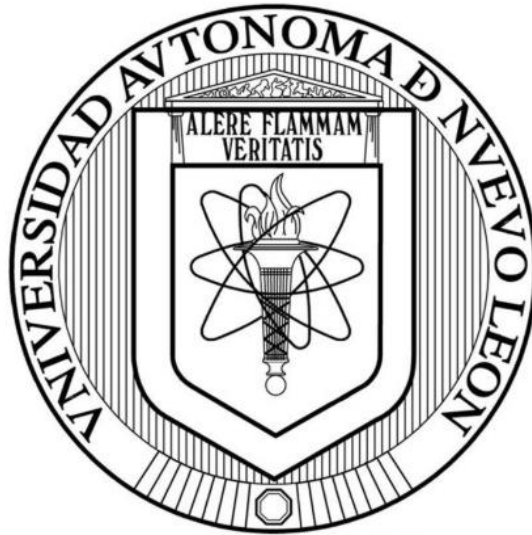


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:

**GUÍA PARA RECARGA DE ACUÍFEROS MEDIANTE POZOS DE INYECCIÓN
PROFUNDA EN AMBIENTES KÁRSTICOS: ESTUDIO DE CASO GALERÍA LOS
ELIZONDO**

POR

GERARDO AUGUSTO MONTEMAYOR AHUJA

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERÍA, CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

AGOSTO DE 2026

DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA RANGEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE. -

Estimado Dr. Mendoza Rangel,

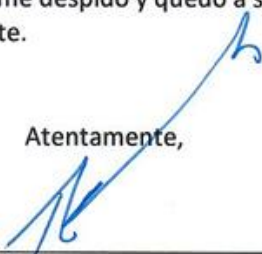
Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es **"GUÍA PARA RECARGA DE ACUÍFEROS MEDIANTE POZOS DE INYECCIÓN PROFUNDA EN AMBIENTES KÁRSTICOS: ESTUDIO DE CASO GALERÍA LOS ELIZONDO"**, que presenta el **M.I. GERARDO AUGUSTO MONTEMAYOR AHUJA**, como requisito parcial para obtener el grado de **DOCTOR EN INGENIERÍA**, del programa **DOCTORADO EN INGENIERÍA 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. 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

2026/05/11

DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA RANGEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE. -

Estimado Dr. Mendoza Rangel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es **"GUÍA PARA RECARGA DE ACUÍFEROS MEDIANTE POZOS DE INYECCIÓN PROFUNDA EN AMBIENTES KÁRSTICOS: ESTUDIO DE CASO GALERÍA LOS ELIZONDO"**, que presenta el **M.I. GERARDO AUGUSTO MONTEMAYOR AHUJA**, como requisito parcial para obtener el grado de **DOCTOR EN INGENIERÍA**, del programa **DOCTORADO EN INGENIERÍA 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. HÉCTOR DE LEÓN GÓMEZ

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

DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA RANGEL

Subdirector de estudios de posgrado e investigación

Facultad de Ingeniería Civil

Universidad Autónoma de Nuevo León

Estimado Dr. Mendoza Rangel:

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de TESIS, cuyo título es **“GUÍA PARA RECARGA DE ACUÍFEROS MEDIANTE POZOS DE INYECCIÓN PROFUNDA EN AMBIENTES KÁRSTICOS: ESTUDIO DE CASO GALERÍA LOS ELIZONDO”**, que presenta el **M.I. Gerardo Augusto Montemayor Ahuja**, como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en Ingeniería 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. Víctor Hugo Guerra Cobián

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



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

FECHA: 2026/03/06

DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA RANGEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE. -

Estimado Dr. Mendoza Rangel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es **"GUÍA PARA RECARGA DE ACUÍFEROS MEDIANTE POZOS DE INYECCIÓN PROFUNDA EN AMBIENTES KÁRSTICOS: ESTUDIO DE CASO GALERÍA LOS ELIZONDO"**, que presenta el **M.I. GERARDO AUGUSTO MONTEMAYOR AHUJA**, como requisito parcial para obtener el grado de **DOCTOR EN INGENIERÍA**, del programa **DOCTORADO EN INGENIERÍA 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. José Luis Bruster Flores
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



Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro
RECTORÍA

Calzada Antonio Narro No. 1923, Colonia Buenavista
Saltillo, Coahuila, México. C.P. 25315
Tel. (844) (844) 411 03 44/45 y (844) 411 03 98/99
e-mail: rectoria@uaaan.edu.mx Página Web: www.uaaan.edu.mx

FECHA: 2026/07/20

DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA RANGEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE. -

Estimado Dr. Mendoza Rangel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de TESIS, cuyo título es **"GUÍA PARA RECARGA DE ACUÍFEROS MEDIANTE POZOS DE INYECCIÓN PROFUNDA EN AMBIENTES KÁRSTICOS: ESTUDIO DE CASO GALERÍA LOS ELIZONDO"**, que presenta el M.I. GERARDO AUGUSTO MONTEMAYOR AHUJA, como requisito parcial para obtener el grado de DOCTOR EN INGENIERÍA, del programa DOCTORADO EN INGENIERÍA 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. FERNANDO AUGUSTO VILLARREAL REYNA
Evaluador

Asesor de la Rectoría UAAAN



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: GERARDO AUGUSTO MONTE MAYOR AHUJA

TIPO DE DOCUMENTO: ARTÍCULO ☐ TESIS ☒ PI ☐ OTRO ☐

TÍTULO DEL DOCUMENTO A REVISAR:

GUÍA PARA RECARGA DE ACUÍFEROS MEDIANTE
POZOS DE INYECCIÓN PROFUNDA EN AMBIENTES
KÁRSTICOS: ESTUDIO DE CASO GALERÍA LOS ELIZONDO

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. José Manuel Mendoza Rangel

Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación
Ciudad Universitaria, 29 de Julio de 2016

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: 3; Página 1 de 1

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Civil

Subdirección de Estudios de Posgrado e Investigación.

Los miembros del comité evaluador recomendamos que la Tesis titulada “**GUÍA PARA RECARGA DE ACUÍFEROS MEDIANTE POZOS DE INYECCIÓN PROFUNDA EN AMBIENTES KÁRSTICOS: ESTUDIO DE CASO GALERÍA LOS ELIZONDO**”, realizada por el **M.I. Gerardo Augusto Montemayor Ahuja** con número de matrícula **0832590**, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de **Doctor en Ingeniería** dentro del programa **Doctorado en Ingeniería con Orientación en Ingeniería Ambiental**.

El Comité Evaluador:

**Dr. Ricardo Alberto Cavazos
González**
Director de tesis

Dr. Héctor de León Gómez
Evaluador/Codirector de la tesis

**Dr. Fernando Augusto Villarreal
Reyna**
Evaluador/Asesor externo de la tesis

Dr. Víctor Hugo Guerra Cobián
Evaluador de la tesis

Dr. José Luis Bruster Flores
Evaluador de la tesis

Dr. José Manuel Mendoza Rangel
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación

San Nicolás de los Garza, Nuevo León.

Agosto, 2026.

AGRADECIMIENTOS

Por el acompañamiento y las observaciones realizadas a lo largo de esta investigación, expreso mi reconocimiento al Dr. Ricardo Alberto Cavazos González, director de tesis, por su orientación, criterio y conducción durante todo el proceso. Su respaldo fue determinante para estructurar y concluir este trabajo.

Al Dr. Héctor de León Gómez, codirector, agradezco su disposición constante, así como sus aportaciones y claridad en el análisis, que fortalecieron el sustento técnico e hidrogeológico del estudio.

Al Dr. Víctor Hugo Guerra Cobián, reconozco su rigor académico y sus observaciones puntuales, las cuales permitieron mejorar la consistencia de la modelación, la validación de los resultados y el fundamento de los planteamientos.

Al Dr. José Luis Brúster Flores, valoro sus cuestionamientos y comentarios, que contribuyeron a precisar criterios técnicos y a elevar la calidad del análisis desarrollado.

Al Dr. Javier Cortés Bracho y al Dr. Fernando Augusto Villarreal Reyna, agradezco sus aportaciones y observaciones, mismas que fortalecieron el desarrollo integral del trabajo.

A Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, por las facilidades brindadas, el acceso a información técnica y el apoyo otorgado, que hicieron posible el desarrollo de este estudio en condiciones reales.

A la Facultad de Ingeniería Civil y a la Universidad Autónoma de Nuevo León, por la formación recibida y el respaldo institucional que permitieron la realización de este proyecto doctoral.

A mi familia, por su apoyo constante, paciencia y presencia a lo largo de este proceso.

A quienes estuvieron cerca durante este recorrido, por su compañía.

A quienes confiaron en este proyecto desde su inicio, por ser parte de este logro.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Introducción	1
1.2 Antecedentes técnicos y científicos	5
1.3 Planteamiento del problema a resolver	18
1.4 Justificación	30
1.5 Hipótesis general	36
1.6 Objetivos	37
1.7 Aportación científica y técnica de la investigación	38
CAPÍTULO 2. MÉTODOS EXPERIMENTALES	40
2.1 Tipo de investigación	40
2.2 Alcance de la investigación	40
2.3 Diseño metodológico	42
2.4 Materiales empleados	42
2.5 Métodos de preparación	50
2.6 Técnicas de análisis	56
2.7 Procedimientos	60
2.8 Pruebas	62
CAPÍTULO 3. RESULTADOS	67
3.1 Geodesia y referenciación espacial	68
3.2 Fisiografía del área de estudio	70
3.3 Geología	73
3.4 Geofísica del subsuelo mediante resistividad eléctrica	80
3.5 Dimensionamiento de las cavidades kársticas y su influencia en la respuesta hidráulica del acuífero	83
3.6 Fundamento metodológico del monitoreo del acuífero superficial y del enfoque analítico en acuíferos kársticos	85
3.7 Topografía	99
3.8 Diagnóstico hidrológico del sistema de recarga pluvial	104
3.9 Procedimiento para la excavación y perforación del pozo	117
3.10 Conductividad hidráulica del sistema acuífero	125
3.11 Criterios de calidad de agua a inyectar y compatibilidad química en sistemas de recarga artificial en ambientes kársticos	131

3.12	Propuesta de reabastecimiento del acuífero por medio de precipitaciones _____	133
3.13	Descripción técnica del sitio seleccionado para la perforación del pozo _____	135
3.14	Selección del periodo de retorno de lluvia para proyectos de inyección profunda _____	144
3.15	Procedimiento integral para el cálculo y dimensionamiento de la rejilla pluvial de captación y la tubería de conducción hacia el pozo _____	146
3.16	Fundamento hidráulico del sistema del pozo de inyección _____	154
3.17	Procedimiento de dimensionamiento hidráulico por balance volumen-tiempo para un pozo de inyección profunda ($\Delta t = 5 \text{ min}$) _____	161
3.18	Conclusión hidráulica del sistema de inyección profunda _____	175
3.19	Distribución temporal de la precipitación de diseño y del escurrimiento superficial _____	176
3.20	Análisis y discusión de los resultados según objetivos _____	184
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES _____		186
CAPÍTULO 5. PROPUESTA DE GUÍA PROCEDIMENTAL PARA LA RECARGA DE ACUÍFEROS MEDIANTE POZOS DE INYECCIÓN PROFUNDA EN AMBIENTES KÁRSTICOS _____		189
5.1	Paso 1: Geodesia y referenciación espacial del proyecto _____	189
5.2	Paso 2: Evaluación geológica _____	191
5.3	Paso 3: Caracterización geofísica del subsuelo _____	193
5.4	Paso 4: Estudio topográfico _____	195
5.5	Paso 5: Análisis hidrológico para fines de recarga artificial _____	197
5.6	Paso 6: Caracterización hidrogeológica del sistema _____	199
5.7	Paso 7: Caracterización geotécnica del medio _____	201
5.8	Paso 8: Evaluación de la calidad de agua a inyectar _____	202
5.9	Paso 9: Diseño hidráulico y constructivo del pozo de inyección profunda _____	204
5.10	Paso 10: Monitoreo y seguimiento del sistema de recarga _____	206
5.11	Paso 11: Gestión y normatividad _____	208
5.12	Paso 12: Integración final y validación del proceso _____	210
5.13	Esquema general de la guía procedimental _____	213
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS CONSULTADAS _____		214
ANEXOS _____		225
Anexo A _____		225
Anexo B _____		229

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Perforadora Mobile Drill B-50.	45
Figura 2. Utilización en campo de Magellan Promark.	46
Figura 3. Estación total Nikon DTM-322.	47
Figura 4. Aplicaciones y softwares empleados en la investigación.	49
Figura 5. Esquema para el diseño adecuado de un pozo de infiltración.	55
Figura 6. Levantamiento topográfico.	63
Figura 7. Proceso MT (Ilustrativo).	64
Figura 8. Elaboración del sondeo TEM en campo.	65
Figura 9. Sitio de estudio marcado con rojo.	69
Figura 10. Coordenadas del sitio de estudio.	69
Figura 11. Curvas de nivel de la cuenca de estudio y ubicación.	70
Figura 12. Mapa de fisiografía para caracterización de subcuenca Río Santa Catarina.	72
Figura 13. Columna geológica-minera del Noreste de México G14-7.	75
Figura 14. Carta G14-7.	77
Figura 15. Ubicación del Sondeo MT y TEM sitio Camino al Diente.	81
Figura 16. Perfil y construcción de modelo geo-eléctrico.	83
Figura 17. Toma satelital de pozos de monitoreo.	89
Figura 18. Instalación y rastreo de pozos.	89
Figura 19. Croquis de instalación de pozo de monitoreo.	90
Figura 20. Índice de confianza simultáneos de 95% de Tukey.	94
Figura 21. Gráfica de regresión polinomial piezómetro 1.	96
Figura 22. Topografía del sitio de estudio obtenida por medio de GPS Promark 3 Magellan y estación total.	101
Figura 23. Zonificación de pendientes para el área de estudio.	103
Figura 24. Datos de las instalaciones de control climatológico adyacentes.	105
Figura 25. Método National Weather Service.	107
Figura 26. Pluviosidad máxima anual acumulada en 24 horas del sitio.	108
Figura 27. Curvas altura de precipitación-duración-frecuencia	115
Figura 28. Curvas altura de intensidad-duración-frecuencia.	116
Figura 29. Exploración geotécnica in situ.	117
Figura 30. Muestra de material estudio geotécnico profundidad 20 a 70 metros.	118
Figura 31. Muestra de material estudio geotécnico profundidad 188 a 230 metros.	119
Figura 32. Muestra de material estudio geotécnico profundidad 274 a 310 metros.	119

Figura 33. Muestra de material estudio geotécnico profundidad 354 a 392 metros. _____	120
Figura 34. Muestra de material estudio geotécnico profundidad 514 a 552 metros. _____	121
Figura 35. Muestra de material estudio geotécnico profundidad 634 a 672 metros. _____	122
Figura 36. Muestra de material estudio geotécnico profundidad 652 a 708 metros _____	123
Figura 37. Datos resultantes del estudio geotécnico. _____	124
Figura 38. Representación de propuesta de pozo de reabastecimiento por medio de precipitaciones. _____	135
Figura 39. Mapa con cuencas hidrográficas para caracterización de subcuenca río Santa Catarina. _____	136
Figura 40. Localización del sitio de estudio. _____	137
Figura 41. Plano Topográfico del área de estudio que representa los piezómetros instalados. _____	142
Figura 42. Localización de pozo de reabastecimiento por precipitación. _____	143
Figura 43. Componente de seguridad. _____	157
Figura 44. Hidrograma unitario. _____	179
Figura 45. Hietograma de precipitación de diseño para TR=50 años. _____	183
Figura 46. Esquema general de la guía procedimental. _____	213
Figura 47. Solicitud para autorización de recopilación de datos en el sitio de estudio. Nota. Reproducido de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (2022). _____	226
Figura 48. Autorización para proporción de facilidades necesarias para la recabación de información hidrogeológica en Galería Los Elizondo. Nota. Reproducido de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (2022). _____	227
Figura 49. Delimitación del área comprendida por Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey en Camino al Diente, Monterrey, Nuevo León. Nota. Reproducido de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (2022). _____	228
Figura 50. Equipo de bombeo utilizado por Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey durante las actividades operativas asociadas al pozo de inyección profunda en el área de estudio Galería Los Elizondo. _____	229
Figura 51. Vista de la caseta y tuberías utilizadas para la conducción y control del agua hacia el pozo en el sitio Galería Los Elizondo. _____	230
Figura 52. Piezómetro instalado para el monitoreo. _____	230
Figura 53. Panorámica del entorno donde se localiza el pozo y la infraestructura asociada. _____	231
Figura 54. Pozo de extracción controlada desde el acuífero kárstico. _____	231
Figura 55. Infraestructura y equipo utilizados en campo. _____	232

Figura 56. Trabajos operativos en campo.	233
---	-----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas de localización de los pozos de monitoreo.	88
Tabla 2. Resultados mediciones pozos de monitoreo.	90
Tabla 3. Método de análisis experimental.	91
Tabla 4. Información del factor.	92
Tabla 5. Análisis de varianza.	93
Tabla 6. Resumen del modelo.	93
Tabla 7. Índices de confianza	93
Tabla 8. Agrupación Tukey.	94
Tabla 9. Pruebas simultáneas Tukey.	94
Tabla 10. Síntesis del modelo regresión polinomial P-1 vs. Fecha. Síntesis del modelo.	95
Tabla 11. Análisis de varianza regresión polinomial P-1 vs. Fecha.	95
Tabla 12. Análisis de varianza secuencial regresión polinomial P-1 vs. Fecha.	95
Tabla 13. Síntesis del modelo regresión polinomial P-2 vs. Fecha.	96
Tabla 14. Análisis de varianza regresión polinomial P-2 vs. Fecha.	96
Tabla 15. Análisis de varianza secuencial regresión polinomial P-2 vs. Fecha.	97
Tabla 16. Síntesis del modelo regresión polinomial P-3 vs. Fecha.	97
Tabla 17. Análisis de varianza regresión polinomial P-3 vs. Fecha.	97
Tabla 18. Análisis de varianza secuencial regresión polinomial P-4 vs. Fecha.	97
Tabla 19. Resumen del modelo regresión polinomial P-4 vs. Fecha.	98
Tabla 20. Análisis de varianza regresión polinomial P-4 vs. Fecha.	98
Tabla 21. Análisis de varianza secuencial regresión polinomial P-4 vs. Fecha.	98
Tabla 22. Levantamiento topográfico curvas de nivel.	102
Tabla 23. Instalaciones climatológicas adyacentes al emplazamiento.	104
Tabla 24. Datos de precipitación máxima para cada estación climatológica.	106
Tabla 25. Valores para calcular el valor de precipitación máxima en la cuenca de estudio.	108
Tabla 26. Precipitación máxima anual acumulada en la cuenca de estudio.	109
Tabla 27. Datos arrojados por la prueba Kolmogorov-Smirnov.	110
Tabla 28. Resultados de precipitación por periodo de retorno según la distribución.	111
Tabla 29. Resultados periodo de retorno distribución EV2-MAX(L-Moments).	112
Tabla 30. Altura de precipitación en diferentes periodos de retorno.	115
Tabla 31. Intensidad de pluviosidad en diferentes periodos de retorno.	116

Tabla 32. Conductividad hidráulica Galería Los Elizondo. _____	129
Tabla 33. Datos del acuífero somero. _____	168
Tabla 34. Datos del acuífero profundo. _____	168
Tabla 35. Resultados de tiempo de llenado recarga pluvial. _____	176
Tabla 36. Datos generales para el hidrograma unitario. _____	178
Tabla 37. Cálculos para la generación del hidrograma unitario. _____	178
Tabla 38. Método de Bloque Alternó, hietograma de precipitación para un periodo de retorno de 50 años. _____	182

NOMENCLATURA

CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
NOM	Normas Oficiales Mexicanas
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
ASR	Almacenamiento y Recuperación de Acuíferos
FMAM	Fondo para la Defensa del Medio Ambiente Mundial
UANL	Universidad Autónoma de Nuevo León
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
ONU	Organización de las Naciones Unidas
SADM	Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey
FAMM	Familiares y Amigos del Medio Ambiente
ISO	International Organization for Standardization
ASTM	American Society for Testing and Materials
ACONAGUA	Asociación de Colaboración para el Norte de América, Grupo de Umbrals de Calidad
ANOVA	Análisis Unidimensional de la Varianza
LIDAR	Detección y Medición por Luz
RGNA	Red Geodésica Nacional Activa
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
SIG	Sistema de Información Geográfica
AEC	Architecture, Engineering and Construction
AMT	Tecnología de Manufactura Americana
MT	Magnetotelúricos

TEM	Transitorio Electromagnético
EDM	Medición Electrónica de Distancias
PIB	Producto Interno Bruto
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
SPT	Prueba de Penetración Estándar
USD	Dólar de los Estados Unidos
P	Valor P
F	Estadístico F de Fisher
MC	Media de Cuadrados
SC	Suma de Cuadrados
GL	Grados de Libertad
PVC	Policloruro de vinilo
Kg	kilogramo
g	gramo
m	metro
m ²	metro cuadrado
km ²	kilómetro cuadrado
mm	milímetro
cm	centímetro
m ² /s	metro cuadrado sobre segundo
m/s	metro sobre segundo
m/d	metro sobre día
cm/s	centímetro sobre segundo
kg/cm ²	kilogramo sobre centímetro cuadrado
g/cm ³	gramo sobre centímetro cúbico
L/s	litro sobre segundo
Ohm	Unidad de resistencia eléctrica
Hz	Hertzio
Min	minuto
CO ₂	Dióxido de Carbono

RESUMEN

La reducción de cuerpos de agua dulce a lo largo del tiempo, tanto superficiales como subterráneos, ha planteado problemas cada vez más complicados a nivel mundial y especialmente en el norte de México. Las condiciones climáticas, el crecimiento de la población y el uso intensivo de los recursos hídricos son factores que están involucrados en esta situación.

Y dado este hecho, los especialistas en el campo han examinado y ofrecido alternativas que permiten mantener y utilizar el agua de manera sostenible en todas las fuentes de agua, ya sea en reservorios superficiales o subterráneos. Los acuíferos subterráneos tienen un gran potencial para almacenar agua bajo tierra, lo que les otorga un valor relativamente excelente para la conservación de recursos.

Al mismo tiempo, su uso está plagado de serios problemas, particularmente donde no se conocen mediciones exactas de su ubicación, extensión y comportamiento. En este sentido, los avances en métodos técnicos como estudios geofísicos, hidrológicos, topográficos, geotécnicos y geológicos han servido para facilitar la identificación y caracterización temprana de estos sistemas, haciendo posible seleccionar mecanismos de gestión más eficientes con mayor eficacia.

No obstante, el control y la gestión adecuados del agua siguen siendo la columna vertebral de su preservación. No es un objetivo a alcanzar en un escenario imposible; sin embargo, se necesita una estrategia clara y continua a lo largo del tiempo para proteger las aguas subterráneas. La provisión de este recurso invaluable para las generaciones futuras es la única manera en que podemos ser tan responsables.

En el estado de Nuevo León, este problema se intensifica durante los periodos en los que la precipitación es baja o inexistente. Durante el año 2023, la sequía alcanzó niveles particularmente críticos, situación que se reflejó en las dificultades que enfrentaron, y que en algunos casos persisten, los habitantes del Área Metropolitana de Monterrey en relación con el acceso al agua. Este escenario pone de manifiesto la necesidad de analizar e implementar alternativas técnicas que contribuyan a atender de manera efectiva la escasez hídrica.

Dentro de este marco se localiza la región conocida como la Galería Los Elizondo, la cual limita al Sur con el municipio de Santiago, al Norte con el municipio de Monterrey, al Oeste con el municipio de Santa Catarina y al Este con el municipio de Guadalupe. En los últimos años, esta zona ha adquirido relevancia como espacio de investigación e innovación tecnológica, con un interés particular en el desarrollo de técnicas orientadas a la conservación del agua subterránea mediante la aplicación de la inyección profunda.

La técnica de inyección profunda se basa en la perforación de pozos para introducir agua hacia los acuíferos subterráneos, aprovechando excedentes que permanecen en superficie como resultado de la precipitación o de la escorrentía asociada con cuerpos de agua superficiales. Este procedimiento permite almacenar el recurso en depósitos naturales para su uso posterior durante periodos de sequía o de baja precipitación, contribuyendo así al abastecimiento tanto para el consumo humano como para las actividades agrícolas.

La investigación que se presenta tiene como propósito evaluar la factibilidad metodológica y tecnológica de la aplicación de la técnica de inyección profunda para la recarga de acuíferos en la región de la Galería Los Elizondo, ubicada en la ciudad de Monterrey. Para ello, se plantea la elaboración de una guía técnica que sirva de apoyo en la planeación y el diseño de esta alternativa, así como en su aplicación bajo criterios de control y viabilidad técnica.

Contar con una guía práctica para el uso de la técnica de inyección profunda en el llenado de fuentes de agua subterránea representa un aporte relevante para quienes participan en la planeación y gestión del recurso hídrico, al proporcionar lineamientos técnicos que apoyan la toma de decisiones frente al problema de la escasez de agua, especialmente en regiones donde la presión sobre el recurso se ha vuelto cada vez más evidente.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

La conservación de los recursos naturales ha venido a adquirir un papel protagónico dentro de las sociedades, razón por la cual se han implementado diferentes leyes y reglamentos para regular la utilización y el aprovechamiento consciente de estos recursos (Baggini, 2021). El ahorro del agua no ha escapado de estas regulaciones y actualmente existen normativas como lo es la Ley de Aguas Nacionales (1992), el Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales (2014), Normas Oficiales Mexicanas (2016) vigentes en el sector hídrico, estudios de impacto ambiental (Normatividad de las evaluaciones ambientales, 1999), reglamento de protección civil (Ley General de Protección Civil, 2020), cumplimiento con normativas estatales y locales, consulta con comunidades locales y registro de pozo. Todos ellos son datos que deben procesarse ante la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), que se encuentra en vigor y es esencial cumplirla de forma estricta, para garantizar así la conservación de este recurso.

En el caso de la Galería Los Elizondo, ubicada en el Área Metropolitana de Monterrey, se cuenta con infraestructura de inyección profunda asociada con la gestión del recurso hídrico, desarrollada en el marco de un proyecto institucional por Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey con fines de abastecimiento público. Es importante precisar que dicha infraestructura no fue diseñada, ejecutada ni operada por el autor de la presente investigación, y su utilización en este estudio se limita exclusivamente al análisis académico y técnico de la información generada durante su desarrollo.

Es de suma importancia que todos los grupos humanos, desde personas particulares hasta empresas, se hagan responsables del consumo de agua y eviten desperdiciarla, aplicando medidas para su conservación (González y Gil-Marín, 2020). Pequeñas acciones como evitar el goteo de grifos, disminuir el tiempo en la ducha y hacer uso de artefactos de bajo consumo, son cruciales para el aprovechamiento eficiente del agua (López-Barrera et al., 2017).

Por otro lado, las industrias también deben cumplir al pie de la letra las normativas vigentes antes mencionadas para evitar en la mayor medida posible la contaminación de

los yacimientos del vital líquido. Una colaboración conjunta asegurará su protección y la garantizará a las generaciones venideras.

Asimismo, se indican los elementos de un estudio que tiene como finalidad la elaboración de una guía para el uso de la técnica de inyección profunda en el llenado artificial de fuentes de agua subterránea. Para lograrlo fue necesario analizar diferentes factores de ingeniería, así como evaluar la efectividad de esta guía y su viabilidad. Esto surge de la necesidad de recargar el agua subterránea que es propensa a disminuir en los períodos de sequía o por la sobreexplotación.

En otras palabras, la guía que se presentará establece un procedimiento de pasos que se posicionan como una opción eficaz, viable y pertinente para el ahorro del agua y su sostenibilidad a futuro en las zonas con mayores necesidades debido a la carencia de este recurso, tal como es el caso de la región de la Galería Los Elizondo en Monterrey.

Se aspira otorgar una posible solución técnica y tecnológica a un problema real que actualmente ha afectado negativamente a la población del Área Metropolitana de Monterrey, especialmente en los periodos de baja pluviosidad. La sequía que experimentó la región mencionada a principios del año 2023 fue muy grave y ocasionó una gran crisis que no pasó desapercibida. Las autoridades estatales y municipales llevaron a cabo grandes esfuerzos para atender el problema de la falta de agua en esta zona, pero no fueron suficientes; las soluciones que han tratado de implementar no han dado resultados contundentes y las mismas dificultades respecto al vital líquido aún permanecen (Sosa y Constantino, 2023). Para comprender con mayor claridad la naturaleza de este problema, resulta necesario distinguir el tipo de sequía que afectó a la región.

La sequía es un fenómeno hidrológico y climático que puede manifestarse de distintas formas según el componente del sistema afectado. De manera general, se reconocen la sequía meteorológica, definida como un déficit significativo de precipitación respecto a los valores normales de largo plazo; la sequía agrícola, asociada con la insuficiencia de humedad en el suelo que afecta el desarrollo de la vegetación; la sequía hidrológica, relacionada con la disminución sostenida de caudales superficiales y niveles de almacenamiento subterráneo; y la sequía socioeconómica, que se presenta cuando la escasez de agua impacta de manera directa las actividades productivas y el bienestar

social (Heim, 2002). En el caso específico de la región de la Galería Los Elizondo y del Área Metropolitana de Monterrey, la crisis registrada durante el periodo 2022–2023 corresponde principalmente a una sequía de tipo meteorológico, ya que su origen se encuentra en la reducción anómala y persistente de la precipitación, sin que ello implique de manera inmediata un agotamiento estructural irreversible de los acuíferos. Esta distinción es relevante, dado que la sequía meteorológica constituye el primer eslabón en la cadena de impactos hidrológicos y proporciona el contexto climático bajo el cual se interpretan los análisis desarrollados en el presente estudio (Wilhite y Glantz, 1985).

Bajo este escenario climático, la escasez permanente de agua ha comenzado a manifestar diversas consecuencias y se ha convertido en una amenaza latente para los habitantes de la Galería Los Elizondo. Ante esta infortunada situación, se ha considerado necesario tomar medidas orientadas a impedir mayores afectaciones al bienestar poblacional y al medio ambiente, lo que refuerza la pertinencia de analizar alternativas técnicas que contribuyan a la conservación y recuperación del recurso hídrico (Pichardo, 2024).

De esta manera, se propone una solución novedosa que pueda contribuir a mitigar la crisis de agua que experimenta Monterrey. Las medidas que se pretenden implementar en esta investigación tienen alcance en el nivel local, regional y nacional, y pueden ser aplicadas en cualquier región donde el problema de escasez de agua sea evidente y se torne necesario ofrecer una solución.

La conservación de agua y almacenamiento a través de la recarga gira en torno a la adopción de prácticas de gestión que sean eficientes y sostenibles, la creación de fuentes alternativas para su abastecimiento, la implementación de técnicas de conservación y captación para el servicio y el fomento de campañas públicas dirigidas a la concienciación de su uso a baja y gran escala.

En términos generales, este estudio no pretende abolir los mecanismos ya existentes respecto a la conservación del agua, sino, al contrario, enriquecerlos y fortalecerlos para unir esfuerzos y atender de forma efectiva el problema que afecta al Área Metropolitana de Monterrey. Con las soluciones prácticas e innovadoras que se presentan en la guía propuesta se busca inspirar la colaboración y la acción entre las partes que se ven involucradas en la problemática de la escasez de la localidad, con la

intervención de entes ya sean locales, regionales o nacionales. Lo que se aspira es garantizar un futuro sostenible en esta región en cuanto a los recursos hídricos (CONAGUA, 2015).

Así pues, este estudio parte de un análisis del entorno y del aprovechamiento de los recursos a través de la utilización de diversas tecnologías que garanticen su sostenibilidad. De ahí, surge como objetivo de investigación diseñar una guía para el empleo de la técnica de inyección profunda en el llenado de acuíferos a través de fuentes naturales y externas.

El estudio se presentará en cuatro capítulos, los cuales muestran todo el proceso investigativo que se llevó a cabo para alcanzar el objetivo que se ha propuesto de crear el pozo de recarga y la guía de procesos como una propuesta. Tales capítulos se distribuyen de la siguiente manera:

En el primer capítulo se desglosan los elementos introductorios que establecen el marco conceptual de la temática y se contextualiza el estudio. Asimismo, se presentan los antecedentes que fundamentan la investigación y se delimita el problema específico que se pretende resolver. Luego se formula la hipótesis y los objetivos que se buscan establecer y que servirán para guiar el proceso investigativo.

El capítulo dos comprende una explicación técnica detallada de materiales, procedimientos y métodos aplicados que se utilizaron para sustentar la investigación. Ahí se encuentra el marco teórico del estudio y la metodología empleada para cumplir con los objetivos planteados.

El tercer capítulo presenta y analiza los resultados obtenidos durante la ejecución del proyecto de investigación, es decir, los procesos constructivos relacionados con la elaboración del pozo y el análisis crítico de los resultados.

En el cuarto capítulo se presentan las conclusiones obtenidas, a partir de los resultados de la investigación, así como las recomendaciones que el autor plantea posterior a ello, se incluirá un capítulo adicional que aborda la guía técnica de perforación del pozo de infiltración, con todas sus implicaciones para investigaciones similares futuras.

1.2 Antecedentes técnicos y científicos

Los antecedentes son aquellos trabajos previos que sirven de sustento a la investigación que se presenta, estos tienen relación directa con la temática a desarrollar. Tras una revisión bibliográfica se pudo constatar que existen documentos que también proponen soluciones para enfrentar el problema de la escasez de agua a través de guías y otros materiales para tal fin. A continuación, se presentan los más relevantes.

1.2.1 Internacionales

Un proyecto desarrollado en 2014 por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible), el cual se tituló *Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos*, su objetivo fue establecer directrices unificadas para el manejo del agua en Colombia; con esto se buscó solventar el problema que existe respecto al agua. Dicho proyecto se ejecutó bajo la modalidad de Proyecto Factible y su resultado más significativo fue la aplicación de estrategias y líneas de acción a la población sobre el manejo recurso hídrico (estableciendo un tiempo de vigencia de 12 años), lo que fortaleció en gran medida la gobernabilidad y la institucionalidad de los recursos dentro de ese país.

Este proyecto nació en consonancia con la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (2010), la cual pretendió dar respuesta ante la necesidad de una gestión de los recursos que fuera integral y sostenible, para que existiera concordancia entre el ciclo hidrológico y la interacción humana, así como de otros factores naturales. Así pues, lo más relevante de esta política fue establecer una armonía entre el desarrollo de las dinámicas naturales y las dinámicas de vida del ser humano.

Aporte

Esta guía que habla sobre la formulación de planes de manejo ambiental de acuíferos representa una oportunidad desde la experiencia de los previos investigadores para el estudio actual, ya que a través de ella se establece un patrón de desarrollo o modelaje de los contenidos que puede incluir una guía práctica. Debido a que este es el

propósito de la investigación, este ejemplo se posiciona como un aporte importantísimo que ejemplifica temas totalmente relacionados que deben tomarse en consideración.

Al momento de estudiar el acuífero, el mismo contiene criterios técnicos, procedimentales y metodológicos apegados a las leyes nacionales, es decir, con un marco normativo al cual debe regir cada uno de los métodos implementados. Su aporte es valioso para seguir un patrón similar aun cuando no se trata del mismo país. Pues bien, el estudio mencionado como antecedente fue desarrollado en Colombia; sin embargo, al desarrollar un estudio similar en México, cada uno de los episodios metodológicos que ellos consideraron servirá como un recurso tanto práctico como teórico para desarrollar procedimentalmente una solución comunitaria ambiental para la zona afectada.

Se tiene el estudio realizado por el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) en el año 2020, donde se propuso una Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas, la cual fue realizada con apoyo de la División Ambiental y Participación Ciudadana, en Chile. El propósito de este estudio se centró en establecer una referencia que permita la identificación de los elementos fundamentales que deben estar incluidos en la creación de modelos de aguas subterráneas en sus diferentes etapas. Esto con la finalidad de otorgar información importante para evaluar el funcionamiento de dichos modelos.

Para ello se realizó un estudio de campo, el cual arrojó como resultado más significativo el establecimiento de criterios de evaluación para rectificar la calidad y confiabilidad de los modelos que se creen por los responsables de aquellos proyectos que sean regidos por el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEA). Además de ello, facilitó a las autoridades estatales competentes el conocimiento sobre lo relacionado con las temáticas ambientales y la revisión eficaz de dichos modelos, lo cual mejora los estándares de evaluación ambiental dentro del territorio chileno.

Aporte

En este antecedente se habla específicamente del tema donde siguieron exactamente el mismo patrón de la actual investigación, es decir, trataron las aguas subterráneas y posteriormente crearon una guía en base a los contenidos que

acompañaron el desarrollo, la cual contenía todos los detalles de los alcances que lograron en el desarrollo de la investigación.

Uno de los aportes más resaltantes que tuvo este estudio se afianzó en cómo de manera gráfica describen todo el proyecto. Pues bien, consideran la normativa ambiental aplicable, consideran los riesgos y contingencias, consideran a su vez las características del levantamiento de la información, y ellos lo conectan con la predicción del impacto tanto cualitativa como cuantitativa y las áreas de influencia por componente.

Asimismo, se ve una consecuencia eficaz en la evaluación del impacto, incluyendo los planes de contingencia y emergencia y las medidas de manejo ambiental, es decir, medidas de mitigación, reparación o compensación. Son pasos necesarios para considerar una guía práctica; es decir, sugiere que aspectos han de considerarse de lo más general a lo más particular que va a describir una guía para próximos o futuros investigadores que le den continuidad a este tipo de estudios.

Por su parte, la investigación de Requesens (2022), titulada *Experiencia de Recarga Gestionada de Acuíferos en la Cuenca de Santiago (Chile): Lecciones Aprendidas Después de Dos Años de Operación*, surge como el siguiente antecedente. Tuvo como objetivo examinar la experiencia de recarga gestionada de acuíferos en la cuenca de Santiago de Chile. Este trabajo partió de la necesidad de dar respuestas a los problemas que se generan en la zona a causa de la sequía y el crecimiento demográfico. Se aplicaron técnicas referidas al funcionamiento de piscinas de infiltración y a la observación del comportamiento del agua en una zona arcillosa.

La investigación en cuestión dio como resultado el logro de la infiltración de 780.000 m³ de agua, con unas pérdidas por evaporación del 0,25%, y a pesar de que hubo algunos errores en las estimaciones del caudal, se llegó a la conclusión de que los métodos de funcionamiento y seguimiento fueron exitosos.

Aporte

El estudio que se acaba de mencionar como un antecedente tiene un gran aporte a la investigación actual, ya que habla específicamente de un tema de gran valor que es necesario tomar en cuenta al momento de realizar la guía. ¿Qué son los errores sísmicos de estimación de los caudales? Es decir, hay que considerar de manera muy específica

y cuidadosa todas las pruebas metodológicas, operacionales y de monitoreo que deban hacerse ante la elaboración exitosa del acuífero. Pues bien, errores de cálculo o de falta de cuidados importantes pudieran damnificar o dañar una excavación profunda, y poner en riesgo el líquido abundante que pueda reservar el acuífero.

Es así que considerar el buen desempeño de la infiltración que pueda tener la recarga gestionada sobre el acuífero será analizada y considerada de tal manera que la experiencia garantice el funcionamiento del acuífero al ser recargado sin riesgos de sufrir variables críticas como la colmatación, la formación de montículos y las tasas de infiltración. Estos detalles son realmente importantes, ya que pueden afectar la movilidad del agua dentro del acuífero y a su vez a los habitantes que consumirán la misma.

Como quinto y último antecedente se tiene la investigación de Opolenko (2022), cuyo título es *Potencialidad de Uso de Aguas Servidas para Riego y Recarga de Acuíferos: Cuenca del Río La Villa, República de Panamá*, su objetivo fue analizar la potencialidad de uso de aguas servidas para riego y recarga de acuíferos en la cuenca del río La Villa en Panamá. Para llevar a cabo dicha investigación se empleó un enfoque multidisciplinario, en el cual se tomaron en cuenta aspectos biofísicos y socioeconómicos.

Asimismo, dentro de la investigación referida se consideraron diferentes técnicas como la reutilización directa y la recarga superficial de acuíferos. Con esto se determinaron los niveles de remoción y se estimaron las propiedades hidrológicas, lo que permitió definir esa la zona acuífera con la capacidad de recibir agua de recarga.

Por otro lado, cabe destacar en este apartado que las tecnologías de inyección profunda poseen una larga historia, en especial en Estados Unidos, donde uno de los métodos con mayor relevancia para la recuperación y almacenamiento de aguas subterráneas es el Almacenamiento y Recuperación de Acuíferos (ASR).

Aporte

El estudio desarrollado en Panamá permite ampliar una visión de los diversos usos que se le pueden dar al acuífero y a las diversas recargas artificiales que puede tener el mismo a fin de que se logre una recuperación natural como una fuente alternativa de agua. Aun cuando el estudio actual no involucra remoción de contaminantes de las aguas

inyectadas a través de mecanismos naturales o artificiales, vale la pena considerar que la contaminación del agua puede ser un factor perjudicial que puede acontecer con una infiltración de recarga; es decir, se hace necesario tomar algunas medidas preventivas que puedan evitar tal fenómeno aun cuando no es el punto focal del estudio.

De acuerdo con Peña et al.(2016), la investigación lleva por título *Recarga Artificial de Acuífero en Alta Montaña, las Comunas de Santa Eulalia*. Por ser un estudio bastante similar al desarrollado, este hecho que tomó lugar en Perú, Lima, se considera como un antecedente donde utilizaron herramientas eficientes que integraron un recurso hídrico para la comunidad. Lo especial de este estudio es que fue en una zona montañosa donde el recurso es bastante escaso, y la forma de recargarlo es a través de la lluvia, por lo cual la técnica específica de recarga se llama inducción forzada, lo cual se considera que no es natural.

El estudio deja ver que la práctica de formación geológica se puede hacer en distintas condiciones. En este caso, se hizo en Santa Eulalia, donde el objetivo principal fue tener disponible el recurso hídrico para asegurar el bienestar de los centros poblados cercanos como Callahuanca, Chauca, San Pedro de Casta, Chaclla, recurso que deseaban garantizar durante todo el año a fin de poder contribuir con la seguridad hídrica de ese municipio de Lima llamado Metropolitano.

Aporte

El estudio considerado como un antecedente tiene un aporte significativo para la investigación. Pues bien, el acuífero fue desarrollado en una zona montañosa, lo cual significa que las recargas serán diferentes a otras zonas donde solamente se canaliza el recurso y puede ser recargado de manera natural. En este caso, la recarga artificial es una de sus características, y para el estudio actual el investigador desea aportar la recarga artificial como uno de sus aportes ante la investigación, por lo cual es bastante oportuno considerar los medios utilizados por estos investigadores para hacer la recarga externa del acuífero.

Pues bien, mencionan algunos ensayos de canales estratégicamente utilizados a fin de conducir las aguas de lluvia a una fuente principal. Esto conllevó en el estudio a utilizar zanjas de infiltración a través del suelo como un fenómeno de colmatación que

tiene lugar en el fondo de las zanjas y canales, y que a través del proceso de arrastre se logra mantener una recarga limpia, específicamente en épocas de lluvia. Esta técnica puede ser una sugerencia apropiada que se pueda aplicar ante la recarga artificial como un aporte a la investigación que beneficiará la comunidad.

1.2.2 Nacionales

Se tomó el trabajo de grado de Vanegas (2017), cuyo título es *Pozos de Inyección Profunda: Recarga Artificial de Acuíferos con Aguas Pluviales y Disminución de Inundaciones en el AMG, Guadalajara- México*. El objetivo central de este trabajo fue aplicar estrategias de inyección profunda para la disminución de los efectos negativos de la sobreexplotación de acuíferos, y evitar de esta manera las inundaciones en el Área Metropolitana de Guadalajara, México. Para llevarlo a cabo se utilizó un diseño experimental, donde se realizó la modelación de un pozo de inyección profunda, con el cual se demostró que es posible eliminar las inundaciones y recargar a su vez los acuíferos sobreexplotados.

Aporte

La investigación se vuelve un aporte necesario y significativo debido a que es desarrollada en el propio país, es decir, México. Así como también el estudio representa realidades a las cuales el estudio actual se está enfrentando, la cual es la sobreexplotación de acuíferos. Se considera de gran valor este estudio ya que en el país existe un problema generalizado, el cual está relacionado con la impermeabilización de los suelos con pavimento y edificaciones, lo cual ha provocado inundaciones en el país.

Tomar en consideración este estudio permite encontrar las posibles soluciones ante las mismas adversidades que se presentarán en el estudio actual, es decir, el estudio aporta un sondeo de 38 formas de penetración estándar, las cuales son posibles alternativas ante las inundaciones recurrentes que ocurren en México. Considerar la forma de infiltrar la cuenca y aprovechar la capacidad del pozo aún con estos problemas puede resultar un desafío. Sin embargo, ver cómo otros investigadores se han sobrepuesto al problema servirá también para tener ideas de cómo afrontarlo.

De acuerdo con Olivas (2022), la investigación denominada *Recarga Inducida de Acuíferos en Fraccionamiento Urbano en Chihuahua, México*, consideró problemas puntuales como capacidad, métodos de recarga, objetivo de la recarga, tiempo, y algunos otros factores de impacto tanto positivos como negativos que pudieran influir en la recarga artificial del pozo. Se planteó como objetivo general explicar los métodos de recarga inducida del acuífero, haciéndolo de manera fraccionada desde zonas estratégicas; los objetivos específicos del estudio estuvieron dirigidos a identificar las características hidrogeológicas de la ciudad, así como también caracterizar el desarrollo urbano.

Sucesivamente se debieron calcular variables requeridas a fin de ser interpretadas para el desarrollo de la recarga del acuífero, y finalmente obtener una aplicación de los distintos métodos de recarga inducida. Se utilizaron métodos específicos donde se habla de parámetros geomorfológicos e hidrogeológicos, y en los resultados se mostró una plataforma llamada inocua la cual sirvió para la modelación, evaluación y optimización técnica de los procesos.

Aporte

La investigación se basó en la recarga inducida de acuíferos en fraccionamientos urbanos en la zona poniente de la ciudad de Chihuahua. Este estudio habla específicamente de las recargas inducidas y considera la historia de la misma desde 60 años atrás. Este aspecto es sumamente significativo ya que ayuda a identificar la evolución tecnológica que han tenido tanto en el mundo como en el país, es decir, considerando aspectos puntuales que por supuesto, tienen un interés particular en el estudio actual.

Es importante este estudio ya que habla específicamente de la infiltración y los sistemas de recarga posteriores. Asimismo, habla de algunas características geográficas que deben considerarse, así como una serie de criterios amplios que tienen que ver con la geomorfología y los rasgos hidrogeológicos que guardan idoneidad con las decisiones de los métodos disponibles para la recarga.

De acuerdo con el estudio desarrollado por Boyas et al. (2021), el siguiente antecedente se refiere a la determinación de sitios potenciales de recarga artificial de

agua subterránea en los acuíferos que conforman la subregión Valle de México. La investigación se desarrolló con el propósito de encontrar las principales áreas cercanas al lago de Texcoco, el cual es un suelo habitacional con proyección de expansión en marcha urbana. Este tuvo como objetivo general determinar el uso del álgebra de mapas de zonas potenciales para la recarga artificial súper especial de los acuíferos que conforman la subregión Valle de México con la finalidad de contribuir a su manejo sustentable.

De manera consistente se plantearon los objetivos específicos que guardan relación con la caracterización de la zona, específicamente los componentes geográficos, climatológicos e hidrológicos a fin de poder conocer la dinámica del ciclo del agua del sistema, identificar variables importantes como la infiltración del agua subterránea en la zona de estudio, asignar variables en función de la relevancia del proceso de infiltración del agua subterránea, y finalmente identificar los sitios más adecuados para implementar los acuíferos. Explicaron en el desarrollo de la investigación que el álgebra de mapa es un método específico para la modelación espacial que se obtiene a través de algunas funciones aplicadas a una matriz o grupo de matrices, y muestran a su vez el gráfico con los respectivos cálculos que emite tal cuadrícula.

Aporte

El estudio consultado estaba dirigido específicamente a las estrategias utilizadas para la determinación del sitio donde se realizaría la recarga artificial del acuífero. Este terminó siendo un estudio nacional de México que tiene total relación con los procedimientos prácticos que se desarrollan en el estudio actual. Se pudieron encontrar aportes significativos con respecto a la determinación del lugar, como, por ejemplo; se deben considerar ciertos elementos clave. A partir de este estudio se pudo tener en cuenta que la pendiente de inclinación del lugar escogido, así como también la capacidad de infiltración y las precipitaciones son características determinantes para escoger la zona de ubicación. A esto se le llamó variable de peso y aun cuando no es el mismo lugar utilizado en esta investigación propia, se pudieron obtener variables de interés que fueron utilizadas en este mismo estudio.

De la misma forma, se consideraron algunas condiciones adversas que menciona el proyecto, así como la subsidencia en el terreno, la capacidad que tiene el mismo para agrietarse, elementos de importancia que también determinan el lugar. A través del análisis también se pudo percibir que existían otras variables como litología, densidad de drenaje, elementos estructurales, profundidad de agua subterránea, geomorfología, densidad de fractura y capacidad de infiltración; todos ellos tienen indicadores numéricos estadísticos que varían según diversos autores, donde establecen cuál es el mínimo aceptable para cada una de esas variables. Este fue un factor importante que se consideró al desarrollar la investigación a fin de verificar si las relaciones relativas de las variables que inciden en ese proceso de recarga artificial de agua subterránea estaban según lo sugerido por los expertos propuestos en este estudio.

Adquirir conocimientos a través de esta investigación que tenía relación con la recarga de agua subterránea permitió estar alerta y considerar variables que determinan el sitio potencial de la recarga artificial. Es de gran aporte encontrar estudios como este donde se favorece y esclarece determinantes importantes que guardan relación con la cantidad de agua que se puede almacenar a través de la infiltración y el flujo subterráneo.

De esta manera, Zaragoza (2019), en la investigación titulada *La recarga de Acuíferos: Análisis de su Estimación de Acuerdo con la Información Disponible*, aborda el caso del acuífero del Valle de San Juan del Río, Querétaro. El estudio tuvo como objetivo fundamentarse en la información técnica disponible sobre aguas subterráneas, particularmente en la generada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), con el propósito de desarrollar un análisis técnico. Asimismo, la investigación se orientó a la recopilación progresiva de métodos para la recarga de agua subterránea, incorporando cartografía, áreas de análisis, datos de pozos y registros de monitoreo de acuíferos previamente publicados.

La intención era integrarlos como un factor constituyente que permitiera estimar recargas de agua subterránea de forma eficiente, basándose en trabajos previos. Desde ese punto de vista, los investigadores hicieron énfasis en el acuífero del Valle de San Juan de Río y desde ahí desarrollaron explicaciones de las variaciones anuales de precipitación y profundidad que consideraban los últimos seis años. Consideraron desde el año 2012 al año 2017, hablando así de las variaciones mínimas y máximas de las

precipitaciones, así como también de la profundidad de nivel estático. Consideraron resultados publicados por las mismas entidades gubernamentales, los cuales habían sido censos de resultados previos de cambios de almacenamiento de información que abarcaron estimaciones puntuales. De manera técnica, se habla de 303.09 metros cúbicos y un mínimo de 296.6 metros cúbicos, los cuales fueron resultados satisfactorios que demostraron el método de balance establecido.

Aporte

La investigación desarrollada se considera un aporte valioso en primera instancia porque considera los organismos nacionales para afianzar el desarrollo técnico del trabajo de investigación dándole la importancia necesaria al fundamento legal que tiene el país. Asimismo, permite analizar que ante el desarrollo de cualquier práctica hidrológica como lo es la perforación de un pozo, debe hacerse un análisis previo a fin de considerar las evoluciones históricas que tiene el tema y las repercusiones técnicas que pudieran estarse involucrando en el desarrollo del mismo. Además, se hace importante considerar la fórmula del cálculo del cambio de almacenamiento a fin de ser aplicado para estimar los resultados de desarrollo físico, técnico, y metodológico del acuífero de recarga externa.

De acuerdo con lo expresado por la Alianza Latinoamericana de Fondos de Agua (2020), se desarrolló una investigación denominada *Estudio Hidrológico de Zonas de Recarga Acuífera para el Abastecimiento de Agua en la Ciudad de México*. La investigación fue cofinanciada por el Banco Interamericano de Desarrollo a través de la Alianza Latinoamericana de Fondos de Agua y también fue una iniciativa de la fundación de Fondo para la Defensa del Medio Ambiente Mundial (FMAM). El objetivo de la investigación estaba relacionado con los procesos hidrológicos e hidrogeológicos de la conservación del ecosistema de la cuenca de México.

Por ello desarrollaron algunas herramientas que permitían tomar decisiones para aplicar la inversión de los fondos que tenían destinado para este propósito, para ello, se plantearon como objetivos específicos identificar zonas de recarga de agua subterránea, donde a su vez hablaron de un área aproximada de 8,339 kilómetros cuadrados, y con una cantidad de cuatro a siete acuíferos administrados por CONAGUA. Para realizar el

análisis previamente establecido recabaron información relacionada con los suelos, vegetación, pendientes del terreno, precipitaciones de la cuenca y las características hidrológicas que identificarían el comportamiento de las variables de infiltración de agua de lluvia que posteriormente servirían para recargar los acuíferos de acuerdo a su localización.

Para ello utilizaron un análisis el cual abarcaba todas las variables antes mencionadas, y finalmente, obtuvieron como resultado una generación de mapas temáticos con el propósito de mostrar geográficamente las zonas de recarga divididas en bases potenciales a fin de permitir la infiltración del agua de lluvia a la recarga acuífera.

Aporte

Este proyecto tiene un gran aporte a la investigación presente debido a que muestra que existen técnicas de estudio previo que pueden llevar de una manera exitosa el agua de lluvia al acuífero, así como también habla de las variables existentes que deben ser consideradas como antecedentes para ser conectadas a la recarga integral del mismo. Es decir, deben existir casos previos que identifiquen las zonas más apropiadas para encontrar las aportaciones que puede hacer la lluvia ante los efectos del cambio climático que pueda tener la principal recarga del acuífero.

1.2.3 Locales

En Nuevo León se realizó un estudio por Murillo (1986), *denominado Estudio Hidrogeoquímico del Área Metropolitana de Monterrey*, fue presentado en el año 1986 como un trabajo de grado para optar al título de maestro en ciencias con especialidad en ingeniería y en la salud pública. El informe explica que se llevó a cabo para evaluar la calidad del acuífero de Monterrey en el área metropolitana y que también se necesitaba evaluar el agua de 156 pozos someros y profundos que constituían la región. De esos 156 se utilizaron la muestra de 58 las cuales se analizaron a través del laboratorio analítico de química de la facultad de Biología de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL).

El objetivo principal fue determinar si existían sólidos totales, PH, conductividad eléctrica, dureza total, alcalinidad y fenoltaleína, y por otra parte alcalinidad, bicarbonatos, sulfato, cloruro, Calcio, Magnesio, Sodio, y Potasio, así como elementos de desecho APHA, AAWWA Y WCF. Los objetivos de esta investigación fueron; clasificar al acuífero según los resultados obtenidos fisicoquímico, establecer una dirección de flujo del agua subterránea, conocer las posibilidades de recarga y de contaminación que tenía el acuífero y finalmente hacer ese análisis a fin de poder saber cuál de los pozos era el más apto para el consumo humano.

Finalmente, los resultados exponen una normativa de consumo de agua potable a fin de poder categorizar los pozos analizados. Se constituyó que el 80% de las muestras analizadas cumplirían los estándares establecidos para potabilizar el agua, por lo cual, se le estaba suministrando agua de buena calidad a Monterrey en el estado de Nuevo León.

Aporte

Esta investigación permite entender que el acuífero más allá de ser recargado artificial o naturalmente se debe considerar también algún otro proyecto que proporcione un análisis químico del agua a fin de poder garantizar que las personas que van a consumir dicho recurso hídrico se les pueda garantizar su estabilidad de salubridad. Es decir, que el análisis actual debería futuramente dársele continuidad a través de un estudio del agua para analizar las aguas subterráneas y las aguas inyectadas del acuífero.

El informe fue proyectado hacia un sistema de gestión sustentable del agua para los usuarios del Área Metropolitana de Monterrey, desarrollada por Monforte (2013), un ensayo de los factores socio ambientales, en la UANL. La cual consistió en mostrar de acuerdo con un estudio de caso, los efectos que componen la gestión sustentable del agua. Con el proyecto se propuso un marco contextual sobre los componentes económicos y ambientales; por ello, se elaboró una propuesta de gestión sustentable, la cual se basa en el consumo urbano para el sector domiciliario.

Asimismo, se planteó profundizar sobre el deterioro ambiental de la cuenca y hablar sobre los impactos hidrológicos que tiene el sector industrial y los servicios en el

uso del agua. Durante el estudio realizaron un diagnóstico de la cuenca, así como también se estudiaron las variables que están relacionadas con el control del agua, específicamente las aguas no contabilizadas que provienen de la lluvia. Mencionan las políticas de rentabilidad y sustentabilidad, así como también el consumo per cápita del agua responsablemente a utilizar. Finalmente llevaron a cabo una estimación de consumo específicamente bajo el escenario de la sustentabilidad de las condiciones actuales que se encontraron en la población, el ensayo lo estructuraron en seis capítulos donde incluyeron una cobertura de servicio específica para evaluar el volumen del agua, la forma en que disminuía y en que sería recargado.

De esta forma estructuraron así una tarifa para el control de la potabilización y el incentivo residual del agua a tratar. Concluyeron que el precio del agua que manejaban hasta ese momento era muy barato y que incluso era bien económico para los niveles más bajos, llegaron al acuerdo que podría hacerse un incremento del 40% del servicio y que el pago del agua debería representar por lo menos el 3% del ingreso familiar, así que también se debían implementar políticas de ahorro a fin de que las familias pudieran cuidar el recurso hídrico y de esta manera le dieran una subvaloración a la tarifa que pagaban.

Aporte

Esta investigación permite comprender que todo proyecto donde interviene un recurso natural o hídrico debe ir acompañado de un estudio socio ambiental a fin de hacer los ajustes necesarios, como en este caso pudieron ajustar el precio del recurso colocándolo en un 3% del ingreso familiar, Asimismo, la evaluación del recurso hídrico permite garantizar que se le esté garantizando a las familias comunitarias agua de calidad.

El estudio desarrollado por el investigador Lozano (1998), denominado *Localización, Construcción y Prueba de Pozo en una Falla Geológica de Dilución*, se hizo con el propósito de atender las fallas superficiales específicamente de profundidad en un caudal mayor de 5 litros por segundo, la cual está destinada para una población de 5500 habitantes. El propósito era servir a la población en favor de su bienestar, así como también aprovechar esa falla geológica a fin de poder localizar el volumen del agua

subterránea, por consiguiente, optimizar los procedimientos de localización, construcción y la prueba del pozo profundo, además de describir el funcionamiento del equipo de perforación del agua.

Finalmente optimizar el uso racional del recurso hídrico en esa zona, para ello estudiaron la hidrografía, clasificación del suelo, geología regional y todos los aspectos técnicos relacionados para poder hacer el diagnóstico profundo de la perforación por percusión. Asimismo, explican los procedimientos de perforación que llevaron a cabo, los materiales utilizados, el equipamiento destacando así las evidencias de cada uno de los procedimientos desarrollados. A su vez, explican cómo se comporta el pozo incluyendo las pruebas de bombeo del acuífero, así como también la calidad química del agua, aspecto que es sumamente importante para garantizar su calidad.

Aporte

El estudio permite ver lo amplia que fue la investigación. Pues bien, de manera detallada y precisa explica cómo realizan un diagnóstico y hacen la perforación del pozo, detallan el bombeo del agua a la comunidad e incluso incluyen el análisis químico del agua. Es decir, permite ampliar la visión de que la extracción del agua del acuífero va mucho más allá que solamente la perforación, sino que también puede implicar algunos otros proyectos donde se consoliden y amplíen todas las necesidades a fin de que queden cubiertas, lo cual brinda un servicio de calidad a la comunidad.

1.3 Planteamiento del problema a resolver

Una de las fuentes de agua dulce que cubre las necesidades de poblaciones, industrias y ecosistemas está constituida por el agua subterránea. Según Choi (2022), esta fuente hidrológica en el mundo abarca aproximadamente los cuatro billones de metros cúbicos. Particularmente las poblaciones ubicadas en las regiones septentrionales de México, específicamente los estados de Nuevo León, Coahuila, Chihuahua y Sonora, el agua subterránea desempeña un papel esencial en el abastecimiento hídrico, debido a que las fuentes superficiales son escasas o se encuentran contaminadas.

De acuerdo con datos recopilados de la CONAGUA (2023), el abastecimiento de agua potable se obtiene en 60 % de fuentes superficiales y 40 % de fuentes subterráneas, lo que resalta la importancia que tienen los acuíferos en la seguridad hídrica de este municipio.

No obstante, el calentamiento global y el cambio climático han generado aumento en la evapotranspiración, por lo que la profundidad de las aguas subterráneas ha ido en un aumento gradual con el pasar del tiempo. Desde finales del siglo XX se han registrado episodios recurrentes de sequías y escaseces hídricas, razón por la cual ha surgido la necesidad de crear, desarrollar y aplicar nuevos métodos y tecnologías para asegurar el abastecimiento de agua y la conservación de los recursos hídricos dentro del territorio mexicano (Campos J. , 1998).

En la actualidad se han sufrido los embates del cambio climático, colocando más que nunca al agua como un elemento esencial para la conservación de la vida y de las actividades humanas. Los acuíferos contienen los depósitos más significativos del mundo ya que existen y desempeñan un papel importante dentro de los ecosistemas en la adaptación proactiva de los seres humanos ante la constante variación del clima.

Para Ortiz Haro et al. (2023) ,el uso de los recursos hídricos subterráneos se debe establecer como una estrategia para enfrentar los cambios climáticos abruptos, lo cual es crucial no solo en México, sino en el nivel mundial. Estas fuentes de agua han adquirido relevancia en la actualidad y han desempeñado un rol preponderante en la regulación hídrica superficial y la cantidad de suelo, además, han tenido un papel fundamental en situaciones de sequías e inundaciones, garantizando la productividad alimentaria.

La sequía es un fenómeno natural que tiene un impacto negativo en diversos aspectos, tales como la agricultura, recursos hídricos, ecosistemas y la economía. Esta se produce dentro del ciclo hidrológico y es un problema común, pero cuando se presenta en altas magnitudes y de manera frecuencial, tiene repercusiones que afectan el desempeño habitual de las actividades dentro de las distintas poblaciones y sectores de la sociedad.

Para Yun (2023), este fenómeno ha aumentado recientemente debido al cambio climático que se vive en el mundo entero. La presencia de la sequía siempre trae consigo

consecuencias graves para la producción agrícola, la cual es altamente demandada debido al gran crecimiento económico y a las exigencias en la mejora de la calidad de vida.

En muchos casos, existe una sobreexplotación de las fuentes de agua subterránea, pues se consideran, según Yun (2023), un medio sistemático de abastecimiento de agua. Esto ocurre frecuentemente en los territorios donde hay escasez, y que además poseen sistemas inadecuados para suministrar el vital líquido, y cuyas fuentes de aguas superficiales son susceptibles al cambio climático.

Asimismo, el autor Brooks (2022), expone que la ciudad de Monterrey enfrenta problemas de hidrología urbana y cuenta con una población aproximada de 5 millones de habitantes, también se sabe que es una ciudad en con crecimiento demográfico acelerado. Por otro lado, una de sus características principales es el clima extremo y la sequía prolongada, por lo cual se acentúa un problema excesivo buscando frecuentemente la explotación de acuíferos para poder extraer agua subterránea de calidad y eficiente para la población.

