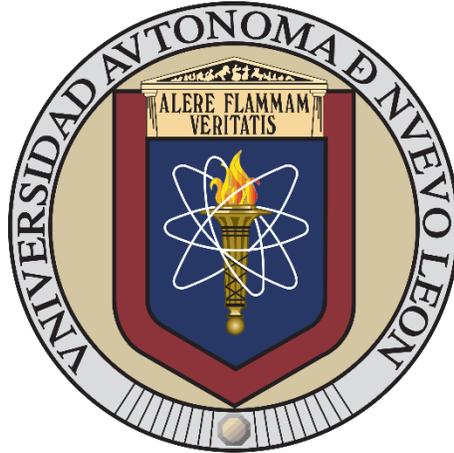


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**EVALUACIÓN GEOAMBIENTAL DE LA OPERACIÓN ACTUAL DE LA PRESA
“CERRO PRIETO” EN LOS PERIODOS DE LA SEQUÍA EXTREMA 2021 - 2024.**

**POR:
LINDA SOFÍA TORRES MARTÍNEZ**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

ABRIL, 2025



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**EVALUACIÓN GEOAMBIENTAL DE LA OPERACIÓN ACTUAL DE LA PRESA
“CERRO PRIETO” EN LOS PERIODOS DE LA SEQUÍA EXTREMA 2021 - 2024.**

POR:

LINDA SOFÍA TORRES MARTÍNEZ

Vo. Bo.

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Héctor de León Gómez

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L.

ABRIL, 2025



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**EVALUACIÓN GEOAMBIENTAL DE LA OPERACIÓN ACTUAL DE LA PRESA
“CERRO PRIETO” EN LOS PERIODOS DE LA SEQUÍA EXTREMA 2021 - 2024.**

POR:

LINDA SOFÍA TORRES MARTÍNEZ

Vo. Bo.

COMITÉ DE REVISIÓN

Dr. Héctor de León Gómez

Director de Tesis

Dr. Ricardo A. Cavazos González

Codirector de Tesis

Dr. Vsévolod Yutsis

Asesor Externo

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L.

ABRIL, 2025



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

2025/03/08

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es **“EVALUACIÓN GEOAMBIENTAL DE LA OPERACIÓN ACTUAL DE LA PRESA “CERRO PRIETO” EN LOS PERIODOS DE LA SEQUÍA EXTREMA 2021 - 2024”**, que presenta la **ING. LINDA SOFÍA TORRES MARTÍNEZ**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictaminó que este trabajo sea **APROBADO**.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

DR. HÉCTOR DE LEÓN GÓMEZ

Evaluador



Av. Universidad S/N Cd. Universitaria Apdo. Postal 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455
Tels. (81) 14424400 ext. 4448, 8329 4000 ext. 7216, 7234
www.ingenieriacivil.uanl.mx



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

2025/03/21

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE. -

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de TESIS, cuyo título es **“EVALUACIÓN GEOAMBIENTAL DE LA OPERACIÓN ACTUAL DE LA PRESA “CERRO PRIETO” EN LOS PERIODOS DE LA SEQUÍA EXTREMA 2021 - 2024”**, que presenta la ING. LINDA SOFÍA TORRES MARTÍNEZ, como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRA EN CIENCIAS, del programa MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento CUENTA con la calidad y nivel CIENTÍFICO, adecuados para su defensa, por lo que dictaminó que este trabajo sea APROBADO.

Así mismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,


DR. RICARDO ALBERTO CAVAZOS GONZÁLEZ

Evaluador



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Av. Pedro de Alba S/N Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455
81 8329 4000 ext. 4060 • www.fic.uanl.mx



2025/MARZO/07

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL

SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

PRESENTE. -

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de TESIS, cuyo título es **“EVALUACIÓN GEOAMBIENTAL DE LA OPERACIÓN ACTUAL DE LA PRESA “CERRO PRIETO” EN LOS PERIODOS DE LA SEQUÍA EXTREMA 2021 - 2024”**, que presenta la **ING. LINDA SOFÍA TORRES MARTÍNEZ**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

DR. VSEVOLOD YUTSIS

Evaluador



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Comprobante de corrección de escritos

ESTUDIANTE PROFESOR

NOMBRE: LINDA SOFÍA TORRES MARTÍNEZ

TIPO DE DOCUMENTO: ARTÍCULO TESIS PI OTRO

TÍTULO DEL DOCUMENTO A REVISAR:
EVALUACIÓN GEOAMBIENTAL DE LA OPERACIÓN
ACTUAL DE LA PRESA "CERRO PRIETO" EN LOS
PERIODOS DE LA SEQUÍA EXTREMA 2021-2024.

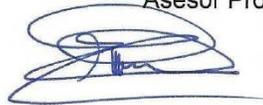
RECOMENDACIONES ADICIONALES:

REALIZAR LAS CORRECCIONES QUE APAREZCAN
EN LA TESIS IMPRESA.

*Este documento certifica la corrección DEFINITIVA del trabajo arriba
identificado, en los aspectos: ortográfico, metodológico y estilístico.

Nombre y firma de quien corrigió:

Arq. Ramón Longoria Ramírez
Asesor Profesional de Apoyo



Dr. Gerardo Fajardo San Miguel
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación
Ciudad Universitaria, 07 de marzo de 2025



SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



Av. Universidad S/N Cd. Universitaria
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P.P. 66455
Tels. (81) 14424400 ext. 4448 | 83294000 ext. 7216, 7234
correo electrónico: spi.fc@uanl.mx

Clave: FOR-SPI-14; Revisión: 02; Página 1 de 1

TÍTULO DE LA TESIS

**“EVALUACIÓN GEOAMBIENTAL DE LA OPERACIÓN ACTUAL DE LA PRESA
“CERRO PRIETO” EN LOS PERIODOS DE LA SEQUÍA EXTREMA
2021 – 2024”**

Aprobación de la tesis

Dr. Héctor de León Gómez
DIRECTOR DE TESIS

Dr. Ricardo Alberto Cavazos González
CODIRECTOR DE TESIS

Dr. Vsévolod Yutis
ASESOR EXTERNO

Dr. Gerardo de Jesús Fajardo San Miguel
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRDO E INVESTIGACIÓN

DEDICATORIA

A las personas que más amo y admiro:

A mis padres, Linda E. Martínez Leal y Erbey Torres Silva, quienes han amado, cuidado y apoyado todos los días de mi vida, en cada uno de mis sueños y metas. Les estoy profundamente agradecida, los amo.

A mis hermanos, Óscar y Lily, responsables de mis alegrías y orgullo. Que este logro sea solo una prueba de que no existen límites cuando hay determinación y esfuerzo, sé que ustedes llegarán aún más lejos y aquí estaré para apoyarlos.

A mis abuelos, Martha e Hilario, pilares fundamentales en mi educación, gracias por guiarme y amarme.

A mi novio, Rodolfo, mi compañero durante gran parte de mi formación profesional y noches de desvelo. Gracias por tu paciencia, tu apoyo incondicional y por recordarme mis fortalezas en los días más difíciles. Tu amor y confianza en mí siempre me han motivado.

A mi mejor amiga, Karime, quien ha estado a mi lado desde la prepa, de manera incondicional, gracias por tu paciencia y por recordarme muchas veces que siempre hay tiempo para descansar y divertirnos.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología (CONAHCYT), por impulsar el desarrollo científico en México, brindándome una beca durante mi formación de maestría, la cual me permitió dedicarme plenamente a mis estudios e investigación.

A la Facultad de Ingeniería Civil de la UANL, por brindar programas de educación de posgrado y apoyar con el préstamo de vehículos oficiales para las salidas a campo.

A los investigadores involucrados en esta investigación, al Dr. Héctor de León Gómez por fungir como director de tesis, al Dr. Ricardo Alberto Cavazos González como codirector y al Dr. Vsévolod Yutsis como asesor externo; su dedicación, interés y asesoramiento a lo largo de esta investigación fueron clave para el desarrollo y mejora cada semestre.

Al Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT), por brindar el equipo y personal altamente capacitado para realizar la medición e interpretación geofísica.

A la CONAGUA, especialmente a la oficina en Linares, por su disponibilidad de acceso a la presa Cerro Prieto.

A mis compañeras de línea de investigación Mariana Pérez y Karla Medellín, por sus consejos, guía a lo largo de los semestres y principalmente por la amistad brindada y los buenos momentos.

A mis compañeros de cubículos, quienes se convirtieron en grandes amigos y fueron de gran apoyo en los momentos más desafiantes de la maestría, Adriana Álvarez, Julián Alfaro, Frank Trujillo, Ilse Álvarez, Carlos Caballero, Raúl Barragán, Paulina Barrera y Daniel de León.

A mis amigas Katia Alonso y Yaresi González, de lo mejor que me llevo de la FIC. Gracias por su amistad y apoyo siempre.

A los ejidatarios de Linares N.L., por su accesibilidad para realizar las mediciones piezométricas.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Capítulo 1 Generalidades	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Descripción del problema.....	11
1.3 Justificación del estudio	12
1.4 Hipótesis	13
1.5 Objetivos	14
1.6 Antecedentes	15
Capítulo 2. Marco teórico.....	18
2.1 Presas	18
2.2 Sequía.....	23
2.3 Geología e hidrogeología	30
2.4 Métodos Geofísicos.....	33
2.5 Geoindicadores ambientales.....	34
Capítulo 3. Características fisiográficas del área de estudio	39
3.1 Presa Cerro Prieto.....	39
3.2 Zona de estudio	41
3.3 Gran sequía 2021 – 2024.....	44
3.4 Geología.....	50
3.5 Hidrología	53
3.6 Hidrogeología.....	55
Capítulo 4. Método	58
4.1 Volúmenes de llenado de la presa	58
4.2 Cartas piezométricas del área de estudio	60
4.3 Filtraciones y zonas de humedales	64
4.4 Métodos geofísicos	65
4.5 Parámetros de la matriz de geoindicadores	72
Capítulo 5. Análisis y discusión de resultados.....	73
5.1 Relación de volúmenes de llenado con la evolución de la sequía y su impacto en el abastecimiento	73

5.2	Evolución de la piezometría y área de influencia aguas abajo de la cortina 77	
5.3	Evolución de filtraciones y zonas de humedales	87
5.4	Zonas con deformaciones en la cortina.....	120
5.5	Matriz ICOLD	136
Conclusiones y recomendaciones		143
	Conclusiones	143
	Recomendaciones	146
Bibliografía consultada.....		147
Anexos		159
	Anexo 1: Localización de vertedores en la Presa Cerro Prieto (de León, 1993).	160
	Anexo 2: Cartas a detalle de humedales	162
	Anexo 3: Desplazamientos Horizontales en Inclímetro I-1, Eje de Río, Eje Cortina	179
	Anexo 4: Asentamientos de testigos Superficiales en Corona y Cortina	182
	Anexo 5: Radagramas	186
	Anexo 6: Cartas de acceso al área de estudio	188
	Anexo 7: Matriz completa de la ICOLD en contexto de sequía.....	195

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 (ONU, 2015).	1
Figura 2. Objetivo No. 6 de los ODS (ONU, 2020).	2
Figura 3. Disponibilidad de agua en la Tierra (Macías,2024).	3
Figura 4. Ciclo Hidrológico (U.S. Geological Survey, 2022).	4
Figura 5. Elaboración propia con datos del Servicio Meteorológico Nacional (Aguilar Barajas et al., 2023).	5
Figura 6. Infraestructura hidráulica del AMM (Modificado de Aguilar Barajas et al., 2021).	6
Figura 7. Abastecimiento de agua mediante pipas en el AMM (Brooks, 2022).	7
Figura 8. Comparativa de la Presa Cerro Prieto en época ordinaria vs. sequía (Modificado NASA, 2022).	8
Figura 9. Localización de presas registradas en la base de datos de la ICOLD (ICOLD, 2023).	18
Figura 10. Capacidad de almacenamiento per cápita en 2020 (m ³ /hab) (Estadísticas del Agua en México CONAGUA, 2023 Y FAO 2023).	19
Figura 11. Principales presas en México 2022 (Nota: Únicamente se etiquetan las presas con capacidad al NAMO mayor a 1000 hm ³), (Modificado de CONAGUA, 2023).	21
Figura 12. Evolución del número de presas principales. Periodo 1990 a 2022 (CONAGUA, 2023).	22
Figura 13. Volumen de las presas principales (hm ³). Periodo de 1990 a 2022 (CONAGUA, 2023).	22
Figura 14. Afectaciones que puede causar una sequía hasta llegar a los impactos en la salud humana (Traducido por Linda Torres de Toreti et al., 2024).	23
Figura 15. Secuencia de sucesos de sequía y sus efectos para tipos de sequía comúnmente aceptados (Ortega-Gaucin, 2012).	24
Figura 16. Sequías más importantes registradas durante los años 2022 – 2024 con ejemplos de los mayores sistemas afectados (Toreti et al., 2024), Imagen traducida por Linda Torres.	26
Figura 17. Mapa de los climas de México (Elaborado por IMCO (2024) con información de la CONABIO, Catálogo de metadatos geográficos).	27
Figura 18. Ubicación geográfica de México (CONAGUA (2024) Elaborado con base en NASA 2016).	27
Figura 19. Categorías de sequía y Criterios Generales Promedio ante la Emergencia en los Programas de Medidas Preventivas y de Mitigación a la sequía (Banco de México, 2022).	28
Figura 20. Porcentaje de afectación por sequía en México acentuando período 2022 (modificado de MSM, 2023).	28

Figura 21. Tipos de acuíferos litológicos, 1. Acuífero de poros, 2. Acuífero de grietas, 3. Acuífero cárstico (modificado de Werner, 1996).	31
Figura 22. Medición de nivel freático de un pozo de abastecimiento (Werner, 1996).	32
Figura 23. Ilustración representativa del uso de microgravímetro (Flores, 2011).	34
Figura 24. Procedencia de un impacto ambiental mediante la valoración del medio natural (Garmendia-Salvador et al., 2005).	35
Figura 25. Diagrama de caracterización ambiental con enfoque interactivo (SEMARNAT, 2022).	36
Figura 26. Estructura interna de la cortina de la Presa Cerro Prieto en la sección máxima con perfil geológico en zona de ataguía (De León Gómez, 1993).	40
Figura 27. Principales Presas del estado de Nuevo León (modificado de Google Earth, 2023).	41
Figura 28. Provincias fisiográficas de México (modificado por Martínez-Vallejo (2007) de RAISZ, (1964)).	42
Figura 29. a) Precipitación histórica 1958-2023 (Elaborado con datos de SIH), b) Ubicación de estaciones hidrométricas (de León, 1993), c) Porcentaje de afectación por sequía (SMN, 2024).	43
Figura 30. Porcentaje de área con sequía en Nuevo León de los años 2003 – 2022 (Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, 2023).	44
Figura 31. Implementación de bombeo en presa Cerro Prieto junio 2022.	45
Figura 32. Presa Cerro Prieto al 0.5% de su volumen de llenado respecto al NAMO en julio 2022.	45
Figura 33. Evolución de la sequía en s estado más crítico del año en el periodo 2021 – 2024; destacando el color de los años acorde a la intensidad de sequía presente en el municipio de Linares, N.L. (SMN, 2024).	47
Figura 34. Evolución del patrón de la Tormenta Tropical Alberto (National Oceanic and Atmospheric Administration & National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center, 2024).	48
Figura 35. Presa Cerro Prieto al 109 % de llenado respecto al NAMO en julio 2024.	49
Figura 36. Río Santa Catarina durante la tormenta Tropical Alberto (TecScience & Becerril, 2024).	49
Figura 37. Columna estratigráfica de la SMO (Michalzik, 1988).	50
Figura 38. Formaciones geológicas presentes en el área de la Presa Cerro Prieto y zonas de fracturas localizadas (De León Gómez, 1993).	51
Figura 39. Formación San Felipe.	52
Figura 40. Formación Méndez.	52
Figura 41. Cuenca Hidrológica del Río Pablillo, la cual desemboca en la Presa Cerro Prieto (Dávila-Pórcel, 2011).	54

Figura 42. Disponibilidad media anual de acuíferos, marcado con una línea celeste el acuífero donde se encuentra la presa cerro prieto (modificado de CONAGUA, 2020).	55
Figura 43. Acercamiento al acuífero “citrícola sur” mostrando datos de disponibilidad media anual positiva y negativa (DMA), (modificado de CONAGUA, 2020).	56
Figura 44. Ejemplo del acuífero en el pozo CP-1 del área de estudio.	57
Figura 45. Esquema metodológico empleado en la investigación.	58
Figura 46. Vista de la página web de Monitoreo de Principales Presas de México (CONAGUA, 2024).	58
Figura 47. Ejemplo de medición de aprovechamientos hidráulicos en Cerro Prieto, empleando la sonda Solinist.	61
Figura 48. Ubicación de los aprovechamientos hidráulicos (modificado de Google Earth, 2023).	61
Figura 49. Ejemplo de campaña de medición en los 14 aprovechamientos hidráulicos.	62
Figura 50. Ejemplo de tabla elaborada en excel para calcular nivel piezométrico, datos primer campaña de medición.	63
Figura 51. Vista previa del programa ArcMap, para la elaboración de cartas piezométricas.	64
Figura 52. Ejemplo de imagen satelital de NDMI (Obtenida de Copernicus Browser, 2024).	65
Figura 53. Deformación de la cortina de la presa Cerro Prieto.	66
Figura 54. Imagen aérea de la cortina Cerro Prieto, donde se puede apreciar la vegetación presente en el talud (IPICYT, 2024).	66
Figura 55. Equipo Scintrex CG-5.	67
Figura 56. Estación base FCT, toma de medición 60 segundos.	67
Figura 57. Ejemplo de estaciones realizadas en la cortina, tiempo de toma 30 segundos.	67
Figura 58. Dirección de las líneas de medición con georadar (modificado de Google Earth, 2024).	71
Figura 59. a) Medición en georadar, b) antena RTA, c) Equipo georadar MALA.	71
Figura 60. Parámetros considerados en el inventario ambiental para el llenado de matriz.	72
Figura 61. Volumen de almacenamiento de la presa Cerro Prieto (Elaborado con datos de CONAGUA, 2024).	74
Figura 62. Extracción diaria de la Presa Cerro Prieto (Elaborada con datos de CONAGUA, 2024).	75
Figura 63. Contraste del volúmenes máximo y mínimo de los años 2021 - 2024 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).	76
Figura 64. Carta piezométrica del mes de marzo 2023.	79

Figura 65. Carta piezométrica a detalle del mes de marzo 2023.	80
Figura 66. Carta piezométrica del mes de junio 2023.	81
Figura 67. Carta piezométrica a detalle del mes de junio 2023.	82
Figura 68. Carta piezométrica del mes de enero 2024.	83
Figura 69. Carta piezométrica a detalle del mes de enero 2024.	84
Figura 70. Carta piezométrica del mes de julio 2024.	85
Figura 71. Carta piezométrica a detalle del mes de julio 2024.	86
Figura 72. . Filtraciones al pie de la Cortina (De León, 1993).	87
Figura 73. Carta de Humedales Volumen Máximo 2021 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).	89
Figura 74. Carta de Humedales Volumen Mínimo 2021 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).	90
Figura 75. Carta de Humedales Volumen Promedio 2021 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).	91
Figura 76. Carta de Humedales Volumen Máximo 2021 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).	92
Figura 77. Vertedor 3 en visita a campo en el mes de abril 2022, con 6.75 % de volumen de llenado.	93
Figura 78. Implementación de bombas flotantes en la presa.	93
Figura 79. Compuertas en el año 2021.	93
Figura 80. Vertedor 1 completamente seco en el mes de junio 2022, con 2.11 % de volumen de llenado de la presa.	94
Figura 81. Pie de la parte más alta de la cortina de la presa Cerro Prieto, completamente seca junio 2022.	95
Figura 82. Área de mayor influencia en zonas de humedales, junio 2022.	95
Figura 83. Carta de Humedales Volumen Mínimo 2022 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).	96
Figura 84. Carta de Humedales Volumen Máximo 2022 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).	97
Figura 85. Carta de Humedales Volumen Promedio 2022 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).	98
Figura 86. Carta de Humedales 2022 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).	99
Figura 87. PZ – 3 completamente inundado en el mes de marzo 2023 con 13 % de volumen de llenado de la presa.	100
Figura 88. Localización de filtraciones en V – 1, marzo 2023 con 13 % de volumen de llenado de la presa.	101
Figura 89. Zona de filtraciones al pie de la cortina con presencia de tule y carrizo, marzo 2023 con 13 % de volumen de llenado de la presa.	102

Figura 90. V – 2 completamente seco en marzo 2023 con 13 % de volumen de llenado de la presa.	102
Figura 91. V – 3 durante la campaña de medición de marzo 2023, con 13 % de volumen de llenado de la presa.	103
Figura 92. Manantial localizado aguas debajo de V – 3 en la medición de marzo 2023, con 13 % de volumen de llenado de la presa.	103
Figura 93. Vista hacia el pie de la cortina de la presa donde se observa la presencia de filtraciones.	104
Figura 94. V – 3 con presencia de filtraciones en el mes de junio 2023, con 17 % de llenado de la presa.	105
Figura 95. 1) Localización de manantial, 2) Amplitud del manantial, 3) Escurrimiento del manantial hacia aguas abajo 4) Influencia del manantial en el V – 3.	105
Figura 96. Carta de Humedales Volumen Mínimo 2023 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).	106
Figura 97. Carta de Humedales Volumen Máximo 2023 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).	107
Figura 98. Carta de Humedales Volumen Promedio 2023 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).	108
Figura 99. Carta de Humedales 2023 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).	109
Figura 100. Vista hacia el pie de la cortina con presencia de filtraciones enero 2024.	110
Figura 101. Vista hacia el pie de la cortina desde la parte más alta de la cortina de la presa, con 100.65 % de volumen de llenado.	111
Figura 102. Presencia de agua en la zona del V – 1, julio 2024.	111
Figura 103. V – 3 durante la visita julio 2024, volumen de presa 100.65 %	112
Figura 104. Localización de manantial en V – 3 en julio 2024.	113
Figura 105. Redireccionamiento del caudal hacia aguas abajo del V – 3.	114
Figura 106. Zona de humedal en el área del V – 3, julio 2024.	114
Figura 107. Carta de Humedales Volumen Mínimo 2024 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).	115
Figura 108. Carta de Humedales Volumen Máximo 2024 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).	116
Figura 109. Carta de Humedales Volumen Promedio 2024 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).	117
Figura 110. Carta de Humedales 2024 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).	118
Figura 111. Contraste de humedal máximo en 2024 y mínimo en 2022.	119
Figura 112. Inclonómetro fuera de servicio en la actualidad.	120

Figura 113. Desplazamientos horizontales reporte de comportamiento 1990 (SARH, 1990).	121
Figura 114. Asentamientos en la cortina de la presa Cerro Prieto (SARH, 1990).	122
Figura 115. Anomalía gravimétrica de Aire Libre, mGal.....	123
Figura 116. Anomalía gravimétrica de Bouguer, mGal.	123
Figura 117. Anomalía gravimétrica de Bouger, mGal (modificado de Google Earth, 2024).	125
Figura 118. Anomalía gravimétrica de Bouger, mGal contrastándola con las zonas mínimas y máximas de humedales (modificado de Google Earth, 2024).....	126
Figura 119. Interpretación de la línea de 50 MHz.	128
Figura 120. Interpretación de la línea de 50 MHz, hacienda una comparativa con el área de influencia de gravimetría.	129
Figura 121. Interpretación de la línea de 500 MHz.....	131
Figura 122. Interpretación de la línea de 500 MHz, haciendo una comparativa con el área de influencia de gravimetría.	132
Figura 123. Influencia del medio geológico para la interpretación de radagramas.	133
Figura 124. Detalle de sección de radagrama en la zona de influencia.	134
Figura 125. Detalle de sección de radagrama en la zona de influencia.	135

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Alternativas de fuentes de abastecimiento consideradas en el proceso robusto de toma de decisiones robustas (Clariond Reyes et al., 2016).	9
Tabla 2. TIPOS DE PRESAS Según su composición (Elaborado con información de la ICOLD, 2007).	19
Tabla 3. Presas en estado crítico por la sequía en 2024 (Elaborado con datos Hernández, J. & CONAGUA, 2024).	29
Tabla 4. Diferentes áreas de estudio geológico (Tarbuck et al., 2013).	30
Tabla 5. Conceptos de evaluación de Indicadores Ambientales en la Matriz de Grandes Presas (Leal, 1977).	38
Tabla 6. Datos generales de la Presa Cerro Prieto (CONAGUA, 2012).	40
Tabla 7. Precipitación anual en el estado de Nuevo León, láminas estimadas de enero a diciembre, valores expresados en milímetros (mm), (Elaborado con datos de la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional de los años 2017 – 2024).	44
Tabla 8. Aporte del Ciclón Tropical Alberto en las presas de Nuevo León (Bravo-Lujan, 2024).	49
Tabla 9. Evolución de volúmenes de la presa 2021 - 2024 (CONAGUA, 2024). ...	59
Tabla 10. Especificaciones de los aprovechamientos hidráulicos.	60
Tabla 11. Localización de las estaciones de microgravimetría en la cortina de la presa Cerro prieto.	68
Tabla 14. Datos empleados para obtención del parámetro C_elev Hinze.	69
Tabla 12. Datos empleados para obtención de parámetro G0 WGS84.	69
Tabla 15. Datos empleados para obtención de parámetro gobs.	69
Tabla 13. Datos empleados para obtención de parámetro G0 Hinze.	69
Tabla 16. Tabla de datos microgravimétricos procesados.	70
Tabla 17. Mediciones de aprovechamientos hidráulicos.	77
Tabla 18. Medición de piezómetros en la primera campaña de medición.	100
Tabla 19. Resultados de las correcciones de Aire Libre y de Bouger.	124
Tabla 20. Primera sección de la matriz de grandes presas llena en época de sequía.	139
Tabla 21. Segunda sección de la matriz de grandes presas llena en época de sequía.	140
Tabla 22. Tercera sección de la matriz de grandes presas llena en época de sequía.	141
Tabla 23. Cuarta sección de la matriz de grandes presas llena época de sequía.	142

GLOSARIO

Organismos, Instituciones y Programas

AMM – Área Metropolitana de Monterrey

CIGB – (En francés) Commission Internationale Des Grands Barrages

CIPA – Centro de Investigación en Producción Agropecuaria

CONABIO – Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad

CONAGUA – Comisión Nacional del Agua

DOF – Diario Oficial de la Federación

FAO – Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

ICOLD – International Commission On Large Dams (Comisión Internacional de Grandes Presas)

IDW – Método de interpolación ponderada por distancia inversa

IMCO – Instituto Mexicano para la Competitividad, A.C.

IMTA – Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

INEGI – Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática

IPICYT – Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica

MIA – Manifestación de Impacto Ambiental

MOPU – Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo

NAMO – Nivel de Aguas Máximas Ordinarias

NASA – National Aeronautics and Space Administration (Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio)

NDMI – Índice de Diferencia de Agua Normalizado

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration (Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica)

ODS – Objetivos del Desarrollo Sostenible

OMS – Organización Mundial de la Salud

ONU – Organización de las Naciones Unidas

PCGM – Planicie Costera del Golfo de México

PMPMS – Programas de Medidas de Prevención y Mitigación a la Sequía

SADM – Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey

SEMARNAT – Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

SIG – Sistema de Información Geográfica

SIH – Sistema de Información Hidrológica

SMN – Servicio Meteorológico Nacional

SMO – Sierra Madre Oriental

Unidades de medida

°C – Grados Celsius

cm – Centímetros

ha – Hectárea (10,000 m²)

hm³ – Hectómetro cúbico (Un millón de metros cúbicos)

km – Kilómetros

Km² – Kilómetros cuadrados

Km/h – Kilómetros por hora

l/s – Litros por segundo

m – Metros

m³ – Metros cúbicos

m³/hab – Metros cúbicos por habitante

m³/s – Metros cúbicos por segundo

mGal – Mili gales (1 mGal = 0.001 Gal)

Mm³ – Millones de metros cúbicos

msnm – Metros sobre el nivel del mar

μGal – Micro gales (1 μGal = 0.000001 Gal)

MW – Megavatio (Un millón de vatios)

mm – Milímetros

RESUMEN

El estado de Nuevo León atravesó por una sequía extrema de los años 2021 - 2024, la cual provocó una drástica disminución en los niveles de las fuentes de abastecimiento superficiales y subterráneas, causando una crisis hídrica en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM). La presente investigación considera a la presa José López Portillo “Cerro Prieto”, ubicada en el municipio de Linares, N.L., la cual fue la fuente superficial más afectada durante este periodo; con el objetivo de analizar e identificar la evolución y estado actual de la presa, en materia ambiental, hídrica y de operación durante la sequía extrema.

Cerro Prieto llegó a su agotamiento en 2022, causando la suspensión temporal de abastecimiento de agua potable al AMM; pero también presentó cambios en la evolución de filtraciones, la hidrodinámica del acuífero y estabilidad de la cortina durante esta sequía. Dicha evolución se estudia en la presente investigación con la aplicación de métodos hidrológicos, geológicos, hidrogeológicos, geofísicos y geoambientales.

Los alcances de esta investigación muestran la configuración hidrodinámica del acuífero en diferentes períodos con una notable diferencia en la época de sequía y extraordinaria, así como la relación directamente proporcional que existe entre el volumen de la presa, las filtraciones existentes, el aumento del nivel freático en los aprovechamientos hidráulicos aguas debajo de la cortina y la presencia permanente de zonas de humedales; los cuales se ven beneficiados con una mayor recarga al acuífero por la influencia del volumen de la presa, la evolución de estos se ve representada en una serie de cartas piezométricas y cartas de evolución de humedales. Estas filtraciones en el área de la cortina, han afectado su estabilidad y composición; se identificaron mediante métodos geofísicos las principales zonas de vulnerabilidad por anomalías en el gradiente hidráulico con microgravimetría y múltiples asentamientos diferenciales así como fallas y/o grietas en todo el cuerpo con el uso del georadar.

Finalmente, estos datos de evolución y estado actual se ven reflejados en una matriz de geoindicadores ambientales, siendo el aporte más significativo de la investigación identificar los impactos en la Presa Cerro Prieto y emitir una serie de recomendaciones para mejorar la gestión de los recursos hídricos, fortaleciendo los puntos débiles en la infraestructura actual y el almacenamiento de agua; con el propósito de prevenir, mitigar o erradicar parámetros geoambientales que pongan en riesgo el suministro de agua hacia el AMM, la agricultura presente en la zona, los ecosistemas y la economía.

ABSTRACT

The state of Nuevo León experienced an extreme drought from 2021 to 2024, leading to a drastic decline in the levels of both surface and groundwater supply sources, resulting in a water crisis in the Monterrey Metropolitan Area (AMM).

This research focuses on the José López Portillo "Cerro Prieto" Dam, located in the municipality of Linares, N.L., which was the most affected surface water source during this period. The study aims to analyze and identify the dam's evolution and current status in terms of environmental, hydrological, and operational conditions during the extreme drought.

Cerro Prieto reached depletion in 2022, causing the temporary suspension of potable water supply to the AMM. However, the drought also led to changes in the evolution of wetlands, the hydrodynamics of the aquifer, and the stability of the dam structure. This research examines these aspects through the application of hydrological, geological, hydrogeological, geophysical, and geo-environmental methods.

The findings of this study reveal the hydrodynamic configuration of the aquifer during different periods, showing a notable contrast between drought and extraordinary water conditions. Additionally, a directly proportional relationship was identified between the dam's volume, existing seepage, the increase in the phreatic level in hydraulic developments downstream of the dam, and the permanent presence of wetland areas. These seepage benefit from greater aquifer recharge influenced by the dam's volume, and their evolution is represented through a series of piezometric and wetland evolution charts.

Seepage in the dam area have affected its stability and composition. Geophysical methods were used to identify the main vulnerability zones due to anomalies in the hydraulic gradient through microgravity measurements, as well as multiple differential settlements, faults, and/or cracks throughout the dam structure using ground-penetrating radar (GPR).

Finally, the evolution data and current status are reflected in an environmental geo-indicator matrix, which constitutes the most significant contribution of this research. This matrix identifies the impacts on the Cerro Prieto Dam and provides a series of recommendations to improve water resource management by strengthening weak points in the current infrastructure and water storage system. The ultimate goal is to prevent, mitigate, or eliminate geo-environmental factors that could jeopardize water supply to the AMM, local agriculture, ecosystems, and the regional economy.

Capítulo 1 Generalidades

1.1 Introducción

El agua es pilar y sustento de todas las formas de vida, mantiene la seguridad ecológica, así como el de la civilización humana y la prosperidad económica entre las naciones. Sin embargo; el acelerado crecimiento poblacional, la expansión urbana sin límites, la transformación de la superficie terrestre por actividades humanas, las continuas innovaciones tecnológicas y el cambio climático han llevado a una crisis mundial del agua en calidad y cantidad para satisfacer las múltiples demandas que aumentan año con año; requiriendo mejores planes para una gestión integral de los recursos hídricos la cual beneficie a todas las partes involucradas especialmente al medio ambiente (He et al., 2020; Johnson et al., 2001; Lee, 2013).

En el año 2015, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) planteó la Agenda 2030, con 17 Objetivos para el Desarrollo Sostenible (ODS); formando un plan de acción que abarca temas de seguridad alimentaria, vida sana, educación de calidad, igualdad de género, acceso al agua y la energía, promover el crecimiento económico sostenible, acciones urgentes para combatir el cambio climático, promoviendo así la paz y el acceso a la justicia. En 2023, la evaluación de 140 metas demostró que la mitad de las metas se encuentran en un estado de moderado a gravemente desencaminadas a lograr los objetivos y el 30% de las metas no han presentado avance; por lo cual es necesario que el gobierno, empresas, sociedad civil, la ciencia, juventud, entre otros; redoblen esfuerzos para alcanzar cada una de las metas englobadas en los 17 objetivos (ONU, 2023).



Producido en colaboración con TROLLBACK COMPANY | TheGlobalGoals@trollback.com | +1 212 656 1010
Para cualquier duda sobre la utilización, por favor comuníquese con: @jcampes@trollback.com

Figura 1. 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 (ONU, 2015).

El objetivo 6 de los ODS, alberca uno de los desafíos más grandes del Siglo XXI, el cual es garantizar la disponibilidad del agua, su gestión sostenible y el saneamiento para todos; dentro de una de las 8 metas de este objetivo la 6.5 pretende implementar una gestión integrada de los recursos hídricos a todos los niveles promoviendo la cooperación y coordinación intersectorial con el fin de mejorar el abastecimiento, riego agrícola, generación de energía y preservación de la biodiversidad en los diferentes ecosistemas para enfrentar los efectos negativos del cambio climático y la escasez de agua (ONU, 2024).



Figura 2. Objetivo No. 6 de los ODS (ONU, 2020).

Las presas de almacenamiento de agua toman un papel relevante en la contribución de este objetivo ya que son consideradas infraestructura de vital importancia para el abastecimiento de agua potable; teniendo una mayor relevancia en lugares que experimentan temporadas de escasez de agua, inundaciones periódicas o sequías (López-Moreno et al., 2009). A pesar de los avances registrados entre 2017 y 2020, con el acelerado crecimiento poblacional de 49 a 54 sobre 100, la meta 6.5 del objetivo 6 de los ODS está muy lejos de ser alcanzada; de todos modos, los temas de mejorar la gestión del agua deben de ser acelerados para mejorar la resiliencia ante las constantes crisis climáticas, sanitarias y económicas que se puedan presentar al año 2030 (ONU, 2023).

Disponibilidad del agua.

La disponibilidad de los recursos hídricos está continuamente cambiando en todo el mundo, esto es a causa de que el ciclo del agua es dinámico y puede verse afectado por factores como los cambios hidro-climáticos causados por el calentamiento global y el consumo insostenible del agua (Rodell et al., 2018). De acuerdo con los datos, el promedio anual de disponibilidad de agua en todo el mundo es de 1386 billones de hm^3 ; sin embargo, el 97.5% de esa agua es salada y solo el 2.5% que equivale a 35 billones de hm^3 es dulce y casi el 70% de esta no está disponible para consumo (CONAGUA, 2023).

El uso final del agua dulce en el mundo está destinado en un 70% a la agricultura, 20% a la industria y para los usos domésticos y municipales un 12%, dentro de estos valores el agua subterránea juega un papel importante ya que proporciona el 25% del agua necesaria para la agricultura y la mitad para usos domésticos (World Water Assessment Programme, 2022, 2024).

Los mares y océanos son solo el 0,023% de la masa total del planeta

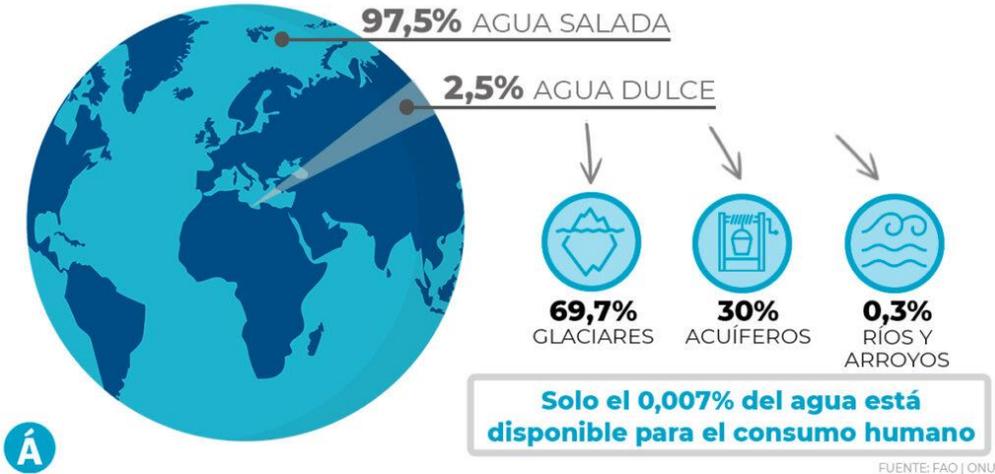


Figura 3. Disponibilidad de agua en la Tierra (Macías,2024).

El ciclo hidrológico detalla dónde se encuentra el agua en la Tierra y la dinámica de ésta, ya que se puede encontrar en la atmósfera, de manera superficial o en el subsuelo, en cualquiera de los tres estados. El agua se mueve en todas las escalas, tanto de forma natural o por las actividades humanas afectando los sitios de almacenamiento, la dinámica y su calidad (U.S. Geological Survey, 2022).

Se estima que para el año 2050, el calentamiento global cambie la dinámica del ciclo mundial del agua, aumentando la evapotranspiración, alteración de patrones espaciales, cantidad de precipitación y recarga del agua subterránea, causando afectaciones de un 42% a un 79% de las cuencas hidrográficas del mundo, intensificando la frecuencia de las sequías e inundaciones provocando así daños irreversibles en los ecosistemas (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023). En la figura 4, se muestra el ciclo hidrológico y la gran influencia que tienen las actividades humanas en él.

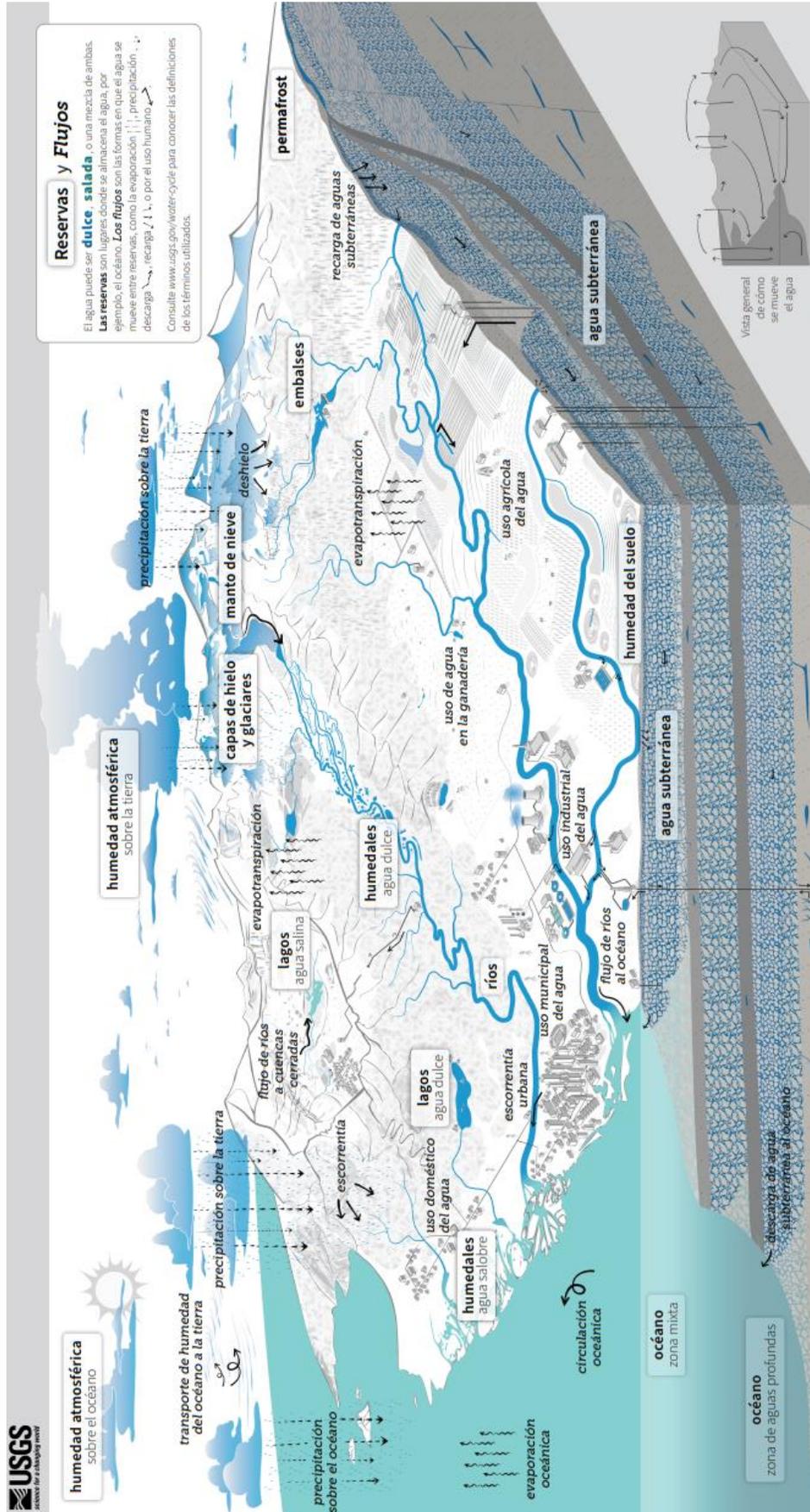


Figura 4. Ciclo Hidrológico (U.S. Geological Survey, 2022).

Situación actual del agua en Nuevo León.

El estado de Nuevo León presentó un repunte del 24.3% en su población de 2010 a 2020, principalmente por la migración de personas de otros estados en busca de mejores oportunidades de empleo, en una de las ciudades industriales con más inversión e importancia en México (Gobierno del Estado de Nuevo León, 2021). Es el 7° estado con mayor población del país albergando a más de 5.7 millones de habitantes a 2020 (INEGI, 2021); esto ha traído múltiples beneficios, pero también grandes retos y consecuencias medio ambientales, ya que al ser una de las mayores regiones urbanas se encuentra expuesta a una crisis ambiental en todos sus niveles (aire, agua y suelo), (Micheli, 2002).

El Área Metropolitana de Monterrey (AMM), por su ubicación geográfica y según la clasificación de Köppen se encuentra en una zona semiárida (BSh), lo cual indicaría que es un área con baja disponibilidad de recursos hídricos y una alta variabilidad interanual susceptible a fenómenos como sequías e inundaciones (Aguilar Barajas et al., 2021).

Estadísticas de precipitación obtenidas de 1991 a 2020, revelan que la precipitación media anual del estado de Nuevo León oscila en los 594 mm, mientras que el promedio nacional es 747.6mm, recibiendo aproximadamente 20% menos lluvia que México como país (Martínez Muñoz et al., 2023).

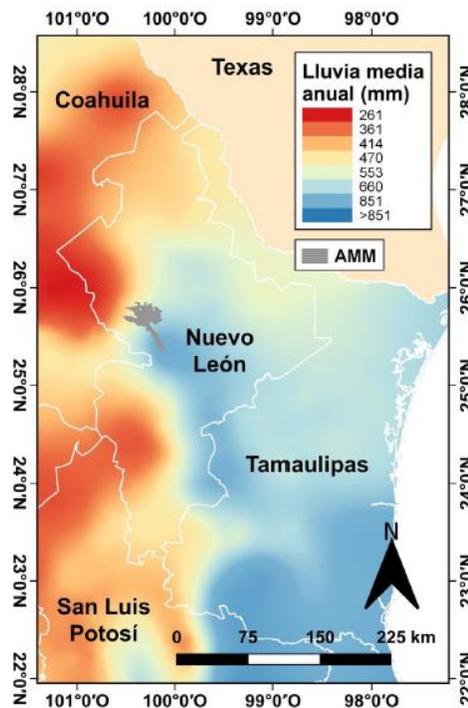


Figura 5. Elaboración propia con datos del Servicio Meteorológico Nacional (Aguilar Barajas et al., 2023).

Es por esta razón que ha sido necesario construir una extensa infraestructura; en el AMM, el suministro de agua potable es cubierto a través de las fuentes superficiales en un 67% por las presas Rodrigo Gómez “La Boca” con un NAMO de 39.5Mm³, José López Portillo “Cerro Prieto” con 300 Mm³ y Cuchillo-Solidaridad “El Cuchillo” con 1123 Mm³, brindando a Monterrey una capacidad total de 1462.5 Mm³ y subterráneas en un 33% con el sistema de pozos profundos y someros Buenos Aires, Mina y Monterrey, además del manantial la Estanzuela, los túneles Cola de Caballo I y II y San Francisco; aunque estos datos varían según la disponibilidad hídrica (Aguilar Barajas et al., 2021; Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, 2024).

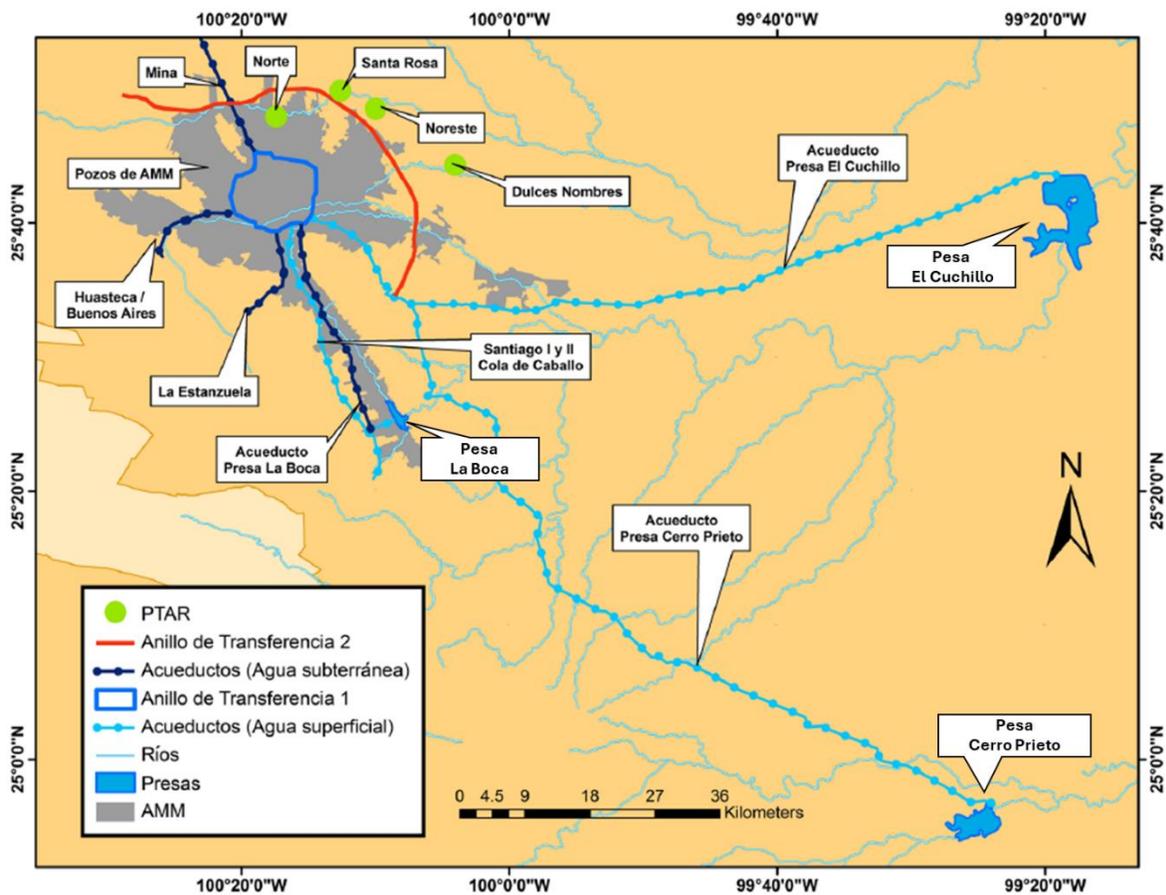


Figura 6. Infraestructura hidráulica del AMM (Modificado de Aguilar Barajas et al., 2021).

Desde el año 2016, inició una crisis hidrológica en la cuenca del Río San Fernando, la cual continuó y durante 2021 – 2022, los efectos de una crisis del agua fueron notorios en el AMM; otra de las causas de esta crisis fue la falta de continuidad a proyectos como Monterrey IV (el segundo acueducto de la Presa El Cuchillo) generando una crisis hidráulica y por último una crisis de gobernabilidad en el sector hídrico (Martínez Muñoz et al., 2023).



Figura 7. Abastecimiento de agua mediante pipas en el AMM (Brooks, 2022).

Para inicios del año 2022, la crisis hídrica estalló dejando a la población en un estado vulnerable después de veintiún años de servicios de abastecimiento de agua ininterrumpidos (Martínez Muñoz et al., 2023). En febrero de ese mismo año, el Diario Oficial de la Federación publicó el decreto por el que se establece el plan de acción inmediata para atender la emergencia por el desabasto de agua potable para uso público urbano y doméstico en los municipios afectados por baja disponibilidad en sus fuentes de abastecimiento y por sequía en el estado de Nuevo León (DOF, 2022). Se implementaron acciones emergentes como el programa de pipas que llegó a suministrar más de 440 unidades diarias a los habitantes que menos tenían alrededor del AMM (Martínez Muñoz et al., 2023).

Sin embargo, las extremas consecuencias de esta crisis se pudieron evitar o aminorar, debido a que desde el año 2017, Nuevo León formaba parte de la lista de estados que eran más propensos a experimentar el fenómeno de sequía; donde se catalogó a Nuevo León con 0.7 del índice de seguridad hídrica, en un intervalo de 0 a 1, donde la tendencia a 0 es la más crítica (Rodríguez Varela et al., 2017). Aunque este intervalo excluye a la infraestructura disponible para el abastecimiento de agua y el tipo de gestión del agua en la AMM, la cual ha priorizado obras secundarias y manteniendo en mala gestión del agua a las fuentes de abastecimiento, cuencas hidrológicas y acuíferos (Martínez Muñoz et al., 2023).

Tomando como ejemplo en esta investigación a la presa José López Portillo “Cerro Prieto” ubicada en el municipio de Linares, Nuevo León, debido a que fue uno de

los embalses más afectados por la sequía en Nuevo León en el año 2022, llegando al 0.5% de su capacidad total en julio del mismo año (NASA, 2022).

Agua y Drenaje de Monterrey anunció en julio 2022 que la presa Cerro Prieto dejaría de bombear agua a la zona metropolitana de Monterrey por un período de 3 meses, causando un déficit hídrico y falta del vital líquido en el desarrollo social, político y económico en su población (Flores, 2022).



Figura 8. Comparativa de la Presa Cerro Prieto en época ordinaria vs. sequía (Modificado NASA, 2022).

Aunado a los bajos niveles que se presenta la presa Cerro Prieto, esta cuenta con deficiencias en su capacidad de almacenamiento, ya que presenta filtraciones localizadas al pie de la cortina y los diques, ocasionadas por el efecto del fracturamiento hidráulico, las pérdidas promedio por filtraciones existentes en el año de 1993 fueron de 1 m³/s, estas filtraciones repercuten en la demanda de agua potable, el suministro real que proporciona la presa y la estabilidad de la obra hídrica (De León Gómez & Schetelig, 1996). Incluso en el mes de marzo 2024 la sequía continuaba y se registraban los peores valores en conjunto de las presas Cerro Prieto, La Boca y El Cuchillo, desde 2013; por este motivo la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), exhortaba a Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM) a tener un plan de manejo responsable (Villasáez, 2024).

Si bien se tiene un Plan Hídrico Nuevo León 2050, el cual proyecta que las demandas a futuro son superiores a la oferta actual y propone un incremento de la oferta con diversas alternativas, como se muestra en la Tabla 1. Estas opciones son costosas y propuestas a mediano y largo plazo (Clariond Reyes et al., 2016).

Tabla 1. Alternativas de fuentes de abastecimiento consideradas en el proceso robusto de toma de decisiones robustas (Clariond Reyes et al., 2016).

No.	Descripción	Tipo de fuente	Q diseño (m ³ /s)	Costo de inversión (millones de MXN)	Costo de operación (millones de MXN)	Robustez
1	Acueducto Cuchillo II	Superficial	5.0	7047	2150	Baja
2	Presa Vicente Guerrero	Superficial	5.0	12373	3538	Mediana
3	Subálveo del Río Pilón La Unión-Gral. Terán	Subterránea	0.5	863	167	Baja
4	Subálveo del Río Conchos	Subterránea	0.5	233	107	Baja
5	Túnel San Francisco II-Sistema Santiago	Subterránea	0.3	360	21	Baja
6	Campo de Pozos El Pajonal	Subterránea	0.3	235	44	Baja
7	Presa La Libertad	Superficial	1.5	3200	480	Baja
8	Pozo en el Obispado	Subterránea	0.6	27	51	Baja
9	Pozos Monterrey y Contry Sol	Subterránea	0.1	30	20	Baja
10	Pozos Ballesteros, La Escalera y Montero Acuífero Buenos Aires	Subterránea	0.5	740	83	Baja
11	Subálveo del Río Pilón	Subterránea	0.3	61	46	Baja
12	Pánuco -Monterrey	Superficial	5.0	22103	4815	Alta
13	Desalinizadora Matamoros	Superficial	5.0	21103	7014	Muy Alta
14	Proyecto de inyección inducida de agua residual tratada	-	1.0	2000	966	Muy Alta
15	Proyecto de reducción del Agua No Contabilizada	-	1.0	1800	206	Muy Alta

Lo anteriormente expuesto, evidencia la necesidad de crear estrategias y acciones más asequibles enfocadas en disminuir los impactos negativos de una sequía, debido a que la frecuencia de estos fenómenos aumentará y se deben incluir más y mejores prácticas en el uso eficiente del agua, especialmente el manejo de presas antes y durante una sequía (Breña Naranjo, 2021).

En tal sentido, uno de los objetivos principales del estado de Nuevo León, así como del resto de México, es alcanzar una mayor seguridad hídrica para poder afrontar de mejor manera los retos presentes y futuros como lo son la escasez del agua, la contaminación de los cuerpos de agua, fenómenos hidrometeorológicos extremos como lo son grandes inundaciones y sequías, así como el deterioro ambiental de las cuencas y acuíferos para lograr cubrir la creciente demanda de agua (Rojas Rueda & Tzatchkov, 2022).

Así pues, ver las necesidades regionales y locales, proporcionara los factores clave para una mejor gestión del agua. En la presente investigación, se tomará como caso de estudio a la Presa Cerro Prieto; la metodología a aplicar en esta investigación serán geológicas, hidrogeológicas, geofísicas y ambientales; destacando la importancia de determinar el estado actual de la cortina de la presa afectada por filtraciones, almacenamiento y suministro nulo, deformación e inestabilidad, factores que podrían propiciar un colapso hidráulico.

Finalmente, la presente investigación aportará los indicadores ambientales enfocados en presas en época de sequía para determinar las causas y los efectos del cambio climático, teniendo así alternativas de cómo aminorar estos efectos, reduciendo el impacto negativo en el suministro de agua potable al AMM y proponiendo mejoras para la gestión del agua y seguridad en la Presa Cerro Prieto.

1.2 Descripción del problema

La presa Cerro Prieto, ubicada en Linares, N.L., representa la segunda fuente superficial de las tres fuentes que cubre gran parte del suministro de agua potable para la ciudad de Monterrey y su área conurbada. Desde su construcción en 1982 hasta la fecha, ha suministrado 4.1 m³/s a la población de Monterrey y su periferia (De León, 1993). Dicho suministro se vio interrumpido por la gran sequía del año 2022, la que generó el cierre total de abastecimiento de agua, por un período de más de 3 meses, ocasionando graves problemas en los sectores social, político y económico de la población de Monterrey y el estado de Nuevo León.

Aunado a lo anterior, es necesario realizar una serie de estudios geológicos, hidrogeológicos, geofísicos y ambientales; que arrojen el estado actual de la misma, especialmente la identificación de zonas de humedales y de filtraciones, estabilidad de la cortina, el impacto ambiental en el suministro y la prevención de un llenado repentino, acorde con las condiciones climatológicas, que podrían causar un colapso hidráulico, dependiendo de los resultados a obtener de la presente investigación.

El problema dirige esta investigación mediante las siguientes preguntas:

1. ¿Cómo afectó la sequía del 2021 - 2024 al suministro de agua para el Área Metropolitana de Monterrey? ¿Es probable que esta crisis se repita en años futuros?
2. ¿Se vio afectada la estabilidad de la cortina por el volumen mínimo de almacenamiento del vaso y a la vez del cero suministro?
3. ¿Se modificaron los patrones de filtración durante la sequía?; ¿Cómo fue el comportamiento hidrodinámico en la sequía?; ¿El volumen de la presa tiene relación con el área de filtraciones aguas abajo de la cortina?
4. ¿Se modificaron de manera negativa los ecosistemas presentes en el área del vaso y la cuenca de la presa Cerro Prieto?

1.3 Justificación del estudio

Según estudios anteriores, la presa Cerro Prieto, presenta una cantidad considerable de filtraciones aguas debajo de la cortina, laterales y en el vaso de la presa; estas pérdidas de volumen son de gran importancia debido a que la presa fue una de las fuentes superficiales más afectadas por la sequía 2021 - 2024, teniendo su punto más crítico en el año 2022, llegando a su agotamiento y nulo suministro al abastecimiento de agua a la ciudad de Monterrey y su área metropolitana. El periodo de sequía, ha causado graves afectaciones en Monterrey y su área metropolitana por la crisis hídrica que se presenta continuamente y una crisis ambiental en el área de estudio.

La importancia de este trabajo de investigación, radica en identificar los parámetros de impacto ambiental provocados por la sequía mediante una matriz de geoindicadores ambientales, así como conocer la evolución de las filtraciones y zonas de humedales durante esta época y localizar las áreas de deformación actual de la cortina de la presa; con el fin de contribuir a una mejor gestión del agua, su buen aprovechamiento hidráulico y la seguridad de la presa.

1.4 Hipótesis

La Presa Cerro Prieto en Linares, Nuevo León; se vio afectada por la sequía extrema y prolongada de los años 2021 - 2024. Se presume que esta sequía causó impactos ambientales en el área de estudio; además de cambios en la hidrodinámica del acuífero, la evolución de filtraciones y la deformación de la cortina; por lo cual es importante identificar los parámetros de impacto ambiental en la presa durante la sequía, para prevenir y mitigar los efectos negativos de la misma.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Analizar y evaluar el impacto ambiental de la sequía (2021-2024) en la presa Cerro Prieto y sus efectos reflejados en la suspensión temporal de abastecimiento de agua potable, evolución de filtraciones y estabilidad de la cortina; aplicando métodos hidrológicos, geológicos, hidrogeológicos, geofísicos y ambientales.

1.5.2 Objetivos específicos

1. Identificar las características geológicas-estructurales de la zona de estudio; las condiciones de fracturamiento y fallas geológicas, que permiten las filtraciones.
2. Analizar los volúmenes de almacenamiento del vaso de la presa y su evolución en época de sequía, para relacionarlos con el impacto en el abastecimiento de agua al Área Metropolitana de Monterrey.
3. Realizar mediciones de los niveles freáticos en los aprovechamientos hidráulicos (pozos, norias, papalotes, manantiales) de la periferia del vaso de la presa, para identificar su evolución en época de sequía y extraordinaria, obteniendo cartas piezométricas.
4. Identificar zonas de filtraciones y humedales aguas abajo de la cortina, comparando la influencia que tienen los volúmenes de la presa durante los años 2021 - 2024.
5. Realizar mediciones geofísicas en la cortina, para identificar zonas con anomalías.
6. Obtener los parámetros ambientales “in situ” de la Matriz de Indicadores Ambientales (ICOLD, 1989) en el vaso y cuenca de la presa, para identificar los impactos ambientales provocados por la sequía extrema en la presa.

1.6 Antecedentes

Geología

En 1993, De León Gómez comenzó las investigaciones de la Presa José López Portillo, donde fue de gran importancia describir la geología del lugar ya que la presa se encuentra ubicada sobre dos formaciones geológicas, es por ello que el aporte ingeniero geológico fue indispensable para comenzar a estudiar los otros factores que involucran a la presa. Más tarde, en 1996, De León Gómez & Schetelig, determinaron el fracturamiento hidráulico de la presa Cerro Prieto en la serie de discontinuidades geológico-tectónicas de la formación San Felipe y Méndez, aunado al gradiente hidráulico del vaso sobre la cortina.

Hidrología

En 1993, De León Gómez determinó el aporte real de la presa Cerro Prieto, así como su balance hidrológico para conocer su estado de operación. Tiempo después de León Gómez et al., en 1998, evaluaron el estado de operación de las fuentes superficiales presas el Cuchillo, Cerro Prieto y la Boca, así como las fuentes subterráneas, con la finalidad de incrementar el suministro de agua para Monterrey.

Filtraciones

La evolución de las filtraciones es uno de los puntos más destacables dentro de la presente investigación, ya que se cuenta con antecedentes de la presencia de filtraciones desde su construcción, superando las filtraciones permisibles; De León Gómez, en 1993, investigó las pérdidas por filtración de la presa Cerro Prieto a través de estudios hidrológicos, ingeniero geológicos e hidrogeológicos de la cortina y los diques 1 y 2; así como calculó la estabilidad de la cortina a un posible colapso hidráulico. Se propusieron recomendaciones para el saneamiento de dicha obra hidráulica. De León Gómez et al., en 1994, investigaron las pérdidas por filtración de la presa Cerro Prieto y propusieron una serie de recomendaciones para su reducción y recuperación para aumentar el suministro de agua hacia Monterrey.

No sólo el área de la cortina de la presa se ha visto afectada en los últimos años, sino que también se cuenta con otros sistemas de filtraciones laterales como los que investigó Martínez Vallejo, en 2007, quien analizó las filtraciones laterales de la presa Cerro Prieto con fines de su recuperación, para incrementar el suministro de agua para Monterrey.

Hidrogeología

Identificar el agua subterránea del área de estudio es importante, ya que al realizar cartas piezométricas esto permitirá tener un paradigma más amplio de las direcciones del agua subterránea y su calidad. Lizárraga-Mendiola et al., en 2005, realizaron la evaluación del impacto ambiental del acuífero de poros-gravas generado por los desechos sólidos del tiradero municipal de Linares en la cuenca de la presa. Posteriormente, Lizárraga Mendiola et al., en 2006, investigaron la calidad del agua subterránea en la parte Este de la cuenca del río Pablillo, afectada por la infiltración de los desechos sólidos del tiradero de Linares afectando directamente la calidad del agua de la presa Cerro Prieto.

Dávila Pórcel, en 2011, aplicó métodos de hidrogeología urbana para obtener el desarrollo sostenible de la cuenca baja del Río Pablillo. Dávila Pórcel & De León Gómez, en 2011, describieron la hidrogeología urbana de la cuenca baja del Río Pablillo y su impacto en la presa Cerro Prieto. Dávila Pórcel et al., en 2012, investigaron el impacto urbano de la evolución hidrogeológica e hidrogeoquímica del agua subterránea en el acuífero de Linares.

Lizárraga-Mendiola et al., en 2013, investigaron la influencia natural y antropogénica en la calidad del agua subterránea en el área del tiradero municipal de Linares y la Petaca, la cual afecta la calidad del agua subterránea.

Dávila-Pórcel & De León-Gómez, en 2013, investigaron el origen y la hidrogeoquímica del agua subterránea a través de cartas SIG en la cuenca baja del Río Pablillo, en Linares.

Dávila Pórcel et al., en 2014, investigaron la vulnerabilidad por contaminación de nitratos en la cuenca baja del Río Pablillo, a través de métodos DRASTIC y SIG. De León-Gómez et al., en 2015, investigaron la calidad de las aguas superficial y subterránea impactada por los lixiviados del relleno sanitario municipal de Linares y su conexión hidráulica con la presa Cerro Prieto.

Martínez Solís, en 2016, investigó el impacto de la sequía del 2011 en el acuífero de grietas de la formación Méndez en el CIPA-UANL.

De León-Gómez et al., en 2020, investigaron la contaminación del agua subterránea por nitratos y metales pesados en el área del CIPA/Linares y su conexión hidráulica con la cuenca del Río Pablillo.

Geofísica

A través de métodos geofísicos se pueden conocer diversos factores ya que se usan métodos indirectos, por ejemplo, Izaguirre Valdez, en 2008, realizó el análisis hidrogeofísico de la presa Cerro Prieto, aplicando métodos de gravimetría, magnetometría y sísmica de refracción para obtener la estructura geológica del vaso de la presa.

Yutsis et al., en 2009, emplearon métodos gravimétricos y magnéticos para determinar las características estructurales de las formaciones Méndez y San Felipe en el vaso de la presa Cerro Prieto, como fuente superficial importante de almacenamiento.

Estrada Solís & Perales Martínez, en 2010, aplicaron métodos sismo-estratigráficos para determinar la geología del fondo de la presa Cerro Prieto y recalcular el volumen actual de almacenamiento de la presa.

Yutsis et al., en 2014, realizaron un estudio de sísmica de alta resolución para determinar los espesores de los sedimentos (azolves) en el vaso de la Presa Cerro Prieto y las pérdidas por filtración vertical, aunado a las fallas geológicas y su impacto en el balance hidrológico de la presa y el abastecimiento a la ciudad de Monterrey.

Indicadores geoambientales

En 2006, De León Gómez et al., elaboraron la matriz de impacto ambiental en la presa Cerro Prieto, la cual analizaba los parámetros ambientales causa-efecto existentes en la zona; sin embargo, en esta matriz no se consideró el efecto de la sequía y tampoco se llegó al suministro nulo de la presa, la cual no ha tenido ninguna actualización desde entonces.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Presas

Una presa se puede definir como un tipo de barrera colocada comúnmente de manera artificial para retener o controlar un caudal de agua o cualquier material transportado por el agua. Estas pueden variar en tamaño y tipo de estructura (ICOLD CIGB, 2007). En 2023, se registraron más de 62,000 presas en todo el mundo (ICOLD CIGB, 2023).

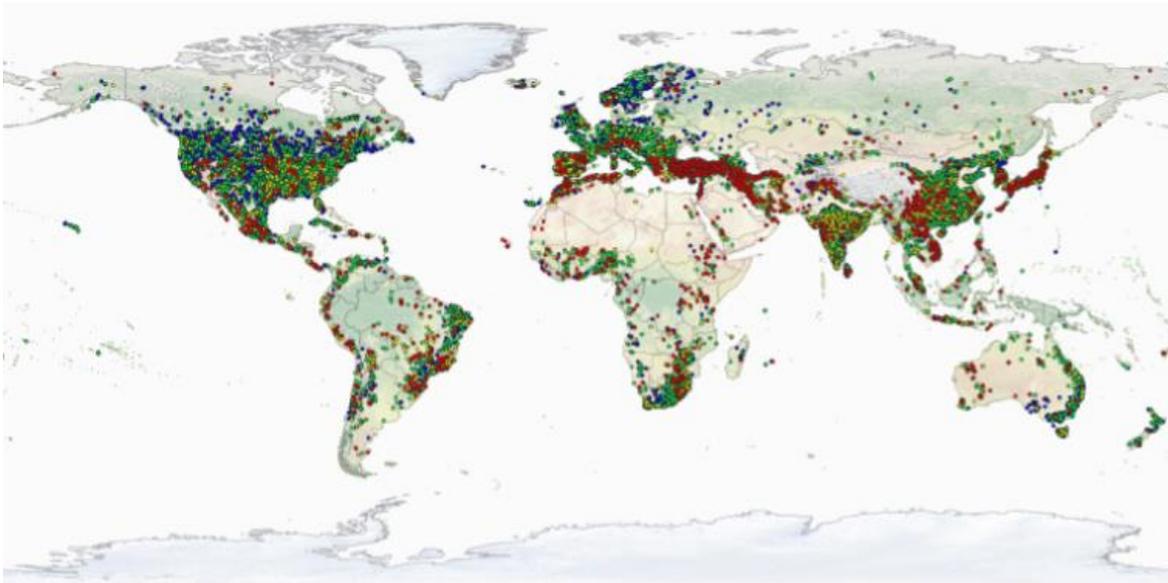


Figura 9. Localización de presas registradas en la base de datos de la ICOLD (ICOLD, 2023).

En la antigüedad, las civilizaciones crearon las presas para abastecimiento e irrigación. Cuando la sociedad avanzó era necesario construir las presas con un motivo específico, como el abastecimiento de agua, control de avenidas, irrigación, navegación, control de sedimentos y generación de energía hidroeléctrica (ICOLD CIGB, 2024). Este tipo de estructuras se sigue usando en la actualidad con múltiples propósitos, la capacidad de almacenamiento de cada país, está relacionada con el desarrollo hidráulico de los países y es un indicador que permite la valoración per cápita, acorde con datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO), México se encontró en el año 2022 en el lugar No. 38 en el nivel mundial en capacidad de almacenamiento per cápita de 1,181 m³/hab (CONAGUA, 2023).

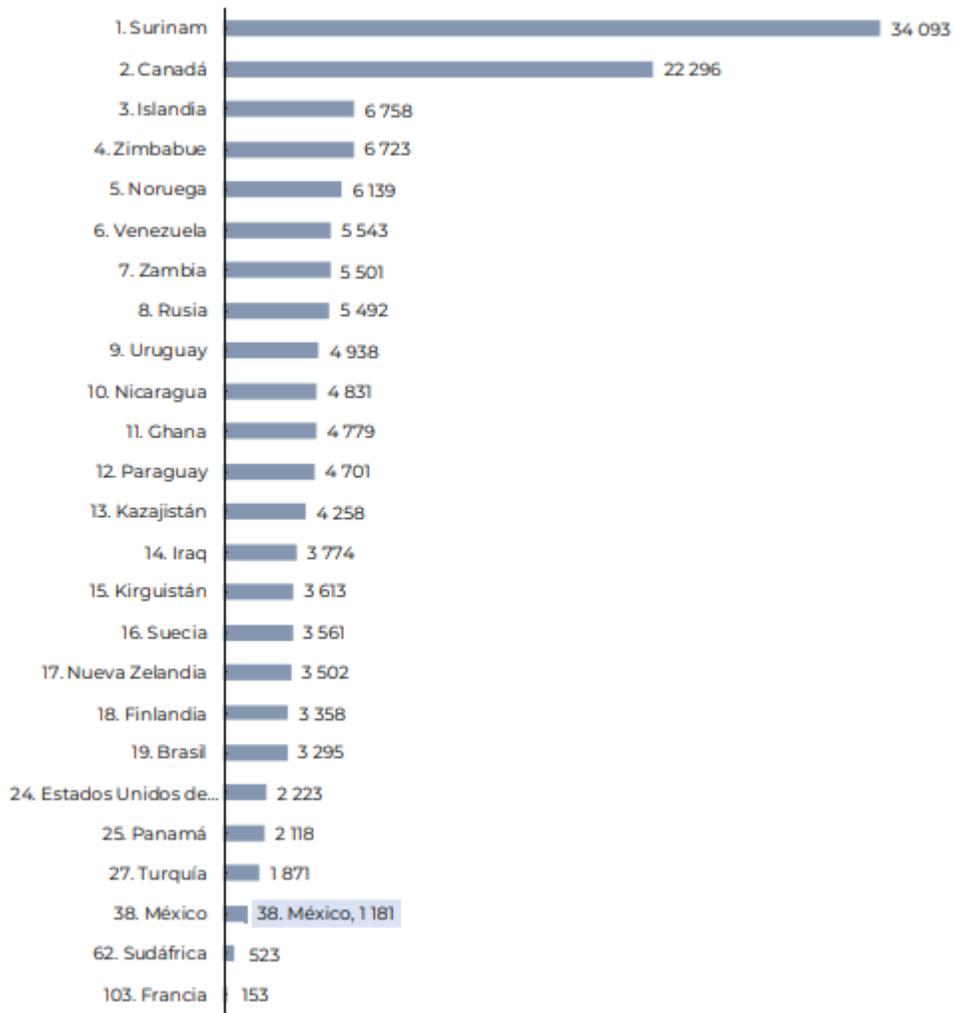


Figura 10. Capacidad de almacenamiento per cápita en 2020 (m³/hab) (Estadísticas del Agua en México CONAGUA, 2023 Y FAO 2023).

