dren Chimalhuacán 1b. 1a y 2b con valores de 1.259, 1.044 y 1.041 m³/s respectivamente. El río San Bernardino no se registró ninguna velocidad de flujo, y los Ríos Santa Mónica, Río Chapingo, Dren Chimalhuacán 2a y Río Coatepec, registraron los valores mínimos de caudal con 0.028, 0.258, 0.386 y 0.658 m³/s respectivamente, cabe mencionar que los aforos fueron realizados durante el mes de agosto que es considerado como un mes de época de lluvias.

Es muy importante definir el volumen o el caudal real que podría tomarse de las aguas superficiales para ser tratado, ya que el escurrimiento del Dren General forma parte del volumen comprometido para el riego en el Valle del Mezquital. Con base en los valores de las tres instalaciones de tratamiento de aguas residuales existentes en la zona, se podría tratar para el aprovechamiento en el ANP 1.6 m³/s, aunque en la actualidad se tratan para alimentar al lago Nabor Carillo 0.55 m³/s.

Respecto de la caracterización geofísica, hidrogeológica, e hidrogeoquímica y modelación del flujo subterráneo. En el presente informe se desarrolló una descripción de la fisiografía regional, características de los suelos, estratigrafía y permeabilidades, así como la evolución del piezométrica en el acuífero. La información anterior permitió desarrollar un modelo de perfil para la zona del humedal en Texcoco, de acuerdo con lo observado en los resultados de la simulación, después de 50 años de simulación se observa poco efecto del humedal sobre el acuífero, observándose únicamente un efecto local sobre la equipotencial con valor de 2227.875 m, que indica una pequeña sobre elevación de la carga hidráulica sobre la zona del humedal. No se observan efectos en los niveles aguas abajo o aguas arriba de la ubicación del humedal. Es importante considerar que el diseño del modelo de perfil se realizó para efectos interpretativos y no se considera un modelo calibrado, se requiere generar u obtener más información de la zona de estudio para poder realizar un modelo bidimensional calibrado que permita obtener mayor certidumbre en el comportamiento de la dinámica de flujo en la zona de estudio.

Con la información antes referida se llevó a cabo la valoración y propuesta de diseño de tres sistemas de humedales de tratamiento. 1) Sistema de humedal de tratamiento prototipo que depure el agua del Dren Chimalhuacán I para el riego de cultivos de nopales; 2) Sistema de humedal de tratamiento prototipo en el Parque Los Ahuehuetes; y 3) Sistema de humedal de tratamiento de Tocuila.

Por otra parte, se realizó la evaluación de algunas estructuras adicionales al Programa Hídrico Lago de Texcoco consistentes en el análisis hidráulico a la propuesta de bordos en la Ciénega de San Juan y la asesoría técnica para la conservación de la Laguna Xalapango.

Finalmente, se realizó capacitación con un taller de humedales a la población, esto con el fin de alinear el proyecto a los objetivos del Programa Hídrico del Lago de Texcoco. Principalmente en brindar bases para el mantenimiento y operación de este tipo de infraestructura verde.

5 Referencias

- APHA (American Public Health Association). (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (E. Rice, R. Baird, A. Eaton, y L. Clesceri (eds.); 22a ed.). Washington, D.C: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, pp.724
- Aragón Cortés S. F. 2006. Análisis, discusión, modificación y aprobación del Presupuesto de Egresos de la Federación para el Ejercicio Fiscal de 2006. *Comisión de presupuesto y cuenta pública de la cámara de Diputados*.
- Arce, J.L., Macías, R., García-Palomo, A., Capra, L., Macías, J.L., Layer, P., Rueda, H., 2008, Late Pleistocene flank collapse of Zempoala Volcano (Central Mexico) and the role of fault reactivation: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177, 944–958.
- Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS), 2016. En línea: <https://app.conagua.gob.mx/bandas/>
- Bear, Jacob. 1979. *Hydraulics of Groundwater*. ISBN 0-07-004170-9. McGraw-Hill Inc.
- Briebesca, C.L., 1960. Hidrología histórica del Valle de México. *Rev. Ing. Hidraul. Mex.*, XIV (3).
- Bouwer, H. 1986. Intake rate: Cylinder infiltrometer. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 1. Physical and mineralogical methods* (2nd ed., pp. 825– 844). Agronomy Monograph No. 9. ASA and SSSA.
- Cadoux, A., Missenard, Y., Martínez-Serrano, R., Guillou, H., 2011, Trenchward Plio-Quaternary volcanism migration in the Trans- Mexican Volcanic Belt: the case of the Sierra Nevada range: *Geological Magazine*, doi:10.1017/S0016756810000993.
- Carranza-Edwards A. 2018. Correlación litológica del subsuelo del lago de Texcoco. *Hidrobiológica* 28 (1): 93-101
- CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente). (2001). *Metodologías simplificadas para la evaluación de eutrofización en lagos cálidos tropicales*. (OPS/CEPIS/PUB/01). Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente; Organización Panamericana de la Salud (pp. 60). <https://iris.paho.org/handle/10665.2/55330>
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad) (2015). *Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves*. CONABIO. <http://avesmx.conabio.gob.mx/AICA.html>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2019). *Estadísticas del Agua en México*. CONAGUA. https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2019.pdf
- CONAGUA (2021a). *Calidad del agua en México. Sistema Nacional de Información del Agua*. CONAGUA. <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del->

agua

- CONAGUA (2021b). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*. CONAGUA. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/703303/Inventario_2020.pdf
- CONAGUA (2021c). *Ley Federal de Derechos. Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales* 2021. http://www.indautor.gob.mx/documentos_normas/leyfederal.pdf
- CONAGUA (2018). En línea: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/101451/PRESENTACION_CONAGUA_NAICM_11sep14.pdf.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2021. Estudio Previo Justificativo para la declaratoria del Área de Protección de Recursos Naturales Lago de Texcoco. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 386 páginas y cinco Anexos
- Cruickshank, G. (1995). *Proyecto Lago de Texcoco. Rescate hidroecológico*. Ciudad de México: Cruickshank, pp. 111.
- Cruz Vivar, N. V. (2023). *Evaluación de la problemática en el lago Nabor Carrillo y dimensionamiento de las estrategias para su rehabilitación* [Tesis de maestría en proceso, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua].
- DETENAL, Carta topográfica, 1976.
- Edmunds, W. M., Carrillo-Rivera, J.J., & Cardona, A., 2002. Geochemical evolution of groundwater beneath Mexico City. *Journal of Hydrology*. 258, 1-24.
- Enciso-de la Vega, S., 1992, Propuesta de nomenclatura estratigráfica para la cuenca de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, 10, 26-36.
- Fries, C., Jr., 1960. Geología del Estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México, UNAM. Inst. Geol., Bol. 60, 236.
- García Enriqueta 1964 Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía de la UNAM
- García-Palomo, A., Zamorano, J.J., López-Miguel, C., Galván-García, A., Carlos-Valerio, V., Ortega, R., Macías, J.L., 2002. El arreglo morfoestructural de la Sierra de las Cruces, México central: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25, 158-178.
- Gibbs, R. J. (1970). Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, Vol. 170, No. 3962, pp. 1088-1090.
- Herrera I., Alberro J., León J. y Chen B., 1974. Análisis de asentamientos para la construcción de los lagos del Plan de Texcoco. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