El autor Brooks (2022) especifica que existe una gran demanda por el agua potable, la población con frecuencia busca resolver el problema que se tiene ya que es una ciudad industrial y la falta o carencia de esta impacta críticamente en el desarrollo económico de la población. Se considera que el agua es sumamente primordial para su crecimiento y vitalidad, por ello, han desarrollado muchos proyectos encaminados a hacer un diagnóstico de la carencia, para posteriormente plantear múltiples propuestas y poder mantenerla en el sector a través del almacenamiento en un acuífero.

Para la conservación de las aguas subterráneas se han implementado diversas técnicas, entre las más relevantes se encuentra la recarga artificial, la cual aumenta el volumen total de agua a través de la inyección del agua superficial, esta puede provenir de la lluvia, el agua reutilizada o de otras fuentes en el subsuelo. Para aplicar esta técnica Choi (2022) plantea que se deben instalar estructuras artificiales, tales como cuencas, humedales, canales, presas subterráneas e instalaciones de infiltración, esto con el fin de modificar las condiciones del terreno para poder inyectar el agua de forma artificial dentro de los acuíferos.

Este tipo de tecnología de inyección ha ganado terreno y se ha ido extendiendo en las zonas que se han visto más afectadas por los cambios climáticos y por el fenómeno de la sequía. Una de estas zonas ha sido la parte norte de México, en la cual se han tenido diversas problemáticas debido a esta razón. La técnica de la recarga artificial proporciona ventajas porque permite aprovechar el exceso de agua acumulada en la superficie o suelos durante los períodos de lluvia, infiltrándola en los acuíferos para ser usada posteriormente cuando llegan las temporadas secas.

Este método permite almacenar más agua de la que se logra acumular subterráneamente de forma natural. Además, Zheng et al. (2022), establece que con la recarga artificial se aprovechan las ventajas naturales de capacidad de depuración de los acuíferos. Las formas de llevar a cabo la recarga artificial pueden variar e incluir pozos de inyección, zanjas, cuencas de recarga, filtración de bancos, entre otros.

Por otro lado, es importante señalar las principales fuentes de agua que abastecen a la ciudad de Monterrey. En esta zona el agua que se suministra se extrae de fuentes superficiales y subterráneas. Dentro de las fuentes superficiales se encuentra la presa Rodrigo Gómez-La Boca, la cual se construyó en 1963 y se incorporó al sistema en el año 1965; la presa José López Portillo-Cerro Prieto, que funciona desde 1984, y la presa El Cuchillo-Solidaridad, habilitada desde 1994.

Por su parte, las fuentes subterráneas que funcionan en la actualidad se manifiestan por medio de pozos profundos entre 700 m y 1.000 m en Nuevo León, concretamente en Buenos Aires, Mina y el Área Metropolitana de Monterrey. También se encuentran pozos someros de menos de 100 m de profundidad, un manantial en la zona de la Estanzuela, tres túneles cerca de Cola de Caballo I y II, y una galería filtrante llamada San Francisco situada en La Huasteca (FAMM, 2018).

Sin embargo, a pesar de que en la zona de Monterrey existen diferentes fuentes de abastecimiento de agua, estas han reducido su capacidad de distribución debido a los efectos del cambio climático que se han comenzado a sentir, por lo que se puede notar la escasez del vital líquido en esa región. Fenómenos como tormentas crecientes y sequías severas (que se han hecho cada vez más frecuentes) han afectado negativamente el abastecimiento de agua en la zona metropolitana de Monterrey, por lo que la cantidad de estaciones encargadas de surtir agua no son suficientes, trayendo

como consecuencia la disminución en el abastecimiento del vital líquido, lo cual llega a convertirse en una situación crítica, tal como lo han planteado Lafragua (Campos A. , 2016). Ante esta situación surge la necesidad de sugerir una serie de acciones que brinden soluciones a esta problemática, quizás una de la más importante es aprovechar el aumento de registros de lluvias y de los niveles en lagos, embalses y acuíferos.

Según los datos proporcionados por la CONAGUA se han identificado 653 acuíferos, de los cuales el 24% presenta problemas de cualquier índole de los cuales 120 de ellos son afectadas por la sobreexplotación, 18 presentan intrusión marina y 32 tienen salinización del suelo.

Asimismo, López (2017) establece que en el territorio mexicano el 46% del agua se desperdicia a causa de fuga en las redes de abastecimiento; el 80% de los cuerpos de agua se encuentran en estado de contaminación por los vertidos industriales y solo 1 de cada 100 litros de agua de lluvia se recicla para actividades diversas. Este panorama ha traído como consecuencia que en el país haya más de 12 millones de personas que no tienen acceso al agua potable.

A esto se le añade el fenómeno de sequía por el que atravesó el país en 2023, a causa de la variabilidad climática. El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) afirma que, como consecuencia de esta sequía, en México se perdió 10% del Producto Interno Bruto (PIB), y establece un cálculo aproximado donde muestra que 48 millones de habitantes padecen consecuencias significativas por habitar en regiones áridas, semiáridas y secas, pues dicho fenómeno afecta a cuatro de cada cinco hectáreas.

Por su parte, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) (2022), destaca que los escenarios donde la escasez de agua es protagonista irán aumentando con mayor frecuencia y el fenómeno de la sequía se experimentará con mayor duración y severidad. Esta realidad coloca en un primer plano la necesidad de desarrollar políticas públicas adecuadas para atender la escasez de agua de una forma oportuna y preventiva.

Aparte de considerar las fuentes principales de agua y los panoramas que se han presentado a razón de la sequía, también es importante observar los rasgos de la población en el Área Metropolitana de Monterrey. De esa manera se puede identificar el

tipo de uso que se da al líquido vital, El Servicio de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM) establece que dentro de esta zona existe el tipo de uso doméstico, doméstico colectivo, comercial e industrial, así como el uso de agua potable por parte de instituciones benéficas públicas y privadas con reconocimiento social, por organismos públicos y por dependencias gubernamentales.

Saber las características de la población en relación con el uso y consumo de agua y su protección es de vital importancia para planear cualquier proyecto que disminuya o erradique la problemática a la que este territorio se enfrenta. Esto otorga un panorama claro para la evaluación analítica que debe aplicarse en materia de actividad económica y social a la hora de la ejecución de un proyecto. Además, permite tener conocimiento acerca de los requerimientos del servicio de agua potable a fin de tener claro qué planes o programas hídricos aplicar, así como estimar los recursos necesarios para llevarlos a cabo.

Otro aspecto importante de conocer las características poblacionales es que, según Lara (2021), posibilita anticipar factores de riesgo en el abastecimiento de agua, lo cual debe ser considerado dentro de cualquier diseño de políticas, proyectos o programas que se aspire aplicar en la población objeto de estudio.

Por otro lado, es importante hacer mención de algunos aspectos legales que dan prioridad al servicio de agua dentro de la población mexicana. En el artículo número cuatro de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (Congreso de los Estados Unidos Mexicanos, 2023), se establece que “Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible” (p.3). Y dentro del mismo artículo se especifica que “El estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos” (p.3).

Asimismo, el artículo 27 de la mencionada ley plantea que “La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional, corresponde originariamente a la Nación, la cual ha tenido y tiene el derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares.” (p.14).

Estos aspectos normativos demuestran que la población mexicana tiene el derecho de poseer un buen servicio de agua potable que cumpla con los requerimientos

para garantizar el abastecimiento de toda la población. Además, demuestra que la Nación puede otorgar el derecho a cualquier persona sobre la propiedad de tierras y fuentes de agua, por lo que se entiende que, si algún particular desea ejecutar algún proyecto para recuperar o crear alguna fuente de agua, tendrá un respaldo gubernamental. Por lo que la presente investigación quedaría amparada.

De acuerdo con Ita (2019) y con estudios consultados sobre el estado de Nuevo León, la problemática del agua presenta un carácter histórico y estructural, ya que afecta de manera general al país, al ámbito estatal y, de forma particularmente crítica, al municipio de Monterrey. Esta situación ha evidenciado, a lo largo del tiempo, la necesidad de implementar soluciones sustentables e integrales orientadas a garantizar la seguridad hídrica. Si bien durante décadas se han realizado diversos esfuerzos institucionales y técnicos para atender dicha problemática, en la actualidad persisten secuelas derivadas de problemas que no han sido resueltos de manera integral, lo que refleja limitaciones en la gestión, planificación y aprovechamiento sostenible del recurso hídrico.

En el área metropolitana de Monterrey, el problema de la escasez de agua es un fenómeno tanto estructural como multifactorial, el cual está derivado de la interacción que hay entre presiones antrópicas y procesos ambientales de alcance nacional, regional, e internacional. La sobreexplotación sostenida de los recursos hídricos subterráneos y superficiales ha superado significativamente las tasas naturales de recarga, lo cual hace que se comprometa la disponibilidad de agua y reduce tanto la seguridad hídrica como el bienestar social. Esto empeora debido a los efectos del cambio climático, los cuales se muestran en mayor variabilidad hidrológica, periodos largos de sequía, y en la disminución en la precipitación efectiva, lo cual tiene como consecuencia que se incremente la vulnerabilidad del sistema urbano. Por otro lado, la contaminación de los cuerpos de agua, asociada a las descargas industriales, aportes de aguas residuales y acumulación de residuos sólidos, deterioran la calidad del recurso hídrico y hace que sus usos potenciales estén limitados.

Adicional a ello, se le suman deficiencias en la gestión del agua y la participación ciudadana insuficiente, lo cual favorece el desperdicio, dificulta la adopción de prácticas sostenibles y obstaculiza la implementación de soluciones como el consumo responsable

y las iniciativas comunitarias. Esta problemática subraya la necesidad que existe de implementar enfoques integrales que articulen la protección ambiental con criterios de justicia social y equidad, reconociendo el acceso al agua como un elemento central para la sostenibilidad territorial y para la calidad de vida.

En conjunto, esta problemática subraya la necesidad de enfoques integrales que articulen la protección ambiental con criterios de justicia social y equidad, reconociendo el acceso al agua como un elemento central para la sostenibilidad territorial y la calidad de vida.

Todos estos problemas requieren solución, sin embargo, en Nuevo León el problema del agua ha sido algo que ha permanecido por años y se ha tratado desde diferentes formas, no obstante, algunas soluciones han sido temporales y aun se necesita brindar mayores oportunidades para saldar ante la participación ciudadana y comunitaria esta dificultad.

El problema de la sequía y el cambio climático en Nuevo León ha sido una situación de amenaza seria para sus pobladores, y aun cuando se han adoptado algunas medidas firmes se sigue teniendo la consecuencia de no tener una vida humana sin la carencia de este vital líquido. Pues bien, el acceso limitado al agua debido a las condiciones ambientales y al calentamiento global han sido factores que se han combinado para que en la actualidad el riesgo y las consecuencias de no tener el vital líquido se agudicen de manera permanente, se manifiesta que han existido movimientos sociales que han acaparado el interés de la población a fin de poder solucionar los problemas colectivos que afrontan. Uno de los movimientos que han creado con este propósito se llama “No a Monterrey VI, sí al agua para todos” (Asamblea Ciudadana en Defensa del Agua y la Vida, 2016).

Este movimiento ha sido un grupo de asociaciones civiles, especialistas y académicos que lo han conformado con el objetivo de construir acordes, específicamente llevar información sobre los proyectos hidráulicos de Monterrey y así poder contemplar acciones eficientes a bajo costo para mejorar el problema del agua. Se han establecido a través de este proyecto acuerdos para crear acueductos costeados por las empresas privadas y por órganos del gobierno debido al elevado valor de inversión. A través de estos movimientos se protege el agua conservada en acuíferos que en algunas

ocasiones ha sido contaminada y ha puesto en riesgo la salud de los habitantes, así como también el riesgo de la fauna y la flora (CONAGUA, 2024).

Ahora bien, el punto de partida del estudio que se presenta está enfocado en la recarga de acuíferos a través de la técnica de inyección profunda en la población de Monterrey, específicamente el caso la Galería Los Elizondo. Considerando esto es pertinente tomar en cuenta la información referida a los acuíferos, definidos como:

El conjunto de rocas que permiten la permeabilidad del agua y la pueden acumular en sus poros o grietas. A esta agua retenida en las estructuras rocosas se le conoce como agua subterránea y puede llegar a presentar manifestaciones de hasta dos millones de kilómetros cuadrados de tamaño (Gross, 2019).

La formación de los acuíferos naturales se genera cuando se absorbe el agua producto de las lluvias a través de la superficie terrestre. Este proceso se genera porque el suelo (donde predomina la presencia de arena o arcilla) es permeable, por lo que la penetración del agua no es dificultosa. Los acuíferos son de gran importancia para los ecosistemas, ya que constituyen una fuente de agua importante para el desarrollo de la vida de la flora, la fauna y los seres humanos.

CONAGUA es la encargada de gestionar los acuíferos en México, su responsabilidad es garantizar la utilización sostenible de estos recursos. Esta tarea lleva consigo prestar atención a los niveles en las reservas de agua subterránea, regular su utilización y asegurar que no se agoten, a través de múltiples esfuerzos de conservación.

No es exagerado el nivel de relevancia que tienen los acuíferos en el territorio mexicano, estos son una fuente agua segura para fines agrícolas, industriales y domésticos. Por este motivo, se torna importante que se utilicen responsablemente para evitar daños al medio ambiente y no agotar estas fuentes de agua. Es necesario entonces utilizarlos con prudencia y colaborar en conjunto para garantizar la conservación y sostenibilidad de los acuíferos del país, especialmente de la zona de Monterrey que es la que atañe a esta investigación.

El manejo y uso de las aguas subterráneas también tiene un fundamento constitucional en México, pues en el párrafo quinto del artículo 27 de la suprema ley se establece que "Las aguas subterráneas podrán ser extraídas y apropiadas artificialmente por el propietario, pero cuando lo exija el interés público o se afecten otros usos, el

Ejecutivo Federal podrá regular su extracción y aprovechamiento, e incluso establecer zonas de restricción." (Congreso de los Estados Unidos Mexicanos, 2023).

En otras palabras, la disposición de las aguas subterráneas está garantizada, siempre y cuando se cumplan las normativas y las disposiciones legales vigentes de cada territorio. De esta forma, los fundamentos de esta investigación tienen total respaldo del mandato constitucional, puesto que se centra en la gestión de aguas subterráneas.

Lo anteriormente descrito abre un amplio panorama para entender la problemática objeto de estudio, como se pudo constatar, la sequía como fenómeno afecta a muchas regiones del mundo. Para desarrollar la presente investigación se tomó específicamente la zona de la Galería de los Elizondo, ubicada en Monterrey, dentro del estado de Nuevo León. Ahí la sequía se ha abierto camino y sus consecuencias más significativas se evidenciaron en el periodo de estiaje en el año 2023, de acuerdo con los registros oficiales sobre disponibilidad y condición de los acuíferos en el estado (CONAGUA, 2024).

La situación hídrica en este territorio no puede pasar desapercibida, ya que afecta a un gran número de habitantes, así como a las diversas actividades económicas, sociales e industriales que se realizan en la zona. La escasez de agua ha dado evidencias de la vulnerabilidad del sistema hídrico, específicamente frente a periodos prolongados de sequía.

Debido a esto, el Gobierno del Estado realizó diversas acciones orientadas a mitigar la crisis, algunas de ellas son: inversiones significativas en infraestructura hídrica, como la perforación de pozos profundos y la finalización de la Presa Libertad para mejorar el abastecimiento del Área Metropolitana de Monterrey (Gobierno del Estado de Nuevo León, 2022),). Lamentablemente, estas medidas no fueron suficientes para contrarrestar los efectos de la sequía, por lo que la población sigue sufriendo sus efectos.

Este problema empeoró en gran medida durante el año 2022, cuando el estado de Nuevo León enfrentó la peor crisis hídrica de los últimos 30 años. El autor González (2023) habla de que los niveles de almacenamiento de las presas Cerro Prieto y La Boca descendieron de forma crítica alcanzando valores por debajo del 5 % de su capacidad, lo que evidenció la magnitud del problema y la necesidad de estrategias adicionales y sostenibles para garantizar la seguridad hídrica del estado.

Por lo anterior, las condiciones climáticas tomaron un papel muy importante, ya que se presentó una gran diferencia entre la evapotranspiración potencial y la disponibilidad real de agua en el suelo, lo cual hizo que se generara un déficit hídrico significativo. Esto es documentado y analizado mediante boletines geográficos, los cuales son informes oficiales que difunden información geoespacial, climática, ambiental o territorial, basada en datos oficiales, mediciones sistemáticas y análisis técnicos (Gobierno de México , 2021).

El Servicio Meteorológico Nacional, dependiente de la Comisión Nacional del Agua, elabora y difunde estos boletines, gracias a ellos los niveles de sequía han sido considerados y según los dictámenes meteorológicos este déficit de precipitaciones evita que el flujo de agua en la superficie y en el subsuelo tengan fechas cronológicas determinadas para darle fin a la sequía y mantener un clima natural con menos impactos ambientales asociados a dicho fenómeno (SMN, 2024).

La responsabilidad de solucionar las dificultades que surgen en relación con el abastecimiento de agua dentro de las zonas urbanas no puede recaer solamente sobre los entes gubernamentales. De forma particular, cada institución, empresa e incluso persona, puede proponer posibles soluciones. El estudio que se presenta tiene como foco una investigación científica que pueda surgir como una solución que sea posible poner en práctica por ingenieros, especialistas, científicos, investigadores y profesionales en áreas afines en proyectos similares.

Con esto se pretende crear una guía para emplear la técnica de inyección profunda para el almacenamiento del agua producto de la lluvia. Para llevar a cabo esta propuesta es importante tomar en cuenta los fenómenos hidrológicos, pues estos permiten determinar la cantidad de agua superficial que estaría a disposición a la hora de realizar la recarga, para esto hay que considerar las características del suelo, la vegetación y la topografía.

Las condiciones del suelo determinan la velocidad de infiltración; la cubierta vegetal disminuye la erosión del suelo, intercepta las precipitaciones, disminuye la escorrentía y facilita la infiltración del agua. Mientras que la topografía es fundamental para identificar las cantidades disponibles de agua superficial. Asimismo, es necesario estudiar el periodo de retorno, el cual es visto como el tiempo medio entre las ocurrencias

de una tormenta. Para Ramos, et al., (2005) entender los factores antes descritos cobra importancia para gestionar eficazmente los recursos hídricos y ayuda en la protección ante fenómenos meteorológicos los cuales pueden tener consecuencias extremas.

Debido a ello, dicho entendimiento tiene significativa relevancia para el diseño de la recarga de acuíferos, ya que facilita la identificación de condiciones favorables para una adecuada infiltración del agua, y por otro lado, el aprovechamiento de los excedentes pluviales. Esto contribuye tanto a la reducción del déficit de agua subterránea, así como a mitigar efectos asociados a los escurrimientos superficiales excesivos.

Además de esto, la construcción de la guía que se propone en ese estudio, también se basa en todo lo referido a los pasos, el equipo, las herramientas estadísticas y matemáticas, y en cualquier otro elemento para evaluar la factibilidad de emplear la inyección profunda en la recarga artificial, y garantizar así un mejor abastecimiento con agua de calidad.

A través de dicha guía se busca contribuir con la sostenibilidad de las reservas de agua subterránea en la Galería Los Elizondo, las cuales pueden abastecer a la zona metropolitana de Monterrey, la cual experimentó una gran sequía en el año 2023, (Sosa y Constantino, 2023). Dentro de dicha guía se analizarán los elementos técnicos fundamentales para conservar las reservas de agua subterránea y darles un uso sustentable. Asimismo, incluirá estrategias de diseño y las evaluaciones geológicas que se crean pertinentes.

Una vez descrita la problemática que experimenta la población objeto de estudio y de conocer las condiciones necesarias del territorio para aplicar una posible solución, es importante señalar las interrogantes de la investigación a las cuales se aspira dar respuesta, estas se presentan a continuación.

Generales

¿De qué manera la aplicación de una guía práctica para el llenado sostenible de yacimientos de agua subterránea mediante la técnica de inyección profunda puede contribuir a disminuir los efectos de la sequía en la Galería Los Elizondo, ubicada en Monterrey, Nuevo León, México?

Específicas

- ¿Cuál es la factibilidad técnica de mantener abastecidas las reservas de agua subterránea mediante la aplicación de técnicas de ingeniería, particularmente la inyección profunda?
- ¿Qué alternativas de ingeniería pueden implementarse para reducir los efectos de la sequía mediante la recarga artificial de acuíferos?
- ¿Cuáles son las condiciones geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas necesarias para aplicar de manera efectiva la técnica de inyección profunda en la conservación de las aguas subterráneas?
- ¿Qué procedimientos de ingeniería son requeridos para la implementación segura y eficiente de la técnica de inyección profunda en yacimientos de agua subterránea?
- ¿Qué criterios geotécnicos e hidrogeológicos permiten determinar los puntos óptimos para la aplicación de la técnica de inyección profunda?
- ¿Qué aspectos técnicos, normativos y operativos deben considerarse para elaborar una guía práctica que regule la aplicación de la técnica de inyección profunda en la recarga de acuíferos?
- ¿Cuáles son las principales ventajas, limitaciones y resultados esperados de la aplicación de una guía práctica basada en la técnica de inyección profunda para la recarga de acuíferos en la región de Monterrey?

1.4 Justificación

La investigación que se presenta se fundamenta en varios aspectos que determinan su importancia, por lo que se puede justificar desde diferentes visiones.

1.4.1 Justificación técnica

La escasez de agua se ha convertido en un problema creciente en varias regiones del mundo, incluyendo Monterrey, Nuevo León, donde ha aumentado la demanda de agua y se ha visto acompañado de periodos extensos de sequía. La recarga de acuíferos

a través de la técnica de inyección profunda se plantea como una alternativa técnicamente viable para la gestión del recurso hídrico en el noreste de México, ya que ayuda al aprovechamiento y almacenamiento de las aguas subterráneas en periodos drásticos de sequía.

El carácter innovador de esta investigación no se inclina en la inexistencia de la técnica en previas investigaciones, si no en que, hasta hoy en día, no existen guías desarrolladas para la recarga de acuíferos mediante inyección profunda en ambientes kársticos en el noreste de México. Por otro lado, también adapta los criterios tanto geológicos, geofísicos, hidrogeoquímicos, geotécnicos, así como hidrológicos en un procedimiento que permita su adecuada operación.

Crear esta guía ayudará a mantener los recursos de agua. Esto significa que la técnica de inyección de agua permite recargar el acuífero de forma controlada y eficiente, evitando pérdidas que podrían ocurrir. Utilizar esta fuente de recurso hídrico local mejoraría la disponibilidad del agua durante los periodos de escasez.

También la mejora de la calidad del agua: la inyección profunda puede ayudar a prevenir la inclusión de aguas de zonas vulnerables; por lo tanto, podrá mantenerse los niveles de agua subterránea que protegerán su calidad y evitarán la contaminación con otros recursos hídricos que pudieran estar aledaños.

Adicional a ello, al crear esta innovación científica, se vuelve flexible la implementación, ya que la técnica puede adaptarse a diferentes contextos geológicos y climáticos, lo que convierte esto en una opción viable ante la variedad del entorno, incluyendo la zona kárstica como la Galería Los Elizondo.

De la misma forma, el uso de herramientas estadísticas y técnicas de ingeniería sofisticada en el diseño y ejecución del proceso de investigación asegura que se seleccionan los sitios más adecuados para la inyección y optimización de los recursos.

1.4.2 Justificación económica

La investigación suele ser una solución frente a la crisis de agua que conlleva altos costos económicos. La falta de acceso confiable al agua potable impacta negativamente en la salud pública, la productividad agrícola y el desarrollo industrial. Invertir en la

recarga de acuíferos puede reducir estos costos, ofreciendo un retorno significativo sobre la inversión.

Asimismo, los costos de obtención de este vital líquido a largo plazo con implementación de este pozo de inyección profunda serían disminuidos en los procesos de escasez de agua, incluso podría complementarse si se llegará a desarrollar otro estudio u otra investigación. De igual manera sus costos serían menores; tratándose de que el agua se encuentra a disposición y garantizando el suministro confiable.

Otro factor relevante que se vería incluido en el desarrollo investigativo es el aumento del valor de la propiedad. Un acceso confiable y sostenible al agua puede incrementar el valor de las propiedades en la región, lo que beneficia tanto a los propietarios como a las municipalidades mediante un mayor ingreso fiscal.

Asimismo, a través de un programa de financiamiento y sus menciones, se vería en creciente interés por parte de entidades gubernamentales y organismos internacionales para el abordaje de la sostenibilidad del agua en la región. La implementación de este estudio podría abrir oportunidades para obtener fondos adicionales que puedan ayudar a cubrir los costos iniciales como lo son los operativos.

Por último, la mejora de la disponibilidad del agua traerá beneficios directos e indirectos. Puede afectar positivamente la agricultura al reducir costos y aumentar la producción. También fomentará el crecimiento del turismo y de las industrias que dependen de un suministro adecuado de agua.

1.4.3 Magnitud del impacto

Es de suma importancia determinar la magnitud del impacto que podría generar la implementación de una solución frente a una problemática que actualmente afecta a la mayor parte de la población del estado de Nuevo León y en específico a la del municipio de Monterrey. De acuerdo con información reciente, en el estado existen aproximadamente 390,000 hectáreas destinadas a las actividades de agricultura, por lo cual se manifiesta la relevancia estratégica del recurso hídrico tanto para el riego como para la productividad del sector (INEGI, 2022). Por ende, la dependencia de estas superficies agrícolas del suministro de agua hace que se incremente la vulnerabilidad

ante periodos prolongados de sequía, lo cual acentúa los efectos negativos sobre la producción y la seguridad hídrica de la región (SIAP, 2023).

Es relevante destacar que las consecuencias de la sequía no están presentes solamente dentro del aspecto agrícola, pues la población urbana también sufre los estragos de este fenómeno, tal como es el caso de los habitantes del Área Metropolitana de Monterrey, la cual se hace vulnerable cuando pasa por esta situación. Esta población se ve afectada desde lo físico, socioeconómico y medioambiental a causa de la sequía, y los factores que influyen en estos aspectos son complejos y de diversa índole. De parte que el proponer una solución para resolver esta problemática tendrá un impacto positivo dentro de la región.

Debido a lo anterior, en el presente documento se plantea la necesidad que existe de implementar diversas estrategias que den la posibilidad de enfrentar de maneras efectivas los efectos de la sequía, tanto en la agricultura como en la población urbana. Una estrategia es la recarga de acuíferos mediante técnicas de inyección profunda ya que favorece el almacenamiento de agua subterránea y ayuda a fortalecer los sistemas de abastecimiento. Dicha técnica permite complementar otro tipo de acciones del manejo del recurso hídrico, lo que ayuda a reducir la vulnerabilidad ante periodos prolongados de sequía, y adicional a ello, a mejorar la resiliencia hídrica de la región (World Meteorological Organization, 2016).

Asimismo, se pueden llevar a cabo diferentes cambios, desde el ámbito político, que pueda mejorar la sustentabilidad de los recursos hídricos para que el líquido vital se mantenga aún en los periodos de sequía. Estos cambios pueden darse a nivel local, estatal y regional, y pueden lograrse a partir de la adopción de un enfoque proactivo e integral en el manejo del agua. Esto sería provechoso para el mantenimiento del sector agrícola y la mejora de las condiciones de vida de los habitantes del estado de Nuevo León.

1.4.4 Relevancia científica

Históricamente en el municipio de Monterrey, la gestión del recurso hídrico se ha basado principalmente de la infraestructura como son las presas, embalses,

transferencia de agua entre cuencas, fuentes superficiales, entre otras; sin embargo, estos enfoques requieren ser complementados por alternativas innovadoras y sostenibles.

En este aspecto se muestra la importancia de hacer frente a las amenazas de la sequía a través de alternativas de conservación y uso sustentable del agua. Esta necesidad resulta aún más relevante ante la creciente frecuencia e intensidad de los efectos del cambio climático, lo cual deja en evidencia que los métodos aplicados tradicionalmente para la gestión del agua muchas veces no son suficientes para satisfacer la demanda actual, ya que la población aumenta, así como también sus necesidades. Debido a esto, el papel de la ingeniería en el desarrollo de soluciones relacionadas con el aprovechamiento de las aguas subterráneas es de suma importancia, ya que representa una alternativa estratégica que fortalece la seguridad hídrica (Gleeson et al., 2020)..

Los proyectos que se centran en conservar los acuíferos subterráneos son relevantes para el aprovechamiento del agua, y se posicionan como una solución innovadora dentro de la ingeniería. Por ello, es necesario explorar las opciones que otorgan estos proyectos, una de ellas es la técnica de la recarga artificial, la cual se trata de reponer los acuíferos agotados a través de la inyección de agua tratada en subsuelo. Este método es el que se aplica en este estudio dentro del estado de Nuevo León, y cobra importancia porque a través de él se mantiene el nivel freático y se evita la sobreexplotación del agua subterránea.

1.4.5 Trascendencia

Una de las oportunidades que tendrá la guía de elaboración de recarga de acuíferos mediante el pozo de inyección profunda en ambientes kársticos es la trascendencia de saciedad, de ayuda y de contribución a los moradores de este sector que brindará bienestar, menos preocupación y mejor calidad de vida. La guía se transforma en mucho más que un pozo de recarga; se transforma en una solución ante el problema de la sequía. Asimismo, permite mantener el recurso hídrico en un lugar seguro y disponible para la necesidad de los habitantes, por ello garantiza la integridad

del ecosistema de la región. Además, se considera que es un valioso recurso y técnica implementada para el reabastecimiento del líquido vital.

Así mismo, desarrollar esta guía permitirá condensar el conocimiento técnico sobre la instalación y operación del pozo, así como también considerar el monitoreo de los efectos del entorno, pudiendo realizar cambios prácticos. Por ello, otra trascendencia que se puede mencionar es servir de base para el desarrollo de políticas hídricas locales y nacionales. Además de ello, los hallazgos de la investigación pueden ser publicados en una revista especializada, lo que permitirá que la información trascienda a otros ámbitos y que las soluciones que se proponen puedan ser aplicadas por los especialistas en el área para hacer frente a las diferentes demandas poblacionales en las zonas que requieran atención en cuanto al manejo y conservación de aguas subterráneas.

1.4.6 Factibilidad

Se consideró la factibilidad de la investigación dado a las fuentes de información bibliográfica y hemerográfica en donde se especifica el uso de las técnicas que se proponen, las cuales sirvieron de base para diseñar la guía que constituye el objetivo de estudio. Además de ello, se tomó en cuenta la experiencia del autor en cuanto a la realización de proyectos referidos a la aplicación de la técnica de inyección profunda en acuíferos.

Considerando los aspectos antes descritos, la investigación que se presenta se justifica y se vuelve importante para disminuir la baja de los niveles en los acuíferos, aplicando una técnica para el llenado artificial de aguas subterráneas en la Galería Los Elizondo. Sin embargo, esto no es del todo posible sin el diseño de una guía donde se expliquen los puntos focales que se deben considerar para lograr la infiltración de agua a través de la técnica de inyección profunda, lo que permite conservar los niveles de agua subterránea. De esta manera, dicha propuesta cobra importancia debido a las necesidades que tiene la población objeto de estudio a causa de la sequía. Además, de que representa un impacto significativo y trascendente dentro de lo social y lo investigativo.

1.4.7 Factibilidad técnica

La factibilidad técnica se refiere a la habilidad que hay para llevar a cabo la idea de crear una guía técnica sobre cómo hacer un pozo de inyección profunda para los usuarios. En primer lugar, se debe mencionar que la industria privada y los entes gubernamentales han gestionado la tecnología y los recursos necesarios para implementar este proyecto.

Por lo tanto, será posible obtener los recursos económicos necesarios para desarrollar esta investigación. En otras palabras, son recursos que no extrae o subsidia el investigador, sino empresas privadas que tienen acuerdo con el gobierno. Estas empresas han gestionado inversiones con anterioridad en proyectos del mismo tipo.

Subsiguientemente, estos costos se consideran viables debido a que, aun cuando no se tiene el valor exacto de la inversión, podrá ser cubierto en su totalidad. Por otro lado, es importante señalar que las empresas adjudicatarias de la licitación han cumplido con las normativas y regulaciones a las cuales deben estar asociadas, consideradas y aprobadas para la ejecución del proyecto.

1.5 Hipótesis general

La aplicación de una guía técnica para la recarga artificial de acuíferos mediante la técnica de inyección profunda, sustentada en una caracterización integral del sistema acuífero en la Galería Los Elizondo, contribuye a una gestión más eficiente del agua subterránea bajo condiciones de escasez hídrica en la región de Monterrey, Nuevo León, México.

1.5.1 Hipótesis específicas

- El uso de técnicas de ingeniería de inyección profunda permitirá mantener las reservas de agua subterránea en la Galería Los Elizondo durante periodos prolongados de sequía.
- El análisis geológico, geotécnico e hidrogeológico del terreno permitirá identificar los sitios óptimos para la inyección profunda, garantizando la eficiencia y seguridad del proceso de recarga artificial.

- La implementación de un conjunto de procedimientos técnicos estandarizados favorecerá la ejecución segura, controlada y sostenible del llenado de acuíferos mediante inyección profunda.
- La formulación de un marco técnico-metodológico sobre la inyección profunda mejorará la gestión del agua subterránea y fortalecerá la resiliencia hídrica en la región de Monterrey, contribuyendo al manejo sostenible de los recursos subterráneos.

1.6 Objetivos

A continuación, se presenta el objetivo general y los específicos que se establecieron dentro de la investigación:

1.6.1 General

- Proponer una guía técnico-metodológica para la recarga artificial de acuíferos mediante la técnica de inyección profunda, sustentada en la caracterización integrada hidrogeológica, hidrológica y geotécnica del sistema acuífero de la Galería Los Elizondo, orientada a fortalecer la gestión sostenible del agua subterránea bajo escenarios de escasez hídrica asociados a condiciones regionales de sequía en el área metropolitana de Monterrey, Nuevo León, México.

1.6.2 Específicos

Etapas 1. Diagnóstico y caracterización

- Analizar la factibilidad de conservar las reservas de agua subterránea mediante técnicas de ingeniería e hidrogeología.
- Evaluar las condiciones geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas del terreno y las características hidráulicas del subsuelo, con el fin de determinar la viabilidad técnica de la inyección profunda.

Etapas 2. Diseño técnico

- Describir y adaptar los procedimientos de ingeniería documentados en la literatura técnica y en la práctica especializada para la aplicación de la técnica de inyección

profunda en yacimientos de agua subterránea, integrándolos a las condiciones hidrogeológicas particulares del sistema acuífero de la Galería Los Elizondo.

- Definir y sustentar técnicamente la selección de zonas favorables para la recarga del acuífero mediante la aplicación de herramientas estadísticas de carácter descriptivo y multivariable, así como de modelación hidrogeológica conceptual y analítica, considerando parámetros de permeabilidad y propiedades mecánicas del subsuelo, con base en información obtenida en campo y en bases de datos hidrometeorológicas e hidrogeológicas de carácter institucional.

Etapas 3. Elaboración de la guía

- Identificar los aspectos fundamentales que deben integrarse en una guía práctica para la aplicación de la técnica de inyección profunda, garantizando su validez operativa y ambiental.

Etapas 4. Evaluación

- Evaluar las ventajas y limitaciones técnicas de la guía práctica para la recarga de acuíferos mediante inyección profunda, a partir de su coherencia con la caracterización del sistema acuífero y con los criterios de diseño propuestos, en el marco de la gestión sostenible del agua subterránea.

1.7 Aportación científica y técnica de la investigación

La recarga artificial y gestionada de acuíferos se reconoce como una estrategia relevante para fortalecer la seguridad hídrica y enfrentar escenarios de sobreexplotación y variabilidad climática, particularmente en regiones con presión creciente sobre el recurso subterráneo (Dillon et al., 2019). En el caso de los acuíferos kársticos, la literatura especializada destaca que la elevada heterogeneidad estructural, la presencia de conductos preferenciales y la dominancia de la permeabilidad secundaria introducen una complejidad significativa en su caracterización y en la evaluación de intervenciones antrópicas como los sistemas de recarga artificial (Goldscheider y Drew, 2007).

Si bien existen antecedentes relevantes sobre técnicas de almacenamiento y recuperación de agua subterránea, así como estudios aplicados en medios kársticos, estos suelen abordarse desde enfoques parciales o disciplinariamente fragmentados,

centrados en componentes geológicos, geofísicos, hidrológicos o hidráulicos considerados de manera aislada, o bien mediante aproximaciones conceptuales y modelaciones numéricas que requieren supuestos simplificadores respecto a la estructura del subsuelo (Hartmann et al., 2014). En este contexto, no se identifica de manera explícita un planteamiento integral que articule de forma sistemática dichas disciplinas para el análisis y diseño de sistemas de recarga artificial mediante pozos de inyección profunda en acuíferos kársticos profundos con condiciones hidrogeológicas comparables a las del área de estudio.

En este marco, la aportación científica central de la presente investigación consiste en la construcción de un esquema integral orientado al análisis, estructuración y evaluación técnica de sistemas de recarga artificial mediante pozos de inyección profunda en medios kársticos profundos. Dicho esquema se fundamenta en la integración ordenada de información geodésica, geológica, geofísica (incluyendo métodos magnetotelúricos y electromagnéticos transitorios), hidrológica, hidrogeológica, geotécnica e hidráulica, con el propósito de sustentar decisiones de diseño bajo condiciones de elevada complejidad e incertidumbre del subsuelo.

El alcance de la investigación se circunscribe a la planeación y evaluación técnica del sistema propuesto, sin considerar la ejecución física de la infraestructura ni la comprobación de su comportamiento hidráulico en operación. Estos aspectos se reconocen explícitamente como líneas de trabajo posteriores, lo cual permite delimitar con claridad el aporte del estudio y evitar extrapolaciones más allá de su ámbito de aplicación.

Como resultado directo de esta aportación científica, la investigación deriva en la elaboración de una guía técnica, presentada en el Capítulo 5, que constituye la formalización operativa del esquema desarrollado a lo largo del estudio. Dicha guía no representa la aportación científica en sí misma, sino un producto de transferencia del conocimiento generado, orientado a facilitar la sistematización, replicabilidad y aplicación del enfoque propuesto en otros contextos con características hidrogeológicas similares. De este modo, la tesis contribuye tanto al fortalecimiento del conocimiento aplicado en hidrogeología kárstica como al vínculo entre la investigación académica y la toma de decisiones técnicas en materia de gestión sostenible del recurso hídrico.

CAPÍTULO 2. MÉTODOS EXPERIMENTALES

El estudio que se presenta a continuación, específicamente en este apartado, contiene la parte metodológica donde se detalla el método experimental, el tipo de investigación, así como también el alcance y el diseño que tendrá el estudio. También se podrán destacar los materiales a utilizar, explicando el funcionamiento de cada uno de ellos; también se podrá evidenciar las técnicas de análisis y procesamiento de la información, así como los procedimientos técnicos, el método de preparación y algunos otros procedimientos de prueba que son necesarios para demostrar el estudio práctico.

2.1. Tipo de investigación

En la siguiente investigación científica se enmarca un enfoque de investigación aplicada, la cual cuenta con un carácter tanto analítico como evaluativo, orientado al estudio de alternativas relacionadas con la recarga de acuíferos mediante pozos de inyección profunda en ambientes kársticos. Se centra específicamente en la evaluación de estos pozos mediante el análisis de información obtenida en campo en condiciones reales, con el fin de sustentar el desarrollo de una guía técnica y orientativa que contribuya a la planeación y diseño de este tipo de proyectos en un futuro.

El presente estudio no contempla la ejecución de obras ni la implementación de sistemas de recarga, sino que se centra en la evaluación técnica de la información y en la interpretación de los datos disponibles, dando un enfoque metodológico al grado académico doctoral.

2.2. Alcance de la investigación

El alcance de la presente investigación se limita al análisis de los procesos de recarga artificial del acuífero mediante inyección controlada, así como a la evaluación de la respuesta hidráulica del sistema bajo condiciones de infiltración inducida. La caracterización hidrogeológica se desarrolla a partir de la integración de información geológica, geofísica, hidrológica y piezométrica, de acuerdo con criterios ampliamente aceptados para estudios de recarga artificial. La evaluación del acuífero bajo regímenes

de extracción o bombeo no se considera dentro del alcance del estudio, al corresponder a esquemas de aprovechamiento del recurso subterráneo distintos al enfoque metodológico adoptado (Bouwer, 2002) (Pyne, 2005).

En el caso específico de la Galería Los Elizondo, ubicada en el Área Metropolitana de Monterrey, se cuenta con un pozo de inyección profunda asociado a la gestión del recurso hídrico. Dicha infraestructura forma parte de un proyecto institucional desarrollado por Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, cuyo objetivo principal fue el abastecimiento de agua para uso público. En este contexto, es importante precisar que la infraestructura analizada no fue diseñada, ejecutada ni operada por el autor de la presente investigación. Su inclusión en el estudio se limita exclusivamente al análisis académico y técnico de la información disponible, generada durante las etapas de planeación y desarrollo del proyecto institucional.

Se comprende la sistematización y el análisis de información de campo disponible, en donde se incluyen datos estratigráficos, geofísicos, información piezométrica, antecedentes del predio en estudio y su interpretación. En base a esto, se evalúan los escenarios de recarga considerando las características hidrogeológicas del ambiente, así como las condiciones observadas en el caso de estudio.

Con base a los resultados obtenidos, se formula una guía técnica en donde se incluyen todos los análisis desarrollados, dentro de la misma se incorporan criterios, lineamientos y consideraciones metodológicas útiles para proyectos de recarga de acuíferos mediante la inyección profunda en ambientes kársticos. La guía no es un manual operativo ni proyecto ejecutivo, es una propuesta metodológica orientada principalmente a apoyar la planeación técnica de futuras intervenciones y la toma de decisiones.

Es de suma importancia mencionar que el acceso al sitio de estudio y la información técnica recopilada se realizaron con la autorización formal de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, conforme a los oficios oficiales que respaldan el carácter académico de la investigación y delimitan el alcance de la participación del autor, dichos oficios se encuentran en el Anexo A. Adicionalmente, el sitio de estudio y las condiciones observadas en campo fueron documentadas mediante documentación fotográfica, la cual puede ser localizada en el Anexo B.

2.3. Diseño metodológico

La presente investigación se desarrolla bajo un diseño metodológico no experimental, de tipo analítico e integrador, orientado a la evaluación técnica de la recarga artificial de acuíferos mediante la técnica de inyección profunda. El diseño se basa en la integración secuencial de información topográfica, geológica, geofísica, hidrológica, hidrogeológica y geotécnica, así como en la aplicación de análisis estadísticos y procedimientos de modelación hidrogeológica, con el fin de sustentar técnicamente la selección de zonas favorables para la recarga y la elaboración de una guía práctica aplicable al sistema acuífero de la Galería Los Elizondo.

Este diseño no contempla la ejecución física del sistema ni el monitoreo operativo posterior, por lo que la evaluación se realiza a nivel técnico, mediante la coherencia entre la caracterización del medio, los criterios de diseño propuestos y la viabilidad de su aplicación en el contexto de la gestión sostenible del agua subterránea.

2.4. Materiales empleados

Los métodos experimentales por naturaleza van dirigidos a estudios prácticos, es decir, tangibles que necesitan de ciertos procedimientos técnicos para ser ejecutados. En el caso de la excavación del pozo para la recarga de un acuífero de inyección profunda en ambientes kársticos, implica métodos experimentales y técnicos los cuales pueden ajustarse a las características del terreno con un propósito de disponer del recurso hídrico en un futuro próximo, para ello, es necesario explicar algunas metodologías que van encaminadas al método de perforación rotativo el cual consiste en utilizar brocas que giran a altas velocidades y que perforan el suelo. Las maquinarias implementadas permitirán extraer muestras de acuerdo con la profundidad, a través de la utilización de equipos pesados y portátiles.

Así mismo, se pueden quitar algunas barreras manuales a través de procedimientos mecánicos para poder excavar el suelo de una forma más suave; es decir, cuando se hace una perforación de pozo, se utilizan varias técnicas y herramientas, tanto físicas como mecánicas, para que efectivamente se logre alcanzar una gran profundidad y sea accesible el líquido esperado. Sin lugar a duda, este proceso implica

costos y también el uso de algunos equipos especializados. Para ello se realiza un sondeo; este sondeo implica poder excavar por etapas. También considera seguir procesos para evitar colapsos, aprovechando específicamente los suelos más débiles y esforzándose en la parte más difícil (Arriagada, 1960).

Estos procedimientos mencionados y otros, como el método del tambor, el cual consiste en utilizar un martillo que golpea las rocas, permitiendo así la perforación de una manera más rápida en comparación a otros métodos, son ideales para la excavación de pozos profundos. También se considera la metodología de la micro perforación, que, más allá de utilizar perforadoras enormes de gran magnitud, son perforadoras más específicas de menor diámetro que causan un método menos invasivo y permiten, de igual manera, perforar de una forma más tradicional y viable ante las necesidades del requerimiento para el desarrollo de un proyecto en específico.

Estas excavaciones utilizan por lo general equipos que no los tiene con regularidad cualquier individuo, sino empresas u organizaciones que se dedican a esta ramificación en el mercado. También utilizan otro procedimiento, como es el de la hidroexcavadora, es decir, utilizan altas presiones de agua para descomponer el suelo y de esa manera succionar la tierra. Por lo general, se utiliza este último método en niveles delicados donde se necesita precisión y procedimientos mínimos para poder excavar a fin de no involucrar o perjudicar áreas comprometidas.

Y, el método más conocido, es el método de excavación manual, que, utilizando mecanismos como la pala y el pico, logra profundizar de una forma más lenta, pero con la misma eficacia en los estudios geológicos o de perforaciones. La agilidad, rapidez y profundidad dependerán de los materiales y mecanismos implementados, así como también dependerán de la calidad del suelo y de los niveles de agua subterránea a los cuales se está pretendiendo (Arriagada, 1960).

En lo que respecta a los materiales utilizados en el proyecto actual, es evidente que existen varias alternativas posibles, las que abarcan desde el teodolito, que se emplea en la medición óptica, incluyendo piquetes formados por varas de metal con extremo redondeado y un aro, y la plomada, que se emplea en la medición del calado de agua.

Entre otros instrumentos se incluyen regletas, estacas, trípodes, libretas de trabajo de campo y piezómetros de regulación. No obstante, existen instrumentos específicos que se han vuelto imprescindibles los cuales se ponen en funcionamiento y logran con eficacia esta labor.

Principalmente, la estación total es un artefacto esencial que determina con exactitud recorridos y angulaciones. El dispositivo facilita al investigador la obtención de valores precisos, indispensables en el examen de los hallazgos. También, las estacas se emplean para asignar determinados trazos sobre el terreno, en esencia son imprescindibles para establecer un marco de mención sirviendo en la localización y mapeo de la zona estudiada (Arriagada, 1960).

Asimismo, la plomada es un instrumento fundamental para determinar la profundidad del nivel freático. La investigación del nivel estático es crucial para discernir las particularidades de la hidrología de la región y su impacto en el ambiente colindante. Otro equipamiento son los piezómetros de control, utilizados en equipo la medición del nivel de agua en el sustrato y permiten obtener referencia estimable acerca las corrientes de las aguas subterráneas.

Para llevar a cabo con éxito esta investigación, es fundamental contar con la estación total para medir el relieve, varas de madera, sondas y piezómetros de monitoreo, entre otros materiales disponibles. Estos materiales brindan información precisa, permiten establecer un marco de referencia y proporcionan datos esenciales para la localización exacta de las particularidades hidrográficas de la región de estudio.

2.4.1. Perforadora de superficie

La perforadora móvil B-50 es una máquina de perforación versátil y segura, indispensable en muchas aplicaciones de perforación. Tiene beneficios sobre otras máquinas de perforación, debido a su pequeño tamaño, su manejabilidad y aptitud para calar en terreno complicado. Además, su alta movilidad la hace una opción óptima para ubicaciones de perforación distantes (ETW Cloud , 2024).

Por otra parte, el equipo está concebido para reducir al mínimo el efecto sobre el medio ambiente y mitigar el peligro de contaminación, asegurando que las perforaciones

se lleven a cabo de forma segura y responsable. Este equipo de perforación móvil B-50 es muy utilizado para perforación de pozos de agua y la realización de sondeos geotécnicos dada su efectividad, traslado y protección del ambiente (Figura 1).



Figura 1. Perforadora Mobile Drill B-50.

Nota: Elaboración propia.

Adicional a ello, es pertinente precisar que el sistema de perforación empleado para la implantación de los pozos de monitoreo del nivel freático superficial difiere sustancialmente del utilizado en la ejecución del pozo de inyección profunda. Los dispositivos de monitoreo superficial fueron habilitados mediante una perforadora de capacidad limitada, idónea para diámetros reducidos y profundidades someras, cuya selección, gestión operativa y disposición en sitio fueron realizadas de manera directa en el marco de la presente investigación, como parte del diseño metodológico adoptado para la instrumentación hidrogeológica del acuífero superficial y la observación sistemática de la dinámica piezométrica durante el periodo de estudio.

De manera complementaria, la materialización del pozo de inyección profunda requirió el empleo de una unidad de perforación de mayor capacidad, concebida para alcanzar profundidades significativamente mayores, diámetros ampliados y condiciones geomecánicas de elevada complejidad, propias de ambientes kársticos profundos. Si bien este equipo interviene en el contexto general del proyecto del pozo de inyección

profunda, no se incluye dentro del apartado de materiales utilizados de la presente investigación, dado que su participación corresponde a la fase constructiva del pozo y no a las actividades específicas de instrumentación y monitoreo desarrolladas en este estudio.

2.4.2. Magellan Promark 3

Se trata de un navegador o sistema de posicionamiento global de vanguardia, el cual facilita la realización de labores de levantamiento topográfico, captura de entidades SIG (Sistema de Información Geográfica) y localización y navegación. Posee dos receptores de información GPS (Global Positioning System), una antena GPS y los auxiliares correspondientes, este amplio procedimiento posibilita la recogida de datos de alta precisión en poco período (Abdurakhmonov et al., 2023).

Equipado con un monitor digital de gran cantidad de pixeles, funciones de notificación optimizadas y eficaces algoritmos de revelado de imágenes, el Promark 3 suministra valores exactos y fidedignos en numerosos contextos. Por añadidura, resalta por su capacidad de recopilación de datos SIG y proporciona potentes herramientas para el tratamiento de datos (Figura 2).



Figura 2. Utilización en campo de Magellan Promark.
Nota. Elaboración propia.

Es un aparato de medición global extraordinaria que destaca por su rapidez, precisión y poderosa tecnología Medición Electrónica de Distancias (EDM). Esta herramienta presume de una precisión excepcional, pudiendo medir distancias de hasta 2.000 metros utilizando un prisma. Además, la duración de su batería es de hasta 28 horas.

Esta máquina tiene una capacidad de almacenamiento de hasta 25.000 puntos y permite la transferencia de datos mediante cable RS-232C y Wireless. Está específicamente concebido en la medición de trayectos con determinados prismas Nikon, mide con precisión ángulos según DIN 18723 (horizontales y verticales) y cuenta con un sistema de detección fotoeléctrica de lectura con un codificador creciente (Microsoft Corporation, 2024) (Figura 3).



Figura 3. Estación total Nikon DTM-322.

Nota. Elaboración propia.

2.4.3. Equipamiento informático

- **AutoCAD**

Es una aplicación de diseño por ordenador, es ampliamente empleada para crear planos en dos dimensiones y modelos tridimensionales (Autodesk, 2023). Revoluciona la forma en que arquitectos, ingenieros y diseñadores trabajan al proporcionar

instrumentos efectivos para la creación de diseños complicados y modelizaciones detalladas.

La más reciente versión, AutoCAD 2023, tiene características y funcionalidades mucho más evolucionadas. Autodesk, la compañía responsable, es un referente en programa informático de dibujo e ingeniería, y continuamente está actualizando y mejorando sus dispositivos. AutoCAD se impone como una herramienta indispensable para todos los técnicos de distintos segmentos, como la arquitectura, ingeniería y la manufactura (ETW Cloud , 2024).

Su incorporación a AEC Collection (Architecture, Engineering, and Construction), disponible en la nube, posibilita una cooperación y comunicación impecable a lo largo de los pasos de diseño y edificación. En suma, es un artefacto vital para proyectistas e ingenieros a nivel global, suministrando soluciones eficientes y certeras para planes de bosquejos de gran complejidad. Su sucesiva transformación y adhesión con otros softwares, como la Colección AEC, lo convierten en un artefacto cada vez más poderoso para los especialistas en diseño de múltiples ámbitos.

- **Minitab**

Es un poderoso programa numérico creado por primera vez en 1972 por educadores de la Universidad Estatal de Pensilvania. Fue creado con competencia estadística elemental y compleja, siendo comparable a Microsoft Excel, aunque con funciones adicionales para el análisis. En el transcurso del tiempo, MINITAB se ha convertido en una herramienta imprescindible para estadígrafos e investigadores en diferentes áreas. Es capaz de hacer análisis de datos, detectar patrones y realizar pronósticos, MINITAB es amigable y apto para no expertos en estadística, sin embargo, es capaz de procesar conjuntos de datos sofisticados y ejecutar cálculos estadísticos avanzados (Minitab, 2024).

Proporciona una extensa variedad de comprobaciones estadísticas, tales como pruebas t, ANOVA y análisis de regresión. Adicionalmente, MINITAB dispone de diversos diagramas para la representación de cifras y la detección de tendencias, convirtiéndolo en la herramienta perfecta para el estudio de datos y la exposición de hallazgos a otras

instancias. En términos generales, es una aplicación eficaz y polifacética, fundamental para todo aquel que tenga que efectuar cálculos estadísticos.

- **Microsoft Office**

En 1975 se fundó la firma Microsoft Corp. Ha desarrollado un compendio de softwares ofimáticos que se conoce con el acrónimo Microsoft Office. Estos programas efectúan labores ofimáticas, las permiten la automatización y el mejoramiento de las tareas cotidianas de la empresa. El primer lanzamiento de Microsoft Office se produjo en 1989 y consistió en dos módulos fundamentales (Microsoft Corporation, 2024)(Figura 4).

- **Hydrognomon**

Es una eficaz interfaz informática concebida expresamente para la gestión y el análisis de datos de carácter hidrológico. Tiene la capacidad de llevar a cabo diversas labores relativas con el análisis de datos hidrológicos, tales como el tratamiento de datas de series temporales, el análisis de regresión y “data view”. Además, incorpora otras aplicaciones de hidrología especiales, como los patrones de evapotranspiración y los cálculos de equilibrio hídrico. Gracias a su componente estadístico, los internautas comprenderán mejor la complejidad de las asociaciones estadísticas que caracterizan a los procesos hidrológicos y podrán realizar conjeturas más exactas. En conjunto, Hydrognomon es una ayuda indispensable para los hidrólogos y los gestores de reservas hídricas (Hydrognomon, 2024)(Figura 4).



Figura 4. Aplicaciones y softwares empleados en la investigación.

Nota. Elaboración propia.

2.5. Métodos de preparación

Para desarrollar la guía a presentar fue preciso cumplir una sucesión de etapas que garantizaran su debida concreción. En un principio, se procedió a la búsqueda de documentación científica y normativa sobre la infiltración de aguas subterráneas, con el afán de definir el emplazamiento más conveniente para el proyecto (LLerena y Ayala, 2022). Para tal fin, se examinaron las particularidades del sistema de recarga, comprendidos los elementos tanto físicos como políticos.

Sucesivamente, se definió el área de dominio donde efectuar la correspondiente indagación y se elaboró un programa de ejecución, lo más acertado a la realidad. Luego, se definieron los principales fines, que incluyen la infiltración de agua por medio de pozos profundos y la realización de una guía para llevarlo a cabo.

Respecto al párrafo anterior, se recabaron e identificaron diversos estudios disponibles que contribuyeran a la obtención de los fines perseguidos. Seguidamente, se procedió a un reconocimiento topográfico de la superficie mediante aparatos de alta precisión y programas informáticos avanzados (DOF, 2022).

Esto posibilitó un examen detallado del área, que incluyó la delimitación de potenciales obstáculos a la penetración del caudal de agua. Más adelante, se efectuaron más indagaciones para concretar los procedimientos más eficientes de infiltración de agua en profundidad. Para este fin, se examinaron diferentes métodos y tecnologías empleados en otras obras comparables y se recurrió a la opinión de especialistas en la materia.

Se ha desarrollado una guía técnica a detalle que puntualiza de manera sistemática los pasos requeridos para llevar a cabo una infiltración de aguas subterráneas, sustentada en los resultados obtenidos a partir de los siguientes estudios: geológico, hidrogeológico, geotécnico, geofísico, hidrológico, y topográfico. La integración de estos estudios permitió definir las variables y los criterios para la planeación, el diseño y la ejecución del sistema de recarga.

La guía ofrece indicaciones y orientaciones pormenorizadas sobre la elección de la ubicación, la excavación del pozo y la vigilancia del sistema de recarga (Giordano y Villholth, 2007).

En términos generales, la elaboración de la guía requirió un abordaje integral y coherente, sustentado en una amplia gama de casos de éxito documentados en otras regiones, los cuales fueron identificados en el apartado de antecedentes (Ver Capítulo I. Introducción, inciso 1.2.1. Internacionales, 1.2.2. Nacionales, 1.2.3. Locales). La guía elaborada representa un preciado material de consulta para todo aquel que desee emprender iniciativas de infiltración de aguas profundas y ayude a abordar los desafíos que plantean la escasez de agua y la perdurabilidad de los recursos hídricos.

Tras la realización de un sondeo, se procedió a determinar la correspondiente conductividad hidráulica de los mantos a partir de los valores recogidos. Asimismo, se efectuó una somera indagación acerca de la hidrogeoquímica de las aguas de la región. En seguida, se recopilaron parámetros hidrológicos de las instalaciones climatológicas próximas al sector, lo que posibilitó la determinación de la pluviometría máxima al año en la correspondiente zona de investigación, y, se utilizó el cálculo de estimados máximos de 24 horas. Dentro de esta etapa se recolectó información hidrogeológica, así como datos históricos de las precipitaciones obtenidos de las estaciones climatológicas. Posteriormente, se evaluaron los ajustes estadísticos mediante el test de Kolmogorov-Smirnov por medio del software Hydrognomon del cual se obtuvo que la mejor distribución para utilizar era la de EV2 Max (L-Moments). Después, se determinaron los valores de los periodos de retorno para posteriormente realizar las curvas HP-D-TR e I-D-TR, para finalmente realizar el método Dick y Peschke el cual ayuda a definir la distribución temporal de la tormenta de diseño mediante histogramas, los cuales son de gran ayuda para representar la intensidad de lluvia a lo largo de un evento de precipitación (López C. , 2017).

Seguidamente, se decidió utilizar el procedimiento de inyección por infiltración por medio de pozos de inyección profunda por infiltración del agua pluvial. Se eligió este procedimiento por su eficacia para manejar los recursos de agua de la región y, al unísono, minimizar el impacto ecológico. En la aplicación del enfoque, se realizó la fase hídrica de la zona, con el fin de lograrlo, se examinaron las múltiples fuentes abastecedoras de agua, como superficiales, subacuáticas y pluviales, y la utilización de los recursos hídricos de la zona. Posteriormente, se consideró que el empleo de pozos

perforados de inyección profunda sería el modo más efectivo de administrar los acuíferos de la región, al tiempo que supondría un bajo costo de construcción.

El procedimiento de infiltración en pozos de inyección profunda implica la perforación de una sucesión de pozos en el terreno, que luego son llenados con agua. Se permite que esta agua se filtre gradualmente en el terreno adyacente, reabasteciendo el acuífero subterráneo. Este procedimiento es particularmente eficaz cuando el nivel freático es prominente, ya que evita los desbordamientos y disminuye el peligro a que se erosione el suelo (Mukherji y Shah, 2005).

La reducción del impacto ambiental es una de las principales utilidades de este método, los pozos de inyección profunda no precisan obras de envergadura que alteren los ecosistemas del lugar, a diferencia de otros sistemas de tratamiento del agua, como las represas o los diques. Por otra parte, pueden emplazarse sin apenas perturbar el medio ambiente que los rodea, lo que los hace una alternativa más viable para la gestión de los recursos hídricos de la zona.

Para gestionar el agua de forma sostenible en la región, utilizar el procedimiento de infiltración mediante pozos profundos suele ser un buen paso. Para asegurar una administración eficaz de los recursos hídricos en los años próximos, se debe analizar cuidadosamente el ciclo de la hidrología y elegir un método que reduzca el impacto sobre el medio ambiente (Baggini, 2021).

Para garantizar la viabilidad del método que se propone con anterioridad, se realizó un análisis hidrogeológico del sitio de estudio en donde se hizo una caracterización del subsuelo, se identificaron los estratos que portan el agua y se analizó la compresión del comportamiento del flujo subterráneo. El objetivo de este análisis fue evaluar la conductividad hidráulica, la disponibilidad del recurso hídrico y las condiciones geológicas del sitio de estudio, todo esto con el fin de identificar zonas que tengan un alto nivel de potencial para el aprovechamiento del pozo de inyección.

Por otro lado, dentro del estudio se incorpora información tanto geotécnica, geofísica, como de laboratorio, en donde se consideran los resultados de todos los estudios realizados como lo son: el sondeo de exploración, las pruebas MT y TEM, entre otros. Adicional a ello, se evaluaron los efectos existentes de la extracción e infiltración del agua subterránea como el riesgo de contaminación del acuífero, la modificación del

terreno natural, la alteración a la flora y fauna, la alteración a los escurrimientos naturales, etc. Todo esto con el fin de seguir los criterios de sustentabilidad y sostenibilidad y proteger adecuadamente el recurso hídrico (Freeze y Cherry, 1979).

Posteriormente con base en los resultados, se definieron las medidas tanto preventivas como de mitigación, las cuales están orientadas a preservar la integridad del subsuelo y del agua con el fin de llevar a cabo un procedimiento lo más viable posible.

El estudio valoró los riesgos posibles derivados del método de infiltración por medio de un pozo de inyección profunda en ambientes kársticos, específicamente en contexto de la Galería los Elizondo, esta evaluación implica integrar un análisis técnico, hidrológico, hidrogeológico, topográfico, geotécnico, geofísico, geológico, entre otros, para anticipar los posibles efectos en el acuífero y en la calidad del recurso hídrico. Ita (2019) señala que los problemas relacionados con el agua requieren de una participación ciudadana activa para garantizar que las decisiones sean aceptadas por la sociedad y, por otro lado, que sean ambientalmente responsables y viables, específicamente en regiones con presiones hídricas significativas, como lo es el municipio de Monterrey, Nuevo León.

Complementando lo anterior, se tienen que aplicar medidas de mitigación a este tipo de proyectos de investigación, como, por ejemplo, alinear con lo que se establece en la Ley de Aguas Nacionales. Esta regula tanto la explotación, uso, así como la perseveración de las aguas nacionales, incluyendo las subterráneas, define que se tiene que prevenir la contaminación de los acuíferos y proteger la calidad de agua obligatoriamente. Estas acciones deben de ser realizadas mediante control, monitoreo, y cumplimiento de la normativa vigente durante cualquier tipo de obra, y por otro lado, establece que las obras hidráulicas deben llevarse a cabo considerando la conservación del recurso hídrico y la protección a la flora y fauna (Congreso de la Unión, 2023).