Acorde con la ICOLD, existen diferentes tipos de presas según la composición de sus materiales (concreto, enrocamiento, mampostería, tierra, entre otros materiales) estas son construidas dependiendo de las características de la zona y el uso final que vayan a tener estos tipos se definen en la tabla a continuación.

Tabla 2. TIPOS DE PRESAS Según su composición (Elaborado con información de la ICOLD, 2007).

Tipo de presa	Definición
Presa bóveda	Presa de concreto o mampostería curvada hacia aguas arriba con la finalidad de que el mayor empuje de agua se transmita a las laderas. Puede ser de una o múltiples bóvedas.

Presa de contrafuertes	Presa en la que el muro aguas arriba se apoya en una sucesión de contrafuertes; aguas arriba la losa es plana y puede llegar a tener bóvedas en los contrafuertes.
Presa de derivación	Presa cuyo objetivo es derivar el agua hacia otra dirección.
Presa de escollera	Presa de materiales sueltos, su composición es de 50 % de bloques compactados o vertidos de rocas en fragmentos superiores a 10 cm.
Presa de gravedad	Presa de concreto o mampostería cuya estabilidad es debida a su propio peso.
Presa de Concreto	Presa de gravedad compactada con rodillo construida a base de concreto in situ.
Presa de mampostería	Presa construida principalmente en piedras o ladrillos con juntas de mortero. Solo es aplicable a presas con una cara de mampostería.
Presa de materiales sueltos	Presa construida con materiales naturales extraídos del mismo lugar de la construcción (Presa de tierra o escollera).
Presa de tierra	Presa construida a base de materiales sueltos con más de 50 % de tierra compactada.

Las presas más grandes del mundo dependen de los factores que se tomen en cuenta, por ejemplo, la capacidad de almacenamiento, el volumen del material utilizado, la altura de la cortina o su aportación energética (Valdivielso, 2024).

En cuanto a almacenamiento, la presa Kariba en Zambia, tiene 180,600 hm³ de capacidad de volumen (Mignes, 2013). Pero respecto a la altura de la cortina la presa Rogun en Tajikistan tiene el record con 335 m, sin embargo, sigue en proceso de construcción y el segundo lugar lo tiene la presa Shuangjiangkou en China con 315 m de altura (ICOLD CIGB, 2015). En el mayor número de materiales empleados para su construcción está la presa Syncrude Tailings Dam en Canadá la cual necesito de 540,000,000 m³ de material para su construcción (ICOLD, 2015). Finalmente, la presa de las tres gargantas en China, se considera la que tiene una mayor capacidad de generación de energía hidroeléctrica con 22,500 MW de capacidad (Valdivielso, 2024).

En el caso de México, existen alrededor de 6500 presas y bordos libres; algunas son clasificadas como grandes presas de acuerdo con la clasificación de la ICOLD. Se tiene aproximadamente una capacidad de almacenamiento de 150 mil hm³, en el año 2022 se contabilizaron 2010 presas principales las cuales en esa fecha representaron un 85% del almacenamiento en el nivel nacional (CONAGUA, 2023). Este volumen de almacenamiento nacional varió acorde a las condiciones climatológicas (sequía e inundaciones) en la Figura 13, se muestran los principales descensos en los años 2002, 2012 y cómo la tendencia es a la baja desde el año 2017, evidenciando las fuertes y prolongadas sequías en el nivel nacional y la afectación que éstas han causado en las presas de almacenamiento de agua en México.

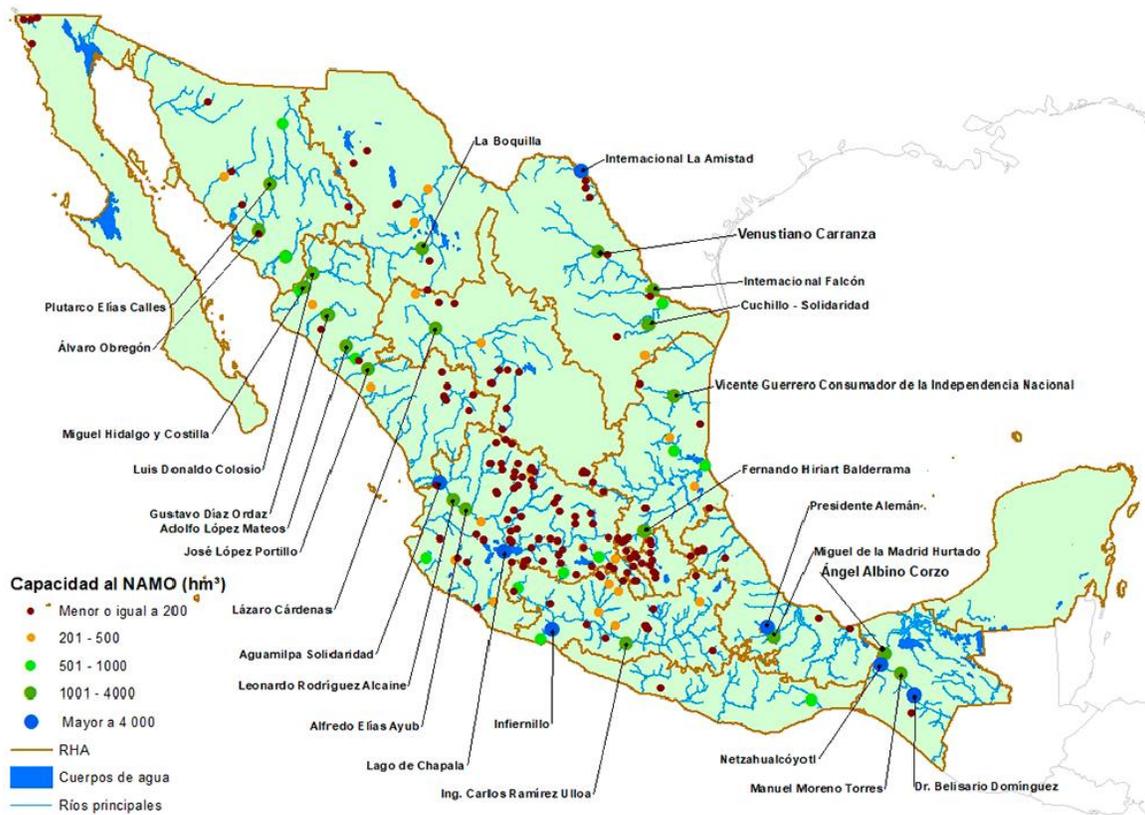


Figura 11. Principales presas en México 2022 (Nota: Únicamente se etiquetan las presas con capacidad al NAMO mayor a 1000 hm³), (Modificado de CONAGUA, 2023).

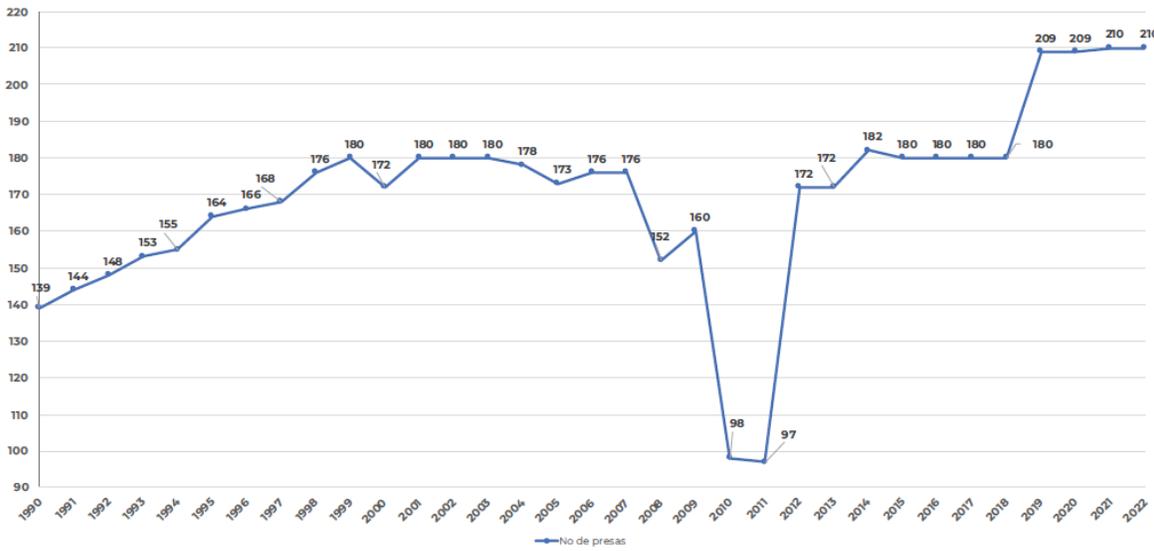


Figura 12. Evolución del número de presas principales. Periodo 1990 a 2022 (CONAGUA, 2023).

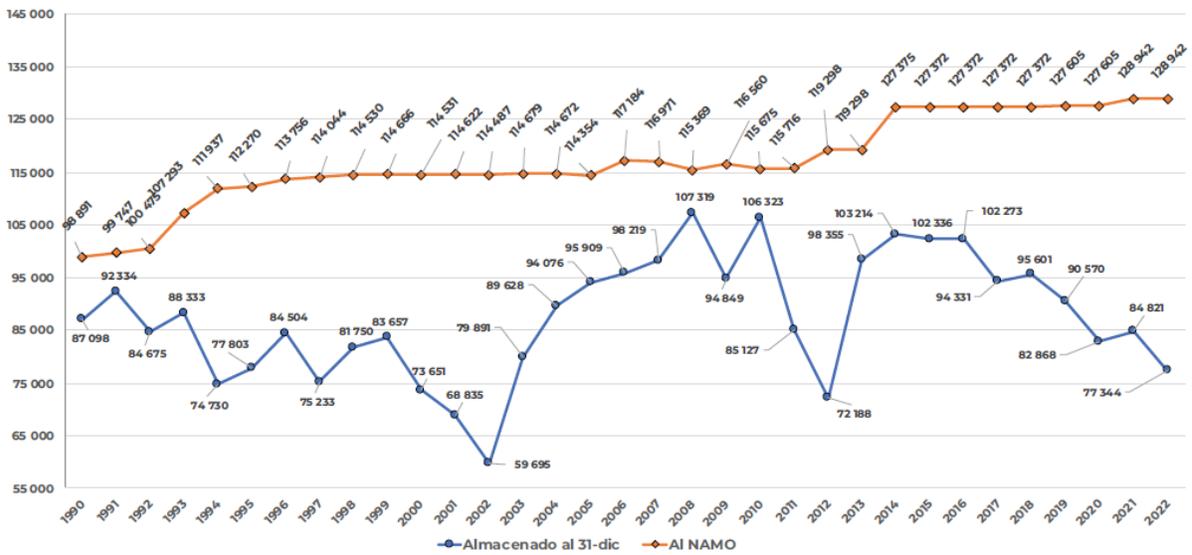


Figura 13. Volumen de las presas principales (hm³). Periodo de 1990 a 2022 (CONAGUA, 2023).

2.2 Sequía

En la actualidad, la sequía es uno de los fenómenos y peligros naturales menos comprendidos debido a que sus causantes son por múltiples factores como el cambio climático, el crecimiento poblacional desmedido y la sobreexplotación de los recursos hídricos (Eslamian & Eslamian, 2017).

Ésta se puede definir como un fenómeno natural de aparición lenta ocasionado por la falta de precipitaciones en una zona, causando períodos secos prolongados. Sus efectos suelen ser devastadores para la sociedad, la agricultura, los ecosistemas y la economía (World Meteorological Organization, 2024). En una definición más extensa, la sequía puede ser definida como la deficiencia de precipitación durante un período de tiempo prolongado usualmente una temporada o más, la cual causa impactos a la flora, la fauna y a las personas. Es considerada como una aberración temporal de las condiciones climáticas normales, variando de una región a otra y es diferente a la aridez que es diferente a las características permanentes de una zona. En la práctica, la sequía se define de diversas maneras según las perspectivas e intereses como lo son: sequía meteorológica, sequía agrícola y sequía hidrológica (NOAA, 2006). Cada año, las sequías se incrementan de una manera más severa, causando afectaciones a la vida humana y a la integridad de los ecosistemas. Las sequías, en combinación con un mal manejo del agua, causan crisis alimentarias, riesgos en la salud, limitaciones en la generación de energía hidroeléctrica, así como afectaciones a la producción manufacturera (Toreti et al., 2024). En 2019, acorde con la Organización Mundial de la salud (OMS), una estimación de 55 millones de personas en todo el mundo son afectadas por la sequía año con año y la escasez de agua ha afectado a más del 40 % de la población mundial.



Figura 14. Afectaciones que puede causar una sequía hasta llegar a los impactos en la salud humana (Traducido por Linda Torres de Toreti et al., 2024).

Tipos de sequías

Al definir una sequía, se deben tener en cuenta diversos factores como el inicio, la finalización, la intensidad y la variabilidad climática en diferentes periodos de tiempo; sin embargo, estas se pueden definir de acuerdo con sus mayores afectaciones e impactos, tipificándolas como sequía meteorológica, agrícola, hidrológica y socioeconómica (Valiente, 2001).

A continuación, se explican los diferentes tipos de sequía:

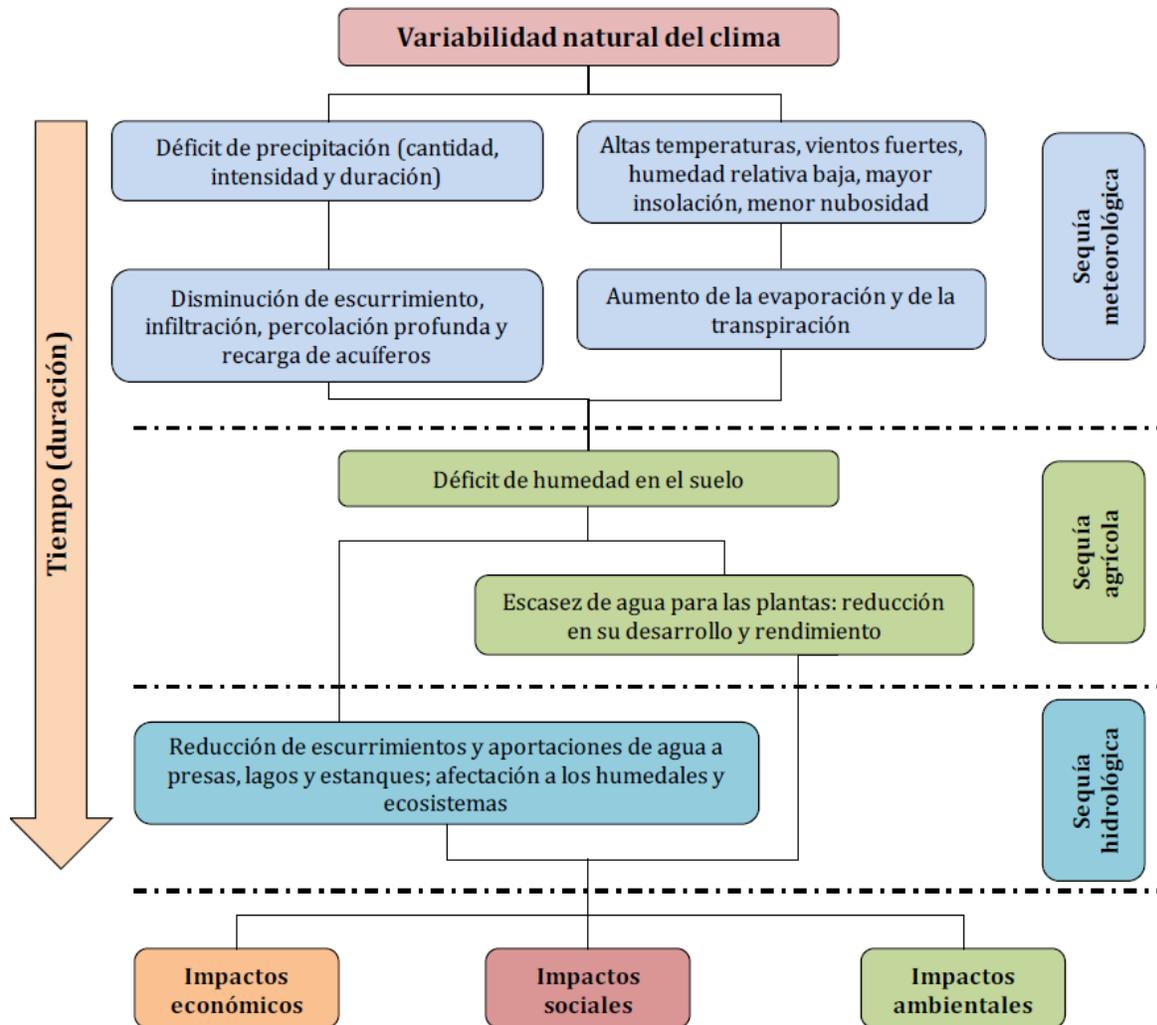


Figura 15. Secuencia de sucesos de sequía y sus efectos para tipos de sequía comúnmente aceptados (Ortega-Gaucin, 2012).

Sequía meteorológica:

Ésta puede ser considerada como una condición anómala a las recurrentes en una determinada región. Se presenta mediante el descenso de la precipitación

considerada como promedio o normal, teniendo como consecuencia desbalances hidrológicos (Ortega-Gaucín, 2012).

Sequía agrícola:

Al existir un déficit de precipitaciones, la cantidad de agua presente en los suelos se reduce significativamente, lo cual desfavorece a los cultivos reduciendo la producción agrícola normal; es el primer sector económico afectado durante las sequías (Ortega-Gaucín, 2012).

Sequía hidrológica:

Se considera como la deficiencia en los volúmenes o caudales de aguas superficiales y subterráneas; tomando en cuenta los ríos, las presas, los acuíferos y los lagos, entre otros (Ortega-Gaucín, 2012).

Sequía socioeconómica:

En este tipo de sequía se ven afectados los bienes económicos por la falta de precipitaciones y la falta de abastecimiento de agua potable para los centros poblaciones, la industria, la agricultura y la generación de energía hidroeléctrica; teniendo un efecto económico en las comunidades (Ortega-Gaucín, 2012).

Sequías en el mundo y en México

Históricamente, la paleo-climatología, indica la presencia de mega sequías que devastaron la Tierra entre 135.000 y 75.000 años antes de Cristo, la cuales fueron responsables de grandes migraciones humanas. Según el World Economic Forum (WEF), clasifica las más grandes sequías de la historia como las siguientes: Mesopotamia y Egipto (2200 AC); imperio maya en el 800 después de Cristo; China entre 1928 y 1930; y a su vez Estados Unidos de América en la década de 1930. Aunque la sequía del 2011-2012 fue muy fuerte no entra dentro de la clasificación de las peores sequías de la historia y enero del 2022 fue el año más seco del siglo y el quinto más seco en los últimos 60 años (Salas, 2022). Según la Organización Meteorológica Mundial, la mayor parte del globo fue más seca de lo normal en 2021, con "efectos en cascada sobre las economías, los ecosistemas y nuestra vida cotidiana" (ONU, 2022). Durante los años 2022 a 2024, Naciones Unidas registró sequías en todos los continentes, las cuales afectaron de manera directa e indirecta a muchos sectores y sistemas como la agricultura, el abastecimiento de agua, la generación de energía hidroeléctrica, la seguridad alimentaria y la navegación interior; afectando la calidad de vida de las personas afectadas y la economía de los países (Toreti et al., 2024), en la Figura 16, se aprecian en color rojo las áreas con mayores afectaciones a causa de la sequía y sus principales afectaciones en cada región.

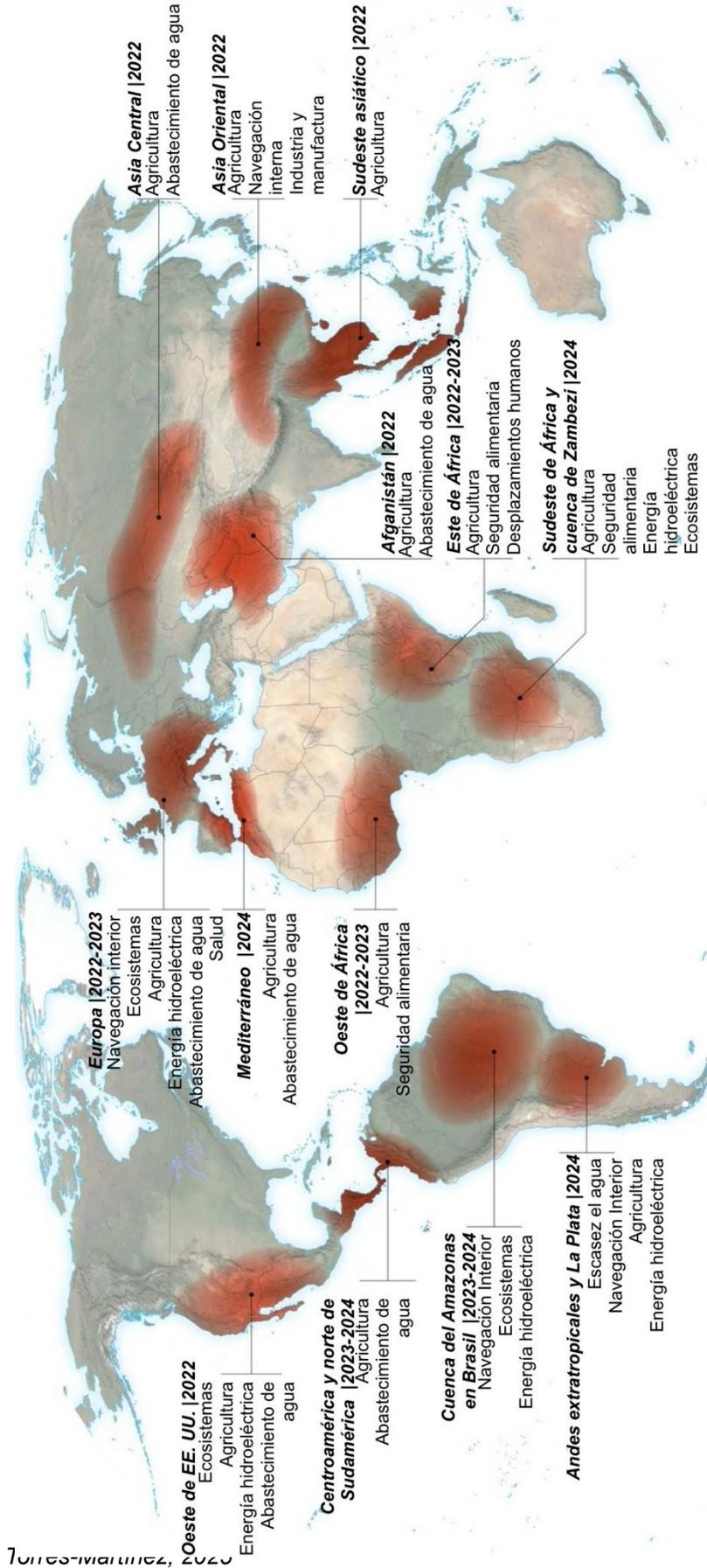


Figura 16. Sequías más importantes registradas durante los años 2022 – 2024 con ejemplos de los mayores sistemas afectados (Toreti et al., 2024), Imagen traducida por Linda Torres.

México:

México posee una gran variedad de climas. Estos pueden variar desde cálido subhúmedo hasta desértico; las sequías son más recurrentes en la región norte del país donde predominan los climas secos y desérticos (IMCO, 2023).

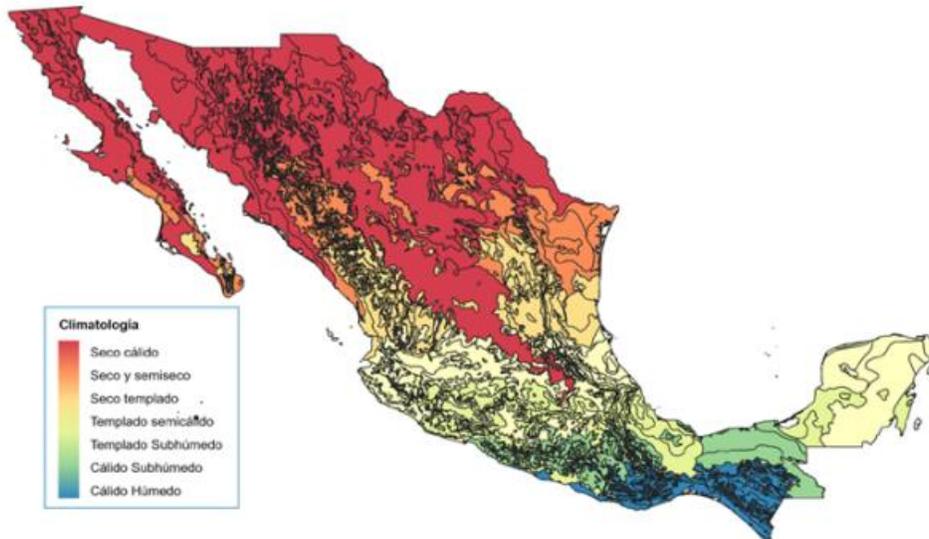


Figura 17. Mapa de los climas de México (Elaborado por IMCO (2024) con información de la CONABIO, Catálogo de metadatos geográficos).

Las sequías son un fenómeno cíclico recurrente en las regiones el centro y norte del país (Banco de México, 2022). El 52 % del territorio nacional cuenta con un clima árido o semiárido volviendo a 14 estados más propensos a las sequías (IMCO, 2023). Esto se relaciona con la posición geográfica de México, en la que el sur está en la zona intertropical y el norte en la región templada e incluso comparte la misma latitud que el desierto del Sahara y el Arábigo (CONAGUA, 2019).

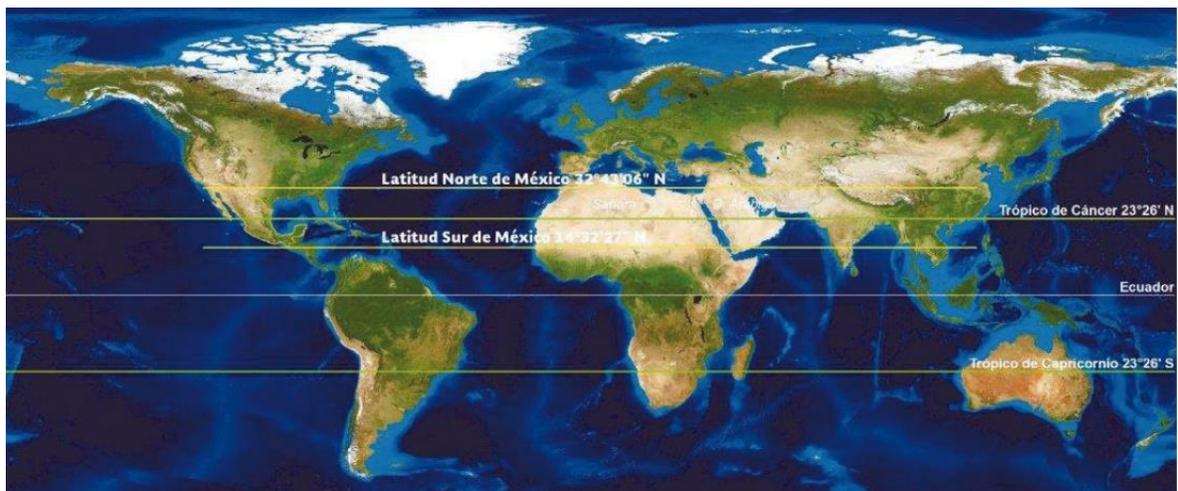


Figura 18. Ubicación geográfica de México (CONAGUA (2024) Elaborado con base en NASA 2016).

Posterior a las sequías en México de los años 2010, 2012 y 2013, la CONAGUA implementó el monitoreo de sequía y los Consejos de Cuenca según la clasificación de sequía: D0, Anormalmente seco; D1, Sequía moderada; D2, Sequía severa; D3, Sequía extrema; D4, Sequía excepcional; a partir de la clasificación D2 se considera estado de emergencia y se tienen que aplicar medidas de carácter obligatorio (Banco de México, 2022a).

Categorías de Sequía y Criterios Generales Promedio ante la Emergencia en los PMPMS

	Intensidad de sequía	Desajuste de oferta/ Disminución de demanda		Carácter de la medida
		Porcentaje		
Emergencia Sequía	D0 Anormalmente seco	10-20		Voluntaria
	D1 Sequía moderada	10-20		Voluntaria
	D2 Sequía severa	20-30		Obligatoria
	D3 Sequía extrema	30-40		Obligatoria
	D4 Sequía excepcional	50		Obligatoria

Fuente: Elaboración de Banco de México con base en CONAGUA, Diario Oficial de la Federación y PMPMS de cada Consejo de Cuenca.

Figura 19. Categorías de sequía y Criterios Generales Promedio ante la Emergencia en los Programas de Medidas Preventivas y de Mitigación a la sequía (Banco de México, 2022).

Durante los años 2020 – 2021, se registró la segunda sequía más severa registrada en México desde el año 2011- 2012 (Pérez, 2021) El monitor de sequía de América del Norte clasificó esta sequía como “extrema” y “excepcional” afectando principalmente a los estados de Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Durango, Tamaulipas, Nuevo León, San Luis Potosí, Guanajuato, Hidalgo y Querétaro (NASA, 2024).

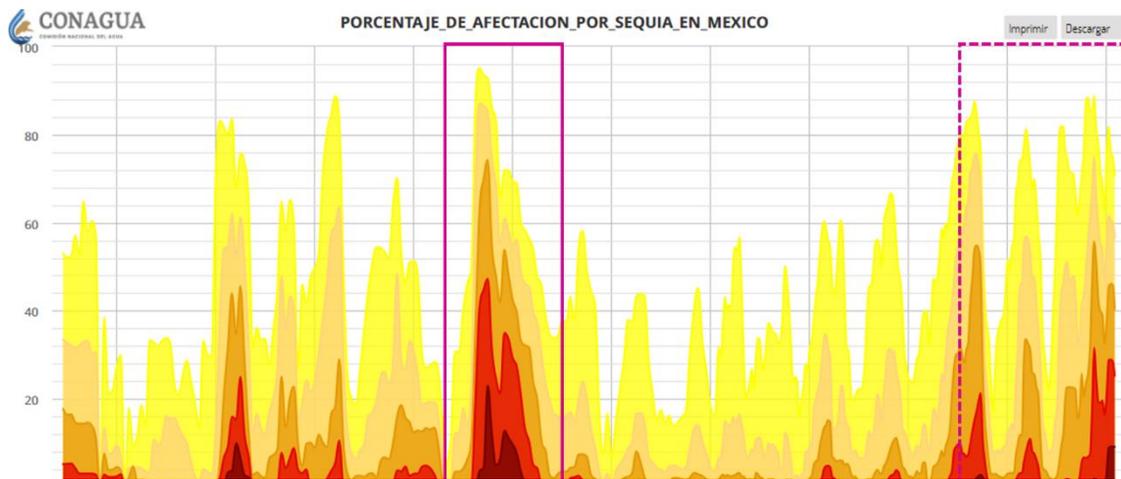


Figura 20. Porcentaje de afectación por sequía en México acentuando período 2022 (modificado de MSM, 2023).

La sequía extrema ocasionó grandes pérdidas agrícolas, aumentó el riego de incendios forestales y agudizó la tendencia a la baja en presas y fuentes subterráneas desde 2018, afectando al suministro de agua (Banco de México, 2022b; Huerta, 2024). Acorde a la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH) en 2022, 93 % de los hogares en México tiene acceso al agua entubada; sin embargo, el 33 % de los hogares con acceso al agua no tenían suministro diario ni de calidad, esta situación se vio agravada por el bajo almacenamiento de las presas (López, 2023).

Esta sequía extrema continuó en 2024; en abril de 2024, las presas más afectadas por la sequía en el nivel nacional se enumeran en la siguiente tabla.

Tabla 3. Presas en estado crítico por la sequía en 2024 (Elaborado con datos Hernández, J. & CONAGUA, 2024).

TOTALMENTE SECAS	MENOS DEL 5 % DE LLENADO	6 % AL 10 % DE LLENADO
El Centenario, Querétaro	Adolfo Ruiz Cortines, Sonora	Adolfo López Mateos, Sinaloa
La llave, Querétaro	De Gonzalo, Michoacán	Ing. Rodolfo Félix Valdés, Sonora
La Venta, Querétaro	Valentín Gama, S.L.P	La Soledad, Guanajuato
Abelardo Rodríguez Luján, Sonora	Vicente Guerrero, Hidalgo	José López Portillo "Cerro Prieto", Nuevo León
Ignacio Alatorre, Sonora	Huapango, Edo. México	La Codorniz, Aguascalientes
La Pañuelitas, Guanajuato	El Papalote, Guanajuato	Miguel Hidalgo, Sinaloa
	San Ildefonso, Querétaro	El Batán, Querétaro
	Constitución de 1917, Querétaro	Copándero, Michoacán
	Cuauhtémoc, Sonora	Vicente Guerrero, Tamaulipas
	Los Ángeles, Michoacán	Sanalona, Sinaloa
	Laguna de Yuriria, Guanajuato	Josefa Ortiz de Domínguez, Sinaloa
	El Molino, Edo. De México	Aristeo Mercado, Michoacán
	Gonzalo N. Santos, S.L.P.	

2.3 Geología e hidrogeología

Geología

La geología es la ciencia que busca comprender las estructuras, los procesos dinámicos y evolutivos que existen en la Tierra, apoyándose en puntos de vista históricos y/o físicos, los cuales se especializan en diferentes áreas, realizando observaciones, mediciones y experimentos en el campo y el laboratorio (Grotzinger et al., 2014; Tarbuck et al., 2013).

La geología abarca amplias áreas de estudio. En la tabla a continuación se muestran algunas de ellas; en la presente investigación se emplearán algunas de estas áreas como la hidrogeología y la geofísica.

Tabla 4. Diferentes áreas de estudio geológico (Tarbuck et al., 2013).

Geología arqueológica	Ciencias oceánicas
Ingeniería geológica	Paleoclimatología
Geología forense	Paleontología
Geoquímica	Geología planetaria
Geomorfología	Geología sedimentaria
Geofísica	Sismología
Historia de la geología	Geología estructural
Geología médica	Tectónica
Mineralogía	Vulcanología
Hidrogeología	

Hidrogeología

La hidrogeología es el estudio de las aguas subterráneas en una formación geológica que permite su circulación por sus poros o grietas permitiendo su aprovechamiento (Custodio & Llamas, 1983). Su aplicación requiere otras disciplinas, métodos y técnicas para estudiar el entorno donde se encuentra el recurso hídrico. Por ejemplo, la geología para determinar las características geológicas y morfológicas del área de estudio. También se emplean la física, la química, la biología, la hidrología superficial, la hidráulica, la mecánica de fluidos y la transferencia de calor, entre otros factores (Dassargues, 2019). Todas las ramas mencionadas anteriormente, toman un papel importante en la investigación y especialización del agua subterránea, para su aplicación en proyectos de ingeniería civil, ambiental y la gestión sostenible del agua (Dassargues, 2019).

El estudio del agua subterránea es de gran relevancia, debido a que es uno de los recursos naturales más importantes. En el nivel mundial, más de 2 billones de personas dependen de fuentes subterráneas para su abastecimiento diario (Hiscock

& Bense, 2014). En cuando a cantidades, el agua subterránea representa un 99 % del agua dulce líquida en la Tierra (Shiklomanov & Rodda, 2003; World Water Assessment Programme, 2022).

Acuíferos

Se considera acuífero al medio rocoso en que se mueve el agua subterránea. Estas rocas conducen cantidades de agua económicamente utilizables. Entre sus principales funciones se encuentra: el almacenamiento de agua, la conducción del agua subterránea y un medio de intercambio geoquímico (Werner, 1996).

Werner en 1996, describió las características principales de los tres tipos de acuíferos litológicos, los cuales muestran propiedades muy diferentes:

1-. *Acuífero de poros*: el agua tiene la capacidad de moverse entre sus poros debido a que la composición de este acuífero consta de sedimentos sueltos las gravas y las arenas.

2-. *Acuífero de grietas*: el agua en estos acuíferos se mueve mediante las grietas o fracturas abiertas de origen tectónico o de intemperismo. Este tipo de acuífero suele presentarse en rocas consolidadas como las areniscas, las calizas no carstificadas, los basaltos, los granitos u otras rocas extrusivas e intrusivas y gneisses. Es importante considerar que en este tipo de acuífero el contenido de poros es despreciable.

3-. *Acuífero cárstico*: el agua en este tipo de acuíferos se mueve mediante los huecos cársticos, los cuales son de diámetros muy variables, en forma de canales o cavernas. En este tipo de acuíferos el porcentaje de poros también es despreciable; se tiene un alto grado de heterogeneidad, alto debido a que las rocas son carstificadas y entre ellas se encuentran calizas, dolomías y yeso, entre otras.

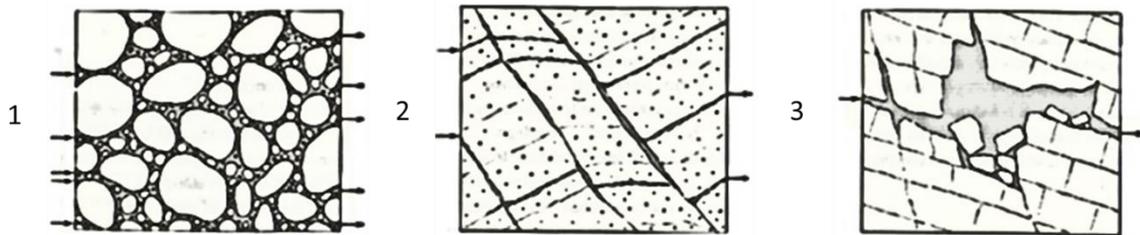


Figura 21. Tipos de acuíferos litológicos, 1. Acuífero de poros, 2. Acuífero de grietas, 3. Acuífero cárstico (modificado de Werner, 1996).

Piezometría

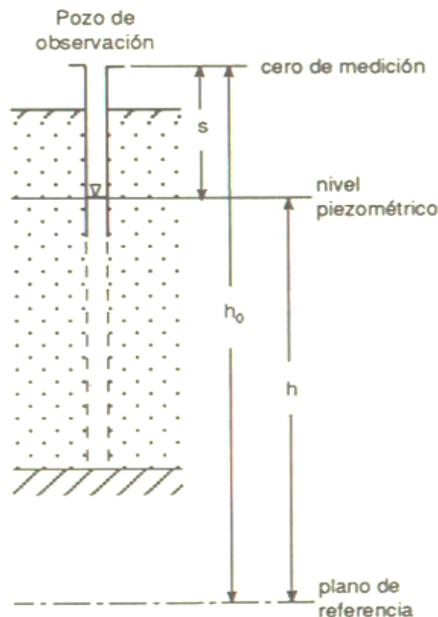


Figura 22. Medición de nivel freático de un pozo de abastecimiento (Werner, 1996).

El nivel freático de los acuíferos libre aflora en los pozos y norias y es conocido como espejo de agua de pozo. Al nivel que se mide en estos pozos, se le llama nivel piezométrico y se calcula (h) como la altura del nivel sobre un plano de referencia, el cual es normalmente el nivel del mar, según:

$$h \text{ [msnm]} = h_0 \text{ [msnm]} - s \text{ [m]};$$

Donde h_0 es altura del punto de medición (cero) sobre el plano de referencia (Figura 22),(Werner, 1996a).

Werner en 1996, muestra como producto de la piezometría las cartas piezométricas, las cuales muestran la configuración espacial del nivel piezométrico de un acuífero, proporcionando información sobre el agua subterránea, por

ejemplo, las direcciones de flujo y altura piezométrica de cada punto.

La base de la construcción de una carta piezométrica es la interpolación lineal, considerando que el agua siempre sigue el gradiente más pronunciado, la dirección de flujo, la cuál debe ser marcada por flechas o líneas de flujo perpendiculares a las isopiezas (Custodio & Llamas, 1983; Werner, 1996a).

Humedales

Los humedales son zonas planas de tierra que se encuentran cubiertas de agua de manera permanente o estacional y puede ser agua dulce o salobre (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2022). En la mayoría de las ocasiones, el factor más significativo en los humedales es el nivel de agua subterránea cercano a la superficie, por lo tanto, la presencia del agua y la vegetación en estas zonas está asociada con el acuífero adyacente (O'Brien & Motts, 1980).

En la actualidad es importante monitorear los humedales para comprender los efectos ecológicos y estacionales de los flujos de agua en diferentes épocas de año (ordinario, extraordinario y sequía). De igual manera es necesario comprender la interacción que existe con la presencia de una presa, debido a que comúnmente éstas influyen en la magnitud y extensión de los humedales (Pal & Saha, 2018).

2.4 Métodos Geofísicos

La geofísica es una ciencia que significa “Física de la Tierra” (Gutenberg, 1937). Los estudios geofísicos albergan una serie de técnicas no destructivas y de gran cobertura para investigar el interior de la Tierra a partir de parámetros físicos significativos y son usados como métodos complementarios en una investigación “in-situ” (González de Vallejo et al., 2002). Estas mediciones se obtienen mediante las diferentes propiedades físicas del subsuelo (rocas, sedimentos, agua, cavernas, entre otras), (Reynolds, 2011).

Los diferentes métodos se aplican según el parámetro físico del subsuelo que se desea ser investigado. Por ejemplo, en gravimetría es la densidad, magnéticos es la susceptibilidad magnética, en los eléctricos es la resistividad, en los electromagnéticos es la conductividad eléctrica y la permeabilidad magnética. Los métodos sísmicos miden la velocidad de propagación de ondas sísmicas y los radiactivos miden los niveles de radiación, ya sean naturales o inducidos (González de Vallejo et al., 2002).

En la presente investigación se emplearon métodos gravimétricos, con el uso del microgravímetro y electromagnéticos con el uso de Georadar.

Gravimetría

Los estudios gravimétricos miden variaciones del campo gravitacional de la Tierra. Estas variaciones son causadas por diferencias en las densidades de las rocas del subsuelo del lugar en el que se realizará el estudio. Cada densidad causa una diferente aceleración de la gravedad la cual es posible analizar y darle diferentes aplicaciones, como estudiar la geología regional de un lugar (Reynolds, 2011).

Las diferencias entre los valores medidos en un lugar y el valor que teóricamente se debería obtener se conoce como anomalía gravimétrica y éstas pueden ser positivas o negativas en un cuerpo de mayor o menor densidad (González de Vallejo et al., 2002). Las unidades de medida dependen de la sensibilidad de los instrumentos de medición. Las más comunes son los miligales ($1\text{mGal} = 10^{-3} \text{ Gal}$) y los micro gales ($1 \mu\text{Gal} = 10^{-6} \text{ Gal}$), (Reynolds, 2011).

Los valores obtenidos en el campo, no son las medidas finales. Éstas deben tener una corrección de anomalías (Aire Libre o de Bouger), (González de Vallejo et al., 2002). En un enfoque micro gravimétrico Reynolds (2011), menciona que éstos se refieren a aquellos realizados en una escala muy pequeña, los cuales corresponden a cientos de metros cuadrados y son capaces de detectar cavidades pequeñas, huecos y zonas de pérdidas de finos, debido al cambio de las densidades del terreno.

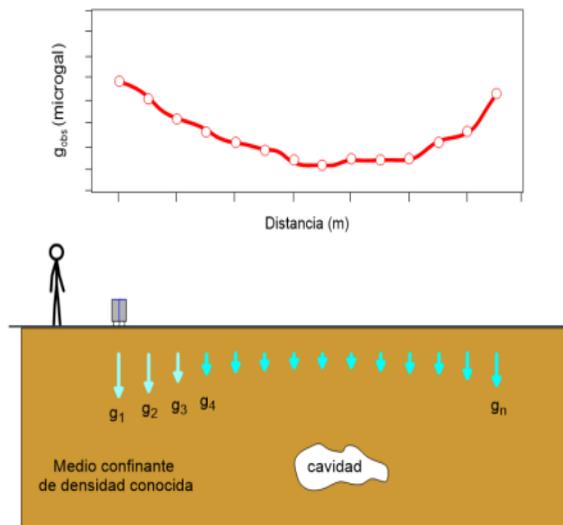


Figura 23. Ilustración representativa del uso de microgravímetro (Flores, 2011).

Georadar

El radar de penetración terrestre, por sus siglas en inglés (GPR) utiliza un intervalo de señales electromagnéticas diseñadas para la localización de objetos o estructuras enterradas someramente, proporcionando información de la posición y la profundidad del objeto, considerando también los objetos no magnéticos de una manera rápida mediante disparos pequeños casi continuos. Las señales captadas se llaman tazas y la acumulación de ellas crea radagramas, los cuales pueden ser visualizados a través de imágenes en escalas de colores (Flores, 2019).

El sistema de georadar consta de en un sistema de control conectado a unas antenas, las cuales pueden ser desplazadas sobre la superficie del medio que se desea analizar. Dichas antenas emiten energía hacia el interior del medio y registran las ondas que provienen de ondas de las reflexiones anteriores (Tavera, 2008). La frecuencia de las antenas es en función de la resolución y penetración deseada y su interpretación consiste en la caracterización de textura, amplitud, continuidad y terminación de las reflexiones (González de Vallejo et al., 2002).

2.5 Geoindicadores ambientales

El medio ambiente es todo lo que rodea al ser humano, incluyendo los factores bióticos y abióticos. Aprender cómo funciona el medio ambiente ayuda a definir la manera en la que el ser vivo interactúa con él, ayudando a encontrar maneras para solucionar los problemas medioambientales basados en la sostenibilidad (Miller & Spoolman, 2010). En la actualidad, el crecimiento poblacional crece de manera

desproporcionada cada año, siendo uno de los más grandes desafíos, en el nivel mundial para lograr coexistir de una manera sostenible, tomando en cuenta los objetivos ambientales, económicos y sociales (Mihelcic & Zimmerman, 2012).

Con el aumento poblacional y la expansión de las ciudades; se tiene la alteración del ambiente producido por la actividad humana. Esto se considera como impacto ambiental, se utilizan indicadores ambientales para determinar la calidad ambiental, aunque estos parámetros cambian con el tiempo de forma natural, por lo que deben ser medidos con frecuencia para determinar una valoración positiva o negativa (Garmendia-Salvador et al., 2005).

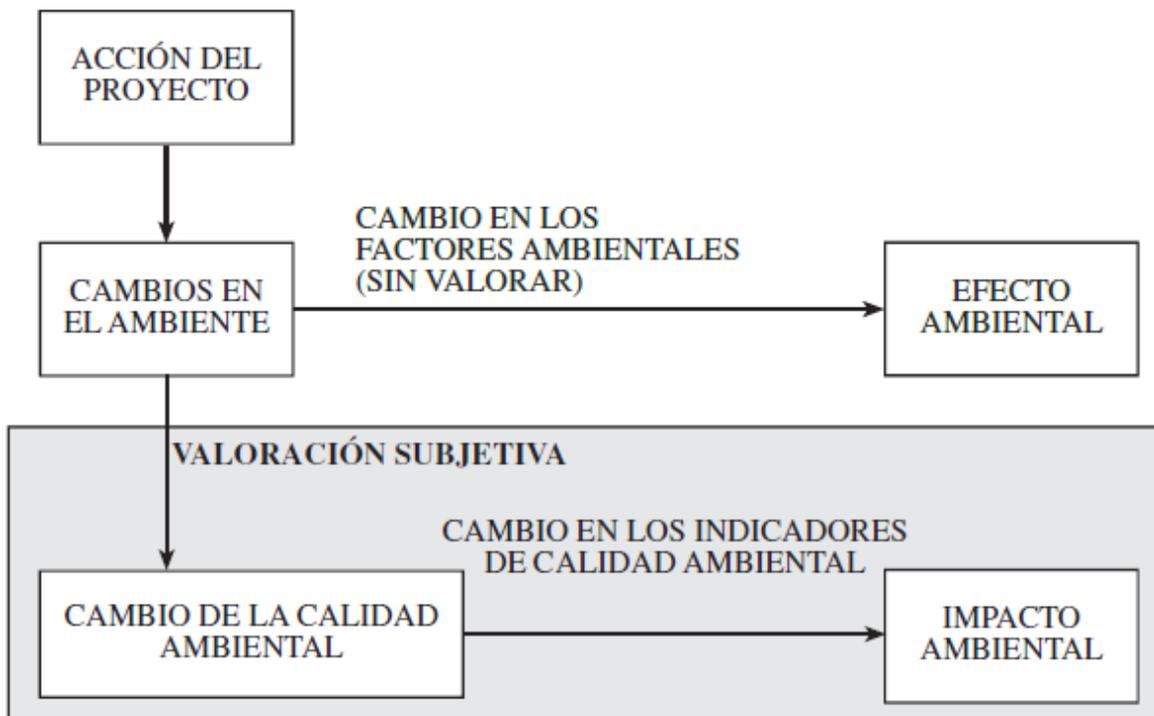


Figura 24. Procedencia de un impacto ambiental mediante la valoración del medio natural (Garmendia-Salvador et al., 2005).

La evaluación de impacto ambiental se entiende como el proceso de análisis en el que el medio ambiente y el proyecto coexisten en un mismo punto, ofreciendo ventajas para ambas partes. Esto consiste en la obtención de información relativa a la actividad a desarrollar, deduciendo su capacidad de generar impactos ambientales (González Alonso et al., 1989). Lo más importante de una Evaluación de Impacto Ambiental son las alternativas que se proponen para mejorar la calidad ambiental de un entorno vulnerable y, si es posible, realizar las acciones que generen un impacto ambiental de una manera menos dañina para el medio ambiente y su interacción con el humano (Garmendia-Salvador et al., 2005).

Inventario ambiental

Para la correcta evaluación e integración de datos ambientales a evaluar, se requiere la elaboración de un trabajo diagnóstico ambiental, el cual consiste en la elaboración de un inventario que caracteriza y analiza el sistema ambiental donde se pretende realizar la obra tomando en cuenta los diferentes usos del suelo, la flora, la fauna, la hidrología y el medio socioeconómico, entre otros factores (SEMARNAT, 2022).

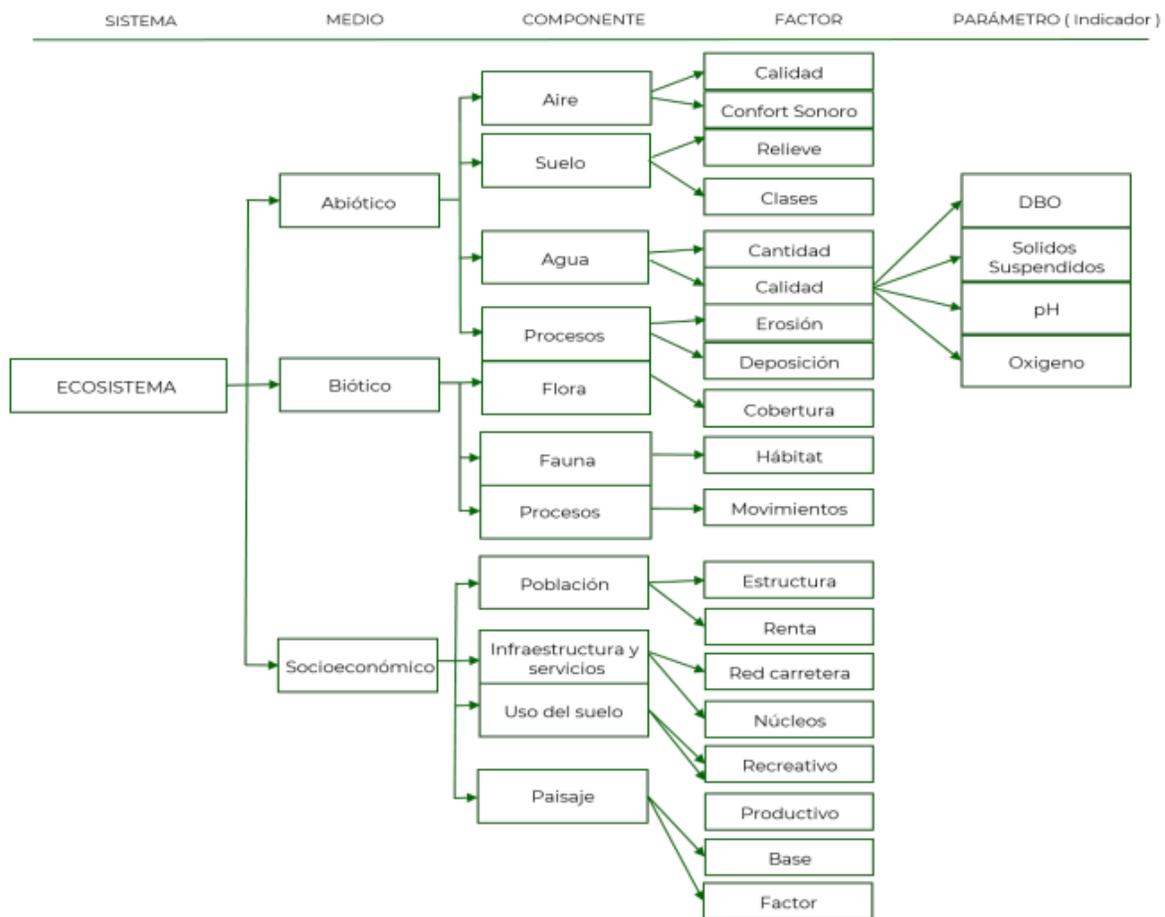


Figura 25. Diagrama de caracterización ambiental con enfoque interactivo (SEMARNAT, 2022).

Con base en los datos obtenidos en el inventario ambiental, éstos deben integrarse en una síntesis objetiva y congruente que tome los factores actuales del sistema ambiental del área de estudio. Esto permitirá conocer el grado de conservación o deterioro en cada uno de los indicadores ambientales. Existen diversos métodos donde se pueden analizar, siendo el más frecuente el uso de métodos matriciales (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2022).

En 2022 la SEMARNAT, incluyó en los MIA los indicadores de impacto y cambio climático, considerando las afectaciones del medio ambiente debidas al cambio

climático; sugiriendo considerar índices cualitativos o cuantitativos para evaluar las alteraciones consecuentes de establecimiento de un proyecto o actividad, donde destacan las tasas de renovación, las tasas de aprovechamiento, las limitaciones, los índices de evapotranspiración para expresar el grado de sequía, los cambios ambientales a corto, mediano y largo plazo, la representatividad y la relevancia; siendo estos los que impactarían principalmente al presente trabajo de investigación.

Métodos de evaluación de impactos

Existe una gran variedad de métodos para elaborar una Evaluación de Impacto Ambiental. Hay métodos muy generales y otros muy específicos, los cuales buscan ponderar un impacto y buscar alternativas diferentes las cuales puedan ser comparadas. Entre las principales se encuentran: la Matriz de Leopold, el método Battelle-Columbus, el método Galletta, el análisis energético Mc Allister y las guías metodológicas del MOPU (Garmendia-Salvador et al., 2005).

Para el desarrollo de la presente investigación se optó por el empleo de las “Guías metodológicas del MOPU”, debido a que éstas están elaboradas específicamente para presas, ofreciendo una valoración cualitativa y cuantitativa, con propuestas de minimización de impactos (Garmendia-Salvador et al., 2005).

Matriz de grandes presas

La Evaluación de Impacto Ambiental más representativa para los impactos ambientales en presas es la matriz propuesta por la Interenational Commision on Large Dams (ICOLD). Esta matriz se elabora mediante el empleo de la evaluación de impactos con símbolos, los cuales introducen nociones de la importancia relativa en el plazo en el que se manifiestan los impactos, el grado de certidumbre y la duración de efectos diferidos (M.O.P.U., 1989).

Ésta es una matriz especializada en proyectos de presas y similares, se estructura en torno a objetivos posibles de la presa en líneas horizontales, mientras que en las columnas verticales figuran los diversos sectores del medio ambiente (hombre, tierra, agua, atmosfera, flora y fauna), (Leal, 1977).

En lo particular a presas; González Alonso et al., en 1989, sugirieron que se tienen consecuencias directas a la naturaleza por un cambio tan sustancial como una presa, ya que se establecen cambios muy bruscos en el sistema donde se establece, originando repercusiones sobre los sistemas naturales existentes y creando la aparición de otros; sin dejar de lado las repercusiones sociales y económicas. Los objetivos múltiples de los embalses ocasionan una complejidad en el impacto ambiental, por lo cual se consideran factores como: Geología y geomorfología, suelo, Hidrología, clima, ruidos, calidad del aire, vegetación, fauna, paisaje y el medio socio-económico, entre otros.

En el caso de la presa Cerro Prieto, De León-Gómez determinó en 2006, una relación del 90% entre los parámetros de causa-efecto que presenta la matriz y propuso acciones correctivas y recomendaciones que buscaban aminorar los efectos; pero es importante actualizar los valores de esta matriz en época de sequía, evento primordial presentado por primera vez en la presa.

Para la presente investigación se optó por aplicar un método de análisis cualitativo, organizado de manera matricial, el cual relaciona y encadena a manera de causa-efecto los impactos identificados; calificando las características cualitativas de importancia relativa, el plazo de manifestación de impactos, el grado de incertidumbre, la duración y los efectos diferidos (M.O.P.U., 1989).

El Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (1989), describe los parámetros del llenado de la matriz para grandes presas considerando el impacto, la certidumbre de ocurrencia, la duración, el plazo de reversibilidad y si es necesario tomar en cuenta acciones correctivas, las cuales se describen a continuación:

1. Carácter del impacto. Contempla si el impacto a evaluar es positivo o negativo, catalogándolos como beneficioso, perjudicial o difícil de cuantificar.
2. Probabilidad de ocurrencia. Se define como el riesgo que existe de la aparición de un impacto, considerando los cíclicos y los no cíclicos.
3. Magnitud del impacto. Valora los efectos de la acción en escalas de menor, medio y mayor.
4. Duración del impacto. Determina si el impacto estudiado es de una duración temporal o permanente acorde a las manifestaciones observadas en el área.
5. Reversibilidad del impacto. Toma en consideración la probabilidad de que retornar a la situación anterior antes del impacto, tomando en cuenta los factores inmediato, mediano o largo plazo.
6. Acciones correctoras. Determina si existe o no la necesidad de realizar una acción correctora para aminorar o evitar la alteración causada.

Tabla 5. Conceptos de evaluación de Indicadores Ambientales en la Matriz de Grandes Presas (Leal, 1977).

Impactos	Beneficioso (B), Perjudicial (D), Difícil de cuantificar (X)
Probabilidad	Cierto (C), Probable (P), Improbable (I), Desconocido (N)
Magnitud	Menor (1), Medio (2), Mayor (3)
Duración	Temporal (T), Permanente (P)
Reversibilidad	Inmediato (I), Mediano (M), Largo (L)
Acciones correctoras	Sí (Y), No (N)

Capítulo 3. Características fisiográficas del área de estudio

3.1 Presa Cerro Prieto

En la década de 1970, la población en el AMM ascendía a 1,196,000 de habitantes y la cobertura de agua entubada era del 71 %, con un suministro de 3,672 l/s, por lo que cerca de 340,000 habitantes carecían del servicio (Aguilar Barajas et al., 2021).

Para el año 1979, bajo el gobierno del Gobernador Alfonso Martínez Domínguez, se experimentó una de las mayores crisis hídricas. Sólo se contaba con 2 o 3 horas de abastecimiento, dejando a más de 256,000 habitantes sin agua (Aguilar Barajas et al., 2021). Esto fue provocado por una de las sequías más graves del siglo las fuentes de abastecimiento con las que se contaba redujeron sus suministros al AMM. La presa de La Boca pasó a suministrar de 1,800 l/s a 600 l/s; los acuíferos Cola de Caballo, San Francisco y La Estanzuela, pasaron de 1,400 l/s a 650 l/s y La Huasteca que llegó a suministrar hasta 3,500 l/s pasó a sólo aportar 1,700 l/s (SADM, 1984).

El proyecto Monterrey III, fue creado como parte del “Plan Hidráulico Monterrey” en 1980. Este contemplaba la construcción de la Presa Cerro Prieto, la primera fase del anillo de transferencia y la planta potabilizadora de San Roque (Aguilar Barajas et al., 2021; Torres & Santoscoy, 1985).

La obra principal del proyecto Monterrey III, fue la presa Cerro Prieto, considerada “la obra del siglo”. La presa localizada en Linares, N.L., se diseñó con una capacidad útil de 300 Mm³ y su proyección de suministro es de 4.1 m³/s para el AMM, 673 ha, para el riego agrícola, además de protección contra las avenidas (huracanes), (Aguilar Barajas et al., 2021; De León Gómez, 1993). Después de cuatro años de construcción, el 18 de julio de 1984, se realizaron las pruebas del acueducto Linares – Monterrey y a la potabilizadora, el 27 de julio del mismo año, se inauguró la Presa Cerro Prieto (Aguilar Barajas et al., 2021; Torres & Santoscoy, 1985).

La Comisión Internacional de Grandes Presas, por sus siglas en inglés ICOLD, define como una grande presa aquella que cuente con una altura de 15 m o más desde el cimiento más bajo hasta la cima o una presa entre 5 m y 15 m, la cual embalse más de 3 Mm³ (ICOLD, 2011). Según estas características anteriores, la presa Cerro Prieto, es considerada dentro del recuento de las 209 presas principales y grandes de México.

La presa Cerro Prieto, tiene una estructura de tipo tierra y enrocamiento con materiales graduados de arena, grava y enrocamiento. El corazón de arcilla compactada impermeable se postra sobre una trinchera, las características de estas capas aumentan la resistencia de la cortina contra la presión del agua y teóricamente disminuyen la posibilidad de filtraciones (De León Gómez, 1993; Martínez Vallejo, 2007).

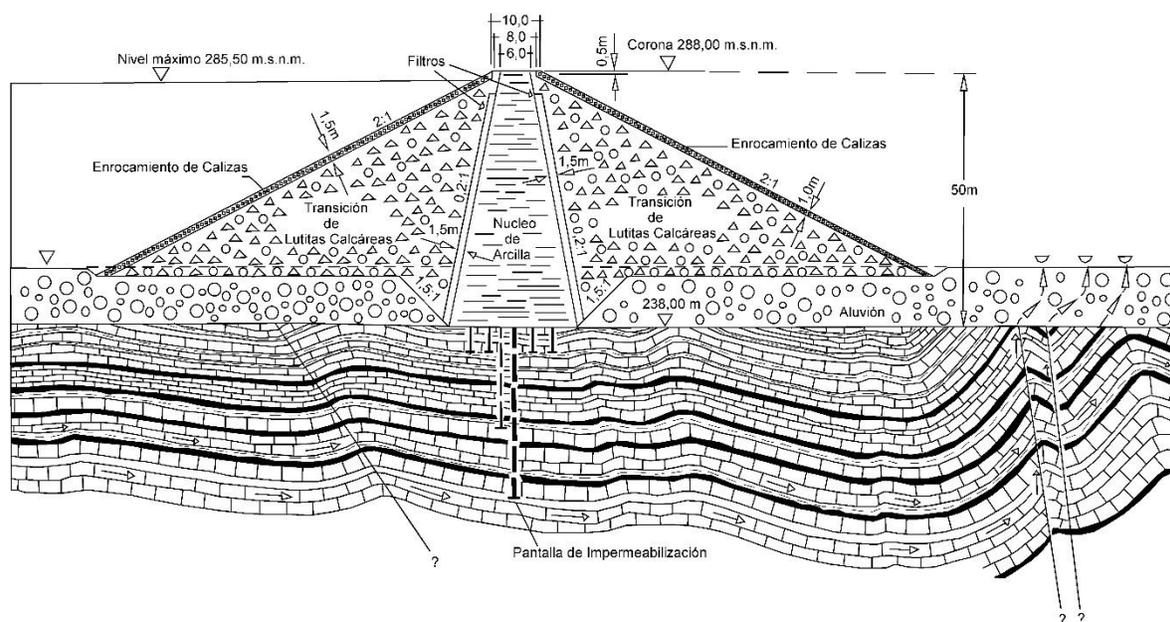


Figura 26. Estructura interna de la cortina de la Presa Cerro Prieto en la sección máxima con perfil geológico en zona de ataguía (De León Gómez, 1993).

Acorde con datos encontrados en la base de datos de CONAGUA (2012), se encontraron los siguientes datos técnicos de la Presa Cerro Prieto.

Tabla 6. Datos generales de la Presa Cerro Prieto (CONAGUA, 2012).

NAME (Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias) a 285.5 msnm	393 Mm ³
NAMO (Nivel de Aguas Máximas Ordinarias) a 282.52 msnm	300 Mm ³
NAMINO (Nivel de Aguas Mínimo de Operación) a 268.5 msnm	51.6670 Mm ³
Volumen de azolves NAMIN	25 Mm ³
Volumen de conservación	248.3330 Mm ³
Volumen para control de avenidas	93 Mm ³
1 Cortina, tipo tierra y/o enrocamiento, comportamiento flexible, altura máxima	50m
Elevación Corona	288 msnm
Ancho	10 m
Longitud	1492.00 m

3.2 Zona de estudio

3.2.1 Localización y vías de acceso

El área de estudio de la presente investigación se localiza en el Noreste de México, en el municipio de Linares, Nuevo León, a 20km de la cabecera municipal de dicho municipio y aproximadamente a 150km del municipio de Monterrey (Figura 27).

La zona de estudio se encuentra limitada a los ejidos localizados al borde de la presa Cerro Prieto (Guadalupe, El Popote, El Cascajoso, COCONAL, Cerro Prieto) y un enfoque a la cortina y sus diques. El acceso a la zona de interés puede ser realizado por la carretera No. 36 y la No. 44.

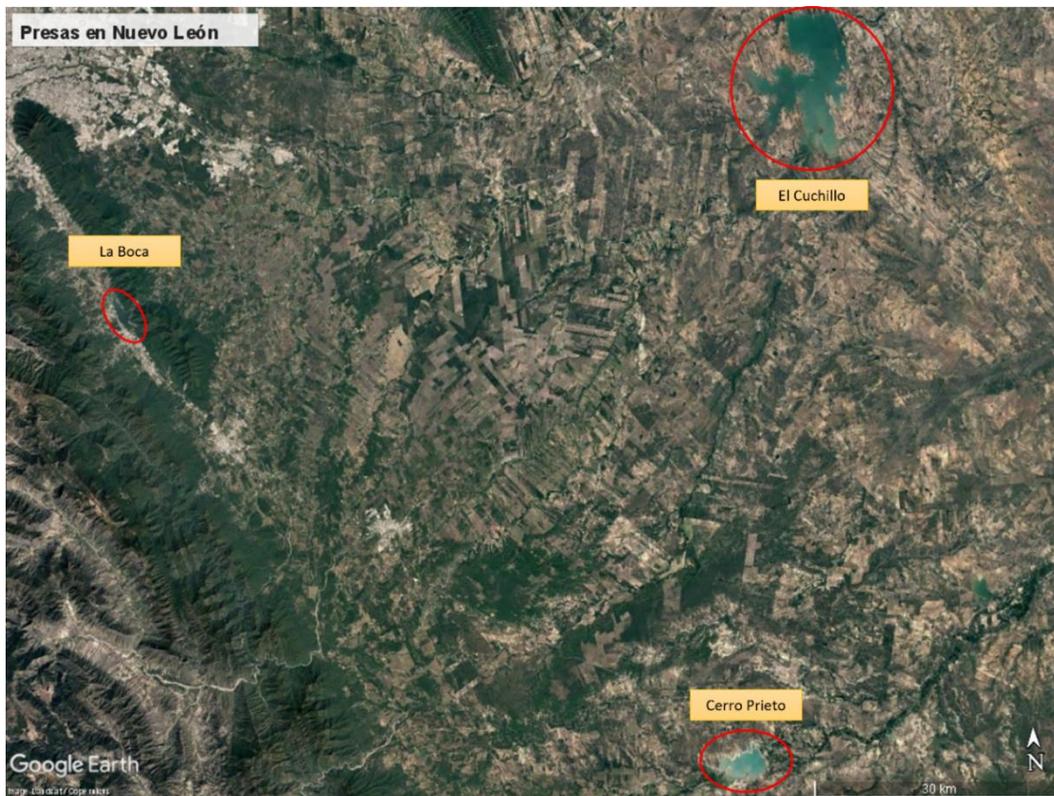


Figura 27. Principales Presas del estado de Nuevo León (modificado de Google Earth, 2023).

3.2.2 Geomorfología

Tomando en cuenta las diferentes regiones fisiográficas que existen dentro de la república mexicana, se puede determinar que, la zona de estudio se localiza en la provincia de la Planicie Costera del Golfo de México (PCGM), la cual corresponde con la región noreste del país.

Entre sus principales características generalmente se encuentran estructuras como lomeríos de escasa elevación, mesetas y amplios valles de sedimentos aluviales aportados por la erosión de la Sierra Madre Oriental (SMO), (Martínez Vallejo, 2007). Los lomeríos localizados en el área están constituidos por rocas lutíticas presentes en la Formación Méndez, en un estado altamente fracturado debido a los eventos compresivos en la Orogenia Laramide, relacionándose estrechamente con la zona transicional entre la PCGM y la SMO (Lizárraga Mendiola, 2003).

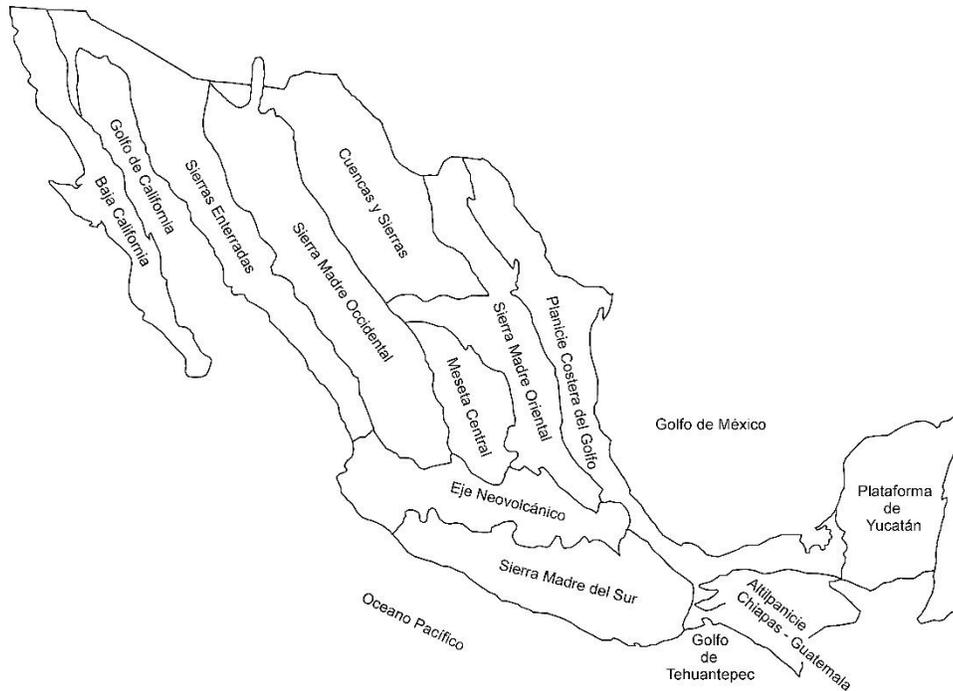


Figura 28. Provincias fisiográficas de México (modificado por Martínez-Vallejo (2007) de RAISZ, (1964)).

3.2.3 Clima y vegetación

Según el INEGI, en 2010, Linares cuenta con un clima cuyo intervalo de precipitación media anual varía de 500 – 1100 mm. Durante el año se pueden percibir los siguientes climas: Semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad (61%), Semiseco muy cálido y cálido (22%), Semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (13%), Semiseco semicálido (3%), Templado subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad (0.7%), Semicálido subhúmedo con lluvias escasas todo el año (0.2%) y Semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (0.1%). Debido al clima de la región, en el área de estudio la vegetación consta de matorral submontano, matorral espinoso tamaulipeco, bosque de encino, encino-pino, chaparrales, mezquites, pastizales inducidos y pastizales cultivados (INEGI, 1986).

Acorde con la base de datos de CONAGUA, la presa Cerro Prieto cuenta con la estación 00019011 “Cerro Prieto, Linares” la cual brinda valores históricos de días con granizo, niebla, tormentas, evaporación, lluvia, temperaturas máximas y mínimas, entre otros datos climatológicos de los promedios de estas; con base a los datos obtenidos de la estación climatológica Cerro Prieto, se cuenta con una temperatura promedio mínima de 16.8°C y una máxima promedio de 29.9°C con datos históricos desde 1951 hasta 2010 (Servicio Meteorológico Nacional, 2010).

El área de estudio ha atravesado por diversas sequías y huracanes desde su construcción, como se muestra en la Figura 29, donde se toman en cuenta estaciones climatológicas en la cuenca del Río Pablillo con datos históricos, los cuales reflejan de manera muy marcada los periodos de sequía y extraordinarios. En el contexto general, Nuevo León, se caracteriza por presentar periodos de sequía prolongados, evidenciando amenazas en la captación para las diferentes presas; sin embargo, este riesgo se ve disminuido por la presencia de huracanes y lluvias extraordinarias, aunque nunca se sabe si estas lluvias ocurrirán en un periodo crítico o no de las presas (Aguilar Barajas et al., 2021).