- INEGI. (1992). Carta Uso de suelo y vegetación Serie I. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/>
- INEGI, (2006). Cuaderno estadístico de la zona metropolitana del Valle de México, México, D.F.
- INEGI. (2007). Carta Edafológica Serie II. <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>.
- INEGI. (2010). Modelo de terreno LIDAR. Resolución horizontal 5 x 5.
- INEGI. (2010a). SIATL. Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas. Obtenido de http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/?s=geo&c=1693&e=04
- Instituto de Ingeniería de la UNAM. 2014. Revisión y evaluación en geotecnia y estructuras para resolver la problemática del transporte aéreo en el centro del país.
- Juárez Velásquez Luis David, 2018. Comportamiento del suelo arcilloso del Ex Lago de Texcoco al aplicarle un mejoramiento con el método de consolidación acelerada por vacío con membrana en un panel de prueba para el NAIM. Tesis doctoral, Facultad de Ingeniería de la UNAM.
- López-Hernández, A., 2009, Evolución volcánica del Complejo Tulancingo-Acocolco y su sistema hidrotermal, estados de Hidalgo y Puebla, México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de doctorado, 170 p.
- López Acosta Norma Patricia, Alejandra L. Espinosa Santiago y Daniel Zuluaga Betancur, 2016. Permeabilidad del subsuelo en la zona del ex Lago de Texcoco. XXVIII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica. Mérida Yucatán.
- MARM. (2011). Guía Metodológica para el Desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. España
- Marsal, R. J. y Mazari, M. (1959). "El subsuelo de la ciudad de México", Facultad de Ingeniería; Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- Marsal, R. J. (1969). Desarrollo de un lago por la consolidación de arcillas blandas, inducida con bombeo. El hundimiento de la Ciudad de México y Proyecto Texcoco, Volumen Nabor Carrillo: México, D.F., Secretaría de Hacienda y Crédito Público, pp. 229-266.
- Marsal, R. J. y Graue, R. (1969). El subsuelo del lago de Texcoco, en El hundimiento de la Ciudad de México y Proyecto Texcoco, Volumen Nabor Carrillo: México, D.F., Secretaría de Hacienda y Crédito Público, pp. 167-202.
- Maza A. J. A., Franco V. (1997). Obras de Protección para Control de Inundaciones. Instituto de Ingeniería. UNAM,
- Mejia, V., Böhnell, H., Opdyke, N.D., Ortega-Rivera, M.A., Lee, J.K.W., Aranda-Gómez, J.J., 2005, Paleosecular variation and time-averaged field recorded in late Pliocene-Holocene lava flows from Mexico: Geochemistry Geophysics Geosystems, 6, 1-19.

- Merck. (2023). *Kits de ensayo y métodos fotométricos*. Merck KGaA. https://www.merckmillipore.com/MX/es/products/analytcs-sample-prep/test-kits-and-photometric-methods/gSb.qB.srcAAAE_Of53.Lxi,nav
- Meriggi, L., Macías, J.L., Tommasini, S., Capra, L., Conticelli, S., 2008, Heterogeneous magmas of the Quaternary Sierra Chichinautzin volcanic field (central Mexico): the role of an amphibole-bearing mantle and magmatic evolution processes: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25, 197-216.
- OCAVM (Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México). (2022). *Elevaciones del espejo de agua en el Lago Nabor Carrillo (del 01 de enero al 15 de diciembre de 2022)*. Dirección de Infraestructura Hidroagrícola, pp. 7
- Osete, M.L., Ruíz-Martínez, V.C., Caballero, M.C., Galindo, C., Urrutia- Fucugauchi, J., Tarling, H.D., 2000, Southward migration of continental volcanic activity in the Sierra de Las Cruces, Mexico: Paleomagnetic and radiometric evidence: *Tectonophysics*, 318, 201-215.
- Ortega-Guerrero, A., Cherry, J. A., & Aravena, R. (1997). Origin of pore water and salinity in the lacustrine aquitard overlying the regional aquifer of Mexico City. *Journal of Hydrology*, 197(1-4), 47-69. doi:10.1016/s0022-1694(96)03280-5
- Parra Piedrahita Natalia del Pilar, 2012. Aspectos geotécnicos para evaluar el comportamiento de la IV etapa del relleno sanitario bordo poniente. *Tesis doctoral, Instituto de Ingeniería de la UNAM*.
- Peñafiel, A., 1884. *Memorias Sobre las Aguas de la Capital de México. Secr. Fome. Mex., D.F., 209 pp.*
- Pineda pastrana oliva 2011, análisis de cambio de uso de suelo mediante percepción remota en el municipio de valle de Santiago tesis de maestría. Centro de investigación en geografía y geomática ing. Jorge I. Tamayo, A.C. CENTROGEO
- Rodríguez Barrón Martha Elena, 2010. Caracterización geoestadística del subsuelo del Ex Lago de Texcoco. *Tesis de Maestría. ESIA. IPN*.
- Rotz, R.R. and Milewski, A.M. 2019 Physical modeling of inland freshwater lens formation and evolution in drylands. *Hydrogeology Journal (2019)27:1597-1610*. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-01940-1>.
- Rudolph D., Herrera I. y Yates R., 1989. Groundwater flow and solute transport in the industrial well fields of the Texcoco saline aquifer system near Mexico City. *Geofísica Internacional, Universidad Nacional Autónoma de México*, Vol. 28-2, pp. 363-408.
- Salas S. M. A. (1999). *Obras de Protección Contra Inundaciones*. CENAPRED, México.
- Schlaepfer, J. C., 1968. Resumen de la Geología de la Hoja México, Distrito Federal y Estados de México y Morelos, Hoja México 14 Q-h (5), Ese, 1: 100 000. *Inst. Geol., UNAM, México, D. F.*

- Secretaría de Economía. (2015). *Análisis de agua - Criterios generales para el control de la calidad de los resultados analíticos*. (NMX-AA-115-SCFI-2015). Diario Oficial de la Federación (p. 90). <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166150/nmx-aa-115-scfi-2015.pdf>
- SEDUE (Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología). (1989). *Acuerdo por el que se establecen los criterios ecológicos de calidad del agua*. (CE-CCA-001/89). Diario Oficial de la Federación (pp. 18) https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4837548&fecha=13/12/1989#gsc.tab=0
- SEGOB (Secretaría de Gobernación) (2022). *Decreto por el que se declara área natural protegida con el carácter de Área de Protección de Recursos Naturales, la zona conocida como Lago de Texcoco, en los municipios de Texcoco, Atenco, Chimalhuacán, Ecatepec de Morelos y Nezahualcóyotl en el Estado*. Diario Oficial de la Federación (pp. 11). https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5646249&fecha=22/03/2022#gsc.tab=0
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2001). *Norma Oficial Mexicana, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis*. (NOM-021-RECNAT-2000). Diario Oficial de la Federación (pp. 118). https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO_2280.pdf
- SEMARNAT (2022). *Norma Oficial Mexicana, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación*. (NOM-001-SEMARNAT-2021). Diario Oficial de la Nación (pp. 17)
- Siebe, C., Rodríguez-Lara, V., Schaaf, P., Abrams, M., 2004, Geochemistry, Sr-Nd isotope composition, and tectonic setting of Holocene Pelado, Guespalapa, and Chichinautzin scoria cones, south of Mexico City: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 130, 197-226.
- SISR (Servicio de Información sobre Sitios Ramsar). (2022). *Ficha informativa Ramsar para el sitio núm. 2469, Lago de Texcoco, México*. Ramsar. <https://rsis.ramsar.org/ris/1467%0Ahttps://rsis.ramsar.org/ris/2332>
- SMIG (Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica) (2021). Formación del Lago Nabor Carrillo, Texcoco. Aspectos ambientales en los métodos de diseño mecanicista-empírico para pavimentos. *Geotecnia*, 260, 13-22. <https://www.smig.org.mx/archivos/revista-trimestral-smig/revista-geotecnia-smig-numero-260.pdf>
- SMN (2023). *Información climatológica: Normales climatológicas por estado*. SMN. <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=mex>

- Tarín Vázquez, M., & Velázquez L., A., 1986. Lavado de suelos en el ex-Lago de Texcoco. *Ingeniería Hidráulica en México, mayo-agosto*.
- Tamez, E., Santoyo, E., Mooser, F. y Gutiérrez, C., 1987. Manual de Diseño Geotécnico, *COVITUR, México D F, 1:9-12*.
- Van Afferden, M., Hansen, A. M., Kaiser, C., y Chapelain, N. (2006). Laboratory test system to measure microbial respiration rate. *International Journal of Environment and Pollution, 26(1-3), 220-233*
- Velázquez, L. O. P., et al., 1981. Estudio agrológico detallado del ex-Lago de Texcoco, Estado de México. *SARH, CLT, México*.
- Velázquez L. A. y Serrano P.R., 1982. Estudios freaticométricos en el ex-Lago de Texcoco. Estado de México. *SARH, CLT*.
- Velázquez L. A. y Serrano P. R. 1984. Estudios de conductividad hidráulica y velocidad de infiltración del ex-Lago de Texcoco. Estado de México, *SARH, CLT*.
- Vidal Abarca, C. e. (1990). Sectorización ecológica de cuencas fluviales: Aplicación a la cuenca del río Segura (SE España) *Anales Geografía. 10 149-182*. En C. Vidal Abarca, M. L. Montes, L. Suarez, & R. Díaz. Universidad Computense. Obtenido de <https://revistas.ucm.es/index.php/AGUC/article/download/AGUC9090110149A/31821>
- Zacaula, S. M. A. (1977). Estudio geohidrológico de los acuíferos alcalinos del Lago de Texcoco, Estado de México, *Tesis de Licenciatura, Instituto Politécnico Nacional, México, D. F.*