Además, se tomaron acciones para prevenir la contaminación de las aguas del subsuelo, tales, la adopción de medidas de penetración de poca repercusión y correcta administración de elementos que pueden ser dañinos. Del mismo modo, se tomaron disposiciones para supervisar la efectividad del procedimiento de infiltración y asegurar que no tenga efectos adversos con los cohabitantes del área en cuestión.

El resultado del análisis de la hidrología fue un significativo progreso para el logro del sistema de incursión planteado. Teniendo en consideración la geomorfología y la topografía de zonas circundantes, entre ellas eventuales consecuencias del calentamiento global y los cambiantes regímenes de utilización del suelo. El estudio permitió detectar los peligros potenciales y concebir estrategias para aplacarlos, la aplicación de esta estrategia no sólo garantizará la viabilidad prolongada de las reservas hidrológicas de la región, sino también el alcance del procedimiento de filtración.

El caudal del diseño se estimó utilizando los criterios hidráulicos para el reabastecimiento artificial del emplazamiento, dentro de los cuales se calculó el volumen infiltrado, volumen de la vertiente, tiempo de llenado, área y finalmente el gasto de infiltración. Posteriormente se realizó una tabla con el volumen infiltrado, la acumulación y los lapsos de tiempo para visualizar los cálculos.

Durante el trabajo de bosquejo se consideró también el procedimiento de elección del material apropiado para la construcción del pozo. En este proceso se tuvieron en cuenta varios elementos, como la bioquímica del acuífero, lo profundo del pozo y la cantidad prevista en caso de ser más de uno. Además, se consideró la influencia de eventuales contaminantes que pudieran existir en la composición del acuífero y se recomendaron las acciones oportunas para preservar su calidad hídrica (Alianza Latinoamericana de Fondos de Agua, 2020).

Además, el diseño incluyó la determinación de la localización ideal del pozo de inyección, considerando varios condicionantes como la cercanía a otros pozos, el declive hidrológico del acuífero y el grado de interacción con otras corrientes de agua. Para ello, fue necesario realizar un análisis exhaustivo de las particularidades hidrológicas de la región, especialmente en lo que se refiere a la posible influencia de las intervenciones del hombre en el plan hídrico subterráneo.

El procedimiento de diseñar el pozo de infiltración ahogado fue un trabajo complicado y de varias etapas, que exigió una variedad de parámetros para asegurar el alcance de la realización del proyecto y la preservación de las reservas naturales de la cuenca.

El desarrollo del trabajo permitió elaborar un método para calcular la infiltración caudal máxima haciendo uso de pozos de inyección profundos y tomando en

consideración el ámbito de aprehensión de las corrientes de agua superficiales. Para esto fue imprescindible calcular el gasto máximo de la cuenca de aportación utilizando el Método Racional Americano.

Adicionalmente, fue necesario determinar el volumen de la geometría del pozo con base en su longitud, el caudal infiltrado y el tiempo de descarga en el pozo. Con el fin de hacer más fácil el cómputo del método correspondiente, se creó una representación tabular, esta representación incluía la acumulación de volúmenes, los datos de infiltración, los períodos de tiempo y los datos de las precipitaciones (Vanegas, 2017).

Es importante mencionar que el método es efectivo cuando se selecciona según las propiedades litológicas del suelo. La permeabilidad o conductividad hidráulica del material estructural están fuertemente correlacionadas con su capacidad de infiltración, lo que significa que el método es el mejor para la infiltración de agua y de esta manera alcanza resultado esperado (Fig.5). Por lo tanto, este estudio ofrece sugerencias útiles sobre la mejor forma de infiltrar el agua, que podrían sustentar próximas medidas de aprovechamiento.

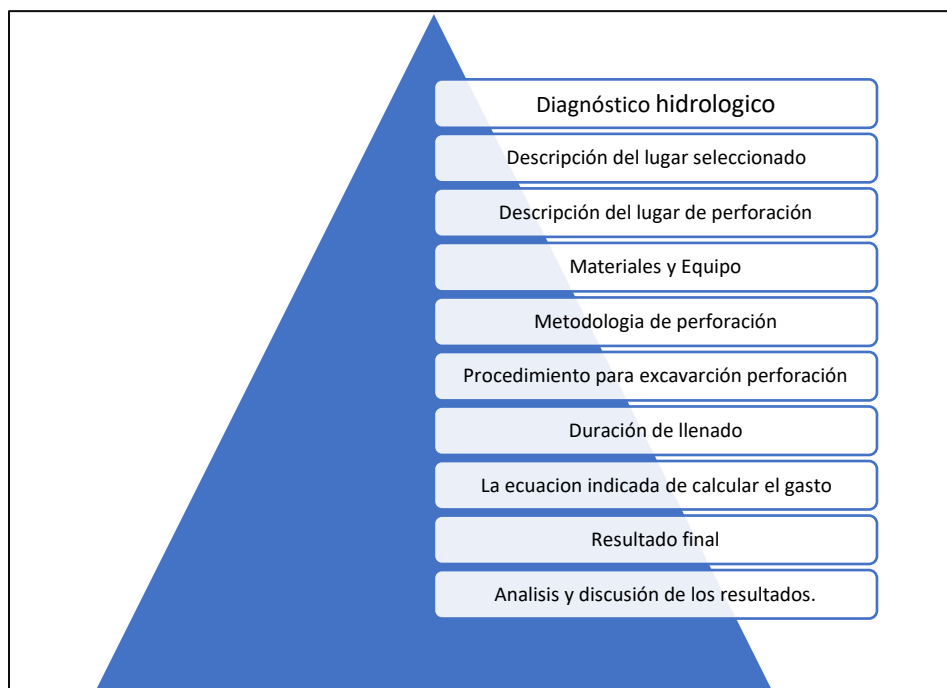


Figura 5. Esquema para el diseño adecuado de un pozo de infiltración.

Nota. Elaboración propia.

El método de preparación técnica de este estudio va alineado con su propósito y en este caso es ofrecer una solución hidrológica de almacenamiento de agua para los habitantes aledaños a La Galería los Elizondo, es por este motivo que se tendrá que hacer una detección del lugar del procedimiento mencionado anteriormente, para posteriormente realizar la perforación del pozo hasta llegar al acuífero.

Mediante técnicas de perforación se construyó de manera apropiada el pozo que infiltrará el agua, proceso que se realizó a partir de una descripción de la zona y las aprobaciones municipales correspondientes, cumpliendo con las regulaciones ambientales para el consentimiento del proyecto. Luego, se evaluó si las condiciones del acuífero permiten o no el almacenamiento efectivo del agua subterránea en el pozo creado (CONAGUA, 2015).

Esta recarga de acuífero mediante el método de inyección profunda se encuadra en un método inductivo de desarrollo, así como también será necesario realizar mediciones y frecuencias de flujo a fin de poder garantizar y controlar el vital líquido posterior a la construcción del pozo; subsiguiente, tener procedimientos de inyección que cumplan con las normativas y regulaciones pertinentes.

El monitoreo, la recolección de datos y el análisis del funcionamiento continuo del agua y los niveles del acuífero garantizarán el impacto de la recarga para la zona afectada a consecuencia de la sequía. Posterior a ello, se analizarán los hallazgos del desarrollo técnico del acuífero, basándose en los resultados tanto presentes como en las proyecciones futuras. A todo este método, metodológicamente, se le denomina método inductivo, que es cuando se realizan procedimientos sucesivos para ir desde aspectos puntuales minúsculos hasta desarrollar por completo cualquier idea práctica o investigativa.

2.6. Técnicas de análisis

Las técnicas aplicadas fueron propias del campo de la ingeniería, pertinentes a la edificación del pozo, se destinaron procedimientos del área de la ingeniería civil, como también geotécnicas necesarias para valorar los riesgos en este aspecto (Gallego y Gonzales, 2017). Asimismo, se utilizó la técnica de la observación, la cual facilitó las

valoraciones y recopiló información sobre lo visto para determinar las características y aspectos más significativos de la evaluación del proyecto.

2.6.1. Geopresión

La operación de roca se conoce debido a la compresión geológica o sobrepresión, lo cual va referido al aumento de la presión en las rocas debido a una serie de factores geológicos. Uno de ellos es la sobrecarga de sedimentación, por lo general, este tipo de fenómenos se presenta en la compresión de reservorios naturales como el gas y el petróleo, o también se puede evidenciar en formaciones geológicas y en procesos de deformación de rocas (Borges, 2017).

Los factores que contribuyen a la geopresión de rocas, en primer lugar, es la sedimentación, lo cual es un fenómeno en donde se acumulan sedimentos en áreas donde la capa superior comprime a la inferior, aumentando la presión en las rocas subyacentes; también la tectónica de placas es otro de los factores que contribuyen a los movimientos de las placas, que, por lo general, causan tensiones y deformaciones en las rocas.

Otro de los factores importantes que influye es el fluido de los suelos, es decir, la presencia de agua, esto afecta la presión intersticial de las rocas, lo cual modifica el comportamiento mecánico y su resistencia. Otro factor importante a considerar son los ciclos de compactación, es decir, a medida que las rocas son sometidas a algunos ciclos de sedimentación y erosión, también se puede experimentar frustraciones en la presión y en la densidad, lo que puede llevar a un estado de sobrepresión.

Así como existen muchos factores que pueden incidir en la geopresión también existen algunos efectos, se menciona la formación de recursos minerales lo cual es una de las formas en el cual se depositan los fluidos, en este caso puede ser el agua y que puede quedar atrapada en formaciones rocosas si la presión es sumamente alta. Otro efecto es el desastre geológico, esto no es más que la contribución de deslizamientos de tierra y otros eventos geológicos que pueden tornarse peligrosos específicamente cuando las áreas son de alta actividad tectónica (Borges, 2017).

Finalmente, el último efecto corresponde a las alteraciones de estructuras geológicas, esto puede causar fallas y fracturas en las rocas lo cual afecta la estabilidad de las estructuras naturales y artificiales. Comprender un poco la opresión de las rocas es sumamente vital para la explotación de los recursos naturales, la gestión de riesgos geológicos y la ingeniería, esto debido a que se deben considerar todos estos efectos y factores detalladamente a fin de poder realizar excavaciones y estudios de estructuras naturales con el conocimiento indicado, con el fin de evitar sorpresas o inestabilidades geológicas al momento de realizar excavaciones.

El tema de la geopresión y la recarga de acuíferos está sumamente relacionado debido a que en el proceso de excavación se podrán encontrar estructuras rocosas impermeables que pueden ser complejas o presentar una elevada permeabilidad en el movimiento de aguas. Al inyectar agua de manera controlada a través del pozo es necesario considerar la geopresión debido a que puede afectar la distribución y el flujo de agua en el acuífero, esta compresión del pozo se puede incrementar. Por otro lado, también la presión intersticial en las rocas kársticas, que es un tema que va acompañado del cuidado necesario para evitar fisuras y poros, así como también considerar el tema para evitar que se infiltre en las áreas menos accesibles (Borges, 2017).

El tema de la geopresión debe ser considerado como un mecanismo de control debido a que los cuidados necesarios evitarían un colapso, específicamente en áreas sísmicas, así como también permite prevenir algunos impactos adversos a la inyección de agua mediante pozo. La regeneración de acuíferos producto de una inyección profunda ayuda a restaurar un ambiente sobreexplotado, y la compresión específicamente en los entornos kársticos es un tema que ayuda a estabilizar geológicamente el terreno comprometido.

Asimismo, la inyección de aguas superficiales y subterráneas en zonas kársticas, fomenta la conexión dinámica entre estas, a su vez influye en la interacción por lo que la inyección de agua puede afectar el equilibrio hídrico y la calidad del agua en el acuífero. Debido a esto, se hace necesario un monitoreo fundamental de la presión y la calidad del agua en el pozo y en el acuífero para así asegurar que la inyección sea sostenible y que no genere daños en la estructura de los entornos kársticos, Asimismo se considera que puede modelar numéricamente haciendo un análisis geológico con herramientas

útiles para predecir cómo la inyección del agua y la geopresión interactúan en los ambientes kársticos.

2.6.2. La Hidrogeología de entornos de rocas calizas erosionadas por agua

Esta extensión de la geología y la hidrología está dedicada al análisis de redes de aguas subterráneas características de zonas constituidas de roca caliza, dolomitas o carbonatos solubles (Ford y Williams, 2007). Los entornos kársticos de esta área son particularmente únicos y de extraordinaria complejidad, esto debido a los fenómenos químicos de disolución de las rocas por la acción del agua del subsuelo.

En estos entornos el agua proveniente de las precipitaciones junto con la de la superficie son permeadas por el suelo combinándose con el dióxido de carbono de la atmósfera (CO_2), transformándose en ácido carbónico el cual tiene la capacidad para desleír la roca caliza (Ford y Williams, 2007). Durante milenios este fenómeno forma sistemas de conducción, rendijas y cavernas propias del subsuelo por los cuales fluye el agua.

La hidrogeología de estos ambientes tiene como propósito la investigación del desplazamiento, acopio y reabastecimiento de los acuíferos. Los sistemas kársticos poseen particularidades hidrogeológicas singulares como su gran capacidad de absorción por medio de estos ambientes. Estas estructuras caracterizadas por drenajes, depresiones profundas y ríos del subsuelo forman intrincados movimientos del líquido y áreas para reabastecimiento (Ford y Williams, 2007). Estas singulares características los convierten en factores de relevancia para la distribución del vital líquido en gran parte del planeta, lo que también constituye un gran desafío para su administración y conservación.

2.6.3. Exposición de morfología kárstica de las estructuras geológicas

Estas estructuras contienen particularidades singulares desde el punto de vista geológico y geomorfológico, donde es común la presencia de rocas calizas, dolomitas y otros carbonatos solubles. La acción química infringida en las aguas de la superficie sobre las rocas son la causa de la formación de cavernas, desagües, dolinas, arroyos en

subsuelo y otras unidades kársticas (Gutierrez y Parise, 2005). Estos factores convierten estas formaciones en ambientes de características únicas que revisten gran importancia para la administración del agua y su influencia en la preservación de los hábitats y su biodiversidad (Palmer, 2011).

2.6.4. Ciclo del agua en zonas kársticas

Este singular fenómeno abarca la acción recíproca entre el agua y los factores geológicos en las estructuras kársticas. Estas zonas contienen particularidades especiales provocadas por rocas de fácil descomposición como la caliza, lo que da como resultado la creación de estos ambientes singulares contentivos de cavernas, depresiones inclinadas y desagües naturales (Williams, 2007).

2.6.5. Reabastecimiento de depósitos subterráneos en entornos kársticos

Este procedimiento es esencial para el llenado en estas zonas, las particularidades geológicas de estas estructuras como la presencia de materiales de gran permeabilidad contribuyen a la forma de la movilidad del líquido y su acopio, es vital la exploración profunda de los surtidores de reabastecimiento para la reactivación de los depósitos (Williams, 2007).

2.7. Procedimientos

En la creación de la guía, hay que definir cada fase del procedimiento. Inicialmente, debe realizarse un estudio de factibilidad para determinar la existencia disponible de agua, el aforo de recarga del acuífero y la zona de inyección conveniente (Perico et al., 2020). Una vez realizada esta etapa de planificación, es fundamental decidir el emplazamiento de la inyección, un lugar idóneo sería un yacimiento profundo situado en una región favorable para la realimentación y que pueda resistir el procedimiento de inyección. Para identificar el emplazamiento adecuado, es necesario realizar una valoración detallada de los parámetros hidrogeológicos, entre ellos la hondura del acuífero, la penetrabilidad del suelo, su cercanía a reservas de agua y potenciales problemas de polución.

Cuando se estudia la opción de recargar artificialmente las aguas subterráneas, es fundamental tener en cuenta la posible influencia sobre el contexto ecológico del sitio y las localidades colindantes. Es igualmente crucial realizar un riguroso análisis de la calidad del agua destinada a la recarga, por otro lado, preciso asegurar que esté exenta de agentes contaminantes que pudieran afectar al acuífero o al ecosistema. Dicho análisis debe abarcar parámetros como el pH, la concentración de disolvente y la presencia de residuos de metales pesados, plaguicidas y otras impurezas (Menendez et al., 2018).

Después de determinar la ubicación y la composición del agua, el próximo requisito es la concepción de la edificación de ingeniería necesaria para la inyección de agua. Como síntesis, la elección del emplazamiento de inyección idóneo y la naturaleza del agua son aspectos clave en el correcto funcionamiento del procedimiento de técnicas de introducción inducida de acuíferos. Mediante la realización del profundo análisis y la adopción de todas las previsiones pertinentes, es posible asegurar el sostenimiento de los depósitos de agua dulce para las nuevas generaciones.

Es crucial hacer acopio de información que preceda al tópico que sirve de razón para la elaboración de este documento, ya que esto permitirá hacer un análisis comparativo al final que valide la contribución que se hace al tema investigado. Opolenko (2022), propone el bosquejo de un pozo de inyección para recargar artificialmente el acuífero de Texcoco para eludir el descenso de volúmenes piezométricos y mitigar la subsidencia diferencial en la región. Su objetivo fue conocer la ubicación idónea para la recarga artificial al interior del acuífero de Texcoco desde el punto de vista geohidrológico, igual que proponer el prototipo de pozo de inyección por medio del que se llevará a cabo la recarga.

Esta propuesta obedece al problema planteado por el hecho de que el 67% de la demanda de agua se satisface a través de pozos que extraen agua de los acuíferos de la región metropolitana del Valle de México. El caudal de la extracción de estos acuíferos supera la recarga natural, provocando graves dificultades de agotamiento de las aguas subterráneas.

Para resolver estos obstáculos, se propone la recarga artificial de acuíferos como clave en la administración integral. Esta técnica consiste en utilizar una serie de métodos

para aumentar la disponibilidad de agua, controlar la subsidencia y mitigar las inundaciones (Valcarce et al., 2018). Estos métodos incluyen técnicas de superficie, de subsuelo (en la zona vadosa) y de profundización (en la zona de saturación).

2.8. Pruebas

La sustentabilidad de las aguas del subsuelo se ha evaluado por medio de diversos estudios de carácter interdisciplinario que incluyen las características geológicas, la hidrogeología, hidrotecnia, ecología y la dimensión económica. A continuación, se describen dichas pruebas, con el fin de evaluar sus características, comprobar su efectividad, comprender su rendimiento y determinar los resultados que arrojan.

2.8.1. Prospección topográfica

El reconocimiento de un terreno consiste en el estudio detallado y técnico de sus propiedades materiales, topográficas y geológicas, al igual que de las variantes o modificaciones que presente. A posteriori, esos valores se agrupan en un atlas pormenorizado, que se utiliza como instrumento de planeamiento en trabajos de construcción. Asimismo, se emplean prototipos digitalizados de altitud para ubicar con exactitud el relieve y detectar posibles riesgos de inundación (Soldevilla, 2022)(Figura 6).

Los modelos digitalizados de altitudes posibilitan la creación de patrones topográficos en dos y tres planos que se utilizan en numerosas áreas, como en las obras públicas, planimetría, fotografía aérea, administración de los recursos de la naturaleza, ingeniería del ejército y cartografía. Asimismo, un ejemplar digitalizado de altimetría de elevada resolución (LIDAR) graba las altitudes reales msnm empleando tecnología de detección y medición asistida por láser (INEGI, 2015).

Además, los dispositivos GPS pueden recopilar datos geodésicos con rapidez y mejorar la topografía proporcionando coordenadas universalizadas en un marco de referencia elegido para señalar un lugar concreto, o para localizar un objeto específico, como un pozo de absorción.



Figura 6. Levantamiento topográfico.

Nota: Elaboración propia.

2.8.2. Curvas de altura-duración-tiempo de retorno (HP-D-TR)

En la obtención de esas curvas es preciso contar con la información de precipitación para lapsos menores a 24 horas, la cual puede obtenerse utilizando pluviógrafos. En cambio, si se carece de esta posibilidad, se puede recurrir a coeficientes para establecer la relación entre las precipitaciones en un intervalo de 24 horas.

La hidrogeología recurre a estas curvas para tipificar la magnitud de las lluvias en base a su intensidad y tiempo de recurrencia, son curvas muy útiles para la programación de los recursos hidrológicos y el desarrollo de infraestructuras hidráulicas. La relación de probabilidad entre la fuerza, longitud y periodicidad de las lluvias se muestra a menudo en gráficas que unen marcas que expresan la fuerza de las lluvias en distintos rangos de cursos y en distintos intervalos de recurrencia (Consultoría Aqua, 2024).

2.8.3. Curvas intensidad-duración-frecuencia (I-D-TR)

La pluviosidad se expresa en función de tres parámetros: la intensidad, la duración y la periodicidad. La intensidad se mide en milímetros de precipitación a lo largo de una tempestad u otro evento de precipitación. La duración se refiere al lapso de tiempo durante el cual ocurren las lluvias, en tanto que la periodicidad se suele medir por el

intervalo de tiempo entre eventos recurrentes o el intervalo de tiempo entre eventos similares. El tiempo de restitución es una forma de medir la posibilidad de ocurrencia de suceso de una determinada dimensión, aunque sea cada año o la supere (Consultoría Aqua, 2024). El principal propósito de una táctica de medida de las lluvias es recoger muestras que sean relevantes de un área de predicción determinada. En hidrología, es crucial determinar con precisión el valor de las precipitaciones, y es de suma importancia considerar la selección de la ubicación, así como el diseño y la orientación del pluviómetro. Con el fin de prevenir las pérdidas debidas a la evaporación, los impactos de la brisa y los salpiques (Pan et al., 2018).

2.8.4. Estudio magnetotelúrico (MT)

Conforme a Xu et al. (2020) el procedimiento se basa en la interpretación de las medidas superficiales de los cuerpos electromagnéticos generados por las fluites naturales que atraviesan el subsuelo terrestre. Mediante la medición de estos campos electromagnéticos naturales, es posible estimar la medida de la fuerza opoente a la corriente de electricidad del subsuelo en base a la reiteración y, a continuación, a la profundidad, utilizando algoritmos de inversión de cifras (Figura 7).

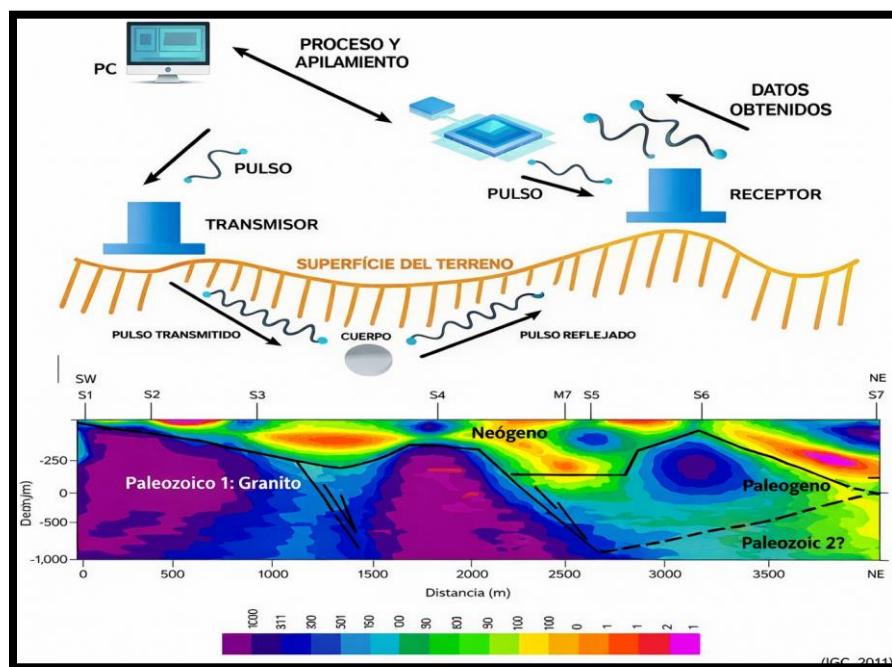


Figura 7. Proceso MT (Ilustrativo).
Nota: Xu et. al. (2020)

Habitualmente, los sondeos audio-magnetotelúricos (AMT) (Tecnología de Manufactura América) y magnetotelúricos (MT) se suelen utilizar para diversos fines por separado. Los registros AMT se utilizan para la exploración de objetivos a profundidades intermedias, como la exploración minera y, más últimamente, la exploración de acuíferos superficiales o en profundidad (>400 m). Con respecto a los sondeos MT se aplican a objetivos situados a más de 1.000 m de profundidad, principalmente en estudios vinculados a la explotación petrolífera, pero también en estudios de la corteza tanto la superior como la media.

2.8.5. Estudio del método electromagnético transitorio en el dominio del tiempo (TEM)

Consiste en una técnica geofísica que se utiliza para estimar la fuerza eléctrica opONENTE magnética del subsuelo mediante el fenómeno de la inductancia electromagnética (Figura 8).



Figura 8. Elaboración del sondeo TEM en campo.

Nota: Elaboración propia.

Se somete a un receptor, generalmente un inductor de metal aislado situado en el suelo, a una descarga eléctrica por un período de tiempo que varía, lo que da lugar a la creación de un campo de magnetismo inicial. La interrupción de la corriente no provoca

una disipación inmediata de la tensión, pero genera campos de magnetismo secundarios al interactuar con elementos del subsuelo.

Estas densidades de flujo se detectan en el área de la captación mediante una bobina. La distancia recorrida puede variar entre una decena de metros y superar los 1.000 metros, dependiendo de la proporción de la bobina emisora, la fuerza asequible del emisor y los grados de interferencia (Pan et al., 2018).

El procedimiento se ha empleado extensamente en la exploración de aguas subyacentes, fontanal termal, mapeo constitutivo, geología, dispersión de emisiones y muchos servicios de la ingeniería, como la medición de la penetración en el subsuelo. La técnica más utilizada para encontrar metales sepultados, como pozos de agua ya desasistidos o canalizaciones y almacenamientos enterrados, es la detección electromagnética (Garcias y Castro, 2018).

2.8.6. Estudio geotécnico

Un análisis y dimensionamiento de los pilotes de las estructuras requiere un estudio geotécnico y geológico que considere las particularidades del terreno y del hábitat periférico. En resumen, consiste en recolectar datos sobre las características naturales del terreno y los peñascos que lo forman. Los ingenieros y geólogos efectúan esos trabajos para concebir los desplazamientos del terreno y las bases de cimentación de las obras (Bai et al., 2017).

Un peritaje geotécnico completo supone una exploración exhaustiva tanto de la superficie como del subsuelo, la recogida de muestras de suelo y aguas subterráneas y la realización de análisis de laboratorio. Este tipo de evaluación exhaustiva permite establecer la reacción del suelo a las modificaciones propuestas y, por lo general, es requisito para conseguir los pertinentes permisos de ejecución de un proyecto.

Los informes geotécnicos obedecen a diferentes condicionantes, y es competencia del profesional de la geotecnia determinar el alcance y los aspectos esenciales del informe. Las inspecciones y pruebas geotécnicas se dividen en las siguientes clases básicas (Bai et al., 2017): Examen del terreno, toma de evidencias, pruebas de campo, y exámenes de laboratorio.

CAPÍTULO 3.- RESULTADOS

En el capítulo III se muestran los resultados obtenidos de la recarga en el acuífero mediante pozo de inyección profunda en ambientes kársticos, siendo el estudio de caso la Galería los Elizondo. En este apartado se mencionan elementos importantes como la descripción del lugar donde se realizó la perforación del pozo, a su vez, se muestran los materiales y equipos utilizados en las diferentes fases del proceso. Asimismo, se explica la metodología de perforación acompañada de los procedimientos para la perforación, y finalmente se muestran los resultados de la perforación del pozo con su respectivo análisis de resultado de acuerdo a los objetivos que se plantearon en el inicio de la misma.

Estudio multivariable

El objetivo principal del análisis multivariable es evaluar el comportamiento integral del acuífero en el contexto de la recarga mediante el pozo de inyección profunda, utilizando múltiples variables que se interrelacionan entre sí y pueden beneficiar o afectar la dinámica del acuífero, lo cual es crucial para la optimización de las estrategias de manejo y recarga.

Para este estudio se seleccionaron algunas variables significativas; entre estas variables se encuentran las propiedades hidráulicas y los factores climáticos, las características de inyección y las condiciones geológicas. Cuando se refiere a las propiedades hidráulicas, se trata de la conductividad, porosidad y permeabilidad del suelo y de la roca; cuando se habla de los factores climáticos, se está hablando de la precipitación, evapotranspiración y temperatura. Respecto a las características de inyección, se estudian el caudal de inyección, la duración del proceso, la calidad del agua inyectada y, finalmente, las condiciones geológicas. Estas condiciones están relacionadas con la estratigrafía y presencia de capas impermeables. Asimismo, se deben recolectar datos que se obtendrán durante el proceso de la recolección del estudio de campo. Estos datos son dirigidos al monitoreo del tiempo real y la revisión de registro histórico, así como a asegurar la disponibilidad y la información actualizada relevante.

Subsiguientemente, hacer el análisis de datos, ahí se aplican métodos de análisis estadístico y de modelación matemática para identificar patrones, tendencias y

relaciones entre las variantes. Así como también se utiliza el análisis multivariable para el análisis de componentes principales y la regresión múltiple, que se emplean para evaluar cómo estas variables interactúan y afectan el comportamiento de la cuenca.

Desde una perspectiva integradora, entender los resultados obtenidos ayuda a ver el sistema de acuíferos en su conjunto, identificando áreas problemáticas y sugiriendo un uso eficaz del pozo de inyección profunda.

Como etapa de cierre metodológico, se hace una validación del modelo mediante una comparación de datos de campos de simulaciones, asegurando su aplicación y efectividad en el acuífero. A partir de los estudios a continuación se extraerán los datos cuantitativos para lograr hacer el análisis final de la investigación.

3.1. Geodesia y referenciación espacial

Para lograr el lugar idóneo que será el reservorio de agua del sitio, se deben emplear ciertos métodos que permitan determinar si el área es adecuada o no para el desarrollo de la investigación. Estos procesos críticos de selección se complementan con diversas disciplinas científicas de carácter técnico. En este sentido, la hidrología, el análisis de la receptividad del suelo, la geofísica y la geotecnia se consideran herramientas fundamentales, ya que permiten caracterizar el comportamiento hidrológico, las propiedades del subsuelo y las condiciones estructurales necesarias para el adecuado funcionamiento del reservorio.

Adicionalmente, es indispensable considerar factores como la topografía del terreno, la pendiente natural y la delimitación de la cuenca de aportación, debido a que estos elementos influyen directamente en la captación, conducción y almacenamiento del agua. De igual forma, el análisis de variables hidrológicas como la precipitación, el escurrimiento superficial y los periodos de retorno permite estimar la disponibilidad del recurso hídrico y dimensionar adecuadamente el sistema. Por otra parte, la evaluación de la permeabilidad e infiltración del suelo resulta clave para asegurar que el almacenamiento sea eficiente y acorde con los objetivos del proyecto, evitando pérdidas excesivas o comportamientos no previstos. En conjunto, la integración de estos estudios permite seleccionar un sitio técnicamente viable, garantizando un funcionamiento

adecuado del reservorio bajo criterios de eficiencia hidráulica, aprovechamiento del recurso y sostenibilidad a largo plazo.

3.1.1. Sitio de estudio

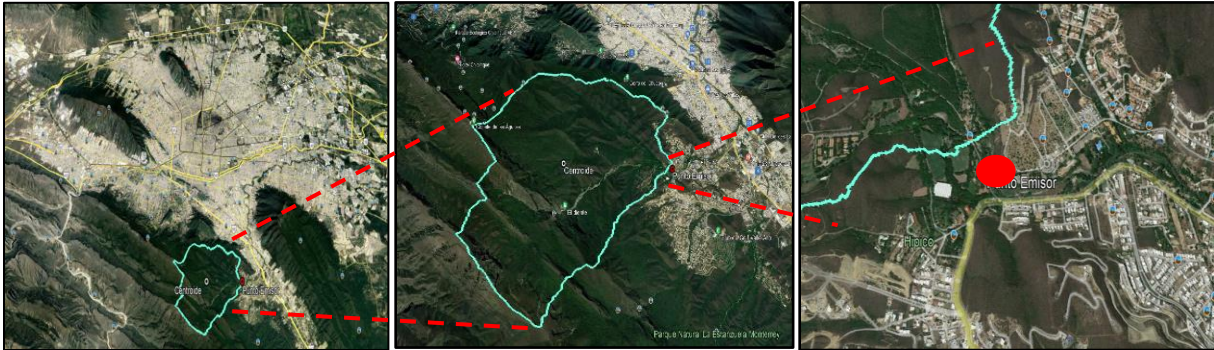


Figura 9. Sitio de estudio marcado con rojo.

Nota: Elaboración propia con Google Earth.

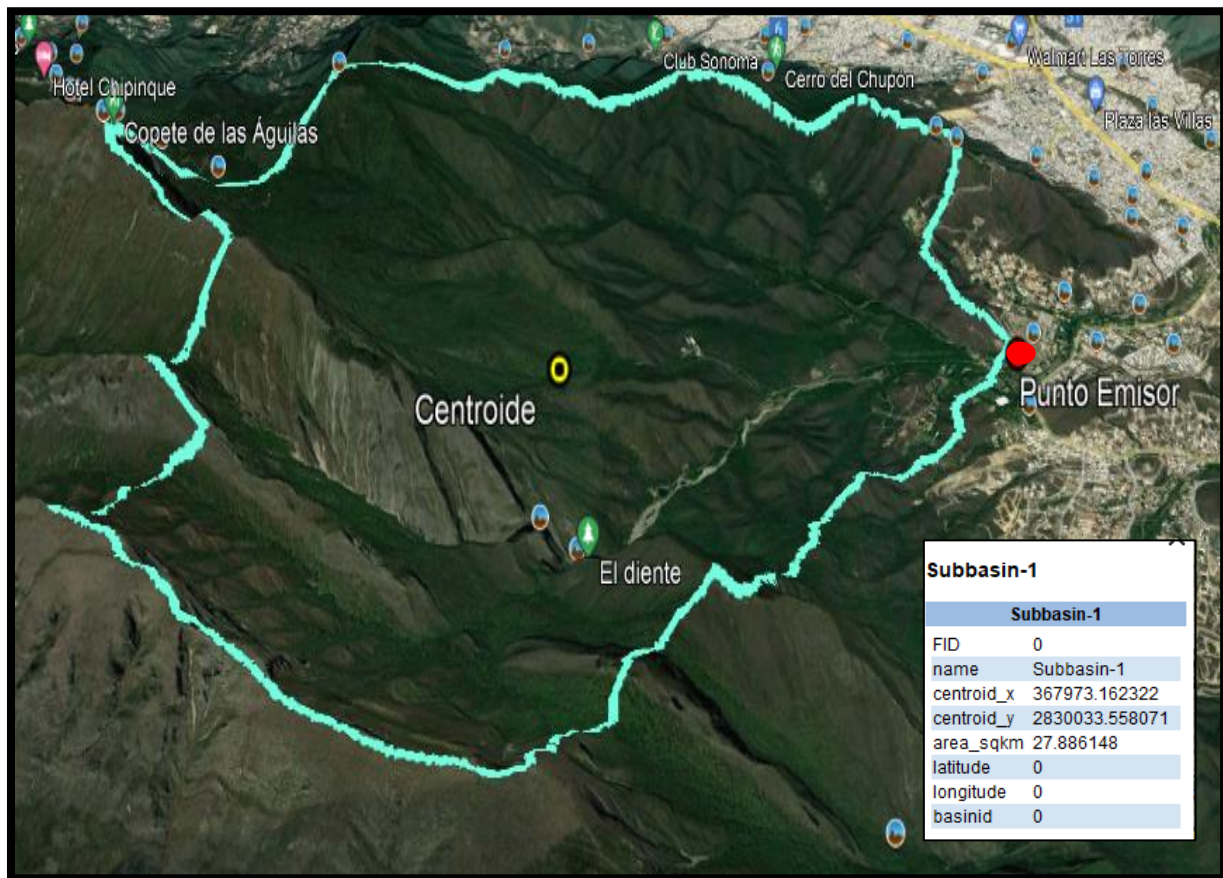


Figura 10. Coordenadas del sitio de estudio.

Nota: Elaboración propia con Google Earth.

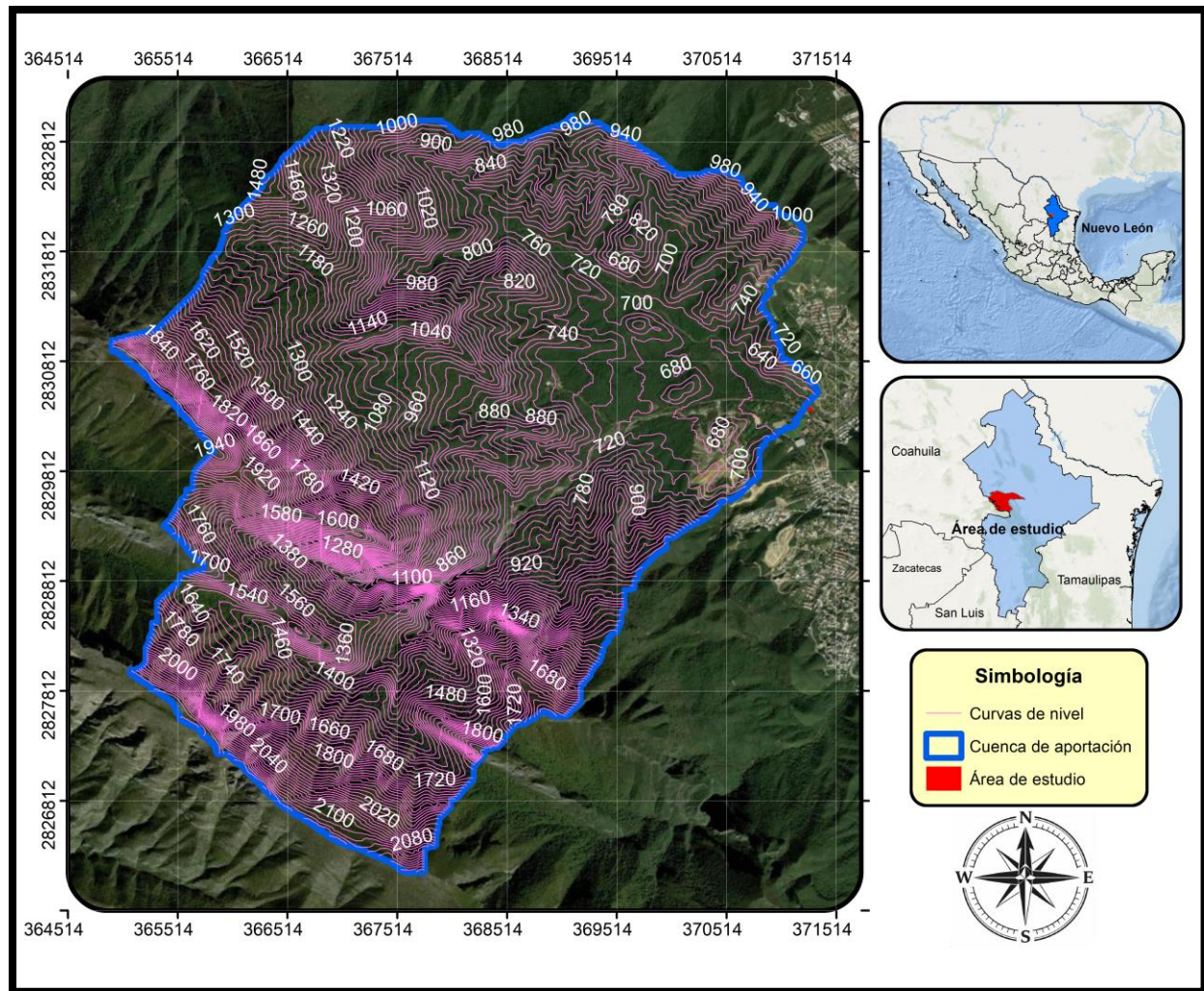


Figura 11. Curvas de nivel de la cuenca de estudio y ubicación.

Nota: Elaboración propia con ArcGIS.

3.2. Fisiografía del área de estudio

La fisiografía es un elemento esencial para comprender el entorno natural que constituye a una región, debido a que describe sus características conforme al relieve, origen y la relación con los procesos geológicos y geomorfológicos que las han modelado a través de los años. Su análisis permite contextualizar la configuración topográfica de una zona y establecer su vínculo con aspectos estructurales, litológicos y tectónicos, por lo que su caracterización es de suma importancia para interpretar correctamente las condiciones naturales del sitio, así como su geología regional.

La zona de estudio se encuentra al sur de la ciudad de Monterrey, Nuevo León, México, dentro de la provincia Sierra Madre Oriental, algunos de los rasgos característicos de esta son: sierras plegadas, pendientes elevadas, valles intermontanos, etc. Es una de las más importantes en México y se visualiza como un macizo montañoso, angosto y estructuralmente complejo, tiene una extensión de aproximadamente 800 km y un ancho de 80-100 km, con niveles de elevación que en algunas áreas alcanzan hasta los 2,500 m.s.n.m. (INEGI, 2016). El relieve desciende gradualmente hasta llegar al Altiplano Mexicano por el poniente, y a la Llanura Costera del Golfo de México por el oriente.

Geomorfológicamente, la Sierra Madre Oriental representa un cinturón plegado y cabalgado, resultante del levantamiento, acortamiento, y deformación de rocas mesozoicas, apoyadas sobre un basamento con edades del Precámbrico y Paleozoico. Esta deformación está asociada a la orogenia Laraídica, en donde se encuentran pliegues apretados, fallas inversas, cabalgadura, entre otras (Eguiluz de Antuñano et al., Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México. , 2000).

Adicional a ello, la provincia muestra variaciones morfoestructurales, las cuales son controladas por la paleogeografía de las unidades sedimentarias y por la existencia de diversos niveles de despegue. Debido a estas condiciones, se ha generado estilos estructurales contrastantes junto con un relieve montañoso continuo (Eguiluz de Antuñano et al., 2000).

Por otro lado, dentro de la provincia de la Sierra Madre Oriental se encuentra la subprovincia fisiográfica Gran Sierra Plegada, que de igual manera corresponde a la zona de estudio. La subprovincia tiene una extensión que abarca desde el este de Saltillo, Coahuila, hasta las proximidades de Monterrey, Nuevo León, en donde modifica su trazo estructural y comienza a dirigirse al sur. Está constituida principalmente por relieves montañosos ligados a estratos sedimentarios plegados, de la litología calcárea, o cuales controlan la morfología del terreno. Se destaca por sus ejes estructurales de anticlinales y sinclinales, así como zonas de flexión regional, en donde se encuentra el Anticlinorio de Arteaga al sur del municipio de Monterrey. Por otro lado, también cuenta con una falla inversa principal acompañada por un sistema de fallas normales en los bordes orientales de la sierra (INEGI, 1985).

En la siguiente figura, se muestra la ubicación y delimitación espacial de la subcuenca del río Santa Catarina, así como su relación con los límites administrativos y la región hidrológica. La delimitación de la subcuenca responde directamente a las condiciones fisiográficas del área, ya que su forma, extensión y orientación están controladas por el relieve, las pendientes y las estructuras de la Sierra Madre Oriental.

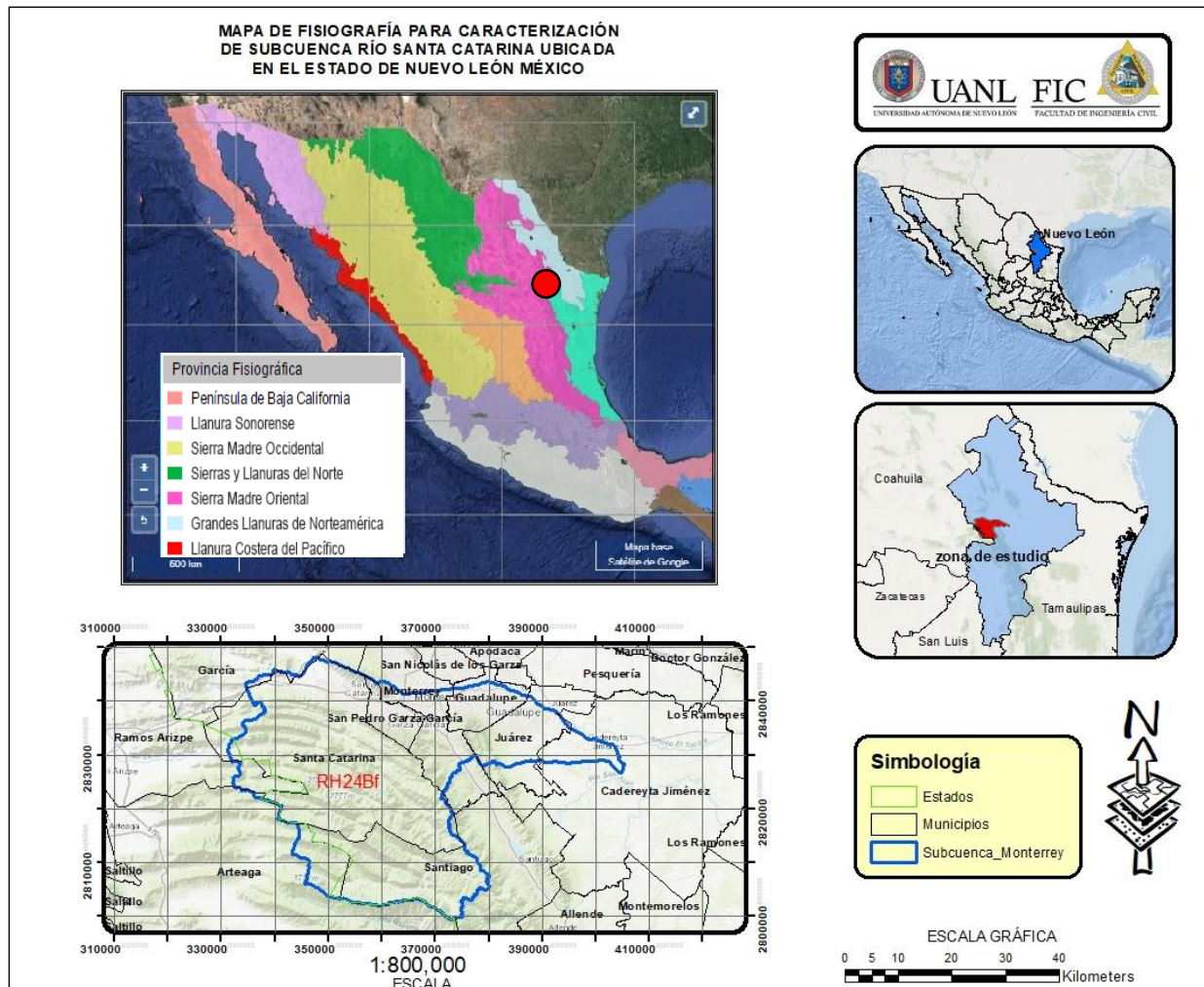


Figura 12. Mapa de fisiografía para caracterización de subcuenca Río Santa Catarina.

Nota. Elaboración propia con ArcGIS.

Por último, es importante mencionar que el sitio de estudio se encuentra dentro del sistema de topoformas tipo Sierra, conformado por relieves montañosos continuos con grandes pendientes y crestas alineadas (INEGI, 2016).

3.3. Geología

3.3.1. Geología regional

Con respecto a la geología regional, la zona de estudio se encuentra dentro del Cinturón Plegado y Cabalgado de la Sierra Madre Oriental la cual es una provincia de gran magnitud que está ubicada en el oriente de México, abarca desde Parral, Chihuahua, hasta Zongolica, Veracruz. Está principalmente constituida por rocas sedimentarias marinas clásticas y carbonatadas del periodo Mesozoico, el cual conforma el núcleo estructural del noreste de México y controla una gran parte de la configuración tectónica y de la estratigrafía de la región (Eguiluz de Antuñano, 2001).

La Sierra Madre Oriental representa un cinturón plegado originado por una deformación de cobertura temprana, con la participación adicional de una deformación de basamento tardía, la cual está directamente vinculada al evento de la Orogenia Laramídica (Chávez-Cabello, 2005)

El basamento de esta provincia presenta una gran variedad litológica y cronoestratigráfica, está compuesta mayormente por gneises de edad Precámbrica y esquistos preoxfordianos provenientes de la región del Transpaís. Por otro lado, también contiene sedimentos del Paleozoico y rocas del Permo-Triásico, las cuales son consideradas el resultado de la subducción del margen occidental de Pangea (Torres-Vargas, 2018).

Los sedimentos que constituyen a la Sierra Madre Oriental fueron depositados durante la evolución de la apertura del Golfo de México, la cual se inició en el Triásico tardío con la fragmentación de Pangea. Este proceso generó fosas y bloques elevados que controlaron la subsidencia y el espacio de acomodación, favoreciendo la acumulación diferencial de sedimentos. Con el tiempo, dichas depresiones fueron invadidas por el mar, estableciendo condiciones marinas que condicionaron la distribución de facies sedimentarias desde el Calloviano (Eguiluz de Antuñano, 2001).

Al inicio, se depositaron evaporitas, seguidas por rocas calcáreo-arcillosas y clásticas carbonatadas, las cuales fueron posteriormente afectadas por una regresión marina regional provocada por el levantamiento Laramídico del noreste de México.

El rifting inicial está representado por acumulaciones volcánicas del Grupo Huizachal, mientras que la sedimentación marina comenzó con las evaporitas del Calloviano al Kimmeridgiano, las cuales con el paso del tiempo actuaron como niveles de despegue regionales que condicionaron las estructuras del cabalgamiento generadas durante la deformación de Laramídica (Pindell, 2009).

Durante el Jurásico tardío, también conocido por Kimmeridgiano-Tithoniano, se depositó la Formación La Casita, la cual está conformada por un mayor flujo clástico y diversas variaciones laterales controladas por la cercanía al Bloque de Coahuila. Por otro lado, en el Berriasiano-Valanginiano se desarrolló la Formación Taraises, compuesta principalmente por calizas y margas de plataforma marina, adicionalmente, se incluye el Miembro Galeana, integrado por areniscas del deltáico (Cantú-Chapa, 1992).

Durante el Cretáceo temprano se establecieron diversas plataformas carbonatadas representadas por las formaciones Cupido y Tamaulipas Inferior, seguidas por Aurora y Tamaulipas Superior. Estas muestran ciclos de somerización interrumpidos por transgresivos profundos, representados por la Formación Peña (Salvador, 1991).

Adicional a ello, entre el Albanio tardío y el Maastrichtiano, se depositaron las siguientes formaciones: Formación Cuesta del Cura, Agua Nueva, San Felipe, y Méndez. En estas se ve reflejada la transición entre ambientes marinos profundos, someros, y en condiciones sinorogénicas asociados a la orogenia Laramidica (Vega, 2009).

A continuación, se muestra la columna estratigráfica representativa del noreste de México, en la cual se sintetiza la sucesión cronológica y litológica de las unidades geológicas desde el Jurásico Superior hasta los depósitos Cuaternarios. La columna incluye la diferenciación por eras y periodos geológicos, así como la descripción de las principales litologías asociadas, tales como calizas, lutitas, areniscas y conglomerados, además de sus relaciones estratigráficas y espesores relativos.

Esta información permite contextualizar el marco geológico regional y sirve como base para la interpretación de las condiciones geológicas y geotécnicas del área de estudio. Asimismo, facilita la identificación de unidades con distinto comportamiento mecánico e hidráulico, lo cual es fundamental para evaluar su respuesta ante cargas y procesos de infiltración. De igual manera, contribuye a reconocer la continuidad lateral de los estratos y su posible influencia en la estabilidad del terreno.

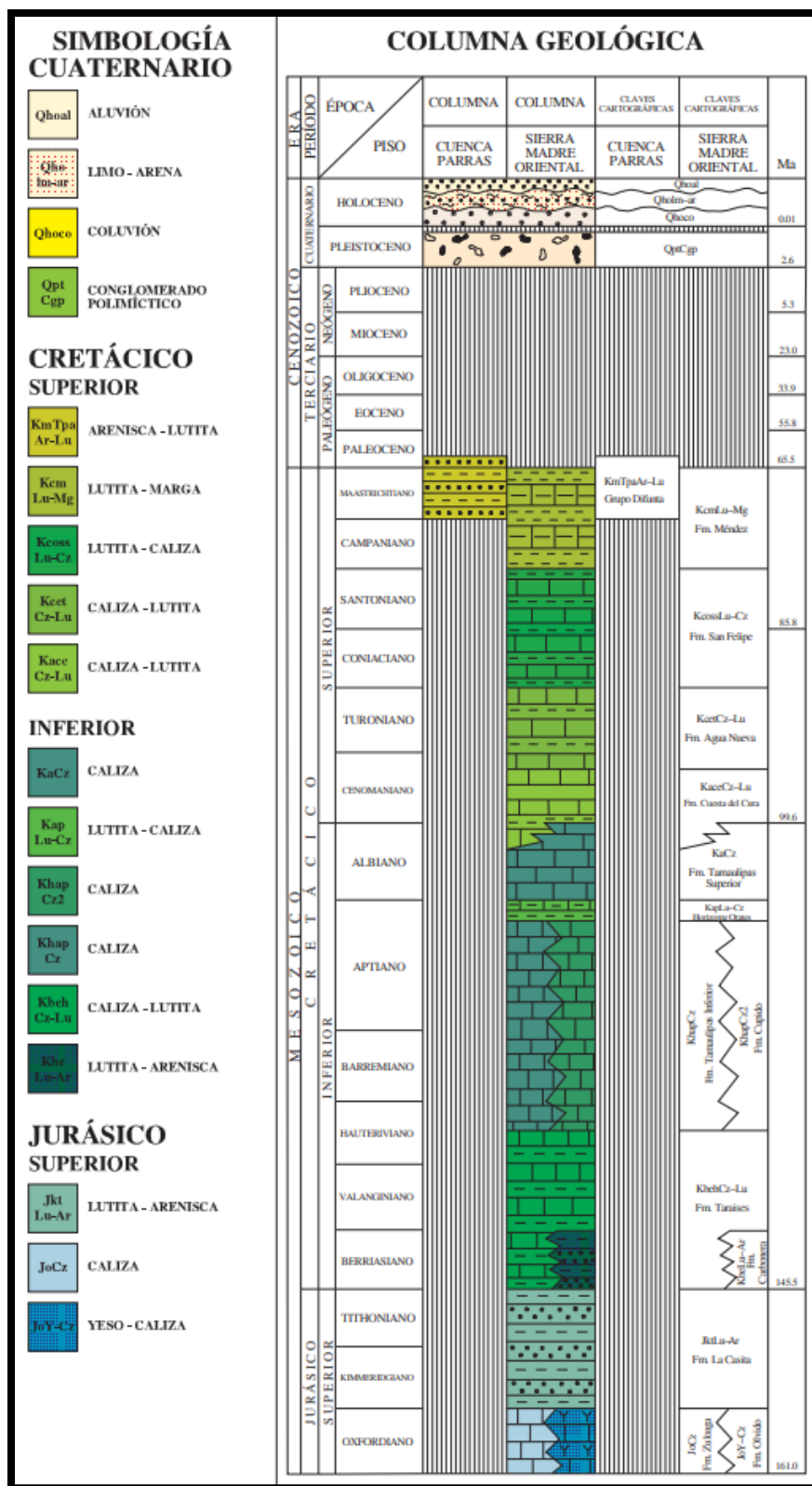


Figura 13. Columna geológica-minera del Noreste de México G14-7.
Nota. Servicio Geológico Mexicano (2000).

3.3.2. Geología local

El predio en estudio está localizado dentro de la provincia de la Sierra Madre Oriental, considerada una cadena montañosa con orientación de noroeste a sureste, dominando el relieve del noreste de México (Suter, 1987).

Con respecto a la geología local, en la zona se encuentran principalmente rocas sedimentarias marinas provenientes del Mesozoico, en donde predominan calizas y lutitas depositadas en ambientes de plataforma y cuenca durante el Cretácico medio e inferior. Estas unidades provienen de la precipitación del carbonato de calcio y la sedimentación de partículas finas en antiguos ambientes marinos, en donde se presentan las calizas como estratos compactos de color gris claro a beige, y, por otro lado, se presentan las lutitas como rocas arcillosas, de tonalidades gris oscuro (Eguiluz de Antuñano, 2001).

El conjunto de las secuencias sedimentarias mencionadas con anterioridad se ha ido deformando con el paso del tiempo, debido a los esfuerzos compresivos asociados a la Orogenia Laramidica, lo que dio lugar al desarrollo de plegamientos, cabalgamientos y a sistemas de fracturamiento (Eguiluz de Antuñano, 2001).

En consecuencia, se originó una topografía estructural compuesta principalmente por anticlinales y sinclinales con dirección de noroeste a sureste, los cuales son responsables del control de la disposición actual de sierras y valles en la región, específicamente del municipio de Monterrey (Suter, 1987).

De acuerdo al Modelo Digital de Elevaciones de INEGI (2019), las zonas más altas en el entorno inmediato al proyecto corresponden a serranías con una elevación de 1,500 m.s.n.m, y las más bajas corresponden depresiones y valles intermontanos con una elevación de 650 m.s.n.m.

Conforme con esta configuración geológica y estructural, en la siguiente figura se muestra una carta geológica en la que se presenta la distribución de las unidades del área, elaborada a partir de información del Servicio Geológico Mexicano (Servicio Geológico Mexicano, 2000). El área de estudio se encuentra marcada con un punto rojo, lo que permite identificar su localización precisa dentro del contexto geológico regional y su relación con las unidades litológicas circundantes.

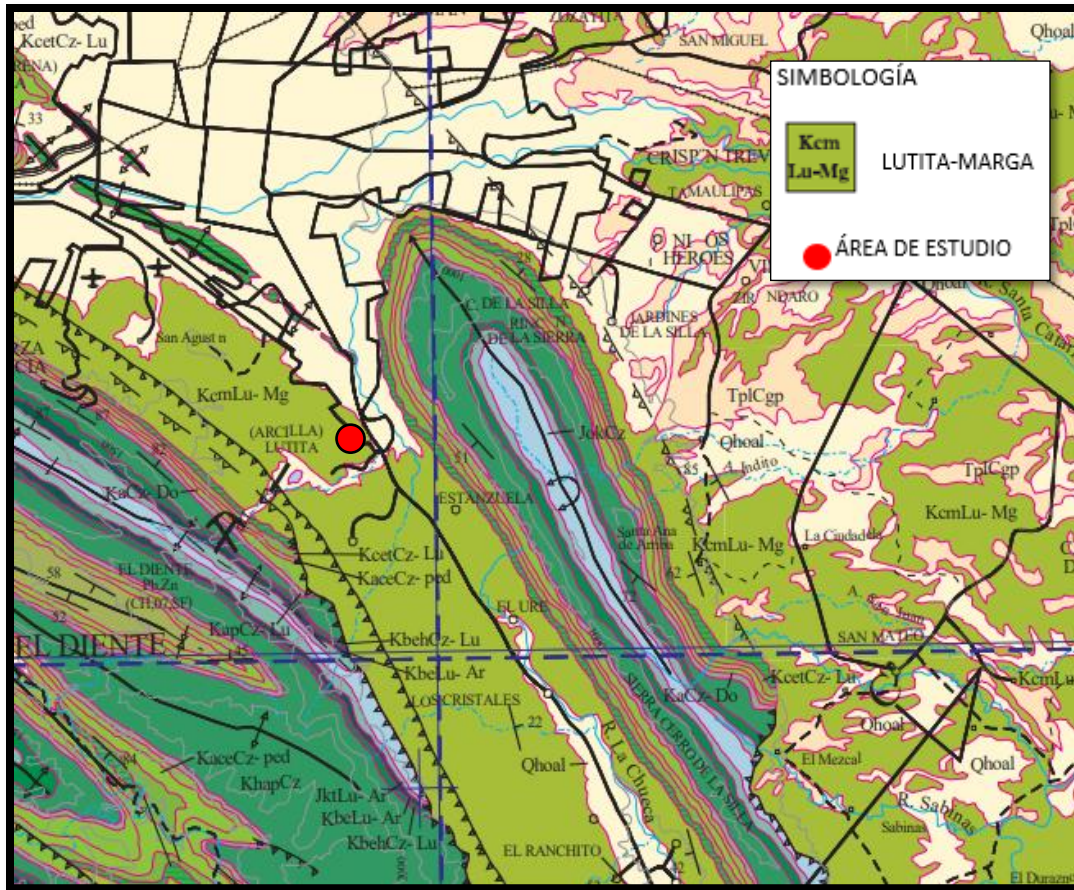


Figura 14. Carta G14-7.

Nota. Servicio Geológico Mexicano (2000), sitio de estudio marcado en rojo.

A continuación, se presenta la estratigrafía de la zona de estudio, en la cual se describen las formaciones reconocidas en el subsuelo del predio, ordenadas de superficie a profundidad, con base en los resultados del estudio geofísico realizado, cuyo método se expone en el capítulo 3.4.

- Aluvión: 0–20 m de profundidad, espesor 20 m, constituido por una mezcla de gravas, arenas, limos y arcillas.
- Formación Méndez: 20–110 m de profundidad, espesor 90 m, lutitas calcáreas de color gris y café.
- Formación Méndez – Formación San Felipe: 110–220 m de profundidad, espesor 110 m, contacto de lutitas calcáreas margosas con una secuencia de calizas arcillosas.

- Formación San Felipe: 220–240 m de profundidad, espesor 20 m, calizas arcillosas con intercalaciones de lutita.
- Formación San Felipe: 240–270 m de profundidad, espesor 30 m, calizas arcillosas intercaladas con lutitas calcáreas; presentan fracturamiento concoidal.
- Formación San Felipe – Formación Agua Nueva: 270–370 m de profundidad; espesor 100 m, contacto de calizas arcillosas intercaladas con lutitas calcáreas y calizas gris oscuro.
- Formación Agua Nueva – Formación Cuesta del Cura 370–425 m de profundidad, espesor 55 m, calizas con textura mudstone–wackestone intercaladas con lutitas calcáreas.
- Formación Cuesta del Cura – Formación Aurora 425–540 m de profundidad, espesor 115 m, calizas con textura mudstone–wackestone con capas delgadas de margas y pedernal negro.
- Formación Aurora – Formación La Peña 540–610 m de profundidad, espesor 70 m, calizas grises de estratificación mediana a masiva, textura mudstone con nódulos y bandas de pedernal.
- Formación La Peña – Formación Cupido: 610–720 m de profundidad, espesor 110 m, alternancia de capas de calizas arcillosas, limolitas y bandas de pedernal.
- Formación Cupido: 720–800 m de profundidad, espesor 80 m, calizas color gris oscuro–claro muy resistentes; presentan fracturamiento y cársticidad.

3.3.3. Unidades hidrogeológicas del área de estudio

En la Galería Los Elizondo, con base en la columna estratigráfica presentada en la Sección 3.4, obtenida a partir de la interpretación de los estudios geofísicos magnetotelúricos (MT) y electromagnéticos transitorios (TEM), se identifican las principales unidades hidrogeológicas del subsuelo. El acuífero somero se desarrolla dentro del paquete hidroestratigráfico comprendido aproximadamente entre la superficie y los ~370 m de profundidad, el cual incluye los depósitos de aluvión y las unidades cretácicas de la Formación Méndez, el intervalo Méndez–San Felipe, la Formación San Felipe, el intervalo San Felipe–Agua Nueva y la Formación Agua Nueva, caracterizadas

por alternancias de lutitas calcáreas y calizas con permeabilidad secundaria asociada a fracturamiento y disolución incipiente.

Por su parte, el acuífero profundo se aloja en el paquete carbonatado subyacente, a partir de profundidades mayores a ~370 m y hasta aproximadamente 800 m, correspondiente a los intervalos Agua Nueva–Cuesta del Cura, Cuesta del Cura–Aurora, Aurora–La Peña, La Peña–Cupido y la Formación Cupido, constituida por calizas masivas y densamente fracturadas que concentran las principales zonas de alta permeabilidad secundaria y aparición de cavernas del sistema profundo.