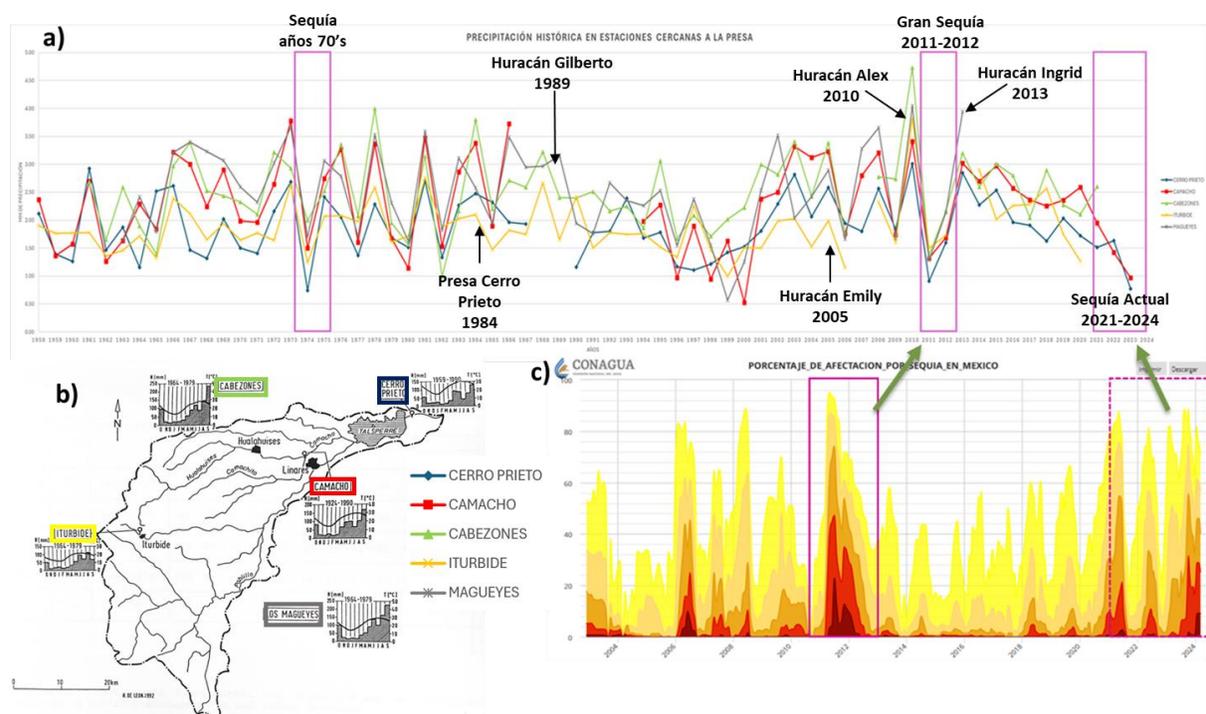


Figura 29. a) Precipitación histórica 1958-2023 (Elaborado con datos de SIH), b) Ubicación de estaciones hidrométricas (de León, 1993), c) Porcentaje de afectación por sequía (SMN, 2024).

3.3 Gran sequía 2021 – 2024

Nuevo León, es susceptible a sequías, como se observa en la Figura 30; aunque su ciclicidad aún no se encuentra definida; desde el año 2017, inició el ciclo de sequía meteorológica, donde la precipitación anual en la entidad comenzó a ser menor ese año y respecto al histórico (Martínez Muñoz et al., 2023). Las precipitaciones en el estado de Nuevo León, presentaron un mayor descenso en el año 2022, con apenas 400.7 mm anuales, siendo este valor el más bajo en el periodo 2017 – 2024 (Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, 2023).

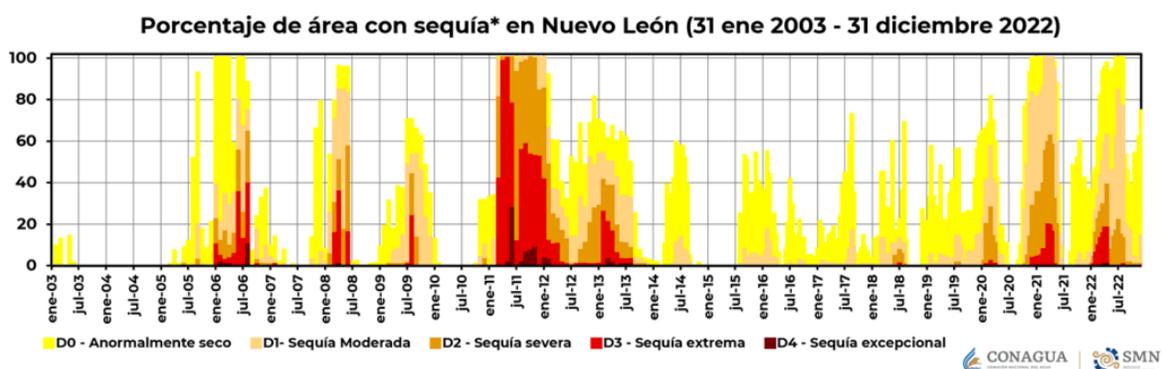


Figura 30. Porcentaje de área con sequía en Nuevo León de los años 2003 – 2022 (Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, 2023).

Tabla 7. Precipitación anual en el estado de Nuevo León, láminas estimadas de enero a diciembre, valores expresados en milímetros (mm), (Elaborado con datos de la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional de los años 2017 – 2024).

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2017	10.2	7.4	50.6	45.0	60.7	45.6	31.0	40.6	172.1	64.9	7.8	34.2	570.1
2018	16.5	18.0	3.6	53.8	47.9	82.0	37.8	21.3	226.9	46.6	14.2	16.6	585.2
2019	22.5	2.8	38.2	13.9	54.6	75.9	31.1	31.0	166.2	28.6	26.7	7.5	499.2
2020	13.0	3.5	15.2	37.0	80.5	72.7	171.4	14.8	102.8	2.7	3.8	8.0	525.5
2021	10.0	6.4	5.5	22.6	79.2	90.1	99.9	43.2	42.1	46.1	40.4	12.0	497.7
2022	15.7	8.5	0.3	29.4	27.8	29.3	10.2	81.1	132.9	34.2	26.9	4.4	400.7
2023	2.2	1.2	23.0	50.5	103.5	15.3	33.9	21.1	31.9	69.3	92.1	12.9	456.8
2024	8.8	24.7	18.7	16.7	43.7	233.5	86.8	31.4	120.8	39.8	3.0	22.4	650.3

Esta notable baja en la precipitación ocasionó que la captación de los embalses superficiales y la recarga de acuíferos no pudiera ser posible, mientras que la demanda del vital líquido aumentaba, teniendo una explicación parcial a la crisis hídrica que se avecinaba (Martínez Muñoz et al., 2023). Este mismo año (2022), se presentó un déficit hídrico en el estado de 31Mm³ llegando al día cero en el mes de

junio generando vulnerabilidad en diversos sectores de la sociedad como el uso doméstico, agrícola e industrial (Ordoñez-Díaz, 2022). Como antecedente de déficit hídrico, De León-Gómez, en 1998, determinó que el abastecimiento de agua potable era de $10\text{m}^3/\text{s}$ y esto solo representaba poco más de la mitad de la demanda de $17\text{m}^3/\text{s}$, es decir que se tenía un déficit de $7\text{m}^3/\text{s}$; considerando que en ese año la población era de 3.5 millones de habitantes, por lo que se proponía una exploración y determinación de nuevas fuentes de abastecimiento complementarias en el Norte y Sur del estado.

El embalse más afectado durante el año 2022 fue la presa José López Portillo “Cerro Prieto”, teniendo una operación al límite del colapso autorizada por la CONAGUA debido a la declaratoria de emergencia emitida en el mes de febrero; durante varios meses se implementaron de bombas flotantes que alimentaron la obra de toma con el bajo nivel que la presa tenía, la cual llegó al punto de almacenamiento más bajo desde su construcción, cayendo al 0.5% de su capacidad y dejó de abastecer a la AMM durante un periodo de tres meses aproximadamente (Martínez Muñoz et al., 2023; NASA, 2022).



Figura 32. Presa Cerro Prieto al 0.5% de su volumen de llenado respecto al NAMO en julio 2022.



Figura 31. Implementación de bombeo en presa Cerro Prieto junio 2022.

Durante el mes de julio de 2022, en Nuevo León se registraron 7 municipios en sequía tipo D0, 31 municipios en sequía tipo D1 y 13 municipios en sequía D2, entre ellos el municipio de Linares; dando un 86.3% de municipios con sequía con respecto al total del estado, durante la elaboración de la presente investigación, este mes la presa presentó las cantidades más bajas de almacenamiento y los efectos fueron más notorios (CONAGUA, 2022).

En el año 2023 la situación de sequía continuó, aunado con una fuerte ola de calor, especialmente en el municipio de Linares, donde se registraron valores de 45° C en la comunidad de La Pamona durante varios días, así como temperaturas arriba de los 40°C en comunidades como Las Crucitas, Camacho y Cerro Prieto; siendo así las temperaturas con las cifras más extraordinarias del mes de junio y el lugar más caluroso de Nuevo León, afectando a la presa Cerro Prieto de pasar de 16.9% a 16.6% de volumen de almacenamiento en un solo día (Gaytán, 2023).

Para 2023, el panorama no fue diferente. El monitor de sequía en México en septiembre y octubre, registró que las lluvias fueron menores que el promedio de años pasados, causando déficits de precipitación en gran parte del territorio nacional. En el caso de la región norte, noroeste, noreste del país y centro occidente, se tuvo la presencia constante de un sistema anticiclónico lo cual propició un ambiente con temperaturas mayores que los 35°C. En el caso del estado de Nuevo León, se obtuvo un 0% de afectación, según el informe de intensidad de sequía, sin embargo, 7.7% correspondía a municipios anómalamente secos, 45.2% a sequía moderada, 42.2% a sequía severa, 4.9% en sequía excepcional, lo cual corresponde a 6 municipios. En el caso del municipio de Linares, se obtuvo el grado de sequía D2, considerada como sequía severa, la cual podría causar afectaciones de evaporación en la presa Cerro Prieto, muy similares a las presentadas en el año 2022, manteniendo los bajos volúmenes de almacenamiento de la presa (CONAGUA, 2023).

La situación de sequía prevaleció en México durante 2024, teniendo su mayor intensidad en las regiones Noreste, Pacífico Norte y Golfo Norte, de los 2471 municipios que hay en México; 1621 contaban con un grado de sequía, 464 municipios anómalamente secos (D0) y solo 396 sin afectación; en el caso del municipio de Linares la intensidad de sequía continuó en D2 (sequía severa) y en el resto de Nuevo León prevaleció como sequía moderada (CONAGUA, 2024). Sin embargo, en el mes de agosto 2024, el monitor de sequía reportó un 0 % de municipios con sequía en el estado de Nuevo León, debido a las precipitaciones por arriba del promedio en los últimos años y la tormenta tropical Alberto. Esto ha impactado de manera positiva a la Presa Cerro Prieto con un volumen almacenado del 109 % al mes de septiembre; pero, a su vez, aumentaron las filtraciones localizadas y las zonas de humedales (CONAGUA & Servicio Meteorológico Nacional, 2024).

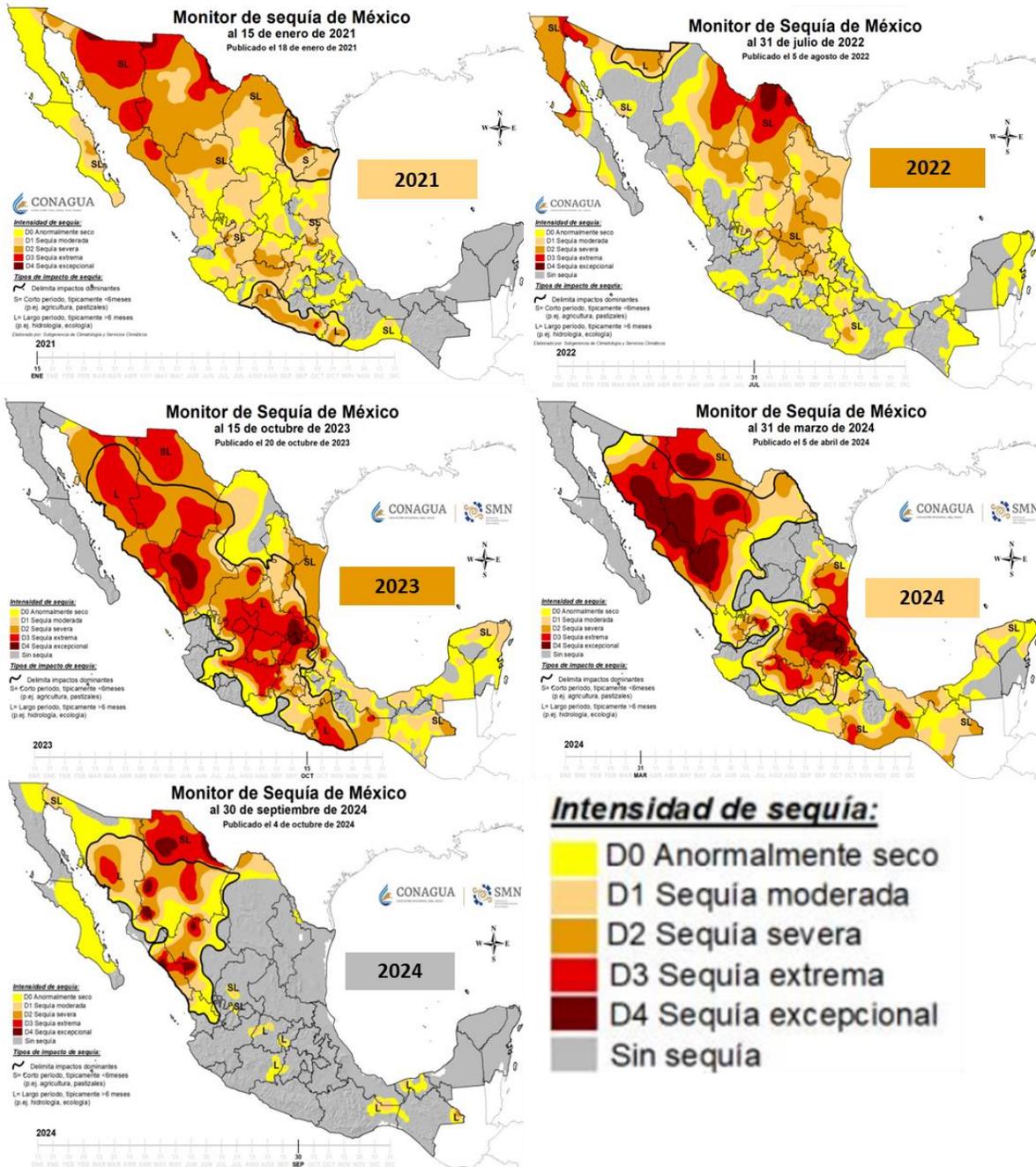


Figura 33. . Evolución de la sequía en s estado más crítico del año en el periodo 2021 – 2024; destacando el color de los años acorde a la intensidad de sequía presente en el municipio de Linares, N.L. (SMN, 2024).

Tormenta Tropical Alberto

El 19 de junio de 2024, se desarrolló la Tormenta Tropical Alberto, siendo el primer ciclón tropical de la temporada del Océano Atlántico. Este sistema evolucionó de manera favorable en el ambiente, alcanzando su máxima intensidad a 220 km al este-sureste de Tampico, Tamps., con vientos máximos sostenidos de 85 km/h y rachas de 100 km/h; sus bandas nubosas se extendieron en los estados de

Tamaulipas, Nuevo León, Coahuila, Veracruz, San Luis Potosí, Querétaro, Hidalgo y Puebla (Bravo-Lujano, 2024).



Figura 34. Evolución del patrón de la Tormenta Tropical Alberto (National Oceanic and Atmospheric Administration & National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center, 2024).

Alberto, tocó tierra el día 20 de junio en el sureste de Cd. Madero, Tamaulipas; al desplazarse por las aguas cálidas y el entorno montañoso del noreste de México, comenzó a perder fuerza degradándose a depresión tropical con vientos máximos sostenidos de 55 km/h y rachas de 75 km/h (Bravo-Lujano, 2024).

Se tuvieron precipitaciones significativas en los estados de Tamaulipas, Nuevo León y Veracruz; las presas con mayores aportes fueron las del estado de Nuevo León, teniendo un incremento de 771.84 Mm³ (Bravo-Lujano, 2024).

Capítulo 3. Características fisiográficas del área de estudio

Tabla 8. Aporte del Ciclón Tropical Alberto en las presas de Nuevo León (Bravo-Lujan, 2024).

Presa	Almacenamiento al 16/06/2024 (Mm ³)	Porcentaje de llenado (%)	Almacenamiento al 25/06/2024 (Mm ³)	Porcentaje de llenado (%)	Variación de almacenamiento (Mm ³)
El Cuchillo	357.02	32	947.68	84	590.66
La Boca	13.08	37	34.12	97	21.04
Cerro Prieto	15.08	5	175.39	58	160.30

Las lluvias máximas en Nuevo León, se registraron el día 19 de junio en la estación “El Cerrito” con 600 mm y el día 20 de junio en la estación “Rodrigo Gómez” con 282.5 mm (Bravo-Lujan, 2024).



Figura 36. Río Santa Catarina durante la tormenta Tropical Alberto (TecScience & Becerril, 2024).



Figura 35. Presa Cerro Prieto al 109 % de llenado respecto al NAMO en julio 2024.

3.4 Geología

3.4.1 Geología regional

En Nuevo León predomina la existencia de rocas de origen sedimentario mesozoico plegadas, ubicadas sobre un basamento paleozoico y precámbrico (Michalzik, 1988). Una serie de plegamientos alargados orientados de NNW – SSE, conforma a la Sierra Madre Oriental, la cual está conformada por una secuencia de rocas carbonatadas y terrígenas de origen mesozoico, que se encuentran plegadas y cabalgadas a causa de la Orogenia Laramide; existe una gran influencia en el aporte de sedimentos por parte de la SMO a la planicie de la Llanura Costera del Golfo (Martínez Vallejo, 2007).

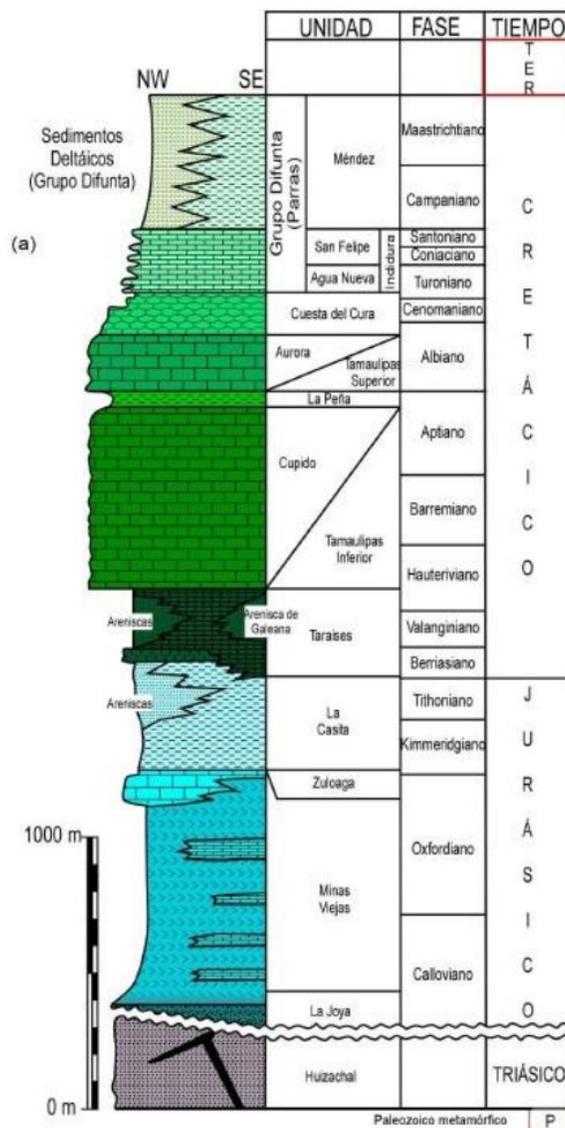


Figura 37. Columna estratigráfica de la SMO (Michalzik, 1988).

En los estados de Tamaulipas, Nuevo León y Coahuila; se encuentra la Planicie Costera del Golfo de México, cuya formación evoca al levantamiento de la Sierra Madre Oriental (SMO) y la subsidencia paralela de la PCGM, teniendo grandes depósitos de sedimentos erosionados y depositados en ríos y arroyos de la región (Dávila-Pórcel & De León-Gómez, 2013).

3.4.2 Geología local

Geología local

En el área de estudio se encuentran dos formaciones geológicas, la Formación San Felipe del Cretácico Superior y la Formación Méndez del Cretácico Superior (De León Gómez, 1993).

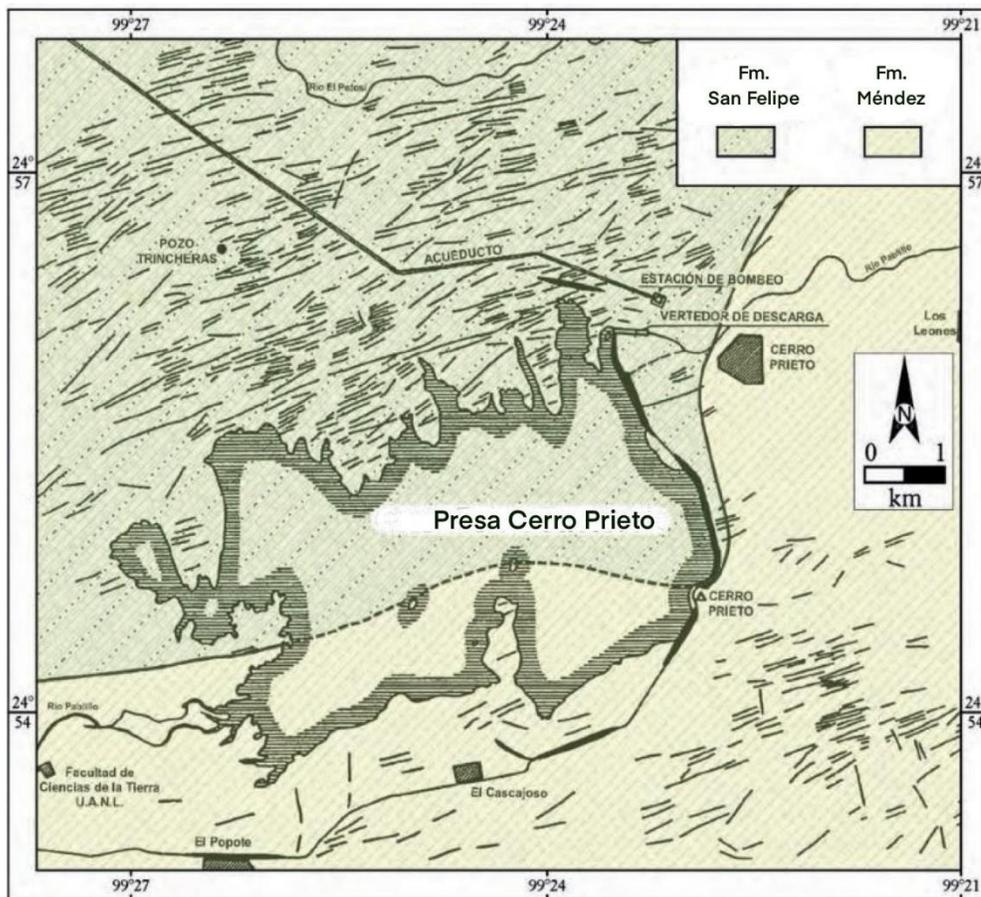


Figura 38. Formaciones geológicas presentes en el área de la Presa Cerro Prieto y zonas de fracturas localizadas (De León Gómez, 1993).

La parte norte del vaso, se encuentra sobre rocas de la formación San Felipe del Cretácico Superior formando la estructura anticlinal Trincheras; se encuentra compuesta por una serie de rocas caliza, calizas silicificadas, lutitas, margas y areniscas; es posible identificar pequeñas fisuras llenas de calcita, cuarzo o

minerales arcillosos; tienen coloraciones amarillas a la intemperie, verde claro a oscuro y delgadas capas blancas (De León Gómez, 1993).



Figura 39. Formación San Felipe.

La parte sur del vaso, se encuentra localizada sobre lutitas homogéneas, calcáreas a limosas de la Formación Méndez del Cretácico Superior; su coloración va de gris a gris oliva; si estas se encuentran a la intemperie meteorizadas sus colores varían de crema, marrón a marrón amarillento, presentando fracturas, grietas o fallas que se encuentran rellenas de calcita teniendo longitudes de 2 m y espesores de 0.4 m aproximadamente (De León Gómez, 1993).



Figura 40. Formación Méndez.

Las formaciones antes mencionadas, se encuentran influenciadas por elementos tectónicos como fallas, diclasamientos considerables y pliegues de empuje (De León Gómez, 1993).

Geología estructural (Fracturas y fallas)

En el nivel regional, el marco tectónico de la Llanura Costera del Golfo se encuentra afectado e influenciado por las rocas sedimentarias de la Sierra Madre Oriental, sin embargo, la tectónica presente en esta región es relativamente suave a la presente en la SMO (Martínez Vallejo, 2007; Padilla y Sánchez, 1982).

De León Gómez, en 1993, encontró la existencia de grandes extensiones de lineamientos con dirección SW-NE en el anticlinal Trincheras, dicho fracturamiento se originó en el momento de mayor afluencia de la orogenia Laramide. Martínez Vallejo, en 2007, realizó el análisis estructural de las formaciones San Felipe y Méndez, las cuales afloran en el área de la presa; donde se pudo evidenciar que existen discontinuidades de familias de fracturas que coinciden en un aspecto general de direcciones; concluyendo con la identificación de un fracturamiento distensivo caracterizado por el sistema de fracturas “ac”, donde los ejes formaron un estiramiento originando fracturas y la inmersión al suroeste, siendo este sistema de fracturamiento el más abundante, con respecto al sistema “bc” las cuales fueron formadas en el momento de compresión situándose mayormente en las crestas de las estructuras.

3.5 Hidrología

La presa Cerro Prieto se encuentra ubicada en la región hidrológica RH25 “San Fernando-Soto La Marina” abarcando una superficie de 1708km² (Izaguirre Valdez, 2008). Cuenta con una influencia de morfología muy marcada en el sureste por la SMO y noreste por PCGM. En la parte de la SMO se cuenta con un drenaje de tipo detrítico-angular y en la PCGM con un drenaje de tipo detrítico-subparalelo. El principal escurrimiento de la cuenca es el Río Pablillo, el cual nace aproximadamente a 60km al SW de Linares en la cercanía de los cerros Pablillo e Infiernillo. Este cauce corre con dirección de SW-NE, en su transcurso se le unen el Río Hualahuises y el Río Camachito. Estos dos dan origen al Río Camacho, vertiendo así sus aguas al Río Pablillo, aportando anualmente un caudal aproximado de 138 Mm³ a la presa; la cual brinda un importante suministro al sistema nacional de abastecimiento de agua potable “Linares-Monterrey” (De León Gómez, 1993; Izaguirre Valdez, 2008).

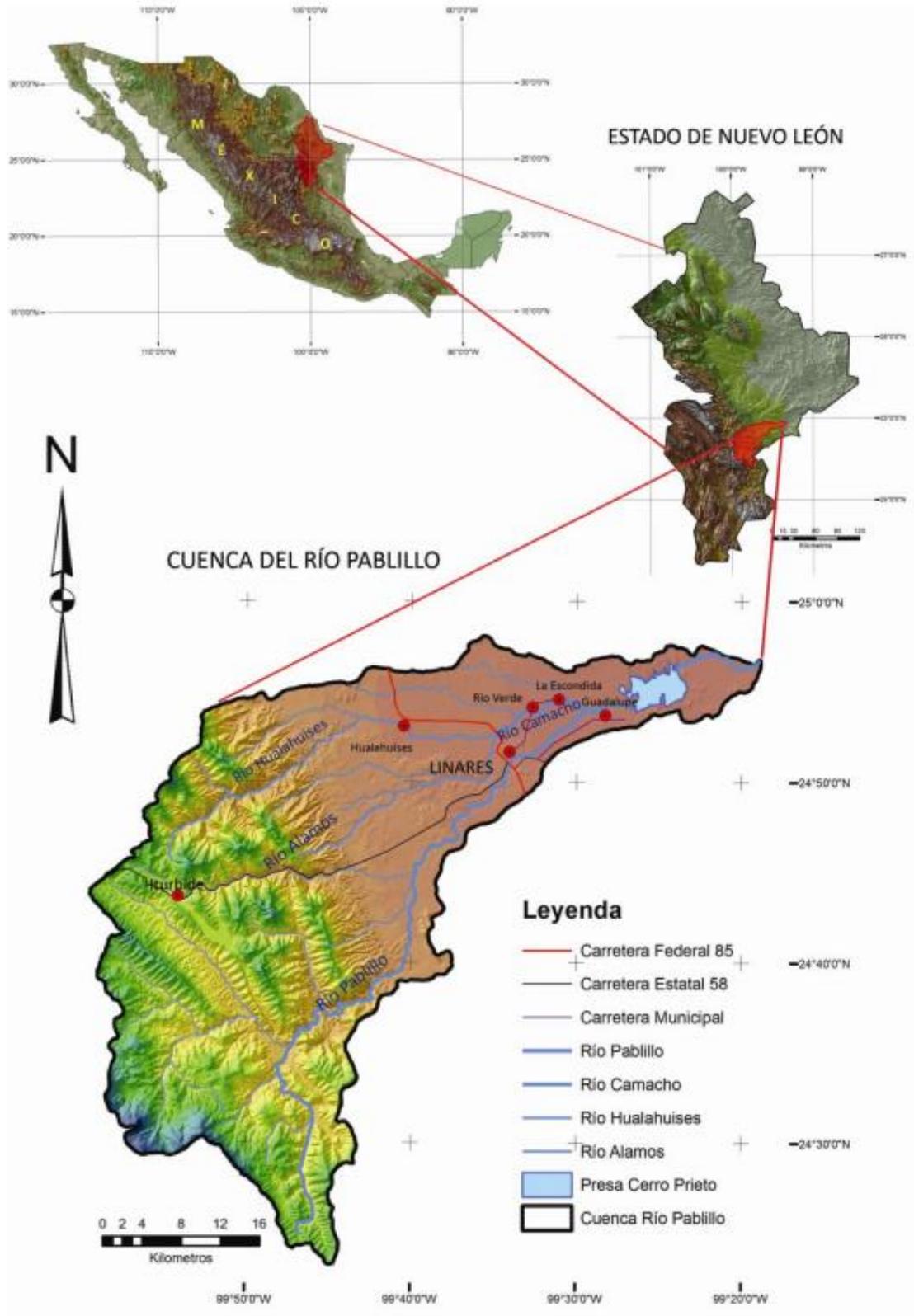


Figura 41. Cuenca Hidrológica del Río Pabillón, la cual desemboca en la Presa Cerro Prieto (Dávila-Pórcel, 2011).

Los objetivos principales de la construcción de la presa fueron:

- Suministro de 4.1 m³/s de agua para uso doméstico e industrial para Monterrey y su área Metropolitana.
- Abastecimiento para el riego agrícola de 673ha
- Control de avenidas en caso de huracanes.

Aunque De León-Gómez en 1993 determinó que el suministro medio anual de la presa era de 2.61 m³/s, lo cual representaba un valor cercano del 30 % de la oferta de agua potable para la ciudad de Monterrey y su área Metropolitana, en su investigación realizó el balance hidrológico donde se determinó la existencia de pérdidas por filtraciones de la presa y considerando que la población era de aproximadamente 4 millones de habitantes y actualmente según el Censo de población y vivienda expedido por el INEGI en 2020, la población es de aproximadamente 5.7 millones de habitantes; por lo que la oferta de agua potable aportada por esta fuente actualmente representa un valor inferior.

3.6 Hidrogeología

Agua subterránea en México:

Desde el año 2001, se comenzó un proceso de caracterización, delimitación, y principalmente la disponibilidad que hay en los acuíferos, ya que un 40.3 % de los usos nacionales del agua, es obtenido mediante aguas subterráneas. Hasta la última actualización que se tiene en el año 2021 se contabilizaron 653 acuíferos en México, de los cuales se señalaron 111 acuíferos sobreexplotados; un acuífero se considera sobreexplotado cuando su relación extracción/recarga es mayor que 1.1 (CONAGUA, 2021, 2022).

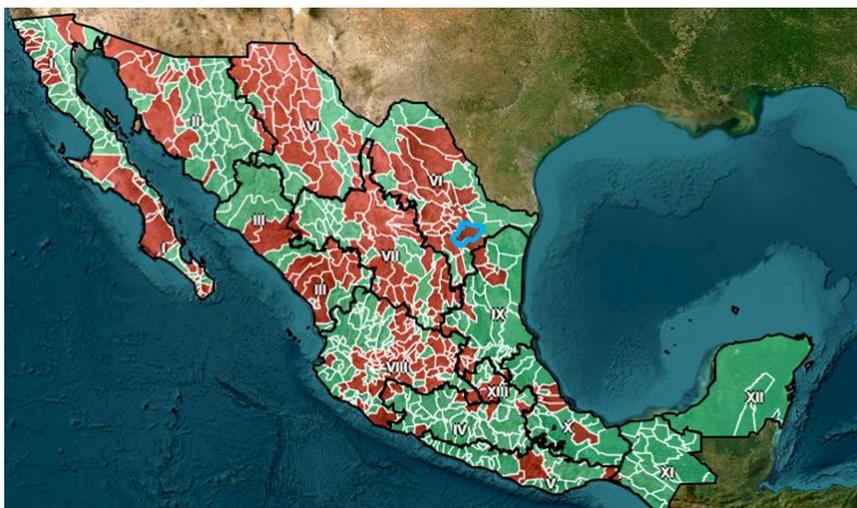


Figura 42. Disponibilidad media anual de acuíferos, marcado con una línea celeste el acuífero donde se encuentra la presa cerro prieto (modificado de CONAGUA, 2020).

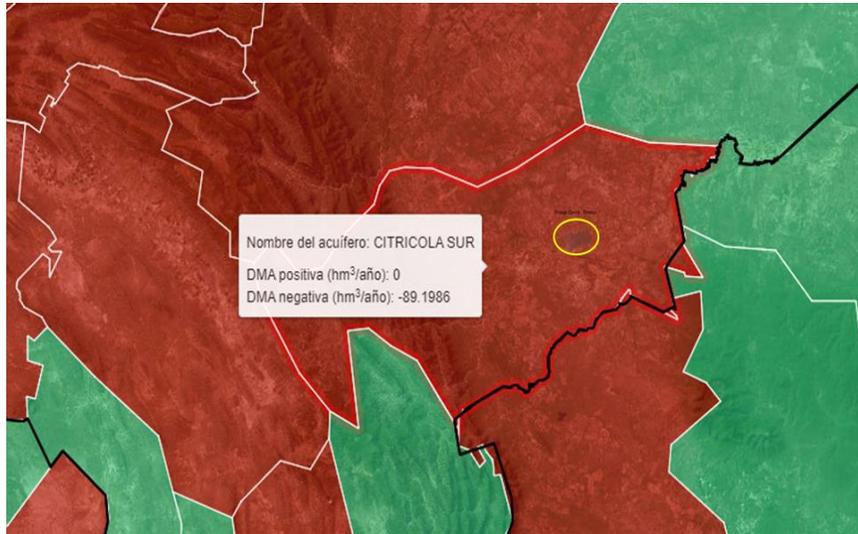


Figura 43. Acercamiento al acuífero “citrícola sur” mostrando datos de disponibilidad media anual positiva y negativa (DMA), (modificado de CONAGUA, 2020).

Hidrogeología Cerro Prieto:

La presa Cerro Prieto, se localiza en una estructura geológica compuesta por pliegues anticlinales y sinclinales fuertemente fracturados y la principal fuente de recarga del acuífero local está constituido por el flujo subterráneo proveniente de la SMO y las infiltraciones de agua almacenada en la presa (Martínez Vallejo, 2007).

Acuíferos:

De León-Gómez, en 1993, identificó tres niveles de aguas subterráneas en el área de captación de la presa Cerro Prieto:

- a) Piso 1: Gravas y arenas fluviales; acuífero superficial (poros-gravas)
- b) Piso 2: Formación Méndez y San Felipe; acuífero medio (grietas)
- c) Piso 3: Borde Sierra Madre Oriental; acuífero profundo (kárstico)

Donde se menciona que los pisos 1 y 2 son de importancia directa para la presa Cerro Prieto, mientras que el piso 3 sólo ocurren en las partes bajas de la Planicie Costera del Golfo.

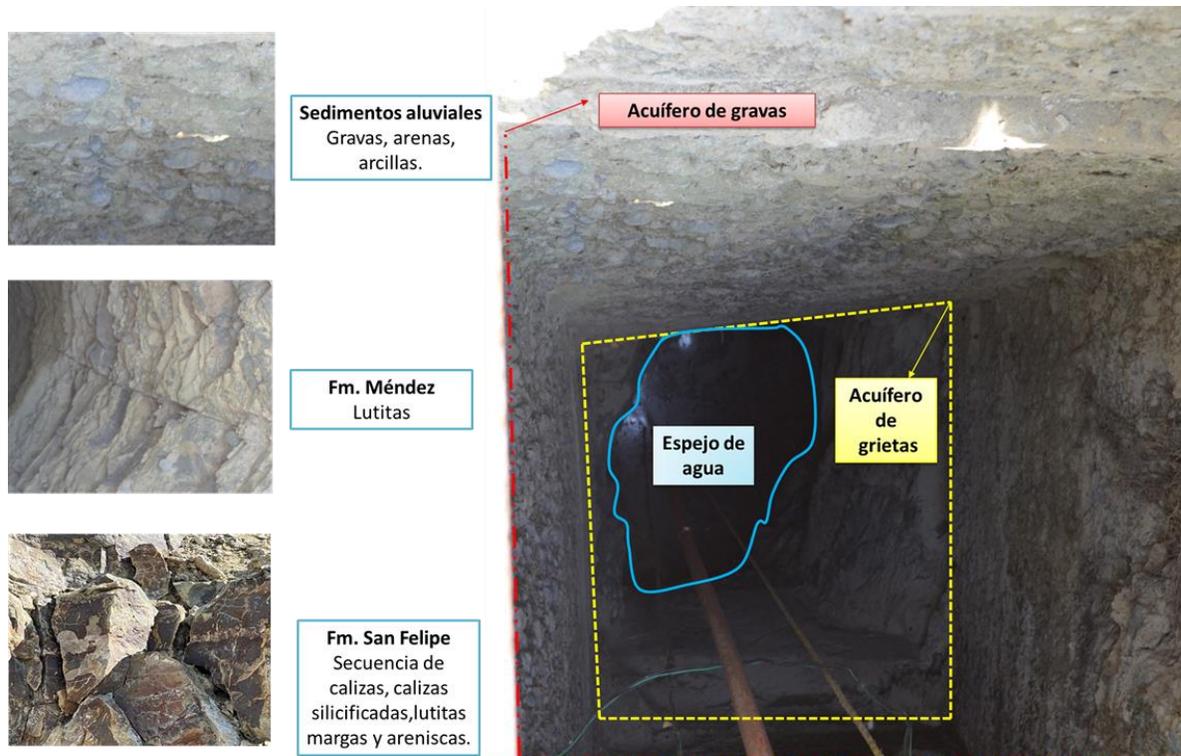


Figura 44. Ejemplo del acuífero en el pozo CP-1 del área de estudio.

Filtraciones:

De León-Gómez, en 1993, determinó el valor de filtraciones el cual correspondía a un orden de 800 l/s; sobrepasando el valor de pérdidas permisibles del 5 %, ya que el presentado era de 16 %. La mitad de estas filtraciones se concentra en el área de cimentación de la cortina, en la zona de la ataguía y la otra mitad fluye en el subsuelo a través de las fracturas de la Formación San Felipe aflorando en forma de manantiales. Todas estas filtraciones se distribuyen en una red hidráulica ramificada, localizada aguas debajo de la presa hasta 7 km de distancia aproximadamente. Las principales causas se deben a elementos tectónico-geológicos como las diaclasas en dirección “ac” que se presentan en forma perpendicular al eje de la cortina y diques, fallas inversas y normales, pliegues de empuje, estratificación horizontal y la presencia de litología heterogénea

Capítulo 4. Método

En la presente investigación se empleó un método de cinco etapas, con el fin de cumplir los objetivos propuestos. En la Figura 45, se muestra un esquema temático de este método, que será descrito en el presente capítulo.

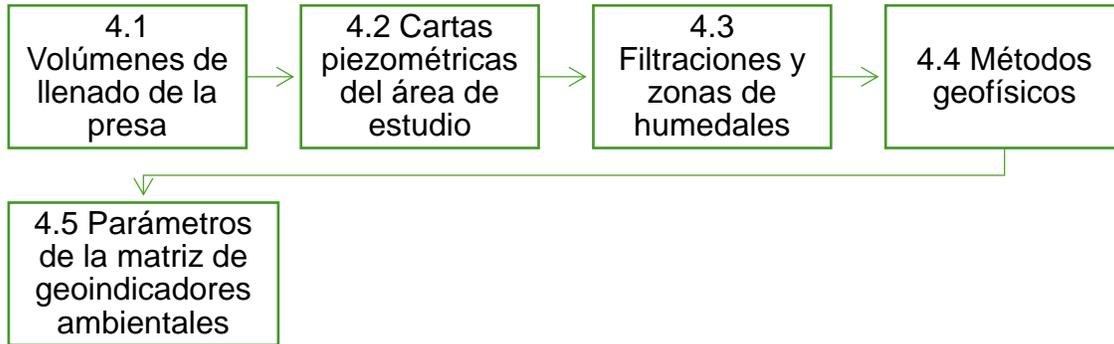


Figura 45. Esquema metodológico empleado en la investigación.

4.1 Volúmenes de llenado de la presa

El monitoreo de la evolución del llenado de la presa, fue uno de los pilares de la presente investigación, debido a que es considerado el primer indicador de la falta de precipitaciones y escurrimientos en el área de estudio.

Para determinar la evolución de los volúmenes de la presa Cerro Prieto, se empleó el uso de la página web “Monitoreo de las Principales Presas de México” del SINA de CONAGUA (<https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/Presas/>), se consultó el reporte el primer día de cada mes desde enero 2021 hasta el mes de diciembre 2024, incluyendo las cuatro campañas de medición realizadas.



Figura 46. Vista de la página web de Monitoreo de Principales Presas de México (CONAGUA, 2024).

Estos datos fueron obtenidos con el fin de elaborar una gráfica donde se pudiera visualizar la evolución de la presa durante los años de sequía, estos datos se muestran en la tabla a continuación.

Tabla 9. Evolución de volúmenes de la presa 2021 - 2024 (CONAGUA, 2024).

FECHA	ALMACENAMIENTO (%)
01/01/2021	25%
01/02/2021	23%
01/03/2021	21%
01/04/2021	19%
01/05/2021	17%
01/06/2021	15%
01/07/2021	14%
01/08/2021	15%
01/09/2021	16%
01/10/2021	14%
01/11/2021	13%
01/12/2021	12%
01/01/2022	10%
01/02/2022	9.79%
09/03/2022	8.30%
06/04/2022	6.75%
25/05/2022	3.18%
14/06/2022	2.11%
20/07/2022	0.50%
01/08/2022	0.78%
09/09/2022	13.04%
01/10/2022	17%
01/11/2022	19%
01/12/2022	17%
01/01/2023	19%
01/02/2023	16%
01/03/2023	14%
09/03/2023	13%
01/04/2023	18%
01/05/2023	13%
01/06/2023	16%
09/06/2023	17%
01/07/2023	15%
01/08/2023	14%
01/09/2023	10%
01/10/2023	8%
01/11/2023	8.00%
01/12/2023	8.00%
01/01/2024	11.00%
01/02/2024	11.00%
01/03/2024	10.00%
01/04/2024	8.00%
01/05/2024	7.00%
01/06/2024	6.00%
19/06/2024	5.00%
23/06/2024	40.00%
10/07/2024	92.63%
01/08/2024	101.00%
01/09/2024	109.00%
01/10/2024	114.00%
01/11/2024	115.00%
01/12/2024	116.00%

4.2 Cartas piezométricas del área de estudio

Para obtener las cartas piezométricas y su evolución durante la sequía, primeramente, se realizaron visitas al campo y se localizaron 14 aprovechamientos hidráulicos (pozos, papalotes y norias); como se muestra en la Figura 47. Estos aprovechamientos hidráulicos se encuentran bordeando la presa Cerro Prieto, con el fin de encontrar una relación entre el volumen de la presa y el nivel piezométrico de los aprovechamientos hidráulicos durante el tiempo que se realizó la presente investigación. Los datos específicos de cada aprovechamiento hidráulico se encuentran en la Tabla 10; para determinar su localización geográfica en Coordenadas UTM, se empleó el GPS Garmin Oregon 450. Durante la localización de los aprovechamientos hidráulicos, también se localizaron los piezómetros y los vertedores, como parte de la instrumentación presente en la presa.

Tabla 10. Especificaciones de los aprovechamientos hidráulicos.

Clave	Información de referencia	Localización (Coord. UTM) Este	Localización (Coord. UTM) Norte	Elevación del terreno (msnm)
CP1	Noria familia Cabriales, en ejido Guadalupe; uso: regular.	452310.00 m	2753671.00 m	296
CP2	Noria Facultad de Ciencias de la Tierra; uso: regular.	452788.86 m	2753734.59 m	296
CP3	Papalote terreno al lado del panteón; uso: sin uso.	454095.72 m	2752916.30 m	294
CP4	Pozo Sigagis, Ejido el Poblado; uso: sin uso.	454990.57 m	2752702.95 m	290
CP5	Papalote ubicado en terreno en venta; uso: sin uso.	455903.47 m	2752856.80 m	297
CP6	Noria en ejido El Cascajoso; uso: regular	457880.99 m	2753815.86 m	296
CP7	Papalote equipado en rancho La Esperanza; uso: regular	459206.51 m	2753522.12 m	285
CP8	Pozo equipado en deportivo Cerro Prieto; uso: sin uso.	459727.18 m	2754811.86 m	292
CP9	Pozo equipado "El Venado"; uso: regular	461173.62 m	2758056.34 m	263
CP10	Pozo equipado #35 Agua y Drenaje; uso: en uso.	460685.39 m	2757972.84 m	264
CP11	Papalote equipado abrevadero de vacas; uso: en uso.	460295.94 m	2758992.59 m	261
CP12	Pozo equipado casita azul; uso: regular.	459594.47 m	2758943.05 m	295
CP13	Pozo cabañas FENSI	453999.00	2755955.00	279
CP14	Terreno privado en Alamillo	449263.00	2755095.00	307
PZ-1	Piezómetro obra de toma.	459860.49 m	2757847.89 m	271
PZ-2	Alineado con las mojoneras, el camino es muy largo.	459797.05 m	2758019.71 m	268
PZ-3	Alineado con la parte más alta de la cortina de la presa.	459815.74 m	2758084.24 m	265
PZ-4	Ubicado por el segundo poste	459609.74 m	2758413.35 m	286
V-1	Vertedor triangular, ubicado al lado del PZ-3	459817.43 m	2758084.24 m	266
V-2	Vertedor triangular, donde antes había bombas	460028.36 m	2758132.53 m	265
V-3	Vertedor triangular, presencia de manantiales en la zona	460872.00 m	2757410.00 m	258

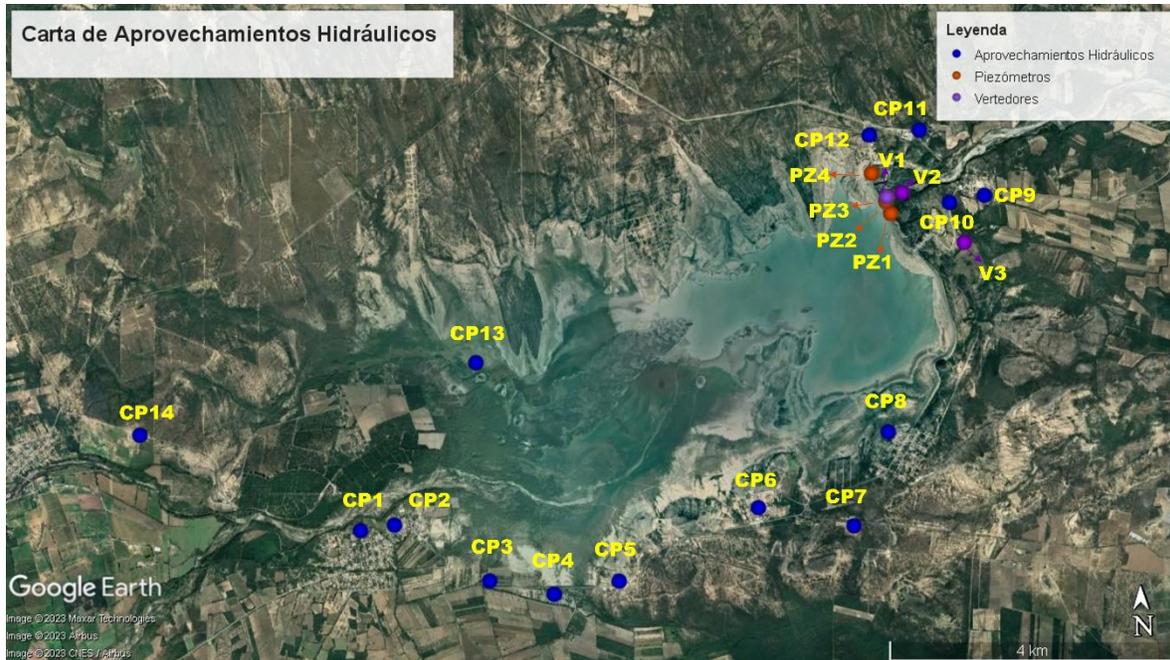


Figura 48. Ubicación de los aprovechamientos hidráulicos (modificado de Google Earth, 2023).

Se realizaron 4 campañas de medición durante el periodo 2023 – 2024, donde se empleó el uso de la sonda hidrogeológica Solinist, para conocer el nivel freático de cada uno de los aprovechamientos; la sonda consta de un electrodo sensible al agua el cual se introduce lentamente en los aprovechamientos hidráulicos y cuando emite un sonido, se registra la profundidad del nivel freático, los datos que proporciona esta sonda adicionales al nivel freático, son la temperatura y la conductividad eléctrica, los datos recabados deben ser añadidos a una bitácora de registro. Es importante limpiar la sonda después de cada medición con agua destilada.



Figura 47. Ejemplo de medición de aprovechamientos hidráulicos en Cerro Prieto, empleando la sonda Solinist.



Figura 49. Ejemplo de campaña de medición en los 14 aprovechamientos hidráulicos.

Los datos completos de las cuatro campañas de medición, pueden ser consultados en el capítulo 5, Tabla 11.

Una vez que se tienen los datos obtenidos en el campo, se procede a elaborar la representación de esta información, en una carta piezométrica, la cual puede ser interpretada de una manera más sencilla, brindando información de la evolución de los niveles piezométricos, cambios en las isóneas y flujo preferente del acuífero; esta representación, se realizó de manera digital usando como herramienta principal el software ArcMap 10.8, donde se aplicó el método de interpolación pondera por

distancia inversa (IDW), para la obtención de las cartas piezométricas, se realizó el siguiente método:

1. Se localizó el área de estudio utilizando Google Earth para delimitar un polígono rectangular el cual abarcará el área de los aprovechamientos hidráulicos; las coordenadas UTM se capturaron en un archivo de Excel, el cual se exportó al software ArcMap 10.8, con el fin de geolocalizar estos puntos en un plano.
2. Los datos recabados en las campañas de medición, fueron transcritos a un Excel, donde se obtuvieron las alturas piezométricas haciendo una sustracción aritmética del nivel estático a la altura del brocal, obteniendo la altura piezométrica, se muestra un ejemplo en la Figura 50.

ID DEL POZO	COORDENADAS (E) LONGITUD	COORDENADAS (N) LATITUD	ALTURA BROCAL (m.s.n.m.)	NIVEL ESTÁTICO (m.s.n.m.)	NIVEL PIEZOMÉTRICO o (m.s.n.m.)
CP-1	452310	2753671	296	5.84	290.16
CP-2	452787	2753734	296	9.82	286.18
CP-3	454094	2752916	294	9.22	284.78
CP-4	454989	2752702	290	6.54	283.46
CP-5	455902	2752856	297	10.31	286.69
CP-6	457879	2753814	296	12.07	283.93
CP-7	459206	2753522	285	21.7	263.3
CP-8	459726	2754811	292	17.34	274.66
CP-9	461172	2758056	263	9.68	253.32
CP-10	460685	2757972	264	3.34	260.66
CP-11	460295	2758991	261	4.24	256.76
CP-12	459602	2758945	295	35.02	259.98
CP-13	453998	2755955	279	15.02	263.98
CP-14	449262	2755095	307	11.49	295.51
PF-1	448257	2759617	319	11.50	307.5
PF-2	462193	2759617	253	4.3	248.7
PF-3	462193	2752103	266	21.8	244.2
PF-4	448257	2752103	316	5.84	310.16

Figura 50. Ejemplo de tabla elaborada en excel para calcular nivel piezométrico, datos primer campaña de medición.

3. Se exportó el archivo de Excel con los datos piezométricos al software ArcMap; para aplicar las herramientas de análisis espacial (Spatial Analyst Tools), donde se eligió la opción de interpolación IDW.

4. A la interpolación, se le añadieron las isolíneas piezométricas para indicar las diferencias de nivel a cada metro, un ejemplo del software se aprecia en la Figura 51.

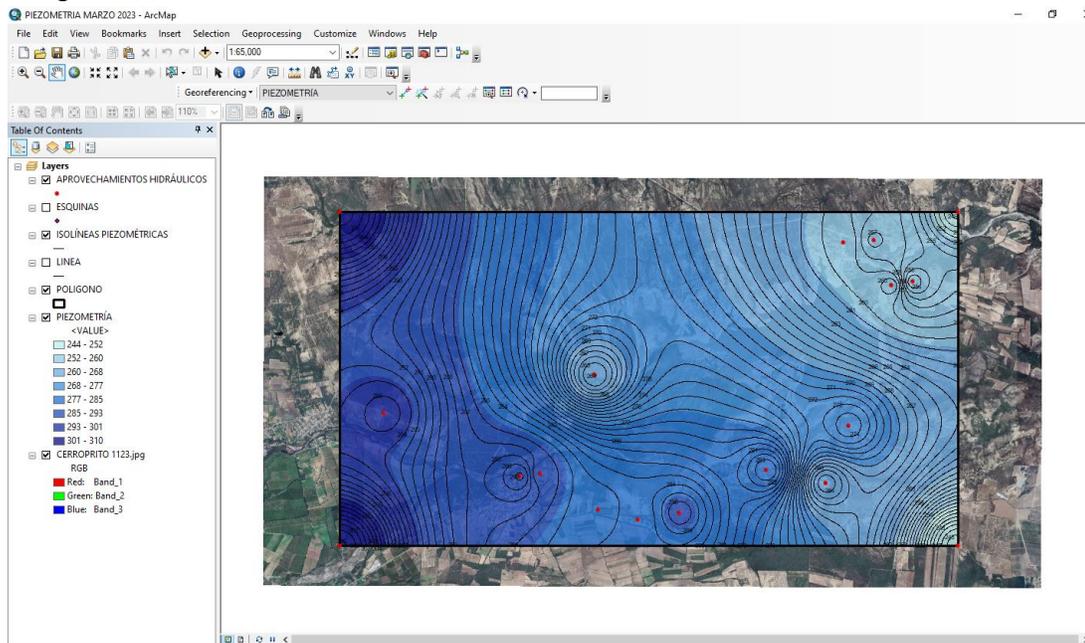


Figura 51. Vista previa del programa ArcMap, para la elaboración de cartas piezométricas.

5. Finalmente, se dibujaron las direcciones de flujo preferente y se exportó el mapa como una imagen completa como se muestra en el Capítulo 5, apartado 5.2 “Evolución de la piezometría y área de influencia aguas abajo de la cortina”.

Se realizó el mismo proceso con las cartas piezométricas a detalle, pero para su elaboración solo se consideraron CP – 9, CP – 10, CP – 11 Y CP – 12; lo cual permite hacer una mejor correlación de datos con las zonas de humedales y los estudios geofísicos.

4.3 Filtraciones y zonas de humedales

A través de las diferentes visitas al campo, se evidenció la existencia de filtraciones y zonas de humedales, por lo que su mapeo era de vital importancia durante los años de sequía 2021 – 2024.

Para la detección de humedales en el área de estudio, se utilizaron imágenes satelitales de Copernicus Browser y se aplicó el filtro de bandas NDMI (Índice de Diferencia de Agua Normalizado). Este índice se emplea para determinar el contenido de agua en la vegetación y para monitorear sequías. El NDMI adopta valores entre -1 y +1. Los valores negativos (cerca de -1) corresponden a suelo

desnudo, mientras que los valores alrededor de cero (entre -0.2 y +0.4) suelen indicar estrés hídrico (Gao, 1996).

Se utilizó el mismo polígono rectangular empleado en las cartas piezométricas para delimitar el área de estudio, como se muestra en la Figura 52. Posteriormente, el archivo fue exportado a Google Earth, donde se diseñaron los patrones de humedales aguas abajo de la cortina, representándolos con diferentes colores para obtener las cartas de evolución. Estas cartas reflejan la influencia de los valores mínimo, máximo y promedio de la presa en el periodo 2021-2024 sobre las zonas de humedales.

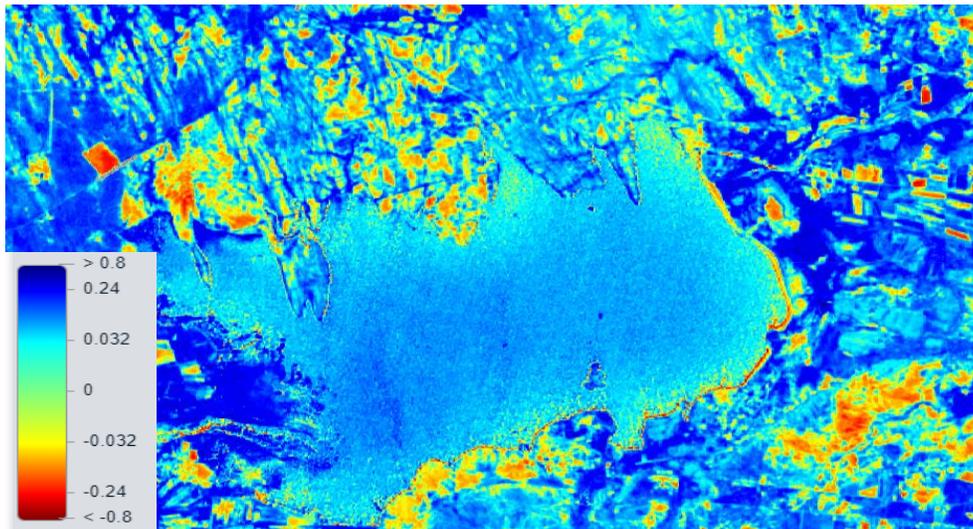


Figura 52. Ejemplo de imagen satelital de NDMI (Obtenida de Copernicus Browser, 2024).

4.4 Métodos geofísicos

La cortina de la presa Cerro Prieto es uno de los elementos estructurales más importantes; sin embargo, a simple vista el deterioro de los taludes de la presa es evidente tanto aguas arriba como aguas abajo. Aguas arriba la geometría del talud fue modificada después del Huracán Emily, ahora el talud cuenta con una especie de escalón cubierta de concreto lanzado. Aguas abajo es notoria la deformación como se muestra en la Figura 53. A través de una imagen aérea de la cortina de la presa se tienen líneas de vegetación muy definidas aguas arriba y aguas abajo, dando indicios de posibles grietas que dan paso a filtraciones en esas zonas, como se muestra en la Figura 54.

Actualmente, la presa no cuenta con ninguna base de datos ni instrumentación necesaria para consultar los asentamientos, ni la deformación horizontal, por esta razón se optó por métodos geofísicos. Ambos métodos empleados no son métodos

destruictivos, ni invasivos en el cuerpo de la cortina y servirán para identificar las zonas con mayores anomalías

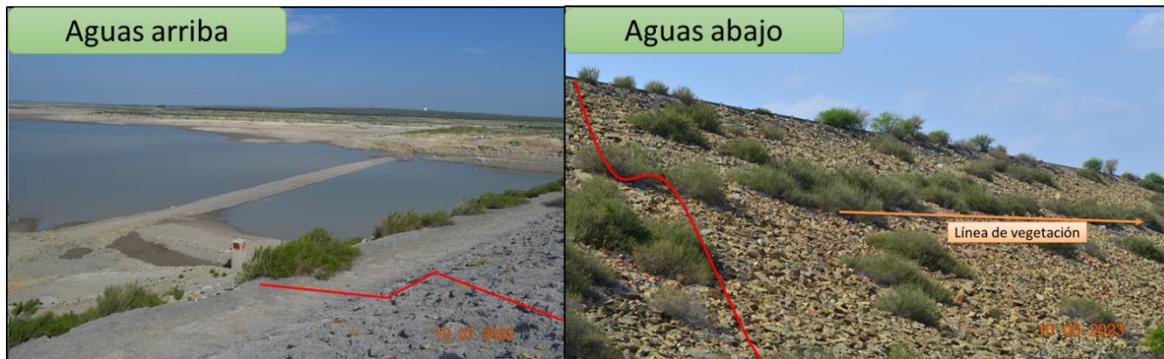


Figura 53. Deformación de la cortina de la presa Cerro Prieto.

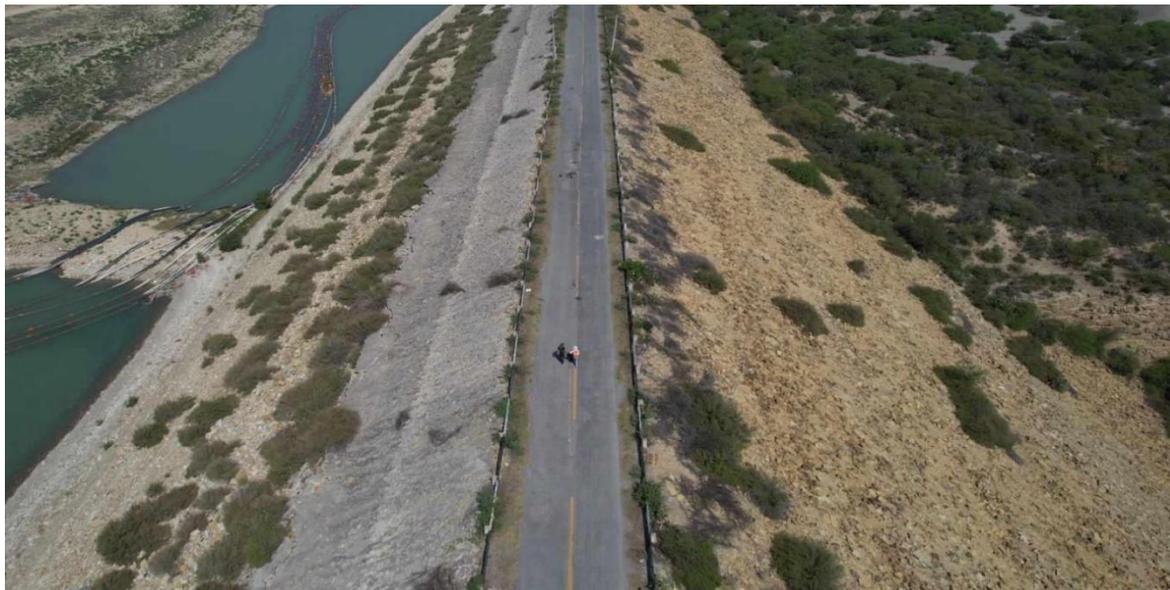


Figura 54. Imagen aérea de la cortina Cerro Prieto, donde se puede apreciar la vegetación presente en el talud (IPICYT, 2024).

Se realizó una campaña de mediciones geofísicas durante el mes de marzo de 2024. El volumen de la presa era del 10 % y este factor es importante debido a que de esta manera la estructura de la cortina estaba seca y no habría señales confusas en las mediciones geofísicas. Se optó por dos tipos de mediciones geofísicas: la primera consta de mediciones gravimétricas y el segundo método implica mediciones con dos antenas de georadar.

A continuación, se describe el método empleado en ambas mediciones.

Gravimetría

Para la adquisición de datos de microgravimetría en la cortina de la presa, se utilizó el equipo Scintrex CG-5 autograv y un GPS Garmin, esta instrumentación, se muestra en la Figura 55.



Figura 55. Equipo Scintrex CG-5.

Antes de comenzar la adquisición de datos en la cortina de la presa, se realizó una estación base en la Facultad de Ciencias de la Tierra, con el fin de hacer las correcciones de gravedad correspondientes cuando se tuvieran todos los datos. Una vez en la cortina, se tomaron mediciones aproximadamente cada 25 m de distancia, obteniendo las coordenadas que se muestran en la tabla. El tiempo para la toma de las estaciones base, fue de 60 segundos y para la cortina de 30 segundos.



Figura 56. Estación base FCT, toma de medición 60 segundos.



Figura 57. Ejemplo de estaciones realizadas en la cortina, tiempo de toma 30 segundos.

Tabla 11. Localización de las estaciones de microgravimetría en la cortina de la presa Cerro prieto.

Punto	Lat N	Long W	Altura m	Grav Station
Base IPICYT	22.14864	101.0344	1900	0
Base FCT	24° 53.906'	99° 28.006'	297	0
CP001	24° 55.863'	99° 23.714'	289	1
CP050	24° 55.876'	99° 23.728'	295	50
CP002	24° 55.882'	99° 23.744'	292	2
CP003	24° 55.887'	99° 23.755'	287	3
CP049	24° 55.903'	99° 23.770'	295	49
CP004	24° 55.929'	99° 23.789'	294	4
CP005	24° 55.940'	99° 23.796'	291	5
CP006	24° 55.952'	99° 23.802'	292	6
CP007	24° 55.964'	99° 23.809'	293	7
CP008	24° 55.976'	99° 23.815'	293	8
CP009	24° 55.987'	99° 23.822'	294	9
CP010	24° 55.999'	99° 23.828'	293	10
CP011	24° 56.011'	99° 23.835'	294	11
CP012	24° 56.023'	99° 23.841'	293	12
CP013	24° 56.035'	99° 23.848'	293	13
CP014	24° 56.046'	99° 23.854'	294	14
CP015	24° 56.058'	99° 23.861'	294	15
CP016	24° 56.071'	99° 23.868'	294	16
CP017	24° 56.084'	99° 23.874'	295	17
CP018	24° 56.095'	99° 23.881'	296	18
CP019	24° 56.108'	99° 23.887'	295	19
CP020	24° 56.118'	99° 23.895'	282	20
CP021	24° 56.133'	99° 23.902'	282	21
CP022	24° 56.144'	99° 23.908'	283	22
CP023	24° 56.157'	99° 23.915'	284	23
CP024	24° 56.169'	99° 23.922'	285	24
CP025	24° 56.181'	99° 23.928'	285	25
CP026	24° 56.193'	99° 23.934'	284	26
CP027	24° 56.207'	99° 23.941'	286	27
CP028	24° 56.217'	99° 23.948'	286	28
CP029	24° 56.229'	99° 23.955'	286	29
CP030	24° 56.242'	99° 23.961'	286	30
CP031	24° 56.255'	99° 23.968'	287	31
CP032	24° 56.267'	99° 23.975'	287	32
CP033	24° 56.280'	99° 23.982'	287	33
CP034	24° 56.292'	99° 23.989'	288	34
CP035	24° 56.304'	99° 23.996'	288	35
CP036	24° 56.315'	99° 24.002'	288	36
CP037	24° 56.328'	99° 24.006'	289	37
CP038	24° 56.341'	99° 24.010'	289	38
CP039	24° 56.353'	99° 24.013'	290	39
CP040	24° 56.366'	99° 24.014'	290	40
CP041	24° 56.378'	99° 24.015'	291	41
CP042	24° 56.392'	99° 24.014'	291	42
CP043	24° 56.405'	99° 24.013'	291	43
CP044	24° 56.417'	99° 24.012'	293	44
CP045	24° 56.430'	99° 24.011'	292	45
CP046	24° 56.442'	99° 24.011'	293	46
CP047	24° 56.454'	99° 24.010'	293	47
CP048	24° 56.467'	99° 24.009'	294	48
Base FCT	24° 53.906'	99° 28.006'	297	0
Base IPICYT	22.14864	101.0344	1900	0

Los datos “crudos” fueron procesados en el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, donde se obtuvieron los valores de G0 teórica (WGS84), empleando los valores de la Tabla 12; los valores de G0 teórica (Hinze, 2005) empleando los valores de la Tabla 13, la lectura cero de deriva (CD), la corrección por elevación de Hinze (C elev Hinze) con los datos de la Tabla 14, la gravedad observada (gobs) con los datos de la Tabla 15 y la sumatoria de la lectura CD; la diferencia del gradiente de anomalía (dgFA) obtenido de (Gobs - G0 teórica (WGS84) + C elev (Hinze)); Finalmente las correcciones de Bouger 2.3 (cbouger) siguiendo la formula $(0.04192 \cdot 2.3 \cdot \text{altura})$ y la dg Bouger simple con $(\text{dgFA} - \text{cbouger } 2.3)$.

Tabla 13. Datos empleados para obtención de parámetro G0 WGS84.

WGS 1984	Blakely, 1995: p. 136, ratio	
g_eq	9.78033	
k	0.00193185138639	sin ^2
e^2	0.00669437999013	sin ^2

Tabla 15. Datos empleados para obtención de parámetro G0 Hinze.

G0 Hinze 2005	978036.309
g_eq	978032.6772
alfa	0.001931851
beta	0.00669438

Tabla 12. Datos empleados para obtención del parámetro C_elev Hinze.

C_elev Hinze 2005	371390.063
alfa	0.3087691
beta	0.0004398
gamma	7.2125
delta	0.00000001

Tabla 14. Datos empleados para obtención de parámetro gobs.

FCT G0 Base	g Base FCT
978849.821	4814.081

Los valores obtenidos se registraron en la tabla a continuación, para posteriormente exportarse al programa Surfer, donde fueron rasterizados y pasados a una imagen la cual se encuentra en el Capítulo 5, apartado 5.4.

Tabla 16. Tabla de datos microgravimétricos procesados.