Anexo 1. Trabajo de campo caracterización del agua subterránea

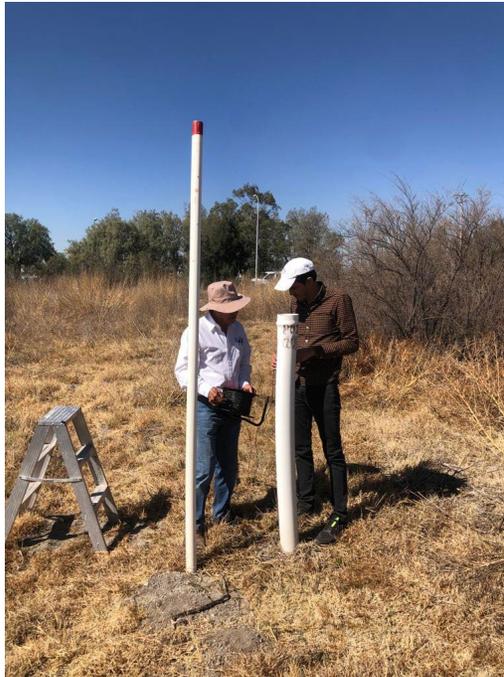
Piezómetro 103



Toma de muestra



Toma de muestra



Piezometría



Medición de parámetros de campo

Piezómetro 33



Toma de muestra



Toma de muestra



Muestras



Baliza

Piezómetro 17



Piezómetro



Nivelación del piezómetro

Río de la compañía



Sitio de toma de muestra

Multipiezómetro



Toma de muestra



Medición de conductividad eléctrica

Piezómetro 29



Toma de muestra

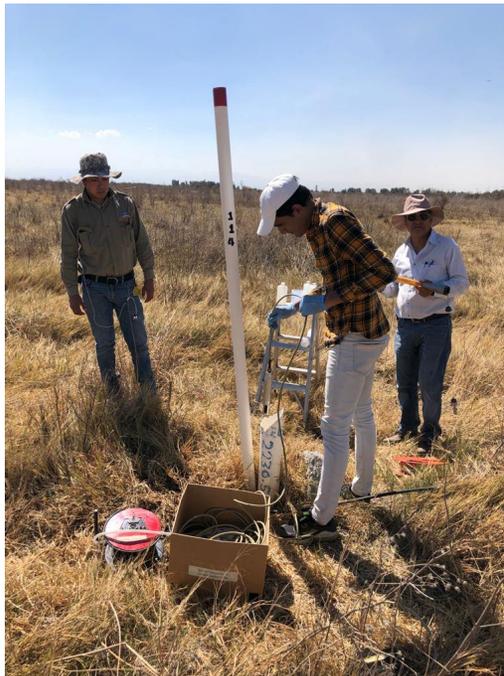


Piezometría

Piezómetro 114



Toma de muestra



Medición de la conductividad eléctrica

Pozo 21 CNA



Anexo 2. Resultados de los análisis químicos de laboratorio del agua subterránea.

 MEDIO AMBIENTE <small>SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y PROTECCIÓN AMBIENTAL</small>		 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>		Paseo Cuauhnáhuac 8532 Col. Progreso Jiutepec Mor. CP. 62550 Tel. (777) 3 29 36 96, 3 29 36 64	
LABORATORIO DE CALIDAD DEL AGUA				037/2023	
RESULTADOS					
AREA: QUÍMICA ANALÍTICA, FÍSICOQUÍMICOS					
CLIENTE Y/O PROYECTO: SUBCOORDINACIÓN DE GESTIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS					
DOMICILIO: PASEO CUAUHNÁHUAC 8532, COL. PROGRESO, JIUTEPEC, MOR., C.P. 62550					
No. de CONTROL: 037/2023		TIPO DE MUESTRA: AGUA SUBTERRÁNEA / AGUAS NEGRAS		FECHA DE MUESTREO: 2023/02/15-17	
				FECHA DE RECEPCIÓN: 2023/02/21	
PARÁMETROS					
No	DESCRIPCIÓN	BICARBONATOS	CLORUROS TOTALES	IÓN SULFATO	
		mg/L	mg/L	mg/L	
1	FECHA DE MUESTREO: 2023/02/15 PIEZOMETRO 103	5271	7152	647	
2	PIEZOMETRO 33	8228	11898	466	
3	PIEZOMETRO 17	9000	11213	261	
4	DREN GENERAL	819	153	76,5	
5	FECHA DE MUESTREO: 2023/02/16 MULTIPIEZOMETRO	10542	13140	496	
6	PIEZOMETRO 29	12771	10968	843	
7	PIEZOMETRO 14	2571	3879	1668	
8	FECHA DE MUESTREO: 2023/02/17 POZO 21 CONAGUA	704	943	6,91	
FECHA DE ANÁLISIS		2023/02/22		2023/03/15	
MÉTODO DE ANÁLISIS		*CAQAF6-08	*NMX-AA-073-SCFI-2001	*NMX-AA-074-SCFI-2014	
FECHA DE EMISIÓN DE RESULTADOS		2023/03/28			
1) Método acreditado por la entidad mexicana de acreditación, a.c., Número de acreditación. AG-177-032/09.					
2) Método acreditado por la entidad mexicana de acreditación, a.c., Número de acreditación. AG-177-032/09. El tipo de muestra se encuentra fuera del alcance de la acreditación.					
3) Número de aprobación CONAGUA. CNA-GCA-2425					
4) Prueba no acreditada por la ema u otra organización o institución, sin embargo, se realiza de conformidad con nuestro Sistema de Gestión de Calidad, basado en la NMX-EC-17025-IMNC-2018					
OBSERVACIONES:					
LAS MUESTRAS 1 A LA 8 LLEGARON FUERA DEL TIEMPO PERMITIDO PARA EL ANÁLISIS DE BICARBONATOS; PRESENTANDO ASÍ DESVIACIÓN A LAS ESPECIFICACIONES REQUERIDAS PARA SU ANÁLISIS. ESTOS SE REALIZARON DE ACUERDO CON LO SOLICITADO POR EL CLIENTE.					
ESTE REPORTE NO PODRÁ SER ALTERADO NI REPRODUCIDO PARCIAL O TOTALMENTE SIN LA AUTORIZACIÓN POR ESCRITO DEL LABORATORIO. LOS RESULTADOS EMITIDOS SÓLO AMPARAN LAS MUESTRAS RECIBIDAS EN ESTE LABORATORIO					
 M. en I. MINERVA SANCHEZ GUZMÁN RESPONSABLE DEL ÁREA					
Edición:	A	M	D	Señalado a:	A
	2023	03	15		2022
					M
					D
					17
					Hoja 1 de 1

FMLC08-B

				Paseo Cuauhnáhuac 8532 Col. Progreso Jiutepec Mor. CP. 62550 Tel. (777) 3 29 36 96, 3 29 36 64						
LABORATORIO DE CALIDAD DEL AGUA				037/2023						
RESULTADOS										
ÁREA: ABSORCIÓN ATÓMICA										
CLIENTE Y/O PROYECTO: SUBCOORDINACIÓN DE GESTIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS										
DOMICILIO: PASEO CUAUHNÁHUAC 8532, COL. PROGRESO, JIUTEPEC, MOR. C.P. 62550										
No. de CONTROL: 037/2023		TIPO DE MUESTRA: AGUA SUBTERRÁNEA / AGUAS NEGRAS		FECHA DE MUESTREO: 2023/02/15-17 FECHA DE RECEPCIÓN: 2023/02/21						
		PARÁMETROS								
No	DESCRIPCIÓN	CALCIO	MAGNESIO	POTASIO	SODIO					
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L					
	FECHA DE MUESTREO: 2023/02/15									
1	PIEZOMETRO 103	3,81	3,77	1135,20	8736,20					
2	PIEZOMETRO 33	2,53	0,64	1801,80	14135,00					
3	PIEZOMETRO 17	28,93	61,60	1573,00	13483,25					
4	DREN GENERAL	35,53	30,25	40,37	229,24					
	FECHA DE MUESTREO: 2023/02/16									
5	MULTIPIEZOMETRO	8,15	18,37	1716,00	14291,75					
6	PIEZOMETRO 29	5,91	12,21	1742,00	13535,50					
7	PIEZOMETRO 14	9,31	22,88	727,10	5077,60					
	FECHA DE MUESTREO: 2023/02/17									
8	POZO 21 CONAGUA	221,93	113,85	37,29	336,49					
FECHA DE ANÁLISIS		2023/03/31		2023/03/07	2023/03/23					
MÉTODO DE ANÁLISIS		1.ª NMX-AA-051-SCFI-2016								
FECHA DE EMISIÓN DE RESULTADOS		2023/03/31								
1) Método acreditado por la entidad mexicana de acreditación, a.c., Número de acreditación. AG-177-032/09.										
2) Método acreditado por la entidad mexicana de acreditación, a.c., Número de acreditación. AG-177-032/09. El tipo de muestra se encuentra fuera del alcance de la acreditación.										
3) Número de aprobación CONAGUA. CNA-GCA-2425										
4) Prueba no acreditada por la em a otra organización o institución, sin embargo, se realiza de conformidad con nuestro Sistema de Gestión de Calidad, basado en la NMX-EC-17025-IMNC-2018										
OBSERVACIONES: NINGUNA										
ESTE REPORTE NO PODRÁ SER ALTERADO NI REPRODUCIDO PARCIAL O TOTALMENTE SIN LA AUTORIZACIÓN POR ESCRITO DEL LABORATORIO. LOS RESULTADOS EMITIDOS SÓLO AMPARAN LAS MUESTRAS RECIBIDAS EN ESTE LABORATORIO										
 M. en I. MANUEL SÁNCHEZ ZARZA RESPONSABLE DEL ÁREA										
Edición:	A 2023	M 03	D 15	Sustituye a:	A 2022	M 07	D 12	Revisión:	17	Hoja: 1 de: 1