La respuesta geofísica de estas unidades, a partir de los contrastes de resistividad identificados mediante los métodos MT y TEM, muestra anomalías conductivas compatibles con circulación activa de agua subterránea y conectividad estructural regional, comportamiento consistente con lo reportado para acuíferos carbonatados cretácicos kársticos en la literatura especializada (Ford y Williams, 2007).

3.3.4. Trayectoria del flujo subterráneo en la Galería Los Elizondo

La trayectoria del flujo subterráneo en la Galería Los Elizondo, con base en los resultados piezométricos y en la configuración estructural identificada en el sistema, se encuentra controlada por la geometría del medio carbonatado, la distribución del cavernamiento y el gradiente hidráulico existente entre los niveles somero y profundo. En el acuífero somero, el análisis realizado indica que el flujo se desarrolla predominantemente de manera subhorizontal, siguiendo planos de estratificación y zonas de fracturamiento que favorecen desplazamientos laterales dentro del macizo rocoso, particularmente en sectores con mayor conectividad estructural.

A medida que el flujo somero intercepta conductos subverticales previamente identificados, se incorpora una componente descendente que permite la transferencia hidráulica hacia el acuífero profundo. Esta trayectoria vertical se asocia al contraste de carga hidráulica entre ambos niveles y a la presencia de cavidades interconectadas que actúan como vías preferenciales de circulación, integrando hidráulicamente el sistema somero con niveles de mayor profundidad dentro del macizo carbonatado.

En el acuífero profundo, el flujo adquiere nuevamente una componente predominantemente subhorizontal, desarrollándose dentro de unidades carbonatadas de

mayor continuidad estructural, lo que sugiere una integración con la red de flujo regional y una menor influencia de condiciones estrictamente locales.

El comportamiento descrito es consistente con lo reportado para sistemas kársticos carbonatados, donde el flujo subterráneo suele estar condicionado por la estratificación, el fracturamiento y la presencia de conductos verticales que permiten la conexión entre distintos niveles hidráulicos (Sharp J. M., 2007).

Asimismo, en medios kársticos profundos, la trayectoria del flujo se encuentra influenciada por la conectividad estructural regional y por redes de cavidades interconectadas, favoreciendo la redistribución del agua dentro del sistema. En este tipo de ambientes, debido a la marcada anisotropía del medio, la identificación precisa de trayectorias reales de flujo requiere la integración de información piezométrica, estructural y técnicas complementarias como el uso de trazadores químicos para verificar conexiones hidráulicas efectivas (Ford y Williams, 2007).

3.4. Geofísica del subsuelo mediante resistividad eléctrica

Los estudios geofísicos presentados en este apartado fueron realizados por la empresa Aplicaciones Múltiples para Consultoría de Valor Agregado, S.A. de C.V., como parte de los trabajos de caracterización del subsuelo del área de estudio.

3.4.1. Criterios y materiales para la selección del sitio de perforación

Para la exploración se usó un magnetógrafo Metronix® modelo ADU08e, con el cual se implementó un cálculo tensorial con un alcance de 50 metros medido en un periodo de 8 horas, lo cual admitió el alcance de profundidades de casi 2 mil metros. Los sistemas digitalizadores usados analizan la información a través de dos tarjetas electrónicas que realizan un escaneo de accesos de frecuencias entre 4,096 a 524,000 Hz y 0.001 a 2048 Hz. La recolección de estas exploraciones se llevó a cabo sin interrupción de baja frecuencia debido a la profundidad establecida usando una cantidad de transmisión de datos para el muestreo a un nivel de 128 a 16,384 Hz. Para procesar estos datos se usó el software Proc- MT Geometrix®. Los valores de capacidad de

Este estudio utilizó la técnica Magneto telúrica de Fuente Natural (MT) y, como complemento, el Transitorio Electromagnético (TEM) para establecer directamente las características de la disposición geo eléctrica de la capacidad de conducción que poseen los elementos del subsuelo en vista de que esta capacidad conductiva de las rocas está supeditada particularmente a los volúmenes de líquidos, salinidad y el nivel de interconexión de los ámbitos porosos.

**SONDEO MT Y TEM SITIO
"CAMINO AL DIENTE"**

Camino al Diente
X=371309.9
Y=2830290.8
Z=620.9

ESCALA 1 cm = 77 m

CAMINO AL DIENTE

Nota. AMC/VA (2022).

La unidad uno comprende los valores de la capacidad de resistencia promedio de 23 Ohm-m a 270 Ohm-m, la cual refleja un grosor de 550 m aproximadamente. En el interior de esta unidad se presentan dos bajos resistivos cuya presencia es atribuida a la saturación, esto ocurre en los 100 a 300 m iniciales de profundidad. El último nivel se caracteriza por un grosor de casi 200 m.

Con esto se deduce que esta unidad se relaciona con lutitas margosas y calizas mayormente arcillosas, intercaladas con margas y probables presencias de organismos bentónicos intrínsecamente relacionados con las formaciones Méndez, San Felipe y Agua Nueva.

Los 600 m indican la presencia de la unidad dos donde se puede notar un resistivo de alto contraste cuyos valores alcanzan niveles por encima de los 1000 Ohm-m. Se presume que se debe a las formaciones La Peña, Cupido y Taraises las cuales están constituidas por calizas arcillosas de alta compactación. Se presume la presencia de fisuras relacionadas con su vecindad con el anticlinal El Diente.

Luego de sobrepasar los 1600 m el estrato de la unidad tres presenta un relevante contraste resistivo, esta característica es motivo de gran atención, pues la presencia de esos valores puede representar la presencia de un acuífero. No obstante, esta información no es suficiente para establecer con exactitud la longitud del reservorio. Este contraste es un elemento fundamental de la red hidrogeológica de la región, la cual provee perspectivas relevantes relacionados con el potencial de acopio y circulación del vital líquido.

El menester de la continuidad de la investigación y exploración para obtener el máximo de conocimiento de las particularidades y el potencial de los reservorios subterráneos relacionados con estos signos de resistividad. No obstante, al identificar el contraste de la capacidad de resistencia de esta capa constituye un excelente paso inicial para la implementación de otras investigaciones futuras asociadas a la red hidrogeológica de esta zona.

A pesar del desaliento que pueda provocar la promesa de obtención de conocimiento más significativo, no tiene medida, pues se podría lograr un óptimo manejo de estos sistemas y formas más eficientes de preservar los invaluable recursos hídricos (Reynolds, 2011).

En la imagen se presenta el perfil del modelo geoelectrico del pozo, donde se muestran las resistividades eléctricas ($\Omega \cdot m$) correspondientes a los distintos estratos y formaciones geológicas, asociadas a los diferentes tipos de materiales, en función de su distribución vertical y de su elevación sobre el nivel del mar (Figura 16).

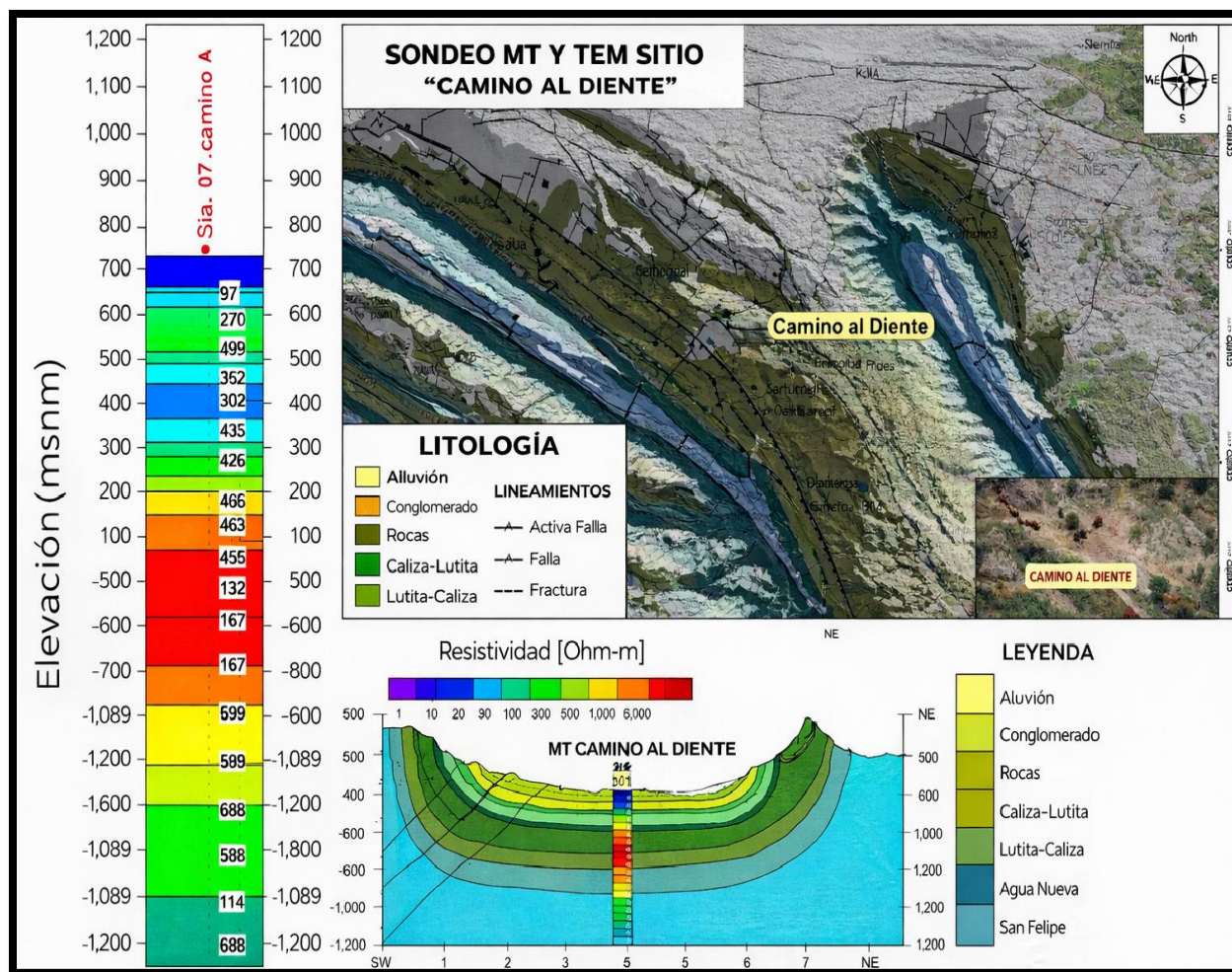


Figura 16. Perfil y construcción de modelo geo-eléctrico.

Nota. AMC/VA (2022).

3.5. Dimensionamiento de las cavidades kársticas y su influencia en la respuesta hidráulica del acuífero

La Galería Los Elizondo se localiza sobre rocas carbonatadas kársticas, donde, con base en la interpretación estructural y geofísica desarrollada en esta investigación, la

distribución espacial, la dimensión y la organización en profundidad de las cavidades ejercen un control determinante sobre el comportamiento hidráulico del acuífero.

En el sitio de estudio se identifica un sistema de conductos y niveles cavernosos asociados tanto al acuífero somero como al profundo, cuya configuración responde a la estratificación, el fracturamiento y la evolución del nivel freático regional.

Este comportamiento es consistente con modelos conceptuales de acuíferos kársticos maduros documentados para el acuífero Edwards (Texas, EE. UU.), donde la disolución progresiva de la roca carbonatada genera redes de conductos interconectados de diversa magnitud (Sharp J. M., 2007).

En dicho análogo se reporta que los conductos que controlan el flujo subterráneo presentan comúnmente diámetros equivalentes del orden de 0.3 a 3 m, mientras que cavidades mayores a 5 m tienden a localizarse en zonas con fuerte control estructural; por el contrario, cavidades menores a 0.5 m son frecuentes, pero rara vez dominan la respuesta hidráulica regional (Sharp J. M., 2007).

En términos hidráulicos, se ha documentado que conductos con diámetros del orden de 1 a 3 m pueden comportarse como vías predominantes de conducción al asociarse con transmisividades elevadas y tiempos de residencia reducidos (Sharp J. M., 2003). En el sitio de estudio, el cavernamiento se interpreta como un sistema multinivel acoplado a los acuíferos somero y profundo definidos en esta investigación.

Para el acuífero somero, el nivel freático fue determinado con base en los registros piezométricos presentados en el Capítulo 3.6.1. A partir de los cuatro pozos de monitoreo (P-1 a P-4), con valores medios de 625.167 msnm, 625.017 msnm, 620.946 msnm y 612.897 msnm respectivamente, se obtuvo un promedio conjunto de 621.007 msnm. Considerando una elevación del brocal aproximada de 628 msnm, la profundidad media al nivel freático es del orden de 6.99 m bajo brocal. En este intervalo se favorece el desarrollo de conductos subhorizontales controlados por la estratigrafía y el fracturamiento, los cuales actúan como vías preferenciales de flujo y condicionan la respuesta hidráulica local.

Para el acuífero profundo se reconoce un nivel cavernoso a mayores profundidades, donde la conectividad vertical adquiere mayor relevancia mediante conductos subverticales que enlazan niveles someros con niveles profundos del sistema.

Ante la ausencia de cartografía espeleológica directa, la caracterización se apoyó en métodos magnetotelúricos (MT) y electromagnéticos transitorios (TEM), orientados a identificar contrastes de resistividad eléctrica asociados a vacíos o zonas de alta permeabilidad dentro del medio carbonatado.

Los perfiles MT muestran zonas con resistividades relativamente bajas del orden de 10 a 50 $\Omega \cdot m$ en contraste con la matriz carbonatada de resistividades mayores, interpretándose dichas anomalías como posibles conductos kársticos saturados o cavidades hidráulicamente activas. De manera complementaria, los perfiles TEM aportan mayor resolución en los niveles someros y respaldan la existencia de anomalías conductivas continuas compatibles con estructuras de flujo preferencial y conectividad vertical.

La magnitud espacial y continuidad de estas anomalías es compatible con conductos de escala métrica (0.5–3 m), rango que, de acuerdo con la literatura especializada, puede concentrar el flujo subterráneo y controlar la respuesta hidráulica del acuífero aun en ausencia de cavernas de gran volumen (Sharp J. M., 2003)

En relación con la inyección profunda, la presencia de niveles cavernosos conectados verticalmente implica que conductos métricos interconectados pueden facilitar la transferencia del agua inyectada fuera del entorno inmediato del pozo y redistribuirla hacia otros niveles del acuífero o hacia zonas de descarga natural, comportamiento ampliamente documentado en sistemas como el acuífero Edwards (Sharp y Clement, 1989).

En consecuencia, el diseño del pozo de inyección debe priorizar la comprensión integral del comportamiento hidráulico y la identificación de cavidades cuya conectividad vertical y horizontal pueda controlar el destino del agua dentro del sistema kárstico.

3.6. Fundamento metodológico del monitoreo del acuífero superficial y del enfoque analítico en acuíferos kársticos

El monitoreo del acuífero constituye un componente central dentro del esquema de análisis hidrogeológico desarrollado en esta investigación, aun cuando el objetivo principal se enfoca en la evaluación del comportamiento de unidades hidrogeológicas

profundas bajo un contexto de recarga potencial. En el presente estudio, el monitoreo del acuífero superficial fue incorporado como elemento metodológico para establecer una línea base hidráulica del sistema, necesaria para interpretar de manera objetiva las fluctuaciones piezométricas registradas durante el periodo de análisis.

En ambientes kársticos, este enfoque resulta particularmente relevante debido a la elevada heterogeneidad estructural, la compleja conectividad vertical y la anisotropía hidráulica asociada a fracturas, diaclasas y conductos de disolución, condiciones ampliamente documentadas en la literatura especializada (Hartmann et al., 2014). Bajo este contexto, el monitoreo sistemático de los niveles freáticos someros permite caracterizar la respuesta natural del sistema ante la precipitación y la variabilidad estacional, estableciendo un marco de referencia para distinguir entre fluctuaciones naturales y posibles efectos asociados a intervenciones antrópicas.

Diversos estudios sobre recarga gestionada de acuíferos señalan que, sin una línea base hidráulica adecuadamente definida, resulta difícil separar la señal hidrológica natural de los impactos inducidos por actividades humanas, lo que puede comprometer la solidez de los análisis comparativos (Dillon et al., 2019).

En coherencia con esta premisa, el monitoreo del acuífero superficial en esta investigación fue concebido como un sistema centinela, capaz de evidenciar respuestas hidráulicas tales como ascensos del nivel freático, modificaciones en los gradientes hidráulicos o sincronías temporales entre eventos de precipitación y la respuesta piezométrica.

Asimismo, en medios kársticos no es metodológicamente válido asumir a priori una desconexión hidráulica entre dominios someros y profundos; por el contrario, la conectividad debe evaluarse indirectamente mediante la observación sistemática del comportamiento del acuífero frente a variaciones hidrológicas. Este enfoque es consistente con recomendaciones institucionales y científicas que destacan la importancia del monitoreo continuo como herramienta de verificación del funcionamiento del sistema (International Association of Hydrogeologists, 2022).

El diseño experimental adoptado en este estudio responde a las limitaciones inherentes a la aplicación de esquemas experimentales clásicos en sistemas hidrogeológicos naturales. En su lugar, se implementó un diseño observacional-

comparativo con control temporal, sustentado en la comparación sistemática de la respuesta hidrológica bajo distintos escenarios climáticos y condiciones naturales del sistema, estrategia metodológica ampliamente utilizada en estudios recientes sobre recarga gestionada de acuíferos (Zheng et al., 2021). La incorporación de periodos extensos de monitoreo permitió establecer un estado de referencia que sirve como base para el análisis de las variaciones del nivel freático.

Bajo este marco, el análisis de los datos piezométricos recopilados durante el periodo de monitoreo se realizó mediante un Diseño Completamente Aleatorizado (DCA) y un Análisis Unidireccional de la Varianza (ANOVA), considerando el tiempo como variable independiente y el nivel freático como variable dependiente. Este procedimiento permitió evaluar estadísticamente las oscilaciones observadas y determinar si las diferencias registradas superan la variabilidad natural esperada, práctica respaldada en la literatura como soporte para la identificación de tendencias y la interpretación cuantitativa de la dinámica del nivel freático (Zheng et al., 2021).

En cuanto a la formulación hidrológica, las ecuaciones empleadas en esta investigación tienen un alcance estrictamente predictivo y están orientadas a la estimación del comportamiento temporal del nivel freático bajo distintos escenarios climáticos y condiciones del sistema.

Estas formulaciones no se utilizaron con fines de diseño hidráulico de obras de recarga, sino como herramientas de apoyo para describir tendencias y proyecciones del comportamiento piezométrico. En ambientes kársticos, donde la complejidad estructural y la limitada disponibilidad de parámetros hidráulicos confiables dificultan la aplicación directa de modelos determinísticos de flujo subterráneo, el uso de aproximaciones empíricas y semiempíricas es reconocido como una práctica metodológicamente válida (Hartmann et al., 2014).

En conjunto, la integración del monitoreo piezométrico, el diseño experimental observacional, el análisis estadístico y la formulación predictiva conforman un marco metodológico coherente con los objetivos del estudio. Este enfoque no depende de una única línea de evidencia, sino de la convergencia de múltiples herramientas analíticas, lo que fortalece el rigor científico y la consistencia interpretativa en un sistema kárstico caracterizado por alta variabilidad espacial y temporal.

Finalmente, aunque el monitoreo del acuífero superficial no constituye un requisito obligatorio dentro de ciertos esquemas técnicos de evaluación, su implementación resulta científicamente recomendable. En sistemas kársticos con alta heterogeneidad y conectividad potencial compleja, el monitoreo somero mejora la confiabilidad del análisis, reduce la incertidumbre conceptual y aumenta la validez de las conclusiones, aun cuando el esquema general de evaluación pudiera aplicarse sin este componente.

3.6.1. Pozos de monitoreo o piezómetro

Fueron revisados continuamente con el objetivo de recolectar la información relativa a la presión, el rastreo fue conducido desde el 2 de agosto de 2021 hasta el 5 de junio de 2023, obteniéndose un importante cúmulo de datos para su examen. Los datos están descritos en las tablas mostradas a continuación donde se observa la simplificación íntegra de las lecturas registradas por los piezómetros a lo largo del rastreo.

La información recolectada a través de estos dispositivos expuso las oscilaciones de los niveles de los acuíferos en los periodos estipulados los cuales se le asignaron a las variaciones sufridas durante las diferentes estaciones y a los cambios de los esquemas de la utilización del líquido. Asimismo, se descubrió que agentes externos como la lluvia y la temperatura eran causantes de dichos cambios.

De manera complementaria, el análisis de los datos obtenidos permitió identificar tendencias temporales en el comportamiento de los niveles piezométricos, lo cual proporciona una base confiable para la evaluación del sistema acuífero y contribuye a la toma de decisiones en proyectos relacionados con la recarga artificial, el aprovechamiento del recurso y la gestión sustentable del agua subterránea.

Tabla 1.Coordenadas de localización de los pozos de monitoreo.

Nota: Elaboración propia.

Coordenadas pozos de monitoreo			
P-1	371091.18 m E	2830506.66 m N	632 msnm
P-2	371294.04 m E	2830376.64 m N	626 msnm
P-3	371428.55 m E	2830265.81 m N	623 msnm
P-4	371640.34 m E	2830348.12 m N	616 msnm

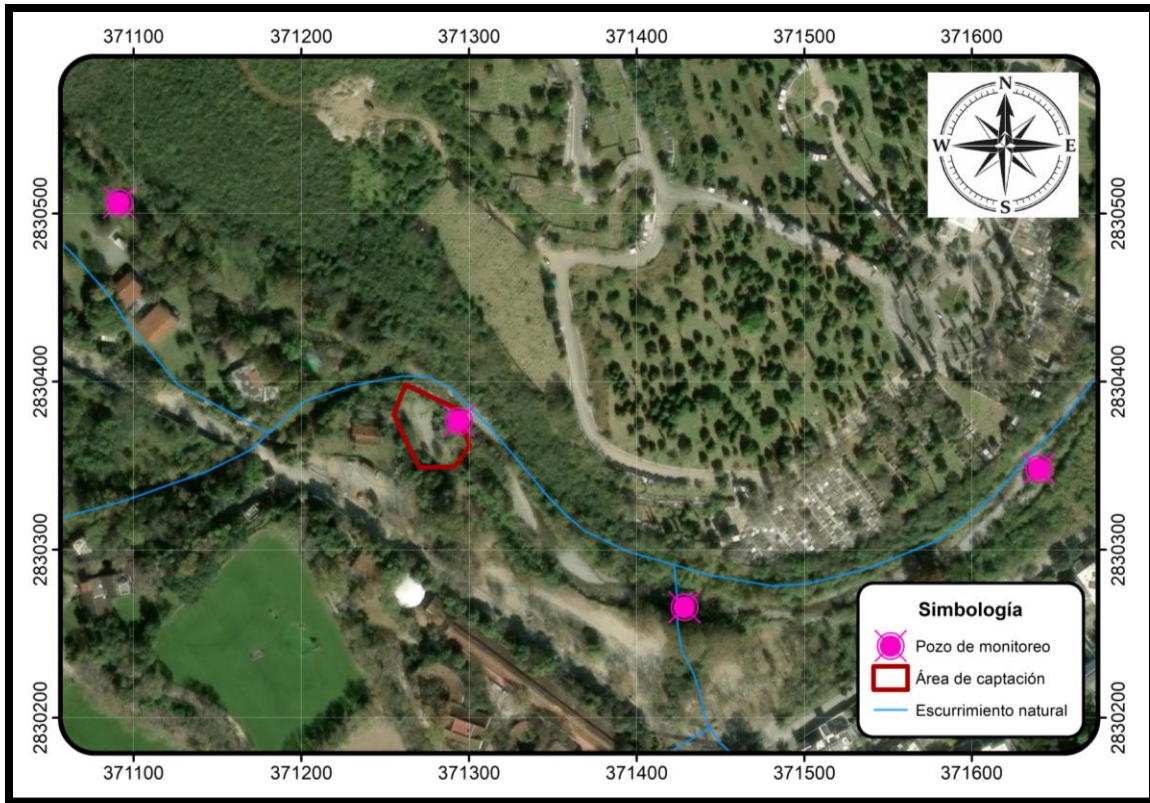


Figura 17. Toma satelital de pozos de monitoreo.
Nota: Elaboración propia con ArcGIS.



Figura 18. Instalación y rastreo de pozos.
Nota: Elaboración propia.

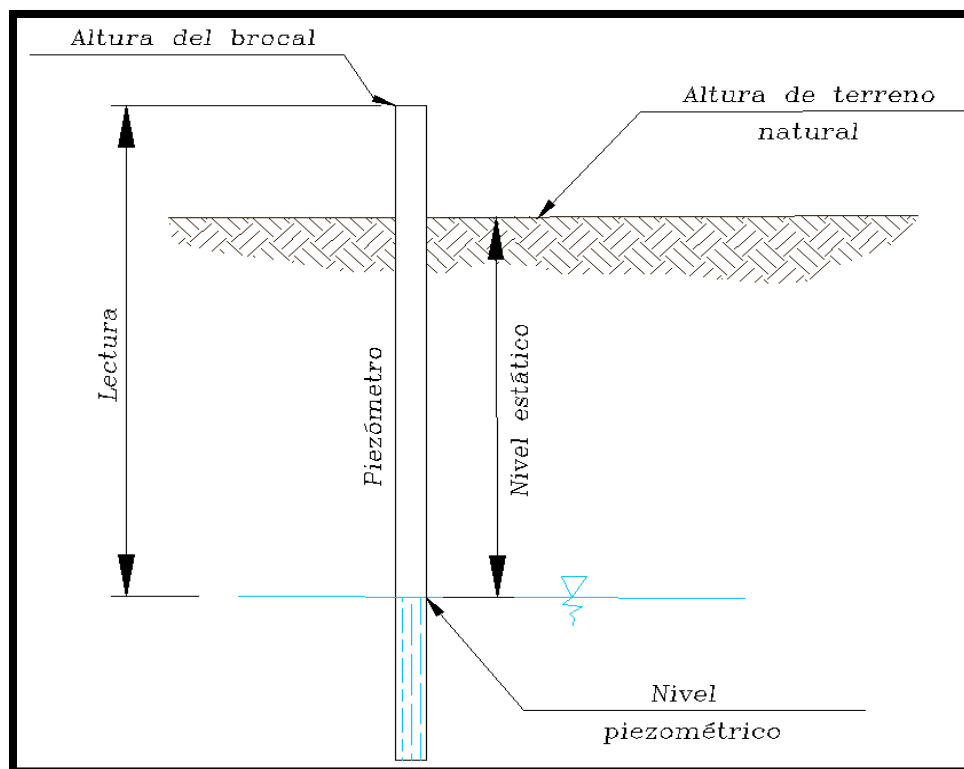


Figura 19. Croquis de instalación de pozo de monitoreo.

Nota: Elaboración propia con AutoCAD.

Tabla 2. Resultados mediciones pozos de monitoreo.

Nota: Elaboración propia con Microsoft Excel.

Nivel piezométrico (msnm)				
Fecha	P-1	P-2	P-3	P-4
02/08/2021	625.32	625.21	621.33	613.74
06/09/2021	625.29	625.20	621.33	613.72
04/10/2021	625.30	625.16	621.36	613.78
01/11/2021	625.24	625.08	621.32	613.52
06/12/2021	625.22	625.04	621.13	613.31
03/01/2022	625.21	625.03	620.80	612.98
07/02/2022	625.23	625.06	620.75	612.92
07/03/2022	625.20	625.07	620.58	612.76
04/04/2022	625.18	625.08	620.55	612.63
02/05/2022	625.19	625.09	620.66	612.84
06/06/2022	625.17	625.07	620.78	612.97
04/07/2022	625.12	625.06	620.85	612.48
01/08/2022	625.13	625.02	620.90	612.95

05/09/2022	625.11	624.96	621.05	613.20
03/10/2022	625.12	624.95	621.18	613.07
07/11/2022	625.09	624.92	621.22	613.02
05/12/2022	625.08	624.90	621.10	612.52
02/01/2023	625.08	624.89	620.85	612.42
06/02/2023	625.07	624.90	620.80	611.97
06/03/2023	625.09	624.92	620.76	612.02
03/04/2023	625.12	624.93	620.73	612.19
01/05/2023	625.13	624.91	620.78	612.65
05/06/2023	625.15	624.93	620.95	612.98

3.6.2. Método para el cálculo y alcance de hipótesis

Tabla 3. Método de análisis experimental.

Nota: Elaboración propia.

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$

El método para el cálculo y evaluación de hipótesis en el presente estudio se fundamenta en un enfoque estadístico inferencial, aplicado al análisis de los datos obtenidos a partir del monitoreo del acuífero superficial. Dado que el objetivo del diseño experimental es evaluar la variabilidad temporal del nivel freático y determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias observadas en distintos periodos de tiempo, se adoptó el Análisis Unidireccional de la Varianza (ANOVA) como herramienta principal de contraste estadístico.

En este contexto, se establecieron las siguientes hipótesis estadísticas:

- Hipótesis nula (H_0): Todas las medias del nivel freático son iguales, lo que implica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los periodos analizados y que las variaciones observadas responden únicamente a la variabilidad natural del sistema.

- Hipótesis alterna (H_1): No todas las medias del nivel freático son iguales, lo que indica la presencia de diferencias estadísticamente significativas entre al menos dos de los periodos evaluados, asociadas a la variabilidad hidrológica del sistema.

El contraste de hipótesis se realizó considerando un nivel de significancia $\alpha = 0.05$, valor comúnmente aceptado en estudios hidrogeológicos y ambientales, el cual establece un equilibrio adecuado entre el riesgo de cometer un error tipo I y la sensibilidad del análisis estadístico. Bajo este criterio, se rechazó la hipótesis nula cuando el valor de p obtenido a partir del estadístico F fue inferior al nivel de significancia establecido.

Es importante destacar que el alcance de estas hipótesis es estrictamente estadístico y metodológico, circunscrito al diseño experimental del monitoreo. En ningún caso estas hipótesis buscan validar la implementación de sistemas de recarga ni la operación de infraestructura hidráulica, sino únicamente evaluar si el comportamiento del nivel freático superficial presenta diferencias significativas entre periodos de observación, aportando sustento cuantitativo a la interpretación hidrogeológica del sistema.

De esta manera, el uso del ANOVA permitió determinar la pertinencia del diseño experimental adoptado, así como la capacidad del monitoreo piezométrico para identificar patrones temporales en el nivel freático.

Los resultados derivados de este análisis constituyen un insumo fundamental para la comprensión del comportamiento del acuífero superficial y para la interpretación de la variabilidad hidrológica observada, sin que ello implique extrapolaciones más allá del alcance metodológico definido en este capítulo.

Tabla 4. Información del factor.

Nota: Elaboración propia.

Factor	Niveles	Valores
Factor	4	P-1, P-2, P-3, P-4

Tabla 5. Análisis de varianza.

Nota: Elaboración propia.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	2280.47	760.157	8967.97	0.000
Error	88	7.46	0.085		
Total	91	2287.93			

Se puede concluir a ciencia cierta que después de haber examinado el valor de “p” en la varianza, el nivel registrado por los piezómetros es influido considerablemente al transcurrir el tiempo, por lo menos en uno de los pozos. Se deduce que la causa estriba en que el valor de “p” está por debajo de 0,05, lo cual es una señal de gran consideración desde el punto de vista estadístico.

Tabla 6. Resumen del modelo.

Nota: Elaboración propia.

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.291142	99.67%	99.66%	99.64%

Es importante acotar que el muestreo realizado fue apropiado y confiable, considerando que el valor de “R-cuadrado” ajustado está por encima del 75%. Este dato es una señal de la suficiencia de la muestra escogida y que puede reflejar con certeza la población del enfoque y los diseños.

Tabla 7. Índices de confianza

Nota: Elaboración propia.

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
P-1	23	625.167	0.074	(625.046, 625.288)
P-2	23	625.017	0.098	(624.896, 625.137)
P-3	23	620.946	0.254	(620.825, 621.067)
P-4	23	612.897	0.510	(612.777, 613.018)

3.6.3. Comparaciones en parejas Tukey

Tabla 8. Agrupación Tukey.

Nota: Elaboración propia.

Factor	N	Media	Agrupación		
P-1	23	625.167	A		
P-2	23	625.017	A		
P-3	23	620.946		B	
P-4	23	612.897			C

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes. *

Tabla 9. Pruebas simultáneas Tukey.

Nota: Elaboración propia.

Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado
P-2 - P-1	-0.1504	0.0859	(-0.3751, 0.0742)	-1.75	0.303
P-3 - P-1	-4.2209	0.0859	(-4.4455, -3.9963)	-49.16	0.000
P-4 - P-1	-12.2696	0.0859	(-12.494, -12.044)	-142.91	0.000
P-3 - P-2	-4.0704	0.0859	(-4.2951, -3.8458)	-47.41	0.000
P-4 - P-2	-12.1191	0.0859	(-12.343, -11.894)	-141.16	0.000
P-4 - P-3	-8.0487	0.0859	(-8.2733, -7.8241)	-93.75	0.000

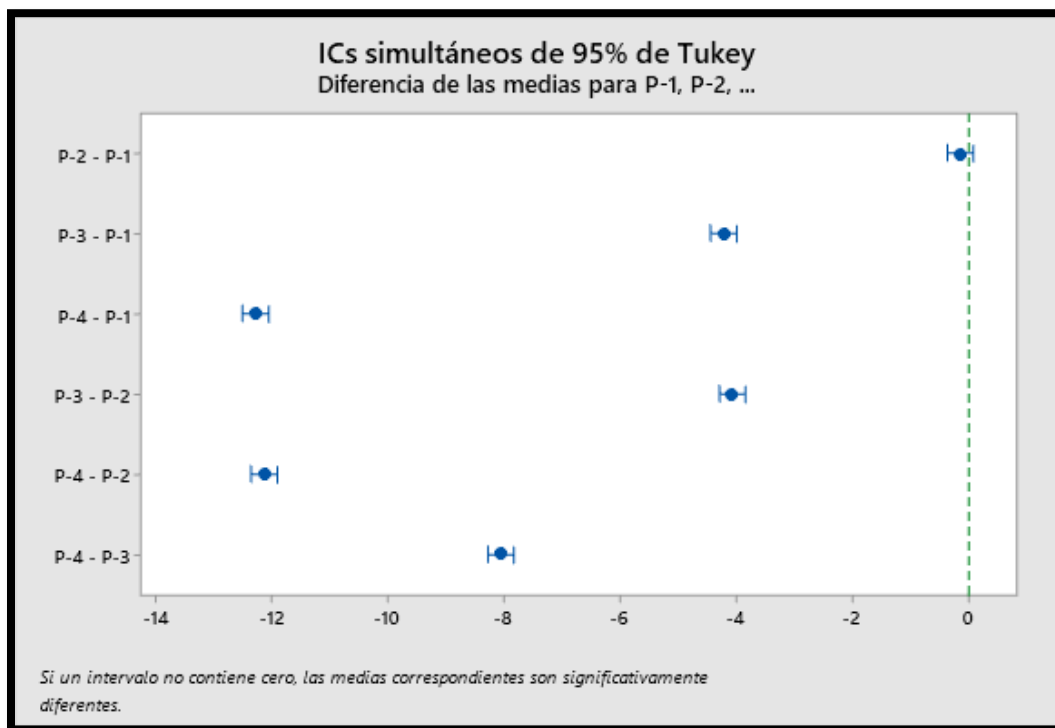


Figura 20. Índice de confianza simultáneos de 95% de Tukey.

Nota: Elaboración propia con Minitab.

3.6.4. Análisis de regresión polinomial: P-1 vs. Fecha

La ecuación de regresión es:

$$P - 1 = 2232 - 0.07153Fecha + 0.000001Fecha^2 \quad (3. 1)$$

Resumen de modelo

Tabla 10. Síntesis del modelo regresión polinomial P-1 vs. Fecha. Síntesis del modelo.

Nota: Elaboración propia.

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)
0.0213576	92.48%	91.73%

Análisis de varianza

Tabla 11. Análisis de varianza regresión polinomial P-1 vs. Fecha.

Nota: Elaboración propia.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Regresión	2	0.112164	0.0560820	122.95	0.000
Error	20	0.009123	0.0004561		
Total	22	0.121287			

Análisis de varianza secuencial

Tabla 12. Análisis de varianza secuencial regresión polinomial P-1 vs. Fecha.

Nota: Elaboración propia.

Fuente	GL	SC	F	P
Lineal	1	0.0930269	69.13	0.000
Cuadrático	1	0.0191371	41.95	0.000

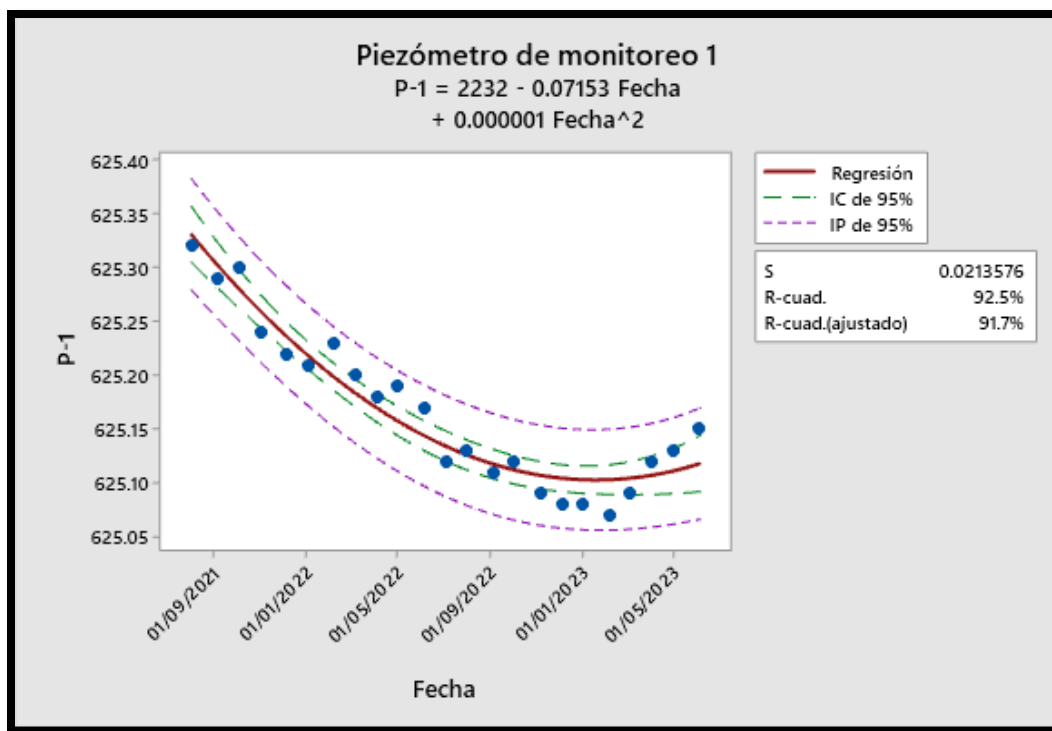


Figura 21. Gráfica de regresión polinomial piezómetro 1.

Nota: Elaboración propia con Minitab.

3.6.5. Análisis de regresión polinomial: P-2 vs. Fecha

La ecuación de regresión es:

$$P - 2 = 1372 - 0.03296 \text{ Fecha} + 0.00000 \text{ Fecha}^2 \quad (3. 2)$$

Resumen del modelo

Tabla 13. Síntesis del modelo regresión polinomial P-2 vs. Fecha.

Nota: Elaboración propia.

S	R-cuad.	R-cuad.(ajustado)
0.0406993	84.31%	82.74%

Análisis de varianza

Tabla 14. Análisis de varianza regresión polinomial P-2 vs. Fecha.

Nota: Elaboración propia.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Regresión	2	0.177993	0.0889965	53.73	0.000
Error	20	0.033129	0.0016564		
Total	22	0.211122			

Análisis de varianza secuencial

Tabla 15. Análisis de varianza secuencial regresión polinomial P-2 vs. Fecha.

Nota: Elaboración propia.

Fuente	GL	SC	F	P
Lineal	1	0.173999	98.43	0.000
Cuadrático	1	0.003994	2.41	0.136

3.6.6. Análisis de regresión polinomial: P-3 vs. Fecha

La ecuación de regresión es:

$$P - 3 = 5910 - 0.2359Fecha + 0.000003Fecha^2 \quad (3. 3)$$

Resumen de modelo

Tabla 16. Síntesis del modelo regresión polinomial P-3 vs. Fecha.

Nota: Elaboración propia.

S	R-cuad.	R-cuad.(ajustado)
0.222628	29.94%	22.94%

Análisis de varianza

Tabla 17 . Análisis de varianza regresión polinomial P-3 vs. Fecha.

Nota: Elaboración propia.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Regresión	2	0.42368	0.211840	4.27	0.028
Error	20	0.99127	0.049563		
Total	22	1.41495			

Análisis de varianza secuencial

Tabla 18. Análisis de varianza secuencial regresión polinomial P-4 vs. Fecha.

Nota: Elaboración propia.

Fuente	GL	SC	F	P
Lineal	1	0.214455	3.75	0.066
Cuadrático	1	0.209225	4.22	0.053

3.6.7. Análisis de Regresión polinomial: P-4 vs. Fecha

La ecuación de regresión es:

$$P - 4 = 7935 - 0.3254Fecha + 0.000004Fecha^2 \quad (3. 4)$$

Resumen de modelo

Tabla 19. Resumen del modelo regresión polinomial P-4 vs. Fecha.

Nota: Elaboración propia.

S	R-cuad.	R-cuad.(ajustado)
0.323443	63.37%	59.71%

Análisis de varianza

Tabla 20. Análisis de varianza regresión polinomial P-4 vs. Fecha.

Nota: Elaboración propia.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Regresión	2	3.61953	1.80977	17.30	0.000
Error	20	2.09231	0.10462		
Total	22	5.71184			

Análisis de varianza secuencial

Tabla 21. Análisis de varianza secuencial regresión polinomial P-4 vs. Fecha.

Nota: Elaboración propia.

Fuente	GL	SC	F	P
Lineal	1	3.22447	27.22	0.000
Cuadrático	1	0.39506	3.78	0.066

3.6.8. Consideraciones finales del análisis estadístico

Con base en los resultados obtenidos mediante el análisis de varianza (ANOVA), se determinó la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los niveles freáticos registrados en los distintos pozos de monitoreo, evidenciando una variabilidad temporal real del sistema acuífero superficial. Las comparaciones múltiples de Tukey mostraron que los pozos P-3 y P-4 presentan descensos significativamente mayores respecto a P-1 y P-2, lo que indica una respuesta diferenciada dentro del área de estudio.

Al contrastar estos resultados con los registros de las estaciones climatológicas del área, se identifica la ocurrencia de un periodo de estiaje o sequía caracterizado por una disminución sostenida de la precipitación acumulada. De acuerdo con la literatura hidrogeológica, los periodos de déficit pluviométrico reducen la recarga natural del acuífero, generando descensos progresivos en el nivel freático debido al desequilibrio entre recarga y descarga (Custodio y Llamas, 1996).

En este contexto, la tendencia descendente observada en las regresiones polinomiales, particularmente en P-3 y P-4, puede interpretarse como una respuesta del acuífero superficial ante condiciones de sequía regional. Esta disminución de niveles podría intensificarse en zonas donde existen procesos de extracción subterránea, incrementando el abatimiento durante periodos de baja recarga.

Por lo tanto, los datos estadísticos obtenidos no solo confirman diferencias significativas entre los periodos evaluados, sino que, al integrarse con la información climatológica regional, permiten concluir que el descenso de los niveles freáticos se encuentra asociado a condiciones de estiaje prolongado, en concordancia con el comportamiento esperado de sistemas acuíferos someros bajo déficit hídrico.

3.7. Topografía

La importancia del siguiente contenido es evidente, por lo que necesita una especial atención relativa a la práctica de curvas de nivel y ubicación por las inclinaciones del área. Esta acción permite una mejor perspectiva de los elementos topográficos de la superficie, además de proporcionar la oportunidad de observar las posibles contingencias. Mediante el uso de esta información se pueden establecer estrategias que avalen la seguridad del personal o de los habitantes del área.

Para implementar un eficaz manejo de los suelos, la zonificación por pendientes es un tema de suma importancia. A través de esta acción se consigue una clasificación de la topografía de la superficie, que al mismo tiempo sirve de apoyo para establecer su utilización más adecuada. En este sentido se puede obtener información sobre pendientes muy pronunciadas, las cuales no son las más aptas para hacer edificaciones o para la actividad agrícola en contraste con la idoneidad de las superficies planas.

Mediante el análisis de las curvas es posible inferir el comportamiento de las fluctuaciones, las cuales no se encuentran por encima de los dos metros en la superficie. Inclusive, es de hacer notar que la ubicación más baja está localizada en el lugar central del equipo de bombeo, a una altura de 626 m.s.n.m.

La utilidad de estos datos es crucial para pronosticar y enfrentar la posibilidad de alguna contingencia o las variaciones del medio, tener conocimiento de las gradaciones

del agua es un punto de apoyo para ejercer acciones razonables y asumir las precisiones adecuadas para asegurar la integridad física y equilibrio del medio ambiente circundante. Asimismo, este cúmulo de compleja información constituye un aporte para sortear los riesgos y garantizar la estabilidad de las personas y su patrimonio.

El análisis detallado de las curvas de nivel permite obtener con precisión los desniveles del terreno, lo cual resulta fundamental para la selección y localización del pozo de inyección. Estas curvas no solo representan la morfología del relieve, sino que también proporcionan información clave sobre las direcciones preferenciales del flujo superficial y subterráneo del agua. A través de su interpretación es posible comprender el comportamiento natural de los escurrimientos pluviales, identificar zonas de acumulación y determinar rutas de drenaje que podrían influir en el diseño y funcionamiento del sistema de recarga.

Adicionalmente, la interpretación integral de la información topográfica permite establecer una relación directa entre las condiciones del relieve y el comportamiento hidráulico del sitio, lo cual es esencial para el correcto funcionamiento del sistema de recarga propuesto.

La identificación de zonas con pendientes favorables facilita la conducción natural del escurrimiento hacia los puntos de captación, reduciendo la necesidad de intervenciones artificiales complejas. De igual forma, el conocimiento detallado de la geometría del terreno contribuye a optimizar la ubicación de infraestructura hidráulica, minimizando riesgos asociados a erosión, acumulación de agua o inestabilidad superficial, y garantizando así un desempeño eficiente y seguro del proyecto a largo plazo.

A continuación, se presenta la topografía, donde se delimitó el polígono correspondiente a la Galería Los Elizondo. Se observan las curvas de nivel que representan las variaciones altimétricas del terreno, así como la ubicación de elementos principales como el pozo de extracción profundo y el centro de bombas. Asimismo, se incluye la tabla con las coordenadas, rumbos, distancias y ángulos que definen cada vértice del polígono, proporcionando el sustento técnico y geométrico del levantamiento topográfico realizado.

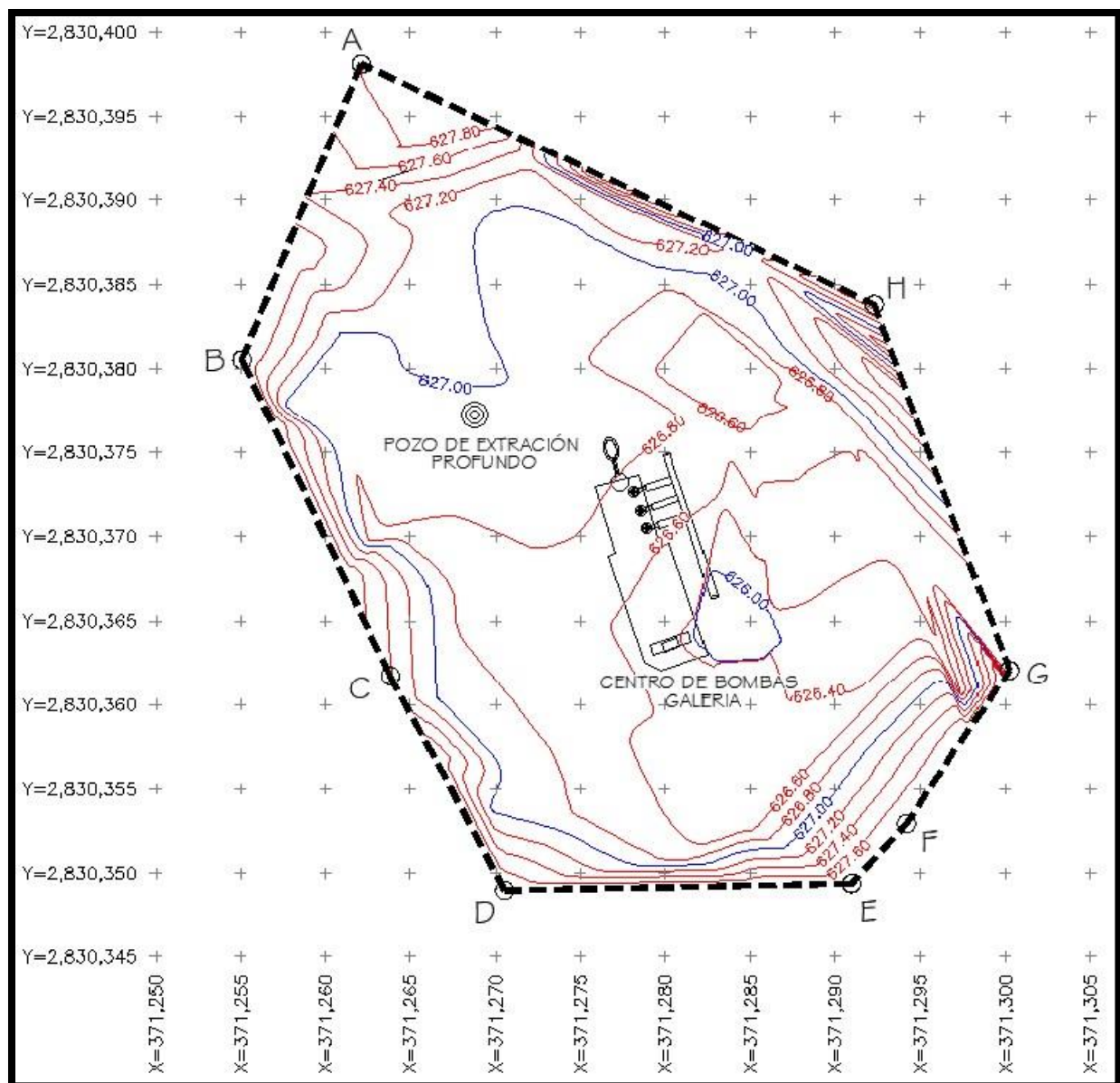


Figura 22. Topografía del sitio de estudio obtenida por medio de GPS Promark 3 Magellan y estación total.

Nota: Elaboración propia con AutoCAD.

A continuación, se presentan las coordenadas correspondientes al polígono delimitado del área de estudio denominada Galería Los Elizondo. En la tabla se muestran los datos técnicos de cada uno de los vértices, incluyendo rumbos, distancias, azimuts y ángulos internos, los cuales definen con precisión la geometría del sitio. Esta información constituye el sustento geométrico del levantamiento topográfico realizado y permite

establecer con exactitud la ubicación y extensión del área analizada, sirviendo como base para el desarrollo de los análisis posteriores dentro del proyecto.

Tabla 22. Levantamiento topográfico curvas de nivel.

Nota: Elaboración propia con AutoCAD.

POLÍGONO GALERÍA LOS ELIZONDO							
LADO	RUMBO	DISTANCIA	AZIMUT	VERT.	ANG.INT.	Y	X
A-B	S 21°51'55.10" W	18.941	201°51'55.10"	A	86°30'50.27"	2,830,398.1099	371,262.1233
B-C	S 25°00'06.93" E	20.744	154°59'53.07"	B	133°7'57.97"	2,830,380.5317	371,255.0693
C-D	S 27°39'02.90" E	14.393	152°20'57.10"	C	177°21'4.03"	2,830,361.7312	371,263.8368
D-E	N 88°51'54.04" E	20.449	88°51'54.04"	D	116°30'56.94"	2,830,348.9823	371,270.5162
E-F	N 42°28'58.73" E	4.815	42°28'58.73"	E	133°37'4.69"	2,830,349.3873	371,290.9609
F-G	N 33°25'16.09" E	10.942	33°25'16.09"	F	170°56'17.36"	2,830,352.9383	371,294.2128
G-H	N 20°01'55.66" W	23.134	339°58'4.34"	G	126°32'48.24"	2,830,362.0706	371,300.2393
H-A	N 64°38'55.17" W	33.409	295°21'4.83"	H	135°23'0.49"	2,830,383.8054	371,292.3147
SUPERFICIE = 1,442.320 m2							

3.7.1. Zonificación por pendientes

Esta estrategia conlleva la identificación de las áreas de zonificación mediante la triangulación de las inclinaciones con rangos específicos, resaltándolos con diferentes colores. Esta técnica permite hacer una observación de los cambios importantes que presenta la superficie en cuanto a sus inclinaciones (Quiroga, 2023).

Asimismo, la zonificación por pendientes permite identificar de manera clara las zonas con mayor potencial para el aprovechamiento del terreno, así como aquellas que requieren consideraciones adicionales en su uso.

Esta información resulta clave para la planeación de obras hidráulicas, ya que facilita la toma de decisiones en cuanto a la ubicación de infraestructura y el control del escurrimiento superficial. De esta manera, se logra una mejor adaptación de las soluciones técnicas a las condiciones reales del sitio, contribuyendo a un desarrollo más eficiente y seguro del proyecto.

Como conclusión, usando este estudio como punto de partida, el 66,68% de las inclinaciones del área donde se ubica la Galería Los Elizondo están por debajo o a igual nivel del 15% y en contraste, el otro 33,32% posee pendientes por encima del 15% (Figura 23).

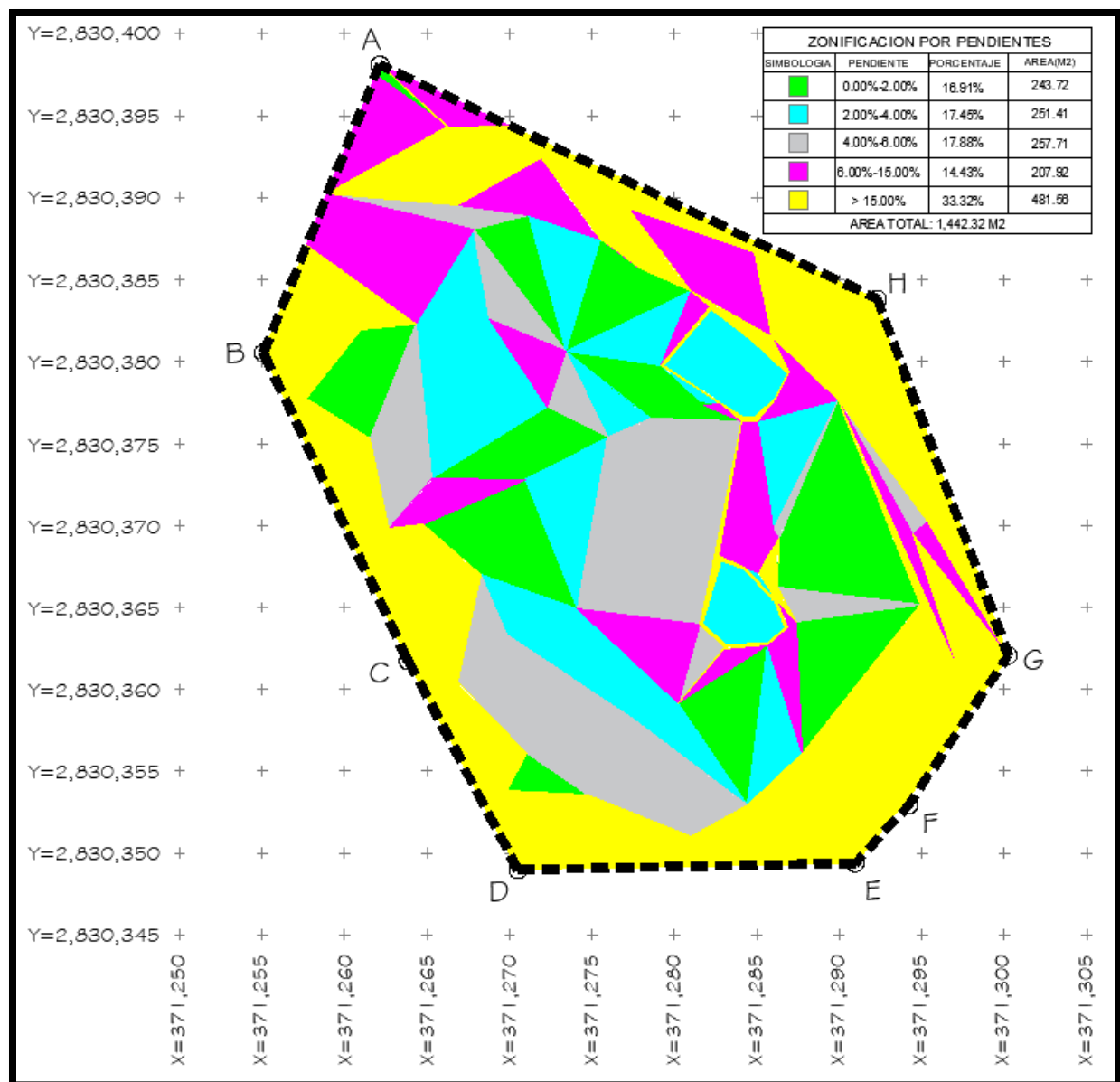


Figura 23. Zonificación de pendientes para el área de estudio.

Nota: Elaboración propia con AutoCAD.

Con la información proporcionada por esta guía se puede concluir que los datos topográficos son esenciales para el establecimiento exitoso de la estructura para el proyecto. Esta estructura tiene como fin la recarga artificial del reservorio subterráneo de manera de conservar los volúmenes idóneos del vital líquido en esta región. Los datos obtenidos por los levantamientos topográficos sirvieron de apoyo para establecer la localización adecuada para la estructura, considerando las particularidades de la

geología e hidrología del área. Con esto se consiguió prevenir las posibles contingencias que podría afectar la construcción debido a su localización.

Asimismo, la información topográfica dio pie para establecer la profundidad y diámetro de la estructura, los cuales son de máxima importancia para realizar la inyección óptima del líquido en el reservorio. Los datos topográficos son cruciales para lograr exitosamente la implantación de este plan. Esta información ha conducido a decidir asertivamente sobre el tema de la localización y formulación de esta estructura, con el aval de la preservación de los niveles de agua de manera constante y razonable.

3.8. Diagnóstico hidrológico del sistema de recarga pluvial

3.8.1. Recolección de información hidrológica

La selección de las estaciones climatológicas se realizó considerando su proximidad al área de estudio registradas por la CONAGUA y la disponibilidad de registros confiables, lo cual garantiza una adecuada representación de las condiciones hidrometeorológicas de la zona. A partir de la información recopilada, es posible analizar el comportamiento de la precipitación y su variabilidad temporal, elementos fundamentales para el desarrollo del análisis hidrológico. De esta manera, los datos obtenidos constituyen la base para la estimación de parámetros como intensidades de lluvia, periodos de retorno y escurrimientos, los cuales son indispensables para el dimensionamiento de las obras hidráulicas propuestas.

Así entonces se pueden señalar: la 19052 Monterrey, ubicada a 16,8 km del centro de obtención, la 19015 El Cerrito, a 16,6 km, y la 19096 La Huastequita localizada a 15,4 km, la cuales fueron usadas para establecer los cánones pluviales del área estudiada.

Tabla 23. Instalaciones climatológicas adyacentes al emplazamiento.

Nota: Elaboración propia.

No. de estación	Nombre	Distancia al centroide (km)
19052	Monterrey	16.8
19015	El Cerrito	14.6
19096	La Huastequita	15.4



Figura 24. Datos de las instalaciones de control climático adyacentes.

Nota: Elaboración propia con Google Earth.

3.8.2. Datos históricos de la estación climatológica 19052-Monterrey, 19015-El Cerrito y 19096-La Huastequita

A continuación, se muestra la tabla de precipitación máxima anual registrada, correspondiente a las estaciones climatológicas consideradas para el análisis. Se incluyen los registros de la estación 19052-Monterrey, 19015-El Cerrito y 19096-La Huastequita. Los datos presentados permiten comparar los valores máximos anuales de precipitación registrados en cada estación, constituyendo la base para el cálculo de los valores para la cuenca de estudio.

Tabla 24. Datos de precipitación máxima para cada estación climatológica.*Nota. Elaboración propia*

Precipitación Máxima Anual Registrada (mm)							
Año	Monterrey	El Cerrito	La Huastequita	Año	Monterrey	El Cerrito	La Huastequita
1951	63.3	-	-	1989	13.1	92.0	62.0
1952	28.0	-	-	1990	65.9	82.5	63.0
1953	62.5	-	-	1991	43.2	84.0	54.5
1954	112.9	-	-	1992	77.7	59.5	38.0
1955	81.4	-	-	1993	66.8	108.0	42.0
1956	41.9	-	-	1994	157.5	91.0	35.0
1957	42.1	79.0	-	1995	62.4	143.0	143.0
1958	83.6	61.7	-	1996	106.9	97.0	109.0
1959	30.5	28.2	-	1997	41.0	79.8	82.0
1960	55.4	-	-	1998	50.7	192.0	92.0
1961	44.5	-	-	1999	77.6	43.0	125.0
1962	56.2	-	-	2000	67.2	170.0	125.0
1963	119.1	190.0	-	2001	65.4	118.0	205.0
1964	27.2	80.5	-	2002	86.0	114.0	76.0
1965	48.6	110.0	-	2003	93.1	75.0	114.0
1966	106.7	194.0	-	2004	129.1	115.0	75.0
1967	100.4	108.0	-	2005	190.9	330.0	236.0
1968	56.0	80.5	-	2006	134.2	65.0	69.0
1969	66.0	61.0	-	2007	48.2	58.0	43.0
1970	72.5	320.0	-	2008	69.4	90.0	87.0
1971	76.7	35.0	-	2009	61.1	57.0	24.0
1972	63.0	75.0	-	2010	332.1	315.0	315.0
1973	85.0	246.0	-	2011	126.8	136.0	110.0
1974	11.0	128.0	-	2012	70.5	112.0	60.0
1975	-	132.0	14.0	2013	119.4	149.0	149.0
1976	-	175.0	20.0	2014	132.0	140.0	170.0
1977	-	187.5	108.0	2015	50.6	74.8	66.0
1978	-	112.0	42.0	2016	60.0	80.0	59.0
1979	-	89.0	73.0	2017	157.4	135.0	75.0
1980	-	114.0	26.0	2018	95.8	150.0	67.5
1981	78.1	82.0	60.0	2019	302.4	330.0	220.0
1982	120.3	26.5	35.0	2020	533.0	330.0	200.8
1983	60.8	116.0	98.0	2021	73.7	85.0	22.0
1984	27.1	99.5	56.0	2022	197.5	216.0	-
1985	45.0	95.0	27.0	2023	65.4	117.0	10
1986	135.8	228.0	60.0	2024	211.5	600.0	30.0
1987	35.4	83.0	60.0	2025	65.2	108.0	16.0
1988	214.0	330.5	135.5	-	-	-	-

Desde esta perspectiva, las instalaciones para el control meteorológico se encuentran muy apartadas de la cuenca afluyente y por ende de la locación de la exploración. Por lo tanto, se tuvo que usar el Servicio Meteorológico Nacional de EE. UU. como medio para calcular los puntos más altos de las precipitaciones anuales considerando las instalaciones adyacentes. De esta manera:

$$P_s = \frac{\sum(P_i w_i)}{\sum w_i} \quad (3.5)$$

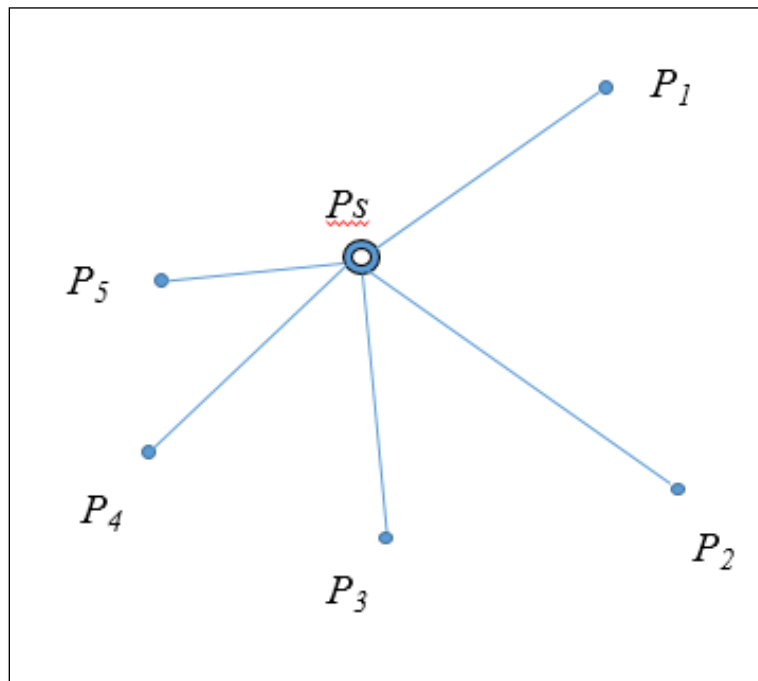


Figura 25. Método National Weather Service.