Punto	Latitud_Grad	Rad	Altura, m	G0 teor (WGS84)	G0 teor (Hinze, 2005)	Lectura CD	C_elev (Hinze)	Gobs	dgFA	Cbouguer 2.3	dg Bouguer simpl
CP001	24.93105	0.435129	289	978950.799	978950.8	4827.7764	89.21771	978863.5	1.935338	27.86422	-25.92888628
CP002	24.931367	0.435134	292	978950.821	978950.8	4828.1071	90.14391	978863.8	3.170371	28.15347	-24.98310133
CP003	24.93145	0.435136	287	978950.826	978950.8	4827.7726	88.60024	978863.5	1.286443	27.67139	-26.38494947
CP004	24.93215	0.435148	294	978950.875	978950.9	4827.4735	90.76137	978863.2	3.100164	28.3463	-25.24614048
CP005	24.932333	0.435151	291	978950.887	978950.9	4827.7113	89.83517	978863.5	2.399142	28.05706	-25.65791449
CP006	24.932533	0.435155	292	978950.901	978950.9	4828.0563	90.14391	978863.8	3.039104	28.15347	-25.11436815
CP007	24.932733	0.435158	293	978950.915	978950.9	4827.8654	90.45264	978863.6	3.143144	28.24989	-25.10674437
CP008	24.932933	0.435162	293	978950.929	978950.9	4827.6031	90.45264	978863.3	2.867056	28.24989	-25.38283182
CP009	24.933117	0.435165	294	978950.941	978950.9	4827.4717	90.76137	978863.2	3.031651	28.3463	-25.31465258
CP010	24.933317	0.435168	293	978950.955	978951	4827.3588	90.45264	978863.1	2.596288	28.24989	-25.65360048
CP011	24.933517	0.435172	294	978950.969	978951	4827.3179	90.76137	978863.1	2.850263	28.3463	-25.49604135
CP012	24.933717	0.435175	293	978950.983	978951	4827.187	90.45264	978862.9	2.396823	28.24989	-25.85306529
CP013	24.933917	0.435179	293	978950.997	978951	4827.3212	90.45264	978863.1	2.517245	28.24989	-25.7326431
CP014	24.9341	0.435182	294	978951.009	978951	4827.6561	90.76137	978863.4	3.148227	28.3463	-25.19807742
CP015	24.9343	0.435186	294	978951.023	978951	4827.5077	90.76137	978863.2	2.986015	28.3463	-25.36028866
CP016	24.934517	0.435189	294	978951.038	978951	4827.3658	90.76137	978863.1	2.829158	28.3463	-25.51714576
CP017	24.934733	0.435193	295	978951.053	978951.1	4827.3655	91.0701	978863.1	3.122661	28.44272	-25.32005947
CP018	24.934917	0.435196	296	978951.066	978951.1	4827.0474	91.37883	978862.8	3.100636	28.53914	-25.43849952
CP019	24.935133	0.4352	295	978951.081	978951.1	4827.3181	91.0701	978863.1	3.047703	28.44272	-25.39501688
CP020	24.9353	0.435203	282	978951.092	978951.1	4827.5295	87.05658	978863.3	-0.76593	27.18931	-25.85524539
CP021	24.93555	0.435207	282	978951.109	978951.1	4827.3697	87.05658	978863.1	-0.94298	27.18931	-28.1322872
CP022	24.935733	0.435211	283	978951.122	978951.1	4826.9524	87.36531	978862.7	-1.06421	27.28573	-28.34993721
CP023	24.93595	0.435214	284	978951.137	978951.1	4827.2425	87.67404	978863	-0.48039	27.38214	-27.86253217
CP024	24.93615	0.435218	285	978951.151	978951.2	4827.6702	87.98277	978863.4	0.242307	27.47856	-27.23625338
CP025	24.93635	0.435221	285	978951.165	978951.2	4827.2445	87.98277	978863	-0.19721	27.47856	-27.67577488
CP026	24.93655	0.435225	284	978951.178	978951.2	4827.7589	87.67404	978863.5	-0.00532	27.38214	-27.38746342
CP027	24.936783	0.435229	286	978951.194	978951.2	4827.6675	88.2915	978863.4	0.504613	27.57498	-27.07036258
CP028	24.93695	0.435232	286	978951.206	978951.2	4827.6806	88.2915	978863.4	0.506206	27.57498	-27.06877015
CP029	24.93715	0.435235	286	978951.22	978951.2	4828.1079	88.2915	978863.8	0.919647	27.57498	-26.65532918
CP030	24.937367	0.435239	286	978951.235	978951.2	4828.5427	88.2915	978864.3	1.339538	27.57498	-26.23543823
CP031	24.937583	0.435243	287	978951.25	978951.2	4828.0885	88.60023	978863.8	1.179115	27.67139	-26.49227699
CP032	24.937783	0.435246	287	978951.263	978951.3	4828.429	88.60023	978864.2	1.505808	27.67139	-26.16558412
CP033	24.938	0.43525	287	978951.278	978951.3	4828.4371	88.60023	978864.2	1.499008	27.67139	-26.17238399
CP034	24.9382	0.435254	288	978951.292	978951.3	4828.3479	88.90897	978864.1	1.704665	27.76781	-26.06314282
CP035	24.9384	0.435257	288	978951.306	978951.3	4828.1825	88.90896	978863.9	1.525454	27.76781	-26.24235424
CP036	24.938583	0.43526	288	978951.319	978951.3	4828.0379	88.90896	978863.8	1.368199	27.76781	-26.39960888
CP037	24.9388	0.435264	289	978951.334	978951.3	4828.9338	89.2177	978864.7	2.557886	27.86422	-25.30633757
CP038	24.939017	0.435268	289	978951.349	978951.3	4828.9606	89.2177	978864.7	2.569725	27.86422	-25.29449892
CP039	24.939217	0.435271	290	978951.362	978951.4	4828.7106	89.52643	978864.5	2.614717	27.96064	-25.34592265
CP040	24.939433	0.435275	290	978951.377	978951.4	4829.0983	89.52643	978864.8	2.987407	27.96064	-24.9732332
CP041	24.939633	0.435279	291	978951.391	978951.4	4829.5858	89.83516	978865.3	3.769909	28.05706	-24.28714692
CP042	24.939867	0.435283	291	978951.407	978951.4	4829.0071	89.83516	978864.7	3.175015	28.05706	-24.88204064
CP043	24.940083	0.435287	291	978951.422	978951.4	4829.197	89.83516	978864.9	3.34997	28.05706	-24.70708642
CP044	24.940283	0.43529	293	978951.436	978951.4	4828.9922	90.45263	978864.7	3.748837	28.24989	-24.50105138
CP045	24.9405	0.435294	292	978951.451	978951.5	4828.9063	90.14389	978864.6	3.339264	28.15347	-24.81420814
CP046	24.9407	0.435297	293	978951.465	978951.5	4829.6548	90.45262	978865.4	4.382753	28.24989	-23.86713491
CP047	24.9409	0.435301	293	978951.479	978951.5	4829.5238	90.45262	978865.3	4.237922	28.24989	-24.01196625
CP048	24.941117	0.435305	294	978951.493	978951.5	4828.9994	90.76136	978864.7	4.007316	28.3463	-24.33898758
CP049	24.931717	0.435141	295	978950.845	978950.8	4827.594	91.07011	978863.3	3.55932	28.44272	-24.88339997
CP050	24.931267	0.435133	295	978950.814	978950.8	4828.3009	91.07011	978864	4.297234	28.44272	-24.14548567

Georadar

Se llevaron a cabo dos líneas de georadar en la cortina de la presa, como se muestra en la Figura 58. El equipo utilizado para la adquisición de datos fue el georadar MALA RTA de con una antena 50 MHz y otra de 500 MHz, este equipo se muestra en la Figura 59.

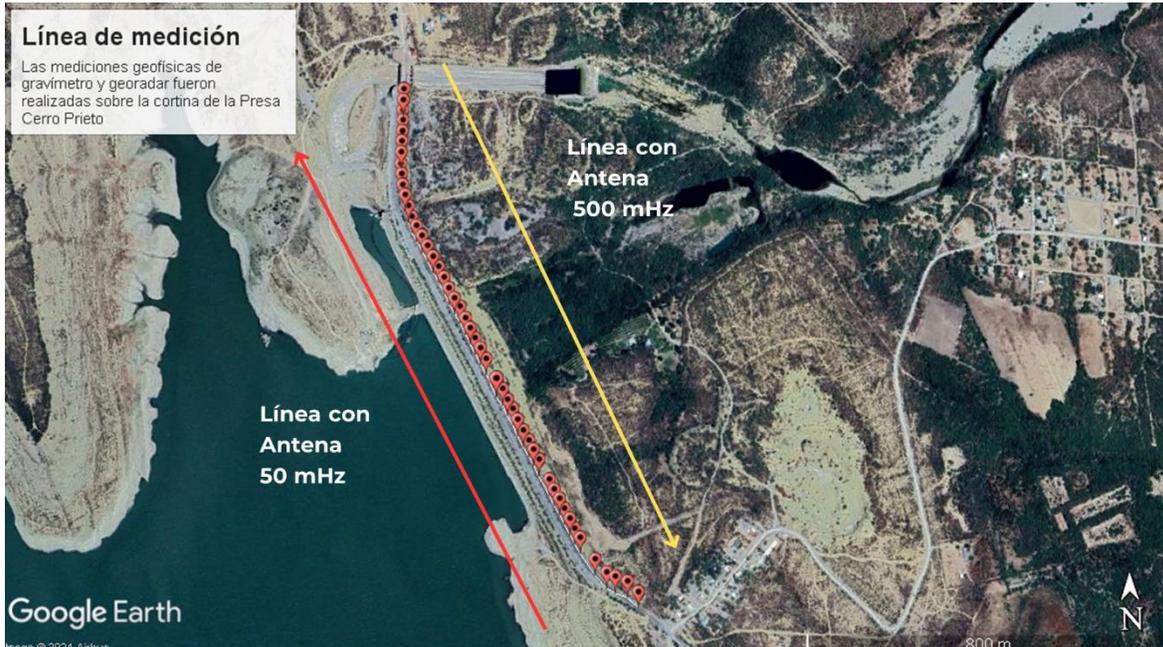


Figura 58. Dirección de las líneas de medición con georadar (modificado de Google Earth, 2024).



Figura 59. a) Medición en georadar, b) antena RTA, c) Equipo georadar MALA.

Los datos obtenidos de ambas líneas se procesaron en el IPICYT con el software RAMAC Ground Vision, siguiendo la siguiente metodología de procesamiento:

1. Automatic gain control (Control automático de ganancia), para compensar la atenuación de la señal con la profundidad.
2. Background removal (eliminación de fondo), elimina el ruido o las señales estáticas no deseadas.

3. Band pass (filtro de banda), permite el paso de frecuencias en un rango específico.
4. DC Removal (Eliminación del componente DC), elimina los sesgos de señales.
5. Running average (promedio móvil), filtra los datos aplicando un promedio.
6. Subtract mean trace (sustracción de la traza media), traza un promedio de las trazas del radagrama para eliminar repeticiones no deseadas.
7. Time varying gain (ganancia variable en el tiempo), corrige la atenuación de la señal a mayor profundidad.

4.5 Parámetros de la matriz de geindicadores

La matriz de geindicadores ambientales propuesta por la ICOLD, es un análisis de identificación de tipo cualitativo; por lo que conocer el área de estudio en este tipo de matrices es fundamental. Las visitas al campo, permitieron identificar las áreas más vulnerables ante una sequía extrema. Los principales parámetros a identificar son la geología y la geomorfología, el tipo de suelos, la hidrogeología, el clima, los ruidos, la calidad del aire, la vegetación, la fauna, el paisaje y el medio socioeconómico.



Figura 60. Parámetros considerados en el inventario ambiental para el llenado de matriz.

Cada uno de estos parámetros fueron llenados acordes con la Tabla 5 y relacionándolos con los datos obtenidos de volúmenes de presa, evolución piezométrica, así como las zonas de humedales y los datos geofísicos, haciendo del llenado de la matriz un estudio integral para la fácil identificación de áreas vulnerables y posibles mantenimientos correctivos y preventivos.

Capítulo 5. Análisis y discusión de resultados

5.1 Relación de volúmenes de llenado con la evolución de la sequía y su impacto en el abastecimiento

En Nuevo León, los mayores efectos negativos de la sequía se presentaron en el año 2022, a pesar de que la ola de sequía más intensa fue en 2021. El municipio de Linares, donde se encuentra el área de estudio, contaba con una clasificación de sequía tipo D2 (Sequía Severa), siendo la falta de precipitación el principal factor de agotamiento de la presa Cerro Prieto, como se muestra en la Figura 61, con 0.5 % de volumen de almacenamiento respecto al NAMO y nulo suministro al abastecimiento de agua hacia la AMM como se muestra en la Figura 62, lo cual afectó a miles de familias regiomontanas (CONAGUA, 2022; NASA, 2022).

Para los resultados de este apartado, se tomó en cuenta el periodo 2021 – 2024, marcando así el periodo más intenso de la sequía en 2021, con una presa al 25 % de volumen de almacenamiento y un abastecimiento hacia la AMM de hasta 5 m³/s, sin interrupciones. Este consumo sin restricciones en el uso del agua, ocasionó que en 2022 el volumen de la presa en enero llegará al 10 % hasta, su estado más crítico en julio con 0.5 % de almacenamiento y sin poder abastecer agua hacia la AMM; En el año 2023 y el primer semestre de 2024, los valores de almacenamiento oscilaron del 19 % como máximo al 5 % como mínimo; evidenciando los impactos de la sequía extrema (2021 – 2024) en la presa Cerro Prieto y su aporte hacia la AMM.

Es importante mencionar que, en el mes de agosto 2024, el monitor de sequía reportó un 0 % de municipios con sequía en el estado de Nuevo León, debido a las precipitaciones por arriba del promedio en los últimos años, a causa de la tormenta tropical “Alberto” en el mes de junio. Esto impactó de manera positiva a la Presa Cerro Prieto, la cual alcanzó un volumen de llenado de 109 % al mes de septiembre (CONAGUA & Servicio Meteorológico Nacional, 2024). “Alberto” ayudó a que Cerro Prieto pasará de 4 % a un 65.5 % en una semana (Reyes & Villasáez, 2024); Sin embargo, Cerro Prieto no pudo suministrar agua hacia la AMM debido a que un desbordamiento en la Presa Libertad (todavía en construcción), inundó la Planta de Bombeo No. 2 del acueducto Linares – Monterrey, como se muestra en la Figura 62 (Aveldaño, 2024).

Después de 2 meses sin suministro hacia la AMM, Cerro Prieto volvió a abastecer agua hacia la AMM (Villasáez, 2024); esto evidenció la falta de conocimiento sobre el estado actual de la presa y sus mantenimientos preventivos y correctivos para evitar los efectos negativos de una sequía y un llenado rápido como fue en el caso de “Alberto”.

En el periodo de esta investigación, el volumen más alto registrado en la presa fue de 110.8 % en el mes de septiembre y con un cuarto desfogue en tres meses por seguridad (Villasáez, 2024). En la Figura 63, se muestra la comparación entre el nivel máximo y el nivel mínimo de la presa durante la presente investigación.

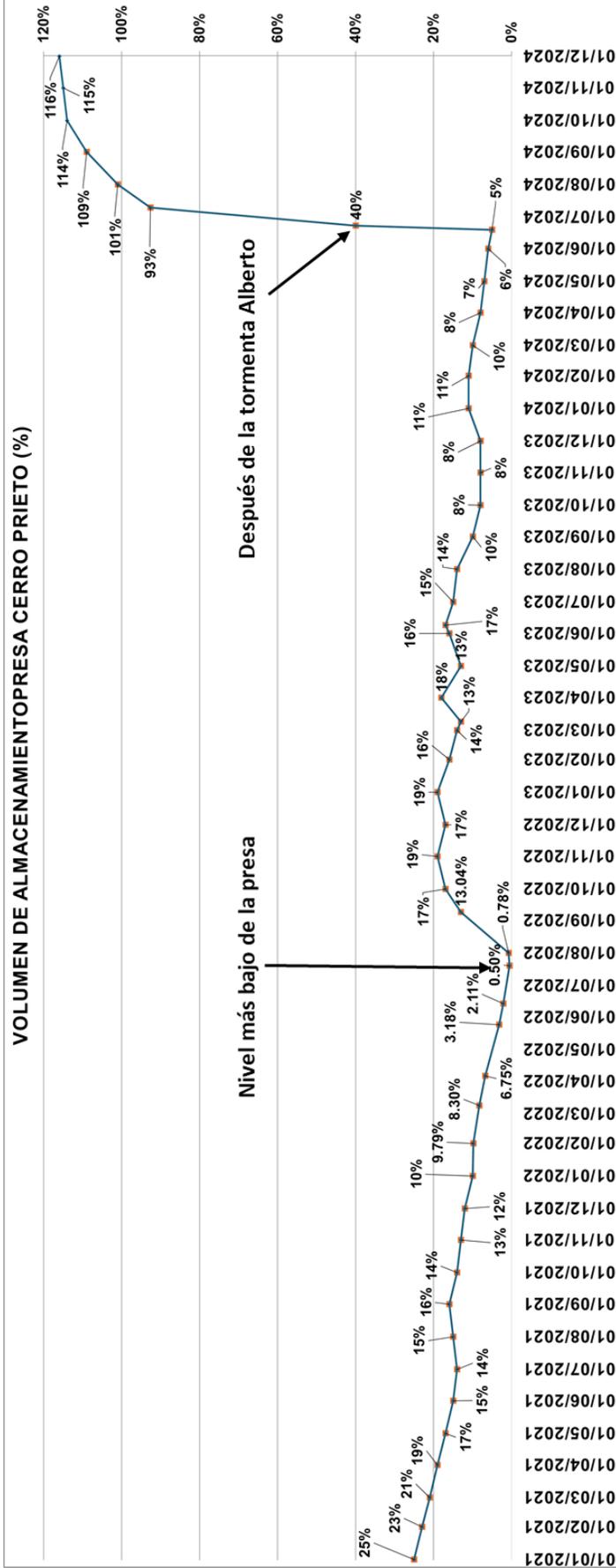
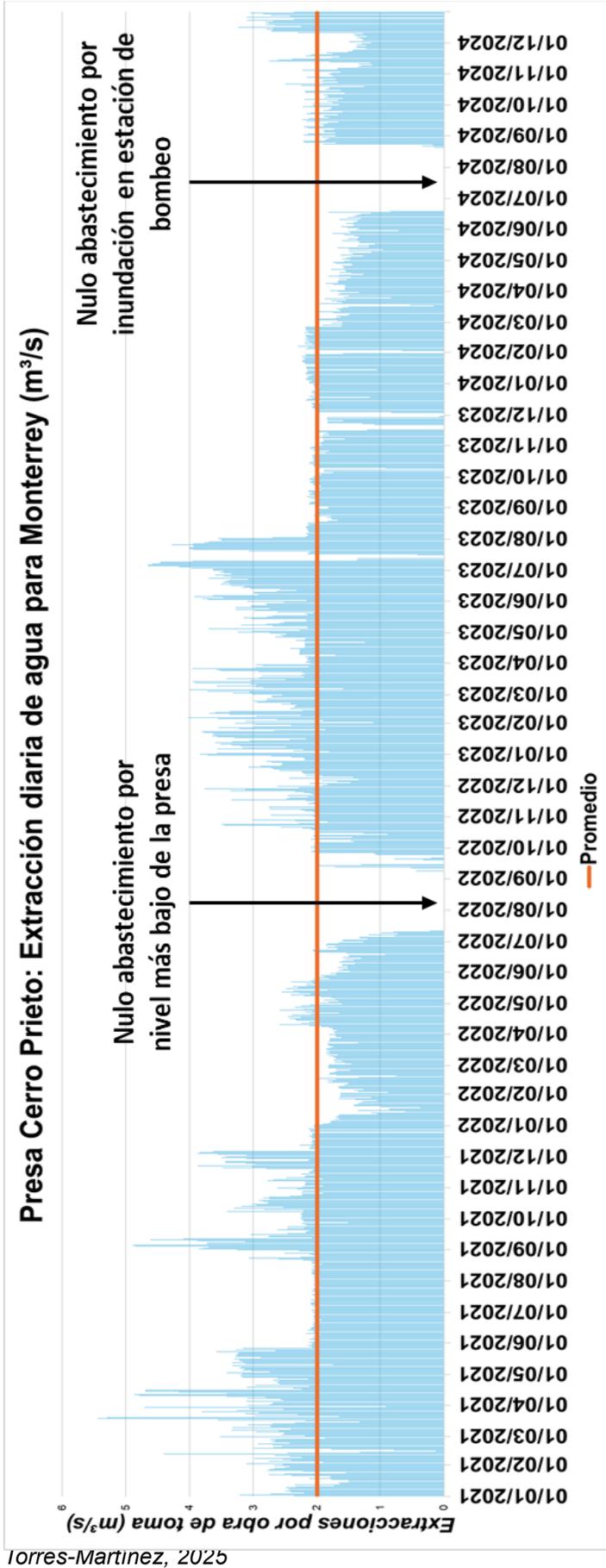


Figura 61. Volumen de almacenamiento de la presa Cerro Prieto (Elaborado con datos de CONAGUA, 2024).



lorres-Martinez, 2025

Figura 62. Extracción diaria de la Presa Cerro Prieto (Elaborada con datos de CONAGUA, 2024).

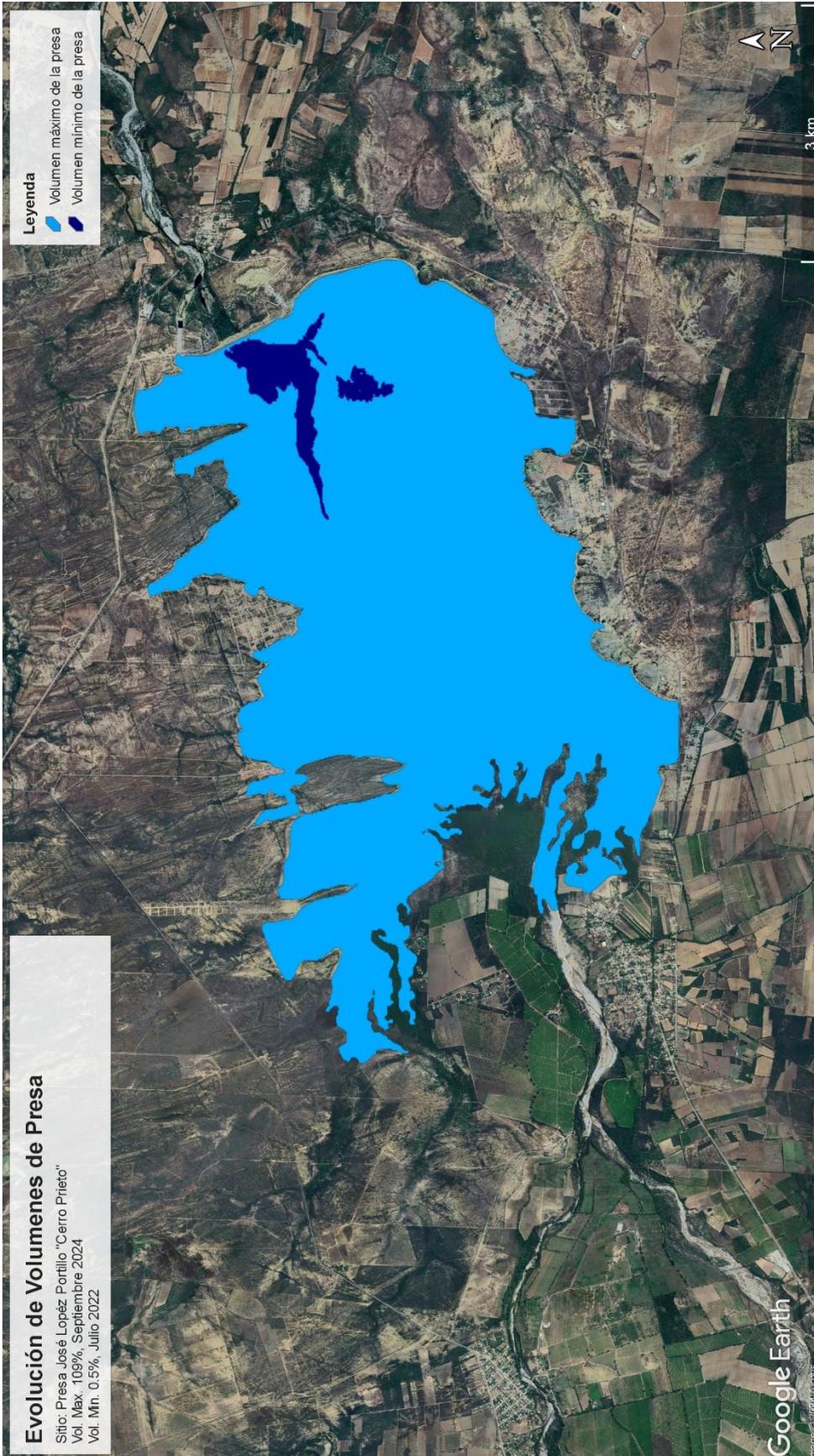


Figura 63. Contraste del volúmenes máximo y mínimo de los años 2021 - 2024 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).

5.2 Evolución de la piezometría y área de influencia aguas abajo de la cortina

Se realizaron cuatro campañas de medición de aprovechamientos hidráulicos para analizar la evolución del acuífero en época de sequía y la relación que existe entre el volumen de la presa y las filtraciones existentes aguas debajo de la cortina. Las primeras tres campañas se realizaron en época de sequía. La primer medición fue en marzo 2023 con 13 % del volumen de la presa, junio 2023 con 17 %, enero 2024 con 11 % y finalmente en julio 2024 después de la tormenta “Alberto” y con desfogues en la presa con un 100.65 % de llenado, por lo cual se puede tener una comparación de diferentes épocas como sequía y extraordinaria.

Tabla 17. Mediciones de aprovechamientos hidráulicos.

ID POZO	NOMBRE DE REFERENCIA	LOCALIZACIÓN UTM		09/03/2023 (Volumen de presa 13%)			09/06/2023 (Volumen de presa 17%)			12/01/2024 (Volumen de presa al 11%)			23/07/2024 (Volumen de presa 100.65%)			OBSERVACIONES
		COORDENADA ESTE (m)	COORDENADA NORTE (m)	T (°C)	COND. (µs/cm)	N.F. (m)	T (°C)	COND. (µs/cm)	N.F. (m)	T (°C)	COND. (µs/cm)	N.F. (m)	T (°C)	COND. (µs/cm)	N.F. (m)	
CP-1	NORIA CABRIELES	452310.00	2753671.00	24	929	5.84	24.2	960	5.32	22.1	970	5.92	24.8	1094	5.19	NORIA SIN EQUIPO
CP-2	NORIA FCT	452788.86	2753734.59	25.1	1482	9.82	25.5	1622	9.03	24.6	2060	9.44	24.9	2484	8.67	SIN EQUIPO, AGUA OLOROSA EN ENERO 2024
CP-3	PAPALOTE PANTEÓN	454095.72	2752916.3	22.6	1456	9.22	22.9	1711	9.17	23.1	1550	9.18	23.2	2137	9.11	PAPALOTE NO SE USA
CP-4	POZO 7 SIGAGIS EL POBLADO	454990.57	2752702.95	26.7	1322	6.54	26.8	1317	6.85	27	1348	6.41	27.5	1321	3.77	EJIDATARIOS DICEN QUE NO SE USA
CP-5	PAPALOTE POR VENDERSE	455903.47	2752856.8	27.1	534	10.31	26.8	753	7.21	27.5	743	8.05	27	716	6.88	NO SE USA
CP-6	NORIA EJIDO CASCAJOSO	457880.99	2753815.86	25.5	1843	12.07	26.3	2219	11.85	25.1	2265	12.03	26.5	2754	10.68	RESTAR ALTURA DE NORIA
CP-7	RANCHO LA ESPERANZA	459206.51	2753522.12	26.2	804	21.7	26.2	826	22.06	26.1	844	20.64	26.3	805	15.29	SE EQUIPO EL POZO CON BOMBA EN
CP-8	POZO DEPORTIVO CERRO	459727.18	2754811.86	26.1	1303	17.34	26.2	1258	17.01	26	1235	19.22	27.5	1090	12.69	MEDICIÓN A ALTURA DE BROCAL
CP-9	POZO EJIDO C.P. VIEJO (VENADO)	461173.62	2758056.34	26.5	987	9.68	26.4	956	7.16	26.7	960	7.96	-	-	4.06	MEDICIÓN A ALTURA DE BROCAL, SE
CP-10	POZO AGUA Y DRENAJE	460685.39	2757972.84	26.7	876	3.34	-	-	2.52	-	-	2.14	26.7	923	1.3	SE REQUIERE APAGAR EL POZO
CP-11	PAPALOTE VACAS	460295.94	2758992.59	26.2	1079	7.1	25.8	1217	4.24	26.5	1027	7.22	27.1	1075	3.76	SE RESTO LA ALTURA DEL BROCAL
CP-12	POZO CASITA AZUL	459594.47	2758943.05	26.8	761	35.02	26.8	1566	34.7	26.7	1213	36.03	26.5	993	23.88	MEDICIÓN A ALTURA DE BROCAL
CP-13	CABAÑAS FENSI	454751.40	2757835.12	-	-	15.02	26.5	732	14.72	-	-	15.2	-	-	11.7	EQUIPADO PERO NO SE USA
CP-14	TERRENO PRIVADO EL ALAMILLO	449263.00	2755095.00	-	-	11.49	26.7	1200	11.19	26.7	1225	11.68	26.5	1455	8.38	SIN EQUIPO

En la Tabla 17, se tienen los registros de nivel freático, conductividad y temperatura; siendo en esta investigación el nivel freático el factor más importante a considerar, el primer contraste a notar, se encuentra en la comparativa de las mediciones 1, 2, y 3 con respecto a la medición 4, la cual fue obtenida después de la tormenta “Alberto”, donde se muestran valores significativamente más altos ocasionados por

la recarga de acuíferos e influencia del volumen de la presa con variaciones que van desde 0.06 m hasta 12.15 m con respecto a otras mediciones como es el caso de el pozo CP-12 en la tercera medición con 36.03 m y en la cuarta medición con 23.88 m, mostrando un ascenso de 12.15 m de nivel freático, tomando en cuenta que los pozos CP-9, CP-10, CP-11 y CP-12, se encuentran en el área de influencia aguas abajo de la cortina de la presa Cerro Prieto por lo cual sus variaciones también dependen del volumen de la presa por ejemplo la segunda medición presenta mayores valores en el nivel freático en el área de influencia con 17 % de volumen de llenado que la tercera medición con 11 % de volumen de llenado de la presa con variaciones que van desde los 0.38 m hasta los 2.96 m tomando en cuenta que el CP-10 se mide con nivel dinámico y no estático como el resto, en el resto de los aprovechamientos medidos en época de sequía si existen variaciones pero estas no son tan marcadas como en el área de influencia. En todas las campañas de medición realizadas, el nivel freático más somero se encontró en el CP-10, el cual corresponde a un aprovechamiento de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, ubicado en el área de influencia por las filtraciones; por otro lado, el pozo con mayor profundidad de nivel freático en todas las mediciones fue el CP-12. Con el registro de los datos de nivel freático, se obtuvieron los niveles piezométricos con los cuales se elaboraron una serie de cartas las cuales evidencian que el acuífero es dinámico y tiene un flujo preferente hacia el Noreste (NE) donde está localizada la cortina de la presa y un flujo secundario al Sureste (SE), lo cual favorece las filtraciones existentes en el área de la cortina y zonas de humedales como se puede apreciar en las figuras donde las flechas de color celeste, marcan el flujo preferente del acuífero.

Los niveles piezométricos en sequía variaron desde 295 msnm hasta 255 msnm, debido a que el área de estudio es extensa, se optó por realizar cartas a detalle de los pozos aguas abajo de la cortina y estos valores piezométricos van de 260 msnm hasta 252 msnm con un flujo preferente NE y secundario SE; los colores más claros en la carta marcan el nivel más somero de agua subterránea y los colores más oscuros evidencian los niveles más profundos de agua subterránea.

Todas las cartas muestran un acuífero dinámico, el cual depende de las cargas y descargas del acuífero, las cuales se vieron afectadas por las escasas precipitaciones y escurrimientos en el área a causa de la sequía extrema; esto es más evidente haciendo la comparación de las cartas de Enero – 2024 y Julio – 2024, donde en la Carta de enero, se tiene una altura piezométrica desde 305 msnm hasta 255 msnm; mientras que en la de julio se tiene una altura piezométrica de 307 msnm hasta 259 msnm; otro punto importante a mencionar, es la alta permeabilidad del acuífero la cual se denota en la comparación de estas dos cartas, donde la equidistancia de las isóneas piezométricas se reduce en la carta de Julio – 2024, especialmente en la zona de influencia aguas abajo de la cortina de la presa (CP-9, CP-10, CP-11 Y CP-12), así como en los aprovechamientos CP-6, CP-7, CP-8.

A continuación, se anexan todas las figuras correspondientes a las cartas piezométricas generales y a detalle.

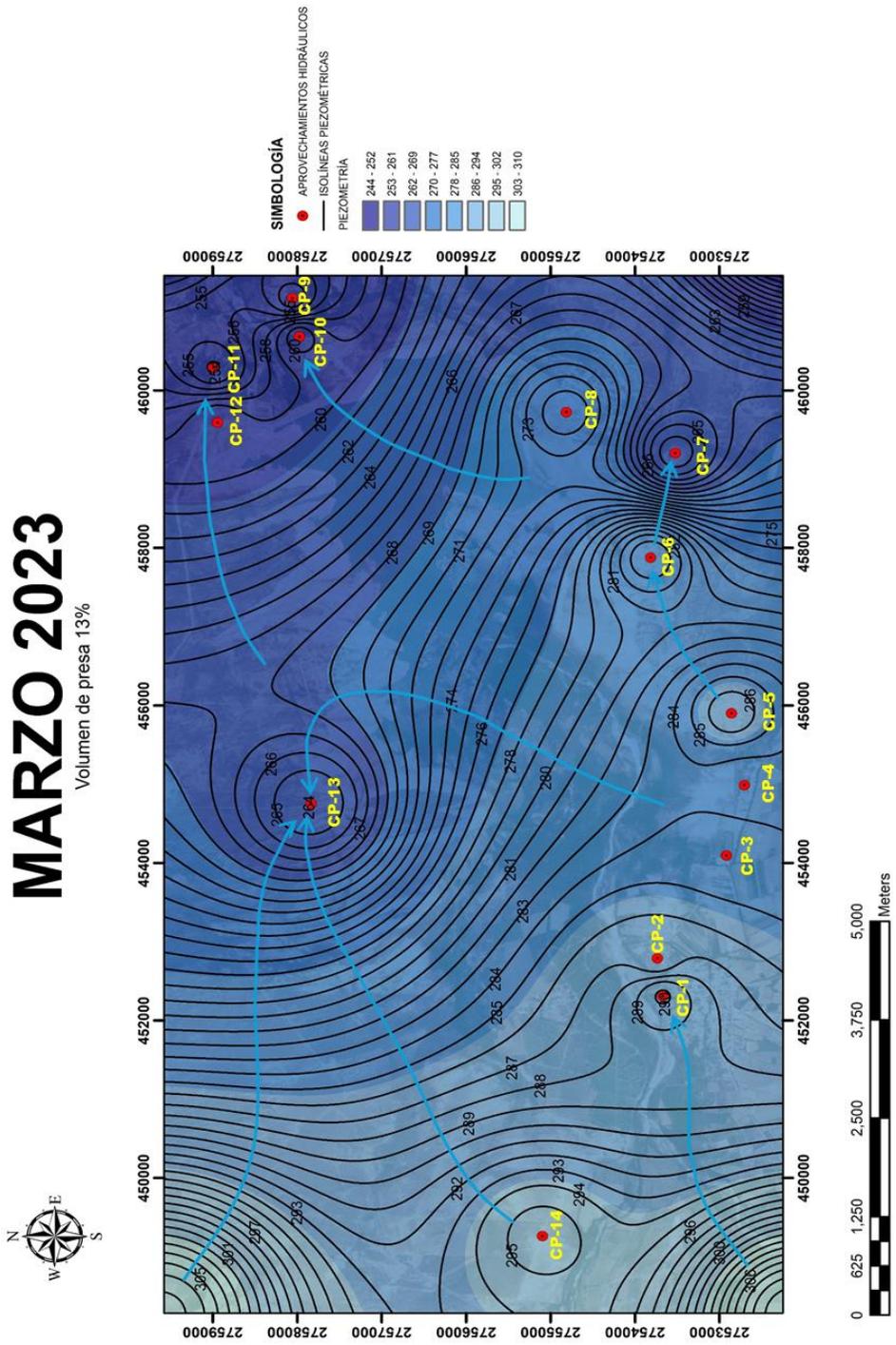


Figura 64. Carta piezométrica del mes de marzo 2023.

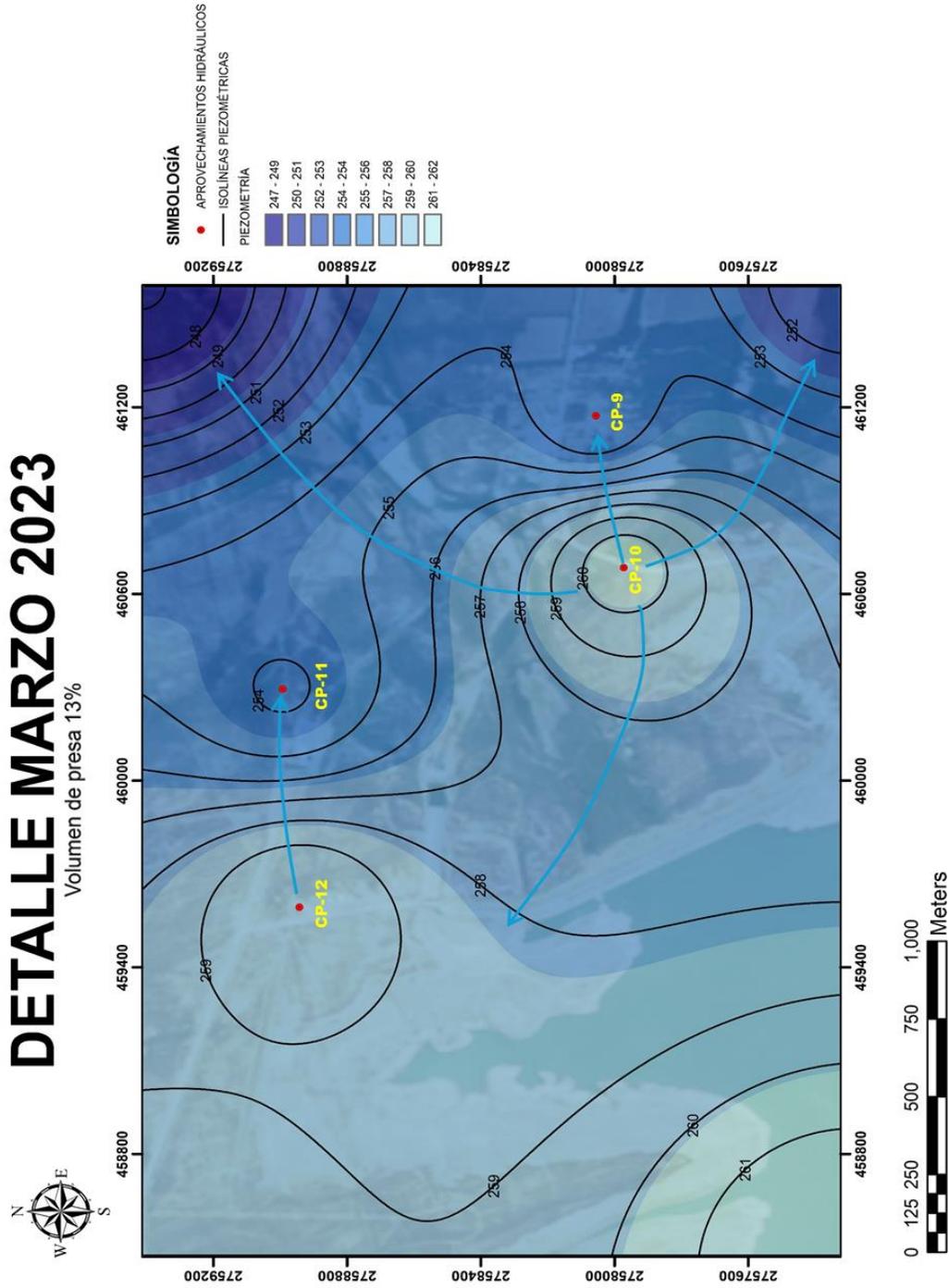


Figura 65. Carta piezométrica a detalle del mes de marzo 2023.

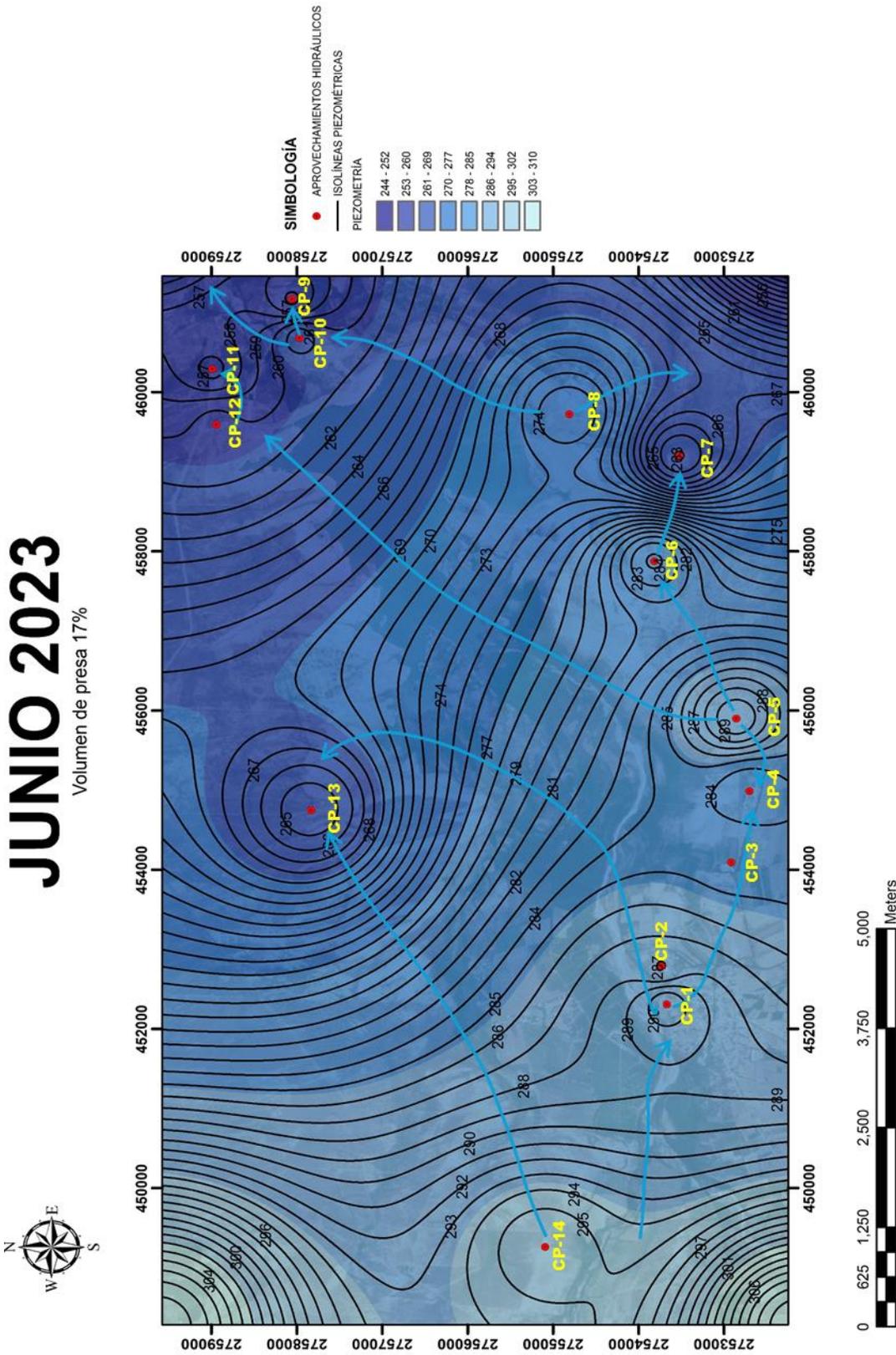


Figura 66. Carta piezométrica del mes de junio 2023.

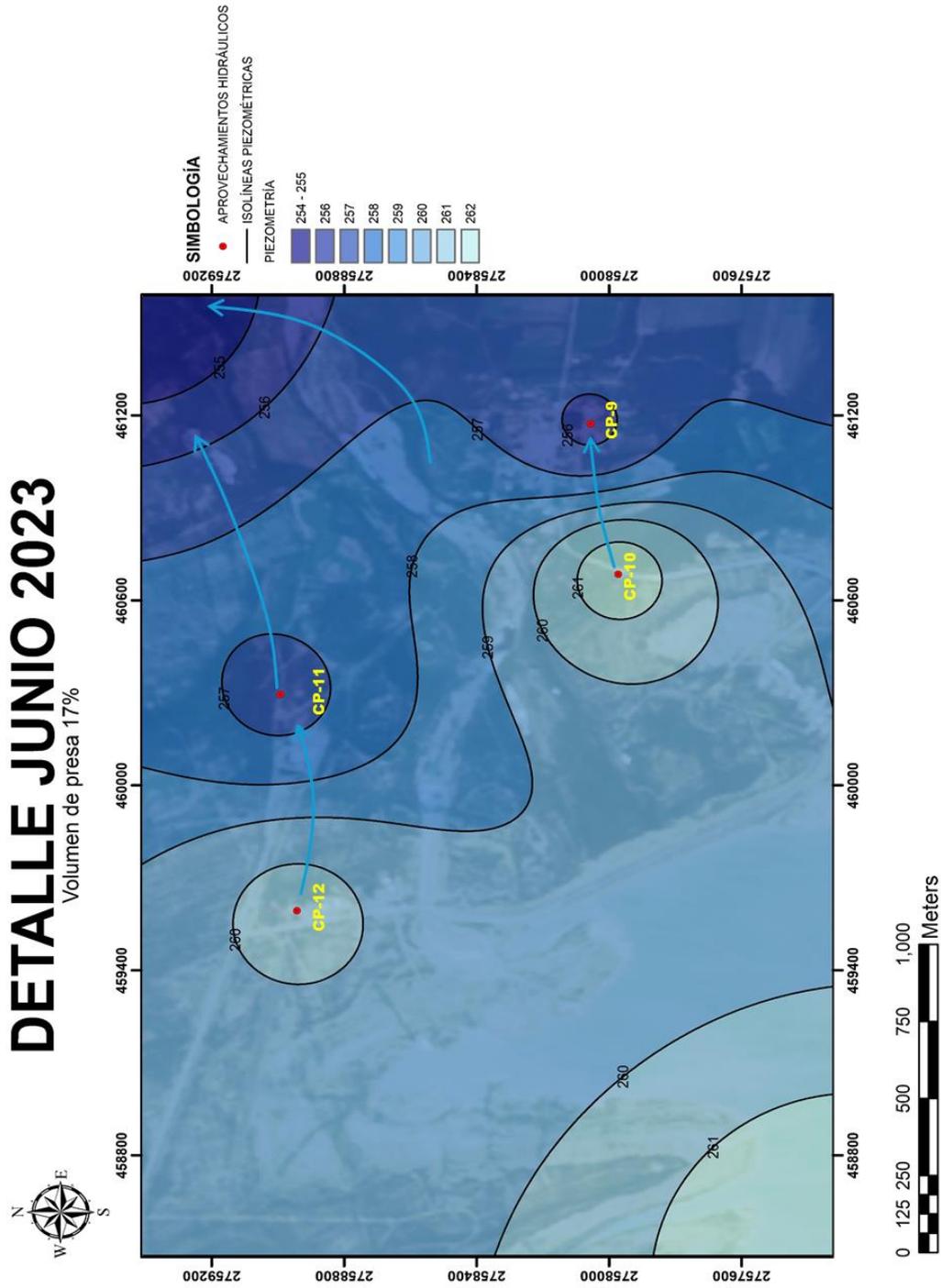


Figura 67. Carta piezométrica a detalle del mes de junio 2023.

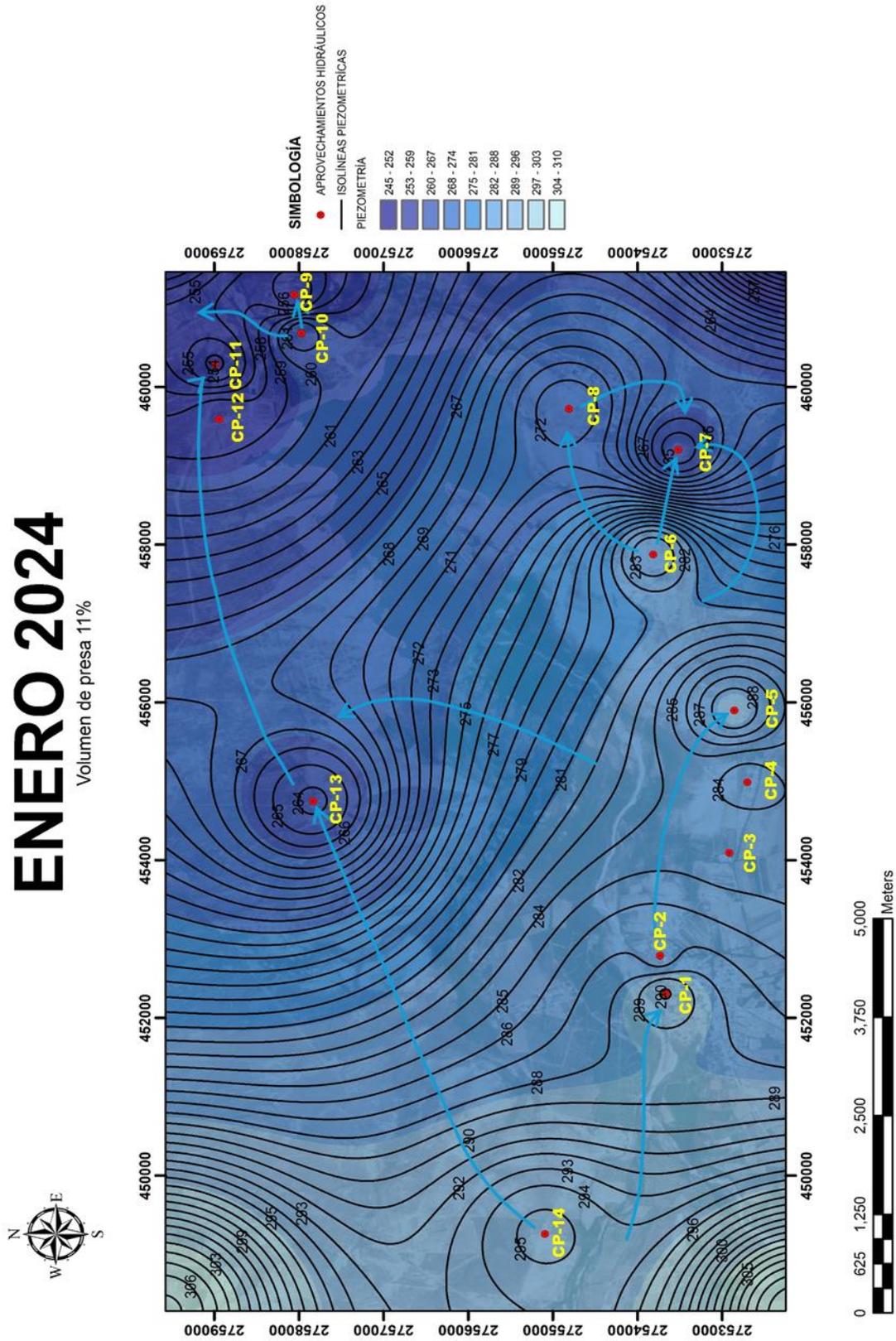


Figura 68. Carta piezométrica del mes de enero 2024.

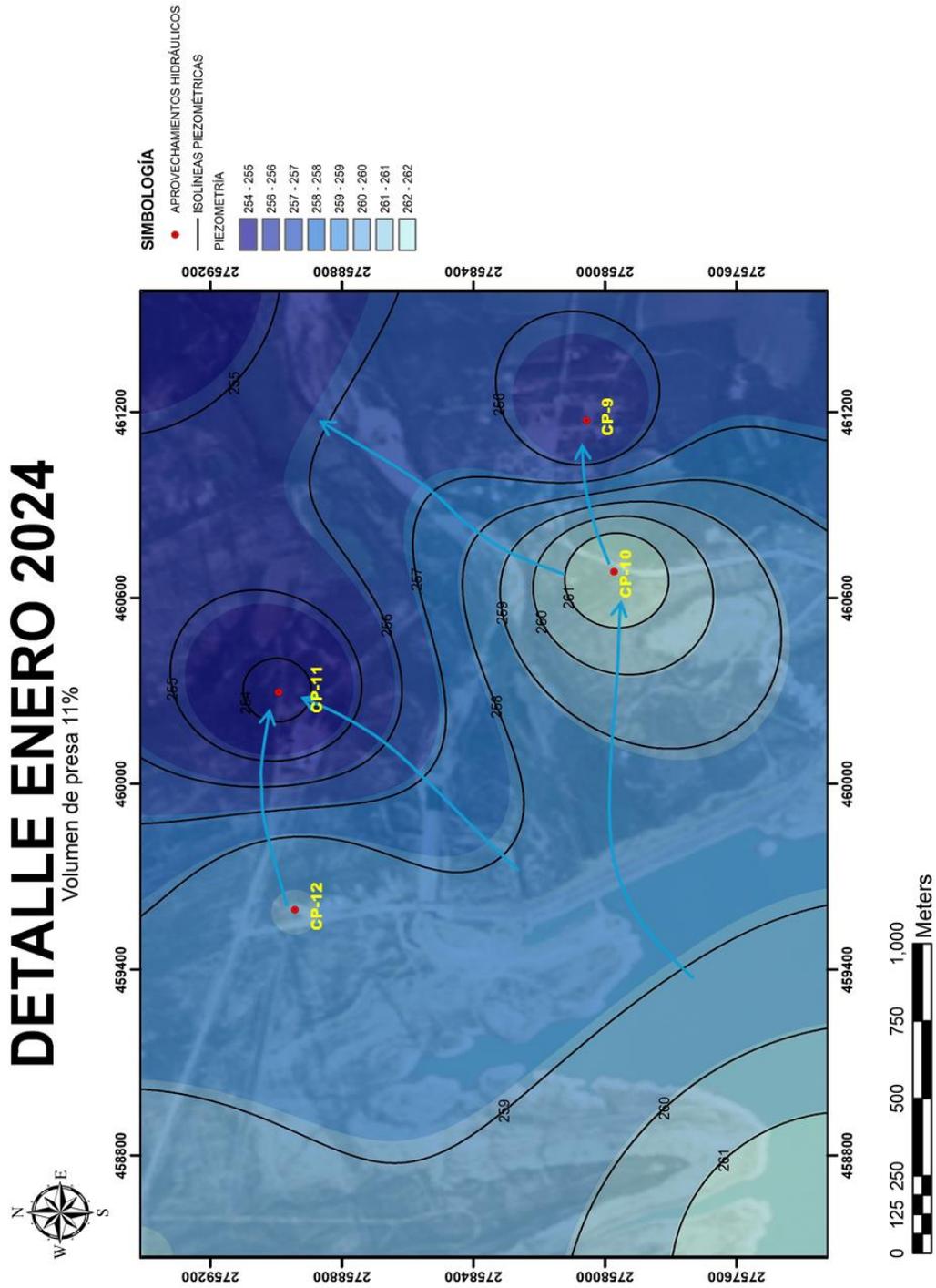


Figura 69. Carta piezométrica a detalle del mes de enero 2024.

JULIO 2024

Volumen de presa 100.655%

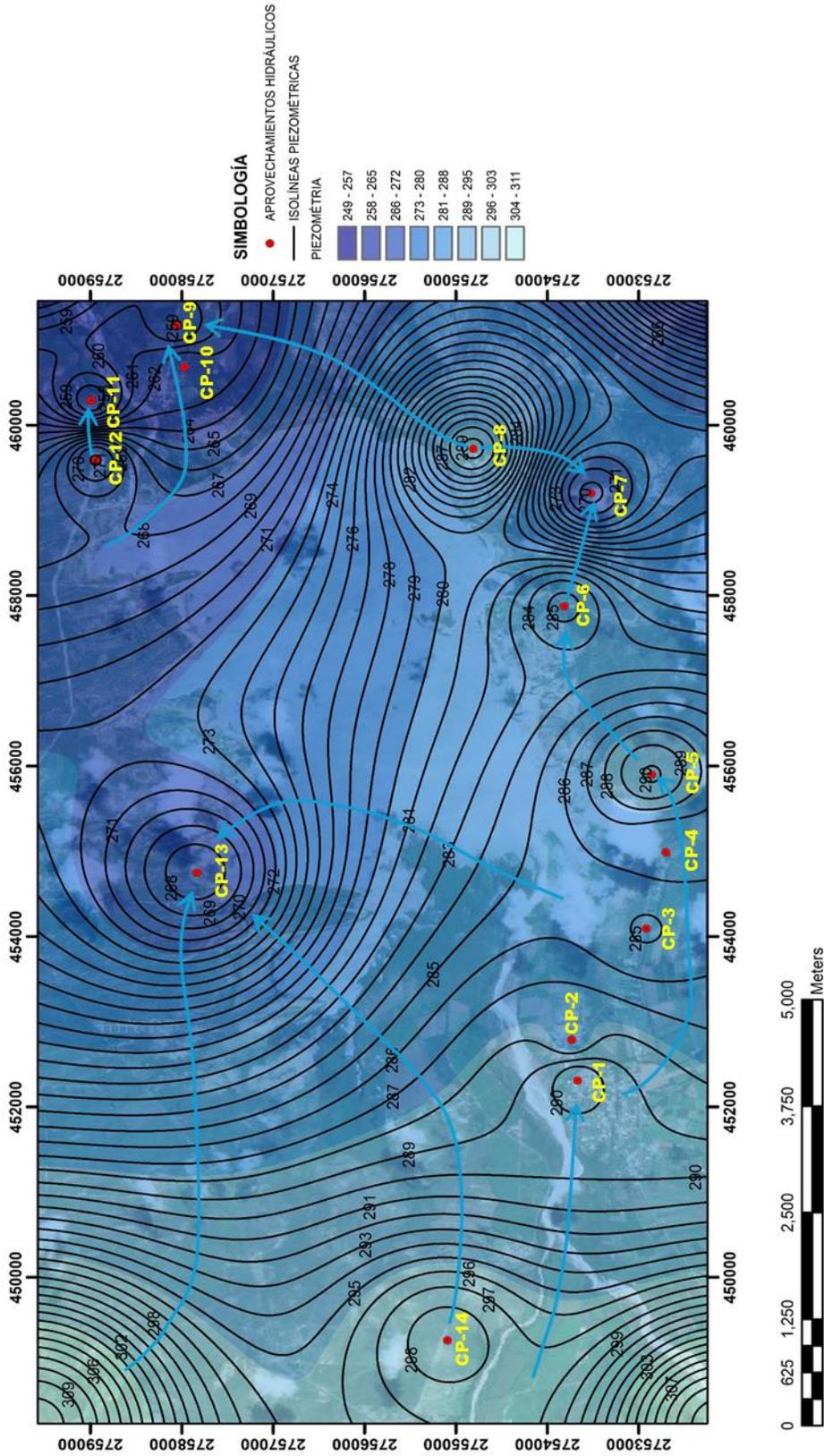


Figura 70. Carta piezométrica del mes de julio 2024.

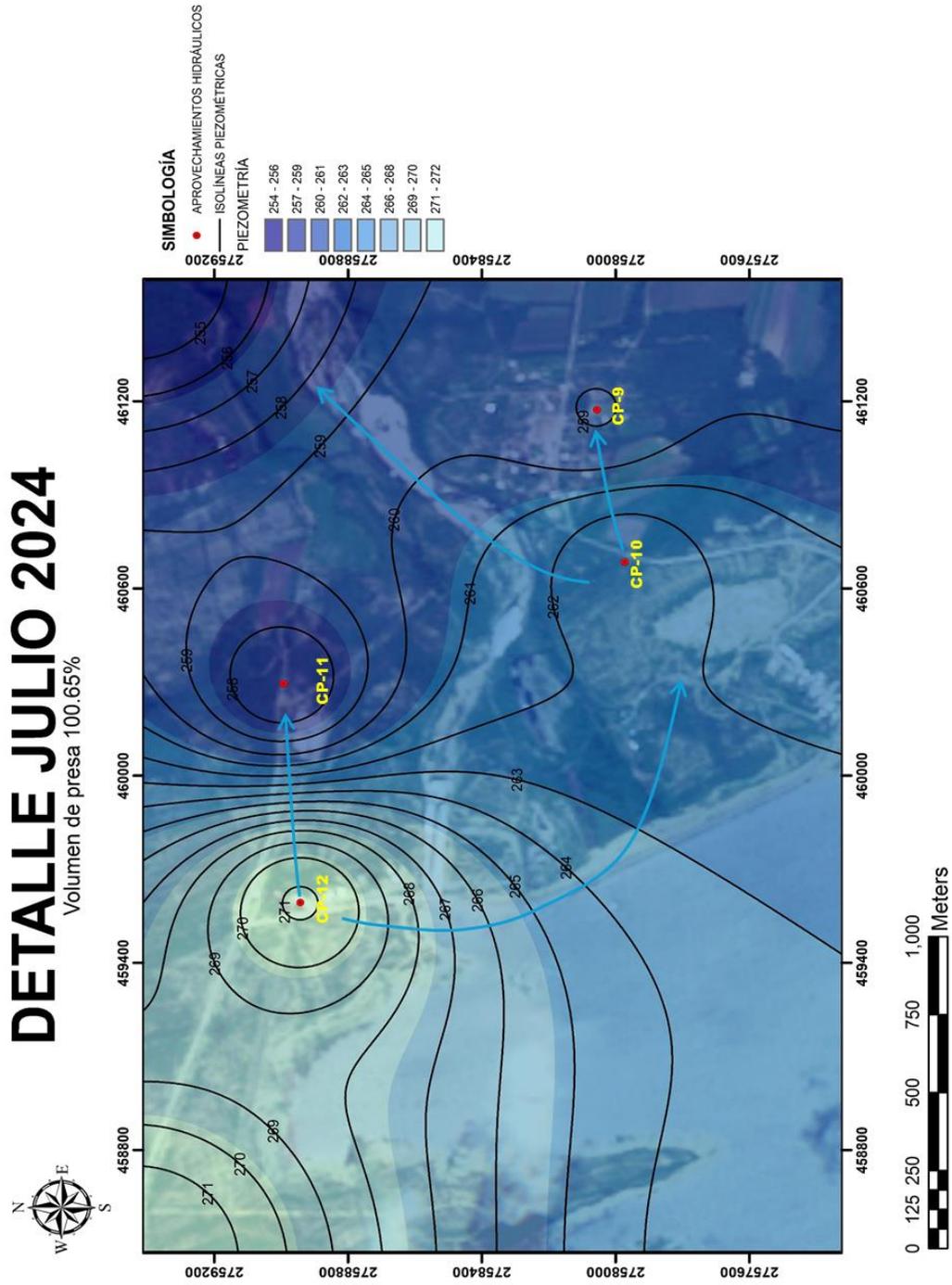


Figura 71. Carta piezométrica a detalle del mes de julio 2024.

5.3 Evolución de filtraciones y zonas de humedales

De León Gómez (1993), detectó filtraciones aguas abajo de la cortina de la presa, con mayor intensidad al pie de la misma, aunque la presencia de filtraciones también se localizaba en diferentes zonas a través de una red hidráulica la cual generaba filtraciones en forma de manantiales en diferentes zonas de la presa; anteriormente la Secretaría de Agricultura y Recursos Hídricos (SARH), documentaba estos puntos de filtraciones midiendo las salidas en vertedores triangulares o cuadrados, se contaba con siete vertedores (véase Anexo 1) en los cuales se llegó a registrar un volumen medio de descarga de 310 l/s al pie de la cortina.

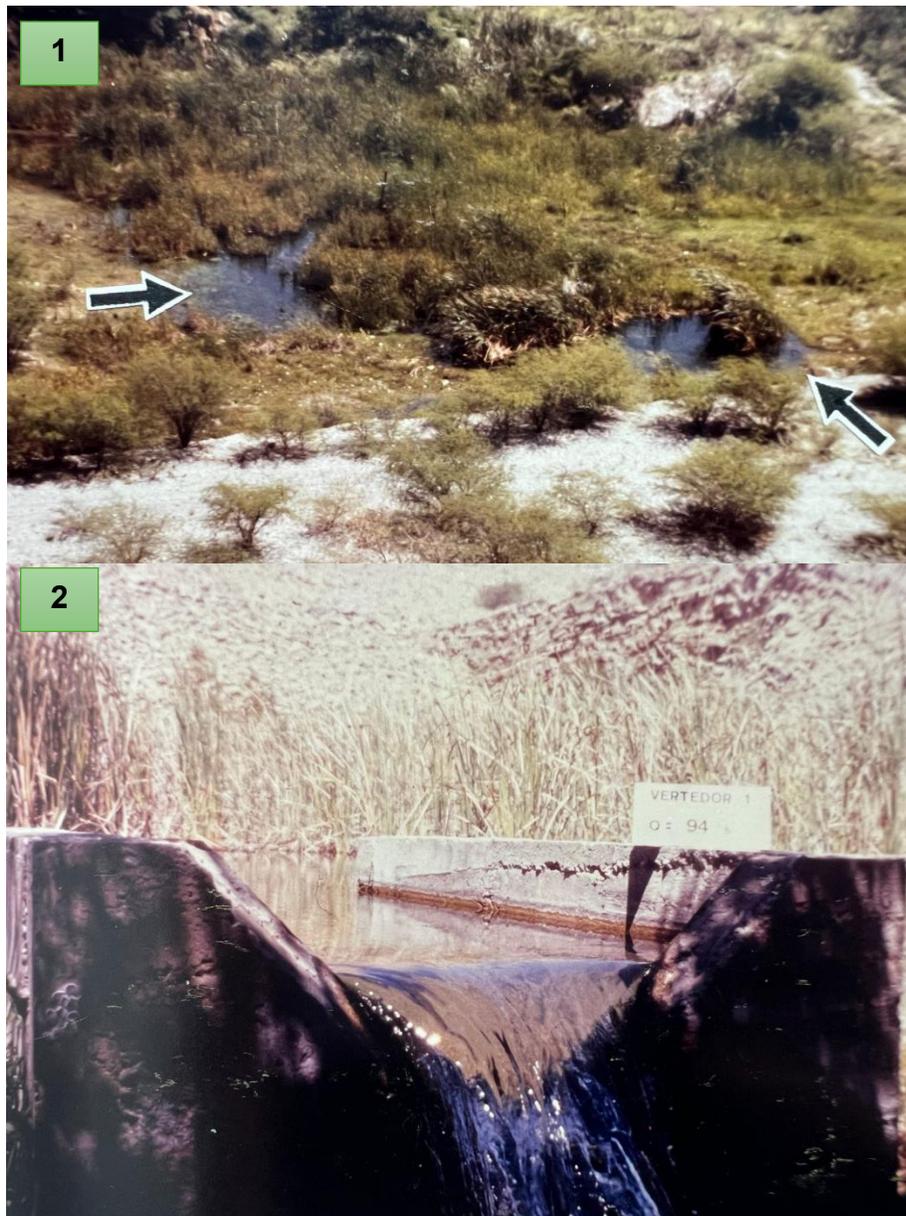


Figura 72. . Filtraciones al pie de la Cortina (De León, 1993).

Las zonas de filtraciones y humedales continúan; sin embargo, ya no se tiene un registro de las filtraciones existentes en los vertedores por parte de la CONAGUA, por ello se realizaron cartas de zonas de humedales empleando imágenes satelitales, así como visitas al campo para visualizar el estado de los vertedores y notar su evolución en época de sequía y la influencia que tiene el volumen de la presa con la cantidad de filtraciones y crecimiento de zonas de humedales.

En el año 2021, inició la sequía en el estado de Nuevo León. La presa Cerro Prieto en ese año, tuvo un almacenamiento máximo del 25 % de llenado con respecto al NAMO en enero, un volumen mínimo de 12 % en diciembre y un volumen promedio de 17 % de llenado en el mes de mayo; con esta información y a través de las imágenes satelitales, se logró obtener las cartas de humedales de este año, donde se puede observar que las zonas de humedales eran bastante extensas principalmente con el mayor volumen de almacenamiento que se tuvo ese año; sin embargo, en este año, no se realizaron visitas al campo donde se pudieran identificar las zonas de filtraciones.

Las figuras 73 a la 76, corresponden a las cartas de humedales realizadas durante ese año, en su volumen máximo, mínimo y promedio, así como la comparación de estas tres fases de la presa en una sola carta (véase figura 76), en el Anexo 2, se añaden las cartas a detalle de estas zonas de humedales con un mayor acercamiento al área de influencia (aguas debajo de la presa).

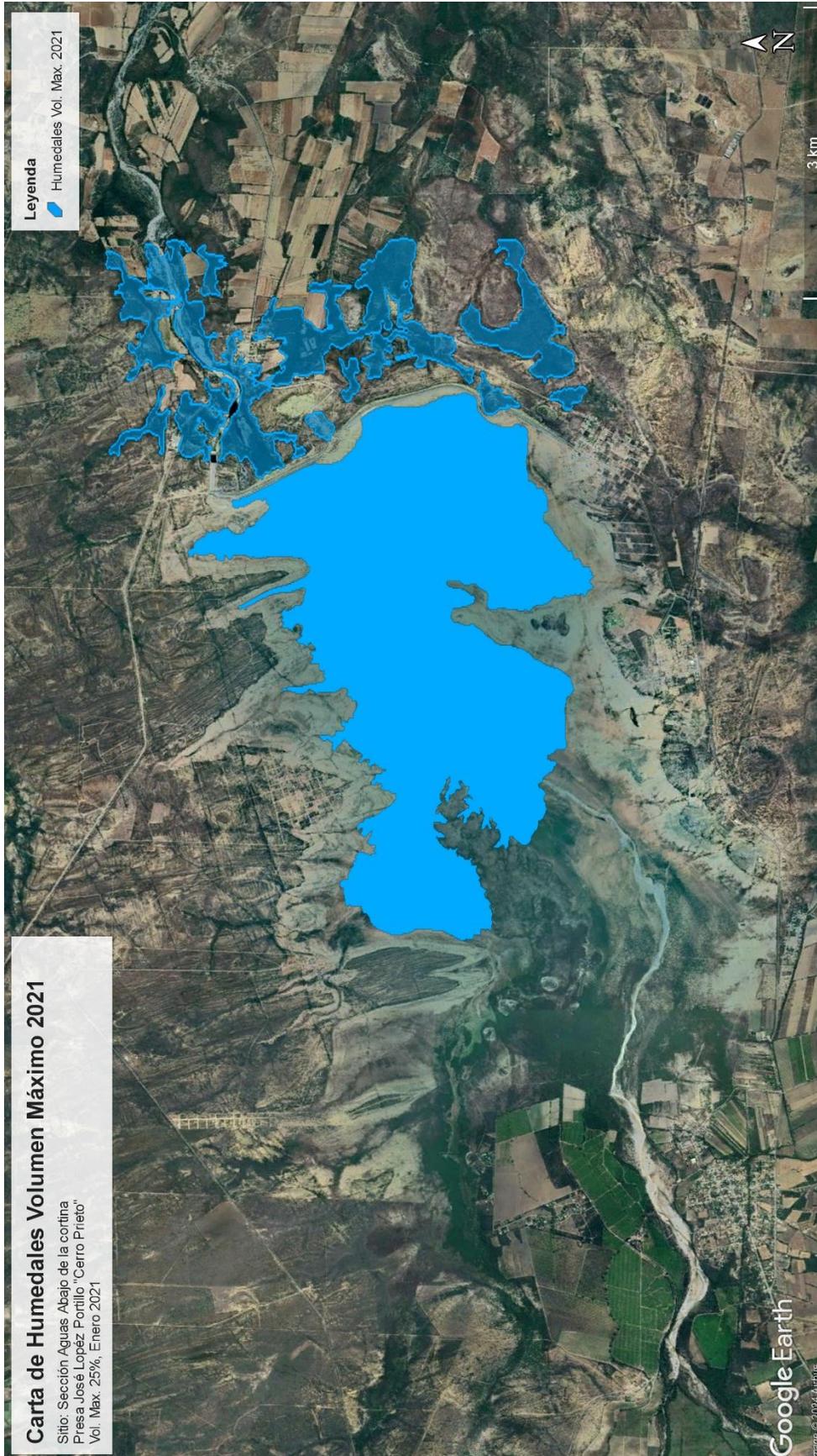


Figura 73. Carta de Humedales Volumen Máximo 2021 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).

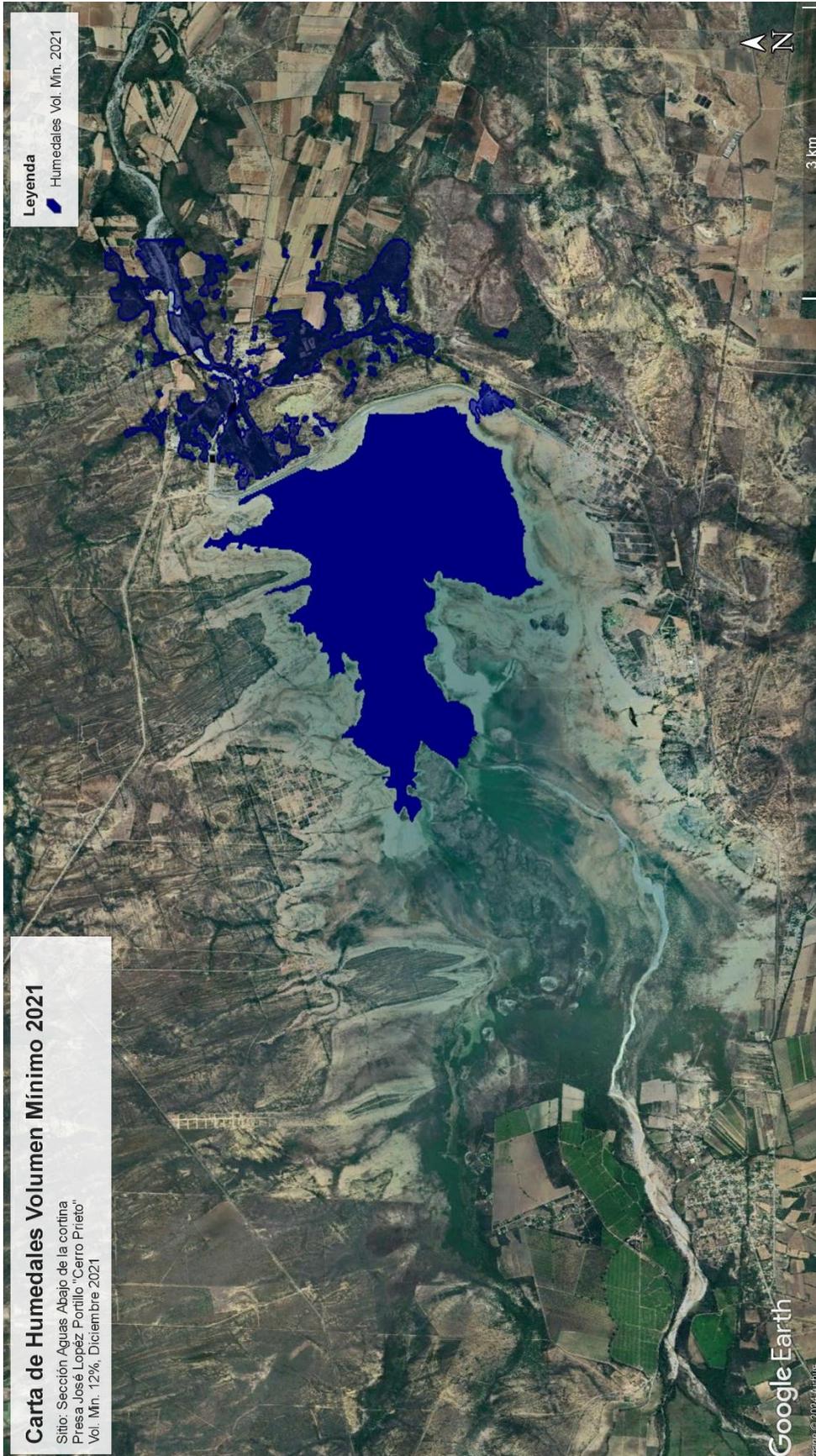


Figura 74. Carta de Humedales Volumen Mínimo 2021 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).