FMLC08-B

Anexo 3. Resultados de los Isótopos Estables.



MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



**COORDINACIÓN DE SISTEMAS HÍDRICOS
SUCCOORDINACIÓN DE GESTIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS
LABORATORIO DE HIDROLOGÍA ISOTÓPICA**

RESULTADOS DEL CONTENIDO DE ISÓTOPOS ESTABLES DE DEUTERIO ($\delta^2\text{H}$) Y OXÍGENO-18 ($\delta^{18}\text{O}$)							
FECHA DE INGRESO: 06/03/2023				ENVÍO DE RESULTADOS: 13/03/2023			
CLIENTE: Dr. Miguel Ángel Mejía González (IMTA) DIRECCIÓN: Paseo Cuauhnáhuac No. 8532. Col. Progreso C.P. 62550. Jiutepec, Mor. CORREO: mamejia@taloc.imta.mx							
NÚM.	ID LAB.	IDENTIFICACIÓN	FECHA	$\delta^2\text{H}$ (‰)	1 σ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	1 σ (‰)
1	W-1003	POZO 33	15/02/2023	-35.7	±0.28	-3.81	±0.03
2	W-1004	POZO 103	15/02/2023	-31.8	±0.37	-3.06	±0.11
3	W-1005	POZO 17	15/02/2023	-34.3	±0.42	-3.19	±0.15
4	W-1006	PIEZOMETRO 29	16/02/2023	-38.6	±0.19	-3.53	±0.01
5	W-1007	MULTIPIEZOMETRO	16/02/2023	-32.5	±0.37	-2.65	±0.18
6	W-1008	POZO 21 CNA	17/02/2023	-62.5	±0.42	-9.33	±0.12
7	W-1009	DREN GENERAL	15/02/2023	-68.1	±0.27	-9.63	±0.03
8	W-1010	PIEZOMETRO 14	16/02/2023	-40.7	±0.2	-4.15	±0.11

NOTA: Los contenidos de deuterio (^2H) y oxígeno-18 (^{18}O) se miden referenciados al estándar VSMOW, y se expresan como valores delta en desviaciones por mil (‰). Los resultados se reportan con el error experimental asociado en el análisis, con desviaciones máximas de 0.15 ‰ para la delta de oxígeno-18 y de 1.0 ‰ para la delta de deuterio.

ATENTAMENTE

Fis. Luis González Hita
Jefe de Proyecto

Paseo Cuauhnáhuac No. 8532, Col. Progreso, C.P. 62550, Jiutepec, Morelos.
Tel: (777) 529 36 00 www.gob.mx/imta



Anexo 4. Control de calidad de las mediciones del apartado 3.2.12

Para control de calidad de las mediciones en este apartado, se realizaron muestras por duplicado para garantizar la confiabilidad de los resultados del análisis experimental.

Para ello se analizaron un total de 83 muestras, 73 de agua y 10 de sedimento. El número total de muestras analizadas por duplicado fue de 32, de las cuales: 24 corresponden a muestras duplicadas de agua y 8 a muestras duplicadas de sedimento.

Tipo de muestra	Métodos	Número de muestras analizadas	Número de muestras analizadas por duplicado
Agua	Electrométrico	26	11
	Fotométrico	26	3
	Gravimétrico	12	7
	Volumétrico	9	3
Sedimento	Electrométrico	2	0
	Gravimétrico	8	8
Total		83	32

El número de duplicados por método se realizó según lo recomendado en la NMX-AA-115-SCFI-2015, que establece un número mayor o igual a 10 % de la población analizada (Secretaría de Economía, 2015). En este apartado, el porcentaje de duplicados fue:

- Método fotométrico: 12 % duplicados
- Método volumétrico: 33 % duplicados
- Método electrométrico: 42 % duplicados
- Método gravimétrico: 58 % duplicados para muestras de agua y 100% para sedimento

Se calculó la diferencia porcentual relativa de duplicados (% RDP), como se establece en APHA, 2012:

$$\% RDP = \frac{|resultado\ de\ la\ muestra - resultado\ del\ duplicado|}{(resultado\ de\ la\ muestra + resultado\ del\ duplicado)/2} * 100$$

El porcentaje de aceptación fue: % RDP ≤ 35 % para procesos biológicos y % RDP ≤ 25 % para procesos físico-químicos. Los resultados muestran que menos de 10% de 32 duplicados analizados, no cumplieron con estos límites. Sin embargo, estos duplicados fueron de sólidos suspendidos totales y mediciones de O₂(g) en las determinaciones de GPP, que son parámetros que presentan dificultad de reproducir.

Anexo 5. Planos del arreglo general del sistema de humedal de tratamiento prototipo que depure el agua del Dren Chimalhuacán I para el riego de cultivos de nopales

Ver documento digital

Anexo 6. Catálogo de conceptos, costos y presupuestos

CONCEPTO		CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	IMPORTE
Clave	DESCRIPCIÓN				
1. CONSTRUCCIÓN DE BORDOS PARA CONFORMAR HUMEDALES					
1.1	Limpieza y trazo en el área de trabajo. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	722.00	m ²	\$19.08	\$13,775.76
1.2	Despalme de capa vegetal y de material no apto para la construcción. Incluye carga, acarreo hasta de 1 km, mano de obra, equipo y herramienta.	108.00	m ³	\$21.01	\$2,269.08
1.3	Extendido y bandeado de material producto de la excavación. Incluye mano de obra, equipo y herramienta.	140.40	m ³	\$14.16	\$1,988.06
1.4	Terraplén compactado al 95% proctor con material de banco. Incluye extracción, carga, descarga, acarreo de hasta 1 km, mano de obra, equipo y herramienta.	717.00	m ³	\$218.16	\$156,420.72
1.5	Afine manual de taludes y fondos de bordos y/o estanques. Incluye mano de obra, equipo y herramienta.	303.42	m ²	\$75.92	\$23,035.65
1.7	Suministro y colocación de geomembrana HDPE GM13 de 1 mm nominal de espesor, juntada con termofusión. Incluye mano de obra especializada, equipo y herramienta.	11.20	m ²	\$406.51	\$4,552.91
1.8	Nivelación con aparato topográfico (estación total, nivel montado, etc.) durante la ejecución de los trabajos para la revisión de niveles constructivos. Incluye mano de obra, equipo y herramienta.	722.00	m ²	\$10.83	\$7,819.26
2. INSTALACIÓN HIDRÁULICA (SISTEMA DE TUBERÍAS)					
2.1	Suministro e instalación de tubería de PVC hidráulico RD/26 de 1" (25 mm) de diámetro. Incluye acarreos, materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	195.40	m	\$29.06	\$5,678.32