Nota: Elaboración propia.

Donde:

- P_s = Pluviosidad calculada (mm).
- P_i = Pluviosidad registrada para la fecha de la faltante en las instalaciones de control auxiliares circundantes (mm).
- W_i = Inverso de la distancia al cuadrado (km).

La siguiente gráfica se obtuvo a partir del método Us National Weather Service, en el cual se estimaron los datos faltantes de las estaciones climatológicas seleccionadas para obtener la precipitación máxima acumulada en un lapso de 24 horas.

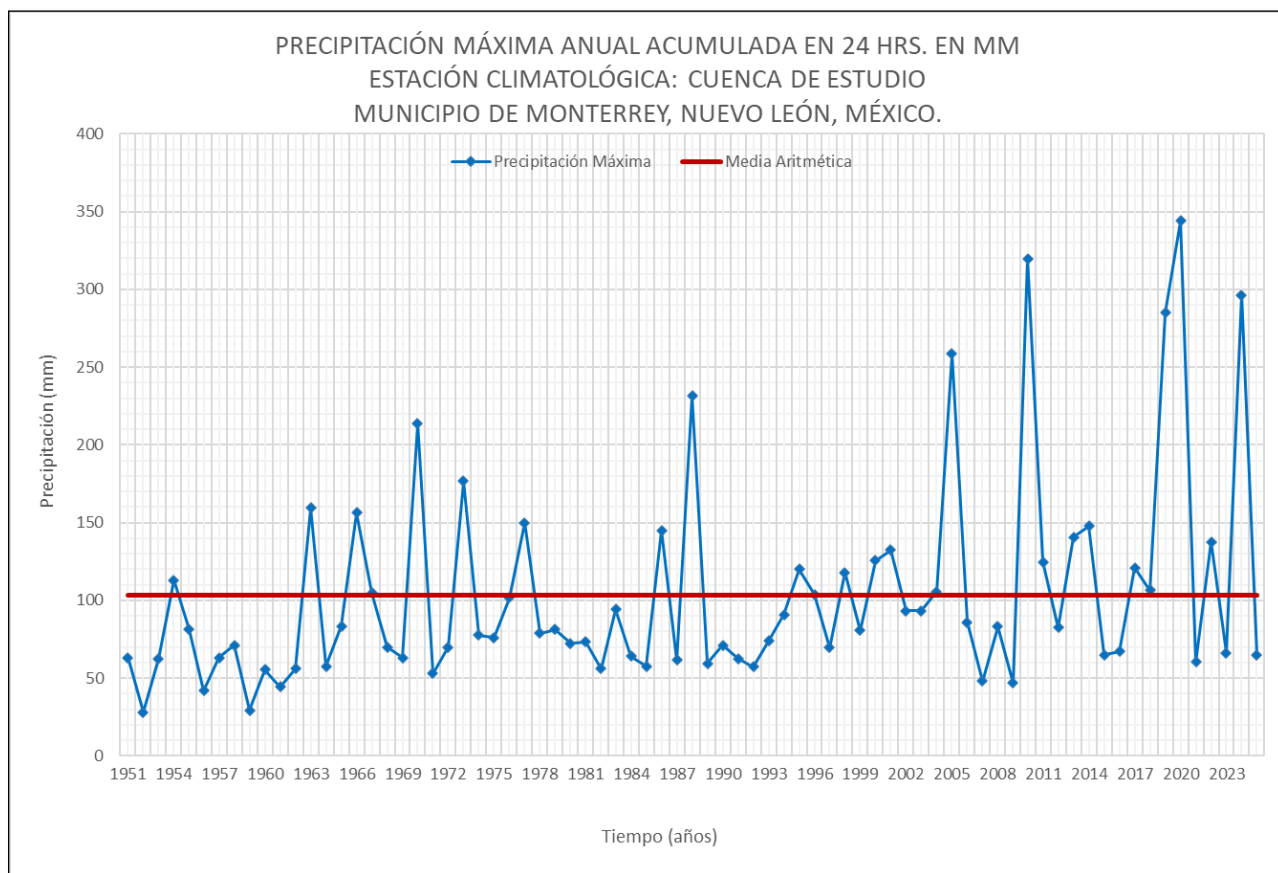


Figura 26. Pluviosidad máxima anual acumulada en 24 horas del sitio.

Nota: Elaboración propia con Microsoft Excel.

A continuación, se muestra la tabla con los valores necesarios para el cálculo de precipitaciones máximas anuales en la cuenca de estudio, los cuales se muestran en la tabla subsecuente.

Tabla 25. Valores para calcular el valor de precipitación máxima en la cuenca de estudio.

Nota. Elaboración propia con Microsoft Excel.

Datos	Monterrey (19052)	El Cerrito (19015)	La Huastequita (19096)	Cuenca de estudio
Suma=	6551.70	9008.50	4284.30	
Distancia=	16.80	14.60	15.40	
W=	0.00354308	0.00469131	0.00421656	0.01245096
W1=	0.00354308	0.00469131		0.00823440
W2=		0.00469131	0.00421656	0.00890787

Tabla 26. Precipitación máxima anual acumulada en la cuenca de estudio.

Nota. Elaboración propia con Microsoft Excel.

Precipitación Máxima Anual Registrada en la Cuenca de Estudio			
Año	Cuenca de Estudio (mm)		
1951	63.30	1985	57.74
1952	28.00	1986	144.87
1953	62.50	1987	61.67
1954	112.90	1988	231.31
1955	81.40	1989	59.39
1956	41.90	1990	71.17
1957	63.12	1991	62.40
1958	71.12	1992	57.40
1959	29.19	1993	73.92
1960	55.40	1994	90.96
1961	44.50	1995	120.06
1962	56.20	1996	103.88
1963	159.49	1997	69.50
1964	57.57	1998	117.93
1965	83.58	1999	80.62
1966	156.44	2000	125.51
1967	104.73	2001	132.49
1968	69.96	2002	93.16
1969	63.15	2003	93.36
1970	213.51	2004	105.47
1971	52.94	2005	258.58
1972	69.84	2006	86.05
1973	176.73	2007	48.20
1974	77.66	2008	83.12
1975	76.14	2009	46.99
1976	101.63	2010	319.87
1977	149.87	2011	124.58
1978	78.87	2012	82.58
1979	81.43	2013	140.58
1980	72.34	2014	147.88
1981	73.44	2015	64.93
1982	56.07	2016	67.20
1983	94.20	2017	121.05
1984	64.17	2018	106.64
		2019	284.89
		2020	344.01
		2021	60.45
		2022	137.59
		2023	66.08
		2024	296.41
		2025	64.66

3.8.3. Distribución de probabilidad para el establecimiento de periodos de retorno de precipitación. Datos arrojados por la prueba estadística Kolmogorov-Smirnov por medio del software Hydrognomon

Tabla 27. Datos arrojados por la prueba Kolmogorov-Smirnov.

Nota: Elaboración propia con Hydrognomon.

Kolmogorov-Smirnov test for: All data	a=1%	a=5%	a=10%	Attained a	DMax
Normal	ACCEPT	REJECT	REJECT	1.09820%	0.18627
Normal (L-Moments)	REJECT	REJECT	REJECT	0.43874%	0.20203
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	26.5899%	0.11591
Galton	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	21.3783%	0.12206
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	12.1747%	0.13660
Exponential (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	26.3836%	0.11614
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	6.63004%	0.15070
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	12.3430%	0.13626
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	76.2367%	0.07722
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	12.1122%	0.13672
EV2-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	12.6274%	0.13570
EV1-Min (Gumbel)	REJECT	REJECT	REJECT	0.01064%	0.25614
EV3-Min (Weibull)	ACCEPT	REJECT	REJECT	3.83180%	0.16238
GEV-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	25.5911%	0.11702
GEV-Min	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	12.3827%	0.13618
Pareto	ACCEPT	REJECT	REJECT	4.12360%	0.16086
GEV-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	92.4890%	0.06327
GEV-Min (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	44.6492%	0.09960
EV1-Max (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	9.21337%	0.14324
EV2-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.2240%	0.04986
EV1-Min (Gumbel, L-Moments)	REJECT	REJECT	REJECT	0.00655%	0.26238
EV3-Min (Weibull, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	6.92563%	0.14973
Pareto (L-Moments)	REJECT	REJECT	REJECT	%	0.41721
GEV-Max (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	38.6984%	0.10441
GEV-Min (kappa specified)	REJECT	REJECT	REJECT	0.16941%	0.21716
GEV-Max (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	33.3426%	0.10914
GEV-Min (kappa specified, L-Moments)	REJECT	REJECT	REJECT	0.08983%	0.22669

Resultados periodo de retorno de lluvias con diferentes distribuciones

A continuación, se presentan los resultados de la altura de precipitación correspondientes a cada periodo de retorno, obtenidos a partir de las distribuciones previamente señaladas, destacándose los valores seleccionados para su uso, correspondientes a la distribución EV2-Max (L-momments).

Tabla 28. Resultados de precipitación por periodo de retorno según la distribución.

Nota. Elaboración propia con Microsoft Excel.

Precipitación por Periodo de Retorno según la Distribución									
Distribución	Periodo de Retorno (años)								
	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
	Altura de Precipitación (mm)								
Normal	103.31	159.08	188.23	219.31	239.39	257.45	273.98	294.02	308.07
Normal (L-Moments)	103.31	150.98	175.89	202.46	219.63	235.07	249.19	266.32	278.33
LogNormal	86.96	142.52	184.51	243.01	290.32	340.69	394.42	471.00	533.44
Galton	87.61	143.97	185.67	242.86	288.51	336.65	387.53	459.37	517.42
Exponential	82.98	143.69	189.62	250.33	296.26	342.19	388.11	448.83	494.75
Exponential (L-Moments)	83.70	142.26	186.56	245.11	289.41	333.70	378.00	436.56	480.85
Gamma	89.55	151.12	192.06	242.77	279.54	315.37	350.49	396.07	430.05
Pearson III	82.93	143.62	189.59	250.38	296.38	342.40	388.41	449.26	495.29
Log Pearson III	84.13	134.72	178.20	246.55	308.62	381.55	467.25	603.94	728.35
EV1-Max (Gumbel)	92.42	151.00	189.79	238.79	275.14	311.23	347.18	394.61	430.46
EV2-Max	87.02	125.54	160.02	217.43	272.96	342.10	428.40	576.42	721.36
EV1-Min (Gumbel)	114.20	157.74	176.25	193.56	203.64	212.07	219.32	227.56	233.03
EV3-Min (Weibull)	91.52	155.28	194.41	239.89	271.12	300.35	327.97	362.50	387.37
GEV-Max	89.18	144.05	184.30	240.10	285.40	333.93	386.10	461.28	523.31
GEV-Min	82.95	143.62	189.57	250.36	296.37	342.40	388.44	449.33	495.40
Pareto	82.96	143.56	189.41	250.02	295.86	341.71	387.56	448.16	494.01
GEV-Max (L-Moments)	82.78	129.67	172.26	244.18	314.65	403.39	515.40	710.07	903.14
GEV-Min (L-Moments)	80.04	137.95	186.49	254.94	309.30	365.49	423.30	501.90	562.84
EV1-Max (Gumbel, L-Moments)	93.60	145.85	180.44	224.15	256.58	288.76	320.83	363.14	395.12
EV2-Max (L-Momments)	81.38	126.44	169.27	244.72	321.69	422.01	553.07	790.21	1034.81
EV1-Min (Gumbel, L-Moments)	113.03	151.86	168.37	183.81	192.80	200.32	206.78	214.14	219.01
EV3-Min (Weibull, L-Moments)	95.69	150.03	181.64	217.21	241.04	262.97	283.41	308.60	326.52
Pareto (L-Moments)	80.78	135.34	182.14	252.34	312.57	379.71	454.55	566.83	663.14
GEV-Max (kappa specified)	88.23	141.00	181.21	238.95	287.41	340.84	399.94	487.98	563.04
GEV-Min (kappa specified)	108.75	160.25	184.19	207.78	222.07	234.35	245.15	257.71	266.20
GEV-Max (kappa specified, L-Moments)	88.64	139.97	179.08	235.23	282.36	334.33	391.81	477.43	550.43
GEV-Min (kappa specified, L-Moments)	107.98	152.19	172.75	193.00	205.27	215.81	225.08	235.87	243.16

Esta prueba reviste gran importancia, ya que evidenció que la repartición EV2 MAX (momentos L) resultó ser la más apropiada para el análisis de la pluviosidad en este estudio, lo cual denotó una coincidencia del 99.22% y un rango de confianza de 90%, 95% y 99% en cada caso.

La siguiente tabla especifica los resultados conseguidos para el pronóstico de las lluvias para un periodo de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años, según esta guía.

Tabla 29. Resultados periodo de retorno distribución EV2-MAX(L-Momments).

Nota: Elaboración propia con Microsoft Excel.

Precipitación Máxima Distribución EV2-Max (L-Momments)	
T (años)	Z
2	81.38
5	126.44
10	169.27
25	244.72
50	321.69
100	422.01
200	553.07
500	790.21
1000	1034.81

3.8.4. Criterios para el uso de la distribución de máximos y la evaluación del ajuste estadístico

El análisis estadístico de la precipitación se realizó a partir de la distribución de valores máximos, debido a que los procesos hidrológicos relevantes en el área de estudio están controlados por eventos extremos de lluvia, y no por el comportamiento promedio del régimen pluviométrico. Fenómenos como el escurrimiento rápido, la infiltración concentrada y la activación de vías preferenciales de flujo responden a precipitaciones máximas ocurridas en intervalos cortos, por lo que el empleo de series de máximos resulta conceptualmente consistente con la naturaleza física del sistema hidrológico analizado (Chow et al., 1998).

El uso de distribuciones de máximos es una práctica ampliamente aceptada en hidrología aplicada cuando el objetivo es caracterizar la lluvia crítica asociada a periodos de retorno específicos, particularmente en regiones con alta variabilidad interanual y dominancia de tormentas convectivas. En este tipo de climas, los análisis basados en series completas o en valores promedio tienden a subestimar la magnitud de los eventos que controlan la respuesta hidrológica del sistema (Koutsoyiannis, 2004).

En este contexto, la prueba clásica de bondad de ajuste Kolmogórov–Smirnov fue aplicada para evaluar la compatibilidad estadística entre los datos observados y las distribuciones analizadas. Los resultados de esta prueba se emplearon como criterios de verificación estadística (Wilks, 2011).

Por esta razón, la selección de la distribución se fundamentó en una evaluación integrada, considerando tanto los resultados de la prueba de Kolmogórov–Smirnov como la coherencia hidrológica y física del fenómeno analizado, priorizando la capacidad del modelo para representar adecuadamente los eventos máximos que gobiernan la respuesta del sistema. Este criterio es consistente con la práctica hidrológica recomendada para el análisis de extremos, en la que el ajuste estadístico se complementa con el entendimiento del proceso físico subyacente (Chow et al., 1998).

3.8.5. Justificación de la selección del método de Dick y Peschke para el análisis de precipitación

El método de Dick y Peschke fue seleccionado para el análisis estadístico de la precipitación por su mayor idoneidad para representar eventos extremos de corta duración en registros pluviométricos caracterizados por alta variabilidad y longitud limitada, condición propia de la región donde se localiza el sitio de estudio (Dick y Peschke, 1989)). En este tipo de contextos, la aplicación de enfoques que dependen de series largas, homogéneas y estadísticamente estables resulta metodológicamente restrictiva, por lo que se requiere un procedimiento capaz de captar de manera más adecuada la dinámica de eventos intensos poco frecuentes.

Este método se fundamenta en el análisis de la estructura temporal de los máximos de precipitación y en su relación con la duración del evento, lo que permite una caracterización más consistente de la lluvia crítica responsable de las respuestas hidrológicas dominantes bajo condiciones climáticas locales (Dick y Peschke, 1989). En particular, tiende a concentrar un mayor volumen de precipitación en los primeros intervalos del evento, lo que se traduce en intensidades más elevadas al inicio de la tormenta y en una representación más exigente de los escenarios de diseño.

En contraste, los métodos clásicos basados en el ajuste de distribuciones teóricas de valores extremos, como Gumbel o Log-Pearson tipo III, requieren series extensas y estadísticamente estables para producir estimaciones confiables, condición que no siempre se cumple en regiones con marcada variabilidad interanual y fuerte concentración de la precipitación en pocos eventos intensos (Chow et al., 1998).

Bajo estas circunstancias, dichos enfoques tienden a generar resultados poco representativos del comportamiento real de la lluvia y presentan una elevada sensibilidad frente a valores atípicos aislados, lo que introduce incertidumbres adicionales en la estimación de las intensidades de diseño y limita su aplicabilidad práctica en contextos con información hidrometeorológica restringida (Chow et al., 1998)

Por su parte, el hecho de que el método de Dick-Peschke produzca intensidades más elevadas en duraciones cortas resulta adecuado para evaluar escenarios críticos en términos de picos de caudal y condiciones de diseño hidráulico (Dick y Peschke, 1989). No obstante, la adopción de estas intensidades no condujo al sobredimensionamiento de las estructuras hidráulicas, como se comprueba en la sección 3.15 de este capítulo, y permite, además, establecer criterios conservadores desde el punto de vista de la infiltración pluvial.

3.8.6. Generación de curvas HP-D-TR e I-D-TR.

Las curvas HP-D-TR e I-D-TR fueron creadas según las propuestas de Dick Peschke (Quispe, 2018) que simbolizan el volumen de pluviosidad-duración-tiempo de retorno y la potencia-duración-tiempo de retorno. Es importante acotar que esta propuesta es adecuada para una duración de la lluvia durante un tiempo menor a una hora (Arango, 2011). La ecuación adecuada para su aplicación es:

$$P_D = P_{24h} \times \left(\frac{d}{1440}\right)^{0.25} \quad (3.6)$$

Donde:

- P_d = pluviosidad total (mm).
- d = duración (min).
- P_{24h} = pluviosidad máxima en 24 horas (mm).
- La intensidad se halla dividiendo la precipitación P_d entre la duración.

Tabla 30. Altura de precipitación en diferentes periodos de retorno.

Nota: Elaboración propia con Microsoft Excel.

Modelo de Dick Peschke									
Duración (Minutos)	Precipitación en 24 horas (mm)								
	81.38	126.44	169.27	244.72	321.69	422.01	553.07	790.21	1034.81
	Periodo de Retorno (Años)								
	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
Precipitación (mm)									
5	19.75	30.69	41.09	59.40	78.09	102.44	134.25	191.82	251.20
10	23.49	36.50	48.86	70.64	92.86	121.82	159.66	228.11	298.72
15	26.00	40.39	54.08	78.18	102.77	134.82	176.69	252.45	330.59
20	27.94	43.40	58.11	84.01	110.43	144.87	189.86	271.27	355.24
25	29.54	45.89	61.44	88.83	116.77	153.18	200.76	286.84	375.63
30	30.92	48.03	64.31	92.97	122.21	160.33	210.12	300.21	393.14
35	32.13	49.92	66.83	96.63	127.02	166.63	218.38	312.01	408.59
40	33.22	51.62	69.10	99.91	131.33	172.28	225.79	322.60	422.46
45	34.21	53.16	71.17	102.89	135.25	177.43	232.54	332.24	435.08
50	35.13	54.58	73.07	105.64	138.86	182.17	238.74	341.11	446.70
55	35.97	55.89	74.83	108.18	142.21	186.56	244.50	349.33	457.47
60	36.77	57.12	76.48	110.56	145.34	190.66	249.88	357.02	467.53
65	37.51	58.28	78.02	112.80	148.28	194.52	254.93	364.23	476.98
70	38.21	59.37	79.48	114.91	151.05	198.15	259.69	371.04	485.90
75	38.88	60.40	80.86	116.91	153.68	201.60	264.21	377.50	494.35
80	39.51	61.38	82.18	118.81	156.18	204.88	268.51	383.64	502.39
85	40.11	62.32	83.43	120.62	158.56	208.01	272.61	389.50	510.06
90	40.69	63.22	84.63	122.36	160.84	211.00	276.53	395.10	517.41
95	41.24	64.08	85.79	124.02	163.03	213.87	280.30	400.48	524.45
100	41.77	64.90	86.89	125.62	165.14	216.64	283.91	405.65	531.21
105	42.29	65.70	87.96	127.17	167.16	219.29	287.40	410.63	537.73
110	42.78	66.47	88.99	128.65	169.12	221.86	290.76	415.43	544.02
115	43.26	67.21	89.98	130.09	171.01	224.34	294.01	420.07	550.10
120	43.72	67.93	90.94	131.48	172.84	226.74	297.15	424.57	555.99

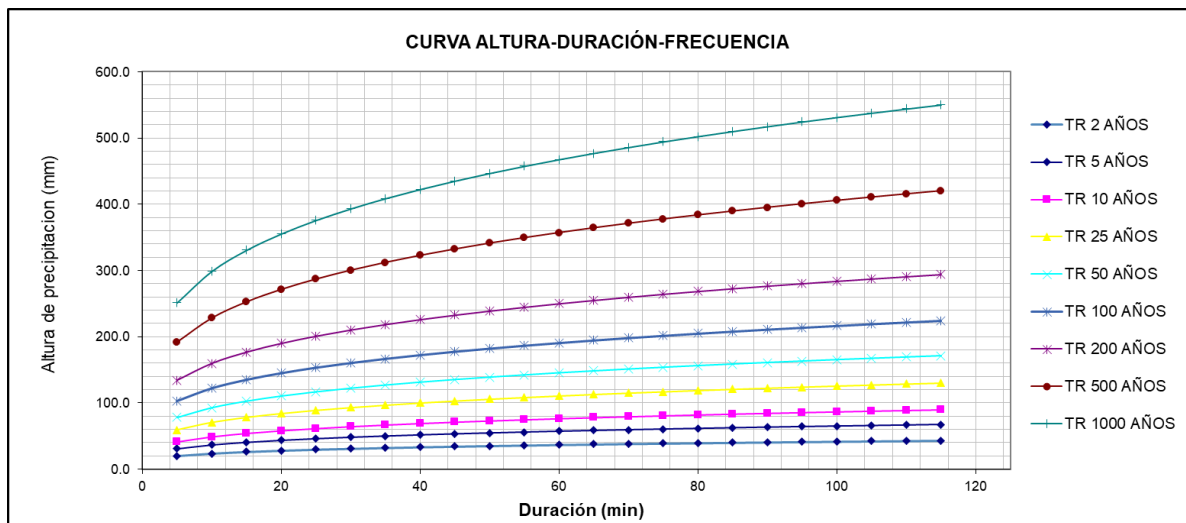


Figura 27. Curvas altura de precipitación-duración-frecuencia

Nota: Elaboración propia con Microsoft Excel.

Tabla 31. Intensidad de pluviosidad en diferentes periodos de retorno.

Nota: Elaboración propia con Microsoft Excel.

Intensidad de Precipitación										
Duración (horas)	Duración (min)	Periodo de Retorno (años)								
		2	5	10	25	50	100	200	500	1000
		Intensidad (mm/hr)								
0.083	5	237.04	368.30	493.07	712.85	937.05	1229.29	1611.06	2301.84	3014.35
0.167	10	140.95	218.99	293.18	423.86	557.17	730.94	957.94	1368.68	1792.34
0.250	15	103.99	161.57	216.30	312.72	411.08	539.28	706.76	1009.80	1322.37
0.333	20	83.81	130.21	174.33	252.03	331.30	434.62	569.59	813.82	1065.73
0.417	25	70.89	110.15	147.46	213.19	280.24	367.64	481.82	688.41	901.50
0.500	30	61.83	96.07	128.62	185.95	244.43	320.66	420.24	600.43	786.29
0.583	35	55.08	85.58	114.57	165.64	217.74	285.65	374.36	534.87	700.44
0.667	40	49.83	77.43	103.65	149.86	196.99	258.43	338.68	483.90	633.69
0.750	45	45.62	70.88	94.89	137.19	180.34	236.58	310.05	442.99	580.11
0.833	50	42.15	65.49	87.68	126.76	166.63	218.60	286.49	409.33	536.04
0.917	55	39.25	60.98	81.63	118.02	155.14	203.52	266.73	381.09	499.06
1.000	60	36.77	57.12	76.48	110.56	145.34	190.66	249.88	357.02	467.53
1.083	65	34.62	53.80	72.02	104.12	136.87	179.55	235.32	336.21	440.29
1.167	70	32.75	50.89	68.13	98.49	129.47	169.85	222.59	318.04	416.48
1.250	75	31.10	48.32	64.69	93.53	122.94	161.28	211.37	302.00	395.48
1.333	80	29.63	46.04	61.63	89.11	117.13	153.66	201.38	287.73	376.79
1.417	85	28.31	43.99	58.89	85.15	111.93	146.83	192.43	274.94	360.05
1.500	90	27.13	42.15	56.42	81.57	107.23	140.67	184.36	263.40	344.94
1.583	95	26.05	40.47	54.18	78.33	102.97	135.08	177.03	252.94	331.23
1.667	100	25.06	38.94	52.14	75.37	99.08	129.98	170.35	243.39	318.73
1.750	105	24.16	37.54	50.26	72.67	95.52	125.31	164.23	234.64	307.28
1.833	110	23.34	36.26	48.54	70.17	92.25	121.01	158.60	226.60	296.74
1.917	115	22.57	35.07	46.95	67.87	89.22	117.05	153.40	219.17	287.01
2.000	120	21.86	33.97	45.47	65.74	86.42	113.37	148.58	212.28	277.99

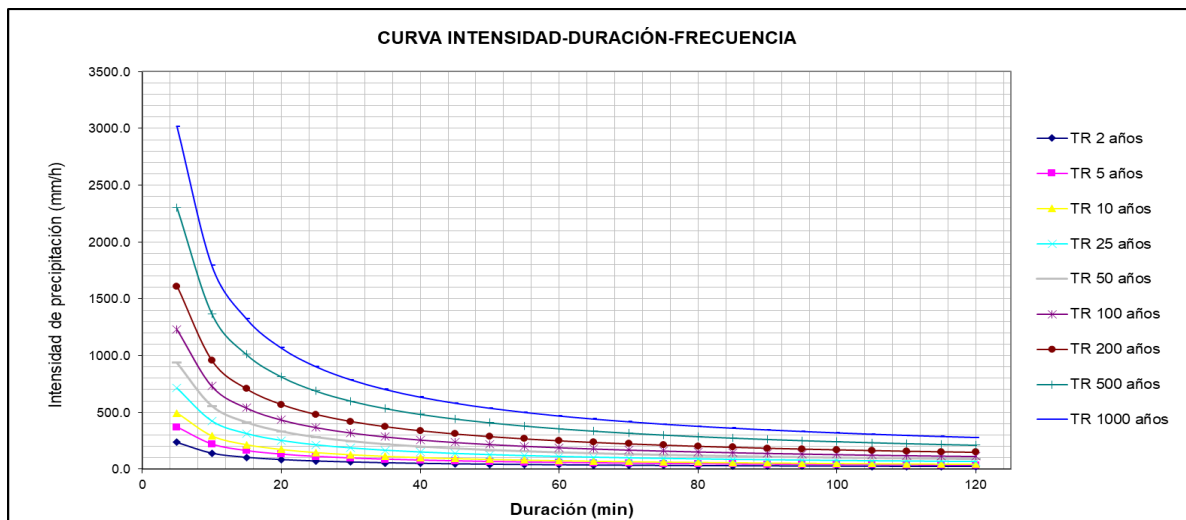


Figura 28. Curvas altura de intensidad-duración-frecuencia.

Nota: Elaboración propia con Microsoft Excel.

3.9. Procedimiento para la excavación y perforación del pozo

3.9.1. Estudio geotécnico

Se realizó la recolección planificada de muestras hasta los 800 metros de profundidad, límite de esta exploración para el logro de la comprensión de la conducta de estos estratos.



Figura 29. Exploración geotécnica in situ.

Nota: Elaboración propia.

A los tres primeros metros de la toma de muestras se logró localizar un estrato de arcilla de color marrón claro con franjas de carbonato y grava. Su contenido medio de humedad se ubica en 18% con límite líquido de 26.5-23.1, un límite plástico de 14.6-12.7 conteniendo finos del 84%. Los equivalentes de la Prueba de Penetración Estándar (SPT) durante los primeros 100 centímetros fueron de 38 golpes continuados por 46 golpes en los siguientes y para el tercer metro un valor de +50 golpes. En los 20 metros iniciales de la perforación se consiguió un aluvión compuesto de cantos rodados y una porción de arcilla.

Un aspecto de gran relevancia durante el progreso de esta guía fue la comprobación de que el nivel freático fue detectado a 2.20 metros de profundidad.

Adicionalmente, se encontró un estrato pequeño de esquisto marrón verdoso interpuesto con delgadas placas de esquistos de color marrón grisáceo con franjas de carbonato de calcio a los 17 metros de profundidad. La resistencia de este material a la compresión simple es de 200-400 kg/cm² que es básicamente el producto de la sedimentación proveniente de las áreas superiores adyacentes.

Los componentes de suelo y sus particularidades determinadas durante la recolección de muestras constituyen una excelente fuente de datos pertinentes para el desarrollo de diferentes edificaciones en esta área. Las grandes proporciones de los delgados estratos de arcilla son un importante aspecto a considerar, pues puede constituir un factor que puede influir en la seguridad de las bases. Incluso, las franjas de carbonato encontradas en estos estratos pueden provocar una afectación en la capacidad de duración de las edificaciones. En este sentido, es obligatorio implementar acciones preventivas que aporten seguridad al equilibrio y duración de las estructuras.

En los siguientes metros se logró identificar un estrato de roca compuesto por esquisto marrón de tonalidad verdosa oscura. No obstante, se notó una variación en el color a un tono grisáceo al alcanzar los 24 metros, con ciertos rasgos carbonatados (franjas de carbonato cálcico).

Este estrato posee un aguante a la compresión sencilla, de 100- 900 kg/cm² y mostrando un sorprendente grosor de 90 metros. Forma parte de la formación Méndez y posee un nivel de permeabilidad de 2-15, el cual está determinado por la profundidad de la ubicación de la roca. Esta característica es vital, pues influye en la capacidad de absorción y de acopio de líquidos de la roca.

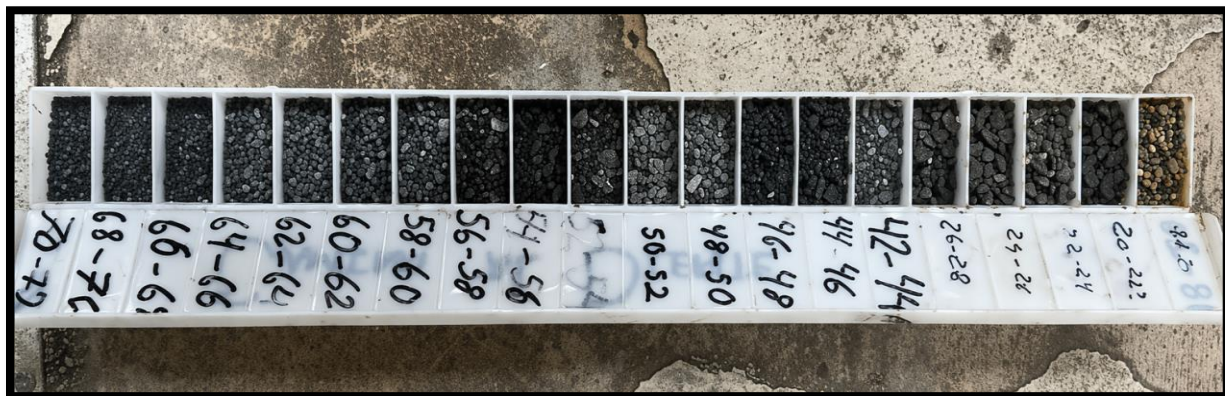


Figura 30. Muestra de material estudio geotécnico profundidad 20 a 70 metros.
Nota: Elaboración propia.

En la Figura 31 se puede notar la presencia de un estrato de caliza grisácea con una intercalación de esquisto calcáreo con un espesor de 50 metros encontrado a una profundidad de 240 metros. Muestra además una rotura en forma de concha con una rigidez de entre 2 y 5 según la escala de Mohr. Presenta poco brillo y con una densidad situada entre 2,55 y 2,62 g/cm³.

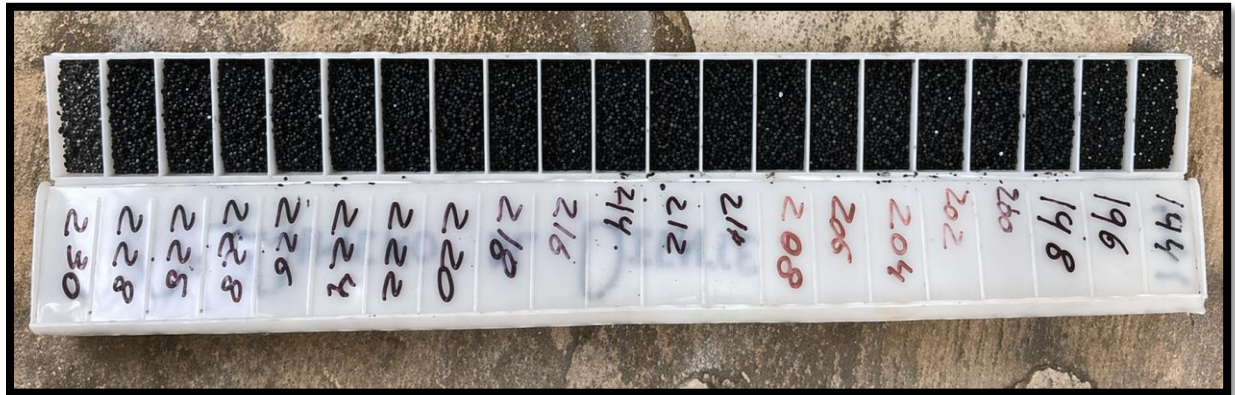


Figura 31. Muestra de material estudio geotécnico profundidad 188 a 230 metros.

Nota: Elaboración propia.

Más adelante, a los 220 metros, se descubrió una capa de caliza arcillosa con esquisto gris claro-oscuro y esquisto margoso con colores marrón verdoso, tendiendo al tono ocre. Esta piedra tiene como componentes fragmentos con un diámetro por debajo de los 0.06 mm con rotura plana con direcciones paralelas. La Figura 32 muestra el enlace ubicado entre las formaciones de Méndez y San Felipe.

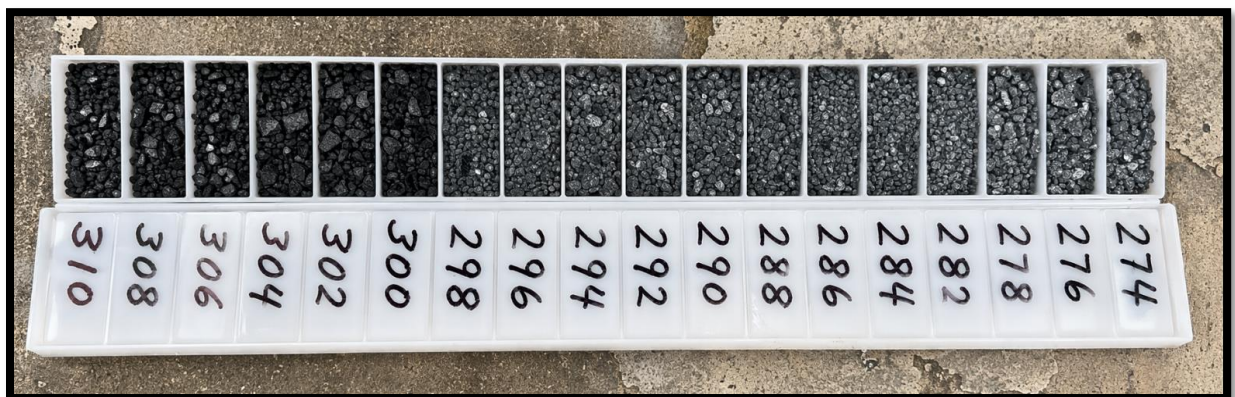


Figura 32. Muestra de material estudio geotécnico profundidad 274 a 310 metros.

Nota: Elaboración propia.

A los 370 m. se descubrió un enlace de caliza de colores gris claro y gris oscuro con esquisto de tonos grisáceos. Estos materiales evidencian franjas de sílex negro con una gradación de delgados estratos a medias en la parte inferior y con finas placas en la parte de arriba. Su aspecto externo es esencialmente de lodolita posada en una base carbonatada con una proporción por debajo de un 10% de granos. Estas muestras insinúan que se sedimentó en un ambiente de plataforma, estas particularidades la sitúan como componente de la unidad Agua Nueva, caracterizadas a su vez por sus rocas sedimentarias originarias del Cretáceo Superior. Los componentes principales de esta formación son la caliza y la arenisca, ampliamente distribuida por el noroeste de México, especialmente en las entidades de Sonora y Chihuahua.

Se han realizado exhaustivas investigaciones de esta formación, puesto que se sitúa en zonas de reservas de hidrocarburos. Por otra parte, las rocas presentes son fuente de importantes datos relativos a la evolución de las particularidades geológicas de la Tierra y en especial de los hábitats marinos ocurridos en el Cretáceo Superior (Padilla y Sánchez, 1986). Al realizar un análisis de los componentes, aspecto exterior y gradación de las rocas, los científicos han logrado la reconstrucción del entorno de sedimentación y deducir los escenarios tectónicos y climatológicos que predominaban en ese período. En consecuencia, haber descubierto la presencia de enlaces de caliza y pizarra en Agua Nueva representa un valioso aporte para incrementar el conocimiento sobre el desarrollo de los fenómenos geológicos que moldearon la composición del suelo terrestre y por ende la formación de la biodiversidad que al mismo tiempo son particularidades definitorias de esta formación (Figura 33).



Figura 33. Muestra de material estudio geotécnico profundidad 354 a 392 metros.
Nota: Elaboración propia.

A los 425 metros se localizó un estrato de piedra caliza con tonalidades marrón grisáceo y gris claro. Este estrato contaba con elementos arcillosos marrón claro- oscuro intercalado con franjas de carbonato. Un gran nivel de fragmentación es notado al ser sometido al tacto y, adicionalmente, en lo más profundo del estrato se consiguieron rugosidades y estratos de boudinage muy particulares en la formación Cuesta del Cura y, debajo, se encontró sílex con tonalidades oscuras.

La roca caliza puede tener una condición de porosidad de 1×10^{-6} a 1×10^{-12} m/s. al descender a 540 m., se encontró un elemento conformado de caliza gris claro. En el centro se identificó una franja de sílex gris oscuro y otra con tonalidad ocre con características de delgados estratos de marga, este elemento contenía una gradación media arriba y abajo con características masivas. El aspecto externo era de marga posada sobre una base por debajo de 10% de granos. Gran parte de las muestras eran propios de la formación Aurora.

La resistencia a la compresión depende del material, la cual puede oscilar entre 500 y 2000 kg/ cm². Las particularidades mostradas en esta área hacen inferir que estas formaciones se desarrollaron durante millones de años por causa de las deposiciones y de los procesos que controlan la estructura terrestre. La información resultante de la exploración de estas formaciones constituye un gran apoyo para otros ámbitos tales como la actividad minera, la geología y la industria de la construcción, los resultados se pueden observar en la Figura 34.



Figura 34. Muestra de material estudio geotécnico profundidad 514 a 552 metros.

Nota: Elaboración propia.

El desarrollo de la exploración condujo a un estrato de calizas grises clara-oscuro alternada con estratos y franjas de sílex negro. Debajo tiene un aspecto más calcáreo debido a los ribetes de carbonato de importante grosor, en tanto que arriba la proporción de carbonato cálcico es menor. Este estrato fue identificado a los 610 metros como un componente de la unidad La Peña, por causa de su poco grosor y su continuidad con las calizas masivas de la unidad Cupido. La roca caliza encontrada está conformada por fragmentos con diámetro por debajo de 0,06 mm, con roturas lisas con orientaciones paralelas y una permeabilidad con variaciones entre el 5 y el 20 %. Por otra parte, se ha expuesto la presencia de restos fósiles de origen marino que sugiere su origen en el periodo Mesozoico, con una antigüedad de entre 65 a 250 millones de años. A través de estas muestras se puede deducir el estado ambiental de esa era, posiblemente marina y adecuadas para la vida de esos especímenes. Por otra parte, se conoce de la resistencia que posee este estrato en cuanto a exposición de los fenómenos naturales, hecho que los convierte en una adecuada opción para ser usados como materiales de construcción para los frentes de las edificaciones, pavimentos.

Las particularidades de estos estratos hacen que sean consideradas como un relevante aspecto geológico que influye positivamente en el conocimiento práctico como histórico. Los datos aportados por el análisis de composición y origen son esenciales para enriquecer la información sobre la evolución del planeta, así como también lo relacionado con su duración y uso práctico para el sector de la construcción y como materiales para la estética.

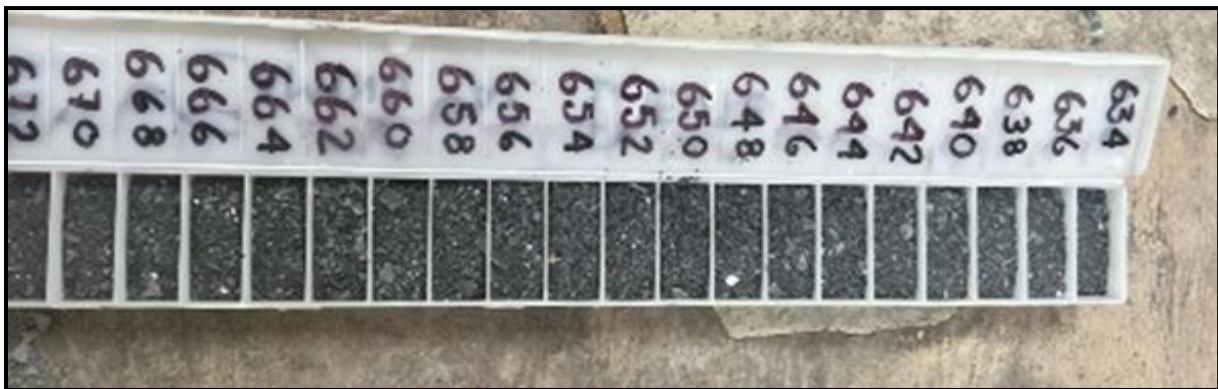


Figura 35. Muestra de material estudio geotécnico profundidad 634 a 672 metros.

Nota: Elaboración propia.

A los 720 metros de profundidad se identificó una serie calcárea correspondiente a una caliza masiva, con tonalidades que varían del gris claro al gris oscuro. Este material presenta un aspecto de lodolita en su parte superior, condición que fue confirmada mediante la identificación de fósiles presentes en su composición. La resistencia a la compresión simple de esta unidad litológica se encuentra en un rango de 500 a 2000 kg/cm², valor que depende del tipo de elementos interpuestos en la matriz rocosa.

Las propiedades mecánicas observadas permiten clasificar este material como perteneciente a la Formación Cupido, la cual se caracteriza por una resistencia excepcional frente a los procesos geológicos asociados a su génesis. Es importante señalar que dicha formación estuvo sometida a condiciones de presión y temperatura extremadamente elevadas, lo que dio lugar a un alto grado de densidad y compactación del material.

Diversos estudios geológicos han documentado de manera exhaustiva las características de la Formación Cupido, evidenciando la presencia de importantes depósitos de minerales y otros elementos de interés. La explotación de estos recursos ha sido aprovechada en distintas actividades, entre ellas la edificación de viviendas y la producción de energía, lo que resalta la relevancia económica y geológica de esta formación.

La muestra presentada permite observar las variaciones en la textura y composición del material a la profundidad indicada. Esta información es clave para la caracterización geotécnica del subsuelo y para evaluar su comportamiento.

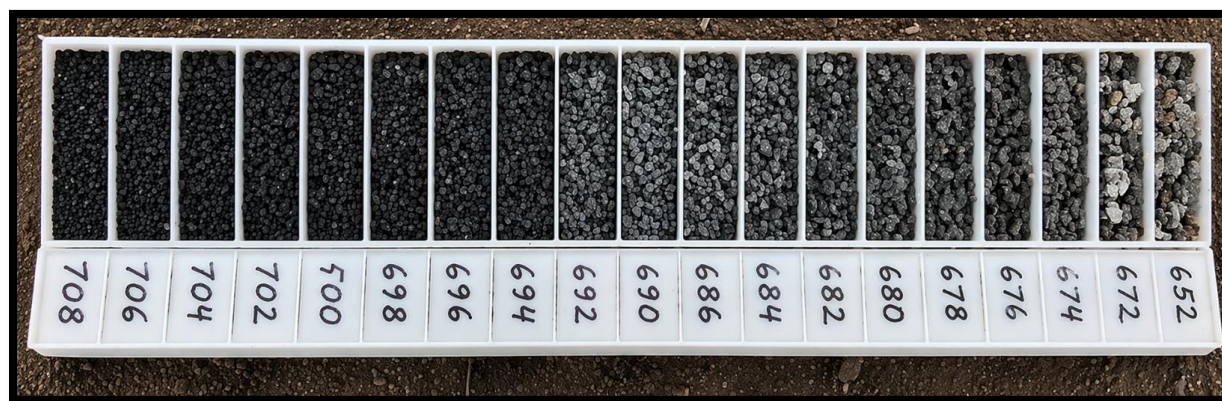


Figura 36. Muestra de material estudio geotécnico profundidad 652 a 708 metros

Nota: Elaboración propia.

3.9.2. Esquema de la exploración geotécnica

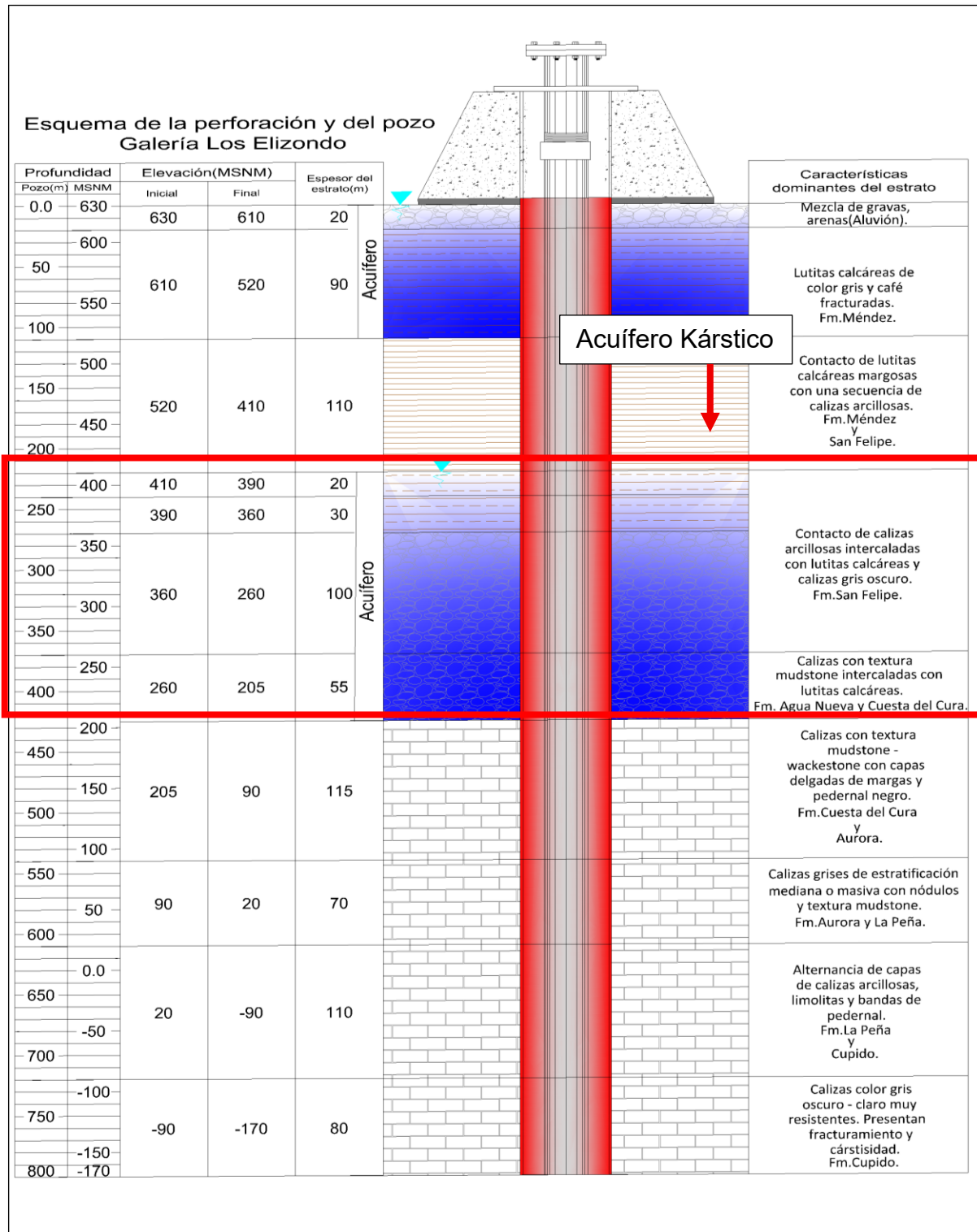


Figura 37. Datos resultantes del estudio geotécnico.

Nota: Elaboración propia con AutoCAD.

3.10. Conductividad hidráulica del sistema acuífero

En el presente estudio, los valores de conductividad hidráulica adoptados se definen específicamente para estratos profundos interceptados por pozos profundos en un sistema kárstico. Dichos valores no corresponden a parámetros característicos de acuíferos someros ni a materiales no consolidados superficiales. La conductividad hidráulica utilizada se concibe como un parámetro hidráulico efectivo a escala de formación, representativo del comportamiento integrado del estrato, y no como una propiedad matricial determinada a escala de laboratorio.

En ambientes kársticos profundos, la circulación del agua subterránea está controlada por una heterogeneidad marcada del medio carbonatado. La porosidad primaria de la matriz es generalmente baja como consecuencia de procesos de compactación mecánica y diagénesis. La transmisión hidráulica de mayor relevancia se concentra en discontinuidades estructurales, planos de estratificación, contactos litológicos y zonas con mayor conectividad interna, lo que genera un comportamiento anisotrópico del sistema (Bear, 1972). Bajo estas condiciones, el flujo subterráneo no responde a un medio poroso homogéneo, sino a un sistema dominado por heterogeneidades persistentes.

La conductividad hidráulica empleada en la caracterización hidrogeológica debe interpretarse como un parámetro representativo del comportamiento hidráulico del estrato a la escala propia de pozos profundos, considerando la profundidad, el grado de confinamiento y la naturaleza kárstica del medio, más que como un valor intrínseco de la matriz rocosa (Ford y Williams, 2007). La asignación de valores diferenciados por intervalo estratigráfico obedece a la necesidad de reproducir de manera consistente la posible transmisión hidráulica en sistemas kársticos profundos, conforme a los criterios conceptuales aceptados en la hidrogeología de medios consolidados (Domenico y Schwartz, 1998).

Los depósitos aluviales superficiales, localizados en el intervalo altimétrico de 630 a 610 msnm (0–20 m de profundidad), corresponden a materiales no consolidados con elevada porosidad efectiva y conectividad intergranular continua. En estos medios, el

flujo subterráneo ocurre predominantemente a través del sistema poroso intergranular, lo que se traduce en valores altos de conductividad hidráulica. La literatura hidrogeológica documenta que arenas y gravas presentan conductividades hidráulicas que varían comúnmente entre 10^{-1} y 10^3 m/día, en función de la granulometría, el grado de selección y el contenido de finos (Fetter, 2001). El valor adoptado de 1×10^2 m/día representa adecuadamente el comportamiento hidráulico esperado de un acuífero libre somero y se utiliza como referencia superior dentro de la columna hidroestratigráfica (Bear, 1972).

La Formación Méndez, comprendida entre 610 y 520 msnm (20–110 m de profundidad), está constituida por lutitas calcáreas consolidadas, cuya permeabilidad matricial es inherentemente baja debido a procesos de compactación y cementación diagenética. En hidrogeología de medios consolidados, la conductividad hidráulica asignada a escala de formación describe el comportamiento hidráulico integrado del paquete estratificado, no la permeabilidad intrínseca de la matriz rocosa (Freeze y Cherry, 1979). En este intervalo se reconoce la presencia de agua, lo que indica que el paquete litológico no se comporta como un medio hidráulicamente inactivo. Por esta razón, se adoptó un valor de 10 m/día, con el fin de representar un comportamiento hidráulico compatible con la existencia de circulación subterránea en un medio profundo estratificado, sin atribuir dicha respuesta a una permeabilidad elevada de la matriz lutítica (Neuzil, 2003).

El intervalo de transición Méndez–San Felipe, ubicado entre 520 y 410 msnm (110–220 m de profundidad), está dominado por lutitas calcáreas margosas con secuencias de calizas arcillosas. Estas litologías presentan una conectividad porosa limitada y un flujo subterráneo restringido. En secuencias lutíticas profundas, aun cuando la permeabilidad matricial es baja, la conductividad hidráulica efectiva a escala de formación puede situarse en órdenes de magnitud bajos, compatibles con valores del orden de 10^{-2} m/día, cuando existe circulación subordinada asociada a heterogeneidades internas persistentes dentro de un sistema regional profundo (Domenico y Schwartz, 1998). El valor adoptado permite representar el papel de este intervalo como unidad de baja transmisividad y control hidráulico vertical.

Entre 390 y 360 msnm (240–270 m de profundidad), la Formación San Felipe está constituida por calizas arcillosas intercaladas con lutitas calcáreas, con porosidad primaria conectada limitada. En este subintervalo se reconoce la presencia de agua, lo que indica conectividad hidráulica suficiente a escala de formación. En medios carbonatados estratificados, la transmisión hidráulica relevante se concentra en planos de estratificación y heterogeneidades internas persistentes, razón por la cual los valores de conductividad hidráulica a escala de estrato suelen ser superiores a los de la matriz intacta (Ford y Williams, 2007). Con base en este marco conceptual, se adoptó un valor de 10 m/día para representar un comportamiento hidráulico coherente con la existencia de circulación subterránea en un medio carbonatado profundo de naturaleza kárstica (Choquette y Pray, 1970).

El intervalo comprendido entre 360 y 260 msnm (270–370 m de profundidad), correspondiente a la transición San Felipe–Agua Nueva, está constituido por calizas arcillosas intercaladas con lutitas calcáreas, lo que configura un medio estratificado heterogéneo. La alternancia de capas con distinta permeabilidad controla la respuesta hidráulica del paquete. La presencia de agua en este intervalo sustenta la adopción de un valor de 10 m/día como parámetro representativo del comportamiento hidráulico integrado del estrato, en concordancia con los fundamentos de la hidrogeología física de medios estratificados profundos (Bear, 1972).

Entre 260 y 205 msnm (370–425 m de profundidad), el intervalo Agua Nueva–Cuesta del Cura está constituido por calizas arcillosas y margosas con intercalaciones de lutitas calcáreas, que reflejan un mayor grado de compactación y una reducción progresiva de la conectividad porosa. La presencia de agua indica que la transmisión hidráulica a escala de formación no es nula. En secuencias carbonatadas arcillosas estratificadas, la circulación subterránea, cuando existe, se concentra en heterogeneidades internas persistentes, lo que justifica la adopción de valores de conductividad hidráulica del orden de 1 a 10 m/día para representar el comportamiento hidráulico del paquete (Freeze y Cherry, 1979). En este intervalo se mantuvo el valor de 10 m/día.

El intervalo Cuesta del Cura–Aurora, localizado entre 205 y 90 msnm (425–540 m de profundidad), está constituido por calizas arcillosas y margosas con capas delgadas

de margas y pedernal, propias de un medio carbonatado profundo, denso y fuertemente cementado. En litologías carbonatadas profundas con estas características, la transmisión hidráulica es limitada y se concentra en discontinuidades internas puntuales. Este comportamiento se traduce en conductividades hidráulicas bajas, coherentes con valores del orden de 10^{-2} m/día, ampliamente documentados para carbonatos compactos estratificados en profundidad (Freeze y Cherry, 1979; Bear, 1972).

Entre 90 y 20 msnm (540–610 m de profundidad), el intervalo Aurora–La Peña está compuesto por calizas grises con nódulos y bandas de pedernal, caracterizadas por una porosidad primaria muy reducida y conectividad hidráulica limitada. En medios carbonatados profundos con alto grado de compactación y cementación, la conductividad hidráulica efectiva se mantiene en órdenes de magnitud bajos, compatibles con valores del orden de 10^{-2} m/día, cuando el flujo se restringe a discontinuidades aisladas o planos estratales persistentes (Bear, 1972; Ford y Williams, 2007).

El intervalo La Peña–Cupido, comprendido entre 20 y –90 msnm (610–720 m de profundidad), está constituido por la alternancia de calizas arcillosas, limolitas y bandas de pedernal. La alternancia litológica y la cementación en profundidad limitan la conectividad del sistema poroso, dando lugar a una transmisión hidráulica reducida. En secuencias estratificadas consolidadas profundas, este comportamiento puede representarse mediante valores bajos de conductividad hidráulica del orden de 10^{-2} m/día, consistentes con el papel hidrogeológico de unidades de baja transmisividad dentro de sistemas profundos (Neuzil, 2003).

La Formación Cupido, localizada entre –90 y –170 msnm (720–800 m de profundidad), corresponde a un carbonato masivo profundo con porosidad primaria mínima, resultado de procesos diagenéticos avanzados y del incremento del esfuerzo litostático con la profundidad. En este tipo de unidades, la transmisión hidráulica es muy baja y se restringe a discontinuidades puntuales. Este comportamiento justifica la adopción de conductividades hidráulicas bajas, representadas en este estudio mediante valores del orden de 10^{-2} m/día, coherentes con un enfoque de parámetros efectivos a escala de formación en medios carbonatados profundos (Bear, 1972; Neuzil, 2003).

Tabla 32. Conductividad hidráulica Galería Los Elizondo.

Nota: Elaboración propia con Microsoft Excel.

Inicial msnm	Final msnm	Profundidad metros	Espesor metros	Conductividad hidráulica (m/día)	Formación geológica	CARACTERÍSTICAS
630	610	20	20	1×10^2	ALUVIÓN	Constituido por una mezcla de gravas, arenas, limos y arcillas.
610	520	110	90	1×10^1	MÉNDEZ	Lutitas calcáreas de color gris y café.
520	410	220	110	1×10^{-2}	MÉNDEZ-SAN FELIPE	Contacto de lutitas calcáreas margosas con una secuencia de calizas arcillosas.
410	390	240	20	1×10^1	SAN FELIPE	Calizas arcillosas con intercalaciones de lutita.
390	360	270	30	1×10^1	SAN FELIPE	Calizas arcillosas intercaladas con lutitas calcáreas presentan fracturamiento concoidal.
360	260	370	100	1×10^1	SAN FELIPE-AGUA NUEVA	Contacto de calizas arcillosas intercaladas con lutitas calcáreas y calizas gris oscuro.
260	205	425	55	1×10^{-1}	AGUA NUEVA-CUESTA DEL CURA	Calizas con textura mudstone – wackestone intercaladas con lutitas calcáreas.
205	90	540	115	1×10^{-2}	CUESTA DEL CURA-AURORA	Calizas con textura mudstone – wackestone con capas delgadas de margas y pedernal negro.
90	20	610	70	1×10^{-2}	AURORA-LA PEÑA	Calizas grises de estratificación mediana o masiva, textura mudstone con nódulos y bandas de pedernal.
20	-90	720	110	1×10^{-2}	LA PEÑA-CUPIDO	Alternancia de capas de calizas arcillosas, limolitas y bandas de pedernal.
-90	-170	800	80	1×10^{-2}	CUPIDO	Calizas color gris oscuro – claro muy resistentes. Presentan fracturamiento y cártisidad.

3.10.1. Establecimiento de la capacidad de conducción del agua horizontal equivalente

En el acuífero somero, el comportamiento hidráulico del estrato rocoso en la totalidad de sus espesores se caracteriza por una elevada capacidad de transmisión de flujo. Bajo estas condiciones, la conexión directa entre el estrato somero y el interior del pozo provocaría el llenado del tubo en cuestión de minutos durante la operación, afectando el control hidráulico del sistema y la correcta interpretación del comportamiento volumétrico del mismo (Bear, 1972). Por tal motivo, se estableció como criterio de control el encamisado/encofrado de los primeros 20 m del tubo, con el propósito de regular la interacción hidráulica directa entre el acuífero somero y el pozo, práctica ampliamente reconocida en medios altamente permeables y heterogéneos (Driscoll, 1986). Este encamisado actúa como una condición de frontera hidráulica que limita la conexión pozo–acuífero en el tramo superior, sin modificar las propiedades hidráulicas intrínsecas del estrato rocoso somero; esta consideración se incorpora de manera explícita en el cálculo de la conductividad hidráulica y de la transmisividad empleadas en la evaluación hidrogeológica del sistema, manteniendo coherencia física entre los parámetros del acuífero y el comportamiento hidráulico analizado (Freeze y Cherry, 1979).

Es lógico que para determinar el potencial de penetración por estratos se incurra en operaciones útiles. En este sentido, Custodio y Llamas (1996) dieron a conocer una fórmula que facilita estos cálculos:

$$K_h = \frac{1}{L} \sum k_i * b_i \quad (3. 7)$$

En donde:

- K_h =conductividad hidráulica horizontal (m/d).
- B_i =grosor de la capa (m).
- K_i =conductividad del estrato (m/d).
- L = distancia total de las capas (m).