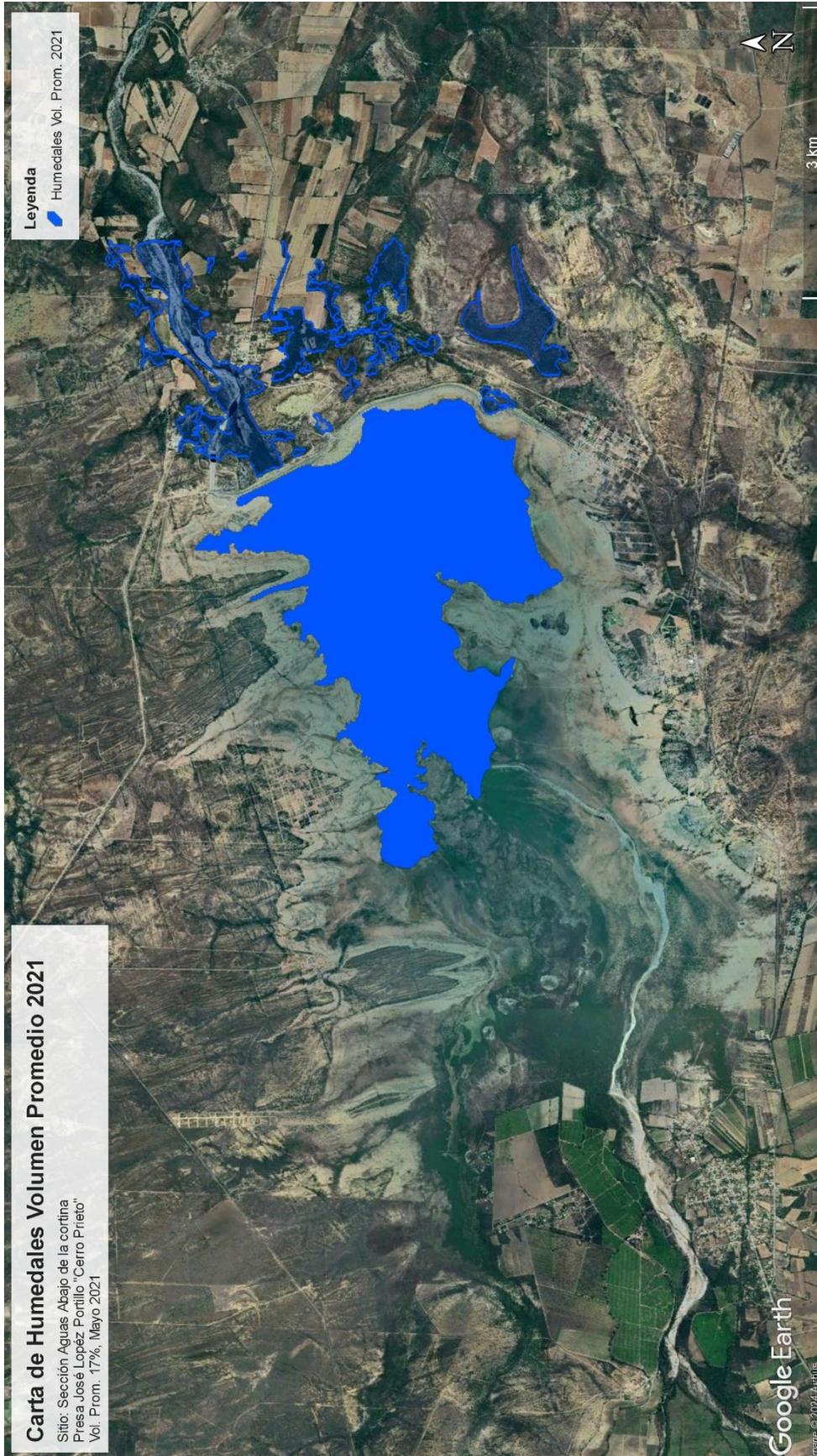


Figura 75. Carta de Humedales Volumen Promedio 2021 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).

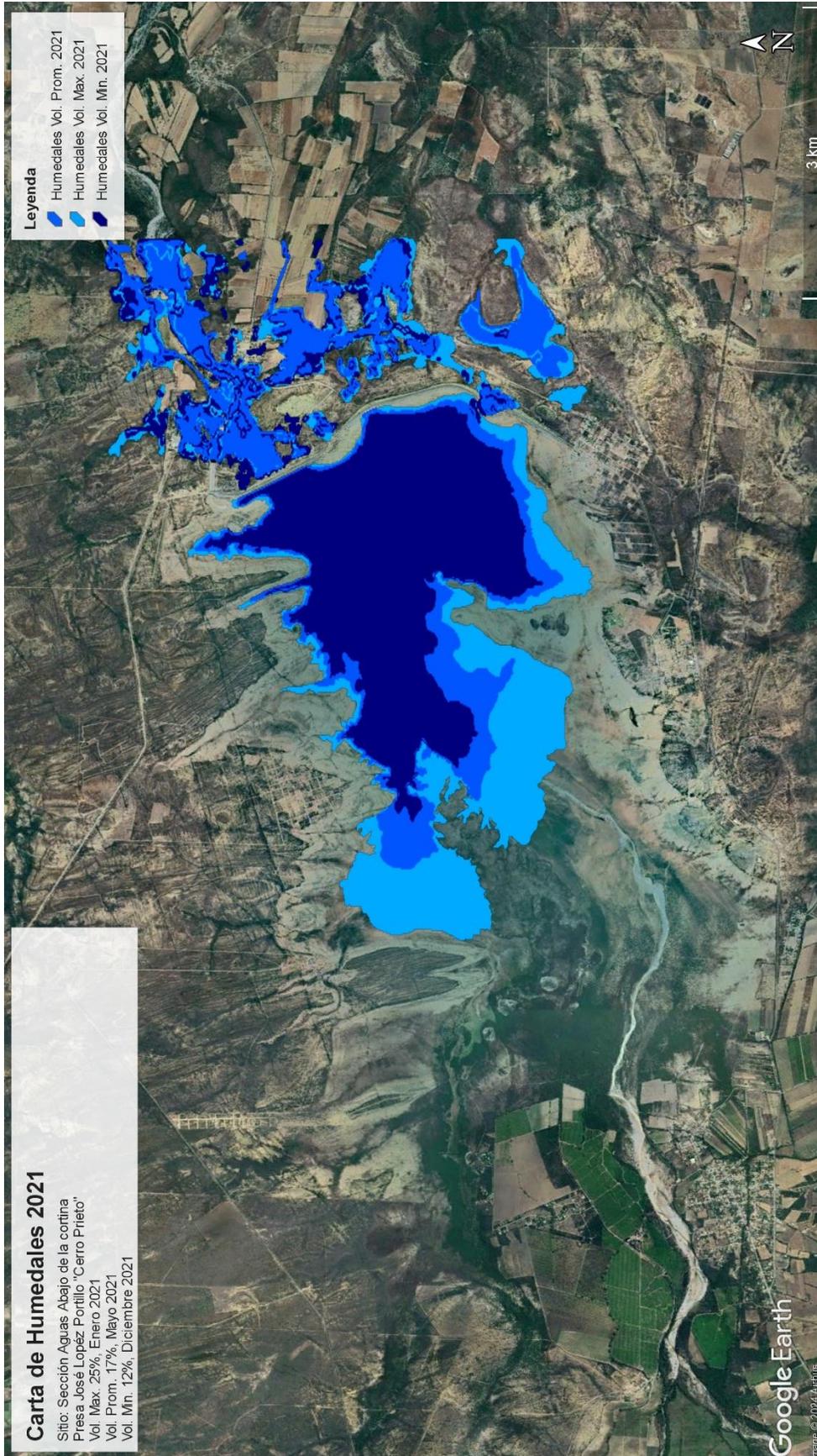


Figura 76. Carta de Humedales Volumen Máximo 2021 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).

Durante el año 2022, se realizaron tres visitas al campo, una en el mes de abril con el 6.75 % de volumen de llenado de la presa y en el vertedor 3 (V-3), no se identificaron filtraciones, como se muestra en la Figura 77, es importante mencionar que el agua en este pequeño volumen no llegaba a tocar las compuertas de la presa, ni la obra de toma, por lo que las bombas flotantes ya habían sido instaladas en el vaso de la presa como se muestra en las Figuras 78 y 79.



Figura 77. Vertedor 3 en visita a campo en el mes de abril 2022, con 6.75 % de volumen de llenado.



Figura 78. Implementación de bombas flotantes en la presa.



Figura 79. Compuertas en el año 2021.

Durante el mes de junio de 2022, se continuó con la exploración del área de estudio. Esta vez se localizó el vertedor 1 (V-1), el cual se encontraba seco, como se muestra en la Figura 80. El volumen de almacenamiento ese mes fue de 2.11 %, a punto de llegar al agotamiento; es importante mencionar que la zona de mayor influencia está localizada en esta zona que corresponde a la parte más alta de la cortina de la presa. La vegetación se encontraba bastante seca y escasa debido a las pequeñas zonas de humedales que se tenían, como se muestra en la Figura 82.

Los efectos más extremos de la sequía en esta presa ocurrieron en el mes de julio, cuando la presa llegó a un 0.5% del volumen de llenado, por lo que las zonas de humedales aguas abajo de la cortina disminuyeron en gran medida, sin embargo, éstas seguían presentes a pesar del escaso almacenamiento, como se muestra en la Figura 83, correspondiente a la carta de humedales con volumen mínimo en 2022. La sequía extrema que se experimentó en la región queda evidenciada en las cartas de humedales de este año, en comparación con los otros años, evidenciando la gran influencia que tiene el volumen de la presa en las zonas de filtraciones y humedales.



Figura 80. Vertedor 1 completamente seco en el mes de junio 2022, con 2.11 % de volumen de llenado de la presa.



Figura 81. Pie de la parte más alta de la cortina de la presa Cerro Prieto, completamente seca junio 2022.



Figura 82. Área de mayor influencia en zonas de humedales, junio 2022.

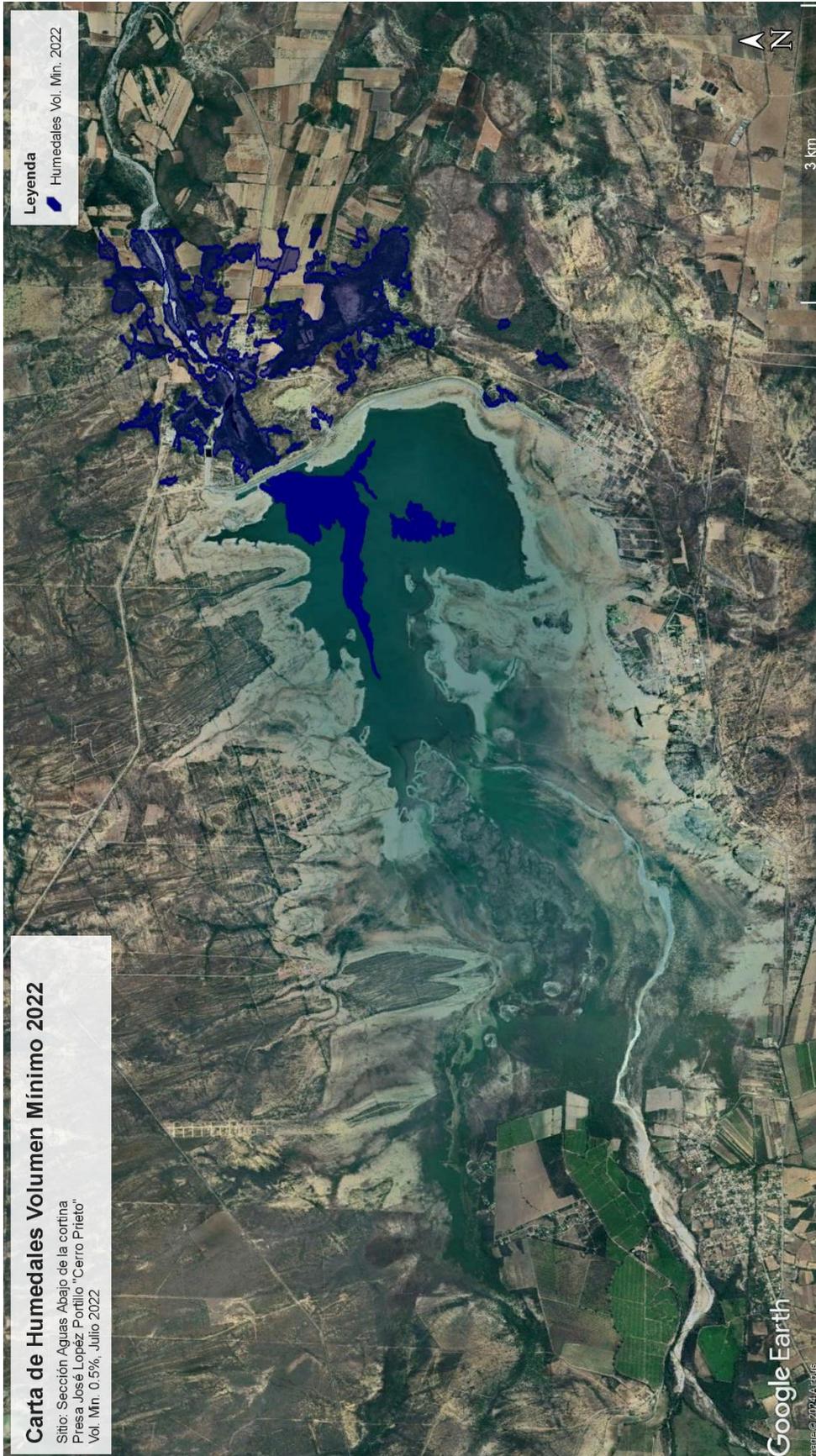


Figura 83. Carta de Humedales Volumen Mínimo 2022 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).

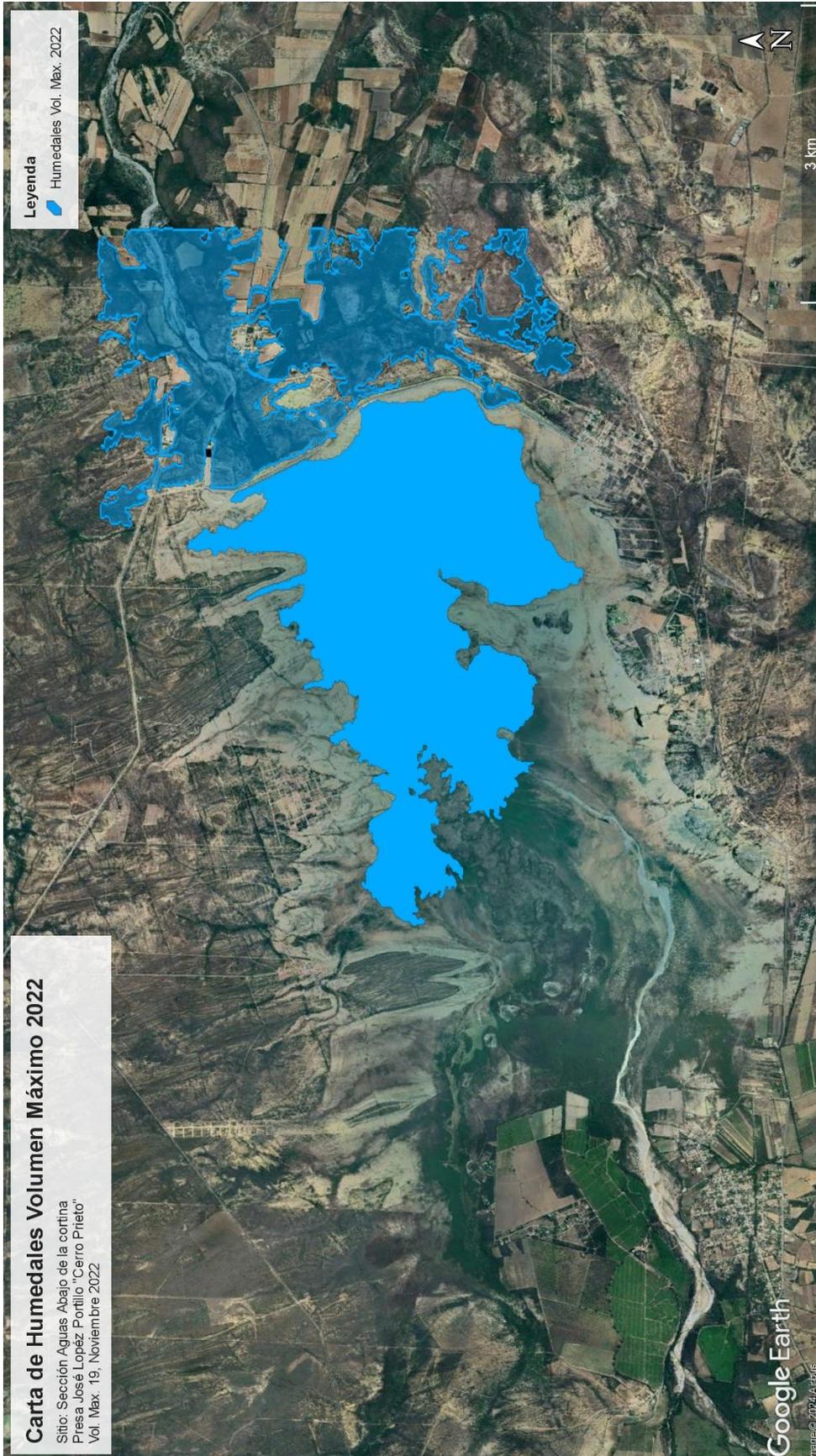


Figura 84. Carta de Humedales Volumen Máximo 2022 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).

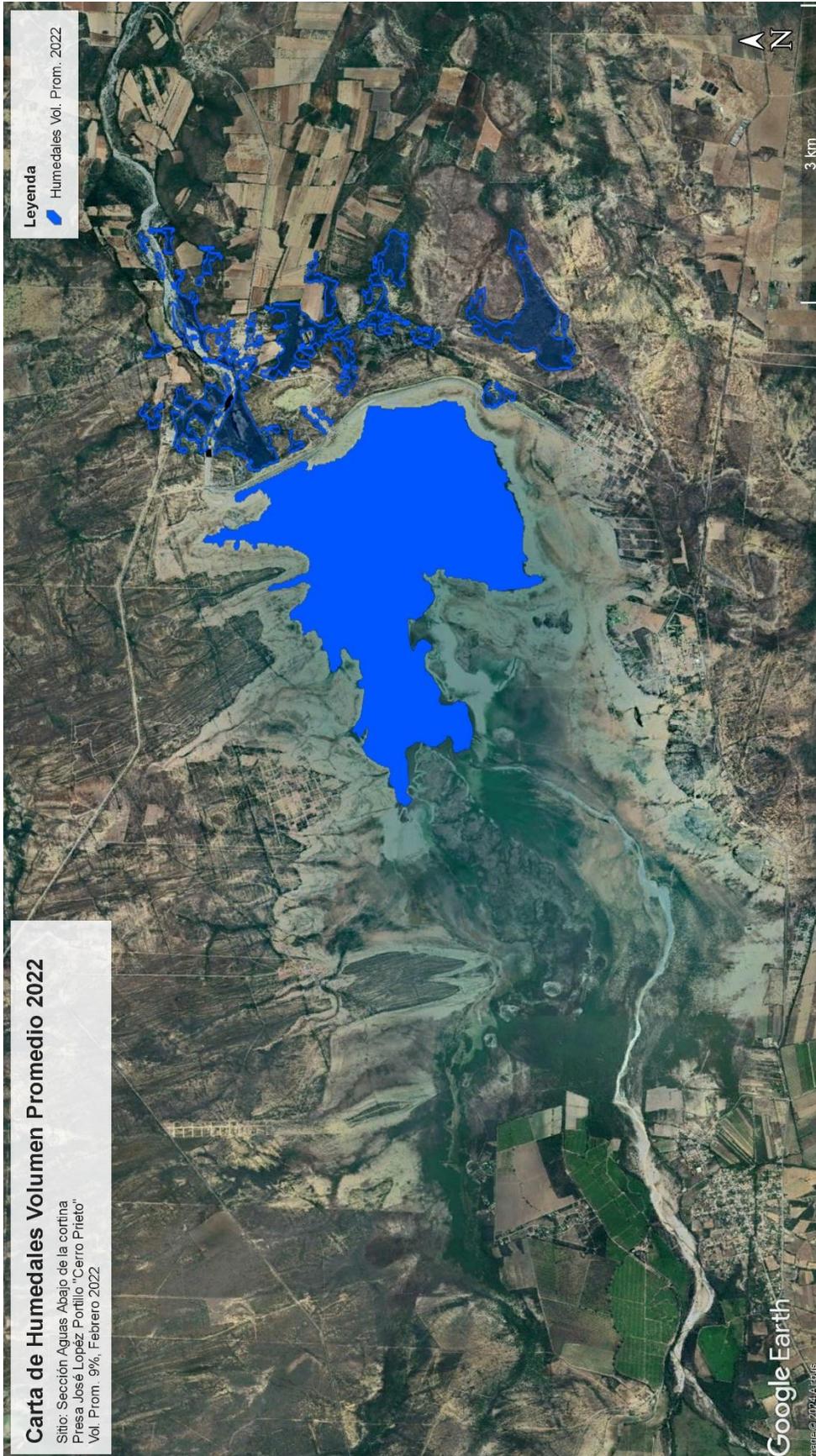


Figura 85. Carta de Humedales Volumen Promedio 2022 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).

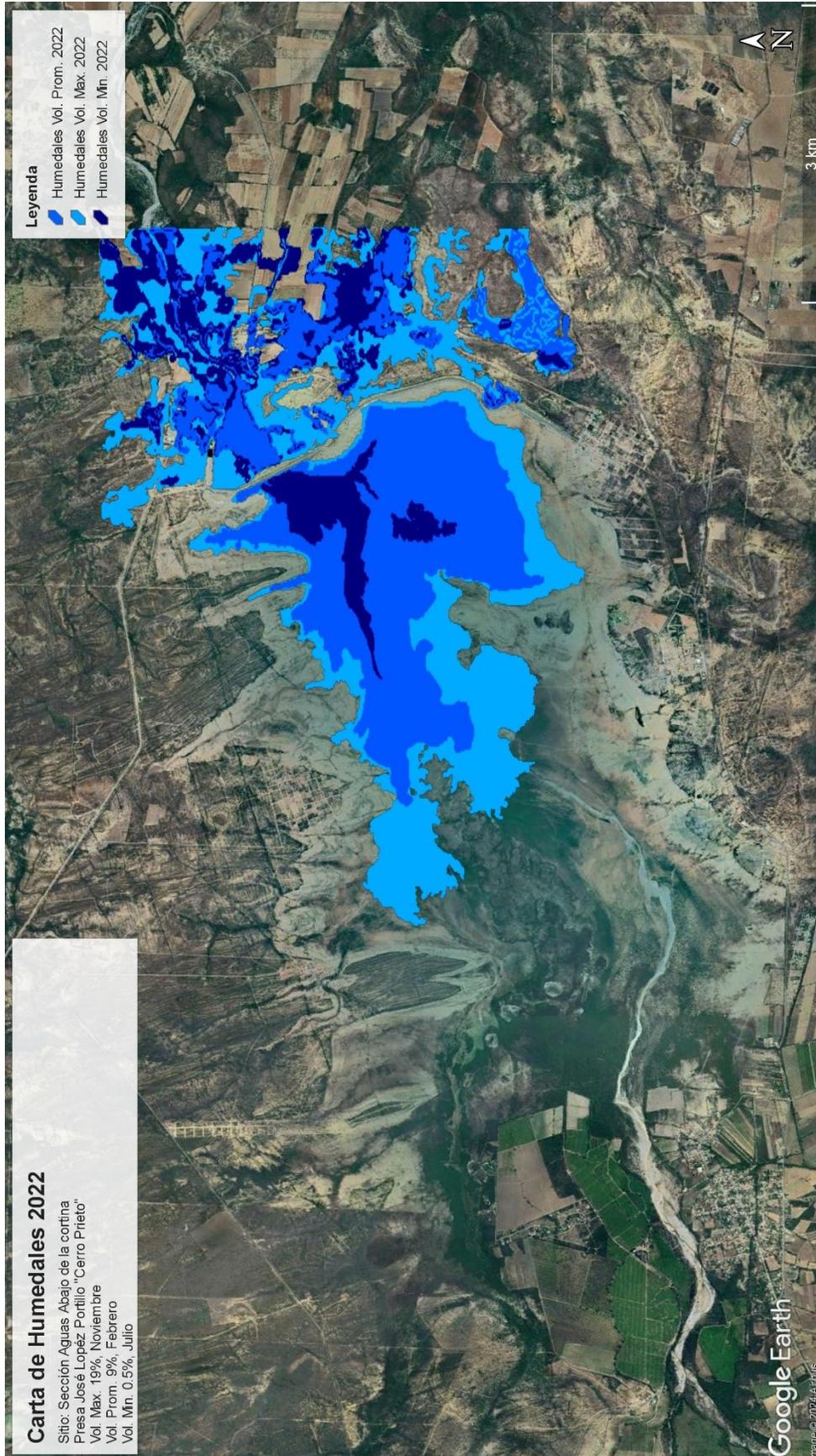


Figura 86. Carta de Humedales 2022 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).

En el año 2023, el volumen máximo de la presa se registró en el mes de enero con el 19 % de volumen de llenado, el volumen mínimo fue de 8 % en el mes de noviembre y el volumen promedio fue de 14 % en el mes de marzo.

En el mes de marzo de 2023, se realizó la primera medición de niveles piezométricos en el área de estudio. El día 9 de marzo de 2023, CONAGUA, reportó un 13 % de volumen de almacenamiento en la presa, donde se midieron los piezómetros en el área de la cortina, como se muestran en la Figura 48, donde se obtuvieron los valores representados en la tabla a continuación.

Tabla 18. Medición de piezómetros en la primera campaña de medición.

ID PIEZÓ-METRO	LOCALIZACIÓN UTM		09/03/2023 (Volumen de presa 13%)			OBSERVACIONES
	COORDENADA ESTE (m)	COORDENADA NORTE (m)	T (°C)	COND. (µs/cm)	N.F. (m)	
PZ-1	459860.00	2757847.00	21.8	554	4.43	OBRA DE TOMA RIEGO
PZ-2	459797.00	2758019.00	25	351	1.62	ALINEADO CON MOJONERAS
PZ-3	459780.00	2758074.00	25	886	0	INUNDADO PARTE MAS ALTA CORTINA
PZ-4	459609.00	2758413.00	-	-	-	SECO 15.5 m DE PROFUNDIDAD

Aquí se aprecia que el PZ – 1 y PZ – 2, se encuentran en un nivel freático muy somero con 4.43 m y 1.62 m respectivamente; mientras que el PZ – 3, el cual se encuentra localizado al pie de la parte más alta de la cortina, se encuentra completamente inundado, como se muestra en la Figura 87, evidenciando las filtraciones de la presa, aún con volúmenes de apenas 13 %.



Figura 87. PZ – 3 completamente inundado en el mes de marzo 2023 con 13 % de volumen de llenado de la presa.

En la campaña de mediciones de marzo de 2023, se registraron filtraciones en el V – 1, localizadas al pie de la parte más alta de la cortina, como se muestra en la Figura 88. Debido a que no se contaba con un medidor de caudal del agua, se optó por seguir el método de King, donde se emplea la ecuación empírica del Profesor Horace King, de la Universidad de Michigan, para vertedores triangulares ($\theta = 90^\circ$), (Marbello-Pérez, 2005).

Formula de King:

$$Q = 1.34 h^{2.47}$$

Q= Caudal (m^3/s)

h= Altura del tirante de agua en el vertedor (m)

*La h medida en esta campaña de medición fue de 12.5 cm = 0.125 m

$$Q = 1.34 (0.125)^{2.47} = 0.0079 m^3/s$$

$$Q = 7.9 l/s$$



Figura 88. Localización de filtraciones en V – 1, marzo 2023 con 13 % de volumen de llenado de la presa.

Al pie de la cortina, aguas arriba del V – 1, se tiene una pequeña represa de contención del agua proveniente de las filtraciones. Esta pequeña represa contaba con una gran cantidad de agua y vegetación tipo carrizos y tule, las cuales son flora que se localiza en zonas de humedales como parte de un micro hábitat que permite la permeabilidad al agua subterránea (Fundación Kennedy, 2024), lo cual se relacionaría con el nivel freático somero en el PZ – 1 Y PZ – 2 y con mayor aporte en el PZ – 3 , el cual se encontró saturado hasta la boca en esta campaña de medición.



Figura 89. Zona de filtraciones al pie de la cortina con presencia de tule y carrizo, marzo 2023 con 13 % de volumen de llenado de la presa.

Por otro lado, el V – 2, localizado aguas abajo del V – 1, estaba completamente seco, como se muestra en la Figura 90.



Figura 90. V-2 completamente seco en marzo 2023 con 13 % de volumen de llenado de la presa.

Finalmente, en esta campaña de medición, el V – 3, no contaba con ningún caudal, como se muestra en la Figura 91; sin embargo, en esta zona De León- Gómez en 1993, detectó la presencia de manantiales. Esto llevó a ampliar un poco la zona de búsqueda, donde a unos escasos metros aguas abajo del V – 3, se encontró un manantial, como se muestra en la Figura 92.



Figura 91. V – 3 durante la campaña de medición de marzo 2023, con 13 % de volumen de llenado de la presa.



Figura 92. Manantial localizado aguas debajo de V – 3 en la medición de marzo 2023, con 13 % de volumen de llenado de la presa.

En el mes de junio de 2023, se realizó la segunda campaña de medición. La presa Cerro Prieto contaba con un 17 % de volumen de almacenamiento, con respecto al NAMO.

Las filtraciones existentes aumentaron debido al alza en el nivel de almacenamiento de la presa, lo cual provocó que la vegetación creciera en el área de los vertedores V – 1 y V – 2. Desde la parte más alta de la presa, era posible ver las filtraciones en la represa existente al pie de la cortina, como se muestra en la Figura 93, la presencia de tule y carrizo aumentó en esta área, así como la vegetación, en general, a causa del crecimiento de las filtraciones y las zonas de humedales influenciadas por el volumen de la presa.



Figura 93. Vista hacia el pie de la cortina de la presa donde se observa la presencia de filtraciones.

En el V – 3, se registraron filtraciones de $h = 3$ cm, siguiendo la fórmula de King, se obtiene el siguiente valor:

$$Q = 1.34 (0.03)^{2.47} = 0.000232 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 0.232 \text{ l/s}$$

Estos, a comparación del mes de marzo, se encontraban inmediatamente aguas abajo del vertedor y las filtraciones habían crecido debido al cambio de volumen de la presa, el cual pasó del 13 % al 17 % en junio. Esto se puede evidenciar en las Figura 94 y la Figura 95.

La evolución de las zonas de humedales en este año se muestra en las Figuras 97 a 99; donde, a mayor volumen de la presa, mayor es el área de humedales.



Figura 94. V – 3 con presencia de filtraciones en el mes de junio 2023, con 17 % de llenado de la presa.



Figura 95. 1) Localización de manantial, 2) Amplitud del manantial, 3) Escurrimiento del manantial hacia aguas abajo 4) Influencia del manantial en el V – 3.

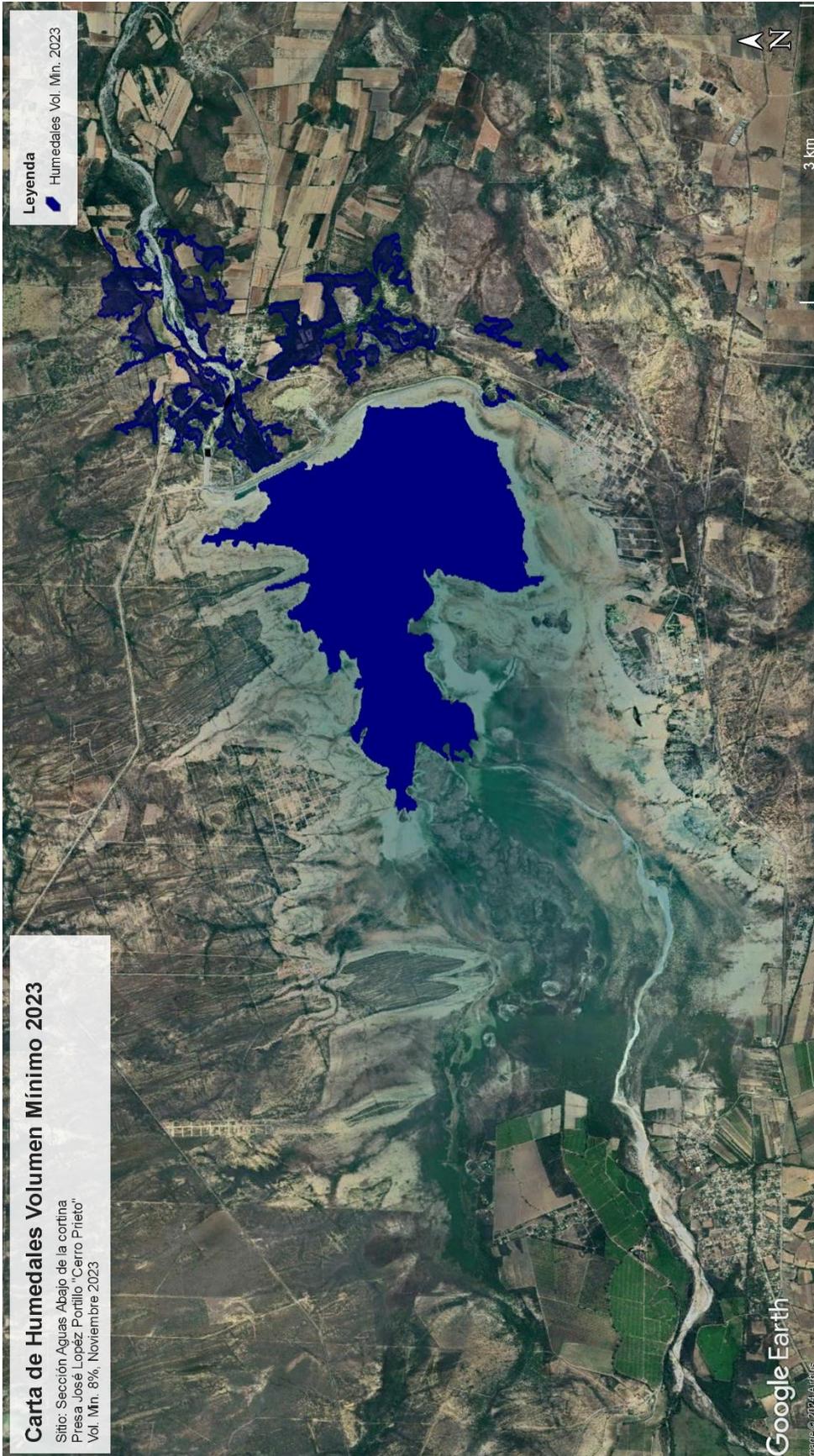


Figura 96. Carta de Humedales Volumen Mínimo 2023 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).

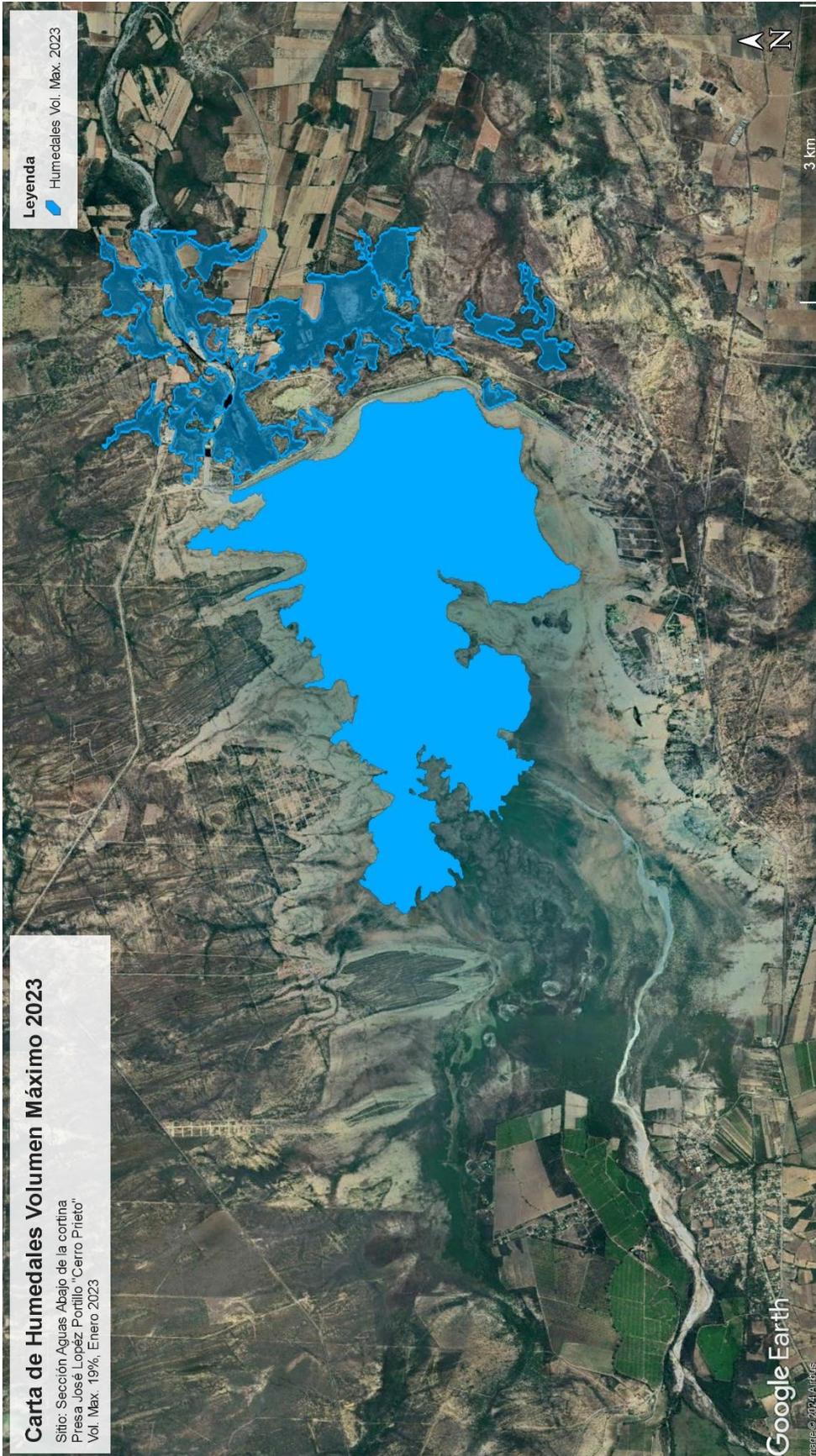


Figura 97. Carta de Humedales Volumen Máximo 2023 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).

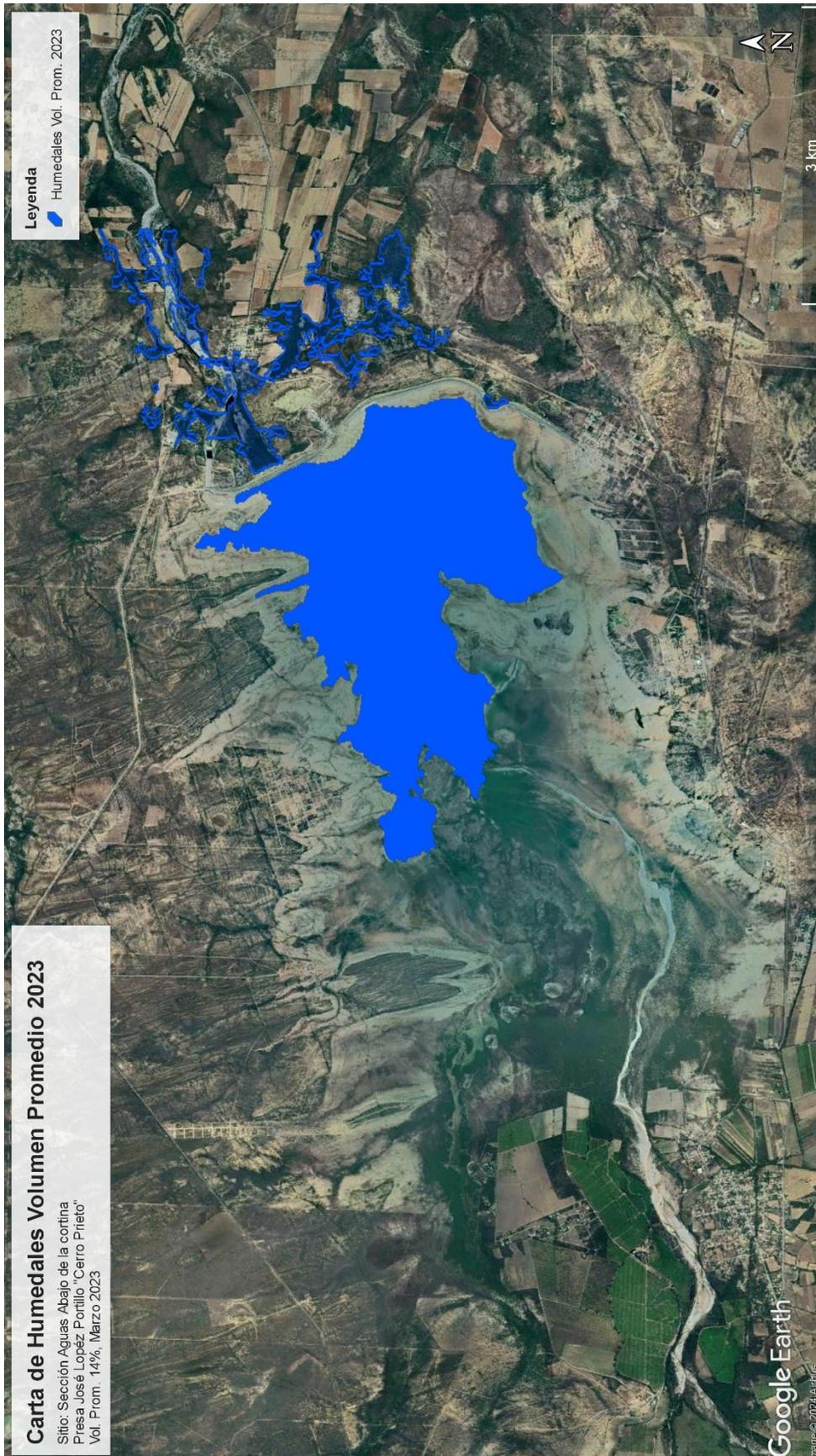


Figura 98. Carta de Humedales Volumen Promedio 2023 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).

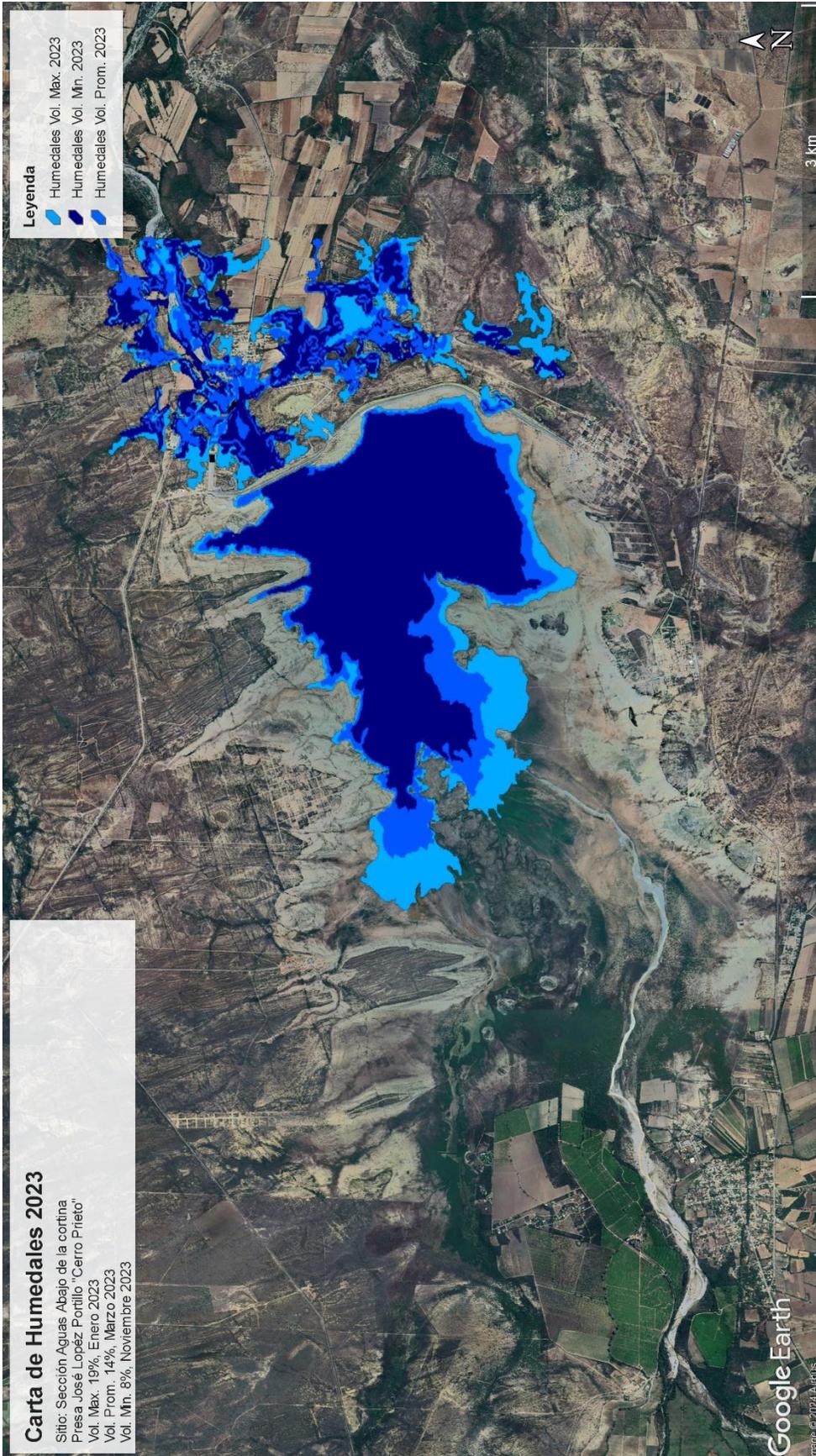


Figura 99. Carta de Humedales 2023 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).

En el año 2024 se experimentaron los mayores cambios en la presa Cerro Prieto. El volumen mínimo que tuvo la presa este año fue del 5 % de volumen de llenado, el volumen máximo fue de 109 % en el mes de septiembre y el volumen promedio fue de 66 % en el mes de junio, teniendo el contraste de la época de sequía y época extraordinaria. Durante este año, se realizaron dos campañas de medición: la primera en el mes de enero, con una presa al 11 % de volumen de llenado; encontrando que el V – 1, contaba con agua, pero la espesa vegetación limitaba su acceso. Se podían apreciar las filtraciones al pie de la cortina desde la parte más alta, observando, a su vez, la vegetación típica de una zona de humedal. En esta visita al campo, no se visitó el V – 2 y el V – 3.



Figura 100. Vista hacia el pie de la cortina con presencia de filtraciones enero 2024.

La última visita se realizó en el mes de julio de 2024. La presa tenía un volumen de almacenamiento de 100.65 %, lo cual aumentó las filtraciones y las zonas de humedales aguas abajo de la presa Cerro Prieto.

El acceso al V – 1 se vio limitado por la espesa vegetación, debido a las lluvias de la tormenta tropical “Alberto”. Desde el punto más alto de la corona de la presa, se podía ver que el pie de la cortina aguas abajo tenía agua, como se muestra en la Figura 101, por lo que se dedujo, que el V – 1, presentaba un caudal por filtraciones, y el PZ – 3, debía estar inundado, de igual manera como lo estuvo cuando la presa estaba en un 13 % de volumen de llenado durante el mes de marzo de 2023. Dicho nivel era ocasionado por la influencia del volumen de la presa.



Figura 101. Vista hacia el pie de la cortina desde la parte más alta de la corona de la presa, con 100.65 % de volumen de llenado.



Figura 102. Presencia de agua en la zona del V – 1, julio 2024.

Se localizaron filtraciones en el V – 3; éstas debido a la presencia de los manantiales, como se muestra en la Figura 103, los cuales ya habían sido localizados en visitas anteriores. El área que abarcaban estas filtraciones creció en medida considerable. Aplicando la fórmula de King, se obtuvo el siguiente caudal, donde $h = 18 \text{ cm}$:

$$Q = 1.34 (0.18)^{2.47} = 0.01939 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 19.39 \text{ l/s}$$

Un día tiene 86400 segundos, por lo tanto, las filtraciones aproximadas en un día son equivalentes a 1,675,296 L / día en el V – 3 durante la campaña de medición realizada.

Es importante considerar que gran parte de este caudal estaba siendo re direccionado, como se muestra en la Figura 105, por lo cual el valor medido no refleja la cantidad real de filtraciones existentes en esta zona.

En las cartas de humedales se aprecia en la Figura 110, cómo las zonas de humedales cubren gran parte de la zona aguas abajo de la cortina y en la Figura 111, se contrasta el volumen máximo y mínimo de la presa en el periodo (2021 – 2024), acentuando la gran influencia que tiene el volumen de la presa con la existencia de filtraciones y área de los humedales en la zona de influencia; demostrando la existencia de éstos, a pesar de los bajos niveles de almacenamiento.



Figura 103. V – 3 durante la visita julio 2024, volumen de presa 100.65 %



Figura 104. Localización de manantial en V – 3 en julio 2024.



Figura 105. Redireccionamiento del caudal hacia aguas abajo del V – 3.



Figura 106. Zona de humedal en el área del V – 3, julio 2024.

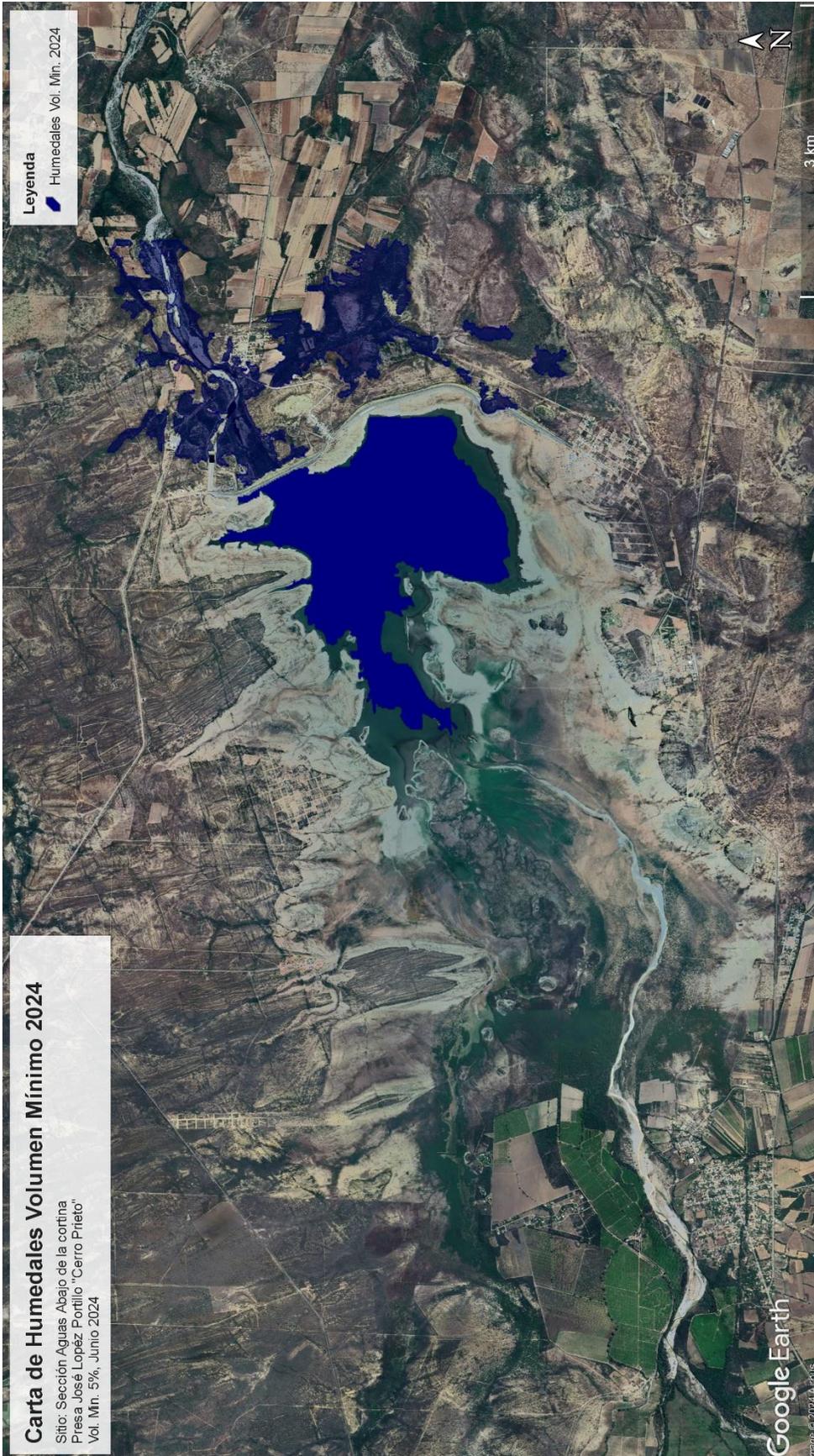


Figura 107. Carta de Humedales Volumen Mínimo 2024 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).



Figura 108. Carta de Humedales Volumen Máximo 2024 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).

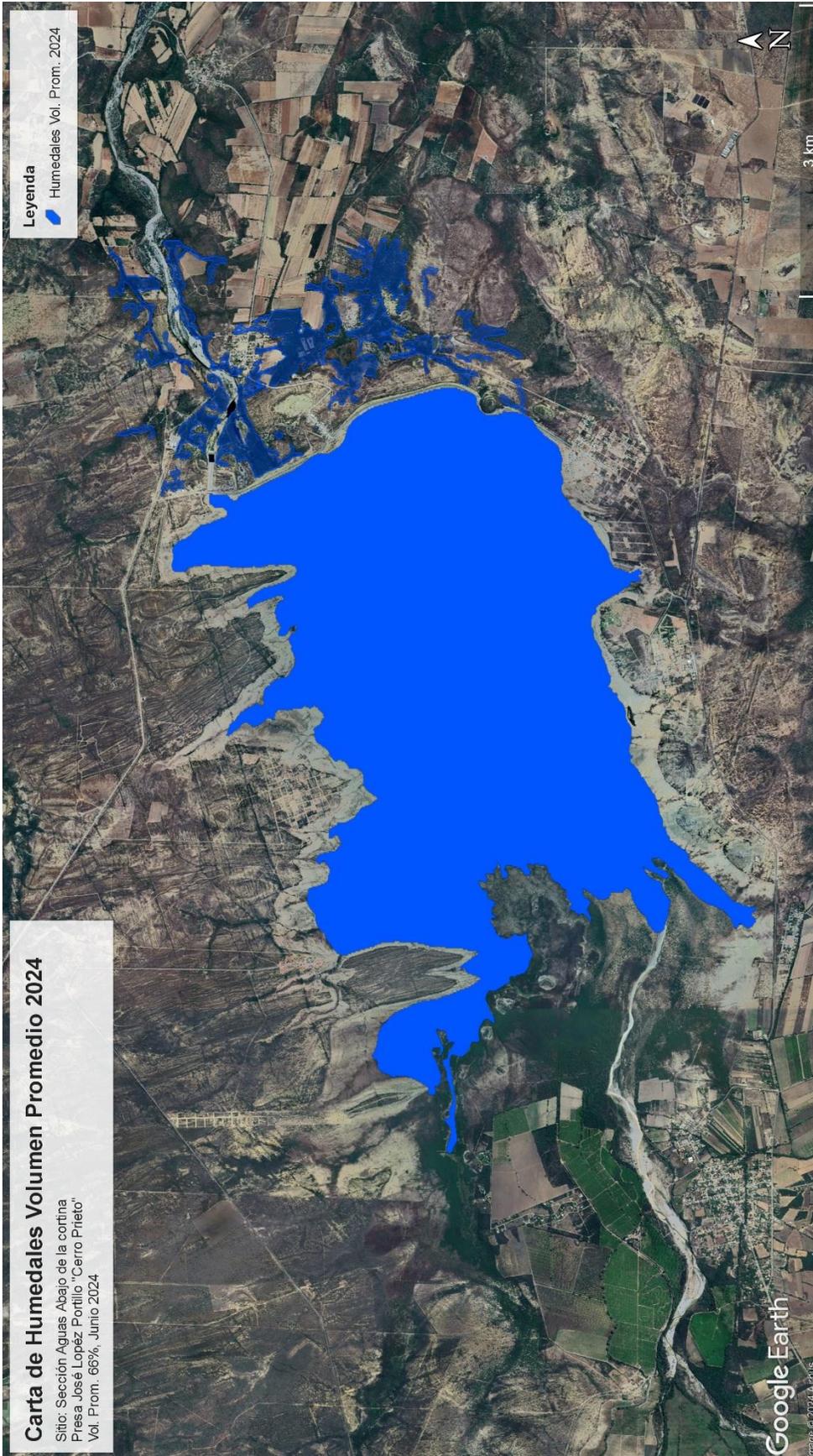


Figura 109. Carta de Humedales Volumen Promedio 2024 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).

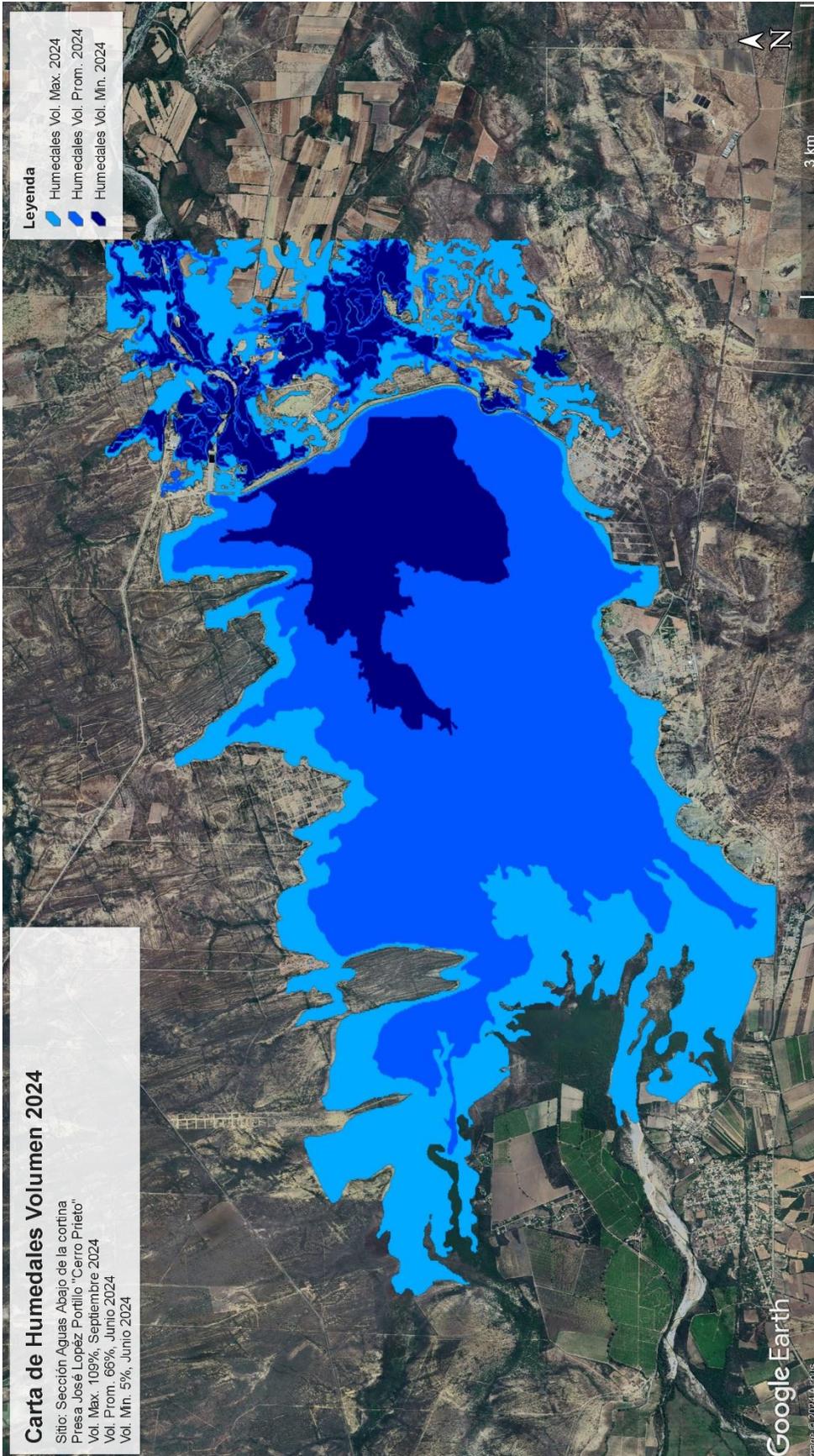


Figura 110. Carta de Humedales 2024 (Elaborado en Google Earth con información de Copernicus Browser, 2024).

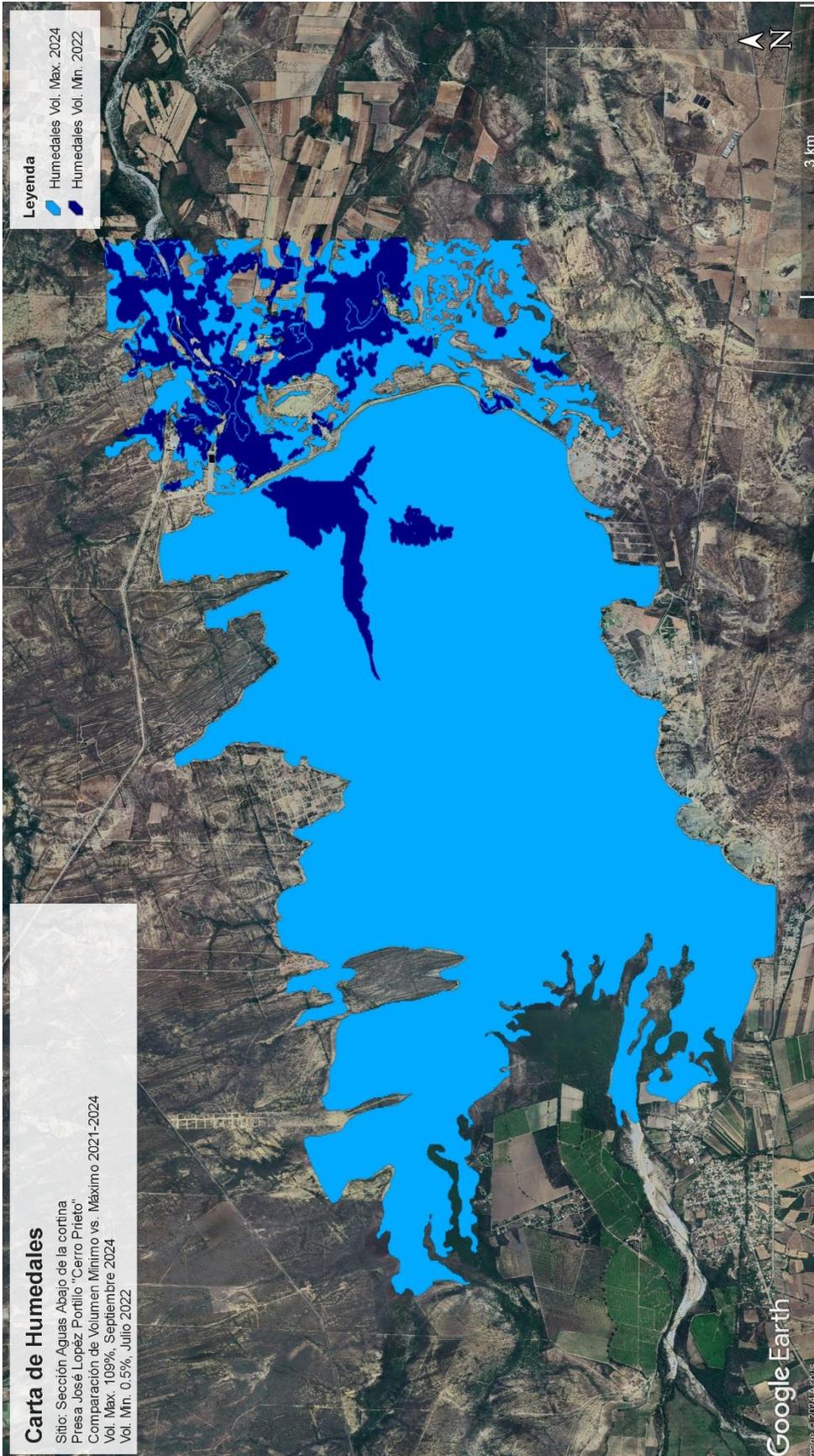


Figura 111. Contraste de humedal máximo en 2024 y mínimo en 2022.

5.4 Zonas con deformaciones en la cortina

Los asentamientos y deformación de la cortina, anteriormente eran monitoreados por la SARH, mediante instrumentación instalada, el último reporte con el que se cuenta data del año 1990, en el cual se mencionan desplazamientos horizontales de la cortina y asentamientos de la corona y diques.

Actualmente, no se cuenta con información de dictámenes en base a la instrumentación de la presa y la instrumentación no se encuentra en operación como se muestra en la Figura 112, donde el inclinómetro que se tenía para medir los desplazamientos horizontales está totalmente destruido y tapado, así como la mayoría de piezómetros y los testigos o mojoneras la mayoría ya no existen. Esta es una de las razones por las cuales se optó por elegir métodos indirectos de geofísica para identificar las áreas con anomalías en cuanto a su estructura.



Figura 112. Inclinómetro fuera de servicio en la actualidad.

Los datos recabados de 1983 – 1990 por el inclinómetro, indican que los desplazamientos horizontales máximos encontrados son sobre el eje del río aguas abajo, alcanzando los 5 cm de desplazamiento total, como se muestra en la Figura 113; la mayor deformación fue después del segundo llenado de la presa (1986) y este fue de 4.2 cm, la tendencia sugiere que con el tiempo la deformación continuaría esta área de la cortina (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1990).

En el Anexo 3, se puede encontrar de manera completa la carta elaborada en este reporte de 1990 correspondiente a “Desplazamientos Horizontales en Inclinómetro I-1, Eje de Río, Eje Cortina”

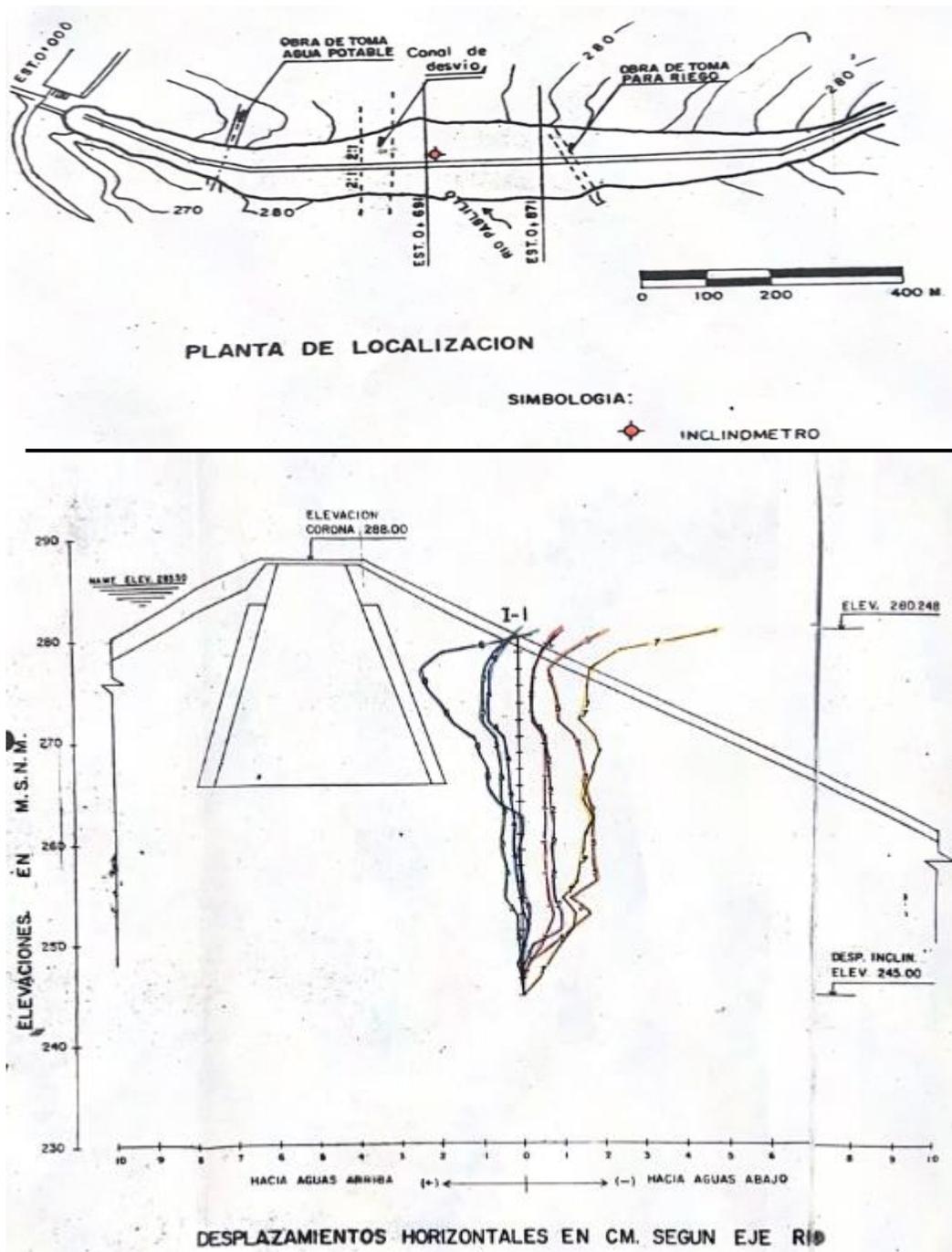


Figura 113. Desplazamientos horizontales reporte de comportamiento 1990 (SARH, 1990).

En cuanto a los asentamientos verticales, en el reporte elaborado por la SARH en (1990), se registraron asentamientos en los testigos de la corona, específicamente en el Testigo 20 (T – 20), el cual presentó un asentamiento de 17.7 cm, lo que corresponde a un 0.37 % de la altura total de la cortina, se determinó que esta deformación continuaría, destacando los eventos donde la presa presentará un

llenado rápido debido a que después del Huracán Gilberto, los asentamientos aumentaron 4 cm ese año; haciendo una comparativa en época ordinaria donde los asentamientos registraban aproximadamente 1 cm por año, la ubicación aproximada del T – 20, es en la parte más alta de la corona de la cortina, como se muestra en la Figura 114, para consultar la carta completa se puede ver el Anexo 4 “Asentamientos de testigos Superficiales en Corona y Cortina”

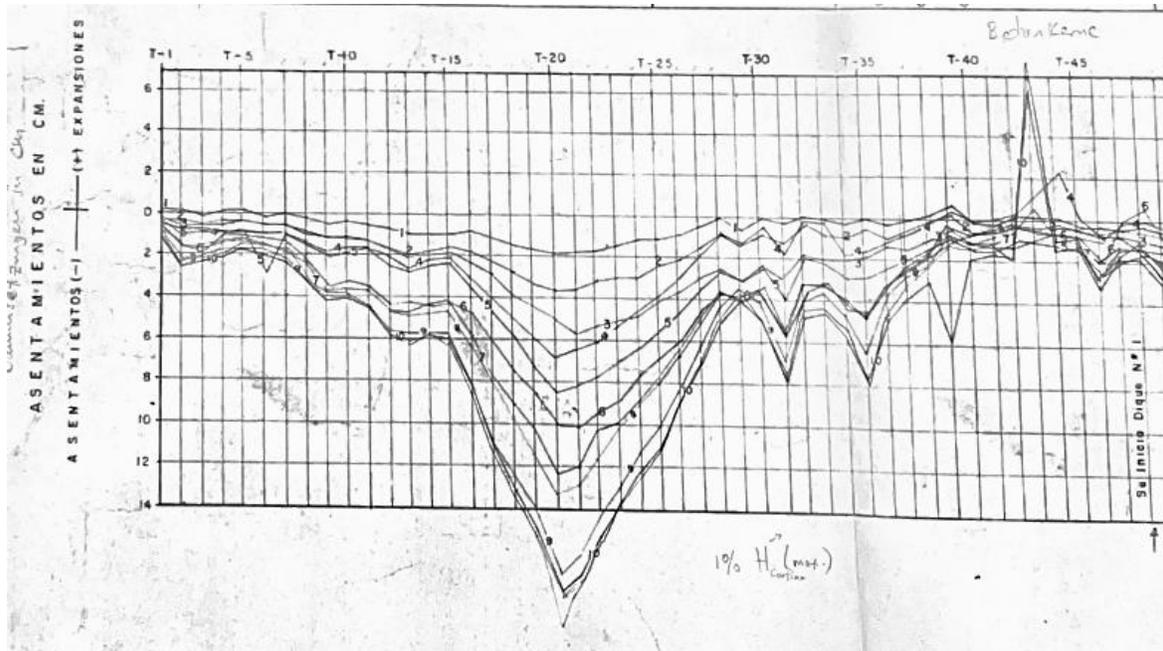


Figura 114. Asentamientos en la cortina de la presa Cerro Prieto (SARH, 1990).