CONCEPTO		CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	IMPORTE
Clave	DESCRIPCIÓN				
2.2	Suministro e instalación de tubería de PVC hidráulico RD/41 de 2" (50 mm) de diámetro. Incluye acarreo, materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	94.44	m	\$19.72	\$1,862.36
2.3	Suministro e instalación de tubería de PVC hidráulico RD/41 de 3" (75 mm) de diámetro. Incluye acarreo, materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	23.47	m	\$32.12	\$753.86
2.4	Suministro e instalación de tubería de PVC hidráulico RD/41 de 4" (100 mm) de diámetro. Incluye acarreo, materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	40.98	m	\$50.09	\$2,052.69
2.5	Suministro, instalación y ranurado de tubería de PVC hidráulico RD/41 de 2" (50 mm) de diámetro según especificaciones de proyecto. Incluye acarreo, materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	261.36	m	\$50.84	\$13,287.54
2.6	Suministro, instalación y ranurado de tubería de PVC hidráulico RD/41 de 4" (100 mm) de diámetro según especificaciones de proyecto. Incluye acarreo, materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	131.67	m	\$77.91	\$10,258.41
2.7	Suministro, instalación y ranurado de tubería de PVC hidráulico RD/41 de 6" (150 mm) de diámetro según especificaciones de proyecto. Incluye acarreo, materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	2.97	m	\$131.57	\$390.76
2.8	Suministro e instalación de piezas especiales de PVC hidráulico de 1" (25 mm) de diámetro entre las que se incluyen yee, tee, codos de 90°, codos de 45°, reducciones, ampliaciones y coples según especificaciones de proyecto. Incluye mano de obra, equipo y herramienta.	1	Lote	\$11,802.00	\$11,802.00

CONCEPTO		CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	IMPORTE
Clave	DESCRIPCIÓN				
2.90	Suministro e instalación de piezas especiales de PVC hidráulico de 2" (50 mm) de diámetro entre las que se incluyen yee, tee, codos de 90°, codos de 45°, reducciones, ampliaciones y coples según especificaciones de proyecto. Incluye mano de obra, equipo y herramienta.	1	Lote	\$19,085.49	\$19,085.49
2.1	Suministro e instalación de piezas especiales de PVC hidráulico de 3" (75 mm) de diámetro entre las que se incluyen yee, tee, codos de 90°, codos de 45°, reducciones, ampliaciones y coples según especificaciones de proyecto. Incluye mano de obra, equipo y herramienta.	1	Lote	\$527.46	\$527.46
2.11	Suministro e instalación de piezas especiales de PVC hidráulico de 4" (100 mm) de diámetro entre las que se incluyen yee, tee, codos de 90°, codos de 45°, reducciones, ampliaciones y coples según especificaciones de proyecto. Incluye mano de obra, equipo y herramienta.	1	Lote	\$19,768.14	\$19,768.14
2.12	Suministro e instalación de rejilla de drenaje plana redonda de 10.16 cm para exteriores adaptable a accesorios de alcantarillado y drenaje de 4 pulgadas. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	12	Pieza	\$341.03	\$4,092.36
2.13	Suministro e instalación de rejilla de drenaje plana redonda de 15.24 cm para exteriores adaptable a accesorios de alcantarillado y drenaje de 6 pulgadas. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	3	Pieza	\$464.05	\$1,392.15
2.14	Platos de acero inoxidable para la distribución de flujo fabricada en taller. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	6	Pieza	\$3,583.34	\$21,500.04
3. CONSTRUCCIÓN DE TANQUE SÉPTICO (SEDIMENTADOR)					
3.1	Estudio de mecánica de suelos.	1	Estudio	\$30,000.00	\$30,000.00
3.2	Diseño estructural.	1	Estudio	\$30,000.00	\$30,000.00
1.1	Limpieza y trazo en el área de trabajo. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	12.25	m ²	\$19.08	\$233.73

CONCEPTO		CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	IMPORTE
Clave	DESCRIPCIÓN				
3.3	Fabricación y colado de concreto de f'c=100 kg/cm2 para plantilla de estructuras. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	2.70	m ³	\$3,305.94	\$8,926.04
3.4	Fabricación y colado de concreto vibrado y curado de f'c= 250 kg/cm2. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	6.36	m ³	\$4,101.55	\$26,085.86
3.5	Suministro y colocación de varilla corrugada para acero de refuerzo f'y=4200 kg/cm2 de 3/8" de diámetro. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	577.00	kg	\$48.08	\$27,742.16
3.6	Cimbra de madera para acabados no aparentes en cimentaciones. Incluye cimbra de apoyo, descimbrado, mano de obra, equipo y herramienta.	2.80	m ²	\$239.47	\$670.52
3.7	Cimbra de madera para acabados no aparentes en muros hasta 3.0 m de altura. Incluye cimbra de apoyo, descimbrado, mano de obra, equipo y herramienta.	54.36	m ²	\$405.72	\$22,054.94
3.8	Cimbra de madera para acabados no aparentes en losas con altura de obra falsa hasta 3.60 m. Incluye cimbra de apoyo, descimbrado, mano de obra, equipo y herramienta.	10.57	m ²	\$397.17	\$4,198.09
3.9	Muro de 12 cm. de block de concreto de 12x20x40 cm. asentado con mezcla cemento arena 1:5, acabado común, con refuerzos horizontales a base de escalerilla a cada 2 hiladas. Incluye materiales, acarreo, mano de obra, equipo y herramienta.	6.50	m ²	\$331.92	\$2,157.48
3.10	Aplanado con mortero cemento-arena 1:3 de 1.5 cm de espesor. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	67.00	m ²	\$248.11	\$16,623.37
3.11	Suministro y colocación de brocal y tapa de concreto. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	2	Pieza	\$3,227.17	\$6,454.34

CONCEPTO		CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	IMPORTE
Clave	DESCRIPCIÓN				
3.12	Suministro e instalación de tubería de PVC hidráulico RD/26 de 1/2" (13 mm) de diámetro. Incluye acarreos, materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	1.10	m	\$16.52	\$18.17
2.2	Suministro e instalación de tubería de PVC hidráulico RD/41 de 2" (50 mm) de diámetro. Incluye acarreos, materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	2.50	m	\$19.72	\$49.30
2.4	Suministro e instalación de tubería de PVC hidráulico RD/41 de 4" (100 mm) de diámetro. Incluye acarreos, materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	2.30	m	\$50.09	\$115.21
3.13	Suministro, instalación y ranurado de tubería de PVC hidráulico RD/41 de 1" (25 mm) de diámetro según especificaciones de proyecto. Incluye acarreos, materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	3.08	m	\$60.18	\$185.35
2.5	Suministro, instalación y ranurado de tubería de PVC hidráulico RD/41 de 2" (50 mm) de diámetro según especificaciones de proyecto. Incluye acarreos, materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	3.08	m	\$50.84	\$156.59
2.8	Suministro e instalación de piezas especiales de PVC hidráulico de 1" (25 mm) de diámetro entre las que se incluyen yee, tee, codos de 90°, codos de 45°, reducciones, ampliaciones y coples según especificaciones de proyecto. Incluye mano de obra, equipo y herramienta.	1	Lote	\$169.52	\$169.52
2.9	Suministro e instalación de piezas especiales de PVC hidráulico de 2" (50 mm) de diámetro entre las que se incluyen yee, tee, codos de 90°, codos de 45°, reducciones, ampliaciones y coples según especificaciones de proyecto. Incluye mano de obra, equipo y herramienta.	1	Lote	\$143.51	\$143.51
1.7	Suministro y colocación de geomembrana HDPE GM13 de 1 mm nominal de espesor, junteada con termofusión. Incluye mano de obra especializada, equipo y herramienta.	9.80	m ²	\$406.51	\$3,983.80

CONCEPTO		CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	IMPORTE
Clave	DESCRIPCIÓN				
2.12	Suministro e instalación de rejilla de drenaje plana redonda de 10.16 cm para exteriores adaptable a accesorios de alcantarillado y drenaje de 4 pulgadas. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	3	Pieza	\$341.03	\$1,023.09
3.14	Suministro e instalación de válvula de flotador. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	1	Pieza	\$2,453.18	\$2,453.18
4. CONSTRUCCIÓN DE CAJA DE LODOS					
1.1	Limpieza y trazo en el área de trabajo. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	5.06	m ²	\$19.08	\$96.54
3.3	Fabricación y colado de concreto de f'c=100 kg/cm ² para plantilla de estructuras. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	0.55	m ³	\$3,305.94	\$1,818.27
3.4	Fabricación y colado de concreto vibrado y curado de f'c= 250 kg/cm ² . Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	0.61	m ³	\$4,101.55	\$2,501.95
3.5	Suministro y colocación de varilla corrugada para acero de refuerzo f'y=4200 kg/cm ² de 3/8" de diámetro. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	8.87	kg	\$48.08	\$426.47
3.6	Cimbra de madera para acabados no aparentes en cimentaciones. Incluye cimbra de apoyo, descimbrado, mano de obra, equipo y herramienta.	0.99	m ²	\$239.47	\$237.08
4.1	Cimbra de madera para acabados no aparentes en dalas, castillos y cerramientos. Incluye cimbra de apoyo, descimbrado, mano de obra, equipo y herramienta.	1.23	m ²	\$291.60	\$358.67
4.2	Muros de tabique rojo recocido, hasta 6.0 m de altura, juntado con mortero cemento-arena 1:5 de 14 cm de espesor. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	5.15	m ²	\$660.34	\$3,400.75