Sustituyendo los valores correspondientes de conductividad y espesor para cada estrato en la ecuación (3. 7), se obtuvo lo siguiente:

$$Kh = \left(\left(\left(\frac{0m}{día} \right) * (20m) \right) + \left(\left(\frac{10m}{día} \right) * (90m) \right) + \left(\left(\frac{0.01m}{día} \right) * (110m) \right) + \left(\left(\frac{10m}{día} \right) * (20m) \right) + \right. \\ \left. \left(\left(\frac{10m}{día} \right) * (30m) \right) + \left(\left(\frac{10m}{día} \right) * (100m) \right) + \left(\left(\frac{0.10m}{día} \right) * (55m) \right) + \left(\left(\frac{0.01m}{día} \right) * (80m) \right) \right) / 800 = \\ 3.013 \frac{m}{día} = 125.539 \frac{mm}{hora}$$

Para todas las capas del yacimiento de Galería Los Elizondo existen registros de los resultados referentes a los experimentos relacionados con la potencialidad de flujo del agua. Estos resultados han expuesto un porcentaje de conductividad hidráulica de 3.013 m/día. Equivalente a 125.539 mm/hora o 3.49×10^{-3} cm/segundo.

Como resultado, el usar técnicas indirectas para establecer el potencial de conducción del líquido en La Galería Los Elizondo demuestra gran viabilidad para ser utilizado en el diseño de pautas para la edificación de pozos de inyección profunda. Los datos recolectados a través de esta exploración revisten gran relevancia para la elaboración de planes exhaustivos que benefician el aprovechamiento de las fuentes de agua de esta zona.

3.11. Criterios de calidad de agua a inyectar y compatibilidad química en sistemas de recarga artificial en ambientes kársticos

La calidad del agua destinada a la recarga artificial desempeña un papel esencial en la evaluación de la viabilidad técnica y ambiental de los pozos de inyección profunda en ambientes kársticos. En este tipo de sistemas hidrogeológicos, las características fisicoquímicas del agua a inyectar y su compatibilidad con el acuífero receptor constituyen factores determinantes, ya que cualquier modificación en el equilibrio natural del medio puede generar alteraciones tanto en la calidad del recurso hídrico como en la funcionalidad hidráulica del sistema de recarga (Appelo y Postma, 2005).

Debido a ello, es indispensable comprender el comportamiento hidrogeológico de los acuíferos desarrollados en ambientes kársticos, los cuales se encuentran principalmente en rocas carbonatadas como calizas y dolomías. Su evolución está

dominada por procesos de disolución química asociados a la interacción entre el agua y el dióxido de carbono, lo que da origen a una red compleja de fracturas, conductos y cavidades que confieren al sistema una elevada heterogeneidad, anisotropía y conectividad hidráulica. Esta configuración estructural influye directamente en la forma en que el acuífero responderá ante la introducción de agua externa (Appelo y Postma, 2005).

Como consecuencia de esta dinámica, el flujo subterráneo suele ser rápido y altamente canalizado, reduciendo los procesos naturales de filtración y atenuación fisicoquímica. Esta condición incrementa la vulnerabilidad del sistema frente a la inyección de agua con propiedades distintas a las naturales, ya que cualquier diferencia significativa puede propagarse rápidamente a través de los conductos kársticos, afectando amplias zonas del acuífero (Ford y Williams, 2007).

Tomando en consideración esta vulnerabilidad inherente, el diseño de la recarga artificial debe regirse por el principio de compatibilidad química, entendido como la necesidad de que el agua a inyectar presente propiedades similares a las del agua subterránea existente. Este criterio busca preservar el equilibrio químico del sistema y prevenir procesos como precipitación mineral, disolución acelerada de la matriz carbonatada, colmatación de conductos o movilización de elementos presentes en la roca o en los sedimentos (Drever, 1997).

Específicamente, la inyección de agua con diferencias significativas en parámetros como pH, alcalinidad, dureza, conductividad eléctrica y composición iónica puede modificar los índices de saturación de minerales carbonatados como la calcita y la dolomita. Estas alteraciones pueden impactar la capacidad de conducción hidráulica del acuífero, reducir la eficiencia de infiltración en el entorno del pozo y comprometer la estabilidad de los conductos naturales del sistema.

Adicionalmente, las variaciones fisicoquímicas derivadas de la inyección pueden favorecer procesos de colmatación física y química en la zona inmediata al pozo de inyección profunda. La presencia de sólidos suspendidos, cambios abruptos en la composición del agua o reacciones geoquímicas inducidas pueden disminuir significativamente la eficiencia del sistema y modificar las trayectorias de flujo originalmente previstas en el diseño hidráulico (Freeze y Cherry, 1979).

Por otra parte, también pueden generarse modificaciones en las condiciones locales de potencial de oxidación-reducción, temperatura y concentración de sólidos disueltos. En ambientes kársticos, estos cambios pueden inducir la movilización de metales o compuestos previamente retenidos en la matriz rocosa o en materiales de relleno, incrementando el riesgo de deterioro de la calidad del agua subterránea recargada (Appelo y Postma, 2005).

En función de lo anterior, el diseño técnico del sistema de inyección profunda debe contemplar una caracterización previa del agua a infiltrar, considerando parámetros como pH, conductividad eléctrica, alcalinidad, dureza, sólidos disueltos totales, composición iónica mayoritaria y temperatura. La evaluación de estos indicadores permite estimar la compatibilidad química con el acuífero receptor y anticipar posibles efectos sobre la estabilidad del sistema (Goldscheider y Drew, 2007).

De forma complementaria, cuando el agua subterránea recargada esté destinada al uso humano, resulta indispensable verificar que la calidad del agua a inyectar cumpla con los límites permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, la cual regula los criterios sanitarios para el consumo humano en México (Secretaría de Salud, 2021). Este cumplimiento normativo fortalece la seguridad del sistema y respalda la sostenibilidad de la recarga artificial.

Finalmente, es importante señalar que el análisis detallado de estos procesos constituye un campo amplio que puede desarrollarse como línea de investigación independiente. En el marco de la presente investigación, el tema se aborda desde una perspectiva preventiva y de diseño, centrada en garantizar la calidad del agua a inyectar como condición indispensable para la viabilidad técnica y ambiental del pozo de recarga en ambiente kárstico.

3.12. Propuesta de reabastecimiento del acuífero por medio de precipitaciones

El aprovechamiento de las precipitaciones como fuente de recarga artificial es una alternativa viable dentro de los esquemas de la gestión integral del agua, específicamente en contextos de regiones en donde la disponibilidad del recurso sea limitada.

En estas condiciones, la captación y conducción del recurso hídrico controladamente permite transformar un recurso temporal en una reserva subterránea con mayor estabilidad y seguridad frente a periodos prolongados de sequía.

Sin embargo, en estas fuentes de reabastecimiento intervienen diversas variables las cuales pueden llegar a condicionar su desempeño, como lo son la variabilidad climática, el tipo de uso, la cobertura del suelo, entre otras, así como las acciones humanas relacionadas con la extracción del acuífero. Por lo que es de suma importancia que las estructuras de recarga sean diseñadas y operadas bajo criterios que permitan que estas sean supervisadas permanentemente, con el propósito de asegurar su correcto funcionamiento hidráulico y prevenir afectaciones al medio geológico y al acuífero (UNESCO, 2021).

Con respecto al caso de estudio, la propuesta de reabastecimiento por medio de precipitaciones se basa en la captación de los escurrimientos pluviales en la superficie, para posteriormente ser conducidos hacia un sistema de pretratamiento y su infiltración controlada mediante el pozo de inyección profunda.

El sistema cumple una función esencial, ya que reduce la carga de sólidos suspendidos y sedimentos finos, lo cual disminuye el riesgo de colmatación para perseverar la capacidad de infiltración del medio kárstico (FAO, 2022).

El pozo de reabastecimiento es propuesto como una estructura para facilitar la transferencia del agua proveniente de las precipitaciones hacia los estratos acuíferos identificados como receptores, tomando en cuenta criterios geotécnicos, geológicos, hidrogeoquímicos, hidrogeológicos, fisiográficos, etc., Es de suma importancia seleccionar correctamente la profundidad para asegurar un proceso de recarga eficiente y seguro, para evitar la sobrepresión, la subsidencia, o el deterioro del acuífero (ASCE, 2018)

En la siguiente figura se presenta un esquema técnico de la propuesta del pozo de inyección por medio de precipitaciones, en donde se pueden identificar los principales elementos que conforman el proceso de captación, filtración, conducción, e inyección del recurso hídrico, así como su integración en el medio geológico, lo cual permite visualizar de manera general el funcionamiento de la propuesta.

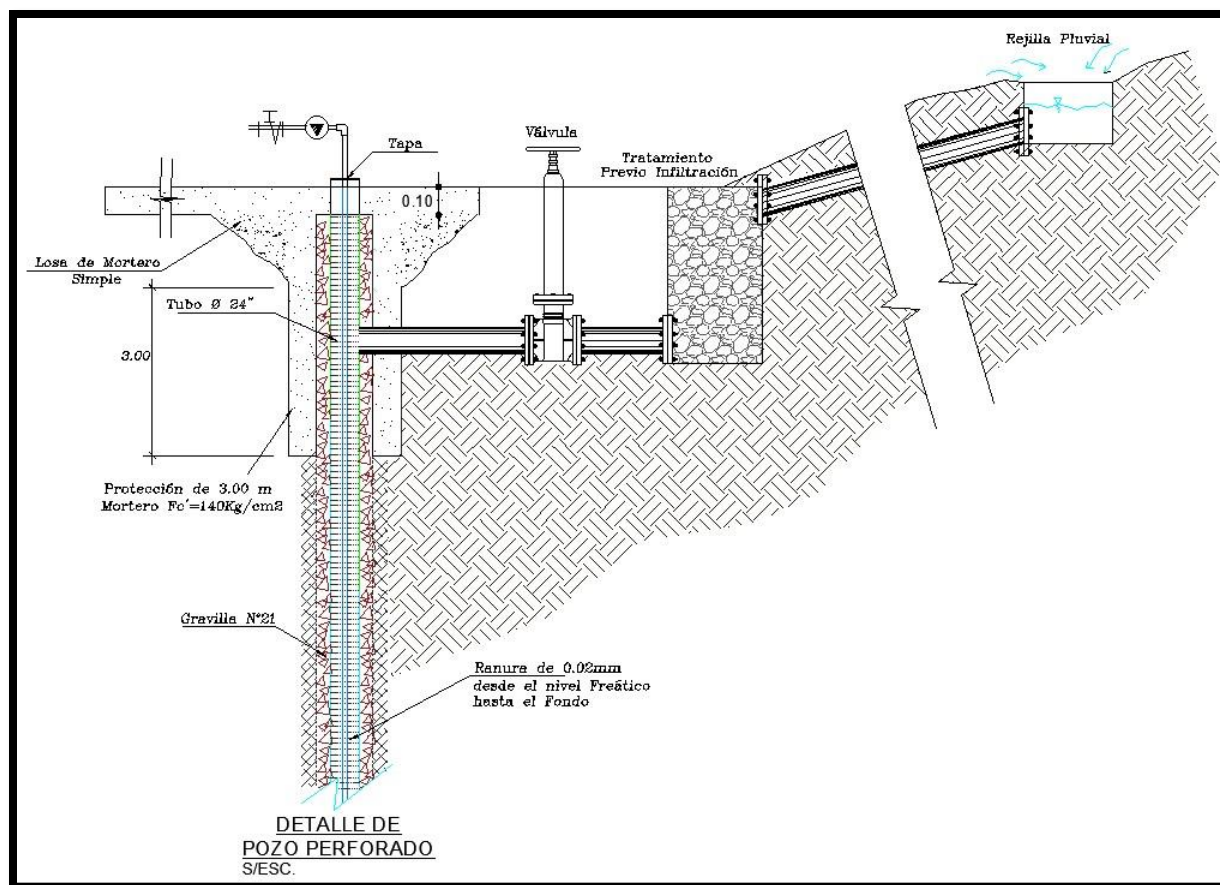


Figura 38. Representación de propuesta de pozo de reabastecimiento por medio de precipitaciones.

Nota: Elaboración propia con AutoCAD.

3.13. Descripción técnica del sitio seleccionado para la perforación del pozo

La exploración se ubicó en el sur del AMM en zona de el Camino al Diente de la Galería Elizondo, en la región de Huajuco. Está limitado al norte por el municipio de Monterrey, al sur por el municipio de Santiago, al este por el municipio de Guadalupe y al oeste por el municipio de Santa Catarina.

Esta zona se ubica entre dos provincias fisiográficas: hacia el este con la provincia de la costa del Golfo hasta la del cerro de La Silla, la otra es un desfiladero que corresponde a la provincia de la Sierra Madre Oriental cuya topografía es montañosa alternada con valles y otras elevaciones que alcanzan una media de 2220 m s. n. m.

Este sitio está localizado en la región hidráulica Bravo -Conchos (RH24) la cual pertenece a la vertiente del Río bravo – San Juan y las sub cuencas llamadas Río

Monterrey y Río Pesquería, de acuerdo con los documentos proporcionados por la CONAGUA. La ubicación para esta propuesta llamada Galería Los Elizondo está determinada de la siguiente manera: una longitud de 100°16'54.13''W, latitud de 25°35'6.74''W, altura de 627 msnm, con una extensión de 1,442.320 m² y un área de la cuenca de contribución de 27.88 km².

En la siguiente imagen se presenta el mapa de cuencas hidrográficas de la subcuenca del río Santa Catarina, mostrando su ubicación, delimitación e integración dentro de la cuenca Río Bravo–San Juan. Asimismo, se incluyen los límites administrativos, la red de drenaje y la jerarquización de escurrimientos, lo que permite comprender el patrón de flujo y la dinámica hidrológica de la región.

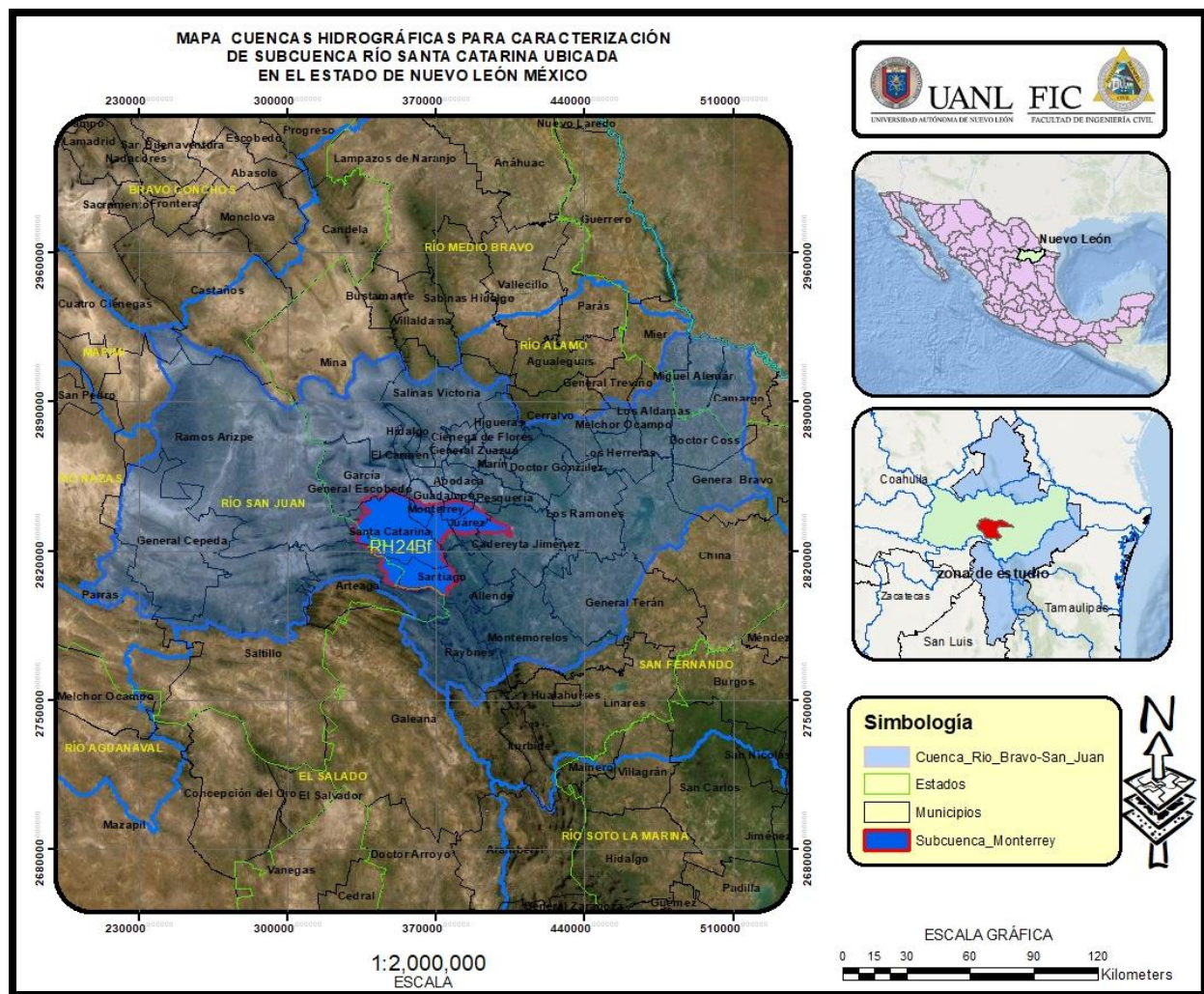


Figura 39. Mapa con cuencas hidrográficas para caracterización de subcuenca río Santa Catarina.

Nota. Elaboración propia con ArcGIS.

En la siguiente imagen se muestra una vista satelital del área de estudio, en la cual se aprecia su localización precisa y delimitación espacial, resaltada mediante un polígono. La imagen permite identificar el entorno inmediato del predio, así como su relación con la infraestructura vial existente, áreas vegetadas y zonas aledañas de uso mixto. Asimismo, facilita la visualización de accesos, caminos principales y la distribución general del terreno.

Esta representación facilita la comprensión del contexto físico y territorial en el que se inserta el área de estudio, así como la interacción entre el relieve, la cobertura del suelo y los elementos antrópicos presentes, constituyendo un apoyo visual fundamental para el análisis posterior de las condiciones hidrológicas y fisiográficas del sitio.

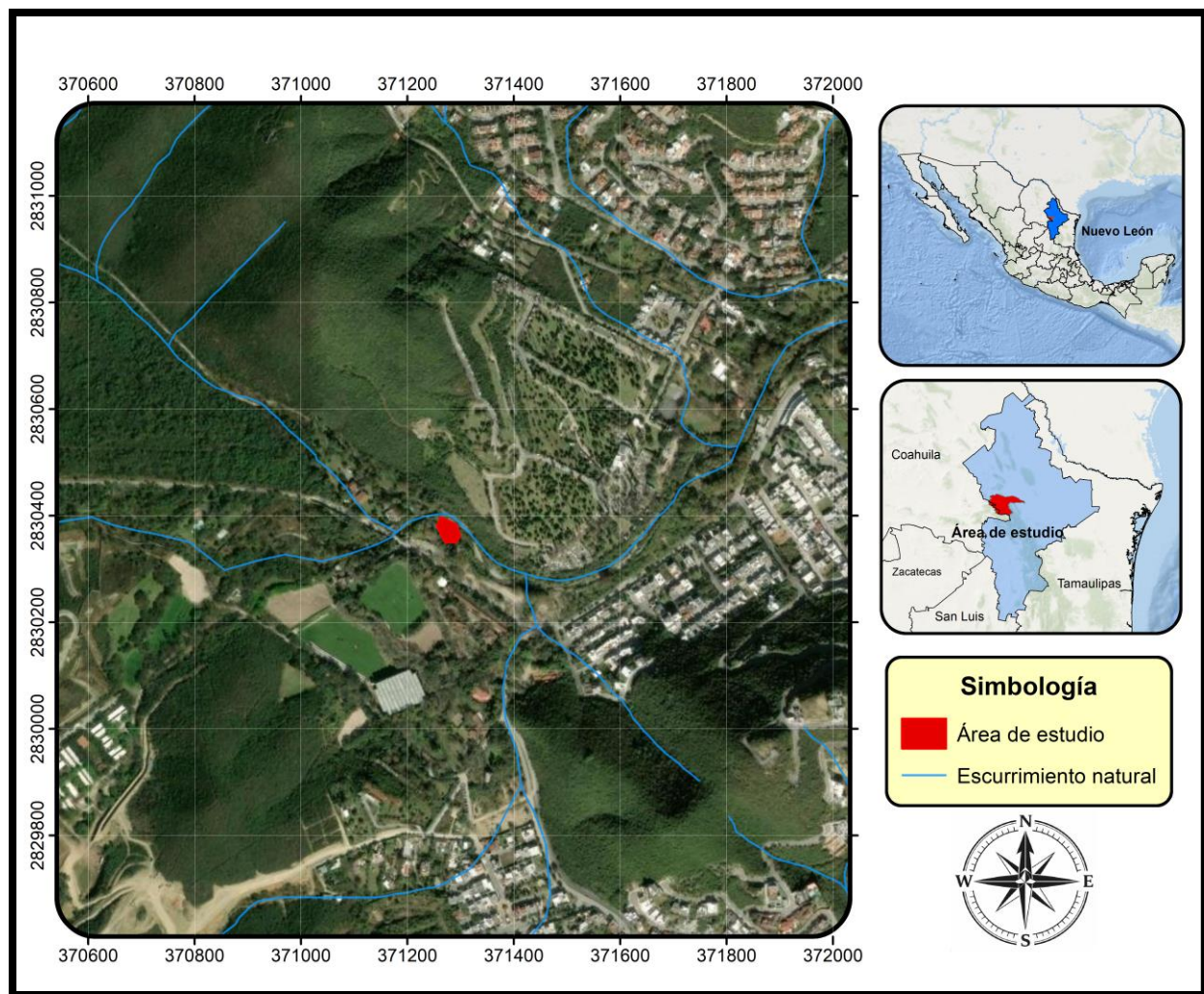


Figura 40. Localización del sitio de estudio.

Nota: Elaboración propia con ArcGIS..

3.13.1. Materiales para perforar el lugar

En este estudio se emplearon diversos materiales para la perforación del sitio, incluyendo una plataforma de perforación rotatoria, un tractor de perforación para pozos profundos, maquinaria especializada que facilita la gestión correcta de un terreno kárstico. De igual forma, se emplearon otros materiales como brocas para perforar, tubos de hierro, sellados y cemento, así como algunos instrumentos de medición para cuantificar la presión, el flujo y la cantidad de agua.

3.13.2. Materiales para construir el pozo

Para construir el pozo de inyección de agua en la Galería los Elizondo, se tomaron en cuenta técnicas de drenaje de un sistema que recoge el agua pluvial y la dirige al pozo de inyección. Esto implica la formación de un drenaje dirigido al pozo, así como la edificación propia del pozo, para ello, se necesitaron materiales específicos para su edificación, con el objetivo de conservar el agua almacenada, captarla y suministrarla.

3.13.3. Materiales utilizados para la recarga artificial

En relación a los materiales empleados para la edificación del pozo de inyección, se requirieron tuberías de revestimiento, que en este caso son de acero, es decir, de material inoxidable, con el objetivo de preservar las condiciones ambientales intactas y prevenir la corrosión. Además, se requirieron tuberías de PVC, que se emplearon en algunas sesiones breves de alta precisión, y también se utilizó el cemento para perforación.

Este último material se empleó para consolidar las tuberías de revestimientos de pozo, garantizando su adhesión e impidiendo que el agua se escape entre el revestimiento y la roca alrededor. Este cemento se modifica en función de las condiciones de profundidad del pozo.

Se emplearon materiales sellantes como la masilla y secadores especializados que aseguran que no existan filtraciones no deseadas a lo largo del revestimiento. También se emplearon brocas de diamante, otro símbolo para la perforación profunda debido a la resistencia del terreno y con el objetivo de lograr profundidades

significativamente mayores. Otros equipos también resultaron útiles como la plataforma de perforación, algunos complementos de perforación que incluyen varillas, brocas, hormigón, bloque de ladrillo, entre otros elementos que usualmente forman parte de un equipo que realiza labores de construcción. Por lo tanto, se consideró una gama de materiales bastante extensa que incluye incluso máquinas para elaborar mezcla de cemento y su vaciado, además del personal humano considerado uno de los materiales.

3.13.4. Método de perforación

En relación con la metodología de perforación, se ha demostrado en el documento anterior que es imprescindible contar con varios componentes esenciales tanto para realizar un diagnóstico, como para establecer el lugar y construirlo. La metodología que se elaboró para la perforación del pozo consiste en primer lugar en realizar un diagnóstico o análisis inicial mediante todas las técnicas citadas como los estudios hidrogeológicos y los geofísicos para comprender las técnicas de perforación.

El paso subsiguiente implica la limpieza del espacio y la colocación de plataformas de perforación. Al comenzar la perforación, se emplean diversas técnicas, tales como la perforación rotatoria, la perforación percusiva y la perforación con lodo. Al igual que se llevan a cabo estos procesos mencionados, también se llevan a cabo otros procesos relevantes que materializan el pozo.

En este punto, se comienza la instalación del revestimiento, la instalación de tuberías, la cementación del revestimiento y la edificación de la tapa del pozo. Además, se verifica también el funcionamiento y la supervisión del pozo. y luego se lleva a cabo un cierto mantenimiento previo a la puesta en marcha del pozo, es decir, se llevan a cabo pruebas preliminares para valorar la capacidad del flujo de agua y la eficacia del pozo, además se establecen sistemas de seguimiento para monitorear el nivel de agua, teniendo en cuenta la calidad del agua y las propiedades del flujo del pozo a lo largo del tiempo.

De igual manera, es fundamental que durante todo el proceso de perforación se mantenga un control técnico riguroso de los parámetros operativos, tales como la

velocidad de perforación, la estabilidad del barreno y las condiciones del material extraído.

3.13.5. Localización del pozo de reabastecimiento

Para seleccionar la localización del pozo de reabastecimiento, se realizó un análisis a la topografía del lugar, del cual se identificaron las cotas, las pendientes naturales del terreno y las direcciones de escurrimiento superficial. El factor clave consistió en la selección del punto con menor elevación, con el fin de aprovechar la inclinación natural del terreno y de esta manera simplificar el reabastecimiento de agua mediante una conducción gravitacional de la escorrentía superficial.

De acuerdo con el análisis descrito anteriormente, se seleccionó como mejor ubicación el área situada en las inmediatas adyacencias de la instalación de bombeo de la Galería Los Elizondo, ya que este sitio presenta ventajas tanto operativas como funcionales. En particular, esta localización permite la integración directa del pozo de reabastecimiento con la infraestructura hidráulica existente, lo que facilita su operación, mantenimiento y control, además de posibilitar su uso como alternativa en caso de una interrupción en el funcionamiento del sistema principal. La ubicación del pozo corresponde a las coordenadas UTM $X = 371,83.686$ m y $Y = 2,830,383.684$ m, localizándose en una zona próxima al acuífero donde se identifican condiciones geomorfológicas favorables para la captación y conducción del agua, tales como pendientes suaves, adecuada accesibilidad y ausencia de escurrimientos superficiales concentrados. Adicionalmente, en este punto se definió un área de captación superficial de 15×30 m (450 m^2), compatible con la configuración del sitio y con la infraestructura existente, la cual permite una recolección eficiente de los escurrimientos locales y su conducción controlada hacia el pozo de reabastecimiento, reduciendo pérdidas por escorrentía superficial y optimizando el aprovechamiento del recurso hídrico disponible, de acuerdo con los principios de diseño hidrológico aplicables a sistemas de captación de agua pluvial (ASCE, 2006).

Adicional a ello, se plantea la adecuación puntual del terreno dentro del área inmediata del emplazamiento, con el propósito de tener una pendiente uniforme y

funcional que permita transportar los escurrimientos hacia el pozo de reabastecimiento por medio de gravedad. Esta pendiente tiene que ser del 1%, ya que es el valor más adecuado para superficies pavimentadas, al permitir un drenaje eficiente del escurrimiento superficial sin generar velocidades excesivas que puedan provocar erosión, incomodidad para el tránsito o afectaciones a la estructura (Chow et al., 1998). Para la nivelación del terreno se emplean ajustes locales de baja magnitud, los cuales consisten en cortes y rellenos controlados únicamente en zonas donde el terreno lo requiera, cuidando que se mantenga la intervención limitada al área propuesta. Con respecto a los rellenos, estos serán compactados uniformemente con el propósito de reducir el riesgo a asentamientos diferenciales que pudieran modificar la pendiente durante la operación del sistema.

Se necesita el uso de maquinaria de obra mediana, seleccionada por su capacidad de perfilado continuo y precisión geométrica para su correcta ejecución. Específicamente, se considera el uso de una motoniveladora como herramienta principal para la conformación de la rasante y el establecimiento de la pendiente lo más preciso posible, y por otro lado, una excavadora hidráulica para realizar correcciones del terreno, y finalmente, un compactador liso o vibratorio de baja energía para estabilizar los rellenos, evitando vibraciones excesivas que puedan provocar inestabilidades en el medio kárstico (Wolf y Ghilani, 2012).

Adicional a ello, para proteger la pendiente y asegurar la correcta conducción del escurrimiento hacia el pozo, se plantea colocar pavimento asfáltico solamente en las franjas funcionales de conducción dentro del área propuesta. Este tendrá un carácter únicamente hidráulico y localizado, sin propósitos estructurales ni de tránsito pesado, y se plantea colocar sobre una subbase granular compactada, su principal función será dirigir el flujo controladamente, reducir pérdidas por infiltración no controlada y minimizar al arrastre de material fino (Ford y Williams, 2007).

Es de suma importancia la correcta selección de la localización del pozo, la adecuación del terreno, la determinación de la pendiente, el establecimiento de maquinaria adecuada, y la implementación de pavimento asfáltico funcional, son factores esenciales para un correcto desempeño hidráulico de un sistema de reabastecimiento y para la operación segura del proyecto de recarga artificial del acuífero.

En la siguiente imagen se presenta el plano topográfico del área de estudio, en el cual se muestra de manera detallada la ubicación y distribución espacial de los piezómetros instalados, así como los principales elementos físicos, topográficos y de infraestructura presentes en el sitio. El plano incluye curvas de nivel, vialidades, cuerpos y corrientes de agua, edificaciones y límites del predio, lo que permite una adecuada interpretación de las condiciones del terreno y su relación con el sistema hidrogeológico local.

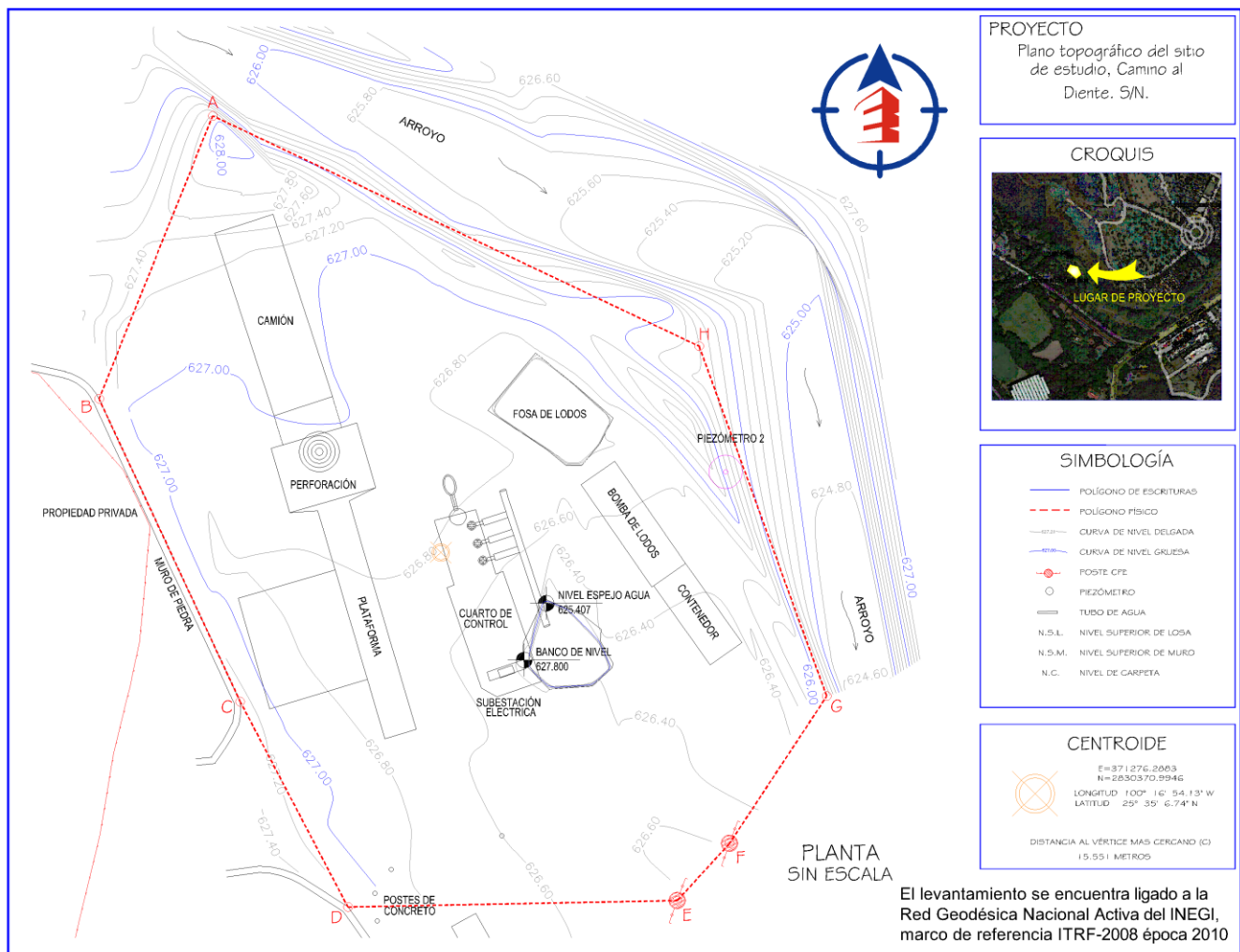


Figura 41. Plano Topográfico del área de estudio que representa los piezómetros instalados.

Nota. Elaboración propia con AutoCAD.

En la siguiente figura se muestra el esquema de ubicación del pozo de reabastecimiento por medio de precipitaciones, así como la traza del sistema de

captación y conducción del agua pluvial. Se indica la localización de la rejilla de captación superficial, la cual se encuentra georreferenciada en las coordenadas $X = 371,283.686$ y $Y = 2,830,383.684$, desde donde el escurrimiento es conducido hacia el pozo de inyección mediante un sistema de tuberías. Asimismo, se representan las pendientes de diseño del 1 %, establecidas para favorecer el flujo gravitacional del agua pluvial hacia el centro de bombas de la galería y posteriormente hacia el pozo, garantizando una conducción eficiente y controlada del escurrimiento superficial.

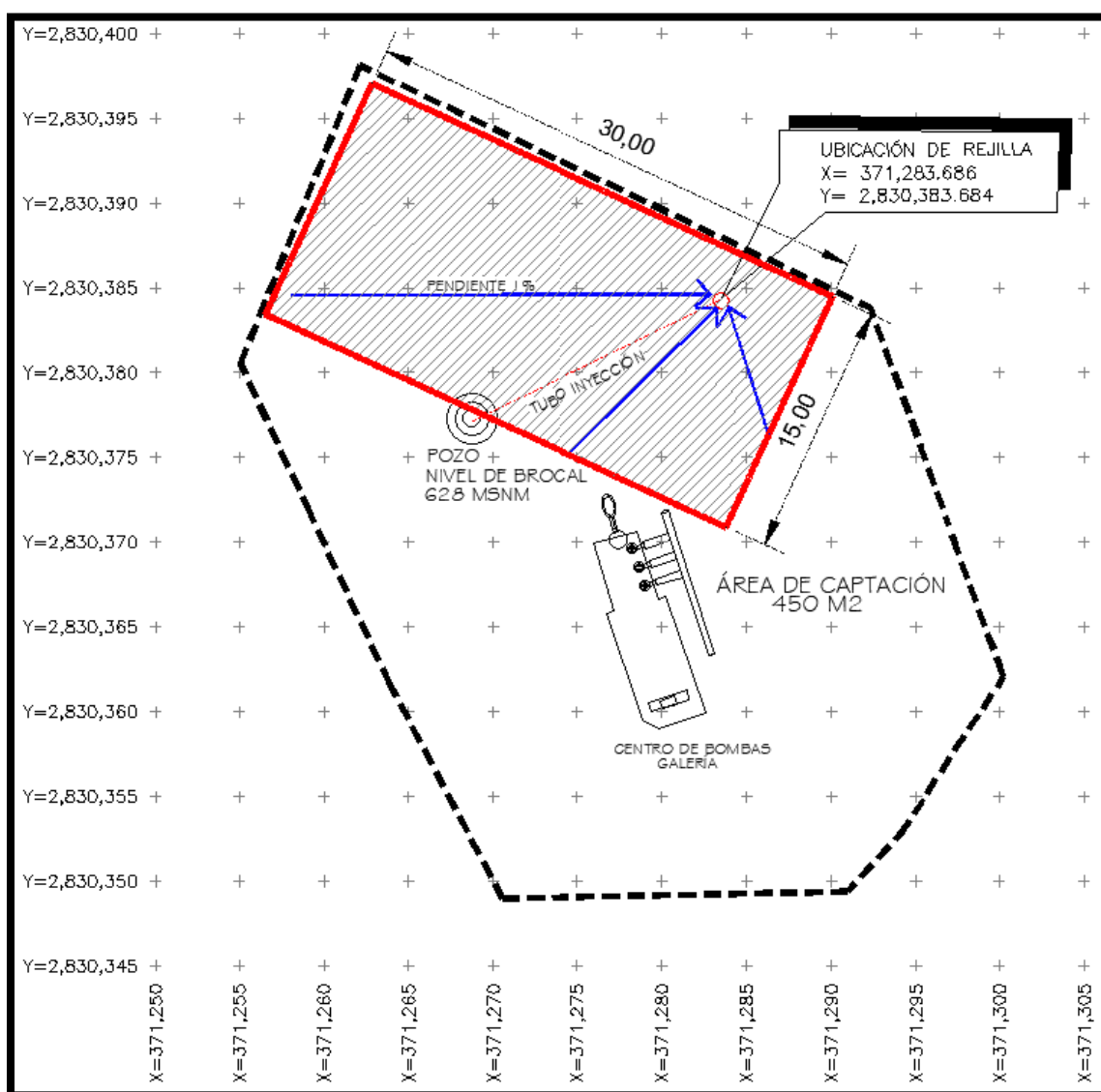


Figura 42. Localización de pozo de reabastecimiento por precipitación.

Nota. Elaboración propia con AutoCAD.

3.14. Selección del periodo de retorno de lluvia para proyectos de inyección profunda

La selección del periodo de retorno de 50 años se fundamenta en la naturaleza del proyecto, el cual corresponde a un sistema de recarga de acuíferos mediante inyección profunda en ambientes kársticos, los cuales son caracterizados por tener una gran heterogeneidad, anisotropía hidráulica, y conductos de flujo. Estas intervenciones hidrogeológicas tienen la capacidad para modificar los regímenes de presión, los gradientes hidráulicos, y la dinámica de flujos subterráneos.

A diferencia de obras hidráulicas superficiales o sistemas de drenaje, los proyectos de inyección profunda implican la introducción controlada de volúmenes significativos de agua directamente en el acuífero receptor. En este tipo de proyectos, el criterio de diseño y evaluación debe ser conservador, considerando escenarios hidrológicos que permitan analizar el comportamiento del sistema bajo condiciones críticas de carga hidráulica, dado que ciertos impactos asociados a la inyección pueden ser de carácter irreversible (Bouwer, 2002).

Los periodos de retorno bajos (10 a 25 años), representativos del régimen ordinario de precipitaciones, permiten caracterizar condiciones habituales de aporte hídrico; sin embargo, no generan escenarios de exigencia hidráulica suficientes para evaluar de manera adecuada un sistema de inyección profunda. Bajo estos eventos, los volúmenes de aporte y los gradientes hidráulicos inducidos resultan limitados, impidiendo el análisis de procesos relevantes como la propagación de presiones en profundidad, la conectividad hidráulica del medio y la respuesta piezométrica del acuífero receptor (McCuen, 2005).

Para efectos del presente estudio, y en función del tipo de proyecto desarrollado, se consideran como periodos de retorno elevados aquellos iguales o superiores a 50 años. En particular, este se clasifica como un evento severo, mientras que el de 100 años corresponde a un evento extremo, representativo de los cuantiles superiores de la distribución de máximos anuales de precipitación. La adopción del evento severo como escenario de diseño permite someter al sistema a condiciones demandantes sin depender de extrapolaciones probabilísticas excesivas, lo cual es un aspecto importante

cuando la longitud de las series pluviométricas limita la robustez estadística de escenarios más extremos (World Meteorological Organization, 2009).

El periodo de retorno de 50 años, si bien representa un evento hidrológico severo y plausible, resulta adecuado para evaluar de manera conservadora los efectos hidráulicos asociados a la inyección profunda, ya que permite generar volúmenes de aporte y gradientes hidráulicos suficientes para analizar la respuesta del sistema bajo condiciones exigentes. En proyectos de recarga gestionada de acuíferos, este nivel de severidad es comúnmente empleado para representar escenarios extremos razonables, permitiendo evaluar la capacidad de admisión del pozo, la propagación de presiones en profundidad, la respuesta piezométrica del acuífero y los márgenes de seguridad frente a procesos de colmatación, sobrepresión o pérdida de eficiencia hidráulica (Bouwer, 2002).

Por el contrario, el periodo de retorno de 100 años, aun cuando corresponde a un evento de baja probabilidad anual de excedencia e hidrológicamente plausible, puede generar volúmenes de aporte pluvial y cargas hidráulicas excesivas sobre el sistema de inyección profunda, lo que conduce a condiciones de diseño sobredimensionadas que no representan de manera consistente el régimen hidrológico esperable del área de estudio. En este sentido, su aplicación resulta menos adecuada para evaluar la capacidad de admisión del pozo, la propagación de presiones en profundidad y la respuesta piezométrica del acuífero dentro de márgenes de seguridad técnicamente razonables (Bouwer, 2002).

Bajo este escenario severo es posible evaluar la capacidad de admisión del pozo, la propagación de presiones a través de la red kárstica, la respuesta piezométrica, y los márgenes de seguridad frente a procesos de colmatación, sobrepresión, o pérdida de eficiencia hidráulica. El nivel de la carga inducida resulta suficiente para activar rutas preferenciales de flujo y forzar condiciones operáticas plausibles, para que se logre mantener a interpretabilidad hidrogeológica del sistema.

La adopción de periodos de retorno superiores a 100 años introduce una incertidumbre estadística creciente, especialmente cuando las series históricas de precipitación disponibles no cuentan con la longitud suficiente para sustentar extrapolaciones probabilísticas robustas. Desde el punto de vista hidrogeológico, estos

escenarios no aportan beneficios proporcionales para la evaluación del sistema de inyección profunda y pueden conducir a supuestos excesivamente conservadores que dificultan la interpretación de los resultados y la viabilidad técnica del proyecto (World Meteorological Organization, 2009).

Por estas razones, el periodo de retorno de 50 años se adopta como criterio técnico de evaluación por representar un equilibrio adecuado entre severidad hidrológica, respuesta no lineal del medio kárstico y plausibilidad estadística. Su empleo permite analizar el comportamiento del acuífero bajo condiciones exigentes pero controlables, garantizando la seguridad hidráulica, la estabilidad hidrogeológica y la viabilidad técnica del sistema de recarga mediante inyección profunda propuesto.

3.15. Procedimiento integral para el cálculo y dimensionamiento de la rejilla pluvial de captación y la tubería de conducción hacia el pozo

El diseño hidráulico del sistema de captación pluvial se desarrolla mediante metodológicas consolidadas de la hidrología aplicada y del drenaje pluvial urbano, estas son ampliamente validadas para el análisis del escurrimiento superficial en áreas reducidas con predominio de superficies impermeables (Akan y Houghtalen, 2003). El procedimiento articula de manera continua la generación del escurrimiento, su concentración espacial y temporal, la captación mediante el uso de rejillas pluviales, y la conducción hidráulica hacia el pozo de reabastecimiento, garantizando coherencia física y consistencia matemática entre cada etapa del diseño (Chow et al., 1998).

3.15.1. Criterio hidrológico de diseño

En el caso de estudio, se establece como evento hidrológico de diseño un periodo de retorno:

$$TR = 50 \text{ años}$$

Donde TR corresponde al intervalo estadístico asociado a la ocurrencia de un evento extremo de precipitación. El valor corresponde a un evento de baja probabilidad anual y resulta apropiado para infraestructura pluvial cuya falla podría comprometer la

operación del sistema, por lo que se emplean criterios conservadores acordes con manuales de drenaje urbano vigentes (AASHTO, 2014).

3.15.2. Área efectiva de captación

El área que contribuye hidráulicamente al punto de captación superficial es:

$$A = 450 \text{ m}^2$$

Donde A corresponde a la superficie que descarga directamente hacia la rejilla pluvial. Para su aplicación en el Método Racional, el área se expresa en hectáreas:

$$A = \frac{450}{10,000} = 0.045 \text{ ha}$$

La delimitación precisa del área es fundamental, ya que el Método Racional asume contribución simultánea de toda la superficie al gasto pico (Chow et al., 1998).

3.15.3. Coeficiente de escurrimiento superficial

Dado que la superficie de captación corresponde a pavimento asfáltico, el coeficiente de escurrimiento se fija en:

$$C = 0.9$$

Donde C es un parámetro adimensional que representa la fracción de la precipitación que se transforma en escurrimiento superficial directo. El valor adoptado es representativo de superficies con capacidad de infiltración moderada, y se encuentra dentro de los rangos recomendados para áreas parcialmente impermeables o con cobertura mixta en estudios de hidrología urbana (Akan y Houghtalen, 2003).

3.15.4. Tiempo de concentración

El tiempo de concentración se estima mediante la ecuación empírica de Kirpich (1940):

$$t_c = 0.0195 L^{0.77} S^{-0.385} \quad (3.8)$$

Donde t_c es el tiempo de concentración en minutos; $L = 25$ m es la longitud hidráulica del escurrimiento superficial, definida como el recorrido máximo desde el punto hidráulicamente más alejado hasta la captación; y $S = 0.01$ es la pendiente media del trayecto hidráulico, expresada como relación adimensional entre el desnivel y la longitud del escurrimiento.

Sustituyendo los valores:

$$t_c = 0.0195(25)^{0.77}(0.01)^{-0.385}$$

$$t_c = 1.369 \text{ min}$$

Para efectos de diseño hidráulico se considera una duración de lluvia de 5 minutos, consistente con la discretización típica de las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia y como criterio conservador para evitar extrapolaciones en eventos de alta intensidad (Federal Highway Administration, 2024).

3.15.5. Intensidad de lluvia de diseño

Para un periodo de retorno de 50 años y una duración de 5 minutos, se emplea la intensidad de lluvia:

$$I = 937.05 \text{ mm/h}$$

Donde I representa la precipitación media por unidad de tiempo correspondiente al evento de diseño. Este valor mantiene coherencia entre la duración crítica del evento y la intensidad máxima utilizada en el Método Racional (Chow et al., 1998).

3.15.6. Caudal máximo de diseño (Método Racional)

El caudal máximo de escurrimiento superficial se determina mediante el Método Racional (Chow et al., 1998):

$$Q_{max} = 0.00278 C I A \quad (3.9)$$

Donde Q_{max} es el caudal máximo de diseño en m^3/s ; C es el coeficiente de escurrimiento; I es la intensidad de lluvia en mm/h ; A es el área de captación en

hectáreas; y el factor 0.00278 es un coeficiente de conversión que garantiza coherencia dimensional en el Sistema Internacional.

Sustituyendo:

$$Q_{max} = 0.00278(0.9)(937.05)(0.045)$$
$$Q_{max} = 0.105 \text{ m}^3/\text{s}$$

Este gasto representa la condición hidráulica más desfavorable que debe ser interceptada por el sistema de captación.

3.15.7. Parámetros hidráulicos de la superficie hacia la captación

Se consideran pendientes longitudinal y transversal de la superficie inmediata a la rejilla iguales a:

$$S_o = S_x = 1\% = 10 \text{ milésimas}$$
$$\frac{S_o}{1000} = \frac{S_x}{1000} = 0.01$$

Donde S_o es la pendiente longitudinal y S_x la pendiente transversal hacia la captación. El coeficiente de rugosidad superficial del pavimento es:

$$n=0.016$$

Donde n es el coeficiente de rugosidad de Manning, representativo de superficies asfálticas en condiciones ordinarias (Federal Highway Administration, 2024).

3.15.8. Geometría del módulo de rejilla y justificación integrada

Se utiliza un módulo de rejilla de geometría rectangular estándar con dimensiones $B = 0.50 \text{ m}$ y $L_g = 1.00 \text{ m}$, debido a que este tipo de configuración geométrica es ampliamente empleada en sistemas de captación y drenaje pluvial por su eficiencia para la interceptación de escurrimientos superficiales, su comportamiento hidráulico estable y su facilidad de integración constructiva y de mantenimiento en arreglos modulares. El empleo de dimensiones estandarizadas en rejillas de captación permite asegurar una adecuada captación del flujo, reducir pérdidas locales y mantener un funcionamiento

confiable bajo distintas condiciones de escurrimiento, conforme a los criterios de diseño hidrológico establecidos para obras de captación de agua pluvial (ASCE, 2006).

Donde B es el ancho y L_g la longitud del módulo, lo que define un área geométrica por módulo de:

$$A_t = B L_g = (0.50)(1.00) = 0.50 \text{ m}^2$$

La geometría rectangular es congruente con el patrón de escurrimiento superficial predominantemente unidireccional sobre pavimentos con pendiente definida hacia la captación, favoreciendo la eficiencia hidráulica de interceptación, la estabilidad del flujo de entrada, la colocación modular de múltiples rejillas consecutivas y la facilidad de mantenimiento del sistema (AASHTO, 2014).

3.15.9. Cálculo del tirante sobre la rejilla

La formulación empleada para el cálculo del tirante se encuentra expresada en sistema inglés, por lo que se utiliza el factor de conversión volumétrica:

$$F = \frac{1}{0.3048^3 \text{ m}} = 35.314 \text{ ft}$$

Donde F es el factor de conversión entre m^3/s y ft^3/s . El caudal convertido es:

$$Q_{\max, ft} = 35.314(0.105) = 3.707 \text{ ft}^3/\text{s}$$

El tirante hidráulico sobre la rejilla se determina considerando que el sistema de captación opera bajo régimen de control hidráulico, condición en la cual la capacidad de admisión de la rejilla gobierna el comportamiento del flujo superficial, independientemente de las características hidráulicas de la conducción aguas abajo. Bajo este supuesto, el tirante sobre la rejilla puede estimarse mediante una expresión empírica que relaciona el gasto máximo incidente con la pendiente longitudinal, la rugosidad hidráulica de la superficie de escurrimiento y los factores geométricos propios del sistema de captación.

La estimación del tirante inicial Y_o se realiza conforme a la siguiente relación:

$$Y_o = \left[\frac{FQ_{max}}{\left(\frac{1}{0.56 \left(\frac{S_x}{1000} \right) \left(\frac{1}{n} \right) \left(\frac{S_o}{1000} \right)^{1/2}} \right)} \right]^{3/8} \quad (3.10)$$

Donde Y_o es el tirante hidráulico sobre la rejilla (m); FQ_{max} corresponde al gasto máximo incidente sobre la estructura de captación (m^3/s); S_x representa la pendiente transversal de la superficie de aporte (%); S_o es la pendiente longitudinal del flujo superficial (%); y n es el coeficiente de rugosidad de Manning asociado al material de la superficie de escurrimiento. El coeficiente empírico y el exponente fraccionario incluidos en la expresión derivan de ajustes experimentales realizados para rejillas pluviales bajo condiciones de flujo superficial uniforme.

La forma funcional de esta ecuación es consistente con las metodologías establecidas para el diseño hidráulico de sistemas de drenaje pluvial urbano bajo control hidráulico, ampliamente documentadas en el *Urban Drainage Design Manual* (HEC-22), el cual constituye la referencia técnica principal para la evaluación del tirante y la capacidad de captación en rejillas pluviales. Esta metodología ha sido adoptada como referencia normativa en el contexto nacional para el diseño de sistemas de drenaje pluvial urbano, por lo que su aplicación resulta técnicamente adecuada para el análisis desarrollado en el presente estudio (Federal Highway Administration, 2024).

Sustituyendo:

$$Y_o = \left[3.707(0.56)(0.01) \left(\frac{1}{0.016} \right) \sqrt{0.01} \right]^{3/8}$$

$$Y_o = 0.464 \text{ ft}$$

Conversión a sistema internacional:

$$Y_o = 0.464(0.3048) = 0.141 \text{ m}$$

3.15.10. Área efectiva requerida de captación

El área efectiva total necesaria para interceptar el caudal superficial bajo el tirante previamente calculado se determina considerando que el flujo que incide sobre la rejilla se encuentra controlado hidráulicamente y que la captación depende directamente del área hidráulica efectiva disponible para la admisión del gasto. Bajo estas condiciones, el área efectiva requerida se define a partir de la relación entre el gasto máximo incidente y la velocidad media de aproximación asociada al tirante sobre la rejilla.

El área efectiva total de captación A_m se calcula mediante la siguiente expresión:

$$A_m = \frac{FQ_{max}}{\left(\frac{1}{4Y_o^2}\right)} (0.3048)^2$$

Donde A_m es el área efectiva total de captación requerida (m^2); FQ_{max} corresponde al gasto máximo incidente sobre la rejilla (m^3/s); Y_o es el tirante hidráulico previamente calculado sobre la rejilla (m); y el factor $(0.3048)^2$ corresponde a la conversión de unidades de pies cuadrados a metros cuadrados, asegurando la coherencia dimensional del análisis hidráulico. La expresión $\frac{1}{4Y_o^2}$ representa la relación hidráulica asociada a la velocidad característica del flujo superficial bajo condiciones de control hidráulico en rejillas.

La formulación empleada es consistente con los criterios establecidos para el diseño de estructuras de captación superficial en sistemas de drenaje pluvial urbano, donde el área efectiva de admisión se determina en función del gasto incidente y del tirante que gobierna el régimen hidráulico del flujo. Este enfoque permite garantizar que la superficie efectiva de captación sea suficiente para interceptar el caudal de diseño sin generar rebase superficial ni pérdida de eficiencia hidráulica en la rejilla.

El uso de esta expresión resulta técnicamente adecuado para el análisis desarrollado en el presente estudio, ya que se basa en metodologías ampliamente aceptadas para el dimensionamiento hidráulico de rejillas pluviales bajo control hidráulico, asegurando la funcionalidad del sistema de captación durante eventos de diseño representativos (Federal Highway Administration, 2024).

Realizando los cálculos intermedios:

$$4Y_o^2 = 4(0.464)^2 = 0.861$$

$$\frac{1}{4Y_o^2} = 1.151$$

Sustituyendo:

$$A_m = \left[\frac{(35.314)(0.105)}{(1.151)} \right] (0.3048)^2$$

$$A_m = 0.299 \text{ m}^2$$

3.15.11. Número de módulos de rejilla

$$N_m = \frac{A_m}{A_t} \quad (3.11)$$

Sustituyendo:

$$N_m = \frac{0.299}{0.50} = 0.598$$

Donde N_m es el número de módulos de rejilla requeridos. Redondeando al entero inmediato superior:

$$N_m = 1 \text{ rejilla}$$

3.15.12. Dimensionamiento de la tubería de conducción hacia el pozo

La conducción del caudal captado hacia el pozo se dimensiona como tubería a gravedad, asumiendo flujo uniforme y sección circular llena, mediante la ecuación de Manning (1998):

$$Q = \frac{1}{n_p} AR^{2/3} S_p^{1/2} \quad (3.12)$$

Donde Q es el caudal conducido; $n_p = 0.016$ es el coeficiente de rugosidad de Manning de la tubería; $S_p = 0.01$ es la pendiente hidráulica; A es el área hidráulica; y R es el radio hidráulico. Con:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} ; R = \frac{D}{4} \quad (3.13)$$

Donde D es el diámetro interior del conducto. Resolviendo para el diámetro:

$$D = 0.335 \text{ m} = 13.2''$$

Se selecciona el diámetro comercial inmediato superior:

$$D = 14'' = 0.355 \text{ m} = 355 \text{ mm}$$

3.15.13. Resultados del procedimiento de diseño hidráulico de la rejilla y del tubo de conexión

Para un periodo de retorno de 50 años y un área de captación de 450 m^2 , el caudal máximo de escurrimiento superficial resultó igual a $0.1055 \text{ m}^3/\text{s}$. El análisis del tiempo de concentración arrojó un valor del orden de 1.37 min, utilizándose una duración de lluvia de 5 min para efectos de diseño, con una intensidad asociada de 937.05 mm/h . El cálculo hidráulico del imbornal permitió determinar un tirante máximo sobre la rejilla de 0.466 ft (0.142 m), a partir del cual se obtuvo un área efectiva requerida de captación de 0.299 m^2 , satisfecha mediante un módulo de rejilla rectangular de 0.50 m^2 . Finalmente, el caudal captado se conduce hacia el pozo mediante una tubería a gravedad con diámetro comercial de 355 mm ($\approx 14''$), garantizando la conducción del gasto de diseño.

3.16. Fundamento hidráulico del sistema del pozo de inyección

3.16.1. Bases técnico-metodológicas para la recarga artificial de acuíferos mediante pozos de inyección profunda

La presente tesis doctoral se sustenta en la recarga artificial de acuíferos mediante pozos de inyección profunda. Estos sistemas se consideran una evolución técnica de los pozos de absorción descritos en el manual *Pozos de absorción* elaborado por la

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación y el Colegio de Postgraduados (SAGARPA, 2017). Dicho manual se adopta como referencia metodológica primaria, dado que define criterios hidráulicos, geotécnicos e hidrogeológicos aplicables a la infiltración y al almacenamiento subterráneo de escurrimientos pluviales.

Los pozos de absorción se describen como excavaciones verticales destinadas a infiltrar agua de lluvia a través de estratos no saturados del suelo. Su aplicación permite reducir escurrimientos superficiales, moderar caudales máximos y contribuir al restablecimiento parcial del balance hídrico subterráneo (SAGARPA, 2017). El manual establece una diferenciación técnica entre pozos de absorción y pozos de inyección. Los pozos de inyección operan cuando el nivel freático o el acuífero se localiza por encima del fondo del pozo, condición que posibilita la incorporación directa del agua al sistema acuífero y define el principio de la recarga artificial profunda.

La tesis orienta su análisis hacia pozos de inyección profunda diseñados para atravesar capas de baja permeabilidad y alcanzar acuíferos profundos. Esta condición es frecuente en ambientes hidrogeológicos complejos, como los sistemas kársticos, donde la heterogeneidad estructural y la elevada conductividad hidráulica controlan el flujo subterráneo. Los criterios de selección del sitio, evaluación de permeabilidad, estimación de la capacidad de infiltración y determinación de la profundidad del nivel freático descritos en el manual se utilizan como base técnica de referencia (FAO, 2013).

En el análisis hidráulico del pozo de inyección profunda se considera que el revestimiento incorpora un tramo ranurado destinado a la infiltración, condición indispensable para permitir el intercambio hidráulico entre el pozo y el acuífero receptor. La presencia de este tramo ranurado constituye un supuesto técnico fundamental para la estimación del área efectiva de inyección, el gasto de infiltración y la evaluación del comportamiento volumen–tiempo del sistema, particularmente en medios kársticos donde la permeabilidad secundaria controla el flujo subterráneo. Este planteamiento es consistente con la literatura especializada en recarga artificial, la cual establece que los pozos de inyección deben permitir la transferencia directa del agua hacia el medio geológico circundante, evitando un comportamiento de almacenamiento estanco (Bouwer, 2002).

El manual desarrolla los criterios para el dimensionamiento hidráulico de las obras de infiltración. Se incluyen el cálculo del volumen afluente, el volumen infiltrado, el volumen de almacenamiento y el balance de masas entre escurrimiento e infiltración (Wanielista, 1990). Estos criterios se emplean en la tesis como base de cálculo. Se incorporan condiciones propias de la inyección profunda, entre ellas el control de presiones de inyección, la respuesta hidráulica del acuífero y los lineamientos normativos aplicables a la infiltración artificial de agua en acuíferos establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-015-CNA-2007.

Los aspectos constructivos y operativos descritos en el manual resultan determinantes en pozos de inyección profunda. El uso de material granular limpio, filtros geotextiles, sistemas de sedimentación, instrumentación piezométrica y programas de mantenimiento condiciona el desempeño hidráulico de la obra. En este tipo de pozos, los procesos de colmatación, la posible contaminación del acuífero y la alteración del medio geológico representan riesgos relevantes que requieren controles estrictos (Azzout et al., 1994)

El manual se integra en la tesis como antecedente técnico esencial, sus criterios permiten estructurar los lineamientos de diseño, operación y monitoreo aplicables a los pozos de inyección profunda considerados en el esquema de recarga artificial propuesto.

3.16.2. Volumen infiltrado

Un desagadero o fosa de absorción es una clase de red que permite que las aguas de la superficie se sumerjan y sean utilizadas en áreas donde las lluvias son copiosas o donde pueden ocurrir crecidas. Su finalidad es aprovechar su capacidad de filtración de los excesos de líquido hacia los reservorios subterráneos. Para calcular la cantidad de líquido que puede penetrar a una de estas estructuras geológicas se debe tomar en cuenta previamente el establecimiento de su profundidad.

Después de haber realizado este cálculo se debe aplicar la fórmula determinada. Cumplir con las normas e indicaciones que aseguren el cabal funcionamiento de un pozo es indispensable para implementar su modelaje y edificación. La clase de suelo, las características del terreno y su localización son ingredientes esenciales para poner en

funcionamiento un sumidero. Para un sumidero de profundidad h , el volumen infiltrado se calcula con la siguiente ecuación:

$$V_i = \frac{A_i \cdot k \cdot t}{1000 \cdot f_s} \quad (3. 14)$$

Donde:

- V_i =volumen infiltrado (m^3).
- A_i =superficie interior del pozo en el cual se produce infiltración (m^2).
- K = infiltración básica o conductividad hidráulica saturada (mm/h).
- t = intervalo de duración de lluvia (h).
- f_s = factor de seguridad.