Gravimetría

Los datos “crudos” de microgravimetría se procesaron en el software surfer, aplicando la corrección de aire libre y de Bouguer; mostrando zonas con gradiente gravimétrico alto, dichas zonas tienen un alto potencial de fracturamiento, lo cual podría ser el camino a las filtraciones encontradas en la cortina de la presa.

Tanto la anomalía de aire libre y la anomalía de Bouguer, no son rectas lo cual evidencia que la densidad en el área de la cortina no es constante como se muestra en las Figuras 115 y 116, siendo otro indicador de potencial fracturamiento en el área de la cortina, debido a que en teoría el corazón de la cortina es homogéneo e impermeable.

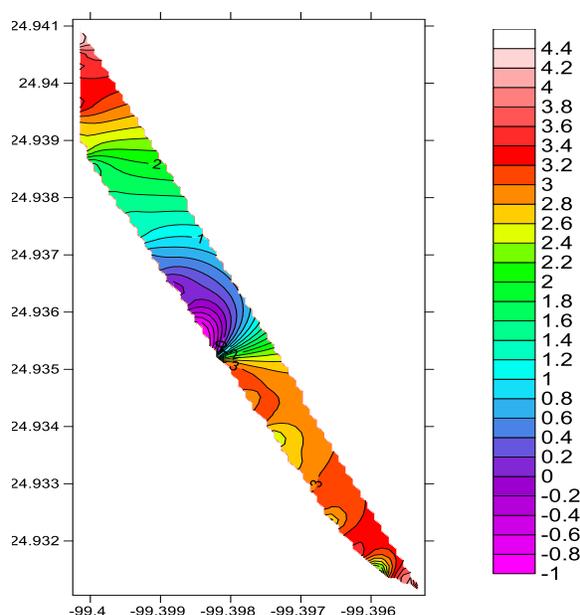


Figura 115. Anomalía gravimétrica de Aire Libre, mGal.

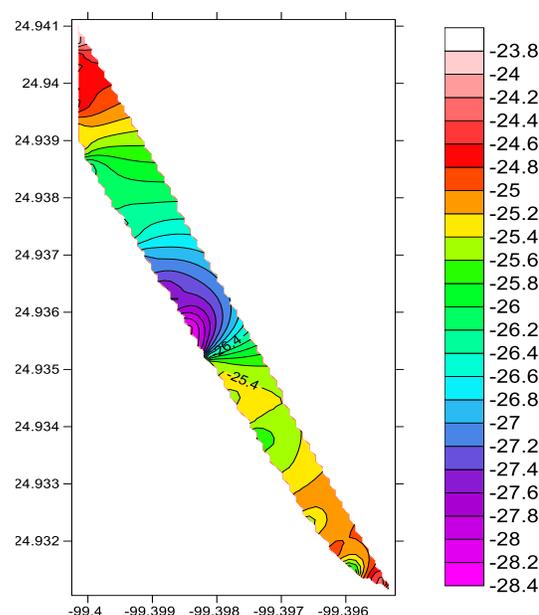


Figura 116. Anomalía gravimétrica de Bouguer, mGal.

En la tabla a continuación, se muestran los resultados de las correcciones de Aire Libre y de Bouguer aplicadas a los datos en el procesado, donde se aprecia que en las estaciones CP020 a la CP028, muestran mayores anomalías negativas, relacionándose con la presencia de materiales menos densos como cavidades, agua o materiales porosos; esta anomalía se encuentra localizada sobre la parte de mayor altura de la corona de la presa, donde aguas debajo de la cortina se encuentra el V – 1, el cual evidenció la presencia de filtraciones en bajos niveles de almacenamiento de la presa durante esta investigación. Las zonas de anomalías coinciden con las zonas de humedales presentes a volúmenes máximos y mínimos de la presa (Figuras 117 y 118). Esta zona de mayor anomalía coincide con los asentamientos registrados del T – 20 por la SARH en 1990, con 17.37 cm de asentamiento.

Tabla 19. Resultados de las correcciones de Aire Libre y de Bouger.

ID	Lat N (Grad)	Long W (Grad)	Long E (Grad)	Z (Elevación Hortométrica (m))	dg Aire Libre	dg Bouguer simpl 2.3
CP001	24.9311	99.3952	-99.395233	289	1.9353	-25.9289
CP002	24.9314	99.3957	-99.395733	292	3.1704	-24.9831
CP003	24.9315	99.3959	-99.395917	287	1.2864	-26.3849
CP004	24.9322	99.3965	-99.396483	294	3.1002	-25.2461
CP005	24.9323	99.3966	-99.3966	291	2.3991	-25.6579
CP006	24.9325	99.3967	-99.3967	292	3.0391	-25.1144
CP007	24.9327	99.3968	-99.396817	293	3.1431	-25.1067
CP008	24.9329	99.3969	-99.396917	293	2.8671	-25.3828
CP009	24.9331	99.3970	-99.397033	294	3.0317	-25.3147
CP010	24.9333	99.3971	-99.397133	293	2.5963	-25.6536
CP011	24.9335	99.3973	-99.39725	294	2.8503	-25.4960
CP012	24.9337	99.3974	-99.39735	293	2.3968	-25.8531
CP013	24.9339	99.3975	-99.397467	293	2.5172	-25.7326
CP014	24.9341	99.3976	-99.397567	294	3.1482	-25.1981
CP015	24.9343	99.3977	-99.397683	294	2.9860	-25.3603
CP016	24.9345	99.3978	-99.3978	294	2.8292	-25.5171
CP017	24.9347	99.3979	-99.3979	295	3.1227	-25.3201
CP018	24.9349	99.3980	-99.398017	296	3.1006	-25.4385
CP019	24.9351	99.3981	-99.398117	295	3.0477	-25.3950
CP020	24.9353	99.3983	-99.39825	282	-0.7659	-27.9552
CP021	24.9356	99.3984	-99.398367	282	-0.9430	-28.1323
CP022	24.9357	99.3985	-99.398467	283	-1.0642	-28.3499
CP023	24.9360	99.3986	-99.398583	284	-0.4804	-27.8625
CP024	24.9362	99.3987	-99.3987	285	0.2423	-27.2363
CP025	24.9364	99.3988	-99.3988	285	-0.1972	-27.6758
CP026	24.9366	99.3989	-99.3989	284	-0.0053	-27.3875
CP027	24.9368	99.3990	-99.399017	286	0.5046	-27.0704
CP028	24.9370	99.3991	-99.399133	286	0.5062	-27.0688
CP029	24.9372	99.3993	-99.39925	286	0.9196	-26.6553
CP030	24.9374	99.3994	-99.39935	286	1.3395	-26.2354
CP031	24.9376	99.3995	-99.399467	287	1.1791	-26.4923
CP032	24.9378	99.3996	-99.399583	287	1.5058	-26.1656
CP033	24.9380	99.3997	-99.3997	287	1.4990	-26.1724
CP034	24.9382	99.3998	-99.399817	288	1.7047	-26.0631
CP035	24.9384	99.3999	-99.399933	288	1.5255	-26.2424
CP036	24.9386	99.4000	-99.400033	288	1.3682	-26.3996
CP037	24.9388	99.4001	-99.4001	289	2.5579	-25.3063
CP038	24.9390	99.4002	-99.400167	289	2.5697	-25.2945
CP039	24.9392	99.4002	-99.400217	290	2.6147	-25.3459
CP040	24.9394	99.4002	-99.400233	290	2.9874	-24.9732
CP041	24.9396	99.4003	-99.40025	291	3.7699	-24.2871
CP042	24.9399	99.4002	-99.400233	291	3.1750	-24.8820
CP043	24.9401	99.4002	-99.400217	291	3.3500	-24.7071
CP044	24.9403	99.4002	-99.4002	293	3.7488	-24.5011
CP045	24.9405	99.4002	-99.400183	292	3.3393	-24.8142
CP046	24.9407	99.4002	-99.400183	293	4.3828	-23.8671
CP047	24.9409	99.4002	-99.400167	293	4.2379	-24.0120
CP048	24.9411	99.4002	-99.40015	294	4.0073	-24.3390
CP049	24.9317	99.3962	-99.396167	295	3.5593	-24.8834
CP050	24.9313	99.3955	-99.395467	295	4.2972	-24.1455

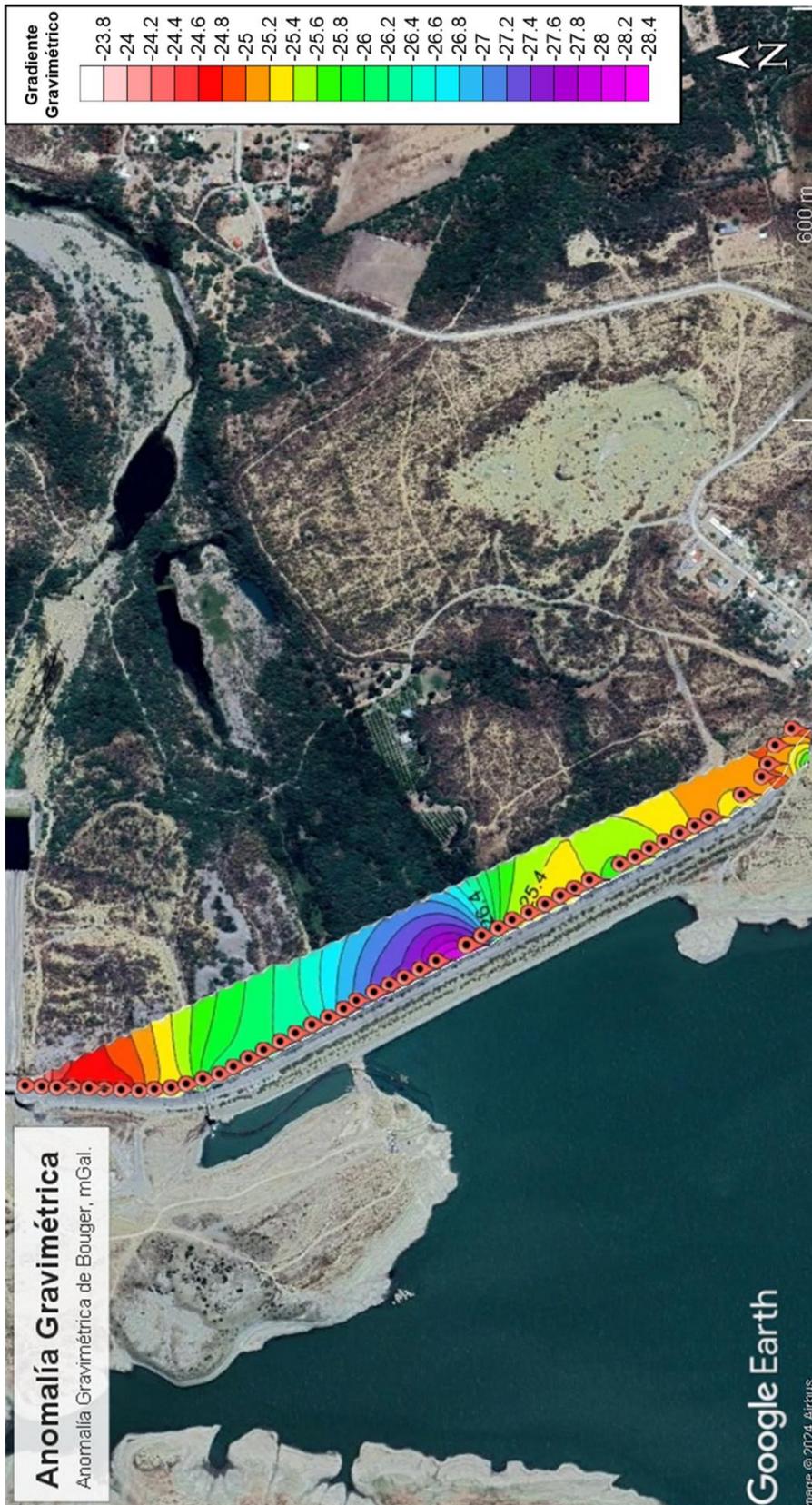


Figura 117. Anomalia gravimétrica de Bouguer, mGal (modificado de Google Earth, 2024).

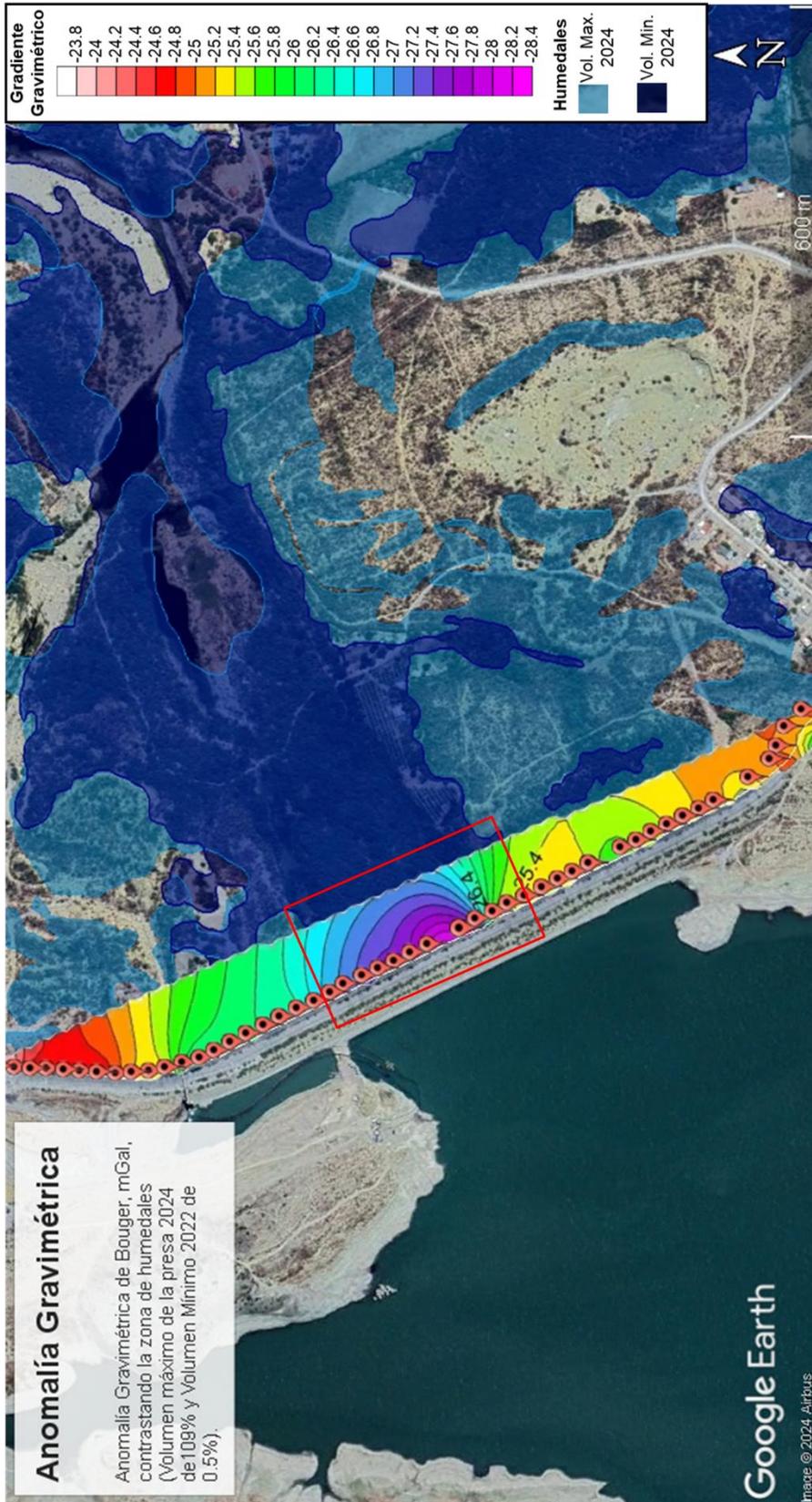


Figura 118. Anomalía gravimétrica de Bouguer, mGal contrastándola con las zonas mínimas y máximas de humedales (modificado de Google Earth, 2024).

Georadar

Se obtuvieron líneas de georadar con dos antenas diferentes (50 MHz y 500 MHz), la primera permite una mayor profundidad, pero menor resolución, mientras que la segunda aporta una mayor resolución, pero menor profundidad.

Realizando una interpretación visual acerca de los radagramas obtenidos, es posible observar en el radagrama de la antena de 50 MHz (Figura 119), la existencia de múltiples zonas donde los reflectores pierden continuidad; las zonas donde la continuidad se pierde a mucha profundidad pueden ser interpretadas como zonas de fracturas o grietas, evidenciando la baja estabilidad y consolidación que presenta el terreno; mientras que las zonas donde se aprecian una especie de domos, se interpretan como asentamientos diferenciales existentes en el área de la cortina de la presa.

En el radagrama de la antena de 50 MHz, la zona de mayor interés se encuentra en la distancia 540 m hasta los 900 m. Esta zona presenta una mayor cantidad de grietas o fracturas a profundidades considerables, lo cual favorecería los posibles canales de tubificación que se encuentran en el corazón de la cortina y afloran aguas abajo de la presa en forma de filtraciones; estos datos son cotejados con la zona de mayores anomalías gravimétricas, como se muestra en la Figura 120, la cual también tiene incidencia con la zona del V – 1, siendo un área donde se han registrado las mayores filtraciones y humedales a pesar de la sequía extrema. Como se puede apreciar en la Figura 119, una de las grietas o fracturas en esta área de influencia, se encuentra a una profundidad de 15 m y a la distancia de 880 m, las otras grietas o fracturas existentes oscilan de los 7 m hasta los 12 m. Otra de las grandes fallas o grietas se aprecia a los 1020 m de distancia con una profundidad de 17 m.

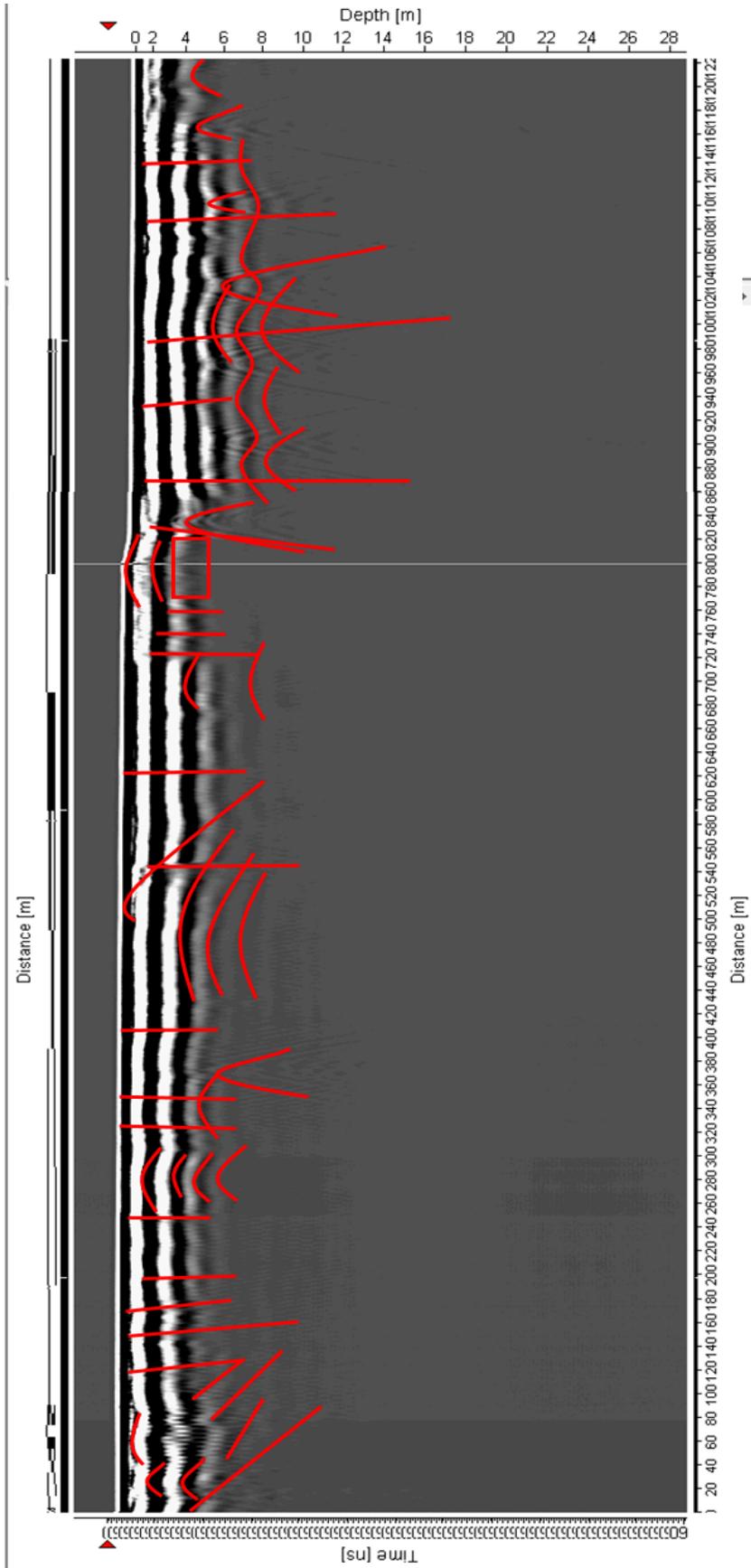


Figura 119. Interpretación de la línea de 50 MHz.

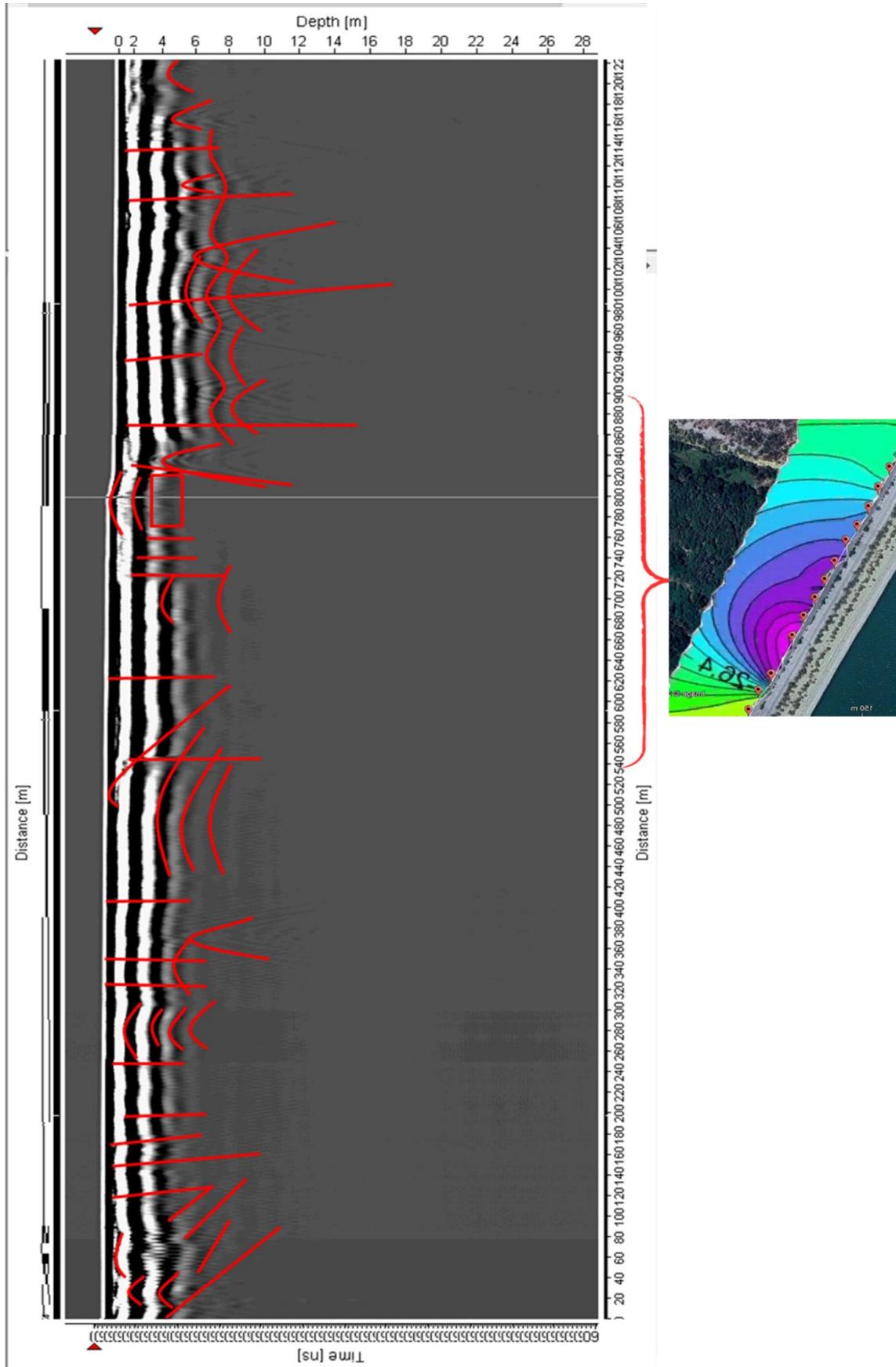


Figura 120. Interpretación de la línea de 50 MHz, haciendo una comparativa con el área de influencia de gravimetría.

En la Figura 121, se muestra el perfil general de la antena de 500 MHz, dicho perfil tiene una distancia de 950 metros y una profundidad de hasta 6 metros, posterior a esta profundidad, la calidad de los reflectores es muy homogénea y se pierde.

Al igual que con la antena de 50 MHz, es posible identificar a simple vista la falta de continuidad en el terreno; desde la distancia de 0 m a 360 m, existen múltiples fallas y/o fracturas, las cuales se pueden llegar a extender 200 m de distancia con profundidades de hasta 7 m con una buena resolución, lo cual hace probable que éstas continúen con más profundidad; las fallas y/o grietas más pequeñas tienen una profundidad de hasta 4 m y se extienden entre 50 m y 100 m de distancia.

A partir de 360 m de distancia, se aprecian mayores fallas y/o grietas que van a profundidades de más de 8 m y recorren distancias de más de 260 m; relacionándose con la mayor zona de anomalías gravimétricas como se muestra en la Figura 122; de León-Gómez en 1993, reportó una falla geológica en esta zona. A los 750 m de distancia, se aprecian múltiples fallas y/o grietas verticales a profundidades de hasta 8 m, así como asentamientos diferenciales como se muestra en la Figura 123.

Con una mayor resolución usando el software RAMAC Ground Vision, se aprecia de manera más somera los detalles de 0 m a 2 m de profundidad. El área de mayor interés a esta resolución está localizada a la distancia de 715 m a los 822 m; el resto de perfiles se encuentra en el Anexo 5, correspondiente a radagramas, donde mayormente se aprecian asentamientos diferenciales a profundidades muy someras que no exceden de 0.5 m.

En la Figura 124, la mayor falla y/o grieta, recorre una distancia de 11 m y tiene una profundidad de visible de más de 2 m. El resto de grietas son visibles de manera muy somera y no sobrepasan de 1.5 m de profundidad.

En la Figura 125, se aprecian fallas verticales que sobrepasan los 2 m de profundidad ubicadas a las siguientes distancias 771 m, 777 m y 809 m; el resto son pequeñas grietas las cuales oscilan entre los 0.5 m a 1 m, de igual manera es posible apreciar múltiples asentamientos diferenciales someros.

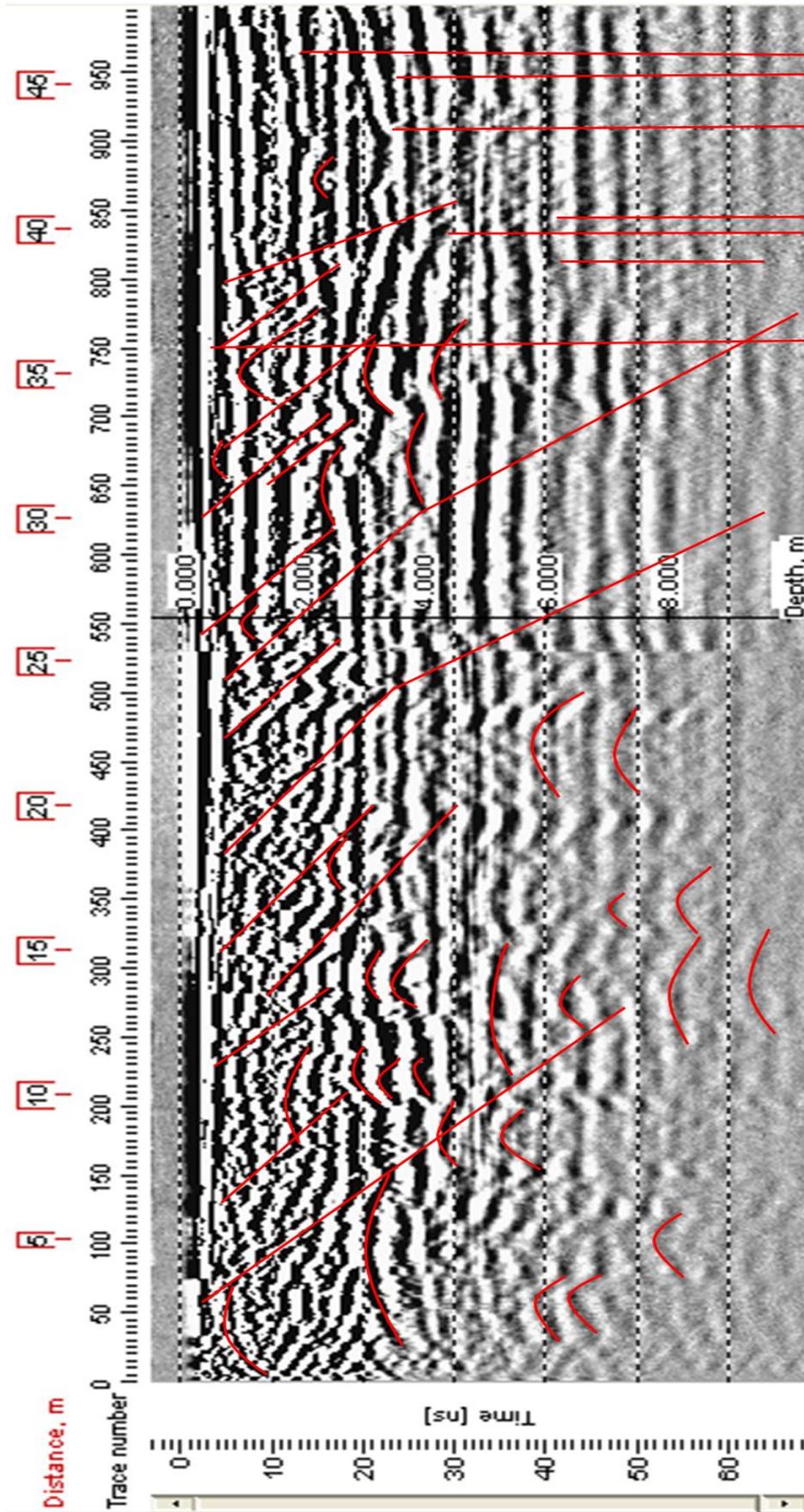


Figura 121. Interpretación de la línea de 500 MHz.

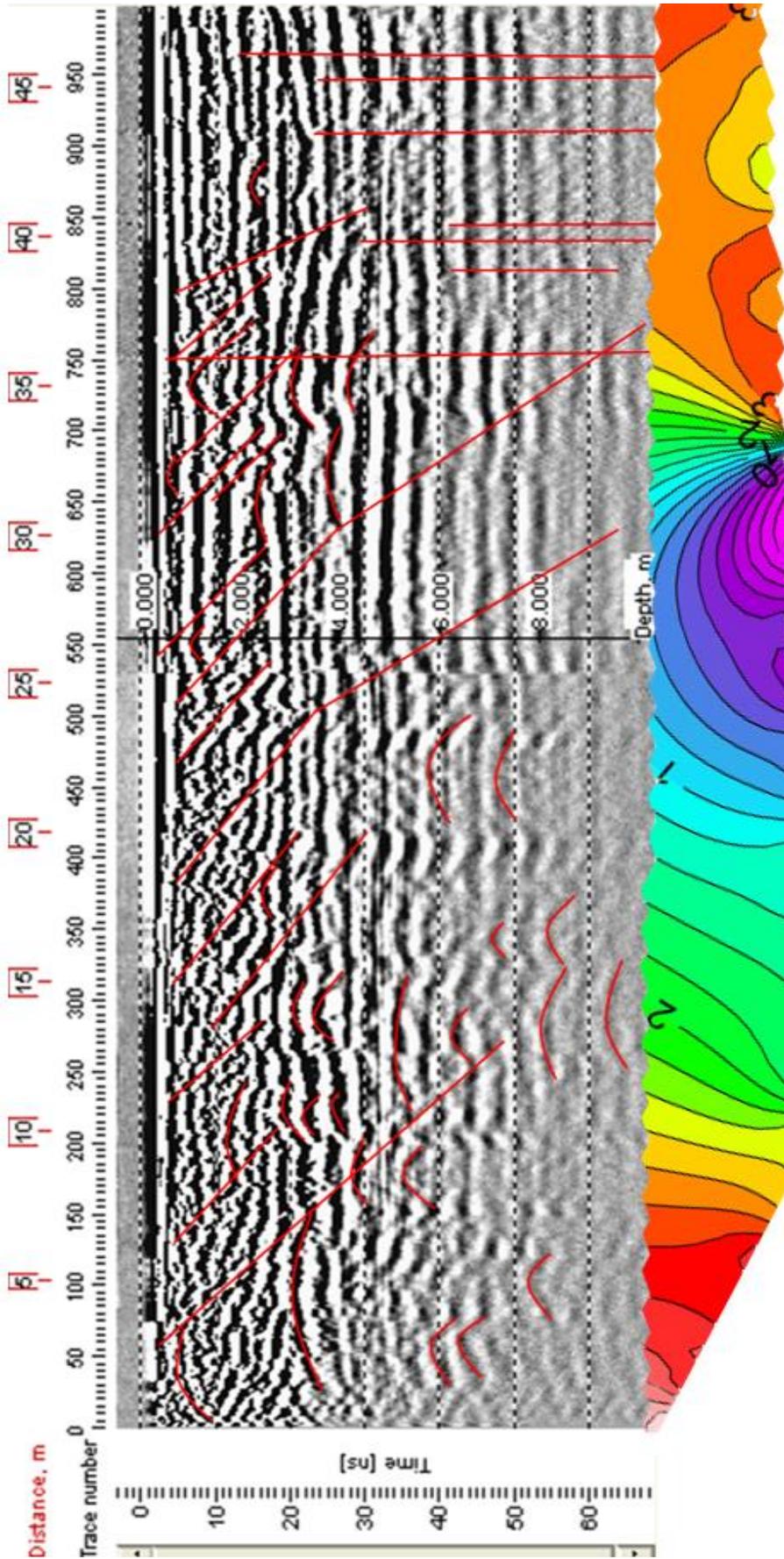


Figura 122. Interpretación de la línea de 500 MHz, haciendo una comparativa con el área de influencia de gravimetría.

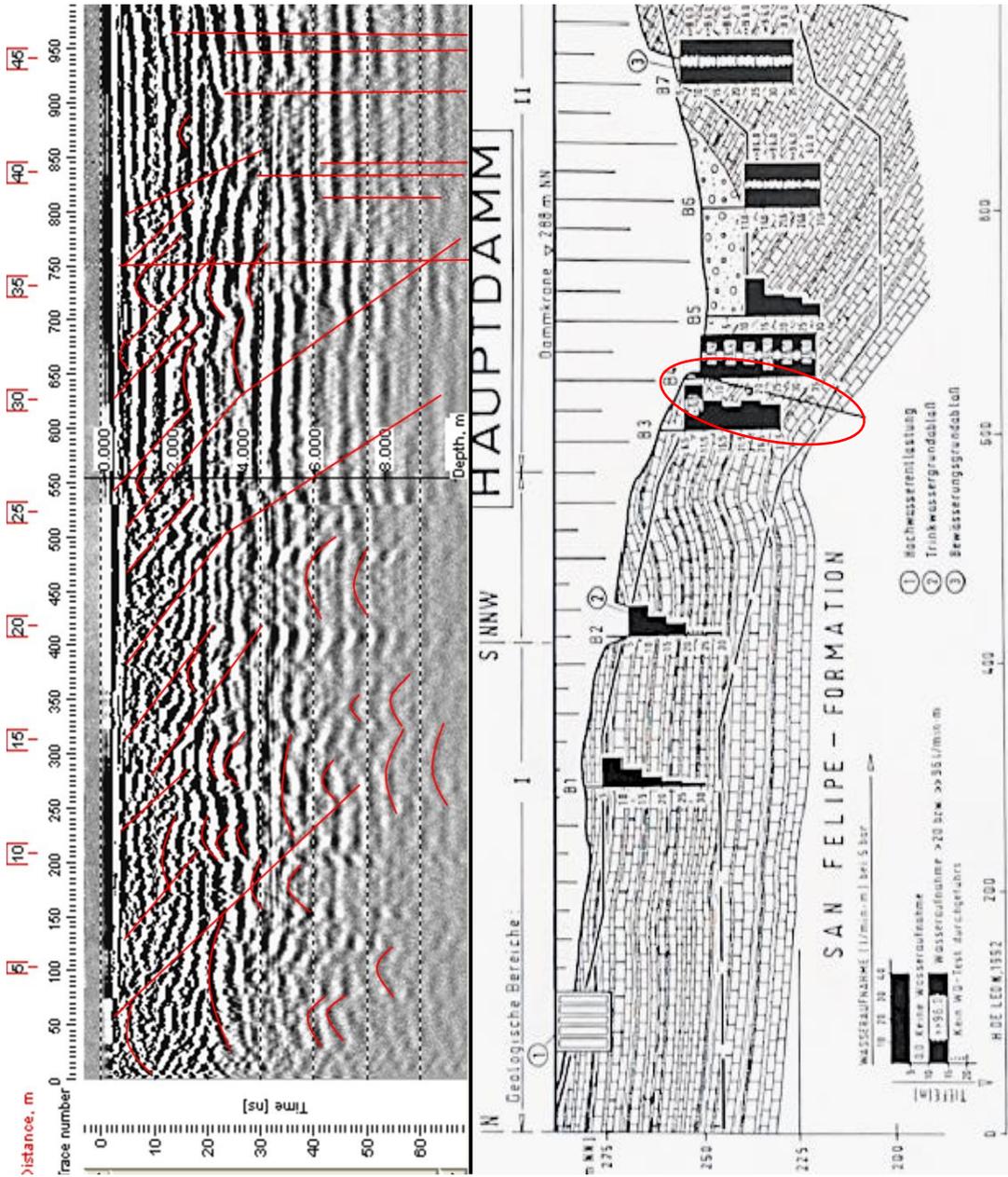


Figura 123. Influencia del medio geológico para la interpretación de radagranas.

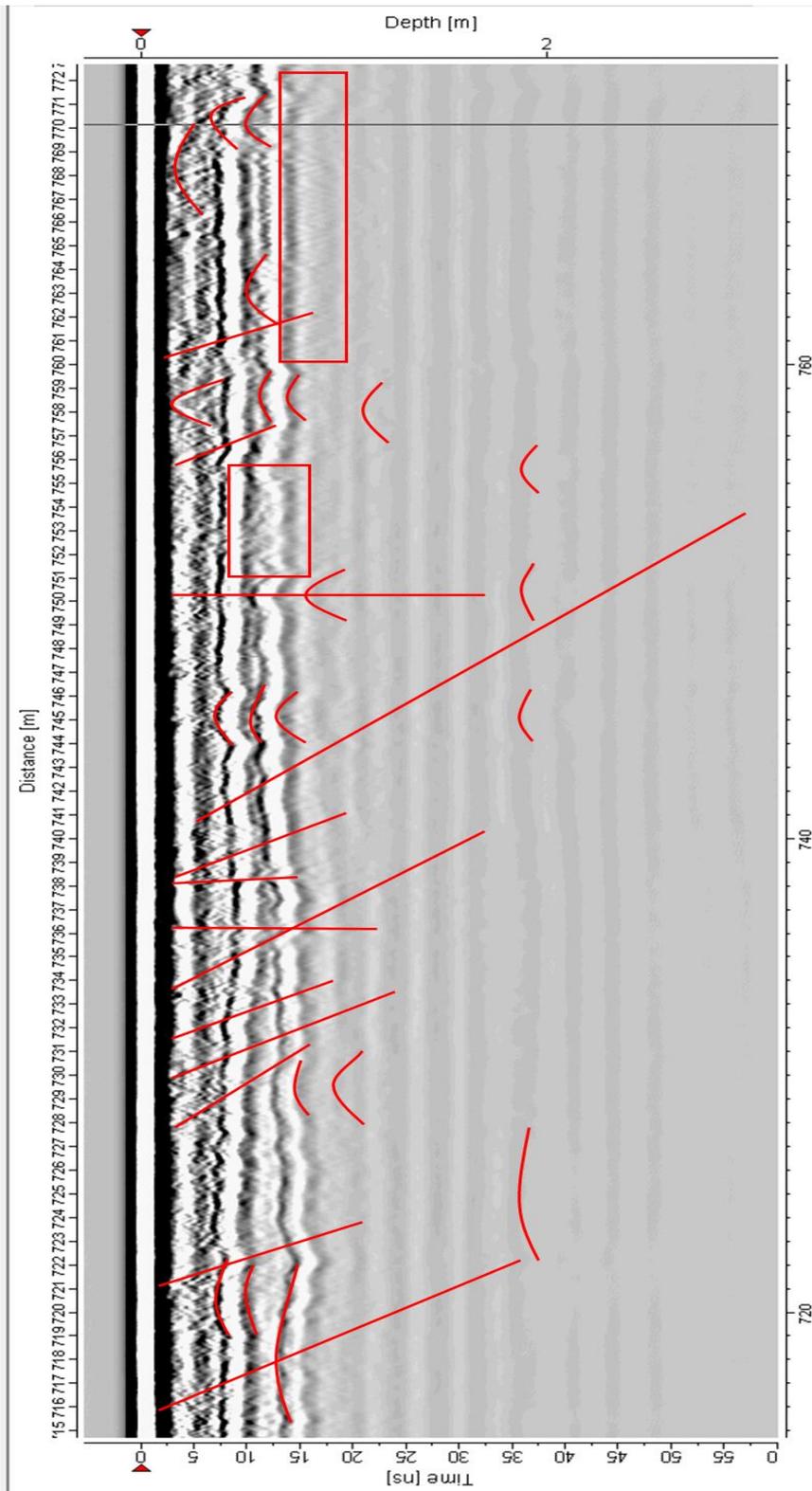


Figura 124. Detalle de sección de radagrama en la zona de influencia.

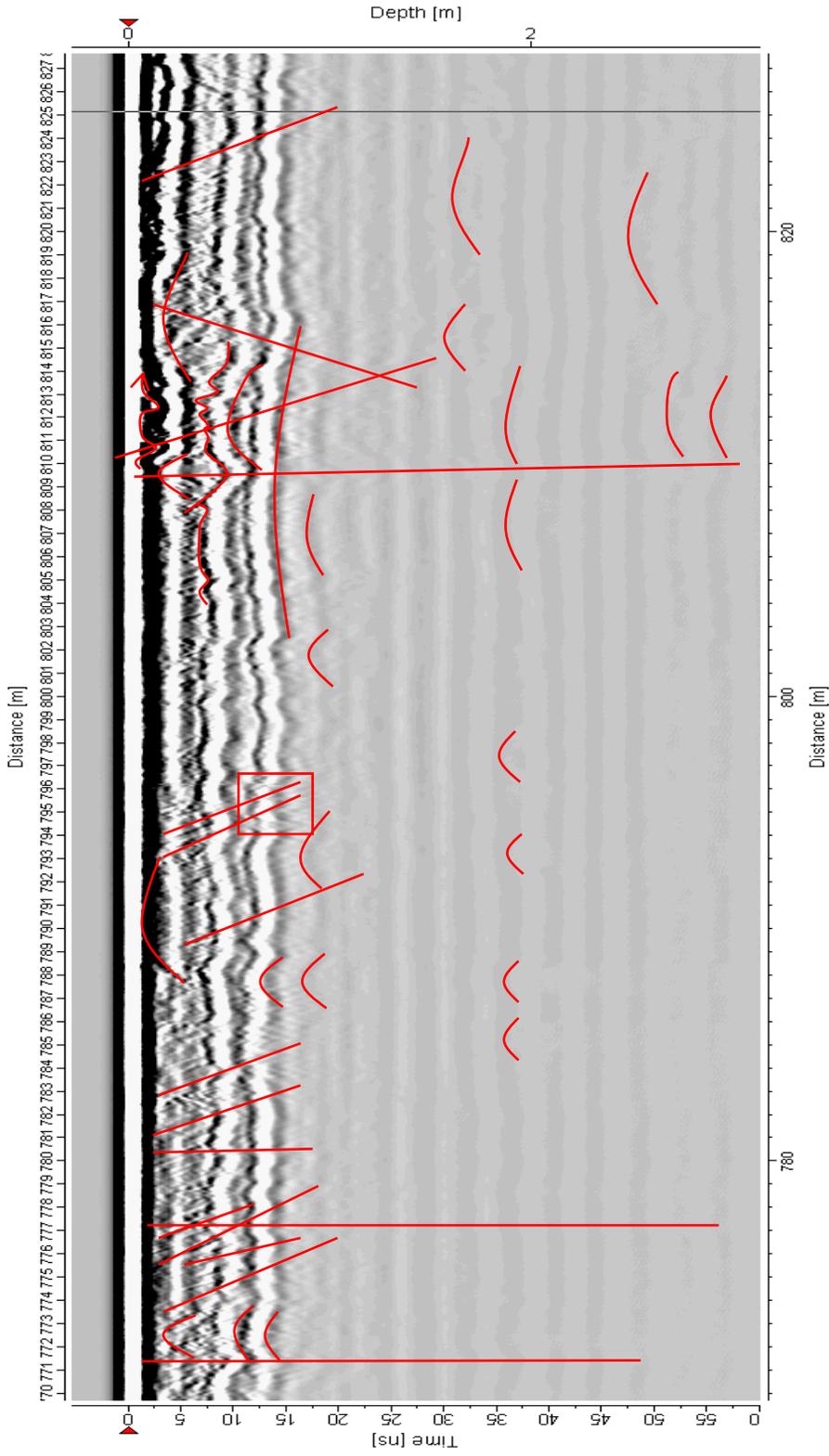


Figura 125. Detalle de sección de radagrama en la zona de influencia.

5.5 Matriz ICOLD

La matriz de Grandes Presas propuesta por la ICOLD, se elaboró en el contexto de sequía extrema presentado en los años 2021 a 2024, denotando la afectación directa en la presa y sus entornos. Con este llenado de una matriz de tipo causa-efecto es más sencillo identificar el grado de afectación que cada uno de los parámetros presentó durante este periodo y tomar en consideración las posibles acciones correctivas, para mejorar las condiciones de la presa en el caso de una sequía futura, así como prestar vital atención a los críticos que requieren un mantenimiento; en el caso del área de estudio, las acciones correctivas más importantes a realizar son las relacionadas al desazolve de la presa, estabilización de taludes principalmente aguas debajo de la cortina, control de filtraciones, implementación de instrumentación de medición y un plan estratégico para la regulación del embalse; la gran mayoría de estas acciones preventivas y correctivas se pueden elaborar de una manera más sencilla y satisfactoria durante época de sequía cuando la presa presenta bajos niveles de almacenamiento.

Los parámetros que se consideraron para el llenado de la matriz en el eje de las abcisas se consideran los bloques de usos del agua, impactos económicos y sociales, impacto geológico, impactos del agua, clima, impactos sobre la fauna terrestre y acuática; mientras que en el eje de las ordenadas, se consideran los bloques usos del agua, tipos de acciones, zonas afectadas y finalmente el apartado de acciones correctoras propuestas.

En el bloque 1, “usos del agua” de las abcisas, los mayores impactos se ubicaron en el eje de las ordenadas en el bloque de “usos del agua”, con afectaciones de mayor importancia principalmente en el abastecimiento de agua y los regadíos, como parte de otras afectaciones en este mismo bloque, se identificaron la pesca, usos recreativos, industriales y la lucha contra incendios. En el segundo bloque de las ordenadas, el factor más afectado fue el de presencia del embalse, teniendo su punto más crítico durante el año 2022.

En el tercer bloque, se consideran las zonas afectadas en la presa, en la actualidad los factores estructurales de la presa, principalmente la cortina de la presa aguas arriba y abajo, tienen zonas de deformación las cuales afectan su correcto funcionamiento; esta información fue cotejada con los datos geofísicos y los datos de la evolución piezométrica durante sequía, denotando la gran influencia que tiene el volumen de la presa con el agua subterránea y el agua que atraviesa el corazón teóricamente “impermeable”, creando inestabilidad y riesgos en llenados rápidos, además de pérdidas por filtraciones.

En el cuarto bloque de “Efectos Económicos y Sociales”, el suministro de agua potable hacia el AMM y el área rural, fue el principal impacto identificado en el estado de sequía extrema en el que se encontraba la presa. La sequía causó afectaciones económicas al sector de la agricultura y de la ganadería en Linares, debido a la falta

de caudal aguas arriba y abajo de la presa; lo cual afectó al comercio y las finanzas, teniendo en consideración el turismo que generaba esta presa. Debido a los bajos niveles de almacenamiento, se identificaron daños a la salud en la población en general por la cantidad de bacterias y microorganismos presentes en el agua que era suministrada.

Respecto a los impactos identificados en el bloque de “Impacto Geológico”, la sequía y los bajos niveles en la presa, permitieron identificar diversos factores como la erosión del talud de la cortina tanto aguas arriba y aguas abajo; así como la mala praxis empleada en la remediación de taludes, por otro lado, se identificó el exceso de sedimentos de arrastre presentes en el vaso de la presa, los cuales crean grandes depósitos que impiden conocer el valor de almacenamiento real; el estado de sequía extrema, permitió relacionar las zonas de humedales u oscilación, zonas de filtraciones con el medio geológico del área de estudio, este factor identificado es uno de los más importantes en la matriz ya que a pesar de los niveles extremadamente bajos durante la sequía, las filtraciones existentes eran considerables y las zonas de humedales, siempre estuvieron presentes.

Sobre el bloque “Impactos del agua”, el principal factor estudiado durante la presente investigación, fue la evolución del acuífero mediante cartas piezométricas y como era su comportamiento en época de sequía, donde se identificaron parámetros en el cambio del régimen hidráulico de la presencia de la presa y su volumen de almacenamiento y como estos cambios afectaban al acuífero, el abastecimiento de agua y los pozos de aprovechamiento hidráulico; la evaporación jugó un papel clave en la sequía debido a las altas temperaturas registradas en la zona, contribuyendo a la salinización de los suelos y la erosión.

Los “Impactos sobre la flora”, impactaron a gran parte de la vegetación existente en la zona, la cual, al ser vegetación en su mayoría nativa, es resistente a las altas temperaturas; aunque la existencia de matorrales y pastizales variaba según la disponibilidad de agua y el aporte a las zonas de filtraciones y humedales; por otro lado, el área citrícola durante estos años experimentó bajas cosechas

Finalmente, las pérdidas en los “Impactos sobre la fauna”, se presentaron principalmente en el sector de la acuicultura y los anfibios, los cuales dependen de la presencia del embalse de la presa y los bajos niveles experimentados durante la época de sequía limitaban el crecimiento de estas especies, teniendo afectaciones de pérdida de fauna y afectaciones económicas para las personas que dependían de este sector.

Las principales acciones correctivas propuestas durante la elaboración de esta matriz en contexto de sequía son: tener un caudal garantizado para el abastecimiento y el regadío, tener una regulación del embalse más estricta con

mayor seguimiento de los datos actuales de la presa y su evolución con respecto al tiempo; considerando en gran medida la estabilización de taludes, implementación de instrumental de mediciones para su revisión constante. Realizar acciones como el desazolve cuando se tienen bajos niveles en la presa y de manera urgente regular la explotación del acuífero así como la ordenación turística y piscícola.

Es de vital importancia mencionar, que esta matriz fue llenada en el contexto de sequía extrema y muchos de los parámetros que se habían marcado como acciones correctivas o preventivas pudieron haber sido grandes factores de cambio cuando sucedió el llenado rápido con la tormenta tropical “Alberto”, destacando entre las acciones correctivas el asegurar el abastecimiento de agua e infraestructura, la regulación del embalse para evitar los escenarios de pérdidas que se tuvieron después de la tormenta, el dragado y desazolve de la presa eran fundamentales en periodo de sequía para lograr darle más capacidad de volumen de almacenamiento a la presa; sin embargo, estas acciones nunca se realizaron. Una de las acciones más importantes era hacer una retención y recaptación de filtraciones en época de sequía ya que en llenado rápido estas filtraciones aumentarían de manera considerable.

A continuación, se presentan las tablas correspondientes a la matriz de la ICOLD llenada para la presa Cerro Prieto, en el contexto de sequía.

Tabla 20. Primera sección de la matriz de grandes presas llena en época de sequía.

MATRIZ		IMPACTOS ECONÓMICOS Y SOCIALES															
A	Clase / Impacto: Clasifica el impacto B Beneficio (B) Perjudicial (D), C Certeza (C); P Probable (P); I improbable (I); D desconocido (N) G Grado/importancia: M Menor (1); M Medio (2); M Mayor (3) D Duración: T Temporal (T); P Permanente (P) P Plazo: I indica la reversibilidad I Inmediato (I); M Medio Plazo (M); L Largo plazo (L) A Acción: S (Y); N (N)	E															
		USOS DEL AGUA	INDUSTRIALIZACIÓN Y COMERCIALIZACIÓN	EMPLEO	TURISMO	AGRICULTURA Y GANADERÍA	VÍAS DE COMUNICACIÓN	COMERCIO Y FINANZAS LOCALES	REVALORIZACIÓN RÚSTICA	ACEPTACIÓN SOCIAL	USOS RECREATIVOS	PATRIMONIO CULTURAL	ESTÉTICO	SUMINISTRO DEL AGUA POTABLE	EXODO RURAL	PROTECCIÓN CONTRA LOS RIESGOS NATURALES	SALUD
	REGADÍO	DC2TM	DP1TM		DC2TM	DP1TM	DP1TM	DC2TM	DC2TM	DC2TM	DC2TM	DC2TM	DC2TM	DC1TM			
	ABASTECIMIENTO	DC3TM	DC2TM		DC2TM	DP3TM	DP1TM	DC3TM	DC3TM	DC3TM	DC3TM	DC3TM	DC3TM	DC3TM	DC3TM	DP2TM	DP1TM
	CONTROL DE AVENIDAS	DP1PL	XP1TM		XP1TL												
	UTILIZACIÓN INDUSTRIAL	XP2TM	XP2TM			DP2TM	DP1TM	DP2TM	DP2TM	DP1TM	DP1TM	DP2TM	DC2TM				
	NAVEGACIÓN					DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DC2TM				
	LUCHA CONTRA INCENDIOS	XP1TM	DP1TM		DC1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DC1TM				
	PESCA	DP1TM	DP2TM		DC1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DC1TM				
	USOS RECREATIVOS	DP1TM	DP1TM		DC1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DC1TM				
	PRESENCIA DE LA PRESA	DC3PL	DP1TM		DC1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DC3TM				
	EMBALSE				DC1TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DC3TM				
	DERIVACIÓN DE AGUA				DC1TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DC3TM				
	OBRAS																
	DEFORESTACIÓN																
	EXCLUSAS																
	CANALES Y TUBERÍAS	DP2TM			DP1TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DC2TM				
	DESCARGA DE AGUA	DP2TM			DP1TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DC3TM				
	TOMAS DE AGUA				DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DC3TM				
	LADERAS Y CUENCAS	DP2TM															
	ZONAS DE OSCILACIÓN (B. ÁRIDA)	DP2TM			DP1TM												
	CURSOS DE AGUAS ARRIBA				DC1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DC1TM				
	CURSOS DE AGUAS ABAJO	KC2TM			DC1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DP1TM	DC1TM				
	CANALES DE REGADÍOS	DP1TM			DP2TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DC1TM				
	AGUAS SUBTERRÁNEAS	DP3TM	DC2TM		DC1TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DP2TM	DC3TM				
	ORDENACIÓN FISICICOLA	Y	Y		Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y		Y		
	CAUDAL GARANTIZADO	Y	Y		Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y		Y		
	ORDENACIÓN TURÍSTICA				Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y		Y		
	REGULACIÓN DEL EMBALSE	Y			Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y		Y		
	INFRAESTRUCTURA				Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y		Y		
	REFORESTACIÓN				Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y		Y		
	LUCHA CONTRA LA EROSIÓN				Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y		Y		
	DRAGADO	Y															
	DESCARGAS DE AGUA				Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y		Y		
	EMBALSE DE RETENCIÓN	Y			Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y		Y		
	EMBALSE DE COMPENSACIÓN	Y			Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y		Y		
	BARRERA CONTRA FLOTANTE				Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y		Y		
	PERÍMETRO DE PROTECCIÓN				Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y		Y		
	TRATAMIENTO DEL AGUA		Y		Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y		Y		
	INDUSTRIAS CORRECTIVAS																
	REASENTAMIENTO																
	DESASOLVE	Y				Y											
	IMPLEMENTACIÓN DE INSTRUMENTAL DE CHEQUEO	Y															
	ESTABILIZACIÓN DE TALUDES	Y															
	MONITOREO SISMICO	Y															
	REGULACIÓN DE EXPLOTACIÓN DE ACUÍFERO	Y															

Tabla 21. Segunda sección de la matriz de grandes presas llena en época de sequía.

MATRIZ		IMPACTO GEOLOGICO											
		EROSION	TRANSPORTES E N SUSPENSION	ARRASTRE DE FONDO	DEPOSITOS	ESTABILIDAD DE LOS TALUDES	SISMOS INDUCIDOS	SALINIDAD DE LOS SUELOS	INUNDACIONES	CREACION DE ZONAS PANTANOSAS	DESECACION DE TIERRAS	INFLUENCIA SOBRE LAS MAREAS	OTROS (FALLAS Y GRIETAS GEOLOGICAS)
A	REGADIO		DC2TM			XP3PL				BP2TM	DC3TM		BC3TM
	ABASTECIMIENTO			DC2TL	DC1PL					DP3PI	DC3TM		DC3TM
	CONTROL DE AVENIDAS	DC1PL											
	UTILIZACION INDUSTRIAL										DC1TM		
	NAVEGACION										DC1TM		
	LUCHA CONTRA INCENDIOS										DC1TM		
	PESCA										DC1TM		
	USOS RECREATIVOS										DC3TM	XP3PM	DC3TM
	PRESENCIA DE LA PRESA	DC2PL	XP2PL	DC2PL	DC1PL	DP3PL	XP1TM	PP2PM	XP3PM	DP2PM	DC3TM	XP3PM	DC3TM
	EMBALSE					DP3PL	XP1TM	PP2PM	XP3PM	DP2PM	DC3TM	XP3PM	DC3TM
DERIVACION DE AGUA													
OBRAS					DP3PL								
DEFORRESTACION													
EXCLUSAS													
CANALES Y TUBERIAS					DP3PL								
DESCARGA DE AGUA					DP3PL								
TOMAS DE AGUA		DP2TM			DP1TM								
LADERAS Y CUENCAS													
ZONAS DE OSCILACION (B. ARIDA)							PP1PM		XP1TM	DP1TM			
CURSOS DE AGUAS ARRIBA	DC1PL								DP2TM	DP1TM	XP1PM	DC2TM	
CURSOS DE AGUAS ABAJO					DP3TM				DP2TM	DP1TM			
CANALES DE REGADIOS					DP1TM								
AGUAS SUBTERRANEAS						XP1PM	PP1PM		BP2TM	DC3TM		BC3TM	
ORDENACION PISCICOLA											Y		
CAUDAL GARANTIZADO									Y				
ORDENACION TURISTICA				Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	
REGULACION DEL EMBALSE	Y		Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	
INFRAESTRUCTURA	Y												
REFORESTACION													
LUCHA CONTRA LA EROSION	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	
DRAGADO													
DESCARGAS DE AGUA									Y				
EMBALSE DE RETENCION					Y				Y	Y	Y	Y	
EMBALSE DE COMPENSACION									Y	Y	Y	Y	
BARRERA CONTRA FLOTANTE									Y	Y	Y	Y	
PERIMETRO DE PROTECCION									Y	Y	Y	Y	
TRATAMIENTO DEL AGUA		Y						Y					
INDUSTRIAS CORRECTIVAS													
REASENTAMIENTO		Y		Y	Y			Y				Y	
DESASOLVE													
IMPLEMENTACION DE INSTRUMENTAL DE CHEQUEO											Y	Y	
ESTABILIZACION DE TALUDES	Y					Y					Y	Y	
MONITOREO SISMICO							Y				Y	Y	
REGULACION DE EXPLOTACION DE ACUIFERO													

Tabla 22. Tercera sección de la matriz de grandes presas llena en época de sequía.

MATRIZ		IMPACTOS SOBRE EL AGUA							CLIMA	
		CALIDAD BIOLÓGICA	CALIDAD FÍSICO-QUÍMICA	SALINIDAD	TEMPERATURA	EVAPORACIÓN	RÉGIMEN HIDRÁULICO	PÉRDIDA DE AGUA	NIVEL FREÁTICO	CREACIÓN DE UN MESOClima
A	REGADÍO	XP1TM	XP2TM	DP1TM	DP3TM	DC1TM	DC3TM	BC1TM	DC2TL	DC3TL
	ABASTECIMIENTO	XP1TM	XP2TM	DP1TM	DP3TM	DC1TM	DC3TM	BC1TM	DC2TL	DC3TL
	CONTROL DE AVENIDAS									
	UTILIZACIÓN INDUSTRIAL									
	NAVEGACIÓN				DP1TM					DC3TL
	LUCHA CONTRA INCENDIOS									
	PESCA	XP1TM		DP1TM	DP1TM	DC1TM	DC1TM			DC3TL
	USOS RECREATIVOS			DP1TM	DP1TM	DC1TM	DC1TM			DC3TL
	PRESENCIA DE LA PRESA				DP3TM	DC3TM	DC3TM	DC3PL		DC3TL
	EMBALSE		XP1TM	DP1TM	DP3TM	DC3TM	DC3TM	DC3PL		DC3TL
DERIVACIÓN DE AGUA								DC3PL		
OBRA										
DEFORRESTACIÓN										
EXCLUSAS										
CANALES Y TUBERÍAS							DC3TM	DC1PL		
DESCARGA DE AGUA										
TOMAS DE AGUA							DC3TM			
LADERAS Y CUENCAS										
ZONAS DE OSCILACIÓN (B. ÁRIDA)						DC1TM			DC1TL	
CURSOS DE AGUAS ARRIBA						DC3TM			DC1TL	
CURSOS DE AGUAS ABAJO						DC3TM		DC3PL	DC1TL	
CANALES DE REGADÍOS							DC1TM	BC1PL	DC1TL	
AGUAS SUBTERRÁNEAS						DP2PL	DC3TL		DC3TTL	
ORDENACIÓN PISCICOLA	Y			Y	Y					
CAUDAL GARANTIZADO					Y		Y	Y	Y	
ORDENACIÓN TURÍSTICA										
REGULACIÓN DEL EMBALSE	Y						Y	Y	Y	
INFRAESTRUCTURA								Y	Y	
REFORESTACIÓN									Y	
LUCHA CONTRA LA EROSIÓN										
DRAGADO										
DESCARGAS DE AGUA										
EMBALSE DE RETENCIÓN					Y		Y	Y	Y	
EMBALSE DE COMPENSACIÓN										
BARRERA CONTRA FLOTANTE										
PERÍMETRO DE PROTECCIÓN										
TRATAMIENTO DEL AGUA		Y		Y						
INDUSTRIAS CORRECTIVAS										
REASENTAMIENTO										
DESASOLVE										
IMPLEMENTACIÓN DE INSTRUMENTAL DE CHEQUEO					Y			Y	Y	
ESTABILIZACIÓN DE TALUDES							Y	Y		
MONITOREO SÍSMICO							Y			
REGULACIÓN DE EXPLOTACIÓN DE ACUIFERO									Y	

Clase / Impacto: Clasifica el impacto. Beneficio (B), Perjudicial (D), Difícil de cuantificar (X)
 Certidumbre: Califica la probabilidad de ocurrencia del impacto: Ciento (C); Probable (P); Improbable (I); Desconocido (N)
 Grado/Importancia: Menor(1); Medio (2); Mayor (3)
 Duración: Duración del impacto Temporal (T); Permanente (P)
 Plazo: Indica la reversibilidad Inmediato (I); Medio Plazo (M); Largo plazo (L)
 Acción: Si (Y); No (N)

Tabla 23. Cuarta sección de la matriz de grandes presas llena época de sequía.

MATRIZ	IMPACTO SOBRE FLORA TERRESTRE								IMPACTO SOBRE LA FAUNA TERRESTRE Y ACUÁTICA							
	LEGIOS Y ERIALES	FORMACIONES HERBACEAS	FLORA ACUÁTICA	VEGETALES SUPERIORES	MAMIFEROS	PAJAROS	INSECTOS	REPTILES Y ANFIBIOS	PESCA EXPLOTABLE	MACRONINVERTEBRADOS	ZOOPLANCTON	MICROORGANISMOS				
A Clase / Impacto: Clasifica el impacto B énéfico (B) P erjudicial (D), D ifícil de cuantificar (X) Certidumbre: Califica la probabilidad de ocurrencia del impacto: C ierto (C); P robable (P); I mprobable (I); D esconocido (N) Grado/Importancia: M enor(1); M edio (2); M ayor (3) Duración: Duración del impacto T emporal (T); P ermanente (P) Plazo: Indica la reversabilidad I mediato (I); M edio Plazo (M); L argo plazo (L) Acción: S i (Y); N o (N)	REGADÍO															
	ABASTECIMIENTO	DP1TM														
	CONTROL DE AVENIDAS															
	UTILIZACIÓN INDUSTRIAL															
	NAVEGACIÓN								DC1TM							
	LUCHA CONTRA INCENDIOS															
	PESCA								DC1TL							
	USOS RECREATIVOS															
	PRESENCIA DE LA PRESA	XC1TM	DC2TL							XP1TM	XP1TM	XP1TL	XP1TL			
	EMBALSE		DC2TL													
DERIVACIÓN DE AGUA																
OBRAS																
DEFORESTACIÓN																
EXCLUSAS																
CANALES Y TUBERÍAS																
DESCARGA DE AGUA																
TOMAS DE AGUA																
LADERAS Y CUENCAS																
ZONAS DE OSCILACIÓN (B. ÁRIDA)	DC1TM	DC1TL	XC1TL						XP1TM	XP1TM						
CURSOS DE AGUAS ARRIBA		DC2TL							XP1TM	XP1TM						
CURSOS DE AGUAS ABAJO	XP1TM		XC1TL	DC2TL					XP1TM		XP1TL	XP1TL				
CANALES DE REGADÍOS			DC2TL													
AGUAS SUBTERRÁNEAS																
ORDENACIÓN FISICICOLA																
CAUDAL GARANTIZADO									Y	Y						
ORDENACIÓN TURÍSTICA																
REGULACIÓN DEL EMBALSE	Y	Y		Y					Y	Y						
INFRAESTRUCTURA				Y												
REFORESTACIÓN																
LUCHA CONTRA LA EROSIÓN									Y	Y						
DRAGADO		Y														
DESCARGAS DE AGUA																
EMBALSE DE RETENCIÓN																
EMBALSE DE COMPENSACIÓN																
BARRERA CONTRA FLOTANTE																
PERIMETRO DE PROTECCIÓN																
TRATAMIENTO DEL AGUA																
INDUSTRIAS CORRECTIVAS																
REASENTAMIENTO	Y	Y	Y	Y												
DESASOLVE																
IMPLEMENTACIÓN DE INSTRUMENTAL DE CHEQUEO																
ESTABILIZACIÓN DE TALUDES																
MONITOREO SISMICO				Y												
REGULACIÓN DE EXPLOTACIÓN DE ACUÍFERO																

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

1. El análisis de la Presa Cerro Prieto en estado de sequía extrema durante los años 2021 a 2024, permitió identificar la evolución de la hidrodinámica del acuífero, zonas de filtraciones y humedales, deformación de la cortina y el impacto ambiental que causa este fenómeno en el área de estudio y sus efectos en el abastecimiento de agua hacia el Área Metropolitana de Monterrey, cumpliendo los objetivos propuestos en esta investigación.
2. El área de estudio se encuentra localizada sobre dos formaciones geológicas (San Felipe y Méndez), las cuales se encuentran influenciadas por elementos tectónicos (fracturamiento alto perpendicular al eje de la cortina y fracturamiento secundario paralelo a la cortina) esta dirección perpendicular permite los caminos de filtraciones en la cortina; la cortina está ubicada sobre la Formación San Felipe, la cual presenta una alta permeabilidad por la secuencia de calizas, margas lutitas y areniscas, lo cual favorece las filtraciones en esta zona de la presa y esta alta permeabilidad es evidenciada en las cartas piezométricas elaboradas.
3. Debido a la sequía y las bajas precipitaciones, los volúmenes de la presa desde enero 2021 descendieron hasta su punto más crítico en julio 2022 llegando a un nulo almacenamiento y abastecimiento de agua para el AMM. Durante el período de la presente investigación (2023-2024) el nivel más alto de la presa fue del 19 % en enero del 2023, hasta junio 2024 cuando la tormenta tropical “Alberto” llenó la presa, estos bajos niveles han repercutido en el abastecimiento con extracciones menores a 2000 l/s desde septiembre de 2023 hasta junio 2024 evidenciando la sequía extrema y la crisis hídrica por la cual atravesaba el estado de Nuevo León, sin tener ningún tipo de conocimiento del estado actual de las presas o plan de emergencia. Después de la tormenta “Alberto” la presa Libertad provocó un problema en el acueducto de Cerro Prieto, lo cual provocó un nulo suministro hacia el Área Metropolitana de Monterrey durante dos meses, este es un factor que debe ser considerado para futuras precipitaciones.
4. Los datos recopilados en cuatro campañas de medición (tres en época de sequía y una en extraordinaria) reflejan a través de sus niveles freáticos la influencia que tiene el volumen de la presa en sus niveles, especialmente en los pozos de aprovechamiento aguas abajo de la cortina, donde sus niveles

freáticos en sequía varían desde 0.38 m hasta 2.96 m con un 11 % y 17 % de volumen de llenado de la presa, mientras que en época extraordinaria estos ascensos son mayores. En las cartas piezométricas la dirección de flujo es suroeste (SW) a noreste (NE) y una dirección secundaria hacia el sureste (SE); este acuífero se considera dinámico y permeable, en sequía los valores piezométricos variaron desde 295 msnm hasta 255 msnm mientras que en niveles extraordinarios la piezometría cambia a 296 msnm a 259 msnm.

5. Un aspecto fundamental en relación con el volumen de la presa es la identificación de zonas de humedales y filtraciones. Desde 1993, De León-Gómez registró y midió con molinete hidráulico filtraciones superficiales en distintos puntos clave, como el pie de la cortina, los diques 1 y 2, y el vertedor de descarga, donde se reportó un valor de 800 l/s en ese año. Estas filtraciones se concentraban principalmente en la cimentación de la cortina, extendiéndose hasta una distancia aproximada de 7 km aguas abajo y superaban el límite permisible del 5 % de filtraciones en la presa, alcanzando aproximadamente el 16 % de filtraciones actuales para, en futuras investigaciones, proponer estrategias de recaptación, así como tener un registro histórico de evolución de filtraciones.
6. En el presente estudio, mediante visitas de campo y análisis de imágenes satelitales, se elaboraron cartas de evolución que reflejan la relación directamente proporcional entre el volumen de la presa y la extensión de las zonas de humedales y filtraciones en el periodo 2021-2024. Además, a partir de la fórmula de King, se calcularon filtraciones teóricas en los vertedores V – 1 y V – 3. En el caso del V – 1, durante la sequía, cuando la presa alcanzaba solo el 13 % de su capacidad, el gasto de filtración fue de 7.9 l/s, y el piezómetro más cercano se encontraba completamente inundado, lo que evidencia que las filtraciones persisten incluso en condiciones de bajo almacenamiento. Por su parte, en el V – 3, el flujo durante la sequía fue de 0.232 l/s, pero tras el paso de la tormenta “Alberto” y el llenado acelerado de la presa, aumentó a 19.39 l/s, lo que representa una pérdida de 1,675,296 litros por día solo en este vertedor.
7. La deformación de la cortina de la presa, es evidente a simple vista, se realizaron mediciones con gravímetro y georadar para identificar las potenciales zonas con anomalías en la cortina. Los datos gravimétricos en la zona indican que el alto gradiente gravimétrico está localizado en la parte de altura máxima de la cortina, la cual coincide con las zonas de mayores filtraciones y zonas de humedales. Por otro lado, los datos de georadar

evidencian una cortina con múltiples anomalías, la gran parte de estas anomalías son asentamientos diferenciales a lo largo de la cortina que se relacionan con fallas en un núcleo 100% compactado de material arcilloso, coincidiendo con los datos gravimétricos y las zonas de mayores filtraciones; es importante atender estas zonas vulnerables debido a que antecedentes evidencian un mayor aumento de asentamientos y desplazamientos horizontales después de un llenado rápido.