CONCEPTO		CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	IMPORTE
Clave	DESCRIPCIÓN				
3.10	Aplanado con mortero cemento-arena 1:3 de 1.5 cm de espesor. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	11.61	m ²	\$248.11	\$2,880.56
4.3	Acarreo de tezontle, volumen medido en banco. Incluye tiempo de espera de la carga mecánica, mano de obra, equipo y herramienta.	2.72	m ³	\$27.66	\$75.24
4.4	Acarreo de tezontle en camión a kilómetros subsecuentes, volumen medido en banco. Incluye maquinaria, mano de obra, equipo y herramienta.	10.88	m ³ km	\$11.07	\$120.44
4.5	Relleno de material de filtro de tezontle producto de banco con un diámetro promedio de 4 a 6 cm. Incluye carga, descarga, cribado, nivelación, extendido, mano de obra, equipo y herramienta.	0.76	m ³	\$101.48	\$77.12
4.6	Relleno de material de filtro de tezontle producto de banco con un diámetro promedio de 2 a 4 cm. Incluye carga, descarga, cribado, nivelación, extendido, mano de obra, equipo y herramienta.	0.98	m ³	\$71.75	\$70.32
4.7	Relleno de material de filtro de tezontle producto de banco con un diámetro promedio de 1 a 2 cm. Incluye carga, descarga, cribado, nivelación, extendido, mano de obra, equipo y herramienta.	0.98	m ³	\$85.33	\$83.62
4.8	Suministro, instalación y ranurado de tubería de PVC hidráulico RD/41 de 2 1/2" (63 mm) de diámetro. Incluye acarreo, materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	13.54	m	\$58.99	\$798.72
4.9	Suministro e instalación de piezas especiales de PVC hidráulico de 2 1/2" (63 mm) de diámetro entre las que se incluyen yee, tee, codos de 90°, codos de 45°, reducciones, ampliaciones y coples según especificaciones de proyecto. Incluye mano de obra, equipo y herramienta.	1	Lote	\$1,830.88	\$1,830.88

5. CAJAS DE SIFÓN

CONCEPTO		CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	IMPORTE
Clave	DESCRIPCIÓN				
1.1	Limpieza y trazo en el área de trabajo. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	2.04	m ²	\$19.08	\$38.92
3.3	Fabricación y colado de concreto de f'c=100 kg/cm ² para plantilla de estructuras. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	0.22	m ³	\$3,305.94	\$727.31
3.4	Fabricación y colado de concreto vibrado y curado de f'c= 250 kg/cm ² . Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	0.20	m ³	\$4,101.55	\$812.11
3.5	Suministro y colocación de varilla corrugada para acero de refuerzo f'y=4200 kg/cm ² de 3/8" de diámetro. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	21.68	kg	\$48.08	\$1,042.37
3.6	Cimbra de madera para acabados no aparentes en cimentaciones. Incluye cimbra de apoyo, descimbrado, mano de obra, equipo y herramienta.	0.88	m ²	\$239.47	\$210.73
4.1	Cimbra de madera para acabados no aparentes en dalas, castillos y cerramientos. Incluye cimbra de apoyo, descimbrado, mano de obra, equipo y herramienta.	3.52	m ²	\$291.60	\$1,026.43
4.2	Muros de tabique rojo recocido, hasta 6.0 m de altura, juntado con mortero cemento-arena 1:5 de 14 cm de espesor. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	6.24	m ²	\$660.34	\$4,120.52
3.10	Aplanado con mortero cemento-arena 1:3 de 1.5 cm de espesor. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	15.44	m ²	\$248.11	\$3,830.82
5.1	Suministro e instalación de manguera industrial transparente de 2" (50 mm) de diámetro. Incluye acarreo, corte, materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	4.00	m	\$224.38	\$897.52
5.2	Fabricación e instalación de soportes de barra de acero inoxidable de 3/8" de diámetro.	2	Lote	\$660.56	\$1,321.12

6. CONSTRUCCIÓN DE CAJAS DE REGISTRO DEL HUMEDAL

CONCEPTO		CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	IMPORTE
Clave	DESCRIPCIÓN				
1.1	Limpieza y trazo en el área de trabajo. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	3.40	m ²	\$19.08	\$64.87
3.3	Fabricación y colado de concreto de f'c=100 kg/cm ² para plantilla de estructuras. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	0.37	m ³	\$3,305.94	\$1,223.20
3.4	Fabricación y colado de concreto vibrado y curado de f'c= 250 kg/cm ² . Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	0.65	m ³	\$4,101.55	\$2,666.01
3.5	Suministro y colocación de varilla corrugada para acero de refuerzo f'y=4200 kg/cm ² de 3/8" de diámetro. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	50.70	kg	\$48.08	\$2,437.66
3.6	Cimbra de madera para acabados no aparentes en cimentaciones. Incluye cimbra de apoyo, descimbrado, mano de obra, equipo y herramienta.	1.14	m ²	\$239.47	\$273.00
4.1	Cimbra de madera para acabados no aparentes en dalas, castillos y cerramientos. Incluye cimbra de apoyo, descimbrado, mano de obra, equipo y herramienta.	8.62	m ²	\$291.60	\$2,513.59
4.2	Muros de tabique rojo recocido, hasta 6.0 m de altura, junteado con mortero cemento-arena 1:5 de 14 cm de espesor. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	10.34	m ²	\$660.34	\$6,827.92
3.10	Aplanado con mortero cemento-arena 1:3 de 1.5 cm de espesor. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	29.20	m ²	\$248.11	\$7,244.81
6.1	Suministro e instalación de vertedor triangular de acero inoxidable cal. 12, según especificaciones de proyecto. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	2	Pieza	\$4,110.23	\$8,220.46
6.2	Rejilla tipo Irving IS-05 de 1/8x1". Incluye materiales, cortes, soldadura, mano de obra, equipo y herramienta.	2.00	m ²	\$2,449.43	\$4,898.86

CONCEPTO		CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	IMPORTE
Clave	DESCRIPCIÓN				
2.4	Suministro e instalación de tubería de PVC hidráulico RD/41 de 4" (100 mm) de diámetro. Incluye acarreo, materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	3.00	m	\$50.09	\$150.27
2.11	Suministro e instalación de piezas especiales de PVC hidráulico de 4" (100 mm) de diámetro entre las que se incluyen yee, tee, codos de 90°, codos de 45°, reducciones, ampliaciones y coples según especificaciones de proyecto. Incluye mano de obra, equipo y herramienta.	2	Lote	\$515.64	\$1,031.28
7. CONSTRUCCIÓN DE TANQUE DE CLORACIÓN					
1.1	Limpieza y trazo en el área de trabajo. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	2.80	m ²	\$19.08	\$53.42
3.3	Fabricación y colado de concreto de f'c=100 kg/cm ² para plantilla de estructuras. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	0.31	m ³	\$3,305.94	\$1,018.23
3.4	Fabricación y colado de concreto vibrado y curado de f'c= 250 kg/cm ² . Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	0.08	m ³	\$4,101.55	\$307.62
3.5	Suministro y colocación de varilla corrugada para acero de refuerzo f'y=4200 kg/cm ² de 3/8" de diámetro. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	9.40	kg	\$48.08	\$451.95
7.1	Suministro y colocación de malla electrosoldada e-6x6-10/10. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	2.80	m ²	\$86.23	\$241.44
3.6	Cimbra de madera para acabados no aparentes en cimentaciones. Incluye cimbra de apoyo, descimbrado, mano de obra, equipo y herramienta.	0.71	m ²	\$239.47	\$169.54
4.1	Cimbra de madera para acabados no aparentes en dalas, castillos y cerramientos. Incluye cimbra de apoyo, descimbrado, mano de obra, equipo y herramienta.	1.35	m ²	\$291.60	\$393.66