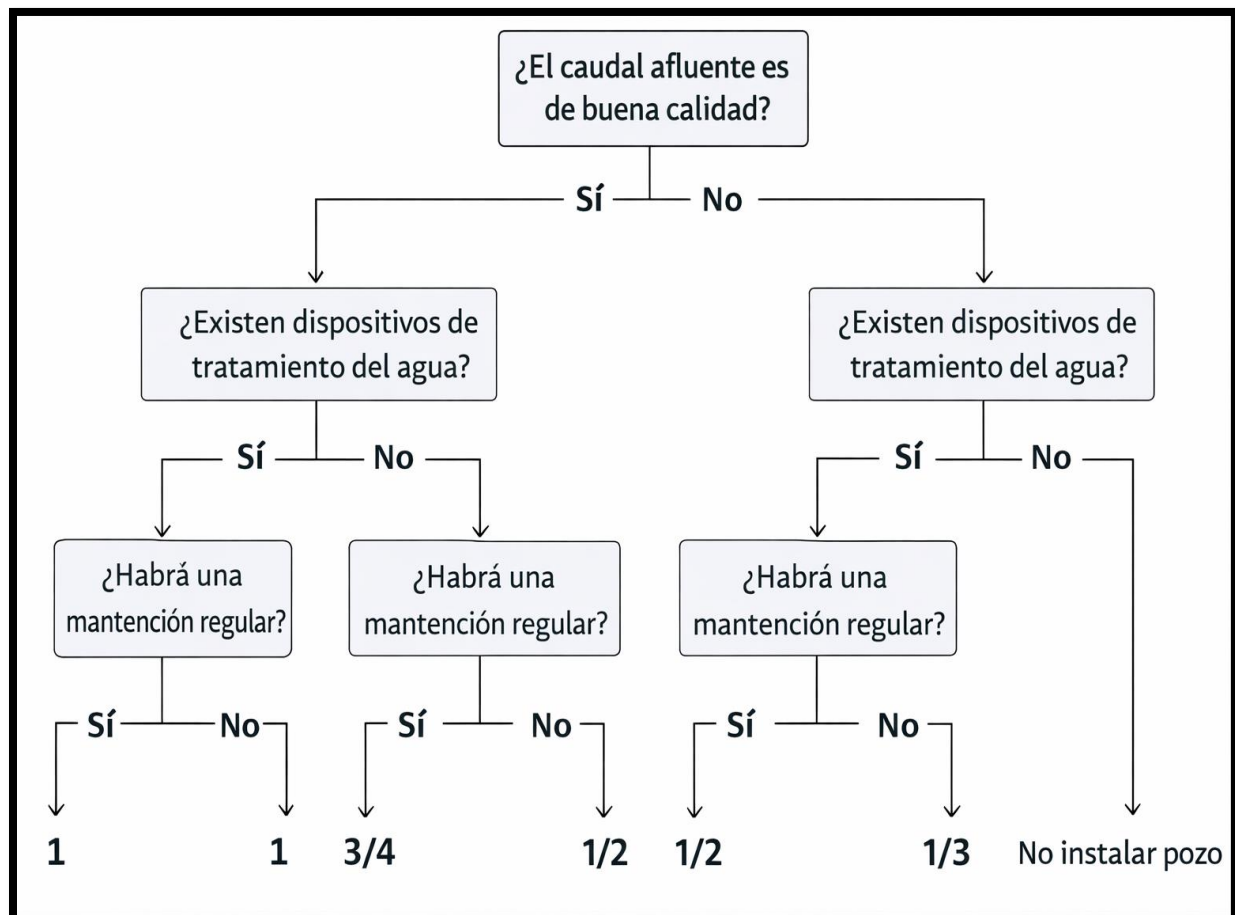


Figura 43. Componente de seguridad.

Nota. Azzout (1994).

La construcción de este sistema fue planificada minuciosamente con el fin de sacar provecho del actual tamaño del pozo de sustracción, cuya edificación se está realizando en estos momentos. Su diámetro es de 24 pulgadas y tendrá 800 metros de profundidad.

El diseño del sistema permitirá asegurar la recuperación del estrato freático con los volúmenes adecuados de líquido, acción indispensable para la preservación el balance de los hábitats naturales de los alrededores y el permanente aprovisionamiento del vital líquido para las comunidades vecinas. Además, en la propuesta contará con terminales electrónicos que regulan los niveles en la instalación y sus alrededores. Esta información es de suma utilidad para asegurar la calidad del proceso y que el nivel del estrato freático se mantenga según los cánones establecidos. Asimismo, representa una fase esencial para asegurar la sostenibilidad del aprovechamiento de las aguas del área. Esta construcción denota la participación comprometida de las autoridades para beneficiar el medio ambiente natural y el de los habitantes vecinos.

3.16.3. Volumen de la vertiente

La cantidad de líquido pluvial que sería absorbida V_a (m³) en un modelo propio para la adquisición de esta clase de líquido con un tiempo de retorno y una potencia (I_t) determinados y durante un periodo (t), se puede medir a través de una fórmula matemática que toma en consideración factores como la clase de suelo y su capacidad de absorción, la inclinación de la superficie y las condiciones de la cubierta vegetal. Por otra parte, la cantidad del líquido que puede ser permeado a través del suelo está supeditado al volumen de agua contenido en él y de la velocidad para el drenado.

Para la realización del cálculo de la cantidad de agua proveniente de la precipitación es necesario conocer la información relativa a la potencia, tiempo de ocurrencia de la lluvia, las características del suelo y el entorno natural. Se pueden usar varias fuentes de información como las instalaciones meteorológicas cercanas al área, datos sobre las características del suelo y los planos de levantamientos topográficos.

$$V_a = \frac{C \cdot I_t \cdot A \cdot t}{1000} \quad (3.15)$$

Donde:

- V_a = volumen del afluente(m³).
- C = coeficiente de escurrimiento superficial(adm).
- A = área total de captación(m²).
- I_t = intensidad de la lluvia(mm/h)
- t = intervalo de la duración de la lluvia(h).

3.16.4. Tiempo de llenado

La altura del agua dentro del pozo es un factor que determina su raudal de infiltración, la cual cambia a medida que se produce su llenado. Esta cantidad depositada se incrementa cuando el volumen de recepción es superior al que se introduce (V_i). El llenado comienza al momento de que la cantidad de entrada esté por encima de la infiltración; sin embargo, al mantenerse el volumen, el líquido se acumulará.

$$V_{aacumulado} - V_{iacumulado} \leq Vol_{geom} \quad (3. 16)$$

Donde:

- V_a acumulado= volumen del afluente acumulado (m³).
- V_i acumulado= volumen infiltrado acumulado (m³).
- Vol_{geom} = volumen geométrico del pozo (m³).

3.16.5. Área

Se ha logrado gran amplitud de los resultados obtenidos para desarrollar las adecuadas etapas en el proceso de la recarga artificial en la Galería Los Elizondo. Este proceso condujo a la construcción de un área poligonal de cuatro vértices y cuatro lados que consta de un espacio de 450 m².

Esta extensión representa una gran significancia y se presume que sirva de apoyo para los procedimientos de incremento artificial de los niveles del líquido en los acuíferos, esencial para su mantenimiento. Asimismo, permite establecer una base operativa adecuada para la implementación de las obras hidráulicas propuestas. De igual manera, contribuye a optimizar la captación e infiltración del agua dentro del sistema.

3.16.6. Gasto de infiltración

La cantidad de líquido propensa a acceder a la superficie del suelo en un tiempo determinado se conoce como “tasa de absorción”. Es un proceso natural que recibe influencias de elementos como la clase de suelo, el estrato superficial vegetal y la potencia de las lluvias. Este es un factor de relevancia de los estudios relacionados con el agua, pues con su cálculo se puede establecer el volumen del líquido que es capaz de ser absorbido por el suelo y la rapidez para depositarse o trasladarse. Una gran velocidad en la absorción es una señal beneficiosa para reducir al mínimo las afectaciones negativas producto del rebasamiento de los niveles de agua en la superficie, además de los daños que produce la erosión.

En caso contrario, una tasa baja supone una gran propensión a las inundaciones, la repleción de la superficie o la proliferación de charcos. Existen técnicas como la caracterización del suelo y el cálculo de penetración. El conocimiento conciso de estos datos es esencial para el manejo y preservación adecuado de las aguas, lo que también conduce a entender de mejor manera el comportamiento del ciclo hidrológico para atender o prevenir eventualidades naturales que podrían afectar al ambiente y a las comunidades.

$$Q_i = V_i / t \quad (3.17)$$

Donde:

- V_i = volumen infiltrado (m³/s).
- Q_i = caudal de infiltración (m³/s).
- t = intervalo de tiempo (s).

3.16.7. Consideración metodológica sobre pruebas de extracción

El análisis desarrollado en este capítulo se orienta a la evaluación del comportamiento hidráulico del sistema bajo condiciones de recarga artificial mediante inyección controlada, considerando la interacción hidráulica entre el pozo de inyección y el acuífero receptor. En congruencia con este enfoque, el estudio no incorpora resultados derivados de pruebas de extracción o bombeo, tales como pruebas de bombeo

escalonado, abatimiento prolongado o recuperación, al corresponder estas a esquemas de evaluación del acuífero bajo condiciones de explotación. En consecuencia, el análisis se concentra exclusivamente en la respuesta del sistema ante la inyección controlada, reconociéndose la aplicación de pruebas de extracción como una alternativa técnica pertinente para trabajos futuros orientados a la caracterización complementaria del acuífero (Bouwer, 2002).

3.17. Procedimiento de dimensionamiento hidráulico por balance volumen-tiempo para un pozo de inyección profunda ($\Delta t = 5 \text{ min}$)

3.17.1. Propósito del procedimiento y fundamento físico

El dimensionamiento hidráulico de un pozo de inyección profunda que recibe aportaciones pluviales indirectas (por escurrimiento hacia una estructura de captación y conducción) debe verificar que, durante un evento de lluvia de diseño, el sistema pueda admitir el volumen de entrada generado por el escurrimiento superficial y evacuar parte de dicho volumen mediante inyección/infiltración hacia el medio geológico, sin producir rebase. Para ello se aplica un balance de masas discretizado en el tiempo, en el que el almacenamiento transitorio requerido dentro del pozo se obtiene como la diferencia acumulada entre el volumen afluente y el volumen inyectado/infiltrado. Este enfoque corresponde al método recomendado para pozos de absorción e inyección basado en tablas por intervalos (balance $V_a - V_i$).

En discretización temporal, el volumen almacenado requerido en el instante t_j se define como:

$$\Delta V_{\text{acumulado}} = V_{a\text{acumulado}} - V_{i\text{acumulado}} \quad (3.18)$$

y el criterio de suficiencia volumétrica del pozo es:

$$V_{\text{pozo}} \geq \max(\Delta V_{\text{acumulado}}) \quad (3.19)$$

donde V_{pozo} representa el volumen efectivo de almacenamiento disponible.

3.17.2. Datos de entrada para el cálculo (valores adoptados)

Para la aplicación del procedimiento se emplean los parámetros hidráulicos determinados con anterioridad, los cuales son:

- Intervalo de cálculo (Δt): $5 \text{ min} = \frac{5}{60} \text{ h} = 0.083333 \text{ h}$
- Coeficiente de escurrimiento (C): 0.9
- Área de captación (A): 450 m^2
- Conductividad hidráulica saturada / infiltración básica adoptada para diseño (I_b): 125.539 mm/h

3.17.3. Cálculo del área interior efectiva de inyección/infiltración A_i considerando área lateral y área de fondo

Para la verificación hidráulica del pozo de inyección profunda es necesario definir el área interior efectiva de inyección/infiltración, A_i , entendida como la superficie interna del pozo a través de la cual el agua puede transferirse hacia el medio geológico saturado. En un pozo de geometría cilíndrica, dicha superficie está constituida por el área lateral interna y el área de fondo, ambas consideradas hidráulicamente activas en este estudio. A continuación, se muestran una serie de pasos en donde se lleva a cabo el procedimiento para dicho valor.

1.- Como primer paso se debe definir la geometría del pozo, el diámetro interior presenta un valor de $D = 0.61 \text{ m}$, por lo que, haciendo la debida conversión, el radio interior tiene un valor de $r = \frac{D}{2} = \frac{0.61}{2} = 0.305 \text{ m}$.

2.- Se obtiene el valor del área del fondo del pozo, la cual se calcula como el área de un círculo de radio r .

$$A_{fondo} = \pi r^2 \quad (3. 20)$$

$$A_{fondo} = \pi(0.305)^2 = \pi(0.093025)$$

$$\boxed{A_{fondo} = 0.292 \text{ m}^2}$$

3.- El área lateral interna de un cilindro se expresa como en la ecuación (3. 21), donde h es la longitud hidráulicamente activa del pozo, es decir, la altura efectiva a través de la cual ocurre la inyección / infiltración.

$$A_{lateral} = 2\pi r h \quad (3. 21)$$

4.- Considerando tanto el área lateral como el área de fondo, la ecuación del área geométrica interna total queda como se muestra continuación:

$$A_{i,geom} = A_{lateral} + A_{fondo} = 2\pi r h + \pi r^2$$

5.- En condiciones reales de operación, no toda el área geométrica interna es completamente efectiva debido a procesos de colmatación, heterogeneidad del medio y pérdidas de eficiencia hidráulica. Por esta razón, en el presente estudio se trabaja directamente con un área interior efectiva de diseño, A_i , en el cual el factor de seguridad de 2 ya se encuentra incorporado dentro del propio parámetro geométrico. El valor adoptado es:

$$\boxed{A_i = 766.19 \text{ m}^2}$$

Este valor es el que se emplea directamente en el cálculo del volumen inyectado por intervalo, sin aplicar factores reductores adicionales sobre la conductividad hidráulica.

6.- Con el fin de determinar la longitud hidráulicamente activa equivalente, h_{ef} , se despeja dicha variable a partir de la expresión del área geométrica, considerando el valor adoptado de A_i . A continuación, se presenta la ecuación correspondiente, el desarrollo algebraico del despeje y la sustitución de valores empleada para obtener el resultado final.

$$A_i = 2\pi r h_{ef} + \pi r^2 \quad (3. 22)$$

$$h_{ef} = \frac{A_i - \pi r^2}{2\pi r}$$

$$h_{ef} = \frac{766.19 - 0.292}{2\pi(0.305)}$$

$$2\pi(0.305) = 1.916 \text{ m}$$

$$h_{ef} = \frac{765.898}{1.916} = 399.6 \text{ m}$$

Redondeando: $\boxed{h_{ef} = 400 \text{ m}}$

7.- Interpretación técnica: el valor adoptado de $A_i = 766.19 \text{ m}^2$ equivale, en términos hidráulicos, a considerar aproximadamente 400 m de longitud efectiva de inyección, para un pozo de 0.61 m de diámetro, incluyendo explícitamente la contribución del área de fondo y con el factor de seguridad incorporado directamente en el área efectiva. Esta formulación garantiza coherencia física en el balance volumen–tiempo y evita la doble penalización del sistema hidráulico.

3.17.4. Capacidad de almacenamiento del pozo

Para la verificación hidráulica mediante balance volumen–tiempo se requiere el volumen efectivo del pozo, V_{pozo} , entendido como la capacidad de almacenamiento transitorio disponible para amortiguar el desfase entre el volumen afluente por escurrimiento superficial y el volumen evacuado por inyección hacia el medio geológico. En un pozo de inyección, el volumen considerado corresponde al espacio interno ocupado por agua libre (cámara hidráulica), por lo que no se trata de un volumen almacenado en una matriz granular o rocosa; en consecuencia, el parámetro que en ocasiones se denomina “porosidad” debe interpretarse estrictamente como fracción de volumen útil disponible del espacio interno del pozo. A continuación, se muestran los pasos necesarios para calcular la capacidad de almacenamiento del pozo.

1.- Es importante mencionar que, bajo la idealización cilíndrica, el volumen geométrico del tramo hidráulicamente útil del pozo se calcula como en la ecuación (3. 23). Donde r es el radio interior del pozo y H es la altura/longitud hidráulicamente útil considerada para almacenamiento.

$$V_{geom} = A_{sección} H = \pi r^2 H \quad (3.23)$$

Tomando en cuenta esta ecuación, el área de la sección transversal se desglosa de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} A_{sección} &= \pi r^2 \\ A_{sección} &= \pi (0.305)^2 = \pi (0.093025) \\ A_{sección} &= 0.292 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Considerando este resultado del área de la sección, se sustituye en valor en la ecuación, y queda de la siguiente manera:

$$V_{geom} = 0.292 H$$

Sin embargo, aún existen dos datos sin valor en la ecuación, pero de acuerdo a este estudio, se cuenta con el volumen adoptado para la verificación hidráulica, el cual tiene un valor de:

$$V_{pozo} = 233.491 \text{ m}^3$$

Lo cual, en forma equivalente, y sustituyendo los valores previamente calculados, la altura útil asociada a ese volumen se presenta a continuación, valor el cual es equivalente al volumen geométrico considerado en el balance.

$$\begin{aligned} H &= \frac{V_{pozo}}{\pi r^2} \\ H &= \frac{233.491}{0.292} \\ H &= 799.6 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\text{Redondeado a: } H = 800 \text{ m}$$

2.- A continuación, se define el volumen efectivo, el cual se expresa de forma general como se presenta en la siguiente ecuación.

$$V_{ef} = n V_{geom} \quad (3.24)$$

Donde n representa la fracción del volumen geométrico que es realmente utilizable para almacenar agua. En medios porosos (suelos o rellenos granulares), n se interpreta como porosidad; sin embargo, en el presente caso se trata de un pozo de inyección operando como cámara de almacenamiento de agua libre, por lo que n debe entenderse como coeficiente de volumen útil (fracción de vacíos disponibles del espacio interno del pozo), no como porosidad de un material.

Bajo el supuesto adoptado de que el tramo de almacenamiento está constituido por agua libre, sin rellenos granulares que reduzcan la capacidad volumétrica interna (y considerando que el volumen utilizado corresponde al volumen hidráulicamente útil delimitado por los niveles operativos), se adopta:

$$\boxed{n = 1.0}$$

Sustituyendo este valor en la ecuación (3.24), se obtiene la siguiente igualdad.

$$V_{ef} = 1.0 \cdot V_{geom} = V_{geom}$$

Lo cual implica que el volumen efectivo coincide con el volumen geométrico del espacio de almacenamiento considerado, valor el cual fue calculado anteriormente en el paso 1.

$$\boxed{V_{ef} = V_{geom} = 233.491 \text{ m}^3}$$

3.17.5. Estimación del nivel estático y del volumen disponible en el pozo de inyección

En pozos profundos que atraviesan múltiples unidades acuíferas, el nivel estático observado en condiciones de reposo no corresponde necesariamente a la carga hidráulica de una sola unidad, sino que tiende a un valor equivalente controlado por la transmisividad relativa de las unidades hidráulicamente conectadas al intervalo abierto del pozo (Konikow et al., 2009). Este comportamiento ha sido ampliamente documentado

en la hidráulica de pozos largos y multicapa, así como en los esquemas de representación de pozos multinodo en modelos de flujo subterráneo (Driscoll, 1986).

Con base en lo anterior, el nivel estático previo se estima mediante un promedio ponderado por transmisividad, lo que permite evaluar el llenado previo del pozo antes de los eventos de precipitación y, por consiguiente, el volumen disponible previo para almacenamiento transitorio durante el evento pluvial (Paillet, 1998). A continuación, se muestran los pasos para la estimación del nivel estático y del volumen.

1.- Estimación de la altura representativa del acuífero somero, h_1 . A partir de la Tabla 7. Índices de confianza, se toman las medidas de los niveles registrados en los 4 piezómetros someros, $n = 4$, los cuales se muestran a continuación.

- $h_{p1} = 625.167$ msnm
- $h_{p2} = 625.017$ msnm
- $h_{p3} = 620.946$ msnm
- $h_{p4} = 612.897$ msnm

Para obtener el valor de la carga hidráulica representativa del acuífero somero, se debe sacar el promedio de los valores registrados.

$$h_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_{p_i} \quad (3. 25)$$

$$\sum h_{p_i} = 625.167 + 625.017 + 620.946 + 612.897 = 2,484.027 \text{ msnm}$$

$$h_1 = \frac{2,484.027}{4} = 621.00675 \text{ msnm}$$

$$\text{Redondeando: } \boxed{h_1 = 621.007 \text{ msnm}}$$

2.- Obtención de los datos hidrogeológicos y geométricos del pozo. Para esto, se calculan las unidades del acuífero somero y del acuífero profundo los cuales dieron los siguientes resultados.

Acuífero somero

Tabla 33. Datos del acuífero somero.

Nota: Elaboración propia con Microsoft Excel.

Acuífero somero	
Espesor del estrato (m)	Permeabilidad (m/d)
20	0
90	10

La transmisibilidad promedio (T) del acuífero somero se determinó a partir de la permeabilidad y el espesor de cada estrato, considerando un promedio ponderado respecto al espesor total del acuífero. Primero, se multiplica el espesor de cada estrato por su respectiva permeabilidad.

- Estrato 1: $20 \times 0 = 0$
- Estrato 2: $90 \times 10 = 900$

Posteriormente, se suman los productos obtenidos, lo cual da el valor de la transmisibilidad, como se muestra continuación.

$$T_1 = 0 + 900$$

$$T_1 = 900$$

Acuífero profundo

Tabla 34. Datos del acuífero profundo.

Nota: Elaboración propia con Microsoft Excel.

Acuífero profundo	
Espesor del estrato (m)	Permeabilidad (m/d)
20	10
30	10
100	10
55	0.1

Siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente, pero ahora para el acuífero profundo, el valor de transmisibilidad promedio es de:

$$T_2 = 1505.5 \text{ m}^2/\text{d}.$$

Tomando en cuenta lo anterior, la carga hidráulica del acuífero profundo, tiene un valor de:

$$h_2 = 410 \text{ msnm}$$

A continuación, se muestran los valores de la geometría del pozo.

- Elevación del brocal (z_b): 628 msnm
- Profundidad total (H): 800 m
- Diámetro interior (D): 24 pulg = 0.6096 m

3.- Para el cálculo del nivel estático equivalente en el pozo, se utilizó la ecuación (3. 26) ya que es consistente con la hidráulica de pozos multicapa y con la dominancia de unidades de mayor transmisividad (Konikow et al., 2009). A continuación, se muestra el procedimiento llevado a cabo.

$$h_w = \frac{T_1 h_1 + T_2 h_2}{T_1 + T_2} \quad (3. 26)$$

$$h_w = \frac{(900)(621.007) + 1505.5(410)}{900 + 1505.5}$$

$$h_w = \frac{264,629.55}{631.86}$$

$$\boxed{h_w = 488.947 \text{ msnm}}$$

Convirtiéndolo a profundidad al nivel estático:

$$D_{NE} = z_b - h_w$$

$$D_{NE} = 628 - 488.947$$

$$\boxed{D_{NE} = 139.053 \text{ m}}$$

4.- En este paso se calculan todos los volúmenes.

El área de la sección interna del pozo se calcula de la siguiente manera.

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$
$$A = \frac{\pi(0.6096)^2}{4}$$
$$\boxed{A = 0.291864 \text{ m}^2}$$

Posteriormente se muestra el procedimiento para obtener el volumen disponible previo.

$$V_{\text{disp},0} = A D_{NE}$$
$$V_{\text{disp},0} = 0.291864(139.053)$$
$$\boxed{V_{\text{disp},0} = 40.585 \text{ m}^3}$$

Adicional a ello, se calcula el volumen de agua previo con el siguiente procedimiento.

$$H_{\text{col}} = H - D_{NE}$$
$$H_{\text{col}} = 800 - 139.053$$
$$H_{\text{col}} = 660.947 \text{ m}$$
$$V_{\text{previo}} = A H_{\text{col}}$$
$$V_{\text{previo}} = 0.291864(660.947)$$
$$V_{\text{previo}} = 192.907 \text{ m}^3$$

Y finalmente, se hace una verificación volumétrica para confirmar la consistencia del balance.

$$V_{\text{tot}} = A H$$
$$V_{\text{tot}} = 0.291864(800)$$
$$V_{\text{tot}} = 233.491 \text{ m}^3$$
$$V_{\text{disp},0} + V_{\text{previo}} = 40.585 + 192.907$$
$$V_{\text{disp},0} + V_{\text{previo}} = 233.491 \text{ m}^3$$

5.- Interpretación técnica: el valor de h_w obtenido demuestra que el nivel estático previo del pozo queda predominantemente controlado por el acuífero profundo, debido a su mayor transmisividad relativa. Aun cuando el pozo no se encuentre completamente vacío antes del evento de lluvia, conserva un volumen disponible previo del orden de 40.585 m³, el cual puede reducirse de forma conservadora mediante la aplicación de un factor de seguridad, considerando procesos físicos, químicos y biológicos que afectan la operación a largo plazo (Bouwer, 2002).

3.17.6. Preparación del pluviograma a 5 min

El evento de lluvia se representa mediante una serie discreta de precipitaciones incrementales ΔP_j (mm) para cada intervalo de 5 minutos. A partir de ΔP_j puede reportarse la intensidad media del intervalo:

$$I_t = \frac{\Delta P_j}{\Delta t} \quad (3. 27)$$

y como $\Delta t = 0.083333$ h, resulta:

$$I_t = 12\Delta P_j$$

Esta relación es útil para documentar el pluviograma en términos de intensidades, aunque el cálculo volumétrico puede realizarse directamente con ΔP_j , lo cual reduce error numérico por redondeo.

3.17.7. Cálculo del volumen afluente por intervalo $V_{a,j}$

El volumen afluente $V_{a,j}$ corresponde al volumen que llega al pozo (o al sistema de alimentación del pozo) durante un intervalo, generado por escurrimiento superficial de la lluvia en el área de captación. La forma general del método (en términos de intensidad) es:

$$V_a = \frac{C A I_t \Delta t}{1000} \quad (3. 28)$$

Como $I_t \Delta t = \Delta P_j$ (mm), $C = 0.9$ y $A = 450 \text{ m}^2$, se utiliza la forma equivalente directa y se sustituyen los valores:

$$V_a = \frac{C A \Delta P_j}{1000}$$

$$V_a = \frac{(0.9)(450)\Delta P_j}{1000}$$

El factor constante queda de la siguiente manera.

$$\boxed{V_a = 0.405 \Delta P_j}$$

$$(\Delta P_j \text{ en mm}, V_{a,j} \text{ en m}^3)$$

Posteriormente se sustituye el valor de P_j para obtener el volumen afluente, a continuación, se muestran ejemplo de trazabilidad numérica para el primer intervalo. Es importante mencionar que este cálculo se repite para cada intervalo de la serie ΔP_j , obteniendo así la columna completa de volúmenes afluentes.

si $\Delta P_1 = 78.088 \text{ mm}$, entonces:

$$V_{a,1} = 0.405(78.088)$$

$$V_{a,1} = 31.625 \text{ m}^3$$

3.17.8. Cálculo del volumen inyectado/infiltrado por intervalo V_i

El volumen inyectado/infiltrado V_i es el volumen evacuado desde el interior del pozo hacia el medio geológico durante el intervalo. La formulación adoptada en el método establece:

$$V_i = \frac{A_i I_b \Delta t}{1000} \quad (3. 29)$$

Con A_i , I_b y Δt constantes, V_i resulta constante para todos los intervalos, lo cual representa una hipótesis operativa de diseño asociada al uso de conductividad hidráulica

saturada adoptada. A continuación, se muestra el desglose de la fórmula sustituyendo los valores:

$$V_i = \frac{(766.19)(125.539)(0.083333)}{1000}$$

Por tanto, para cada intervalo de 5 min:

$$V_i = 8.015 \text{ m}^3$$

Este valor representa la capacidad de desalojo por inyección/infiltración del sistema durante cada intervalo. En eventos con intensidades altas, típicamente $V_{a,j} > V_{i,j}$, por lo que se genera almacenamiento transitorio; cuando la intensidad decrece, $V_{a,j}$ puede caer por debajo de $V_{i,j}$ y el pozo entra en fase de recuperación (descenso del almacenamiento).

3.17.9. Construcción de acumulados y almacenamiento transitorio

Definidos los volúmenes por intervalo, se construyen las series acumuladas:

$$V_{a\text{acumulado}} = V_{a\text{acumulado}-1} + V_a$$

$$V_{i\text{acumulado}} = V_{i\text{acumulado}-1} + V_i$$

con condición inicial:

$$V_{a\text{acumulado}} = 0, \quad V_{i\text{acumulado}} = 0$$

La diferencia acumulada se calcula como:

$$\Delta V_{\text{acumulado}} = V_{a\text{acumulado}} - V_{i\text{acumulado}} \quad (3.30)$$

A continuación, se muestran dos criterios operativos que son importantes a tomar en cuenta para el correcto entendimiento de las ecuaciones previas.

- Si $V_a - V_i > 0$, el pozo tiende a llenarse (aumenta $\Delta V_{\text{acumulado}}$).
- Si $V_a - V_i < 0$, el pozo tiende a vaciarse (disminuye ΔV_{acum}).

El máximo de $\Delta V_{\text{acumulado}}$ en el evento representa el almacenamiento máximo exigido.

Para ilustrar el algoritmo de acumulación:

- Intervalo 1 (0–5 min)

$$V_{a,1} = 31.626, \quad V_i = 8.016$$

$$V_{a\text{acumulado}1} = 31.626, \quad V_{i,\text{acum},1} = 8.016$$

$$\Delta V_{\text{acumulado}1} = 31.626 - 8.016$$

$$\Delta V_{\text{acumulado}1} = 23.610 \text{ m}^3$$

- Intervalo 2 (5–10 min) (si $\Delta P_2 = 92.862 \text{ mm} \Rightarrow V_{a,2} = 107.676$)

$$V_{a,\text{acum},2} = 31.626 + 18.805 = 50.430$$

$$V_{i,\text{acum},2} = 8.016 + 8.016 = 16.032$$

$$\Delta V_{\text{acum},2} = 50.430 - 16.032 = 34.398 \text{ m}^3$$

La misma lógica se aplica sucesivamente a todos los intervalos del evento.

3.17.10. Identificación del volumen máximo requerido y verificación del pozo

Una vez completada la tabla, se determina el volumen máximo exigido por el evento:

$$\Delta V_{\text{max}} = \max(\Delta V_{\text{acumulado}}) \quad (3. 31)$$

En su serie de cálculo, el máximo observado de la diferencia acumulada es aproximadamente:

$$\Delta V_{\text{max}} = 45.099 \text{ m}^3$$

Posteriormente, se compara contra la capacidad efectiva del pozo para obtener el criterio de cumplimiento y el margen volumétrico

$$V_{\text{pozo}} = 40.585 \text{ m}^3$$

$$40.585 \geq 45.099$$

$$40.585 - 45.099 = -4.514 \text{ m}^3$$

3.18. Conclusión hidráulica del sistema de inyección profunda

Bajo los parámetros adoptados y la discretización de 5 min, el pozo cumple el evento analizado con ligero rebase de margen volumétrico del orden de -4.514 m^3 .

Con el propósito de mejorar la claridad y facilitar la visualización de los resultados derivados del procedimiento de verificación hidráulica mediante balance volumen–tiempo, se incorpora como anexo la tabla correspondiente al desarrollo numérico del análisis.

En dicha tabla se presenta de manera ordenada y secuencial la información asociada a cada intervalo de cálculo, incluyendo los volúmenes afluentes, los volúmenes inyectados, sus acumulados y la diferencia acumulada que representa el almacenamiento transitorio requerido. La inclusión de este anexo permite verificar la trazabilidad de los cálculos y sustenta de forma transparente la identificación del volumen máximo requerido para la verificación hidráulica del pozo. La siguiente tabla resume los resultados obtenidos para el intervalo de 0 a 120 minutos.

Cabe destacar que el comportamiento observado durante el análisis refleja una adecuada correspondencia entre la capacidad de infiltración del pozo y los volúmenes afluentes generados durante el evento de diseño, lo cual indica que el sistema propuesto presenta un desempeño hidráulico consistente bajo las condiciones evaluadas. El ligero rebase identificado se mantiene dentro de un rango controlado, lo que confirma la estabilidad del balance volumen–tiempo y la confiabilidad del modelo aplicado. Asimismo, este tipo de evaluación permite comprender de manera más precisa la

respuesta del sistema ante eventos de precipitación, aportando información clave para sustentar el funcionamiento hidráulico del pozo dentro del contexto del estudio.

Tabla 35. Resultados de tiempo de llenado recarga pluvial.

Nota: Elaboración propia con Microsoft Excel.

Tiempo	Intervalo	Precipitación	Intensidad	Infiltración	Va	Vi	Va acumulado	Vi acumulado	va acumulado - vi acumulado	Margen
min	min	mm	mm/hr	mm/hr	m3	m3	m3	m3	m3	m3
0	0	0.000	0.000	125.539	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	40.585
5	5	78.088	937.053	125.539	31.626	8.016	31.626	8.016	23.610	16.975
10	5	92.862	557.175	125.539	18.805	8.016	50.430	16.031	34.399	6.186
15	5	102.769	411.077	125.539	13.874	8.016	64.304	24.047	40.257	0.328
20	5	110.433	331.298	125.539	11.181	8.016	75.485	32.062	43.423	-2.838
25	5	116.768	280.244	125.539	9.458	8.016	84.944	40.078	44.866	-4.281
30	5	122.214	244.428	125.539	8.249	8.016	93.193	48.094	45.099	-4.514
35	5	127.016	217.741	125.539	7.349	8.016	100.542	56.109	44.433	-3.848
40	5	131.327	196.991	125.539	6.648	8.016	107.190	64.125	43.065	-2.480
45	5	135.252	180.336	125.539	6.086	8.016	113.277	72.140	41.136	-0.551
50	5	138.862	166.634	125.539	5.624	8.016	118.900	80.156	38.744	1.841
55	5	142.210	155.138	125.539	5.236	8.016	124.136	88.172	35.965	4.620
60	5	145.338	145.338	125.539	4.905	8.016	129.042	96.187	32.854	7.731
65	5	148.275	136.869	125.539	4.619	8.016	133.661	104.203	29.458	11.127
70	5	151.048	129.470	125.539	4.370	8.016	138.030	112.218	25.812	14.773
75	5	153.676	122.941	125.539	4.149	8.016	142.180	120.234	21.946	18.639
80	5	156.175	117.132	125.539	3.953	8.016	146.133	128.250	17.883	22.702
85	5	158.560	111.925	125.539	3.777	8.016	149.910	136.265	13.645	26.940
90	5	160.843	107.228	125.539	3.619	8.016	153.529	144.281	9.249	31.336
95	5	163.031	102.967	125.539	3.475	8.016	157.004	152.296	4.708	35.877
100	5	165.135	99.081	125.539	3.344	8.016	160.348	160.312	0.036	40.549
105	5	167.162	95.521	125.539	3.224	8.016	163.572	168.328	-4.755	45.340
110	5	169.117	92.246	125.539	3.113	8.016	166.686	176.343	-9.658	50.243
115	5	171.007	89.221	125.539	3.011	8.016	169.697	184.359	-14.662	55.247
120	5	172.837	86.418	125.539	2.917	8.016	172.613	192.374	-19.761	60.346

3.19. Distribución temporal de la precipitación de diseño y del escurrimiento superficial

3.19.1. Hidrograma unitario

El hidrograma unitario es una herramienta comúnmente utilizada en la hidrología para mostrar la forma en que responde el escurrimiento superficial a partir de un evento de precipitación sobre un área de aportación. Utilizarlo permite describir la variación del caudal en función del tiempo, lo cual es esencial para analizar hidrológicamente una zona, y para el dimensionamiento de las obras de conducción asociadas al sistema de aprovechamiento de agua pluvial (USDA-NRCS, 1986).

Para fines de esta investigación, se utilizó un hidrograma unitario, el cual se define mediante las relaciones de tiempo T/T_p y gasto Q/Q_p . A partir de ellas, se obtuvieron los valores reales de tiempo y caudal mediante el tiempo pico y el gasto máximo, conservando la forma característica del hidrograma y adaptándola a las condiciones hidráulicas del sistema (USACE, 2021).

El gasto máximo empleado para la elaboración del hidrograma corresponde al evento de diseño con un periodo de retorno de 50 años, el cual se obtuvo en los cálculos anteriores y presenta un valor de 0.105 m³/s, el cual se convierte a 105 L/s para lograr llevar a cabo los cálculos correspondientes.

Adicional a ello, el tiempo de concentración calculado es de 1.369 min, lo cual nos señala una respuesta hidráulica rápida ante eventos de precipitación. Para fines del desarrollo del hidrograma y los cálculos se utilizó un valor de 5 min, esto se decidió bajo un criterio de seguridad hidráulica, con el propósito de evitar la generación de picos de gasto excesivamente abruptos y conservadores.

Este valor permite incorporar un margen de seguridad en la estimación del escurrimiento superficial, favoreciendo una representación más estable del hidrograma y una mejor evaluación del comportamiento hidráulico hacia el pozo de reabastecimiento. Es un criterio comúnmente utilizado en estudios hidrológicos y de drenaje pluvial, específicamente donde los tiempos característicos calculados suelen ser muy cortos y sensibles a la discretización temporal del análisis (Federal Highway Administration, 2024).

Posteriormente, se determinó el tiempo pico, el cual es el instante en que el hidrograma alcanza su gasto máximo, para calcularlo se empleó la siguiente ecuación:

$$T_p = \sqrt{T_c} + 0.6 T_c \quad (3.32)$$

Donde T_c corresponde al tiempo de concentración adoptado para el sistema. Esta formulación considera tanto el efecto del retardo inicial del escurrimiento, representado por la raíz cuadrada del tiempo de concentración, como el tiempo adicional asociado a la propagación del flujo superficial, expresado mediante el término proporcional a T_c . A

partir del valor adoptado de $T_c = 5$ minutos, se obtuvo el tiempo al pico correspondiente, el cual se utilizó para escalar las ordenadas adimensionales del hidrograma unitario y definir correctamente la posición temporal del gasto máximo en el análisis del escurrimiento superficial.

En la siguiente tabla se muestran los datos empleados para la construcción del hidrograma unitario, adicional a ello, se muestra la tabla del procedimiento correspondiente al cálculo del volumen incremental de escurrimiento, y finalmente, se muestra el hidrograma unitario resultante, el cual representa la respuesta temporal del escurrimiento superficial generado en el sistema de captación para un evento con un periodo de retorno de 50 años.

Tabla 36. Datos generales para el hidrograma unitario.

Nota. Elaboración propia con Microsoft Excel.

Datos Generales	
Qp (L/s)	105
Tc (min)	5.000
Tp (min)	5.236

Tabla 37. Cálculos para la generación del hidrograma unitario.

Nota. Elaboración propia con Microsoft Excel.

Hidrograma Unitario				
T/Tp	Q/Qp	T(min)	Q(L/s)	V (m3)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.18	0.10	0.94	10.50	0.59
0.30	0.21	1.57	22.05	2.08
0.37	0.29	1.94	30.45	3.54
0.47	0.40	2.46	42.00	6.20
0.55	0.50	2.88	52.50	9.07
0.60	0.57	3.14	59.85	11.28
0.70	0.72	3.67	75.60	16.63
0.75	0.79	3.93	82.95	19.54
0.80	0.87	4.19	91.35	22.96
1.00	1.00	5.24	105.00	32.99
1.22	0.91	6.39	95.55	36.62
1.38	0.80	7.23	84.00	36.42
1.50	0.70	7.85	73.50	34.64
1.58	0.60	8.27	63.00	31.27

1.68	0.50	8.80	52.50	27.71
1.82	0.40	9.53	42.00	24.01
2.03	0.30	10.63	31.50	20.09
2.28	0.20	11.94	21.00	15.04
2.78	0.10	14.56	10.50	9.17
3.00	0.08	15.71	8.40	7.92
4.00	0.02	20.94	2.10	2.64
5.00	0.00	26.18	0.00	0.00

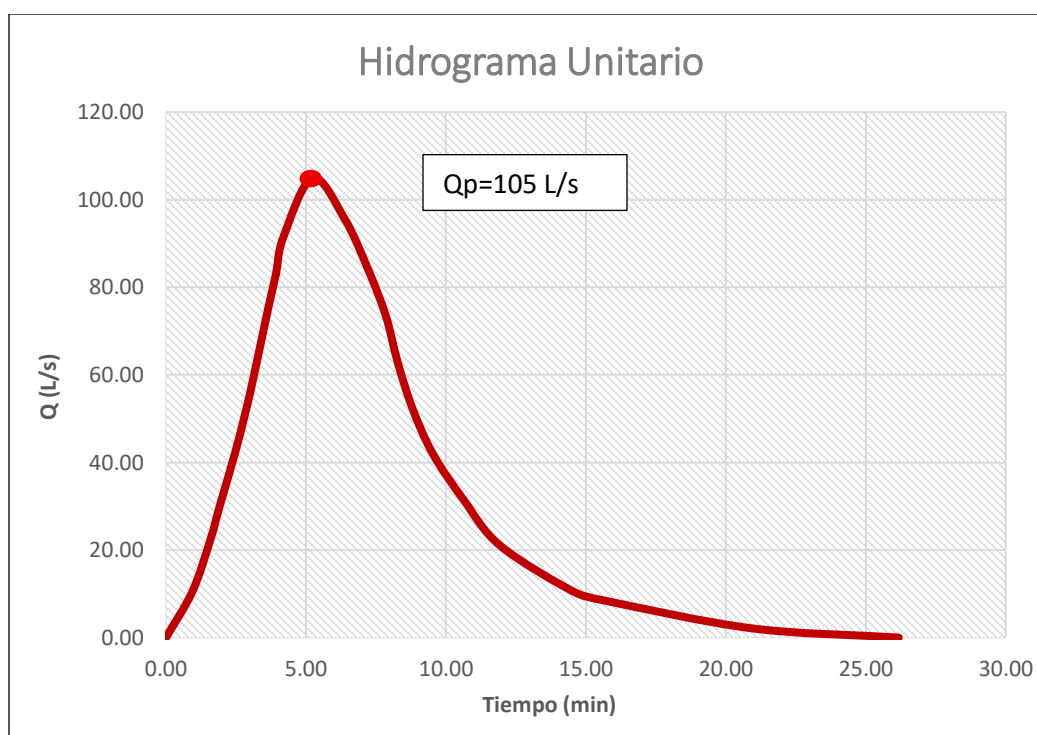


Figura 44. Hidrograma unitario.

Nota. Elaboración propia con Microsoft Excel.

Los resultados del hidrograma unitario obtenidos a partir de los datos presentados con anterioridad, muestran una respuesta hidrológica rápida del área de estudio. El caudal pico unitario (Q_p) alcanza 105 L/s, con un tiempo al pico (T_p) de 5.24 minutos, valor consistente con el tiempo de concentración (T_c) estimado en 5.000 minutos. Esta relación confirma que el escurrimiento superficial se concentra en intervalos cortos de tiempo, condición compatible con la fisiografía, la pendiente y la eficiencia del sistema de drenaje superficial del sitio.

El hidrograma presenta una fase ascendente pronunciada y una recesión progresiva, lo que indica la presencia de almacenamiento temporal durante el evento, asociado a retención superficial e infiltración inicial. Este comportamiento es hidráulicamente coherente con los parámetros adoptados para la generación del hidrograma unitario.

El parámetro de interés para el diseño del sistema de recarga artificial es el volumen total generado por el evento, el cual se determina mediante la suma de los volúmenes parciales calculados para cada intervalo de tiempo. La suma de los valores de la columna V (m^3) representa el volumen total de escurrimiento captado, que, bajo el supuesto de conducción e inyección completas, corresponde al volumen total de agua a infiltrar en el acuífero. El volumen total obtenido es:

$$\Sigma V = 370.41 \text{ m}^3$$

Lo cual es equivalente a aproximadamente 3.7041×10^5 litros. Este volumen constituye el volumen de diseño para la infiltración, y su magnitud debe compararse directamente con la capacidad efectiva de almacenamiento del pozo y con la capacidad de admisión hidráulica del sistema, a fin de verificar que el evento puede ser manejado sin desbordamientos ni limitaciones operativas.

El hidrograma unitario desarrollado permite, por un lado, caracterizar la distribución temporal de los caudales y, por otro, definir de manera cuantitativa el volumen total a infiltrar, el cual se utiliza como base para los análisis de balance volumen–tiempo, el dimensionamiento hidráulico del pozo de inyección profunda y la evaluación del desempeño del sistema de recarga artificial mediante precipitación.

3.19.2. Hietograma Método del Bloque Alterno

Se le conoce como Método de Bloque Alterno a una técnica que es ampliamente utilizada en la hidrología para la elaboración de hietogramas de precipitación a partir de curvas I-D-TR y HP-D-TR. El objetivo de este método es representar de forma sintética la distribución de la precipitación durante un evento extremo, en donde se asegure la coherencia con la intensidad máxima asociada a un respectivo periodo de retorno (Chow et al., 1998).

Se fundamenta principalmente en el supuesto de que la mayor intensidad de precipitación toma lugar cerca del pico del centro de la tormenta, lo cual tiene relación con el comportamiento típico de precipitaciones intensas y eventos de alta gravedad y de corta duración (Viessman et al., 1989). Para su implementación, se debe definir una duración total de tormenta y dividirla en intervalos de tiempo de la misma longitud. Posteriormente, con las curvas I-D-TR se calculan las intensidades de cada duración acumulada, para después transformarlas en incrementos de precipitación para cada intervalo de tiempo.

La originalidad del método reside en la disposición temporal de los incrementos. El bloque con mayor intensidad de precipitación se coloca en el centro del hietograma, mientras que los bloques adyacentes se distribuyen de manera alternada hacia ambos lados del centro, en donde se asignan las intensidades decrecientes antes y después del máximo.

Esta configuración hace un patrón temporal simétrico o cuasi-simétrico, el cual se considera conservador para fines de diseño, ya que concentra los volúmenes más altos de precipitación durante el periodo más crítico del evento de lluvia (Chow et al., 1998). Como resultado se obtiene un hietograma el cual es comúnmente utilizado como apoyo en modelos de lluvia-escorrentía, y, que es de gran ayuda en el diseño hidráulico y manejo de aguas (Viessman et al., 1989).

La aplicación de este método permite obtener una representación más realista del comportamiento temporal de la lluvia, facilitando la simulación de escenarios críticos en el análisis hidrológico. De esta manera, el hietograma generado se convierte en una herramienta clave para evaluar la respuesta del sistema ante eventos intensos, permitiendo estimar con mayor precisión los volúmenes de escurrimiento y apoyar la toma de decisiones en el diseño y dimensionamiento de obras hidráulicas.

En la siguiente tabla se muestran los cálculos para el hietograma de precipitación correspondiente a los resultados de un periodo de retorno de 50 años, calculados mediante el Método del Bloque Alterno. En este se presenta la distribución temporal de la intensidad y la precipitación acumulada e incremental, organizada en intervalos de tiempo de cinco minutos, lo que permite representar de manera conservadora el

comportamiento del evento pluvial de diseño y sirve como insumo para los análisis hidrológicos posteriores.

Tabla 38. Método de Bloque Alterno, hietograma de precipitación para un periodo de retorno de 50 años.

Nota: Elaboración propia con Microsoft Excel.

Hietograma de Precipitación TR = 50 años					
Método Bloque Alterno					
Duración (min)	Intensidad (mm/hr)	Profundidad Acumulada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Tiempo (min)	Precipitación (mm)
5	937.05	78.09	78.09	0-5	1.83
10	557.17	92.86	14.77	5-10	1.96
15	411.08	102.77	9.91	10-15	2.10
20	331.30	110.43	7.66	15-20	2.28
25	280.24	116.77	6.34	20-25	2.50
30	244.43	122.21	5.45	25-30	2.77
35	217.74	127.02	4.80	30-35	3.13
40	196.99	131.33	4.31	35-40	3.61
45	180.34	135.25	3.92	40-45	4.31
50	166.63	138.86	3.61	45-50	5.45
55	155.14	142.21	3.35	50-55	7.66
60	145.34	145.34	3.13	55-60	14.77
65	136.87	148.28	2.94	60-65	78.09
70	129.47	151.05	2.77	65-70	9.91
75	122.94	153.68	2.63	70-75	6.34
80	117.13	156.18	2.50	75-80	4.80
85	111.93	158.56	2.39	80-85	3.92
90	107.23	160.84	2.28	85-90	3.35
95	102.97	163.03	2.19	90-95	2.94
100	99.08	165.14	2.10	95-100	2.63
105	95.52	167.16	2.03	100-105	2.39
110	92.25	169.12	1.96	105-110	2.19
115	89.22	171.01	1.89	110-115	2.03
120	86.42	172.84	1.83	115-120	1.89

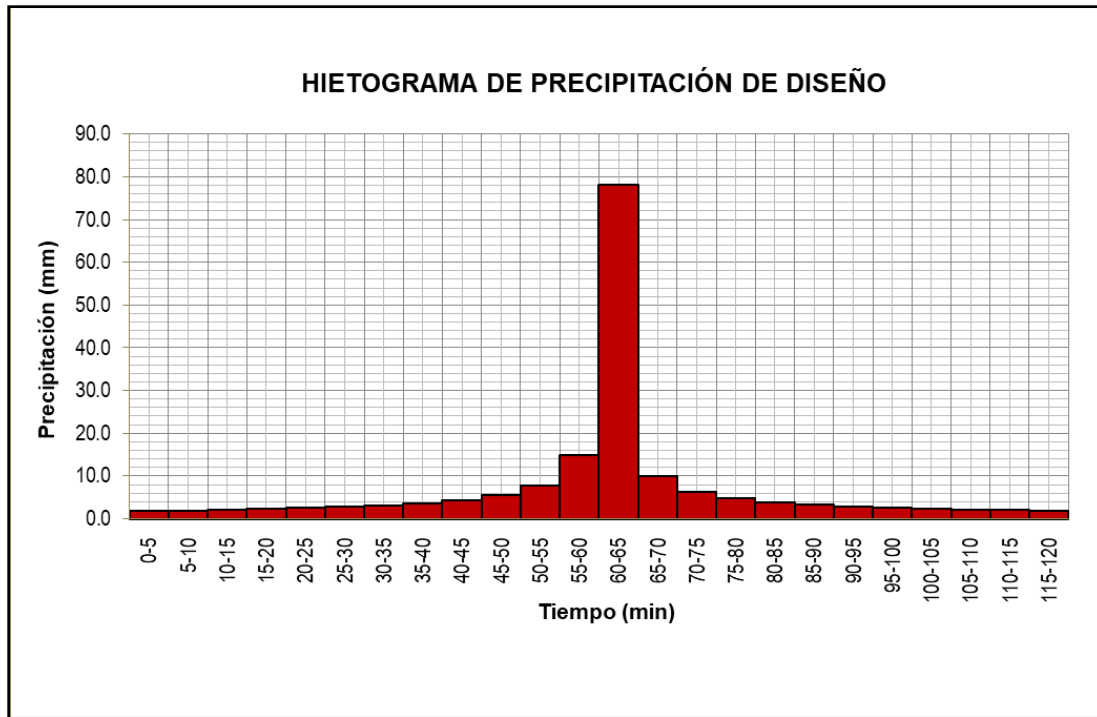


Figura 45. Hietograma de precipitación de diseño para TR=50 años.

Nota. Elaboración propia con Microsoft Excel.

El hietograma de precipitación de diseño obtenido mediante el método del bloque alterno, para un periodo de retorno de 50 años, permite representar la distribución temporal de la lluvia de diseño de manera consistente con los criterios hidrológicos adoptados. La precipitación total del evento alcanza un valor acumulado de 172.84 mm, distribuida en un intervalo total de 120 minutos, con incrementos temporales de 5 minutos.

La mayor intensidad de precipitación se concentra en el intervalo central del evento, específicamente entre los 60 y 65 minutos, donde se registra una precipitación incremental máxima de 78.09 mm, correspondiente al bloque de mayor intensidad. Esta disposición responde al principio fundamental del método del bloque alterno, en el cual el bloque de máxima intensidad se coloca en la posición central del hietograma, generando una condición hidrológica crítica para fines de diseño.

La distribución progresiva de los bloques de precipitación antes y después del pico central da lugar a un patrón simétrico de incremento y decremento de la lluvia, lo que permite representar adecuadamente tanto la fase de acumulación inicial como la

disipación gradual del evento. Este esquema resulta coherente con la evolución temporal esperada de tormentas intensas de corta duración y alta magnitud, características del escenario de diseño considerado.

El hietograma generado constituye la base para la transformación lluvia–escurrimiento, al definir con precisión la entrada hidrológica temporal que alimenta el cálculo del hidrograma unitario y los análisis posteriores de escurrimiento superficial, así como el dimensionamiento del sistema de captación y conducción hacia el pozo de inyección.

3.20. Análisis y discusión de los resultados según objetivos

Los resultados presentados a lo largo del Capítulo 3 se organizaron con base en los objetivos planteados en la investigación, permitiendo describir el comportamiento del sistema analizado a partir de la información generada durante las distintas etapas de caracterización. Los estudios geodésicos, geológicos, geofísicos, topográficos, hidrológicos, hidráulicos, geotécnicos y de monitoreo piezométrico conforman el marco técnico que da sustento a los resultados expuestos.

La referenciación espacial permitió definir con precisión la localización del área de estudio y del sitio seleccionado para la perforación del pozo, manteniendo consistencia geométrica entre los levantamientos topográficos, los estudios geofísicos y el diseño del sistema de captación y conducción. Esta base espacial facilitó la integración de la información generada en las diferentes escalas de análisis consideradas.

Los resultados fisiográficos y topográficos describen las condiciones del terreno en términos de pendientes, direcciones preferenciales de escurrimiento y configuración de la subcuenca. Esta información sirvió para contextualizar el análisis hidrológico desarrollado posteriormente y para describir la dinámica del escurrimiento superficial asociada a las áreas de captación pluvial definidas.

La caracterización geológica e hidrogeológica permitió describir las unidades litológicas presentes, su distribución espacial y su relación con los acuíferos somero y profundo. La identificación de estructuras geológicas y la definición de la trayectoria del flujo subterráneo proporcionaron un marco conceptual para describir la circulación del

agua en el sistema kárstico de la Galería Los Elizondo, sin incorporar inferencias fuera del alcance de la evidencia obtenida.

Los estudios geofísicos aportaron información indirecta sobre las propiedades eléctricas del subsuelo, describiendo contrastes de resistividad asociados a zonas estructuralmente diferenciadas. Estos resultados se emplearon como referencia para describir áreas con posibles condiciones favorables de conectividad hidráulica dentro del medio analizado.

El análisis de la conductividad hidráulica describe el comportamiento hidráulico del sistema acuífero a partir de los valores obtenidos para los estratos interceptados durante la investigación. La estimación de parámetros hidráulicos equivalentes se utilizó como base descriptiva para el desarrollo de los procedimientos de diseño hidráulico presentados en las secciones subsecuentes del capítulo.

El monitoreo piezométrico y su análisis estadístico describen la variación temporal de los niveles del acuífero en los puntos de observación considerados. Las diferencias registradas entre los piezómetros reflejan la variabilidad espacial del sistema y documentan la respuesta del acuífero durante el periodo analizado.

El análisis hidrológico describe la precipitación registrada en las estaciones climatológicas utilizadas, así como su tratamiento estadístico para la definición de eventos de diseño. La generación de curvas, hidrogramas y hietogramas permitió caracterizar la distribución temporal de la precipitación y del escurrimiento superficial, información empleada como insumo para el dimensionamiento del sistema de captación y conducción.

El diseño hidráulico del sistema de rejilla, la tubería de conducción y el pozo de inyección se presenta como resultado del procedimiento metodológico desarrollado. Las relaciones entre volúmenes afluentes, capacidad de almacenamiento y tiempos de llenado se describen mediante el balance volumen–tiempo aplicado al pozo, permitiendo visualizar el comportamiento del sistema bajo los escenarios de diseño considerados.

El Capítulo 3 presenta una descripción detallada de los resultados obtenidos para cada uno de los componentes analizados, organizados de acuerdo con los objetivos de la investigación. La información generada constituye la base técnica que será retomada en el capítulo siguiente para el desarrollo de las conclusiones correspondientes.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos demuestran que el planteamiento metodológico integral propuesto constituye una herramienta técnicamente consistente para la evaluación de sistemas de recarga artificial mediante pozos de inyección profunda en ambientes kársticos. Dicho planteamiento permite integrar, con trazabilidad cuantitativa, información geológica, geofísica, hidrogeológica, hidrológica e hidráulica, así como verificar el comportamiento volumétrico del sistema mediante un balance volumen–tiempo discretizado.

El sistema fue definido en una localización espacial precisa correspondiente a las coordenadas UTM $X = 371,83.686$ m y $Y = 2,830,383.684$ m, integrándose con infraestructura existente. La superficie efectiva de captación se estableció como un rectángulo de 15×30 m, equivalente a 450 m^2 (0.045 ha), con una pendiente superficial del 1 % dirigida hacia el punto de captación, condición que asegura el escurrimiento por gravedad hacia el sistema.

Los estudios geofísicos de resistividad eléctrica, mediante métodos MT y TEM, mostraron valores comprendidos entre 23 y $270 \Omega \cdot \text{m}$ en los primeros cientos de metros y resistividades del orden de $\approx 1,000 \Omega \cdot \text{m}$ a profundidades cercanas a 600 m. Estos resultados evidencian contrastes estructurales significativos en el medio carbonatado y confirman la presencia de una marcada heterogeneidad interna, característica de sistemas kársticos profundos, coherente con el esquema hidrogeológico adoptado para el diseño del pozo de inyección.

La caracterización hidrogeológica se sustentó en la definición de parámetros estratificados de conductividad hidráulica y espesor. Para el acuífero somero se consideraron dos estratos con $b = 20$ m, $K = 100$ m/día y $b = 90$ m, $K = 10$ m/día. Para el acuífero profundo se adoptaron cuatro estratos con $b = 20$ m, $K = 10$ m/día; $b = 30$ m, $K = 10$ m/día; $b = 100$ m, $K = 10$ m/día; y $b = 55$ m, $K = 0.1$ m/día. Estos valores reflejan un comportamiento hidráulico contrastante, dominado por zonas de mayor conectividad y sectores de baja transmisividad.

El monitoreo piezométrico realizado en cuatro puntos (P-1, P-2, P-3 y P-4) registró niveles estáticos promedio de 625.167 msnm, 625.017 msnm, 620.946 msnm y 612.897 msnm, respectivamente, con un promedio conjunto de 621.007 msnm. Considerando un nivel de brocal aproximado de 628 msnm, la profundidad media al nivel freático somero se estimó en ≈ 6.99 m, resultado coherente con la condición de acuífero libre y con la interpretación hidrogeológica del sitio.

El análisis hidrológico se desarrolló para un evento de diseño con periodo de retorno de 50 años. Se adoptó un coeficiente de escurrimiento $C = 0.90$ y una intensidad de lluvia asociada a una duración de 5 minutos de 937.05 mm/h. Con estos parámetros, el caudal máximo de escurrimiento superficial se cuantificó en $Q_{\text{máx}} = 0.1055 \text{ m}^3/\text{s}$ (105.5 L/s) mediante el método racional, valor que se utilizó como condición de diseño del sistema de captación y conducción.

El tiempo de concentración calculado mediante la ecuación de Kirpich fue de 1.369 min. Para efectos de representación conservadora y consistencia con la discretización temporal del análisis, se adoptó una duración de 5 min. El hietograma se empleó exclusivamente para representar la distribución temporal de la precipitación del evento de diseño, presentando en los primeros intervalos intensidades y precipitaciones de 937.05 mm/h (1.83 mm), 557.17 mm/h (1.96 mm), 411.08 mm/h (2.10 mm) y 331.30 mm/h (2.28 mm), manteniéndose un patrón decreciente hasta completar la duración total del evento.

El hidrograma de diseño se definió con base en los parámetros temporales adoptados ($T_c = 5.000$ min; $T_p = 5.236$ min). La integración temporal de este hidrograma, empleada para el análisis hidráulico del sistema, permitió cuantificar un volumen acumulado de 370.41 m^3 , correspondiente al volumen total del evento. Asimismo, el hietograma del evento se construyó con una discretización temporal de 5 minutos, empleando el método de Bloque Alternó, representándose la distribución temporal de la precipitación mediante intensidades decrecientes, iniciando con 937.05 mm/h (1.83 mm) en el primer intervalo, seguidas por 557.17 mm/h (1.96 mm), 411.08 mm/h (2.10 mm) y 331.30 mm/h (2.28 mm) en los intervalos subsecuentes, hasta completar una duración total de 120 minutos.

El diseño hidráulico de la captación superficial arrojó un tirante máximo sobre la rejilla de 0.466 ft (0.142 m) y un área efectiva requerida de 0.299 m², condición satisfecha mediante un módulo de rejilla rectangular de 0.50 m². La conducción hacia el pozo se dimensionó como tubería a gravedad mediante la ecuación de Manning, seleccionándose un diámetro comercial de 355 mm ($\approx 14"$), suficiente para transportar el gasto de diseño sin generar sobrecargas hidráulicas.

El pozo de inyección se caracterizó con un diámetro interior de 24 pulgadas. A partir del área interior efectiva, en la cual se incorporó directamente un factor de seguridad de 2, se obtuvo una longitud hidráulicamente activa equivalente de ≈ 400 m, incluyendo el área de fondo del pozo.

El volumen efectivo del pozo se interpretó como volumen de agua libre disponible para almacenamiento transitorio, adoptándose un coeficiente $\phi = 1.0$. Bajo esta consideración, el volumen efectivo se cuantificó en 40.54 m³. El análisis del nivel estático previo indicó un volumen disponible inicial de ≈ 40.585 m³, aun bajo la condición de no encontrarse completamente vacío antes del inicio del evento.

La verificación del sistema mediante balance volumen–tiempo, discretizada en intervalos de 5 min, mostró que la diferencia acumulada entre volúmenes afluentes e inyectados alcanzó un valor crítico del orden de -4.514 m³, identificando el punto de máxima exigencia volumétrica y evidenciando un comportamiento cercano al umbral de suficiencia del sistema bajo el escenario analizado. A partir de la evolución temporal de los volúmenes acumulados y del volumen efectivo disponible, se determinó un tiempo de llenado del pozo comprendido entre 25 y 45 minutos, valor que describe la dinámica de almacenamiento transitorio durante el evento de diseño.

Los resultados cuantitativos obtenidos muestran que el sistema puede evaluarse de forma rigurosa cuando se integran parámetros hidrogeológicos, hidrológicos e hidráulicos dentro de un mismo marco analítico verificable.

La aportación científica de la investigación radica en la formulación y consolidación de un planteamiento metodológico integral que permite vincular de manera sistemática la caracterización del medio, el análisis hidrológico extremo, la representación temporal del gasto y la verificación volumétrica mediante un balance discreto de volúmenes afluentes y volúmenes infiltrados, atendiendo un vacío metodológico en la evaluación de

proyectos de recarga artificial en ambientes kársticos. Como resultado directo de este planteamiento metodológico se estructuró una guía técnica, la cual sistematiza la secuencia de cálculos, parámetros de entrada y criterios de verificación empleados, constituyéndose como un producto derivado de la aportación científica.

Con ello, se deduce que la recarga artificial mediante pozos de inyección profunda puede evaluarse con rigor técnico cuando se adopta un enfoque metodológico integral sustentado en resultados numéricos explícitos, lo que permite identificar márgenes de seguridad, puntos críticos de operación y la viabilidad hidráulica del sistema analizado.

CAPÍTULO 5. PROPUESTA DE GUÍA PROCEDIMENTAL PARA LA RECARGA DE ACUÍFEROS MEDIANTE POZOS DE INYECCIÓN PROFUNDA EN AMBIENTES KÁRSTICOS

5.1. Paso 1: Geodesia y referenciación espacial del proyecto

Objetivo

Definir un sistema de referencia espacial confiable que permita localizar con precisión las obras y elementos del sistema de recarga, asegurar la coherencia geométrica entre las distintas etapas del proyecto y facilitar el control del comportamiento espacial del terreno durante la operación del pozo de inyección profunda.

Marco normativo y técnico

Las actividades correspondientes a este paso se realizan con base en el Marco de Referencia Geodésico Nacional y en los lineamientos técnicos vigentes para levantamientos geodésicos establecidos por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2012), así como en apego a los criterios técnicos aplicables a obras hidráulicas y proyectos de recarga artificial emitidos por la Comisión Nacional del Agua (2015).

Insumos requeridos

Se requiere el uso de equipos GNSS de doble frecuencia con capacidad de posicionamiento diferencial, acceso a estaciones de la Red Geodésica Nacional Activa

(RGNA) o a una estación base local validada, cartografía oficial y bases de datos geoespaciales del INEGI, así como software especializado para el procesamiento GNSS y la gestión de información geográfica.