8. En el contexto de sequía, la evaluación de impacto ambiental es una herramienta esencial, para identificar las causas y efectos que esta tuvo sobre múltiples componentes del entorno, la matriz de grandes presas propuesta por la ICOLD en 1989, esta permitió identificar impactos directos en usos del agua, infraestructura, ecosistemas terrestres y acuáticos, así como el medio socio-económico; siendo los factores más afectados el abastecimiento de agua al Área Metropolitana de Monterrey, regadíos, pesca y usos recreativos; en el caso de control de avenidas la presa cumplió con su función, aunque fue necesario realizar diversos desfogues a causa de problemas externos en el acueducto los cuales no habían sido identificados como potenciales riesgos. Las acciones correctivas que se pudieron haber realizado en sequía y que son de vital importancia son, desazolve para una mayor capacidad de la presa, caudal garantizado hacia el Área Metropolitana de Monterrey, embalse de retención y recaptación para las filtraciones localizadas, estabilidad de taludes e instalación de instrumental de chequeo (piezómetros, inclinómetro y extensómetro), regulación en la explotación del acuífero, así como una mejor regulación del embalse y ordenación turística.
9. Concluyendo así, que es de vital importancia realizar acciones preventivas y correctivas en la presa durante época de sequía debido a la facilidad de trabajar en su remediación en estos periodos, con el de implementar acciones que mejoren la gestión del agua en época ordinaria y extraordinaria, contribuyendo a preservar y asegurara el abastecimiento de agua potable para el Área Metropolitana de Monterrey, la seguridad hídrica y la seguridad hidráulica a colapso de la Presa Cerro Prieto y principalmente la conservación y protección del medio ambiente.

Recomendaciones

1. Realizar una base de datos con información periódica sobre los niveles en los piezómetros y vertedores de la presa, utilizando mediciones directas en los caudales de filtraciones con el uso de flujómetros, para tener un calcula más preciso de las pérdidas diarias de la presa.
2. Elaborar un balance hídrico, que considere el estado actual de la presa, el aumento de las filtraciones, el cambio climático que genera más evaporaciones y el aumento en la demanda de agua del AMM.
3. Se sugiere realizar nuevas mediciones de filtraciones en los mismos puntos analizados por de León-Gómez en 1993, incluyendo el pie de la cortina, los diques 1 y 2, así como los vertedores de descarga. Esto permitirá evaluar la evolución de las filtraciones a lo largo del tiempo y determinar su impacto actual en la pérdida de aguade la presa. Además, contar con estos datos actualizados facilitará el desarrollo de estrategias más precisas de receptación, contribuyendo a una gestión más eficiente del recurso hídrico y a la reducción de pérdidas por filtración.
4. Evaluar la factibilidad de diversos tipos de remediación o recaptación de filtraciones (inyecciones a los cimientos, impermeabilización o pozos de recaptación aguas abajo), especialmente en el V – 1 y V - 3; en el caso del V – 3, a presa llena las filtraciones ascienden a 1000 litros por día.
5. Se recomienda reactivar las instrumentaciones de la presa, inclinómetros, testigos, piezómetros; para calcular la estabilidad actual de la cortina.
6. Obtener y realizar más estudios geofísicos (georadar, gravimetría, tomografía eléctrica, SEV, concentración de radón), en la cortina y los diques para conocer su actual morfología interna.
7. Realizar un plan de manejo ambiental para situaciones de sequía extrema y conservación del medio ambiente en el área de Cerro Prieto.

Bibliografía consultada

1. Aguilar Barajas, I., Ramírez Orozco, A. I., & Sisto, N. (2021). *Agua para Monterrey. Logros, retos y oportunidades para Nuevo León y México*. (2nd ed.). Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. https://web.sadm.gob.mx/SADM/archivos/uploaded_files/Libro_Enfrentando_e_l_reto_del_agua_en_Nuevo_Leon.pdf
2. Aveldaño, E. (2024). Frena a Cerro Prieto fuga de la Libertad. *El Norte*. <https://busquedas.gruporeforma.com/buscar/elnorte/documentos/VisorArticulos.aspx?idComptto=6&slIdIdentificadorParm=6s8461194d&idproducto=2&id=2502268&tipoElemento=/impresa/&text=presa+cerro+prieto&imgUrl=https://hemerotecalibre.elnorte.com/20240630/interactiva/NPRI20240630-001.JPG>
3. Banco de México. (2022a). *Sequía en México y su Potencial Impacto en la Actividad Económica*. Banco de México.
4. Banco de México. (2022b). *Sequía en México y su Potencial Impacto en la Actividad Económica*. <https://www.banxico.org.mx/publicaciones-y-prensa/informes-trimestrales/recuadros/%7B3A0127A1-D0C9-7D61-C9AE-E57E127FB39B%7D.pdf>
5. Bravo-Lujano, C. (2024). *Océano Atlántico, tormenta tropical Alberto del 17 al 20 de junio 2024*. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Ciclones/2024-Alberto.pdf>
6. Breña Naranjo, A. (2021). Seguridad Hídrica en tiempos de sequía. *Perspectivas IMTA*, 14. <https://www.imta.gob.mx/gobmx/DOI/perspectivas/2021/b-imta-perspectivas-2021-14.pdf>
7. Cardiel, A. (2024). Alberto rompe récord al registrar 646.50 mm de lluvia en tan sólo 3 días en NL. *ABC Noticias*. <https://abcnoticias.mx/local/2024/6/23/alberto-rompe-record-al-registrar-64650-mm-de-lluvia-en-tan-solo-dias-en-nl-219450.html>
8. Clariond Reyes, E., Garza, A., Ramírez Orozco, A. I., Molina Pérez, E., Lugo Contreras, C. D., Guerra Cobián, V. H., Cantú Ayala, C., Groves, D., & Popper, S. (2016). *Plan Hídrico Nuevo León 2050*. <https://famm.mx/wp-content/uploads/2018/10/Plan-H%C3%ADdrico-NL-2050.pdf>
9. CONAGUA. (2019). *Estadísticas del Agua en México 2019*. Comisión Nacional del Agua. https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM_2019.pdf
10. CONAGUA. (2021). *Estadísticas del Agua en México 2021*.

11. CONAGUA. (2022a). *Monitor de Sequía de México*. Medio Ambiente. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Sequ%C3%ADa/Monitor%20de%20sequ%C3%ADa%20en%20M%C3%A9xico/Seguimiento%20de%20Sequ%C3%ADa/MSM20220731.pdf>
12. CONAGUA. (2022b). *Numeragua 2022*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
13. CONAGUA. (2023a). *Estadísticas del Agua en México 2023*.
14. CONAGUA. (2023b). *Monitor de sequía de México, segunda quincena de septiembre*.
15. CONAGUA. (2024). *Monitor de sequía 15 de marzo 2024*.
16. CONAGUA, & Servicio Meteorológico Nacional. (2024). *Monitor de sequía. Segunda quincena de agosto 2024*. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Sequ%C3%ADa/Monitor%20de%20sequ%C3%ADa%20en%20M%C3%A9xico/Seguimiento%20de%20Sequ%C3%ADa/MSM20240831.pdf>
17. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. (2018). *Reporte Anual del Clima en México 2017*. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/Anual2017.pdf>
18. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. (2019). *Reporte Anual del Clima en México 2018*. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/Anual2018.pdf>
19. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. (2020). *Reporte Anual del Clima en México 2019*. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/Anual2019.pdf>
20. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. (2021). *Reporte Anual del Clima en México 2020*. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/Anual2020.pdf>
21. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. (2022). *Reporte Anual del Clima en México 2021*. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/Anual2021.pdf>

22. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. (2023). *Reporte Anual del Clima en México 2022*. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/Anual2022.pdf>
23. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. (2024a). *Reporte Anual del Clima en México 2023*. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/Anual2023.pdf>
24. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. (2024b). *Reporte del Clima en México, diciembre 2024*. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/RC-Diciembre24.pdf>
25. Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrología Subterránea: Vol. II (2°)*. Omega.
26. Dassargues, A. (2019). *Hydrogeology groundwater science and engineering (1° Ed)*. Taylor & Francis Group.
27. Dávila Pórcel, R. A. (2011). *Desarrollo Sostenible de usos de suelo en ciudades en crecimiento, aplicando hidrogeología urbana como parámetro de planificación territorial: Caso de estudio Linares, N.L., México*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
28. Dávila Pórcel, R. A., & De León Gómez, H. (2011). Importancia de la hidrogeología urbana; ciencia clave para el desarrollo urbano sostenible. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 63(3), 463–477.
29. Dávila-Pórcel, R. A., & De León-Gómez, H. (2013). Groundwater Origin and Its Hydrogeochemistry through GIS Maps in Linares Region, Mexico. *Journal of Water Resource and Protection*, 05(08), 1–12. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2013.58A001>
30. Dávila Pórcel, R. A., De León Gómez, H., & Schüth, C. (2012). Urban impacts analysis on hydrochemical and hydrogeological evolution of groundwater in shallow aquifer Linares, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 66(7), 1871–1880. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1411-3>
31. Dávila Pórcel, R. A., Schüth, C., De León-Gómez, H., Hoppe, A., & Lehné, R. (2014). Land-Use Impact and Nitrate Analysis to Validate DRASTIC Vulnerability Maps Using a GIS Platform of Pablillo River Basin, Linares, N.L., Mexico. *International Journal of Geosciences*, 05(12), 1468–1489. <https://doi.org/10.4236/ijg.2014.512120>

32. De León Gómez, H. (1993, July). Die Unterläufigkeit der Talsperre José López Portillo-Cerro Prieto auf einer Kalkstein-Mergelstein-Wechselfolge bei Linares, Nuevo León-Mexiko. *53*, 1–181.
33. De León-Gómez, H., Cruz-Vega, C. R., Dávila-Pórcel, R. A., Velasco-Tapia, F., & Chapa-Guerrero, J. R. (2015). Impacto del lixiviado generado en el relleno sanitario municipal de Linares (Nuevo León) sobre la calidad de agua superficial y subterránea. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, *32*(3), 514–526.
34. De León-Gómez, H., Martín del Campo-Delgado, M. A., Esteller-Alberich, M. V., Velasco-Tapia, F., Alva-Niño, E., & Cruz-López, A. (2020). Assessment of nitrate and heavy metal contamination of groundwater using the heavy metal pollution index: case study of Linares, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, *79*(18), 433. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09164-3>
35. De León Gómez, H., Medina Barrera, F., & Lizárraga Mendiola, L. G. (2006). Elaboración de la matriz de geoindicadores ambientales en la presa José López Portillo (Cerro Prieto), fuente superficial de abastecimiento de agua potable de Monterrey, N.L., México. *Ciencia UANL*, *IX* (1), 65–72.
36. De León Gómez, H., & Schetelig, K. (1996). Fracturamiento hidráulico en presas. *Zentralblatt Für Geologie Und Paläontologie.*, 1037–1043.
37. De León Gómez, H., Schetelig, K., & Meiburg, P. (1994). Abastecimiento de agua potable en el noreste de México. Ejemplo: Presa Cerro Prieto. *Zentralblatt Für Geologie Und Paläontologie. Teil I.*, 593–602.
38. De León Gómez, H., Schetelig, K., Werner, J., Azzam, R., Masuch-Osterreich, D., Medina-Barrera, F., Rangel-Rodríguez, F., Navarro-De León, I., & Salinas-Ramírez, J. (1998). Proyecto: Límites del abastecimiento de agua potable en el Noreste de México, objetivos y metas; (SIREYES/95/053). *Zentralblatt Für Geologie Und Paläontologie. Teil I.*, 511–518.
39. Diario Oficial de la Federación. (2022, July 29). *DECRETO por el que se establece el plan de acción inmediata para atender la emergencia por el desabasto de agua potable para uso público urbano y doméstico en los municipios afectados por baja disponibilidad en sus fuentes de abastecimiento y por sequía en el estado de Nuevo León.* https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5659827&fecha=29/07/2022&print=true2/3
40. Eslamian, S., & Eslamian, F. (2017). *Handbook of Drought and Water Scarcity Principles of Drought and Water Scarcity*. Taylor & Francis Group.
41. Estrada Solís, A. P., & Perales Martínez, B. J. (2010). *Batimetría estratigrafía y sísmica y estructura del fondo de la presa Cerro Prieto a través del método de acústica no lineal*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
42. European Space Agency (ESA). (2024). *Copernicus Open Access Hub* [Plataforma de datos satelitales]. <https://scihub.copernicus.eu>

43. FAO. (2023). *Base de Datos Principal AQUASTAT*. Organización de Las Naciones Unidas Para La Alimentación y La Agricultura (FAO). <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=es>
44. Flores, J. (2019). *Estudio de la estructura somera en el municipio de Cerro de San Pedro por medio del uso de métodos geofísicos* [IPICYT]. https://ipicyt.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1010/2218/1/TMIPICYT_F6E72019.pdf
45. Flores, L. (2022, September 11). *La Presa Cerro Prieto vuelve a extraer desde hoy 1,200 litros por segundo: Samuel García*. <https://www.economista.com.mx/estados/-La-Presa-Cerro-Prieto-vuelve-a-extraer-desde-hoy-1200-litros-por-segundo-Samuel-Garcia-20220911-0004.html>
46. Gao, B. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
47. Garmendia-Salvador, A., Salvador-Alcaide, A., Crespo-Sánchez, C., & Garmendia-Salvador, L. (2005). *Evaluación de Impacto Ambiental*. Pearson Educación, S.A. de C.V.
48. Gaytán, S. (2023, June 18). Linares es el municipio más caluroso de NL: CONAGUA. *ABC Noticias*.
49. Gobierno del Estado de Nuevo León. (2015). *Nuevo León Mañana Plan Estratégico para el Estado de Nuevo Plan Estratégico para el Estado de Nuevo León*.
50. Google LLC. (2024). *Google Earth* (versión 2024) [Software]. <https://www.google.com/earth/>
51. González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación.
52. Grotzinger, J., Jordan, T., Press, F., & Siever, R. (2014). *Understanding Earth* (7.^a).
53. Gutenberg, B. (1937). GEOPHYSICS AS A SCIENCE. *GEOPHYSICS*, 2(3), 185–187. <https://doi.org/10.1190/1.1438082>
54. He, C., Harden, C. P., & Liu, Y. (2020). Comparison of water resources management between China and the United States. *Geography and Sustainability*, 1(2), 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2020.04.002>
55. Hernández, D. (2024). Las 6 presas que la ola de calor ha secado totalmente en México. *La Silla Rota*. <https://lasillarota.com/estados/2024/4/28/las-presas-que-la-ola-de-calor-ha-secado-totalmente-en-mexico-479328.html>
56. Hiscock, K., & Bense, V. (2014). *Hydrogeology Principles and Practice* (2° Ed). John Wiley & Sons.

57. Huerta, L. (2024). Consecuencias de la sequía en México. *Global Revista UNAM*. https://unamglobal.unam.mx/global_revista/consecuencias-de-la-sequia-en-mexico/
58. ICOLD. (2015). *Hoover Dam*. <https://www.usbr.gov/lc/hooverdam/history/essays/biggest.html>
59. ICOLD CIGB. (2007). *Las presas y el agua en el mundo*. ICOLD. https://www.spancold.org/wp-content/uploads/2018/01/Las_presas_y_el_agua_en_el_mundo.pdf
60. ICOLD / CIGB. (2011). Constitution Status. In *ICOLD* (pp. 15–15).
61. ICOLD CIGB. (2015). *World's Highest Dams*. ICOLD World Register of Dams. https://www.icold-cigb.org/article/GB/world_register/general_synthesis/worlds-highest-dams
62. ICOLD CIGB. (2023). *Database Presentation*. ICOLD. https://www.icold-cigb.org/GB/world_register/database_presentation.asp
63. ICOLD CIGB. (2024). *Role of Dams*. ICOLD. https://www.icold-cigb.org/GB/dams/role_of_dams.asp
64. IMCO. (2023). *Aguas en México, ¿Escasez o mala gestión?*. Instituto Mexicano de la Competitividad (IMCO). <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2023/07/Aguas-en-Mexico-%C2%BFEscasez-o-mala-gestion-IMCO.pdf>
65. INEGI. (1986). *Síntesis Geográfica del Estado de Nuevo León*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825220747/702825220747_1.pdf
66. INEGI. (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010 Linares, Nuevo León*. INEGI.
67. INEGI. (2021). *Panorama Sociodemográfico de Nuevo León. Censo de Población y vivienda 2020*. <http://www.inegi.org.mx>
68. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability* (H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, & B. Rama, Eds.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
69. Izaguirre Valdez, F. M. (2008). *Estudio hidrogeofísico de la pesa José López Portillo (Cerro Prieto), Noreste de México*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
70. Johnson, N., Revenga, C., & Echeverria, J. (2001). Managing Water for People and Nature. *Science*, 292(5519), 1071–1072. <https://doi.org/10.1126/science.1058821>

71. Leal, J. (1977). *Guías para la Evaluación del Impacto Ambiental de Proyectos de Desarrollo Local*.
<https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/b083caa8-6ce2-416a-93cc-d53a5f8fc940/content>
72. Lee, H. (2013). *Global risks 2013*. World Economic Forum.
73. Lizárraga-Mendiola, L., De León-Gómez, H., Medina-Barrera, F., & Návar, J. (2005). Evaluation of the aquifer impacted by the landfill of Linares, Mexico. *Neues Jahrbuch Für Geologie Und Paläontologie - Abhandlungen*, 236(1–2), 225–244. <https://doi.org/10.1127/njgpa/236/2005/225>
74. Lizárraga Mendiola, L., De León Gómez, H., Medina Barrera, F., & Návar, J. (2006). Calidad del agua subterránea en Linares, Nuevo León, México. *Ciencia UANL*, IX (4), 426–430.
75. Lizárraga Mendiola, L. G. (2003). *Análisis y evaluación del agua subterránea del área del tiradero municipal y la petaca, Linares, N.L., México*. Universidad Autónoma de nuevo León.
76. Lizárraga-Mendiola, L., Návar, J., Blanco-Piñón, A., González-Sandoval, Ma. D. R., & De-León-Gómez, H. (2013). Natural and Anthropogenic Influence in Water Quality: The Case of Linares City, NE Mexico. *Journal of Water Resource and Protection*, 05(11), 1066–1075. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2013.511112>
77. López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Begueria, S., Garcia-Ruiz, J. M., Portela, M. M., & Almeida, A. B. (2009). Dam effects on droughts magnitude and duration in a transboundary basin: The lower river tagus, pain and Portugal. *Water Resources Research*, 45(2). <https://doi.org/10.1029/2008WR007198>
78. López, S. (2023). *Escasez de agua y sequía en México: Crisis Actual*. IMCO. <https://imco.org.mx/escasez-de-agua-y-sequia-en-mexico-crisis-actual/>
79. Macías B. (2024). *¿Cuánto de agua le queda a la Tierra?* Proyecto Aguas. https://proyectoaguas.es/cuanto-de-agua-le-queda-a-la-tierra/?expand_article=1
80. Martínez Muñoz, A., González Valdez, M., Herrera González, M., Acosta Fregoso, D., Rojas Veloquio, F., Villareal Rodríguez, H., Flores Serna, M., Ramírez Orozco, A., Esparza Hernández, J., Cuilty Siller, A., Herrera Lozano, L., Ayala Delgado, C., Salas Limón, D., Olivo Guzmán, J., Treviño Puente, D., Ortégón Williamson, E., Cuéllar Mijares, E., Maldonado Pérez, E., Camarena Robles, F., ... Barragan Villareal, J. (2023). *Enfrentando el reto del Agua en Nuevo León 2021-2023. Reflexiones sobre una crisis y respuestas institucionales* (J. Palacios Chapa & A. Contreras, Eds.). Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, I.P.D.
81. Martínez Solís, A. M. (2016). *Impacto de la Sequía en el acuífero del centro de producción agropecuaria (CPA)/UANL, Linares, N.L.* Universidad Autónoma de Nuevo León.

82. Martínez Vallejo, F. S. (2007). *Análisis de las Filtraciones Laterales de la Presa José López Portillo/Cerro Prieto; Linares, nuevo León, México*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
83. Michalzik, D. (1988). *Trias bis tiefste Unterkreide der nordöstlichsten Sierra Madre Oriental, Mexiko, Fazielle Entwicklung eines passiven Kontinentalrandes: Darmsatdt, Hesse, Alemania*. Universidad Técnica de Darmstadt.
84. Micheli, J. (2002). Política ambiental en México y su dimensión regional Derechos reservados. *Región y Sociedad*, 14(23), 129–170. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-39252002000100005&lng=es&tlng=es.
85. Mignes, A. (2013). *Los 10 embalses más grandes del mundo*. Iagua.
86. Mihelcic, J., & Zimmerman, J. (2012). *Ingeniería ambiental: fundamentos, sustentabilidad, diseño* (1st ed.). Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.
87. Miller, G. T., & Spoolman, S. E. (2010). *Environmental Sciences* (13.ª). Brooks/Cole Cengage Learning.
88. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (M.O.P.U.). (1989). *Guías Metodológicas para la elaboración de estudios de impacto ambiental. 2 grandes presas*. (S. González, J. Gamarra, A. Pinedo, & I. Salvador, Eds.). Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo - Dirección General de Medio Ambiente.
89. NASA. (2022, July 25). *Un embalse en México se seca*. <https://ciencia.nasa.gov/un-embalse-en-mexico-se-seca>
90. NASA. (2024). *La sequía deja sediento a México*. NASA Ciencia. <https://ciencia.nasa.gov/cambio-climatico/la-sequia-deja-sediento-a-mexico/>
91. National Oceanic and Atmospheric Administration, & National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center. (2024). *ALBERTO Graphics Archive: 3-day Forecast Track and Watch/Warning Graphic*. National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center. https://www.nhc.noaa.gov/archive/2024/ALBERTO_graphics.php
92. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2006). *Drought* (pp. 1–3). National Weather Service.
93. O'Brien, A. L., & Motts, W. S. (1980). HYDROGEOLOGIC EVALUATION OF WETLAND BASINS FOR LAND USE PLANNING ¹. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 16(5), 785–789. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1980.tb02488.x>
94. ONU. (2022, November 29). *Buena parte del planeta sufrió sequías más allá de lo normal en 2021*. <https://news.un.org/es/story/2022/11/1517182#:~:text=Buena%20parte%20del%20planeta%20sufri%C3%B3%20sequ%C3%ADas%20m%C3%A1s%20all%C3%A1%20de%20lo%20normal%20en%202021,->

- 29%20Noviembre%202022&text=Las%20sequ%C3%ADas%2C%20debidas%20al%20cambio,de%205000%20millones%20en%202050.
95. ONU. (2023). Informe de los Objetivos del Desarrollo Sostenible. In *Naciones Unidas*. https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf?_gl=1*y1nwmr*_ga*MTEwNDI0MDM3OS4xNzIxMjU0NjI3*_ga_TK9BQL5X7Z*MTcyMzEzMjc5Mi41LjEuMTcyMzEzMzk0NS4wLjAuMA.
 96. Ordoñez-Díaz, J. A. (2022). *La crisis hídrica en Monterrey, una alerta para otras zonas del país*. Programa Universitario de Estudios Sobre La Ciudad / UNAM. <https://www.puec.unam.mx/index.php/component/content/article/2183-la-crisis-hidrica-en-monterrey-una-alerta-para-otras-zonas-del-pais.html?catid=59&Itemid=101>
 97. Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Objetivos del Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
 98. Organización de las Naciones Unidas. (2024, January). *Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
 99. Ortega-Gaucin, D. (2012). *Sequía en Nuevo León. Vulnerabilidad, Impactos y estrategias de mitigación*. Instituto del Agua del Estado de Nuevo León.
 100. Padilla y Sánchez, R. J. (1982). *Geologic evolution of the Sierra Madre Oriental between Linares, Concepción del Oro, Saltillo and Monterrey, México*. University of Texas.
 101. Pal, S., & Saha, T. K. (2018). Identifying dam-induced wetland changes using an inundation frequency approach: The case of the Atreyee River basin of Indo-Bangladesh. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 18(1), 66–81. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2017.11.001>
 102. Pérez, I. (2021). *La sequía severa en México*. Ciencia UNAM. <https://ciencia.unam.mx/leer/1146/la-sequia-severa-en-mexico>
 103. Ramos, M. (2024). Irá al mar agua de Cerro Prieto. *El Norte*. <https://busquedas.gruporeforma.com/buscar/elnorte/documentos/VisorArticulos.aspx?idComptto=6&slIdIdentificadorParm=6s8473541d&idproducto=2&id=2507292&tipoElemento=/impresa/&text=presa+cerro+prieto&imgUrl=https://hemerotecalibre.elnorte.com/20240717/interactiva/NLOC20240717-001.JPG>
 104. Reyes, D., & Villasáez, J. (2024). “Alberto” deja a NL 2 años de agua. *El Norte*. <https://busquedas.gruporeforma.com/buscar/elnorte/documentos/VisorArticulos.aspx?idComptto=6&slIdIdentificadorParm=1s6749437d&idproducto=2&id=2832991&tipoElemento=/articulo/&text=presa+cerro+prieto&imgUrl=https://img.gruporeforma.com/imagenes/ElementoRelacionado/12/413/11412639.jpg>

105. Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. (2°). WILEY-BLACKWELL.
106. Rodell, M., Famiglietti, J. S., Wiese, D. N., Reager, J. T., Beaudoin, H. K., Landerer, F. W., & Lo, M. H. (2018). Emerging trends in global freshwater availability. *Nature*, 557(7707), 651–659. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0123-1>
107. Rodríguez Varela, J. M., Tzatchkov, V., Cortez Mejía, P. E., Sainos Candelario, A., Llaguno Guilberto, Ó. J., Ortega Gaucín, D., Mendoza Cázares, E. Y., & Navarro Barraza, S. (2017). *ÍNDICES DE SEGURIDAD HÍDRICA (ISH) CLAVE: HC1711.1 Informe final*. <http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1831/HC-1711.1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
108. Roja Rueda, A., & Tzatchkov, V. (2022). *Introducción a la seguridad hídrica*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. https://www.imta.gob.mx/gobmx/DOL/libros/2022/introduccion_seguridad_hidrica.pdf
109. Salas, C. (2022, August 14). *Historia de las peores sequías que han borrado del mapa civilización*. <https://www.lainformacion.com/economia-negocios-y-finanzas/historia-peores-sequias-borrado-mapa-civilizaciones-enteras/2872224/>
110. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2022). *Los humedales de México, belleza y riqueza de enorme importancia*. Gobierno de México. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/los-humedales-de-mexico-belleza-y-riqueza-de-enorme-importancia-145780>
111. Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos. (1990). *Dictamen de comportamiento observado en base a la instrumentación de la Presa Cerro Prieto en el periodo 1989 - 1990*.
112. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2022). *Guía para la elaboración de la Manifestación de Impacto Ambiental Regional*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/698811/Guia_MIA-Regional-enero-2022.pdf
113. Servicio Meteorológico Nacional. (2010). *Normales Climatológica por Estado*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=nl>
114. Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey. (1984). *Con Hechos, la Revolución Cumple su Promesa a Nuevo León. AGUA PARA MONTERRE: LA OBRA DEL SIGLO*. In *SADM*.

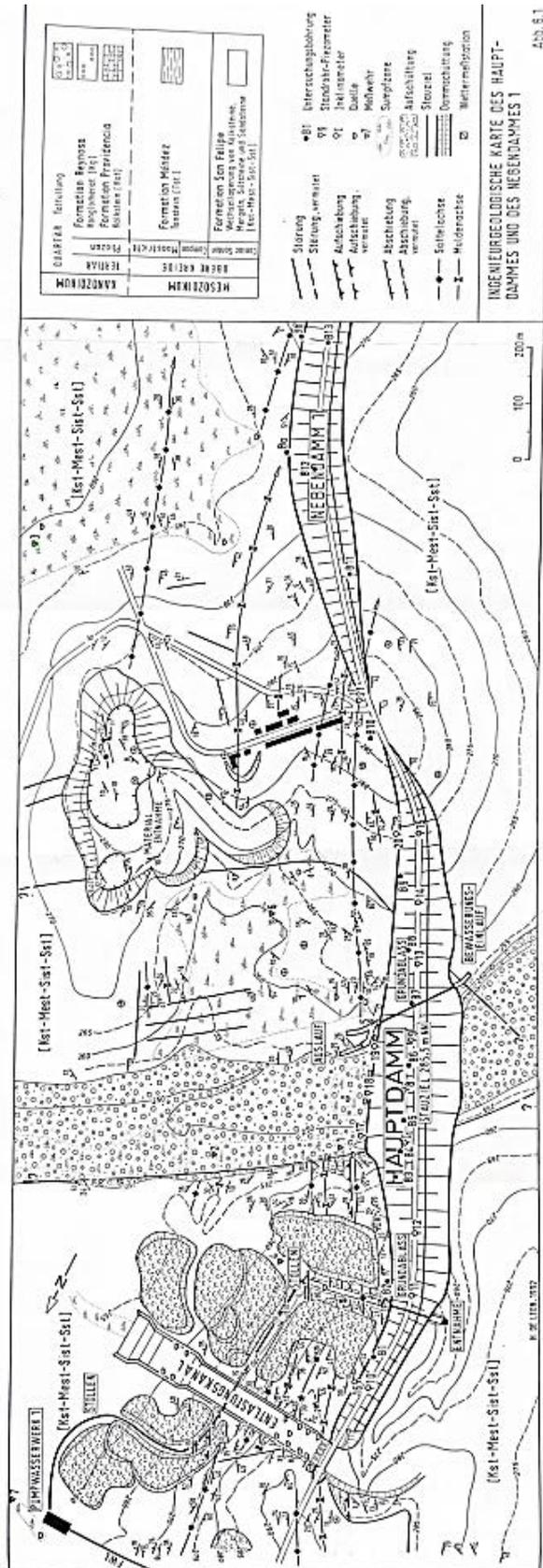
115. Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, I. P. D. /Dirección de O. (2024). *Infraestructura - Fuentes de Abastecimiento*. https://www.sadm.gob.mx/SADM/index.jsp?id_html=niveles
116. Shiklomanov, I. A., & Rodda, J. (2003). *World Water Resources at the beginning of the Twenty-First Century*. <https://catdir.loc.gov/catdir/samples/cam034/2002031201.pdf>
117. Sistema Nacional de Información del Agua. (2024). *Monitoreo de las Principales Presas de México*. CONAGUA. <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/Presas/>
118. Tarbuck, E. J., Lutgens, F., & Tasa, D. (2013). *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física* (M. Martín-Romo & M. Vázquez, Eds.; AMR Traducciones, Trans.; 10.^a). Pearson Educación S.A.
119. Tavera, M. (2008). *Aplicación del georadar para la mejora del rendimiento de una red hídrica* [Universidad Politécnica de Valencia]. https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12248/Tesina_Master_Mtavaera.pdf?sequence=1&isAllowed=y
120. TecScience, & Becerril, D. (2024). *La Organización Meteorológica Mundial espera una temporada de huracanes y tormentas 'muy activa.'* TecScience.
121. Toreti, A., Tsegai, D., Maurer, T., Cremonese, E., Rossi, L., Wens, M., de Moel, H., Sabino Siemons, A., Acosta-Navarro, J., Hrast-Essenfelder, A., Volpi, D., Cotti, D., Sparkes, E., & Hagenlocher, M. (2024). *World Drought Atlas*. Office of European Union & United Nations. <https://doi.org/10.2760/3842670>
122. Torres, E., & Santoscoy, M. A. (1985). *La Historia del Agua en Monterrey desde 1577 hasta 1985, Monterrey, N.L.* Ediciones Castillo.
123. U.S. Geological Survey. (2022, October 13). *El Ciclo del Agua*. Water Science School. <https://www.usgs.gov/media/images/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish-png>
124. Valdivielso, A. (2024). *¿Cuál es la presa más grande del mundo?* Iagua. <https://www.iagua.es/respuestas/cual-es-presa-mas-grande-mundo>
125. Valiente, O. (2001). Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones Geográficas*.
126. Villasáez, J. (2024a). Aporta Presa Cerro Prieto... a cuentagotas. *El Norte*. <https://busquedas.gruporeforma.com/buscar/elnorte/documentos/VisorArticulos.aspx?idComptto=6&slIdIdentificadorParm=1s6829111d&idproducto=2&id=2860861&tipoElemento=/articulo/&text=presa+cerro+prieto&imgUrl=https://img.gruporeforma.com/imagenes/ElementoRelacionado/12/505/11504681.jpg>
127. Villasáez, J. (2024b). Tiene Cerro Prieto cuarto desfogue en tres meses. *El Norte*. <https://busquedas.gruporeforma.com/buscar/elnorte/documentos/VisorArticulos.aspx?idComptto=6&slIdIdentificadorParm=1s6859217d&idproducto=2&id=28>

- 73894&tipoElemento=/articulo/&text=cerro+prieto&imgUrl=https://img.gruporef orma.com/imagenes/ElementoRelacionado/12/548/11547801.jpg
128. Villasáez, J. (2024c, April 8). Están las 3 presas en su peor nivel en 10 años. *EL NORTE*. <https://www.elnorte.com/estan-las-3-presas-en-su-peor-nivel-en-10-anos/ar2786306> Fecha de publicación: 08 abril 2024
129. Werner, J. (1996a). *Introducción a la Hidrogeología* (1° Ed). Universidad Autónoma de Nuevo León.
130. Werner, J. (1996b). *Introducción a la hidrogeología* (1°). Universidad Autónoma de Nuevo León.
131. World Meteorological Organization. (2024). *Drought*. World Meteorological Organization. <https://wmo.int/topics/drought>
132. World Water Assessment Programme. (2022). *AGUAS SUBTERRÁNEAS Hacer visible el recurso invisible Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022*. <http://www.unesco>.
133. World Water Assessment Programme. (2024). *Agua para la prosperidad y la paz Agua para la prosperidad y la paz Datos, cifras y planes de acción Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2024*. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388952_spa
134. Yutsis, V., Jenchen, U., De León-Gómez, H., Izaguirre Valdez, F., & Konstantin, K. (2009). Paleogeographic development of the surroundings of Cerro Prieto water reservoir, Pablillo basin, NE Mexico, and geophysical modeling of the reservoir subsurface. *Neues Jahrbuch Für Geologie Und Paläontologie - Abhandlungen*, 253(1), 41–59. <https://doi.org/10.1127/0077-7749/2009/0253-0041>
135. Yutsis, V., Krivosheya, K., Levchenko, O., Lowag, J., León Gómez, H. de, & Tamez Ponce, A. (2014). Bottom topography, recent sedimentation and water volume of the Cerro Prieto Dam, NE Mexico. *Geofísica Internacional*, 53(1), 27–38. [https://doi.org/10.1016/S0016-7169\(14\)71488-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7169(14)71488-6)

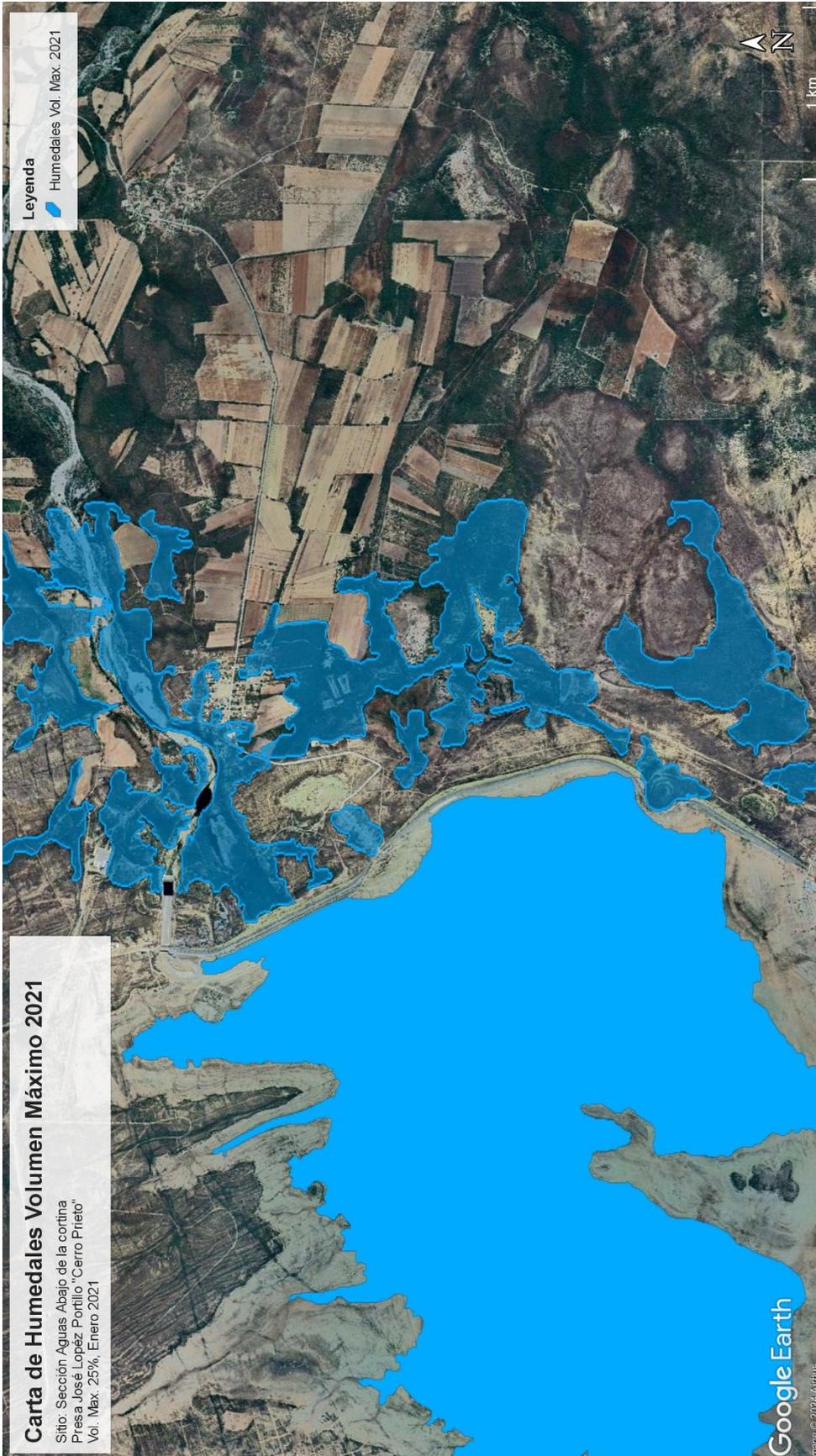


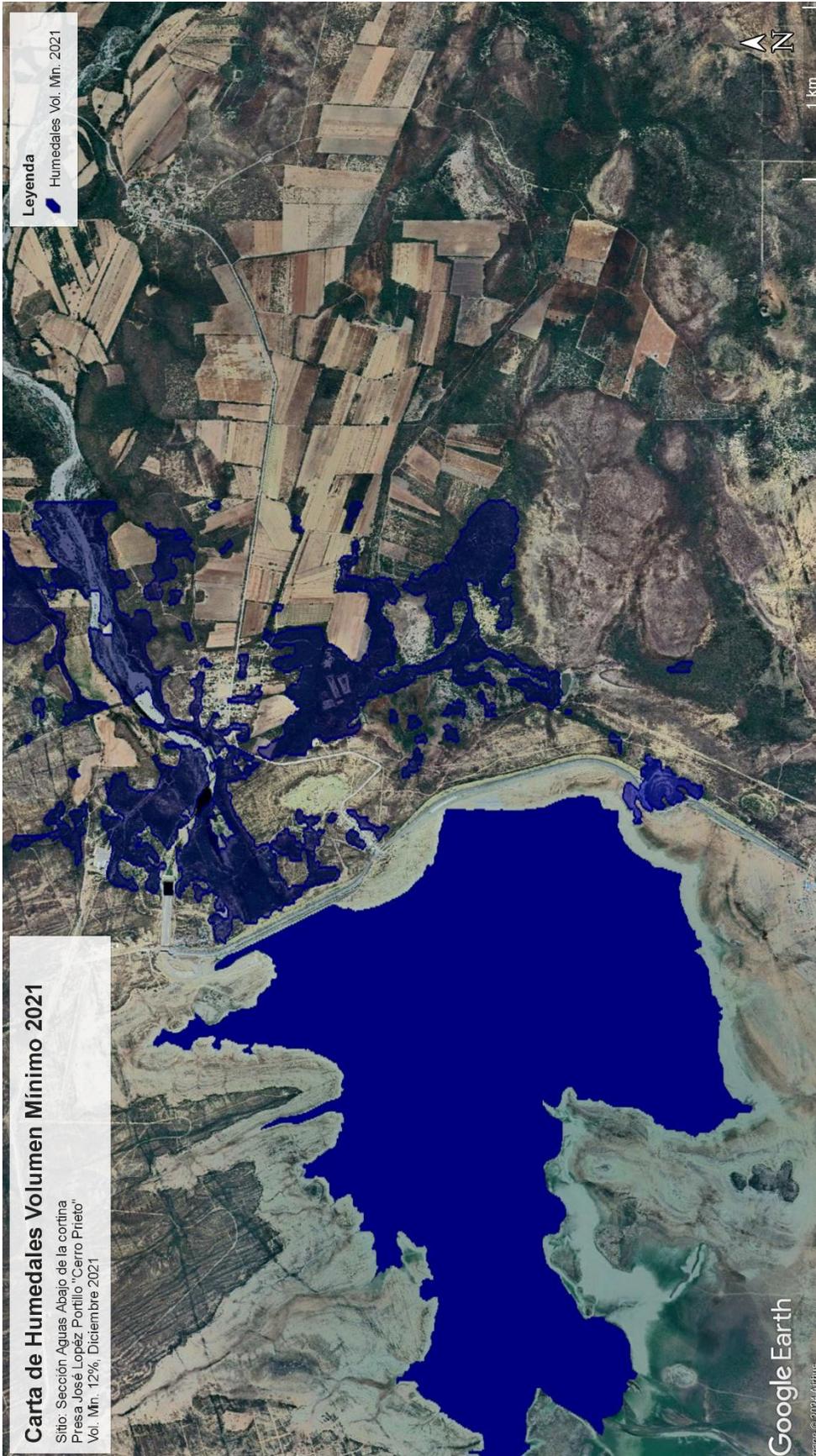
Anexos

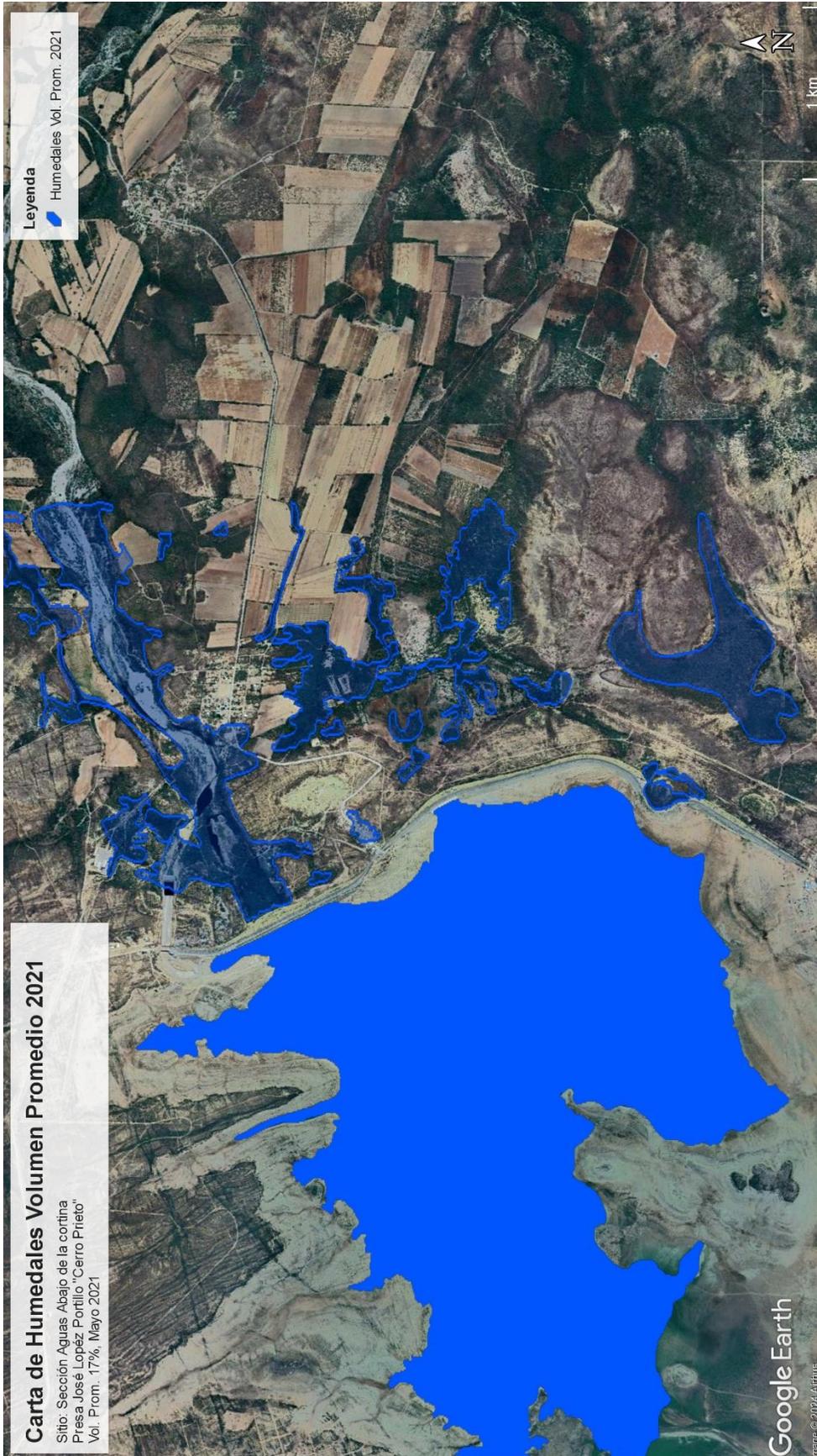
Anexo 1: Localización de vertedores en la Presa Cerro Prieto (de León, 1993).