CONCEPTO		CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	IMPORTE
Clave	DESCRIPCIÓN				
7.2	Muros de tabique rojo recocido, hasta 6.0 m de altura, juntado con mortero cemento-arena 1:5 de 21 cm de espesor. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	4.45	m ²	\$1,036.91	\$4,614.25
3.10	Aplanado con mortero cemento-arena 1:3 de 1.5 cm de espesor. Incluye materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	9.65	m ²	\$248.11	\$2,394.26
2.2	Suministro e instalación de tubería de PVC hidráulico RD/41 de 2" (50 mm) de diámetro. Incluye acarreo, materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	0.88	m	\$19.72	\$17.35
2.7	Suministro, instalación y ranurado de tubería de PVC hidráulico RD/41 de 3" (75 mm) de diámetro según especificaciones de proyecto. Incluye acarreo, materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	3.85	m	\$63.24	\$243.47
2.9	Suministro e instalación de piezas especiales de PVC hidráulico de 2" (50 mm) de diámetro entre las que se incluyen yee, tee, codos de 90°, codos de 45°, reducciones, ampliaciones y coples según especificaciones de proyecto. Incluye mano de obra, equipo y herramienta.	1	Lote	\$97.68	\$97.68
2.1	Suministro e instalación de piezas especiales de PVC hidráulico de 3" (75 mm) de diámetro entre las que se incluyen yee, tee, codos de 90°, codos de 45°, reducciones, ampliaciones y coples según especificaciones de proyecto. Incluye mano de obra, equipo y herramienta.	1	Lote	\$260.00	\$260.00
8. MATERIAL FILTRANTE EN LAGUNAS					
8.1	Relleno a mano de material de arcilla producto de la excavación. Incluye carga, descarga, nivelación, extendido, mano de obra, equipo y herramienta.	9.99	m ³	\$20.09	\$200.70
4.3	Acarreo de tezontle, volumen medido en banco. Incluye tiempo de espera de la carga mecánica, mano de obra, equipo y herramienta.	248.66	m ³	\$27.66	\$6,877.94

CONCEPTO		CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	IMPORTE
Clave	DESCRIPCIÓN				
4.4	Acarreo de tezontle en camión a kilómetros subsecuentes, volumen medido en banco. Incluye maquinaria, mano de obra, equipo y herramienta.	994.64	m ³ km	\$11.07	\$11,010.66
4.5	Relleno de material de filtro de tezontle producto de banco con un diámetro promedio de 4 a 6 cm. Incluye carga, descarga, cribado, nivelación, extendido, mano de obra, equipo y herramienta.	57.84	m ³	\$101.48	\$5,869.60
4.6	Relleno de material de filtro de tezontle producto de banco con un diámetro promedio de 2 a 4 cm. Incluye carga, descarga, cribado, nivelación, extendido, mano de obra, equipo y herramienta.	89.50	m ³	\$71.75	\$6,421.63
4.7	Relleno de material de filtro de tezontle producto de banco con un diámetro promedio de 1 a 2 cm. Incluye carga, descarga, cribado, nivelación, extendido, mano de obra, equipo y herramienta.	101.32	m ³	\$85.33	\$8,645.64
9. INSTALACIÓN DE PLANTAS ACUÁTICAS					
9.1	Sembrado de plantas acuáticas de la región según especificaciones de proyecto. Incluye mano de obra, equipo y herramienta.	238.92	m ²	\$63.82	\$15,247.56
TOTAL DEL PRESUPUESTO MOSTRADO SIN IVA:					\$636,650.28
IVA 16%					\$101,864.04
TOTAL DEL PRESUPUESTO MOSTRADO:					\$738,514.32

Anexo 7. Procedimiento constructivo

El siguiente procedimiento constructivo se realiza con el propósito de describir los pasos para erigir las estructuras que conforman el humedal artificial La Nopalera, perteneciente al conjunto del Parque Ecológico Lago de Texcoco. Dicho sistema de saneamiento tiene la función de procesar las aguas residuales provenientes del canal contiguo, con el objetivo de que esta agua tratada se aproveche para el riego de las zonas de cultivo (nopaleras) cercanas. A continuación, se muestran las partidas a desarrollar para la ejecución de los trabajos a los que se hace referencia.

1. Construcción de bordos para conformar humedales.

Estos se conformarán principalmente de material de banco cercano al sitio de construcción. Más antes de construir el cuerpo de los terraplenes que dan forma a las lagunas de flujo vertical y horizontal, deben de llevarse a cabo actividades preliminares como limpieza y trazo en el área de trabajo, así como el despalme de la capa superficial de vegetal y de material no apto para la construcción, para finalmente extender en un área vecina los residuos extraídos en la actividad del despalme.

Posteriormente, con el material de banco se procede a conformar los terraplenes de los bordos, los cuales deberán de compactarse al 95% proctor en capas no mayores a 20 cm, empleando para ello la maquinaria y el equipo necesarios. Los taludes de los terraplenes y el fondo de las lagunas tendrán que ser afinados a mano, con el fin de cumplir las características geométricas especificadas en los planos de proyecto, a su vez, los bordos tendrán que protegerse con vegetación característica de la región para así garantizar la estabilidad estructural de estos. Es importante mencionar, que a la par de la conformación de los terraplenes, deberán dejarse los preparativos en estos para la instalación del sistema de tuberías, así como para el desplante de las estructuras que complementan el humedal.

Dentro del humedal de flujo horizontal se colocarán mamparas de geomembrana HDPE GM13 de 1 mm nominal de espesor, acorde a lo plasmado en los planos de proyecto ejecutivo.

En todo el proceso de construcción del humedal, se contará con el apoyo de una brigada topográfica, la cual se encargará de revisar y hacer cumplir los niveles de proyecto de las estructuras y de las terracerías que componen el sistema.

2. Instalación hidráulica (sistema de tuberías).

Esta se refiere a la red de tubos de PVC hidráulico que están destinados a distribuir el flujo en las lagunas del humedal. La tubería a instalar posee distintos diámetros, según los requerimientos del proyecto, los cuales van desde 1 hasta las 6 pulgadas. El arreglo del sistema de tuberías se realizará de acuerdo con lo que se muestra en los planos de proyecto, iniciando con el montaje de la red que se encuentra al fondo de

las lagunas y concluyendo con las parrillas más superficiales, probando y corroborando que la tubería se encuentre correctamente instalada, y tomando en cuenta que conforme se instale la tubería dentro de las lagunas también se colocaran capas de material filtrante para resguardarlas.

En los arreglos del sistema de tuberías, tendrá que tomarse en cuenta que algunas tendrán que ranurarse antes de su instalación, que algunas otras se colocaran de forma vertical para funcionar como respiraderos y que otras formaran parte de las parrillas de los humedales.

En el humedal de flujo vertical, para la adecuada distribución del flujo en la laguna, se adecuará un arreglo tipo araña (ver planos de proyecto), los cuales constan de unos platos huecos de acero inoxidable fabricados en taller que serán alimentados por la red proveniente del sifón y a los que se les adaptarán salidas mediante tubos de PVC de 1 pulgada de diámetro.

Para el desarrollo de la instalación, se emplearán piezas especiales de diferentes diámetros entre las que se incluyen codos de 90° y 45°, tees, yees, reducciones, tapones, válvulas de globo, etc., que se colocaran de acuerdo con lo indicado en los planos de proyecto.

3. Construcción de tanque séptico (sedimentador).

La realización del tanque séptico depende principalmente de llevar a cabo su análisis y diseño estructural, el cual debe apoyarse, entre otros aspectos del estudio de mecánica de suelos del sitio de proyecto. Con base a dicho diseño estructural, es que se definirá la geometría, así como las características del concreto y del acero de refuerzo de los elementos que conformaran el tanque. Así pues, el proceso constructivo de esta estructura se indica de manera general, señalando que este deberá apegarse a lo señalado en el diseño estructural y a sus respectivos planos de proyecto.

Antes de construir la estructura, deben de llevarse a cabo actividades preliminares como limpieza y trazo en el área de trabajo. También, deben aprovecharse los preparativos (tubería, espacio, etc.) dejados en el cuerpo de los terraplenes que conforman el humedal.

Como primer elemento de la estructura debe de construirse la cimentación, cuyo tipo se erigirá de acuerdo con su respectivo diseño estructural.

Posteriormente se conformarán sus muros, los cuales de inicio se proponen de concreto $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$ con doble emparrillado de varillas de 3/8", salvo que en el diseño estructural se indique otra cosa. A su vez, tendrán que instalarse dentro de la estructura del tanque dos mamparas de geomembrana HDPE GM13 de 1 mm nominal de espesor.

Cabe mencionar que cada vez que se realice el colado de un componente de la estructura de concreto, tendrá que dejarse el acero de refuerzo listo para que este pueda ligarse con otro elemento (cuando aplique el caso).

También debe de considerarse dentro del tanque un muro de block en el que se dejaran huecos (ver plano de proyecto) cuyo fin es amortiguar la energía del flujo y a su vez servir como filtro de sólidos.

La última parte de la superestructura es la losa, que también se fabricará en concreto $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$ con acero de refuerzo de varilla corrugada de $3/8"$, la cual al armarse y antes de colarse deberá de considerar los arreglos para dos tapas de concreto, respiraderos e instalación hidráulica.

4. Construcción de caja de lodos.

Como primer paso deben de llevarse a cabo actividades preliminares tales como la limpieza y trazo en el área de trabajo, aprovechando los preparativos dejados en el cuerpo de los terraplenes que conforman el humedal.

El primer elemento de la estructura que debe de construirse es la cimentación, la cual se realizará a partir de una losa de concreto $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$ reforzada con varilla de $3/8"$ con las dimensiones y armado señalados en los planos de proyecto.

Posteriormente se edificará la superestructura, la cual consta de dala de desplante, castillos y cadena de cerramiento los cuales se proponen de concreto $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$ con acero de refuerzo de varilla de $3/8"$, así como de muros de tabique rojo recocido de 14 cm de espesor. En los muros debe de realizarse el aplanado tanto en interiores como exteriores, considerando que en este último el acabado tendrá que ser fino. Al construir la estructura deberán considerarse los preparativos para el sistema de tuberías, así como para el alojamiento del material filtrante dentro de esta.

Cabe mencionar que cada vez que se realice el colado de un componente de la estructura de concreto, tendrá que dejarse el acero de refuerzo listo para que este pueda ligarse con otro elemento (cuando aplique el caso).

El sistema de tuberías se deberá instalar de acuerdo con lo plasmado en los planos de proyecto, tomando en cuenta los diámetros indicados, el ranurado de la tubería, así como las piezas especiales (codos, yees, tees, válvulas, etc.) señaladas.

Por último, se adicionará el material filtrante, el cual se conforma a base de tezontle proveniente de un banco de material cercano. Dicho material deberá ser cribado para obtener así las tres clases de material señaladas en el proyecto con diferentes características de diámetro y transportado hasta el sitio donde se construye el humedal. El material de filtro tendrá que colocarse de acuerdo con el espesor señalado en los planos constructivos.

5. Cajas de sifón.

Deben de llevarse a cabo actividades preliminares tales como la limpieza y trazo en el área de trabajo, aprovechando los preparativos dejados en el cuerpo de los terraplenes que conforman el humedal.

El primer elemento de la estructura que debe de construirse es la cimentación, la cual se realizará a partir de una losa de concreto $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$ reforzada con varilla de $3/8"$, cumpliendo con las dimensiones y armado señalados en los planos de proyecto.

Posteriormente se edificarán las dalas de desplante, castillos y cadena de cerramiento los cuales se proponen de concreto $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$ con acero de refuerzo de varilla de $3/8"$, considerando también la conformación de muros de tabique rojo recocido de 14 cm de espesor. En los muros debe de realizarse el aplanado tanto en interiores como exteriores, considerando que en este último el acabado tendrá que ser fino. Al construir la estructura deberán considerarse los preparativos para colocar los soportes del sifón, así como de la fontanería que compone a este.

Cabe mencionar que cada vez que se realice el colado de un componente de la estructura de concreto, tendrá que dejarse el acero de refuerzo listo para que este pueda ligarse con otro elemento (cuando aplique el caso).

La manguera que forma el sifón será transparente de tipo industrial de 2 pulgadas de diámetro, e ira fijada a las barras de acero inoxidable que sirven de soporte tal como se indica en los respectivos planos de proyecto.

6. Construcción de cajas de registro del humedal.

Se realizarán las actividades preliminares tales como la limpieza y el trazo del área de trabajo, aprovechando los preparativos dejados en el cuerpo de los terraplenes que conforman el humedal.

A continuación, se procede a la construcción de la cimentación, la cual se realizará a partir de una losa de concreto $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$ reforzada con varilla de $3/8"$, considerando las dimensiones y armado señalados en los planos de proyecto.

Posteriormente se edificarán las dalas de desplante, castillos y cadena de cerramiento los cuales se proponen de concreto $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$ con acero de refuerzo de varilla de $3/8"$, considerando también la conformación de muros de tabique rojo recocido de 14 cm de espesor. En los muros debe de realizarse el aplanado tanto en interiores como exteriores, considerando que en este último el acabado tendrá que ser fino.

Cabe mencionar que cada vez que se realice el colado de un componente de la estructura de concreto, tendrá que dejarse el acero de refuerzo listo para que este pueda ligarse con otro elemento (cuando aplique el caso).

Al interior de las cajas de registro se implementará un vertedor triangular, el cual estará fabricado en taller a partir de placa de acero inoxidable cuyo espesor y medidas se señalan en los planos de proyecto. El vertedor se apoyará sobre una mampara de tabique rojo recocido, la cual tendrá que ser aplanada con mortero cemento-arena en proporción 1:3 de 1.5 cm de espesor.

Durante la construcción de la estructura deberán considerarse los preparativos para colocar la tubería de entrada y salida de flujo.

Las tuberías de llegada y de salida serán de PVC hidráulico con un diámetro de 4 pulgadas.

7. Construcción de tanque de cloración.

Se llevarán a cabo los trabajos preliminares tales como limpieza y trazo del área de trabajo, aprovechando los preparativos dejados en el cuerpo de los terraplenes que conforman el humedal.

Se procede a la construcción de la cimentación, la cual se realizará a partir de una losa de concreto $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$ reforzada con varilla de $3/8"$, considerando las dimensiones y armado señalados en los planos de proyecto.

Se prosigue con la fabricación de las dalas de desplante, castillos y cadena de cerramiento los cuales se colarán con concreto $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$ y se reforzarán con varilla de $3/8"$, considerando también la conformación de muros exteriores de tabique rojo recocido de 14 cm de espesor. Por su parte, al interior de la estructura, se colocarán muros divisorios de tabique rojo recocido de 14 cm de espesor con la arquitectura y las dimensiones que se muestra en su respectivo plano de proyecto, los cuales servirán para separar el tanque de cloración en módulos. En los muros debe de realizarse el aplanado tanto en la cara interior como exterior, considerando que en esta última el acabado tendrá que ser fino.

Cabe mencionar que cada vez que se realice el colado de un componente de la estructura de concreto, tendrá que dejarse el acero de refuerzo listo para que este pueda ligarse con otro elemento (cuando aplique el caso).

Mientras se construye la estructura deberán considerarse los preparativos para colocar el sistema de tuberías del tanque.

El sistema de tuberías se deberá instalar de acuerdo con lo plasmado en los planos de proyecto, tomando en cuenta los diámetros indicados, el ranurado de la tubería, así como las piezas especiales (codos, yees, tees, válvulas, etc.) señaladas.

8. Material filtrante en lagunas.

Después de configurados los terraplenes que dan forma a las lagunas del humedal, se adicionarán las capas de material filtrante dentro de estas, las cuales serán hechas a base de tezontle proveniente de un banco de material cercano. Antes de colocar el material de filtro, se rellenará el fondo de las lagunas con una capa de material

impermeable (arcilla) de 10 cm de espesor. En cuanto al material filtrante, este deberá cribarse para obtener así las tres clases de material señaladas en el proyecto con las diferentes características de diámetro requeridas y transportarse hasta el sitio donde se construye el humedal. Las tres clases de material a colocar son:

- Capa con un diámetro granular promedio de 4 a 6 cm.
- Capa con un diámetro granular promedio de 2 a 4 cm.
- Capa con un diámetro granular promedio de 1 a 2 cm.

Dichas capas se conformarán empleando medios mecánicos de acuerdo con los espesores señalados en los planos constructivos.

9. Instalación de plantas acuáticas.

Se realizará el sembrado de plantas acuáticas oriundas de la región (tule) dentro de las lagunas que componen el humedal. Dichas plantas se sembrarán en distancia suficiente para favorecer el desarrollo de cada una de estas. Esta actividad se llevará a cabo por medios manuales, empleando para tal fin herramientas como pala, pico, azadón, etc., así como los materiales y equipo que dicha labor amerite.

Anexo 8. Planos del arreglo general del sistema de humedal de tratamiento prototipo en el Parque Los Ahuehuetes.

Ver documento digital