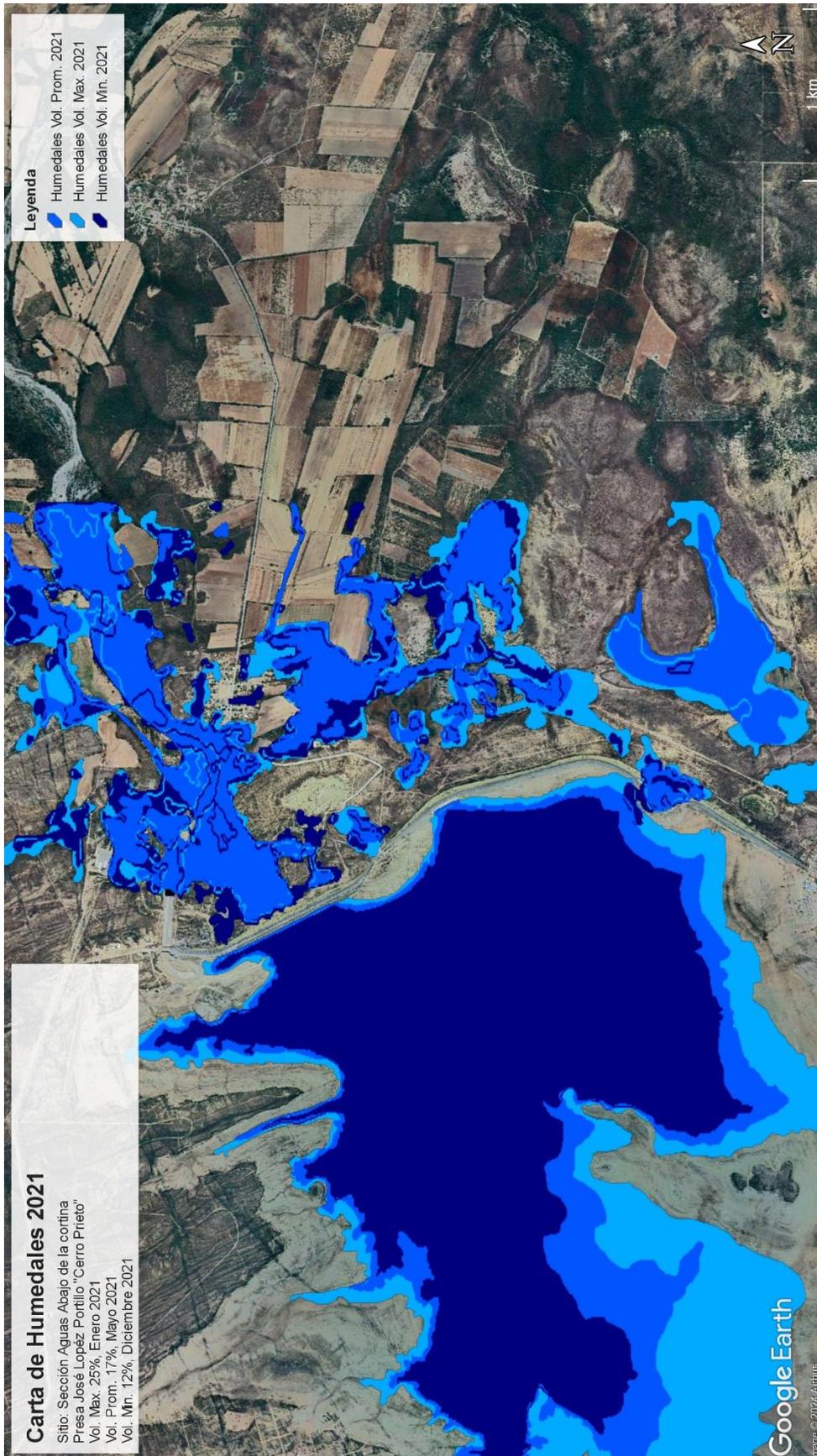


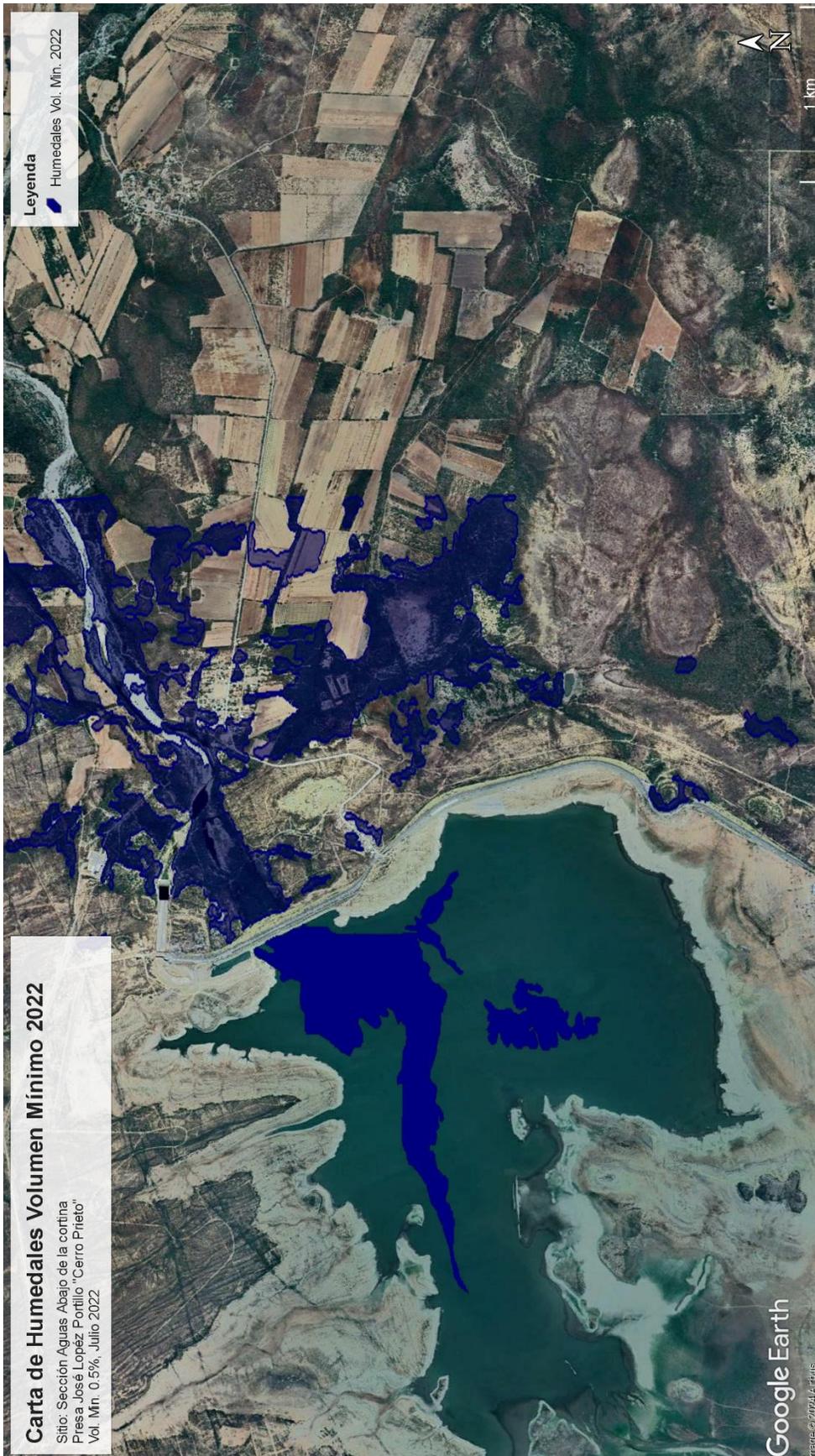
Anexo 2: Cartas a detalle de humedales

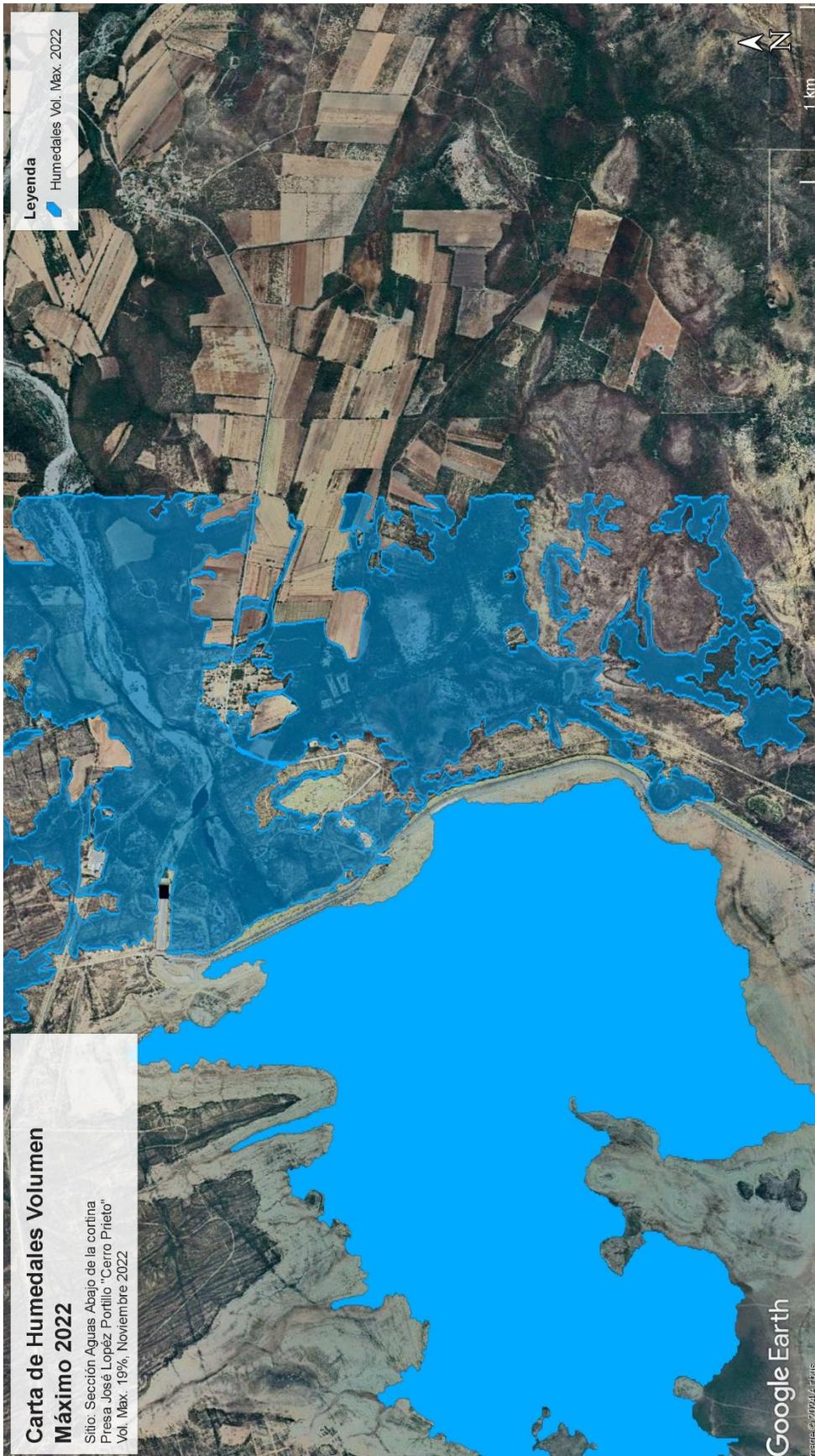


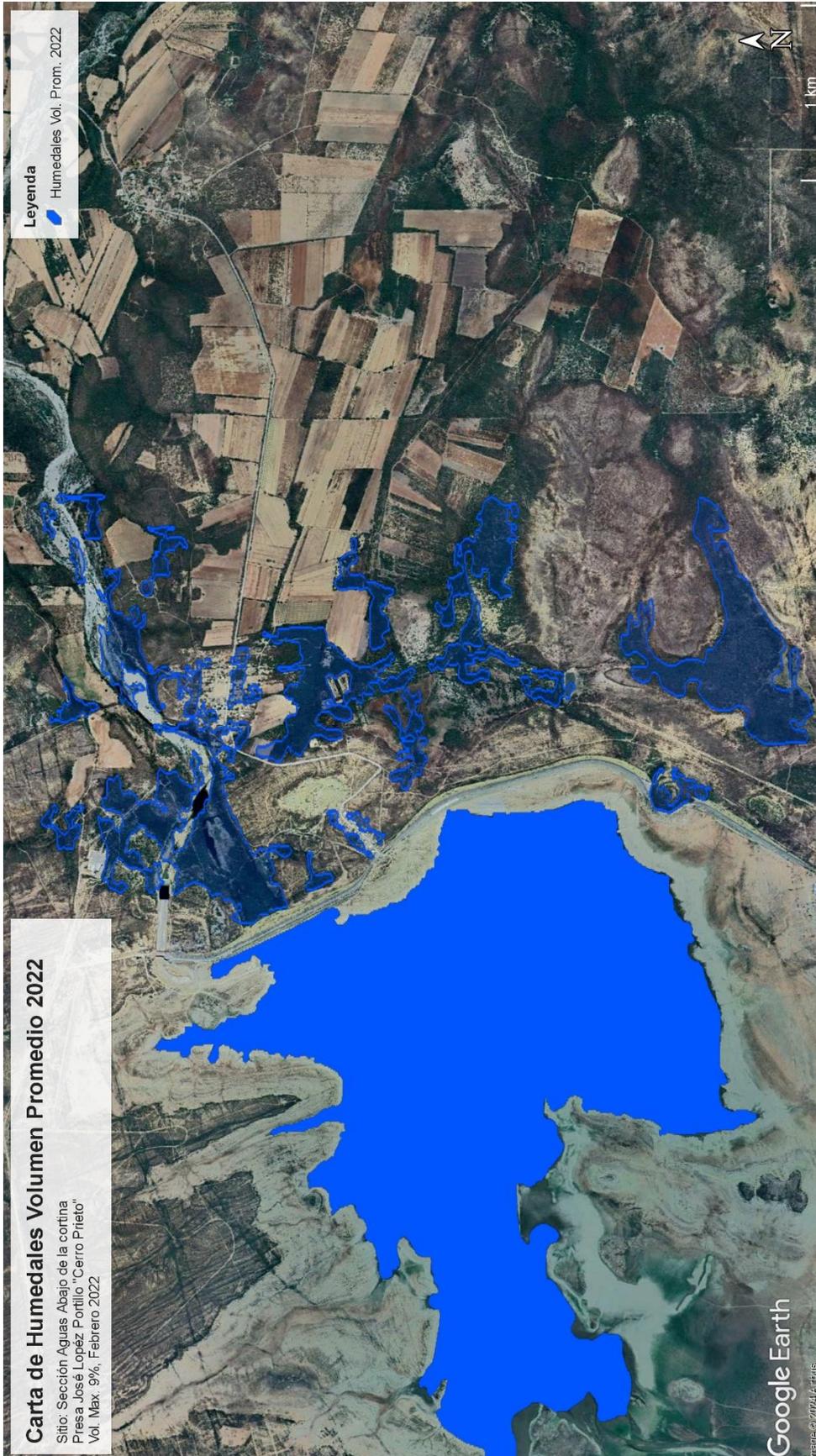


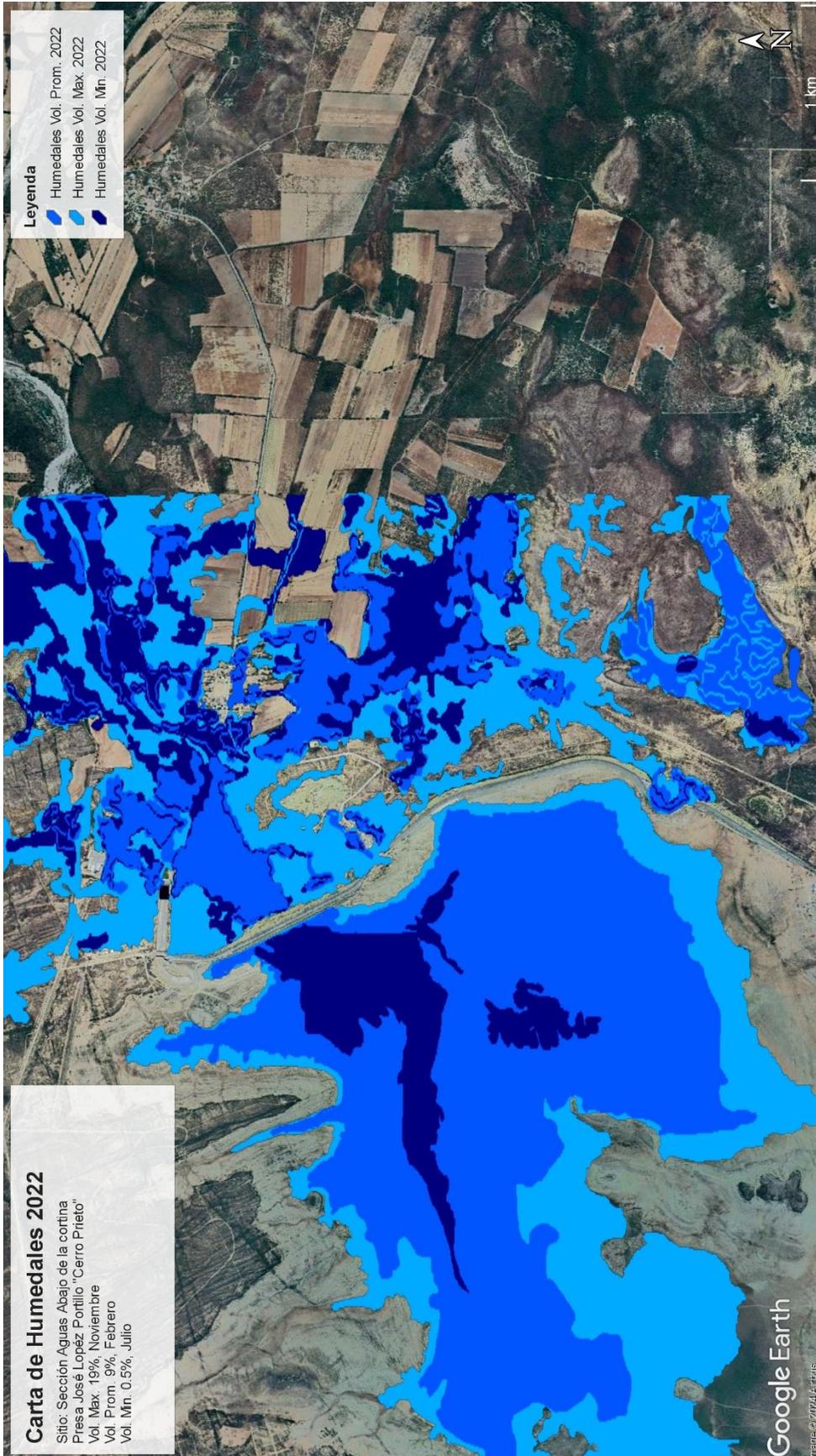


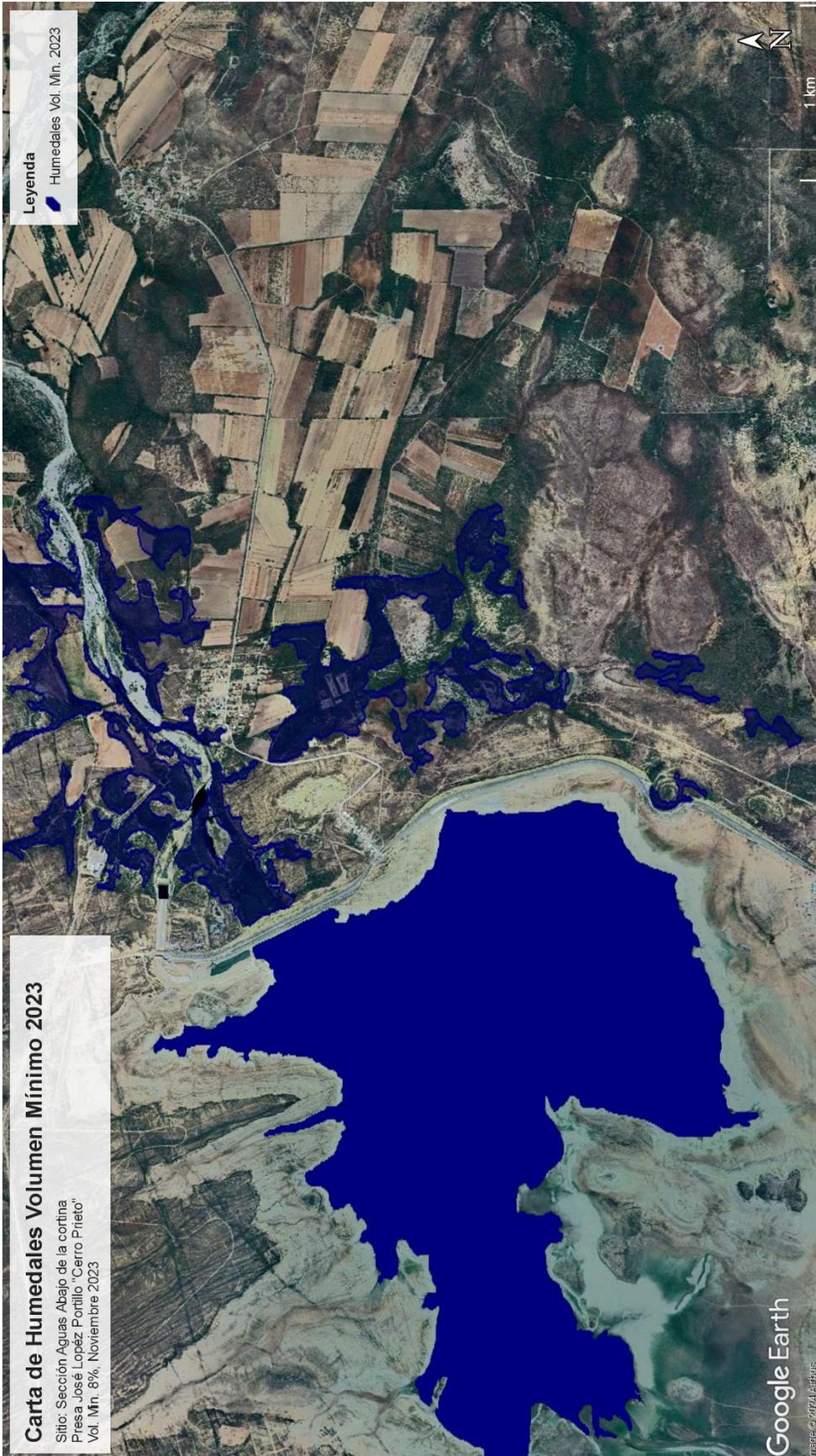


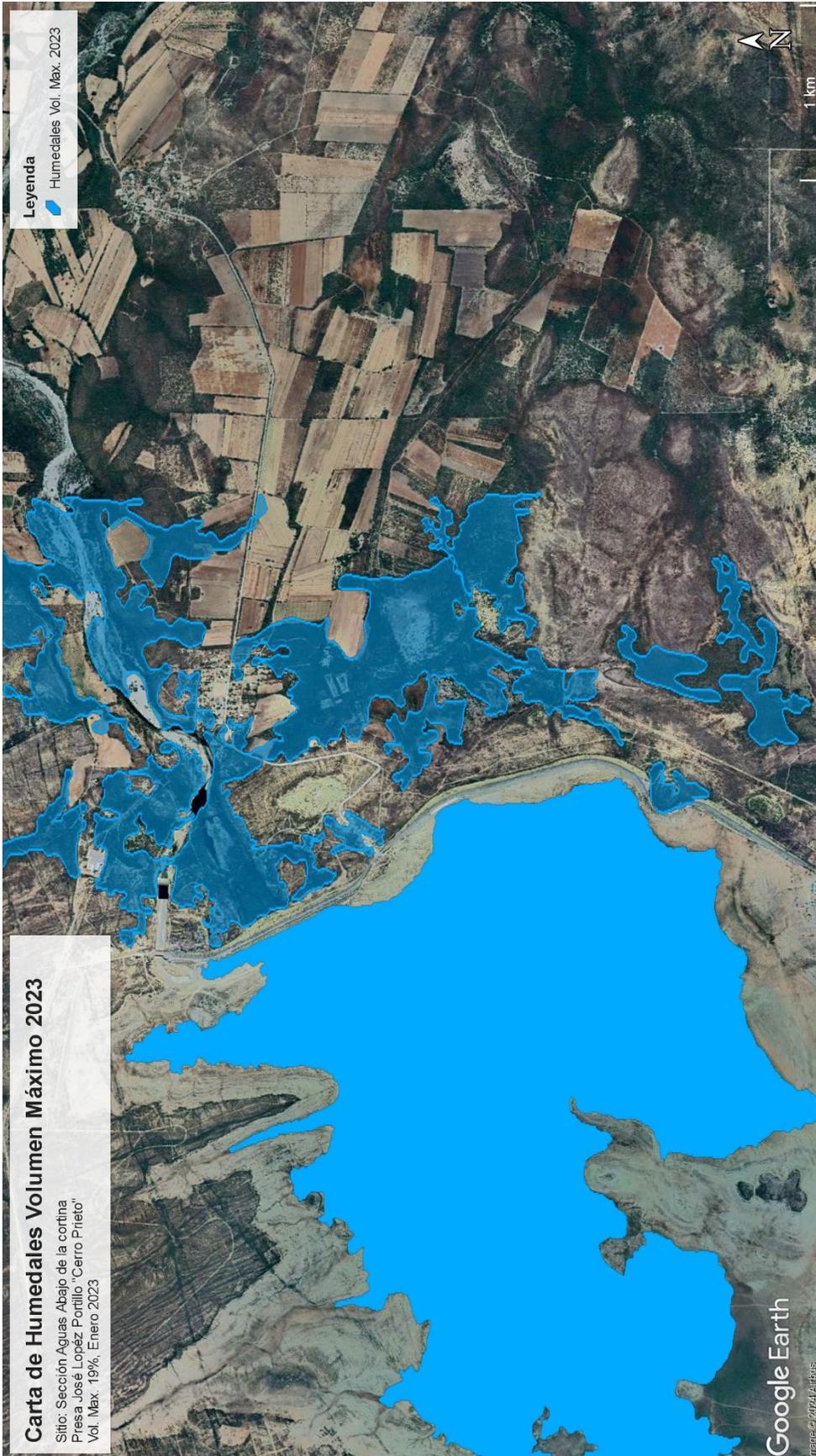


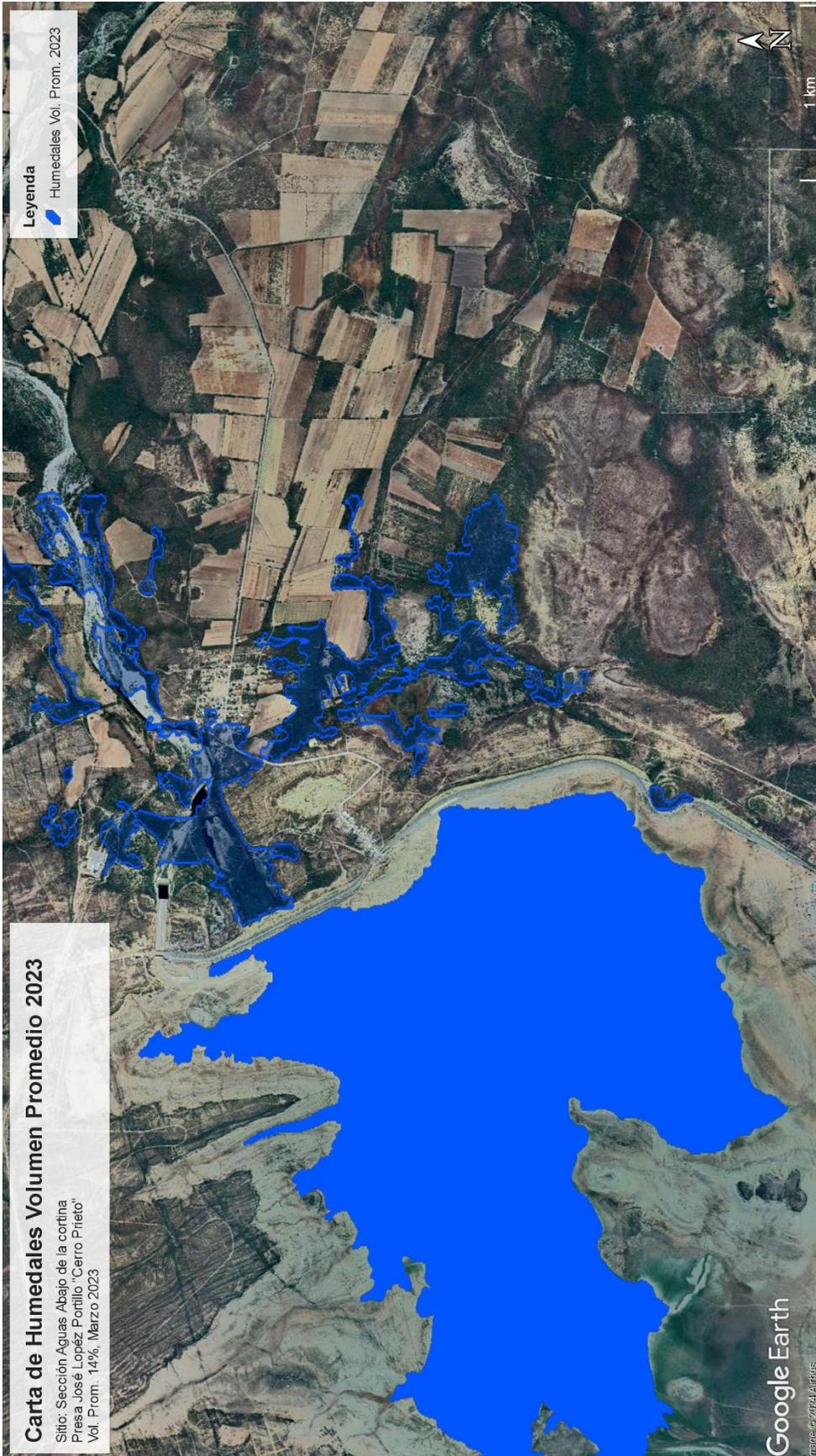


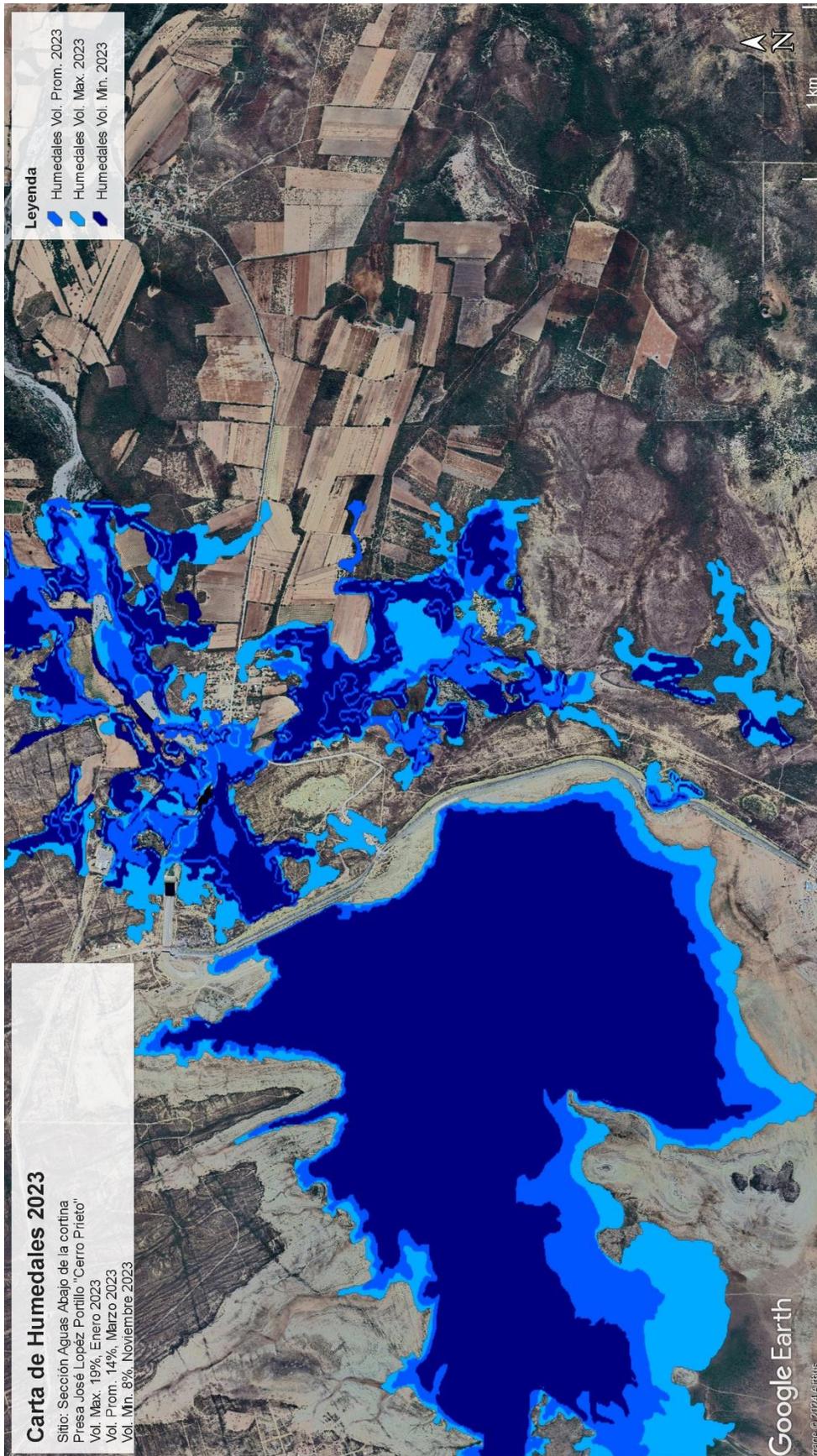


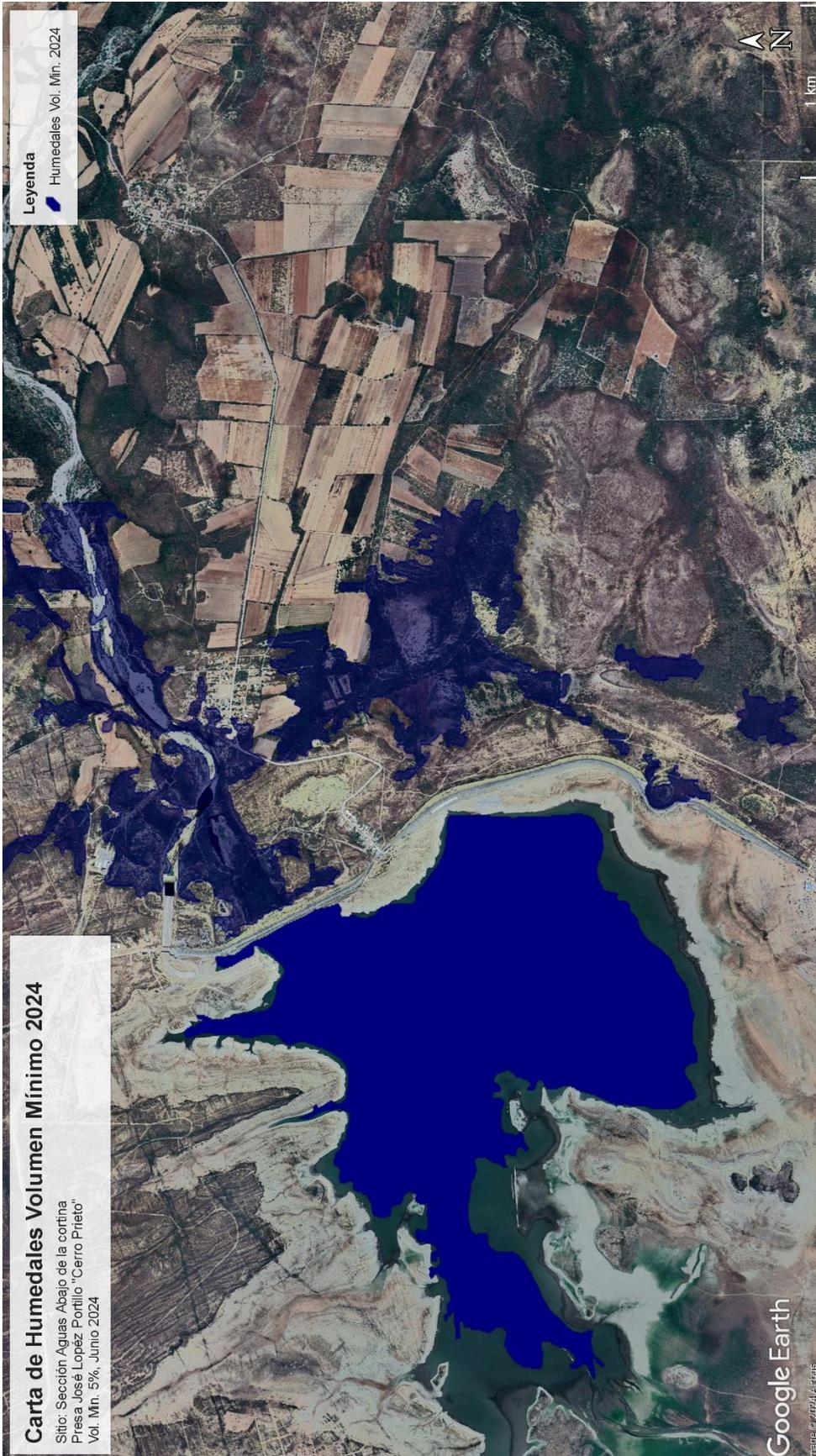


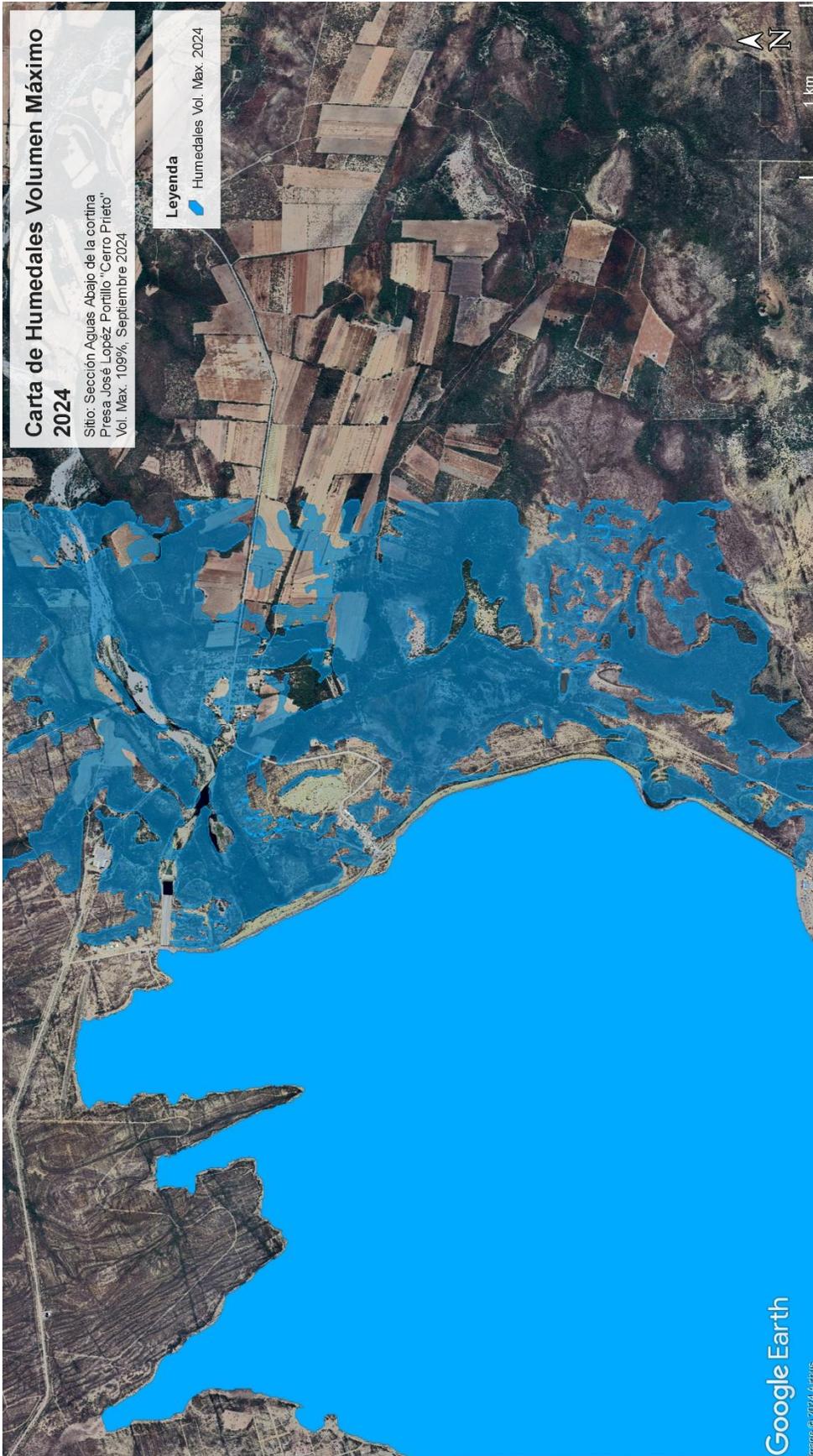


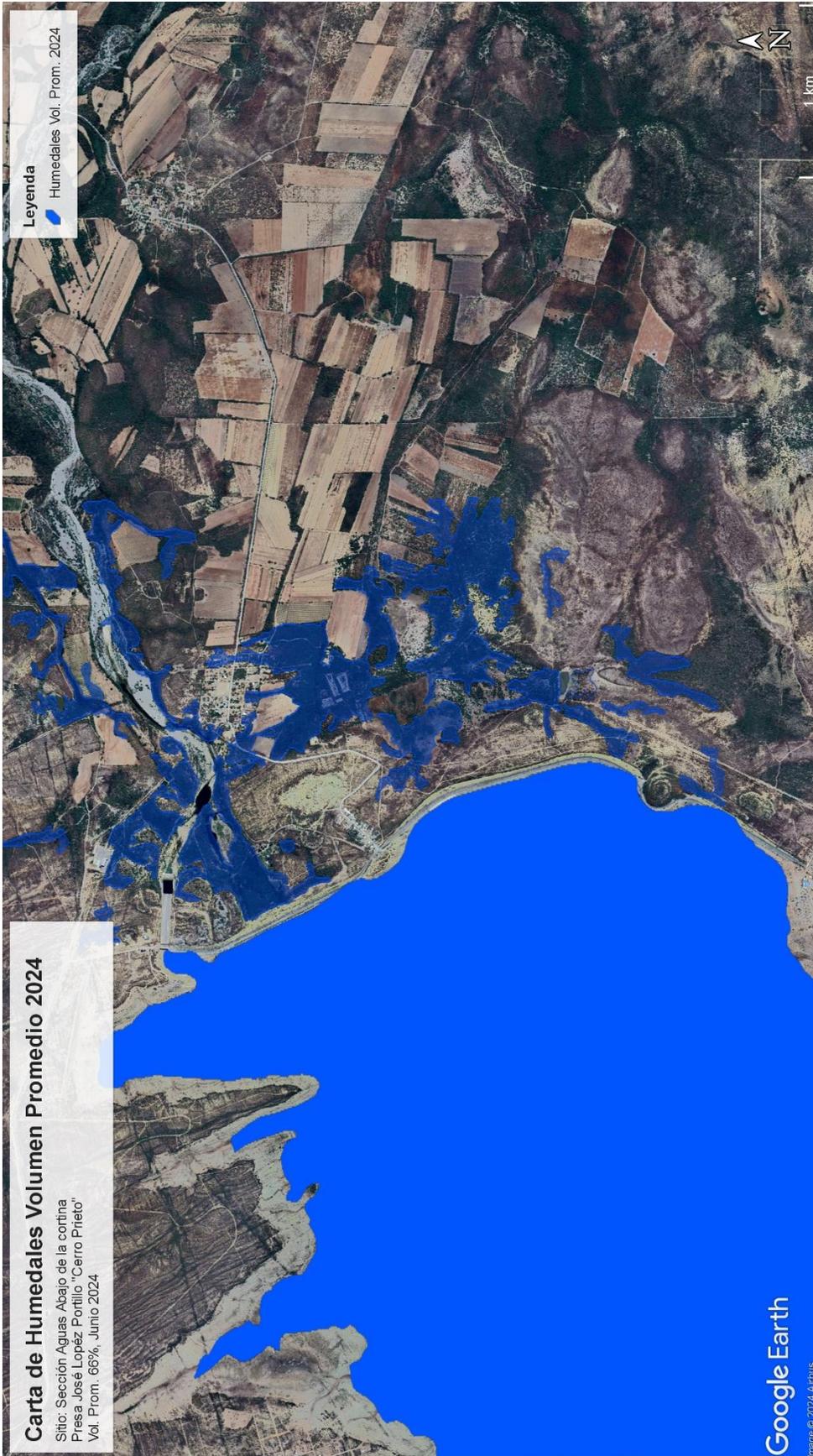


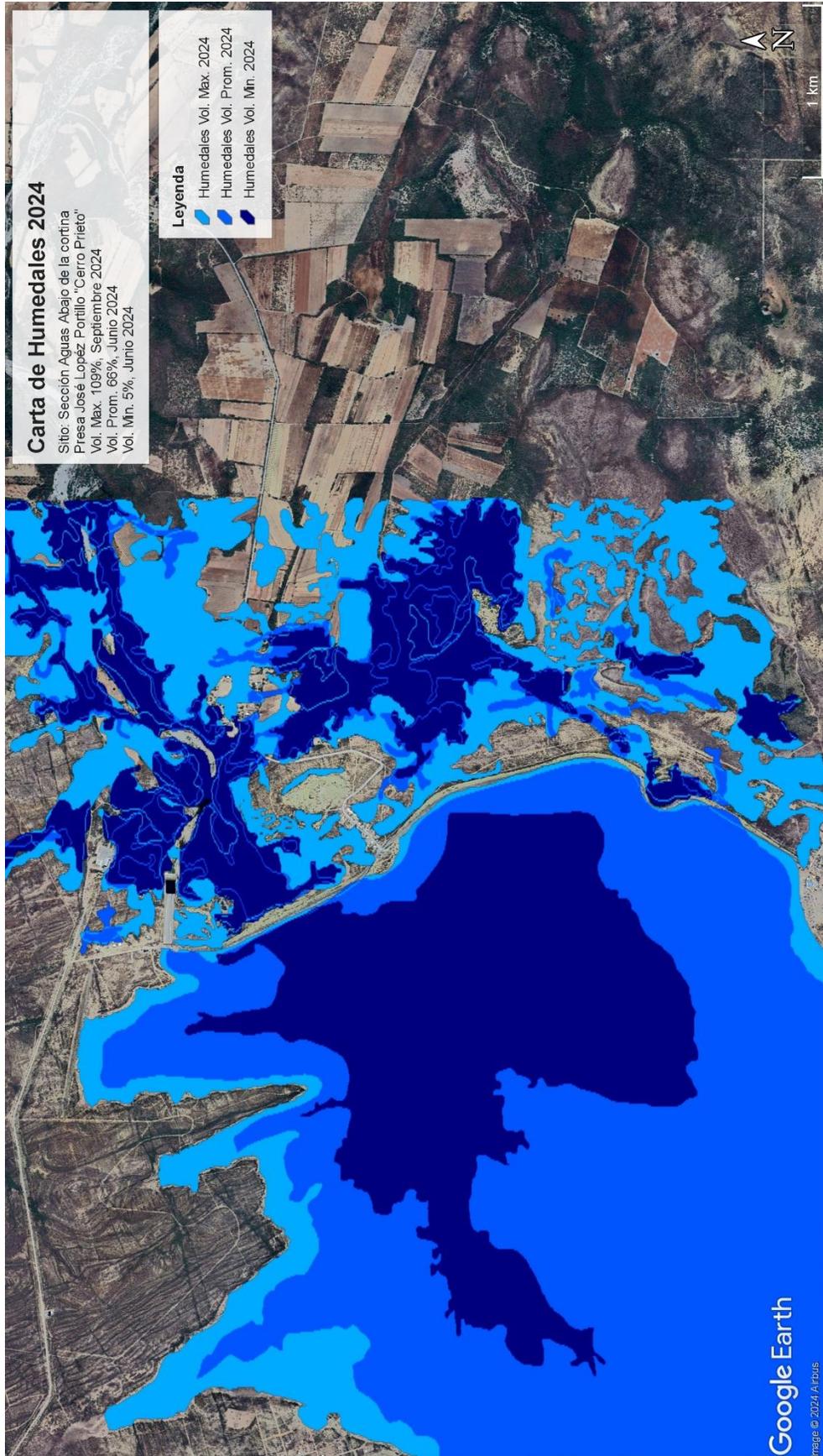




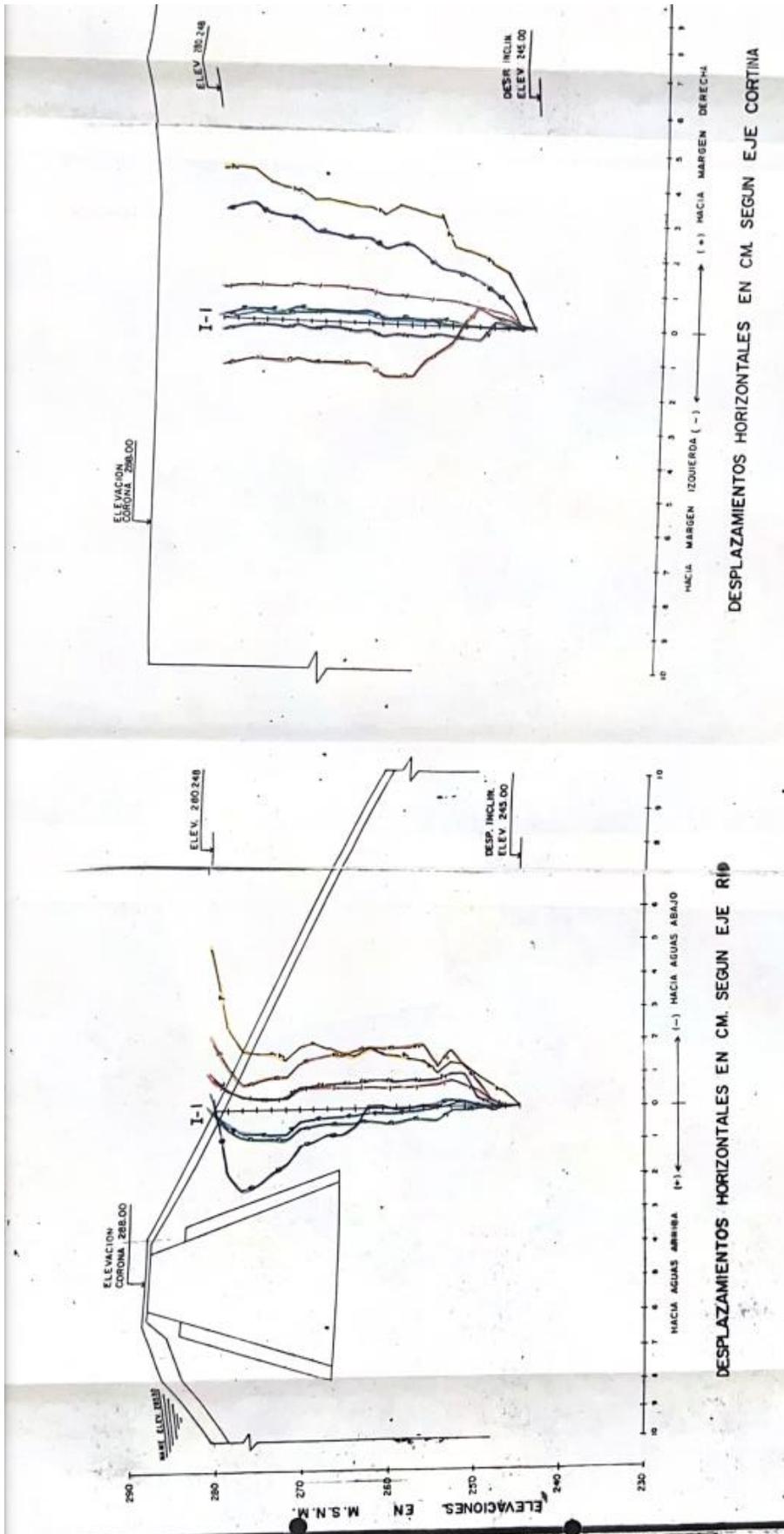


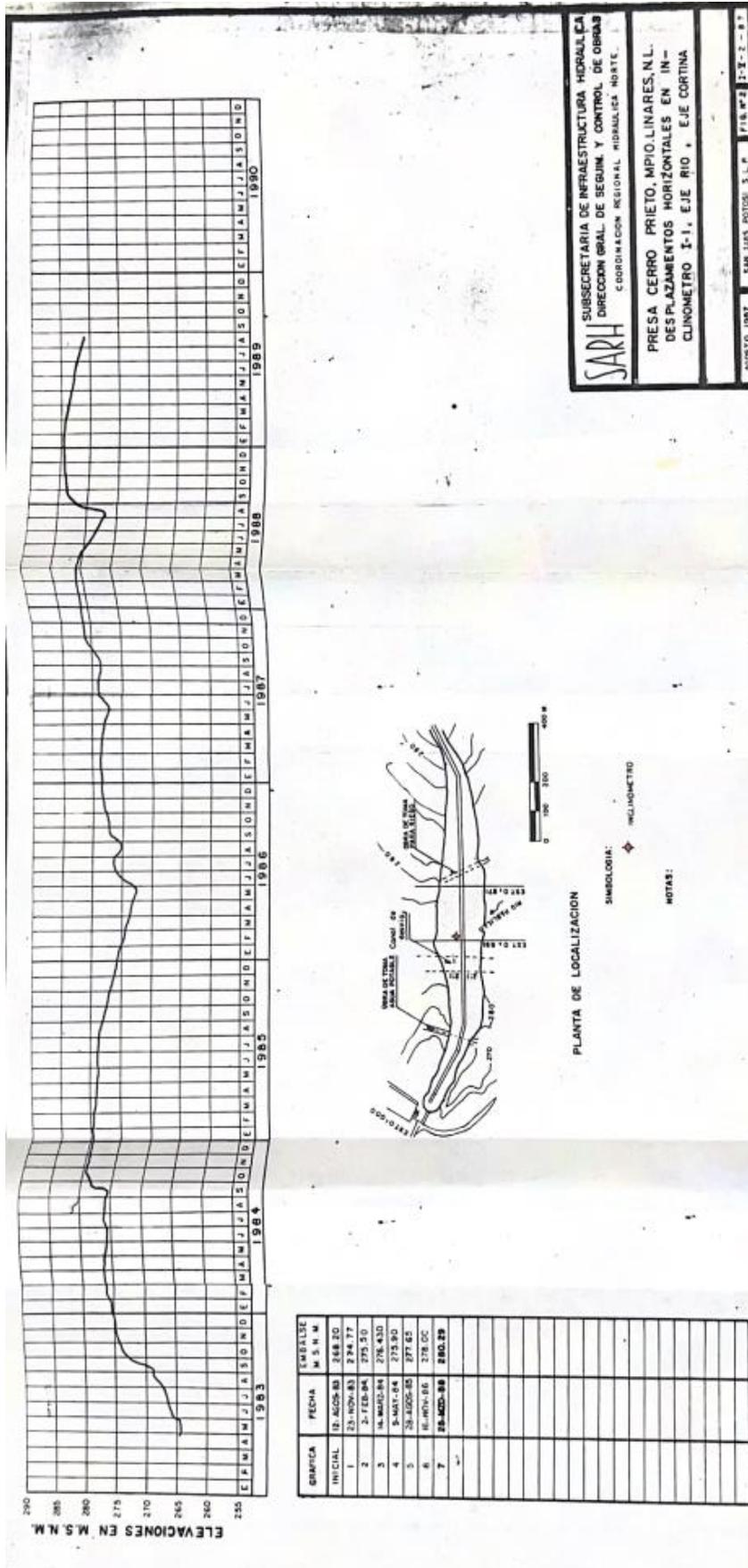




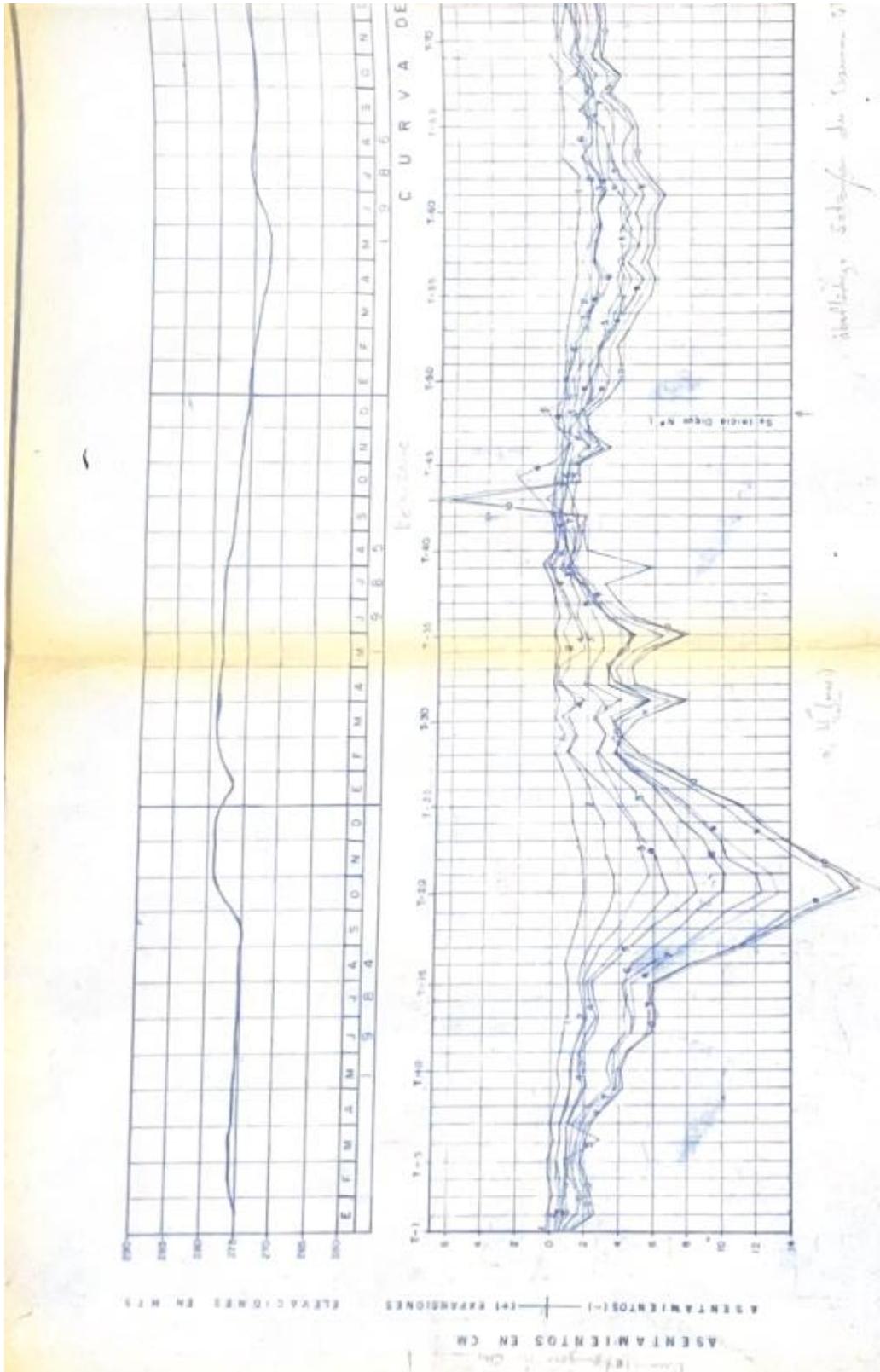


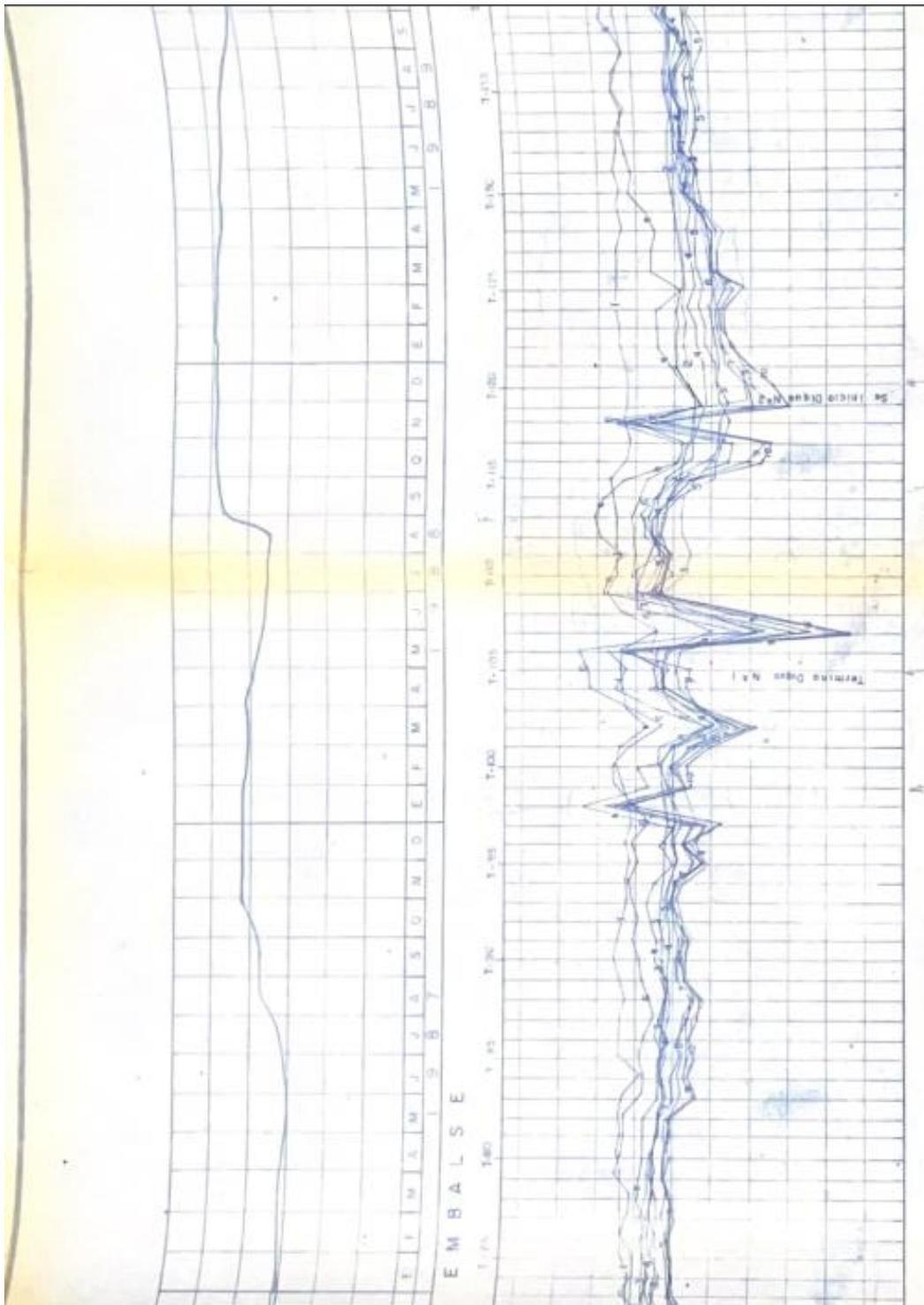
Anexo 3: Desplazamientos Horizontales en Inclímetro I-1, Eje de Río, Eje Cortina

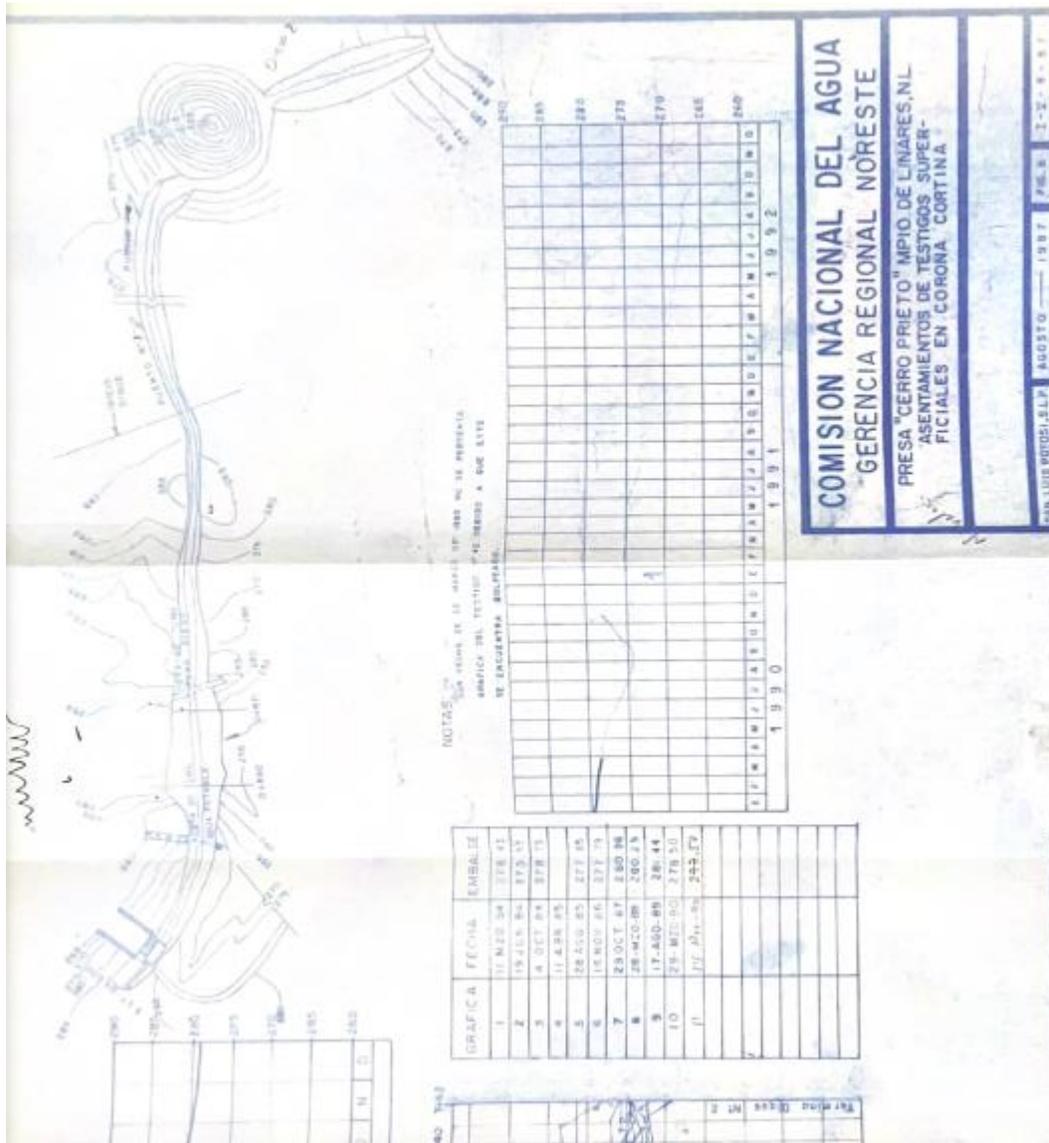




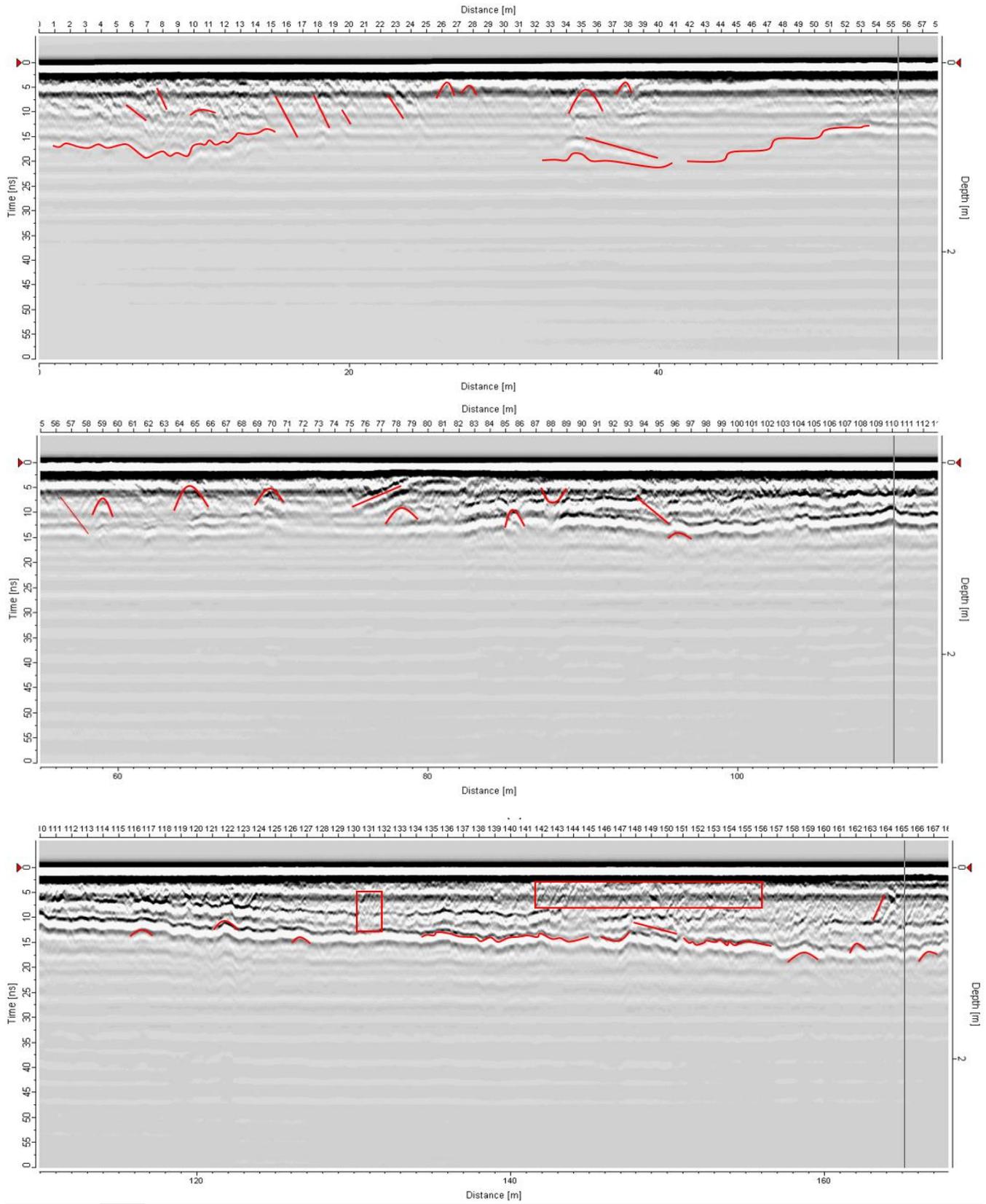
Anexo 4: Asentamientos de testigos Superficiales en Corona y Cortina

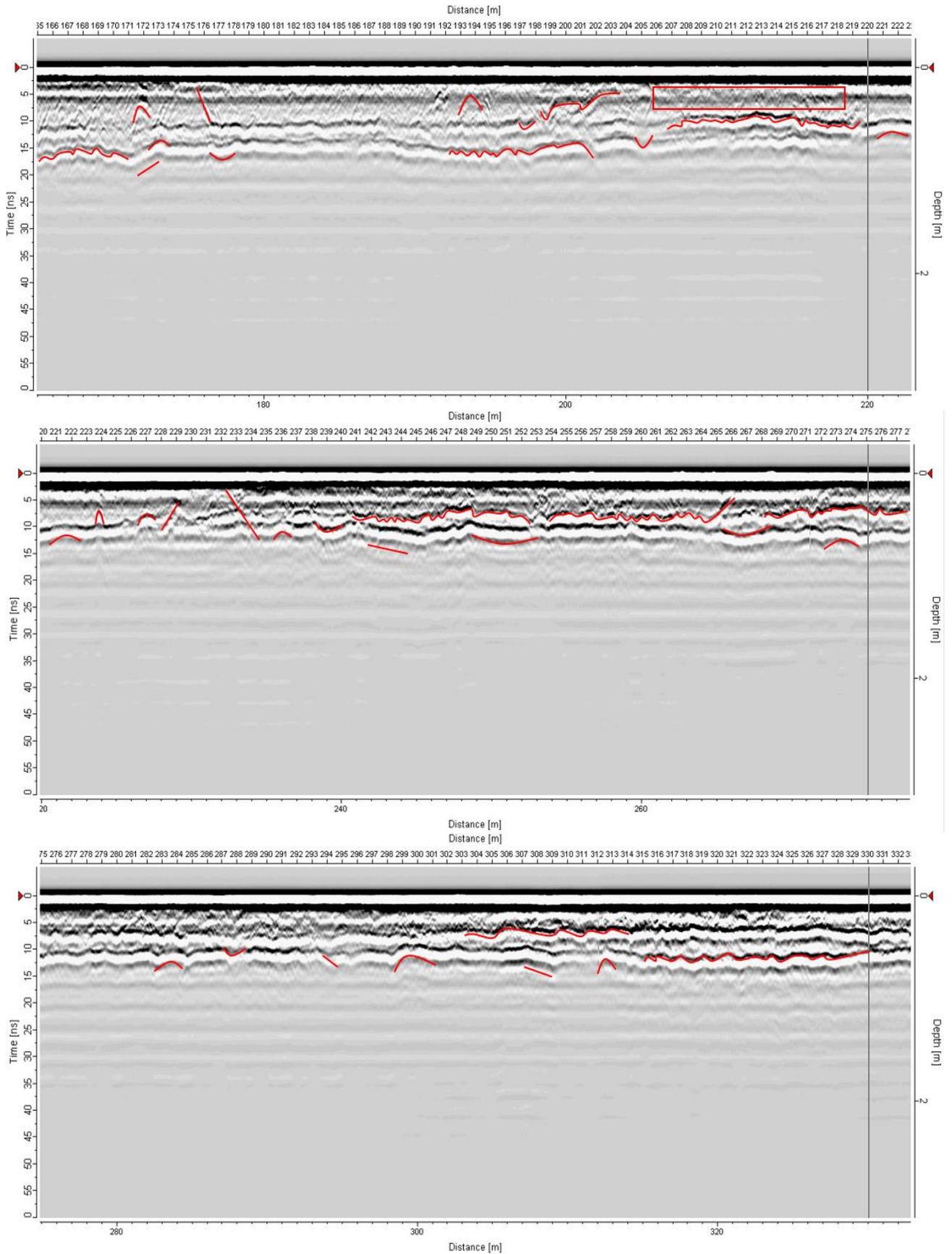


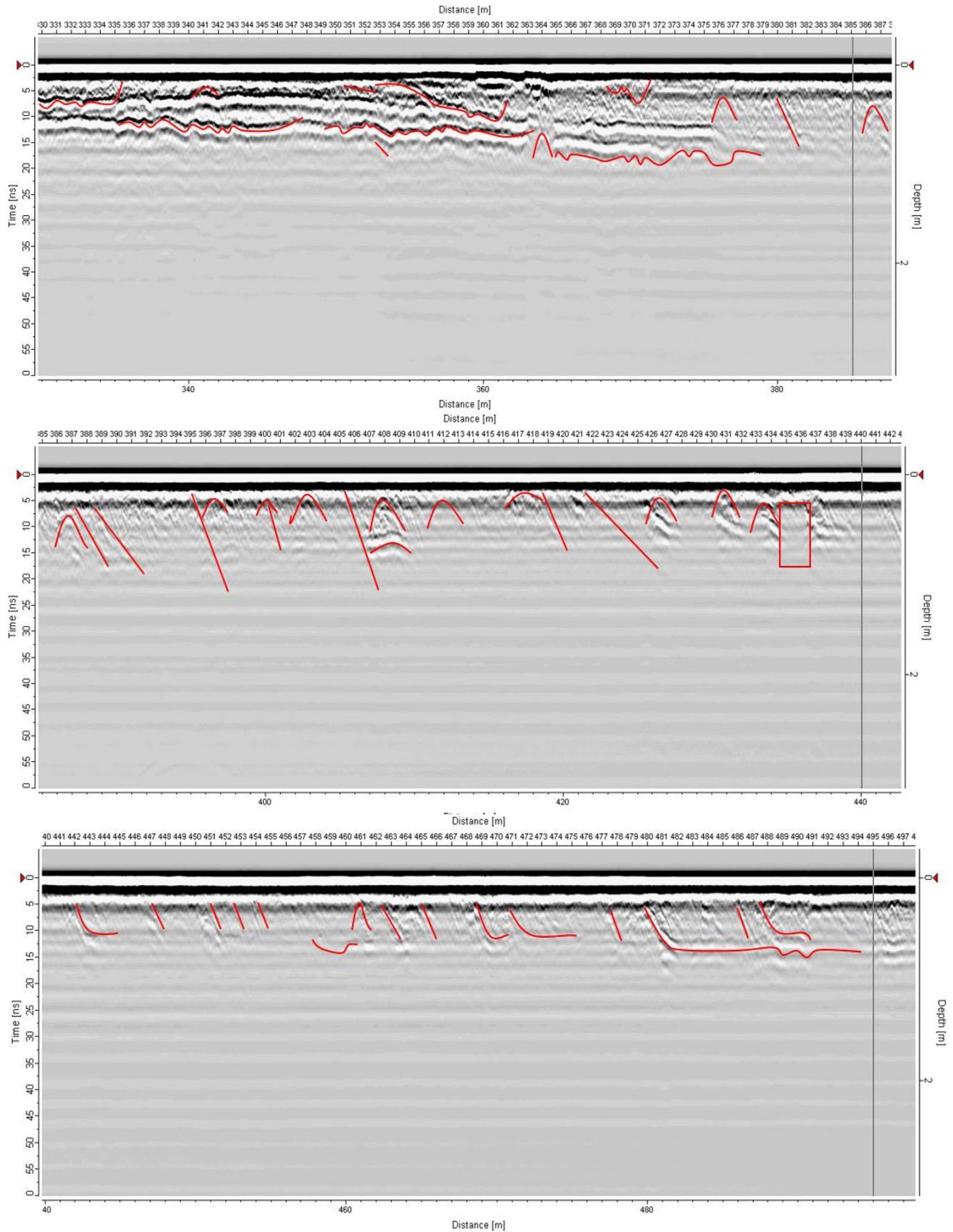


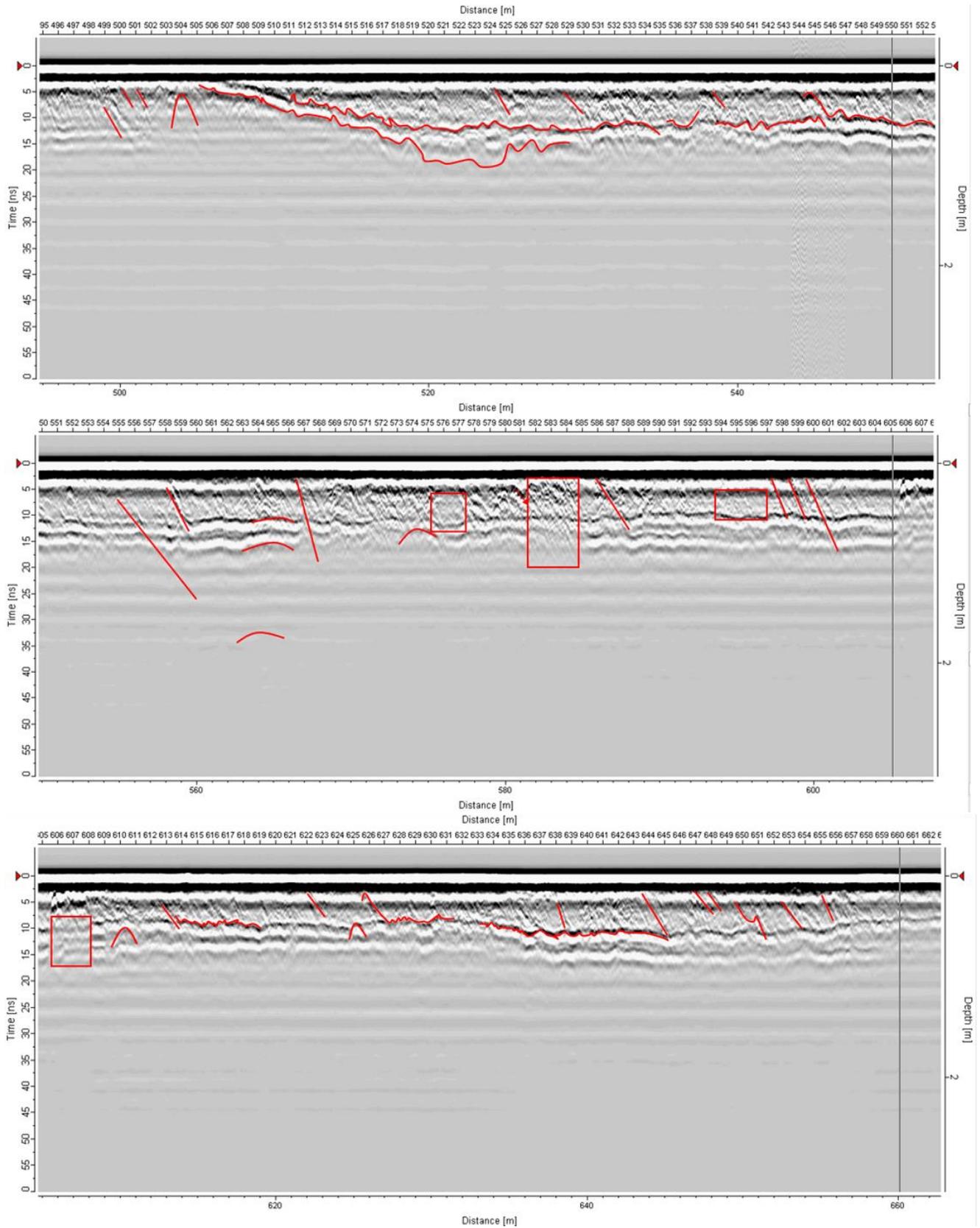


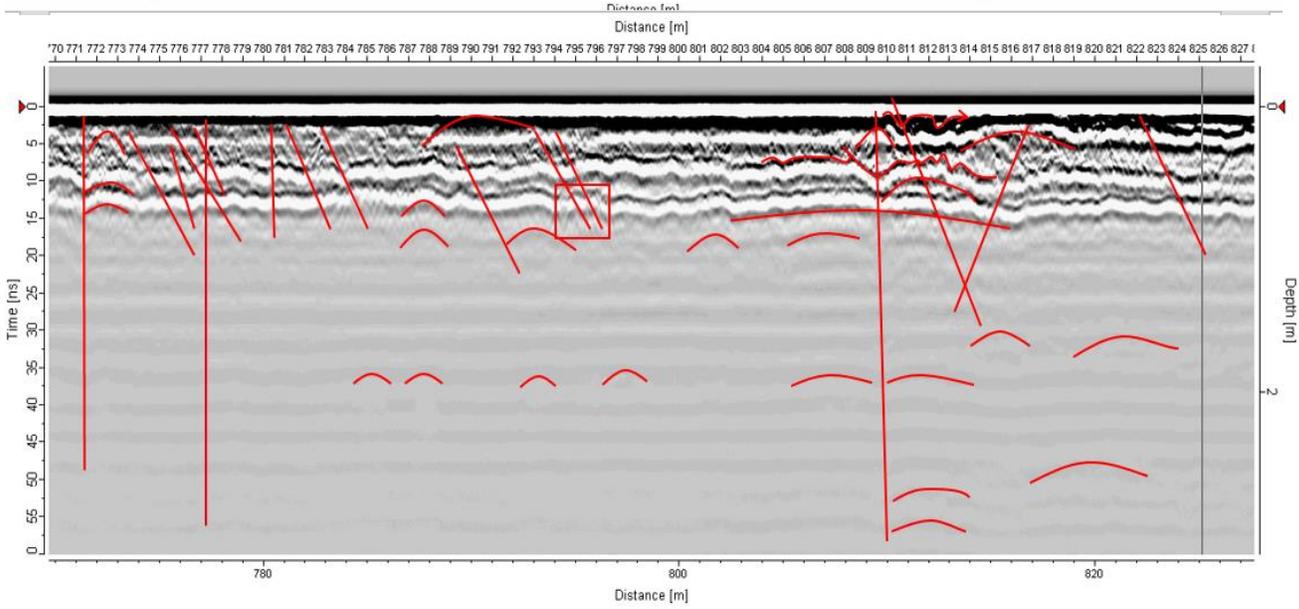
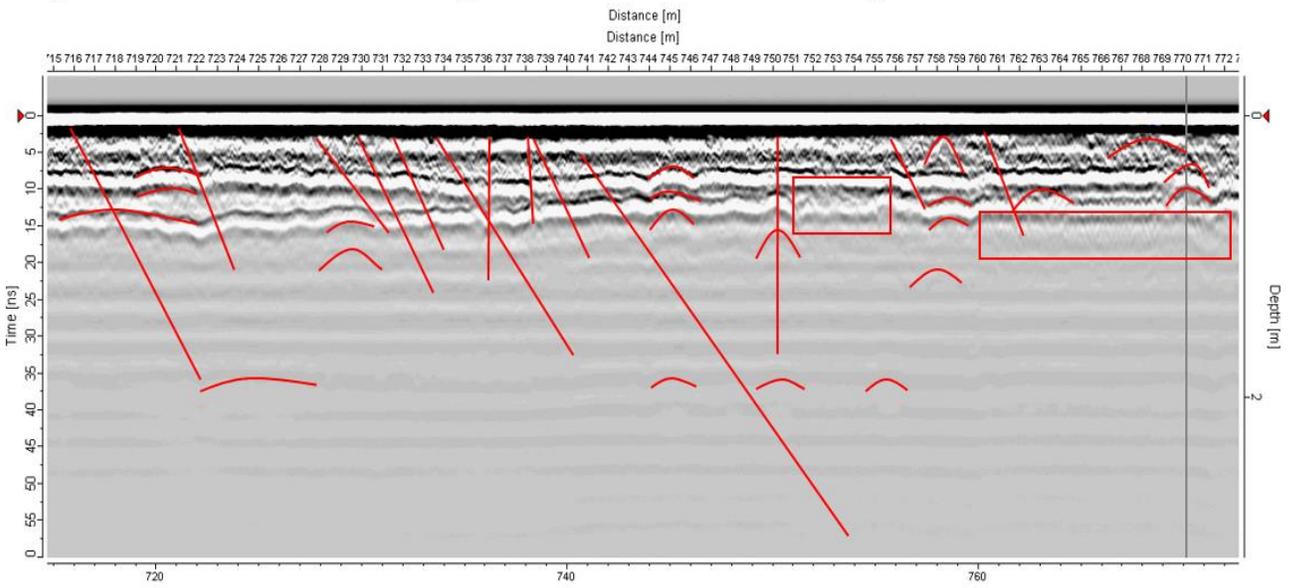
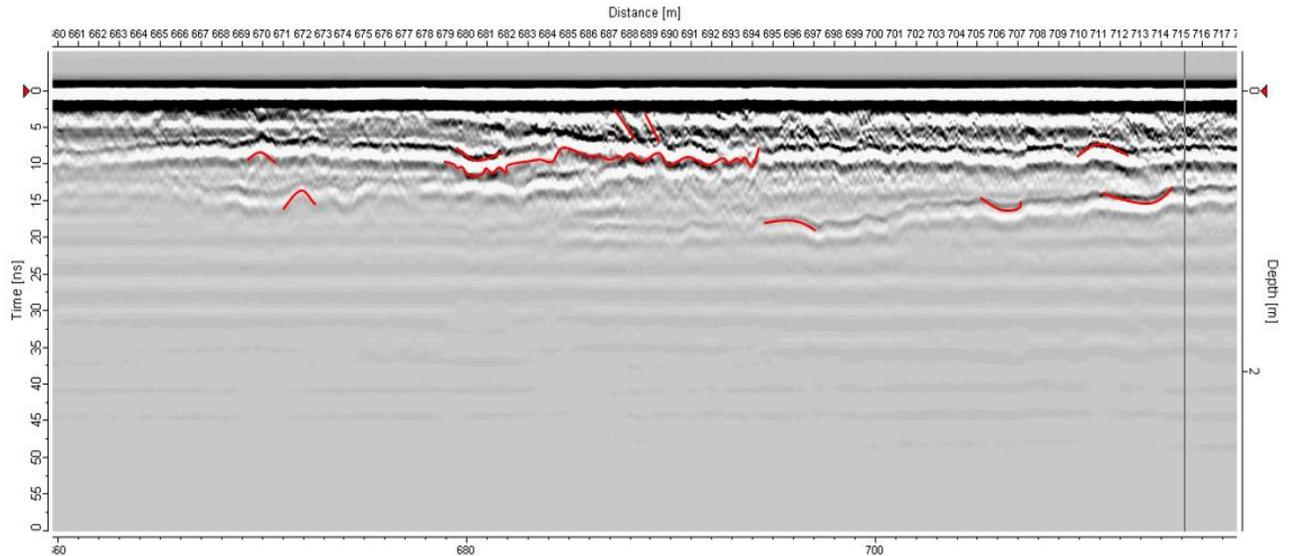
Anexo 5: Radagramas

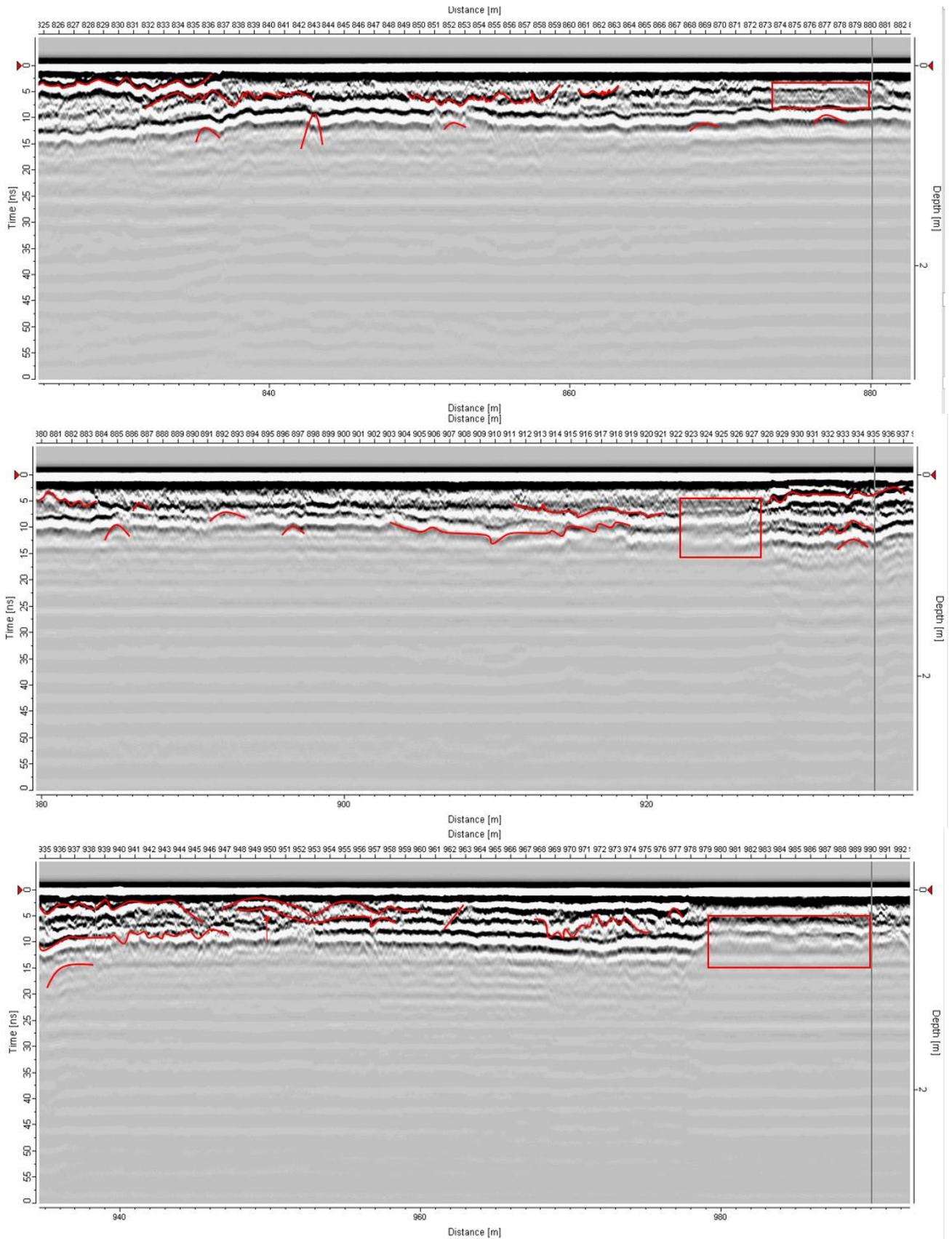


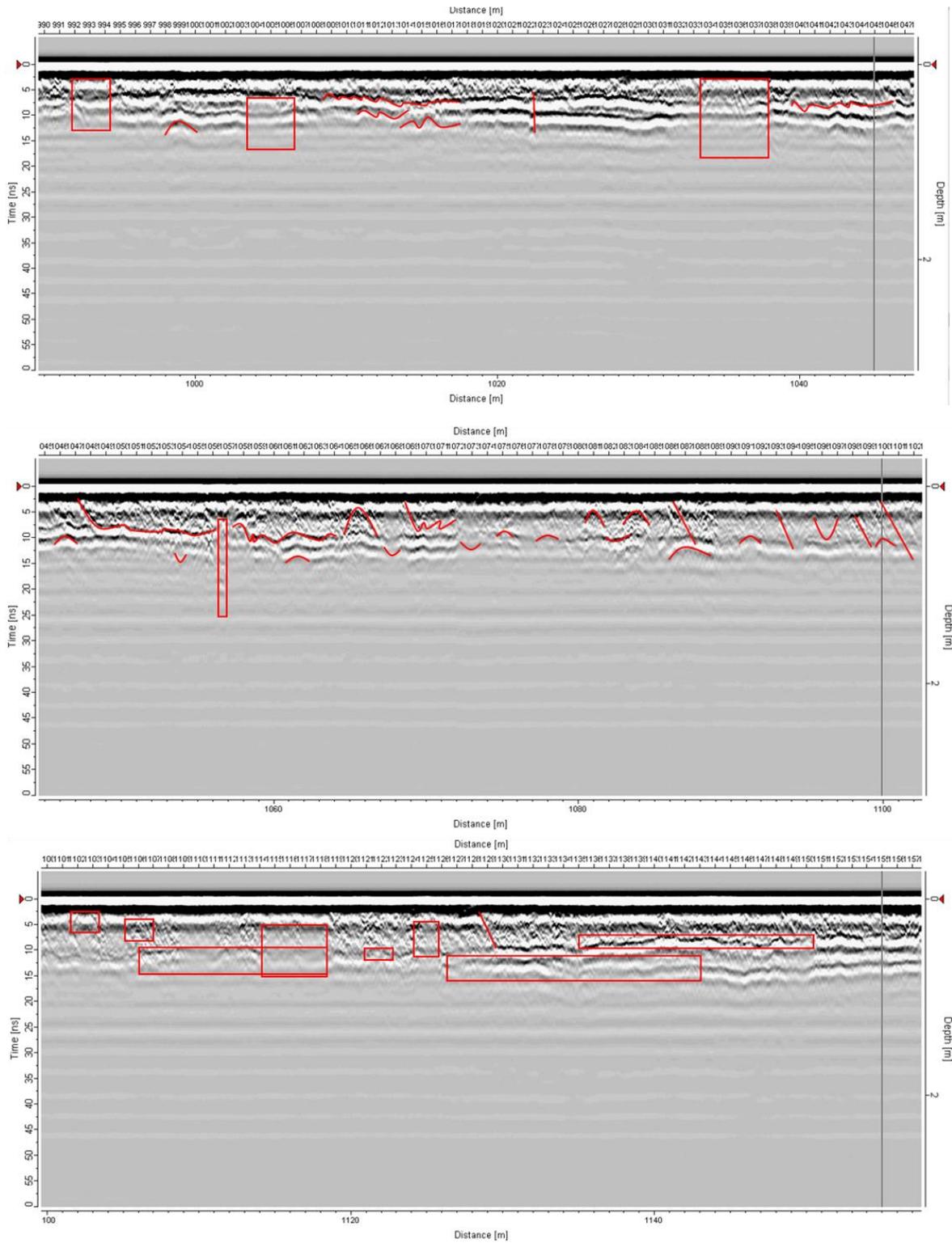


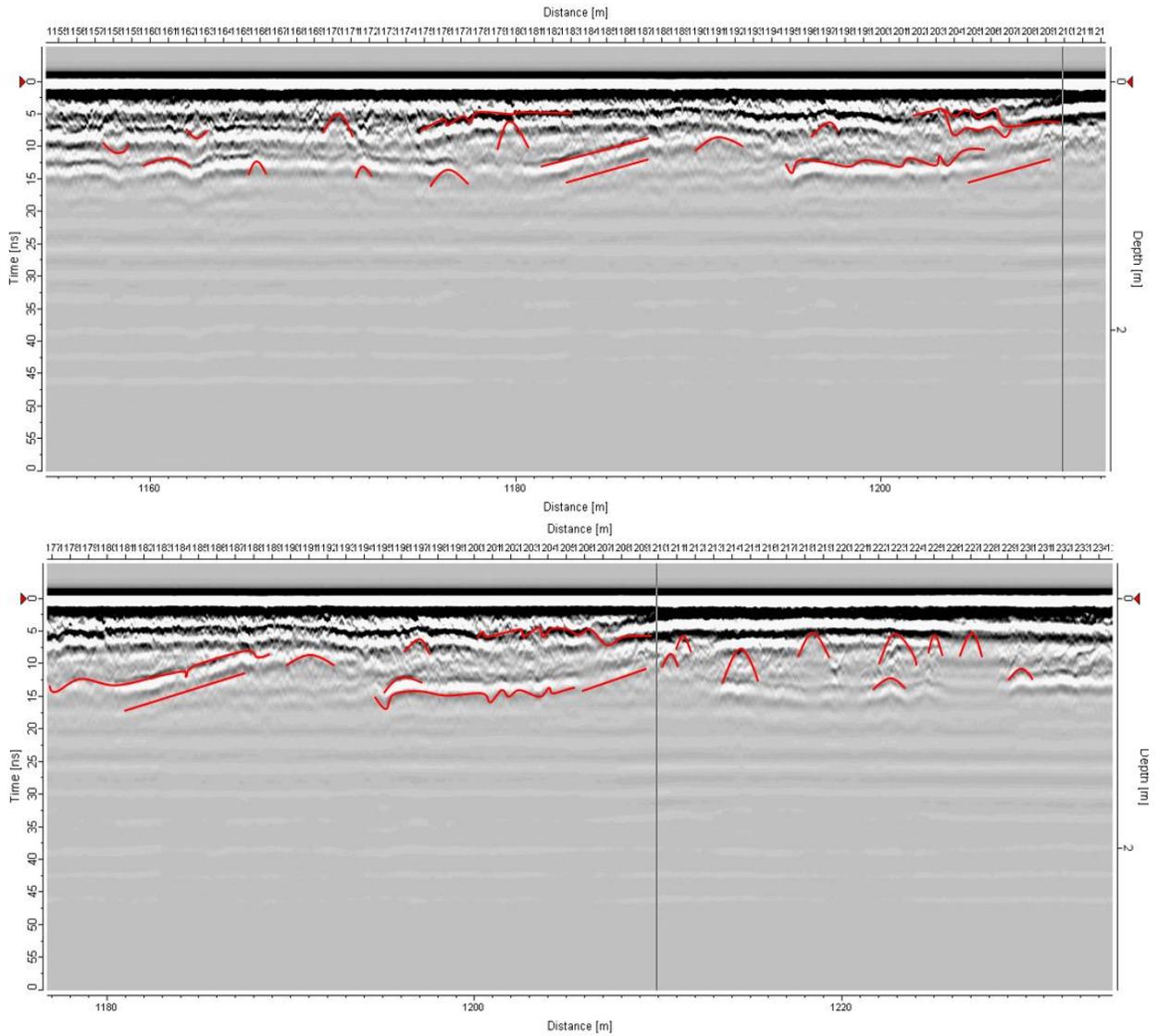












Anexo 7: Matriz completa de la ICOLD en contexto de sequía