Procedimiento

Se establece una red geodésica de referencia mediante observaciones GNSS diferenciales, vinculándola al sistema geodésico oficial. Posteriormente se georreferencia la ubicación del pozo de inyección, los piezómetros, los sistemas de captación y las conducciones asociadas al proyecto. La información espacial se integra en un entorno SIG que permita su análisis y administración conjunta. Asimismo, se ejecutan levantamientos de control antes y durante la operación del sistema con el fin de identificar desplazamientos o deformaciones del terreno asociados a la inyección profunda.

Criterios técnicos de decisión

La precisión obtenida deberá ser compatible con los requerimientos del diseño hidráulico y del monitoreo piezométrico. El sistema de referencia adoptado deberá mantenerse constante durante todo el proyecto. La presencia de deformaciones relevantes deberá analizarse técnicamente antes de continuar o modificar la operación del sistema de recarga.

Producto esperado

Como resultado se obtiene una red geodésica de referencia establecida y documentada, una base de datos espacial integrada en un sistema SIG y un control geométrico suficiente para el diseño, la operación y el seguimiento del pozo de inyección profunda.

Riesgo técnico si se omite

La falta de una referenciación geodésica adecuada puede generar errores en la ubicación de las obras, inconsistencias en la interpretación hidrogeológica y limitaciones para detectar oportunamente deformaciones inducidas por la recarga artificial.

5.2. Paso 2: Evaluación geológica

Objetivo

Caracterizar las condiciones geológicas del área de estudio con el propósito de identificar las unidades litológicas, estructuras y rasgos geológicos que condicionan el comportamiento del sistema kárstico y determinan la viabilidad técnica del pozo de inyección profunda como mecanismo de recarga artificial, asegurando consistencia con la información geológica desarrollada en los capítulos previos de la tesis.

Marco normativo y técnico

La evaluación geológica se desarrolla con base en la cartografía geológica oficial y en los criterios técnicos establecidos por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2012) para la caracterización del subsuelo, así como en los lineamientos aplicables a obras hidráulicas y proyectos de aprovechamiento y recarga de aguas subterráneas emitidos por la Comisión Nacional del Agua (2015). Asimismo, se consideran los principios ampliamente aceptados para la interpretación de sistemas kársticos desarrollados en medios carbonatados, los cuales permiten comprender la relación entre litología, estructura y circulación del agua subterránea, particularmente en acuíferos con porosidad secundaria dominante (Ford y Williams, 2007).

Insumos requeridos

Para la ejecución de este paso se emplea cartografía geológica oficial a escala regional y local, información estratigráfica disponible, registros de sondeos y perforaciones existentes en el área de estudio, así como información estructural previamente documentada. De manera complementaria, se utilizan observaciones de campo orientadas a la identificación de litologías, fracturas, fallas y rasgos kársticos superficiales, apoyadas por imágenes satelitales, fotografías aéreas y modelos digitales del terreno que faciliten la interpretación geomorfológica y estructural del sitio.

Procedimiento

El procedimiento inicia con la revisión e integración de la cartografía geológica regional y local, identificando las unidades litológicas presentes y su relación estratigráfica, así como su continuidad lateral y vertical. Posteriormente, se analizan las principales estructuras geológicas, tales como fallas, fracturas y zonas de debilidad, evaluando su posible influencia en la conectividad hidráulica del sistema kárstico y en la localización de zonas preferenciales para la recarga artificial.

Esta información se contrasta con registros de perforación y datos estratigráficos disponibles, con el fin de corroborar la presencia de unidades carbonatadas favorables y reconocer evidencias indirectas de procesos de disolución, cavernamiento o desarrollo de conductos preferenciales. De manera complementaria, se realizan recorridos de campo orientados a validar las interpretaciones de gabinete y a identificar rasgos geomorfológicos asociados a la evolución kárstica del área de estudio.

Los resultados obtenidos se integran en un modelo geológico conceptual que sintetiza la relación entre litología, estructura y morfología del terreno, y que sirve como base para los análisis hidrogeológicos, geofísicos y para el diseño del pozo de inyección profunda desarrollados en los pasos subsecuentes de la guía.

Criterios técnicos de decisión

La evaluación deberá permitir identificar unidades geológicas con comportamiento favorable para la recarga artificial, así como zonas con posibles restricciones geológicas o geotécnicas. La continuidad de las unidades carbonatadas, el grado de fracturamiento, la presencia de rasgos kársticos y su relación con la estructura regional deberán considerarse de manera conjunta antes de definir la ubicación y profundidad del pozo de inyección. Las interpretaciones deberán mantenerse coherentes con la información hidrogeológica y geofísica del sitio, evitando contradicciones entre disciplinas.

Producto esperado

Como resultado de este paso se obtiene una caracterización geológica sintética del área de estudio, un modelo geológico conceptual del sistema kárstico y la identificación de las unidades y estructuras que condicionan la viabilidad técnica del pozo de inyección profunda y el comportamiento esperado del sistema de recarga artificial.

Riesgo técnico si se omite

La omisión de una evaluación geológica adecuada puede conducir a una ubicación inadecuada del pozo de inyección profunda, a interpretaciones erróneas del comportamiento hidráulico del acuífero y a riesgos operativos asociados a baja eficiencia de la recarga o a inestabilidad del terreno durante la operación del sistema.

5.3. Paso 3: Caracterización geofísica del subsuelo

Objetivo

Caracterizar las condiciones físicas del subsuelo mediante métodos geofísicos con el fin de identificar zonas de heterogeneidad, fracturamiento y posibles conductos preferenciales asociados al sistema kárstico, que condicionan la conectividad hidráulica del acuífero y la viabilidad técnica del pozo de inyección profunda como mecanismo de recarga artificial.

Marco normativo y técnico

La caracterización geofísica se desarrolla conforme a los principios metodológicos aceptados para la investigación del subsuelo en ambientes kársticos y medios carbonatados fracturados, así como a los criterios técnicos utilizados en estudios hidrogeológicos aplicados a obras hidráulicas y proyectos de recarga artificial (Telford et al., 1990). Se consideran metodologías ampliamente reconocidas para la identificación indirecta de vacíos, zonas de disolución y contrastes litológicos mediante propiedades físicas del terreno, tales como la resistividad eléctrica y la conductividad del medio (Reynolds, An introduction to applied and environmental geophysics (2nd ed., 2011)

Insumos requeridos

Para este paso se emplean equipos geofísicos adecuados al método seleccionado, tales como sistemas de resistividad eléctrica, electromagnética o métodos transitorios, así como arreglos de electrodos y configuraciones compatibles con la escala del estudio. Se utilizan además modelos digitales del terreno, cartografía topográfica y geológica, y puntos de control georreferenciados previamente establecidos. De manera

complementaria, se consideran registros de perforación existentes y observaciones de campo que permitan apoyar la interpretación de los resultados.

Procedimiento

El procedimiento inicia con la selección del método o combinación de métodos geofísicos más adecuados en función de las condiciones geológicas del sitio, la profundidad de investigación requerida y los objetivos del estudio. Posteriormente, se define el diseño de los levantamientos geofísicos, incluyendo la disposición de perfiles, separaciones entre estaciones y parámetros de adquisición, asegurando la cobertura suficiente del área de interés.

Una vez adquiridos los datos, se realiza su procesamiento e inversión mediante software especializado, obteniendo modelos físicos del subsuelo que representan la distribución espacial de las propiedades medidas. Estos resultados se interpretan de manera integrada con la información geológica e hidrogeológica disponible, con el fin de identificar anomalías asociadas a zonas de fracturamiento, disolución o cavernamiento potencialmente favorables para la recarga artificial.

Los resultados finales se incorporan a un modelo conceptual del subsuelo que permite delimitar áreas con mayor probabilidad de conectividad hidráulica y apoyar la definición de la ubicación y profundidad del pozo de inyección profunda.

Criterios técnicos de decisión

La interpretación geofísica deberá enfocarse en la identificación de contrastes físicos significativos que indiquen heterogeneidad del medio, evitando interpretaciones aisladas o no sustentadas por información geológica. La coherencia entre los resultados geofísicos y los modelos geológicos e hidrogeológicos deberá evaluarse de manera conjunta antes de definir zonas favorables para la inyección. Las anomalías detectadas deberán analizarse considerando su continuidad espacial, profundidad y relación con estructuras geológicas conocidas.

Producto esperado

Como resultado de este paso se obtiene una caracterización geofísica del subsuelo, la identificación de zonas con potencial conectividad hidráulica asociadas al sistema kárstico y la integración de esta información en un modelo conceptual que sustenta la selección del sitio y el diseño del pozo de inyección profunda.

Riesgo técnico si se omite

La omisión de la caracterización geofísica puede limitar la identificación de heterogeneidades relevantes del subsuelo, incrementar la incertidumbre en la ubicación del pozo de inyección y reducir la eficiencia del sistema de recarga artificial al no considerar la estructura interna del medio kárstico.

5.4. Paso 4: Estudio topográfico

Objetivo

Definir con precisión la geometría superficial del área de estudio mediante la caracterización topográfica y la generación de modelos del terreno que permitan analizar pendientes, escurrimientos, áreas de captación y relaciones espaciales relevantes para el diseño, la localización y la operación del sistema de recarga mediante pozo de inyección profunda.

Marco normativo y técnico

La caracterización topográfica se desarrolla conforme a los lineamientos técnicos y productos cartográficos oficiales del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010), así como a prácticas aceptadas para levantamientos topográficos de precisión aplicados a proyectos de ingeniería hidráulica. Se consideran criterios técnicos ampliamente utilizados para la generación y análisis de Modelos Digitales del Terreno (MDT) y Modelos Digitales de Elevación (MDE), los cuales constituyen insumos fundamentales para el análisis hidrológico y la delimitación de áreas de aportación superficial (Wilson y Gallant, 2000).

Insumos requeridos

Para este paso se emplean levantamientos topográficos de detalle mediante métodos GNSS, estación total o tecnologías de percepción remota, así como cartografía topográfica oficial, modelos digitales de elevación disponibles y puntos de control georreferenciados establecidos en el Paso 1. De manera complementaria, se utilizan fotografías aéreas, imágenes satelitales y software especializado para el procesamiento topográfico y el análisis espacial.

Procedimiento

El procedimiento inicia con la recopilación y validación de la información topográfica disponible, asegurando su coherencia con el sistema de referencia espacial adoptado. Posteriormente, se realizan levantamientos topográficos de detalle en el área de interés, enfocados en definir cotas, pendientes, cauces naturales, microrelieves y elementos relevantes para la conducción y captación de escurrimientos superficiales.

Con la información obtenida se generan modelos digitales del terreno que permiten analizar la morfología del sitio, identificar direcciones preferenciales de escurrimiento y delimitar áreas de captación potencialmente aprovechables para el sistema de recarga. Estos modelos se integran en un entorno de Sistema de Información Geográfica, facilitando su análisis conjunto con la información geológica, geofísica e hidrológica desarrollada en los pasos anteriores y posteriores.

Criterios técnicos de decisión

La resolución y precisión del modelo topográfico deberán ser compatibles con los requerimientos del análisis hidrológico y del diseño hidráulico del sistema de recarga. Las pendientes, cotas y relaciones espaciales identificadas deberán evaluarse considerando su influencia en la eficiencia de la captación y conducción del agua hacia el pozo de inyección. El modelo del terreno deberá mantenerse consistente con la cartografía oficial y con el sistema de referencia adoptado en el proyecto.

Producto esperado

Como resultado de este paso se obtiene una caracterización topográfica del área de estudio, modelos digitales del terreno validados y la delimitación de áreas de

captación y escurrimiento superficial que sustentan el diseño del sistema de recarga y la ubicación del pozo de inyección profunda.

Riesgo técnico si se omite

La omisión de una caracterización topográfica adecuada puede generar errores en la delimitación de áreas de captación, en la estimación de escurrimientos superficiales y en el diseño del sistema de conducción, afectando la eficiencia y seguridad operativa del sistema de recarga artificial.

5.5. Paso 5: Análisis hidrológico para fines de recarga artificial

Objetivo

Analizar el régimen hidrológico del área de estudio y estimar los escurrimientos superficiales potenciales asociados a eventos de precipitación, con el fin de dimensionar la captación y conducción del agua destinada al sistema de recarga mediante pozo de inyección profunda.

Marco normativo y técnico

El análisis hidrológico se desarrolla con base en criterios técnicos ampliamente aceptados para la estimación de escurrimientos en cuencas pequeñas y medianas, así como en la información climatológica oficial y los lineamientos aplicables a proyectos hidráulicos y de recarga artificial de acuíferos (CONAGUA, 2015). Se consideran metodologías clásicas de uso extendido en ingeniería hidráulica, integradas con prácticas actuales de análisis hidrológico aplicadas a la gestión del recurso hídrico (Chow et al., 1998).

Insumos requeridos

Para este paso se emplean registros de precipitación provenientes de estaciones climatológicas oficiales, información de intensidad–duración–frecuencia (IDF), datos de área de captación y características topográficas definidas en el Paso 4, así como parámetros hidrológicos representativos del sitio, tales como coeficientes de

escurrimiento, tiempos de concentración y condiciones de cobertura superficial. Se utilizan además herramientas de cálculo y software especializado para el análisis hidrológico.

Procedimiento

El procedimiento inicia con el análisis estadístico de la precipitación, seleccionando eventos de diseño acordes con los objetivos del sistema de recarga y el nivel de seguridad requerido. Posteriormente, se delimitan las áreas de captación superficial y se determinan los parámetros hidrológicos necesarios para la estimación de escurrimientos, considerando las características físicas del terreno y el uso del suelo. Con base en esta información, se estiman los caudales de escurrimiento mediante métodos hidrológicos apropiados a la escala del estudio, evaluando distintos escenarios de precipitación. Los resultados obtenidos permiten definir los volúmenes potenciales de agua disponibles para su conducción hacia el pozo de inyección profunda y sirven como insumo para el dimensionamiento hidráulico del sistema de captación y transporte.

Criterios técnicos de decisión

La selección del evento de diseño deberá ser coherente con el objetivo del sistema de recarga y con los criterios de seguridad adoptados. Los parámetros hidrológicos empleados deberán ser representativos de las condiciones reales del sitio y mantenerse consistentes con la información topográfica y de uso del suelo. Los resultados deberán evaluarse considerando la variabilidad hidrológica y la incertidumbre inherente al proceso de estimación.

Producto esperado

Como resultado de este paso se obtiene la caracterización hidrológica del área de estudio, la estimación de caudales y volúmenes de escurrimiento superficial y la definición de escenarios hidrológicos que sustentan el diseño del sistema de captación y conducción hacia el pozo de inyección profunda.

Riesgo técnico si se omite

La omisión del análisis hidrológico puede conducir a un subdimensionamiento o sobredimensionamiento del sistema de captación, a una utilización ineficiente del recurso disponible y a riesgos operativos asociados a la incapacidad de manejar adecuadamente eventos de precipitación significativos.

5.6. Paso 6: Caracterización hidrogeológica del sistema

Objetivo

Caracterizar el sistema hidrogeológico del área de estudio con el fin de identificar los acuíferos involucrados, su grado de confinamiento, parámetros hidráulicos representativos y condiciones de flujo subterráneo que controlan la respuesta del medio ante la recarga inducida mediante pozo de inyección profunda.

Marco normativo y técnico

La caracterización hidrogeológica se desarrolla conforme a criterios técnicos ampliamente aceptados para el estudio de acuíferos, integrando información oficial y lineamientos aplicables a la gestión y aprovechamiento de aguas subterráneas (Bear, 1972). Se consideran enfoques clásicos y contemporáneos para la interpretación del flujo en medios kársticos, donde la heterogeneidad del medio y la porosidad secundaria condicionan el comportamiento hidráulico del sistema (Ford y Williams, 2007).

Insumos requeridos

Para este paso se emplean datos de niveles piezométricos, registros de perforación y construcción de pozos, información estratigráfica e hidráulica disponible, resultados de pruebas de bombeo o ensayos hidráulicos existentes, así como la información geológica y geofísica integrada en los pasos anteriores. De manera complementaria, se utilizan series temporales de niveles freáticos y datos históricos de explotación cuando se encuentren disponibles.

Procedimiento

El procedimiento inicia con la identificación y delimitación de los acuíferos presentes en el área de estudio, definiendo su extensión, espesor y condiciones de confinamiento. Posteriormente, se analizan los niveles piezométricos para establecer la dirección y gradiente del flujo subterráneo, así como su variación temporal.

Con base en la información disponible, se estiman parámetros hidrogeológicos representativos, tales como conductividad hidráulica, transmisividad y coeficientes de almacenamiento, considerando la escala de análisis y las particularidades del medio kárstico. Los resultados se integran en un modelo hidrogeológico conceptual que describe la relación entre recarga natural, flujo subterráneo y posibles respuestas del sistema ante la inyección profunda.

Criterios técnicos de decisión

La caracterización deberá permitir evaluar la capacidad del acuífero para recibir volúmenes adicionales de agua sin generar efectos adversos, tales como sobrepresiones, ascensos piezométricos no controlados o interferencias con la explotación existente. Los parámetros adoptados deberán ser coherentes con la información geológica y geofísica y representativos de las condiciones reales del sistema.

Producto esperado

Como resultado de este paso se obtiene una caracterización hidrogeológica del área de estudio, la definición de parámetros hidráulicos representativos y un modelo hidrogeológico conceptual que sustenta la viabilidad técnica del pozo de inyección profunda y orienta su diseño y operación.

Riesgo técnico si se omite

La omisión de la caracterización hidrogeológica puede conducir a una evaluación incorrecta de la capacidad del acuífero para aceptar la recarga inducida, incrementando el riesgo de fallas operativas, impactos no deseados en el régimen piezométrico o afectaciones a usos existentes del agua subterránea.

5.7. Paso 7: Caracterización geotécnica del medio

Objetivo

Caracterizar las propiedades geotécnicas del medio en el área de estudio con el fin de evaluar la estabilidad del terreno, las condiciones mecánicas del subsuelo y los posibles riesgos asociados a la construcción y operación del pozo de inyección profunda, considerando las particularidades de un ambiente kárstico.

Marco normativo y técnico

La caracterización geotécnica se desarrolla con base en criterios técnicos ampliamente aceptados para la investigación del subsuelo y el diseño de obras geotécnicas, así como en prácticas reconocidas para el análisis de estabilidad en medios carbonatados fracturados y kársticos (Das y Sobhan, 2018). Se consideran lineamientos técnicos aplicables a obras hidráulicas y criterios de seguridad empleados en proyectos de infraestructura subterránea (Terzaghi et al., 1996).

Insumos requeridos

Para este paso se emplean registros geotécnicos de perforaciones, descripciones de núcleos y recortes de perforación, resultados de ensayos de laboratorio y de campo disponibles, así como información geológica y geofísica integrada en los pasos anteriores. De manera complementaria, se consideran observaciones de campo orientadas a identificar zonas de debilidad, cavernamiento, colapsabilidad o alteración del macizo rocoso.

Procedimiento

El procedimiento inicia con la recopilación y análisis de la información geotécnica existente, identificando los estratos presentes y sus propiedades mecánicas representativas. Posteriormente, se evalúan las condiciones de estabilidad del terreno en función de la litología, el grado de fracturamiento y la presencia de vacíos o discontinuidades características del medio kárstico.

Con base en la información disponible, se analizan parámetros geotécnicos relevantes, tales como resistencia al corte, compresibilidad y deformabilidad del material,

considerando su influencia en la excavación, entubación y operación del pozo de inyección profunda. Los resultados se integran para identificar posibles riesgos geotécnicos y definir medidas preventivas o de mitigación durante el diseño y la construcción.

Criterios técnicos de decisión

La caracterización deberá permitir evaluar la estabilidad del terreno bajo condiciones estáticas y operativas, identificando zonas con riesgo potencial de colapso, subsidencia o deformación excesiva. Los parámetros adoptados deberán ser coherentes con la información geológica e hidrogeológica del sitio y adecuados para el nivel de profundidad y las condiciones de operación del pozo de inyección.

Producto esperado

Como resultado de este paso se obtiene una caracterización geotécnica del área de estudio, la identificación de riesgos asociados a la estabilidad del terreno y la definición de criterios técnicos que sustentan el diseño estructural y constructivo del pozo de inyección profunda.

Riesgo técnico si se omite

La omisión de la caracterización geotécnica puede conducir a fallas durante la construcción u operación del pozo, problemas de estabilidad del terreno y riesgos para la integridad de la infraestructura y la seguridad operativa del sistema de recarga artificial.

5.8. Paso 8: Evaluación de la calidad de agua a inyectar

Objetivo

Caracterizar la calidad química del agua subterránea y del agua destinada a la recarga con el fin de evaluar su compatibilidad geoquímica, identificar procesos de interacción agua–roca propios del medio kárstico y prevenir efectos adversos asociados a la inyección profunda, tales como incrustaciones, disolución no controlada o movilización de contaminantes. Marco normativo y técnico

La caracterización hidrogeoquímica se desarrolla con base en criterios técnicos ampliamente aceptados para el estudio de la calidad del agua subterránea y su interacción con medios carbonatados, así como en los lineamientos aplicables a proyectos de recarga artificial de acuíferos recarga (Appelo y Postma, 2005). Se consideran principios fundamentales de la hidrogeoquímica de sistemas kársticos y normatividad relacionada con la calidad del agua para uso y gestión del recurso hídrico (Hem, 1985).

Insumos requeridos

Para este paso se emplean análisis fisicoquímicos de muestras de agua subterránea provenientes de pozos y piezómetros, así como muestras del agua superficial o pluvial destinada a la recarga. Se consideran parámetros básicos, mayores y, cuando aplica, elementos traza, además de mediciones de campo como pH, conductividad eléctrica, temperatura y alcalinidad. De manera complementaria, se utilizan registros históricos de calidad del agua y resultados de campañas previas cuando se encuentren disponibles.

Procedimiento

El procedimiento inicia con la recopilación y validación de los datos hidrogeoquímicos disponibles, asegurando la consistencia analítica y el control de calidad de los resultados. Posteriormente, se realiza la clasificación del tipo de agua mediante diagramas hidrogeoquímicos y el análisis de relaciones iónicas, con el fin de identificar los procesos dominantes de interacción agua-roca característicos del medio kárstico.

Con base en esta información, se evalúa la compatibilidad entre el agua a inyectar y el agua del acuífero, considerando posibles reacciones de precipitación o disolución, cambios en el equilibrio carbonatado y efectos sobre la porosidad secundaria del sistema. Los resultados se integran para identificar riesgos hidrogeoquímicos asociados a la recarga inducida y para definir criterios de manejo o tratamiento previo del agua, en caso de ser necesario.

Criterios técnicos de decisión

La caracterización deberá permitir verificar que la calidad del agua destinada a la recarga no genere impactos negativos sobre el acuífero ni comprometa la operación del pozo de inyección. Los parámetros evaluados deberán mantenerse dentro de rangos compatibles con la estabilidad geoquímica del sistema. Cualquier incompatibilidad identificada deberá analizarse técnicamente antes de la operación de la recarga artificial.

Producto esperado

Como resultado de este paso se obtiene una caracterización hidrogeoquímica del sistema, la identificación de procesos geoquímicos relevantes y la evaluación de la compatibilidad del agua a inyectar con el acuífero, sustentando la viabilidad técnica y ambiental del sistema de recarga mediante pozo de inyección profunda.

Riesgo técnico si se omite

La omisión de la caracterización hidrogeoquímica puede conducir a problemas de incrustación, disolución no controlada, deterioro de la calidad del agua subterránea o afectaciones a la integridad del pozo y del sistema de recarga.

5.9. Paso 9: Diseño hidráulico y constructivo del pozo de inyección profunda

Objetivo

Definir el diseño hidráulico y constructivo del pozo de inyección profunda, considerando las condiciones geológicas, hidrogeológicas y geotécnicas del sitio, con el fin de garantizar una operación eficiente, segura y compatible con la capacidad de aceptación del acuífero durante la recarga inducida.

Marco normativo y técnico

El diseño del pozo se desarrolla conforme a criterios técnicos ampliamente aceptados para la construcción y operación de pozos profundos, integrando lineamientos aplicables a obras hidráulicas y proyectos de recarga artificial de acuíferos (Driscoll, 1986). Se consideran prácticas reconocidas para el diseño hidráulico, la selección de

diámetros, profundidades, intervalos ranurados y materiales, así como criterios de seguridad y durabilidad estructural (Missteart et al., 2017).

Insumos requeridos

Para este paso se emplea la información geológica, hidrogeológica y geotécnica integrada en los pasos anteriores, así como los resultados del análisis hidrológico e hidrogeoquímico. Se consideran parámetros hidráulicos del acuífero, caudales de diseño, niveles piezométricos, propiedades del fluido, características del terreno y especificaciones técnicas de materiales y equipos disponibles para la construcción del pozo.

Procedimiento

El procedimiento inicia con la definición de la profundidad y el diámetro del pozo en función de la geometría del acuífero, los estratos a interceptar y los volúmenes de recarga previstos. Posteriormente, se establece la configuración del entubado y de los intervalos ranurados, considerando la distribución vertical de las unidades geológicas y la necesidad de favorecer la entrada uniforme del agua inyectada.

Con base en los caudales de diseño, se realiza el dimensionamiento hidráulico del pozo y de los elementos asociados, evaluando pérdidas de carga, condiciones de flujo y presiones de operación. De manera complementaria, se seleccionan los materiales del entubado y de los accesorios constructivos, asegurando su compatibilidad mecánica y química con el medio y con el agua a inyectar.

Los criterios de diseño se integran para definir un esquema constructivo que permita la operación segura del pozo, facilite las labores de mantenimiento y minimice riesgos de colmatación, daño estructural o afectaciones al acuífero durante la recarga artificial.

Criterios técnicos de decisión

El diseño deberá garantizar que el pozo pueda manejar los caudales de inyección previstos sin generar sobrepresiones ni pérdidas excesivas de carga. La configuración constructiva deberá ser compatible con la estratigrafía y las condiciones geotécnicas del

sitio. Los materiales seleccionados deberán asegurar durabilidad, resistencia y compatibilidad hidrogeoquímica con el sistema de recarga.

Producto esperado

Como resultado de este paso se obtiene el diseño hidráulico y constructivo del pozo de inyección profunda, incluyendo la definición de su geometría, configuración interna y parámetros de operación, sustentando la viabilidad técnica y funcional del sistema de recarga artificial.

Riesgo técnico si se omite

La omisión o deficiencia en el diseño hidráulico y constructivo del pozo puede conducir a fallas estructurales, ineficiencia en la inyección, colmatación prematura, afectaciones al acuífero o riesgos operativos durante la recarga inducida.

5.10. Paso 10: Monitoreo y seguimiento del sistema de recarga

Objetivo

Establecer un esquema de monitoreo, operación y control que permita evaluar el desempeño hidráulico, piezométrico y geoquímico del sistema de recarga mediante pozo de inyección profunda, asegurando su funcionamiento seguro, eficiente y compatible con la respuesta del acuífero a lo largo del tiempo.

Marco normativo y técnico

El monitoreo y la operación del sistema se desarrollan con base en criterios técnicos ampliamente aceptados para la gestión y control de obras hidráulicas y proyectos de recarga artificial de acuíferos, considerando lineamientos aplicables al seguimiento del comportamiento de pozos y acuíferos (Dillon et al., 2019). Se integran prácticas reconocidas para el monitoreo piezométrico, el control de caudales y la evaluación de la calidad del agua, en concordancia con la gestión sostenible del recurso hídrico (ASCE, 2001).

Insumos requeridos

Para este paso se emplean piezómetros de observación, sensores de nivel y presión, dispositivos de medición de caudal, registros operativos del pozo de inyección y resultados de análisis fisicoquímicos del agua. De manera complementaria, se consideran sistemas de adquisición y almacenamiento de datos, así como protocolos de muestreo y control previamente definidos.

Procedimiento
El procedimiento inicia con la definición de una red de monitoreo que incluya el pozo de inyección y piezómetros de observación estratégicamente ubicados, permitiendo registrar la respuesta piezométrica del acuífero durante y después de los eventos de recarga. Se establecen frecuencias de medición acordes con la etapa operativa del sistema y con la variabilidad esperada del acuífero.

Durante la operación del sistema, se controlan los caudales de inyección y las presiones de operación, verificando que se mantengan dentro de los rangos de diseño. Paralelamente, se realiza el seguimiento de la calidad del agua inyectada y del agua subterránea, con el fin de identificar posibles cambios asociados a procesos de mezcla, interacción agua-roca o movilización de sustancias.

La información obtenida se analiza de manera periódica para evaluar el desempeño del sistema, identificar tendencias, detectar anomalías y, en su caso, ajustar los parámetros de operación. Este enfoque permite una gestión adaptativa del sistema de recarga, orientada a maximizar su eficiencia y minimizar riesgos.

Criterios técnicos de decisión

El sistema de monitoreo deberá permitir identificar oportunamente ascensos piezométricos no controlados, pérdidas de eficiencia hidráulica, cambios en la calidad del agua o condiciones operativas fuera de rango. Los criterios de ajuste operativo deberán definirse previamente y aplicarse con base en la interpretación integrada de los datos de monitoreo.

Producto esperado

Como resultado de este paso se obtiene un sistema de monitoreo y control operativo del pozo de inyección profunda, la generación de registros continuos de

desempeño y la capacidad de evaluar y ajustar la operación del sistema de recarga de manera informada y sustentable.

Riesgo técnico si se omite

La omisión del monitoreo y control puede impedir la detección temprana de problemas operativos, generar impactos no deseados en el acuífero y comprometer la eficiencia, seguridad y sostenibilidad del sistema de recarga artificial.

5.11. Paso 11: Gestión y normatividad

Objetivo

Asegurar que el diseño, construcción, operación y monitoreo del sistema de recarga mediante pozo de inyección profunda se desarrollen en apego al marco normativo vigente, garantizando la viabilidad legal, administrativa y ambiental del proyecto, así como su compatibilidad con la gestión institucional del recurso hídrico.

Marco normativo y técnico

La gestión normativa se fundamenta en el marco legal aplicable a las aguas nacionales, a las obras hidráulicas y a la protección ambiental, considerando la legislación vigente en materia de aguas subterráneas, concesiones, permisos y autorizaciones. Se integran los lineamientos técnicos y administrativos establecidos por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2015), así como los criterios derivados de la normatividad ambiental aplicable a proyectos de infraestructura hidráulica y recarga artificial de acuíferos (Congreso de la Unión, 2023).

Insumos requeridos

Para este paso se requiere la recopilación y revisión de la legislación vigente aplicable, títulos de concesión y asignación de agua, permisos y autorizaciones administrativas, estudios técnicos justificativos, así como documentación relacionada con evaluaciones de impacto ambiental, cuando corresponda. De manera

complementaria, se consideran los lineamientos internos de las instituciones responsables de la operación y gestión del sistema.

Procedimiento

El procedimiento inicia con la identificación del marco normativo aplicable al proyecto, definiendo las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas que rigen la recarga artificial y la operación de pozos de inyección profunda. Posteriormente, se revisa la situación legal del aprovechamiento de agua subterránea en el área de estudio, verificando la vigencia y alcance de concesiones o asignaciones existentes.

Con base en esta información, se gestionan los permisos y autorizaciones necesarios para la construcción y operación del pozo de inyección, así como para la implementación del sistema de recarga. De manera paralela, se establecen mecanismos de coordinación institucional entre los actores involucrados, definiendo responsabilidades, procedimientos de reporte y esquemas de seguimiento administrativo.

La documentación generada se integra de forma sistemática, asegurando la trazabilidad de las decisiones técnicas y el cumplimiento de las obligaciones normativas durante todo el ciclo de vida del proyecto.

Criterios técnicos de decisión

La gestión normativa deberá garantizar que el sistema de recarga opere dentro del marco legal vigente y que cualquier modificación técnica relevante sea evaluada desde el punto de vista regulatorio. La falta de cumplimiento normativo deberá considerarse un criterio limitante para la continuidad de la operación del sistema.

Producto esperado

Como resultado de este paso se obtiene un esquema de gestión normativa y administrativa que sustenta legalmente el sistema de recarga mediante pozo de inyección profunda, incluyendo la identificación de permisos, autorizaciones y mecanismos de seguimiento requeridos para su operación.

Riesgo técnico si se omite

La omisión de la gestión normativa puede derivar en la suspensión del proyecto, sanciones administrativas, conflictos institucionales o la invalidación legal del sistema de recarga, independientemente de su viabilidad técnica.

5.12. Paso 12: Integración final y validación del proceso

Objetivo

Realizar la integración final de la información generada en los Pasos 1 a 11 y verificar la consistencia técnica del procedimiento seguido, estableciendo criterios generales para considerar concluida la aplicación de la guía y para documentar ajustes metodológicos cuando sean necesarios, conforme a buenas prácticas reconocidas en proyectos de recarga artificial de acuíferos.

Alcance del paso

Este paso no evalúa resultados particulares ni valida un caso de estudio específico. Su finalidad es cerrar el procedimiento de la guía, confirmando que los pasos previos fueron desarrollados de manera ordenada, articulada y trazable, y que el proceso completo puede ser aplicado y replicado en contextos kársticos comparables, de acuerdo con lineamientos internacionales para la gestión técnica de proyectos de recarga gestionada de acuíferos (Dillon et al., 2019).

Integración y verificación de consistencia

La integración final consiste en revisar de forma conjunta los productos generados en los pasos previos, asegurando coherencia entre el sistema de referencia espacial, la caracterización geológica y geofísica, el modelo topográfico, los supuestos hidrológicos, los parámetros hidrogeológicos, los criterios geotécnicos, la compatibilidad hidrogeoquímica, el diseño hidráulico del pozo, el esquema de monitoreo y los requisitos normativos. Este enfoque integrado es consistente con las prácticas recomendadas para reducir incertidumbre técnica en sistemas complejos de recarga artificial (Misstear et al., 2017).

La verificación se orienta a identificar inconsistencias entre disciplinas, supuestos no sustentados o definiciones incompletas que puedan comprometer la calidad técnica del procedimiento o limitar su reproducibilidad.

Criterios de cierre del procedimiento

Se considera concluida la aplicación de la guía cuando se cumplen, al menos, las siguientes condiciones:

- a) Los pasos fueron ejecutados conforme a la secuencia metodológica establecida y cuentan con productos verificables, lo que garantiza la trazabilidad y consistencia del proceso desarrollado.
- b) Los supuestos técnicos adoptados están documentados y son coherentes entre disciplinas, permitiendo una adecuada integración de la información generada en cada etapa del estudio.
- c) El diseño hidráulico y constructivo del pozo es compatible con la caracterización del medio físico, asegurando que las condiciones del subsuelo, la permeabilidad y la capacidad de infiltración sean congruentes con los requerimientos del sistema.
- d) Se dispone de un esquema mínimo de monitoreo y control operativo que permita evaluar el desempeño del sistema, mediante el seguimiento de variables como niveles piezométricos, calidad del agua y comportamiento hidráulico a lo largo del tiempo.
- e) Se identificaron y atendieron los requerimientos normativos y administrativos aplicables al proyecto, garantizando el cumplimiento de la legislación vigente y los lineamientos establecidos por las autoridades competentes.

Adicionalmente, la verificación integral de estos criterios permite asegurar que el proyecto no solo cumple con los objetivos técnicos planteados, sino que también mantiene una coherencia funcional entre sus componentes, facilitando su implementación y operación en condiciones reales. Estos criterios son congruentes con los principios de control técnico y gestión del riesgo recomendados para proyectos de inyección y almacenamiento subterráneo de agua. (CONAGUA, 2015).

Documentación de ajustes metodológicos

Cuando durante la aplicación de la guía se requieran adaptaciones derivadas de limitaciones de información, condiciones particulares del sitio o cambios normativos, dichos ajustes deberán documentarse indicando el paso afectado, la justificación técnica, el alcance del ajuste y sus implicaciones sobre la consistencia del procedimiento. Esta práctica es fundamental para asegurar la trazabilidad y la correcta interpretación de la guía en aplicaciones futuras (Dillon et al., 2019).

Producto esperado

Como resultado de este paso se obtiene el cierre formal del procedimiento de la guía metodológica, con una validación de consistencia interna, criterios generales de cierre y la documentación de ajustes metodológicos necesarios para asegurar la reproducibilidad y la correcta aplicación del proceso. Asimismo, se consolida la integración de la información generada a lo largo de cada etapa, permitiendo verificar la congruencia entre los análisis realizados y los resultados obtenidos. Este cierre garantiza que el procedimiento puede ser replicado en condiciones similares, manteniendo la confiabilidad técnica del método y facilitando su aplicación en futuros proyectos con características análogas.

Riesgo técnico si se omite

La omisión de este paso puede conducir a aplicaciones fragmentadas de la guía, falta de trazabilidad del proceso y decisiones técnicas basadas en productos inconexos, incrementando la incertidumbre operativa y reduciendo la confiabilidad del sistema de recarga propuesto. Asimismo, puede dificultar la integración adecuada de la información generada en cada etapa, afectando la coherencia del análisis y la validez de los resultados obtenidos.

La aplicación secuencial de los pasos descritos permite replicar el procedimiento en otros contextos kársticos, ajustando la profundidad del análisis a las condiciones específicas de cada sitio. De esta manera, se favorece una implementación ordenada y sistemática del proceso, garantizando que los criterios técnicos sean aplicados de forma consistente y facilitando la adaptación del método a distintos escenarios.

5.13. Esquema general de la guía procedimental

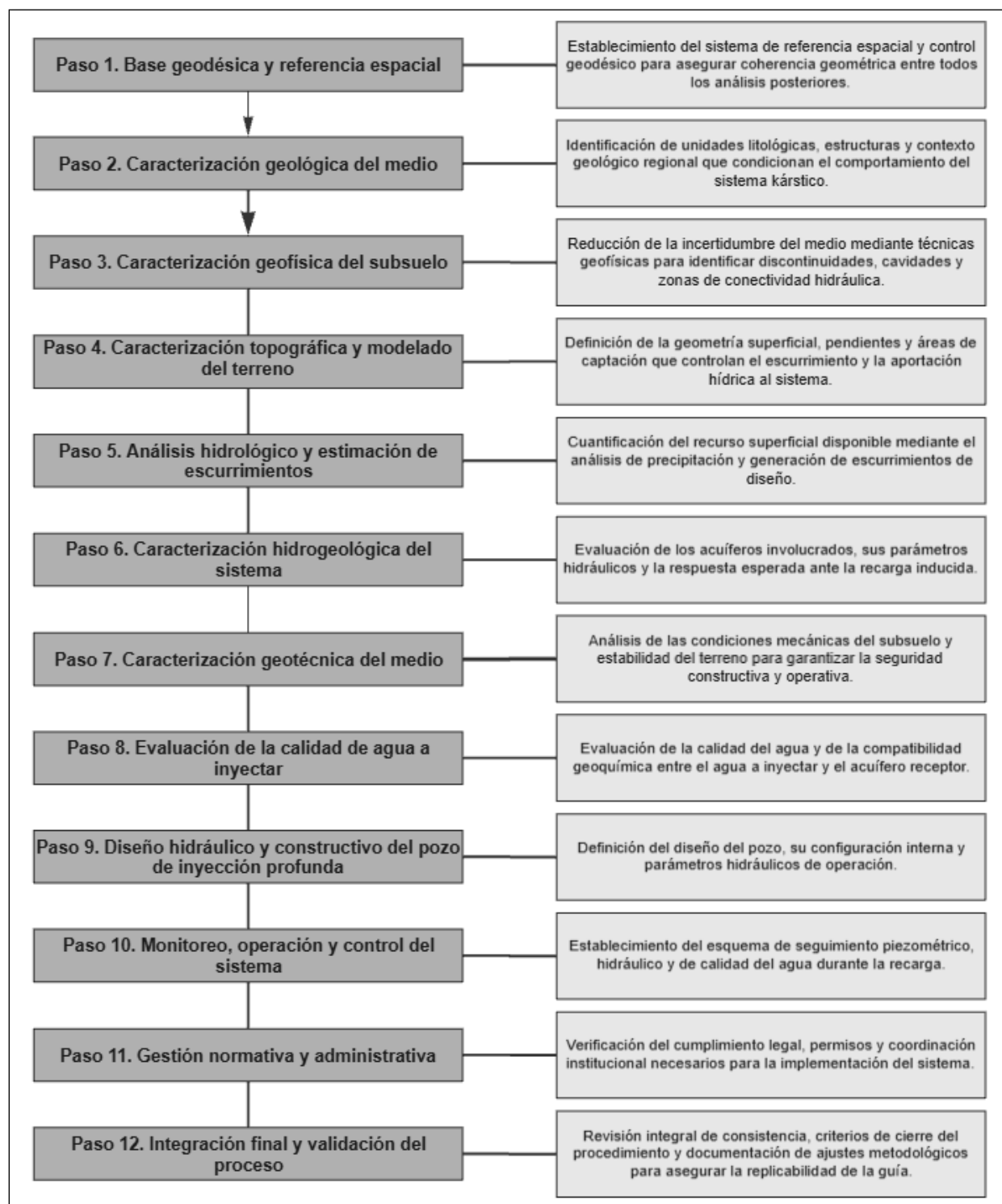


Figura 46. Esquema general de la guía procedimental.

Nota. Elaboración propia con Microsoft Excel.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS CONSULTADAS

1. AASHTO. (2014). *Drainage manual*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
2. Abdurakhmonov, S., Berdiyev, D., Gulov, S., & Bozorov, M. (2023). Application of GIS technologies in the methods of geodetic work in the mapping of demographic processes. *E3S Web of Conferences*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338604004>
3. Akan, A. O., & Houghtalen, R. J. (2003). *Urban hydrology, hydraulics, and stormwater quality*. John Wiley & Sons.
4. Alianza Latinoamericana de Fondos de Agua. (2020). Estudio hidrogeológico de zonas de recarga acuífera para el abastecimiento de agua a la ciudad de México. <https://www.fondosdeagua.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/latin-america/estudiohidr.pdf>
5. AMC/VA. (2022). *Estudio geofísico para el pozo profundo sitio Camino al Diente*.
6. Appelo, C. A., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution (2nd ed.)*. CRC Press.
7. Arango, J. (2011). Manual Hidrología, Hidráulica y Drenaje. Scribd, 10-25.
<https://es.scribd.com/document/758050333/Manual-Hidrologia-Hidraulica-y-Drenaje>
8. Arriagada, G. (1960). Introducción al Método Experimental. <https://obtienearchivo.bcn.cl/obtieneimagen?id=documentos/10221.1/57001/1/255490.pdf>
9. Asamblea Ciudadana en Defensa del Agua y la Vida. (2016). No a Monterrey VI, sí al agua para todos: Pronunciamiento ciudadano. Monterrey, Nuevo León, México: Asamblea Ciudadana en Defensa del Agua y la Vida.
10. ASCE. (2001). *Aquifer storage and recovery*. American Society of Civil Engineers.
11. ASCE. (2006). *Hydrology handbook*. ASCE Press.
12. ASCE. (2018). *Guidelines for managed aquifer recharge*. American Society of Civil Engineers.
13. Autodesk. (2023). *AutoCAD 2023*.

14. Azzout, Y., Barraud, S., Cres, F. N., & Alfakih, E. (1994). *Techniques alternatives en assainissement pluvial: Choix, conception, réalisation et entretien*. . Lavoisier.
15. Baggini, S. (2021). *El agua, nuestro recurso máspreciado*.
<https://www.researchgate.net/publication/353221069>
16. Bai, Y. J., Guo, W., & Yu, F. (2017). Application of Audio Magnetotelluric Sounding Method in Investigation of Groundwater Resources in the Dagler Region. *Ground Water*.
17. Bear, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*. Elsevier.
18. Borges, J. (2017). Generación de un volumen de geopresiones del Campo Franquera, Estado trujillo. <http://saber.ucv.ve/handle/10872/15293>
19. Bouwer, H. (2002). *Artificial recharge of groundwater: Hydrogeology and engineering*. Hydrogeology Journal.
20. Boyás Martínez, E. G.-T. (2021). Determinación de sitios potenciales de recarga artificial de agua subterránea en cinco acuíferos de la Zona Metropolitana del Valle de México. *Cuadernos Geográficos*, 60(3), 73–94.
<https://doi.org/https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v60i3.16226>
21. Brooks, D. (2022). "A Monterrey le llegó el día cero": la grave crisis de falta de agua que vive la segunda ciudad más poblada de México.
<https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-61917457>
22. Campos, A. (2016). *Cambio climático y gestión del agua en Monterrey*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
23. Campos, J. (1998). *La crisis del agua en Monterrey: Análisis y propuestas*. Monterrey: Universidad Autónoma de Nuevo León. <https://www.uanl.mx>
24. Cantú-Chapa, A. (1992). *Stratigraphy of the Upper Jurassic–Lower Cretaceous La Casita Formation, Northeastern Mexico*. . Revista Mexicana de Ciencias Geológicas.
25. Chávez-Cabello, G. (2005). *The Structure of the Sierra Madre Oriental Fold–Thrust Belt, NE Mexico*. . Universidad Nacional Autónoma de México.
26. Choi, M. (2022). *Effects of Hybrid-Type Artificial Groundwater Recharge and Underground Barrier in a Small . Basin: Water*.

27. Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1998). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.
28. CONAGUA. (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Zona metropolitana de Cd de Mexico (0901), distrito federal. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/102942/DR_0901.pdf
29. CONAGUA. (2015). *Estadísticas del agua en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
30. CONAGUA. (2023). *Aguas Subterráneas*. Acuíferos: <https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Edos/nleon/nleon.html>
31. CONAGUA. (2024). ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO ÁREA METROPOLITANA DEMONTERREY (1906), ESTADO DE NUEVO LEÓN. *SUBDIRECCION TÉCNICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS*, 27-28.
32. Congreso de la Unión. (2023). *Ley de Aguas Nacionales*. Diario Oficial de la Federación. <https://doi.org/https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LAN.pdf>
33. Congreso de los Estados Unidos Mexicanos. (2023). Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, Artículo 27.
34. Consultoría Aqua. (2024, julio 17). *Construcción de curvas I-D-TR de las estaciones climatológicas de México con la base de datos SMN-CONAGUA*. <https://consultoriaaqua.com.mx/>: <https://consultoriaaqua.com.mx/wp-content/uploads/2018/06/LIBRO-IDTR-3.2-DEFINITIVO.pdf>
35. Custodio, E., & Llamas, M. R. (1996). *Hidrología subterránea*. Ediciones Omega.
36. Das, B. M., & Sobhan, K. (. (2018). *Principles of geotechnical engineering (9th ed.* Cengage Learning.
37. Dick, G., & Peschke, G. (1989). *Stochastic generation of rainfall and runoff processes*. Springer-Verlag.
38. Dillon, P., Page, D., Vanderzalm, J., Pavelic, P., Toze, S., Bekele, E., . . . & Rinck-Pfeiffer, S. (2019). *Managed aquifer recharge: An introduction*. CSIRO Publishing.
39. DOF. (2022). Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua.

https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#sc.tab=0

40. Drever, J. I. (1997). *The geochemistry of natural waters: Surface and groundwater environments (3rd ed.)*. . Prentice Hall.
41. Driscoll, F. G. (1986). *Groundwater and wells (2nd ed.)*. . Johnson Division.
42. Eguiluz de Antuñano, S. (2001). *Tectonic evolution of the Sierra Madre Oriental fold–thrust belt, Mexico*. . Geological Society of America.
43. Eguiluz de Antuñano, S., Aranda García, M., & Marrett, R. (2000). *Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México*. . Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana.
44. ETW Cloud . (2024, julio 19). *Máquina perforadora móvil*.
<https://mx.etwinternational.com/9b-mobile-drilling-40898.html>:
<https://mx.etwinternational.com/9b-mobile-drilling-40898.html>
45. FAMM. (2018). *Registro de fuentes subterráneas y pozos en Nuevo León*. FAMM.
46. FAO. (2013). *Captación y almacenamiento de agua de lluvia*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
47. FAO. (2022). *Groundwater management and managed aquifer recharge*. . Food and Agriculture Organization of the United Nations.
48. Federal Highway Administration. (2024). *Urban drainage design manual*. U.S. Department of Transportation.
49. Ford, D., & Williams, O. (2007). Karst Hydrogeology and Geomorphology. *Semantic Scholar*, 1-15.
50. Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall.
51. Gallego, A., & Gonzales, ,. R. (2017). *Metodología de la investigación en ingeniería*. . <https://doi.org/10.14483/23448350.11959>
52. Garcias, R., & Castro, E. (2018). *Apuntes sobre exploración geofísica y técnicas de perforación*.
https://www.cohife.org/Exploracion_Geofisica_y_Tecnicas_de_Perforacion.pdf
53. Giordano, M., & Villholth, K. (2007). *The agricultural groundwater revolution: Opportunities and threats to development*. Wallingford, UK.
54. Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M. F., & van Beek, L. (2020). *Groundwater sustainability strategies*. Nature Sustainability.

55. Gobierno de México . (2021, 02 15). *Sistema Nacional de Información Ambiental y Recursos Naturales* . Boletín Estadístico y Geográfico : <https://gisviewer.semarnat.gob.mx/bol/indice/>
56. Gobierno del Estado de Nuevo León. (2022). *Acciones para la atención de la sequía en el estado de Nuevo León* . <https://www.nl.gob.mx>
57. Goldscheider, N., & Drew, D. (2007). *Methods in karst hydrogeology* . Taylor & Francis.
58. González, D. (2023, 03 24). *Análisis de la Crisis de Agua*. Congreso del Estado de Nuevo León: <https://www.hcnl.gob.mx/glpan/2023/03/analisis-de-la-crisis-de-agua.php>
59. Google. (2023). *Google Earth*. <https://doi.org/>. <https://earth.google.com/web/>
60. Gross, M. (2019). *Geología del agua subterránea*. Editorial Científica del Agua.
61. Gutierrez, F., & Parise, M. (2005). *Los sumideros: puntos de entrada de agua hacia el subsuelo*. Geogaceta.
62. Hartmann, A., Goldscheider, N., Wagener, T., Lange, J., & Weiler, M. (2014). *Karst water resources in a changing world: Review of hydrological modeling approaches*. Reviews of Geophysics. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2013RG000443>
63. Heim, R. (2002). *A review of twentieth-century drought indices used in the United States* . Bulletin of the American Meteorological Society.
64. Hem, J. D. (1985). *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water (3rd ed.* U.S. Geological Survey.
65. Hydrognomon. (2024). *Hydrognomon – Software para análisis hidrológico*. <https://hydrognomon.openmeteo.org/>: <https://hydrognomon.openmeteo.org/>
66. INEGI. (1985). *Síntesis geográfica del estado de San Luis Potosí* . Secretaría de Programación y Presupuesto.
67. INEGI. (2012). *Marco de referencia geodésico nacional*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
68. INEGI. (2015). *Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución Lidar, con resolución en 5m.superficie*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=70282579634>
69. INEGI. (2016). *Conjunto de datos vectoriales de sistemas de topografías*. INEGI.

70. INEGI. (2019). *Modelo Digital de Elevación*.
<https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
71. INEGI. (2022). *Censo Agropecuario 2022*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
72. INEGI. (2010). *Conjunto de datos topográficos*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
73. International Association of Hydrogeologists. (2022). *Managed aquifer recharge: Overview and governance (IAH Special Publication)*.
<https://doi.org/https://recharge.iah.org>
74. Ita, B. (2019). A proposito de medio ambiente, participación ciudadana y sustentabilidad. tres problemas relacionados con el agua en el nuevo leon comtemporaneo. <https://humanitas.uanl.mx/index.php/ah/article/view/162>
75. Kirpich, Z. P. (1940). *Time of concentration of small agricultural watersheds*. Civil Engineering.
76. Konikow, L. F., Hornberger, G. Z., Halford, K. J., & Hanson, R. T. (2009). *Revised Multi-Node Well (MNW2) Package for MODFLOW Ground-Water Flow Model (USGS Techniques and Methods 6–A30)*. U.S. Geological Survey.
77. Koutsoyiannis, D. (2004). *Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: I. Theoretical investigation*. Hydrological Sciences Journal.
78. Lara, A. (2021). *La oralidad en educación: el podcast*.
<https://rutamaestra.santillana.com.co/wp-content/uploads/2021/12/Manuela-Lara-Ruta-Maestra-Ed32.pdf>
79. LLerena, J., & Ayala, R. (2022). *Desarrollo de competencias investigativas de estudiantes universitarios de ingeniería en proceso de titulación: propuesta metodologica y experiuencia*. *Memoria investigaciones en ingeniería*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.36561/ING.23.5>
80. López, C. (2017). *El estado del agua en México, retos oportunidades y perspectivas*. México: Centro de Estudios Demográficos, Urbanos y Ambientales del Colegio de México. .
81. López, M. (2017). *Situación del agua en México: desperdicio y contaminación*. CONAGUA.

82. Lozano, F. (1998). Localización, construcción y prueba de un pozo en una falla geologica de dilusión. <http://eprints.uanl.mx/603/1/1080080865.PDF>
83. McCuen, R. H. (2005). *Hydrologic analysis and design (3rd ed.)*. Pearson Prentice Hall.
84. Menendez, O., Evangelistas, N., & Pruñonosa, A. (2018). *Aprovechamiento de las aguas de crecida del sistema kastico de san jose para recarga artificial de acuifero, vall d Uixo, Castellon. Cuevas:La flecha del tiempo de la prehistoria a la actualidad.*
85. Microsoft Corporation. (2019). *Microsoft Excel 2019*.
86. Microsoft Corporation. (2024, julio 08). *Hacer crecer el negocio con Microsoft 365*. <https://www.microsoft.com/es-es/microsoft-365/business>:
<https://www.microsoft.com/es-es/microsoft-365/business>
87. Minitab. (2024, junio 29). *Minitab*. <https://www.minitab.com/es-mx/company/>:
<https://www.minitab.com/es-mx/company/>
88. Misstear, B., Banks, D., & Clark, L. (2017). *Water wells and boreholes*. Wiley-Blackwell.
89. Monforte, G. (2013). Hacia un sistema sustentable del aagua para los usuarios del area metropolitana de monterrey, Un estudio de factores socioambientales. <http://eprints.uanl.mx/3585/>
90. Mukherji, A., & Shah, T. (2005). *Socio-ecology of groundwater irrigation in South Asia: An overview of issues and evidence*.
91. Murillo, M. (1986). Estudio Hidrogeoquimico de area metropolitana de monterrey. <http://eprints.uanl.mx/6851/>
92. Olivas, R. (2022). *Recarga inducida de acuíferos en fraccionamientos urbanos en la zona poniente de la ciudad de Chihuahua*. Universidad Autónoma de Chihuahua. <http://repositorio.uach.mx/482/1/Tesis.pdf>
93. Opolenko, V. (2022). Potencialidad de uso de aguas servidas para riego y recarga de acuíferos: Cuenca del río La Villa, República de Panamá. *Revista Geográfica de América Central*, 68(1), 265–300.
94. Ortiz Haro, G. A., Gress Carrasco, F., & Mazari Hiriart, A. (2023). *Recursos hídricos y cambio climático: una visión desde México*. Programa de Investigación en Cambio Climático (PINCC), Universidad Nacional Autónoma de México

- (UNAM), Recursos hídricos y cambio climático: una visión desde México. <https://cambioclimatico.unam.mx/cambio-climatico-en-mexico-impactos/recursos-hidricos>
95. Padilla y Sánchez, R. J. (1986). *Post-Paleozoic tectonics of northeastern Mexico and its role in the evolution of the Gulf of Mexico*. . Geofísica Internacional.
96. Paillet, F. L. (1998). *Flow modeling and permeability estimation using borehole flow logs in heterogeneous fractured formations*. . Water Resources Research.
97. Palmer, J. (2011). *Cavernas y cuevas: formación y características*. Editorial Espeleologica. https://doi.org/https://www.researchgate.net/figure/Patrones-comunes-de-las-cavernas-cuando-se-observan-en-planta-Tomado-de-Audra-y-Palmer_fig6_370521766
98. Pan, J., Zhan, J., Hong, T., Wang, H., Li, Q., & Li, Z. (2018). Combined Use of Surface Nuclear Magnetic Resonance and Electrical Resistivity. *Imaging in Detecting Grondwater*, 253-262.
99. Peña, F., Condori, E., & Charca, M. (2016). *Recarga artificial de acuíferos en alta montaña. Las comunas de Santa Eulalia*. Congreso Peruano de Geología, Sociedad Geológica del Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/1605>
100. Perico, N. R., Galarza, E. Y., Díaz Ochoa, M. L., & Martínez, P. (2020). *Guía práctica de investigación en ingeniería: apoyo a la formación de docentes y estudiantes*. Corporación Universitaria Minuto de Dios.
101. Pichardo, Y. (2024). *Gestión del agua y sostenibilidad de los acuíferos en el Área Metropolitana de Monterrey*. El Colegio de la Frontera Norte.
102. Pindell, J. (2009). *Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame*. . Geological Society, London, Special Publications.
103. Política Nacional para la Gestion Integral del Recurso Hídrico. (2010). Ministerio de Ambiente, Vivienda y desarrollo Territorial. CONAGUA. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/Politica-Nacional-para-la-Gestion-Integral-del-Recurso-Hidrico.pdf>
104. Pyne, R. (2005). *Aquifer storage recovery: A guide to groundwater recharge through wells (2nd ed.)*. ASR Press.

105. Quiroga, N. (2023). Evaluación de factor pendiente en una metodología de zonificación de Amenaza por deslizamientos. *U Católica de Colombia*, 14-99. <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/0c013665-bc3d-4712-8081-0d19d442b907/content>
106. Ramos, M. D. (2005). *Visualization of storm severity*. <https://hal.science/insu-00385384/>
107. Requesens, J. (2022). Experiencia de recarga gestionada de acuíferos en la cuenca de Santiago (Chile): lecciones aprendidas después de dos años de operación. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/185818>
108. Reynolds, J. M. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics (2nd ed.* Wiley-Blackwell.
109. SAGARPA. (2017). *Pozos de absorción*. Colegio de posgraduados.
110. Salvador, A. (1991). *Origin and development of the Gulf of Mexico basin*. Geological Society of America Bulletin.
111. Secretaría de Salud. (2021). *Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua*. . Diario Oficial de la Federación.
112. Servicio Geológico Mexicano. (2000). *Carta Geológico-Minera Monterrey G14-7 (Escala 1:250 000)*. Secretaría de Economía, Gobierno de México.
113. Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey. (2022). *Documentación técnica proporcionada para el proyecto de investigación doctoral*. . Documento institucional.
114. Sharp, J. M. (2003). *Flow systems in carbonate aquifers*. Karst Waters Institute Special Publication.
115. Sharp, J. M. (2007). *Groundwater in fractured rocks*. Springer.
116. Sharp, J. M., & Clement, T. J. (1989). *Hydrochemical facies as hydraulic boundaries in karstic aquifers: The Edwards aquifer*. Journal of Hydrology.
117. SIAP. (2023). *Estadísticas de superficie agrícola y producción*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera.

118. SMN. (2024). *Monitor de sequía en México*. Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua.
119. Soldevilla, M. (2022). Métodos y técnicas de prospección topográfica aplicada a la arqueología en cavidades cársticas sumergidas con visibilidad cero. El Proyecto Falconera. Atlántica-mediterránea, 24, 61-86. <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/97288833/>
120. Sosa, F., & Constantino, R. (2023). *Sequia en mexico*. <https://redaguam.xoc.uam.mx/wp-content/uploads/2023/08/Red-AgUAM-Sequia.pdf>
121. Suter, M. (1987). *Structural traverse across the Sierra Madre Oriental in northeastern Mexico*. . Geological Society of America Bulletin.
122. Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics (2nd ed.* Cambridge University Press.
123. Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (. (1996). *Soil mechanics in engineering practice (3rd ed.)*. John Wiley & Sons.
124. Torres-Vargas, G. (2018). *Basement evolution and tectonic implications for northeastern Mexico*. . Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana.
125. UNESCO. (2021). *Managed aquifer recharge: A global review*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
126. USACE. (2021). *HEC-HMS user's manual: Hydrologic modeling system*. . Hydrologic Engineering Center.
127. USDA-NRCS. (1986). *Urban hydrology for small watersheds* . U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
128. Valcarce, R. M., González Mesa, Y., & & Díaz García, M. (2018). Contribución de la Geofísica para ubicar pozos de recarga artificial: subcuenca Jaruco. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*,, 86-99. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1680-03382018000200007&script=sci_arttext&tlng=en
129. Vanegas, L. (2017). *Pozos de inyección profunda: Recarga artificial de acuíferos con aguas pluviales y disminución de inundaciones en el AMG*. Jalisco: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente.

130. Vega, A. (2009). *Recarga de acuíferos y disponibilidad de agua en la zona metropolitana de Monterrey*. . Revista Mexicana de Ingeniería Hidráulica,.
131. Viessman, W., Lewis, G. L., & Knapp, J. W. (1989). *Introduction to hydrology (3rd ed.)*. Harper & Row.
132. Wanielista, M. P. (1990). *Hydrology and water quantity control*. . John Wiley & Sons.
133. Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). *Understanding the drought phenomenon: The role of definitions*. Water International.
134. Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences (3rd ed.* Academic Press.
135. Williams, J. (2007). Hidrogeología de ambientes cársticos. *Editorial geológica*, 103-144. <https://doi.org/DOI:10.1002/9781118684986>
136. Wilson, J. P., & Gallant, J. C. (2000). *Terrain analysis: Principles and applications*. John Wiley & Sons.
137. Wolf, P. R., & Ghilani, C. D. (2012). *Elementary surveying: An introduction to geomatics (13th ed.)*. Pearson Education.
138. World Meteorological Organization. (2009). *Guide to hydrological practices (6th ed., WMO-No. 168)*. . World Meteorological Organization.
139. World Meteorological Organization. (2016). *Managed aquifer recharge: The contribution to water security*.
140. Xu, B., Tang, X., Jin, M., Zhang, H., Du, L., Yu, S., & He, J. (2020). *Unificación de programas de desarrollo para la neurogénesis embrionaria y postembrionaria en la retina del pez cebra*. <https://doi.org/https://zfin.org/ZDB-PUB-200530-7>
141. Yun, S. (2023). *Combined Analysis of Net Groundwater Recharge Using Water Budget and Climate Change Scenarios*. Northern Togo: Water.
142. Zaragoza, H. (2019). La recarga de acuíferos. Análisis de su estimación de acuerdo con la información disponible, el caso del Acuífero del Valle de San Juan del Río, Querétaro. https://www.researchgate.net/publication/344849717_La_recarga_de_acuíferos_

Analisis_de_su_estimacion_de_acuerdo_con_la_informacion_disponible_el_caso_del_Acuifero_del_Valle_de_San_Juan_del_Rio_Queretaro

143. Zheng, Y., Ross, A., Villholth, K. G., & Dillon, P. (2021). *Managing aquifer recharge: A showcase for resilience and sustainability*. . UNESCO–IAH. <https://doi.org/> <https://recharge.iah.org>
144. Zheng, Y., Vanderzalm, J., Knappe, D., & Bardi, J. (2022). The 21st century water quality challenges for managed aquifer recharge. *Environmental Sciences: Processes & Impacts*, 24. <https://doi.org/https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9512974/>

ANEXOS

Anexo A

- **Oficios de solicitud y autorización para la recopilación de información hidrogeológica en el sitio Galería Los Elizondo**

Los documentos incluidos en el presente anexo corresponden a los oficios de solicitud y autorización emitidos entre la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León y Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, para la recopilación de información hidrogeológica en el sitio denominado Galería Los Elizondo. El título del proyecto de investigación señalado en dichos documentos corresponde a una denominación preliminar utilizada durante las etapas iniciales del doctorado, la cual fue posteriormente ajustada para reflejar con mayor precisión el enfoque metodológico y el alcance definitivo de la investigación desarrollada.



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
Oficio No. FIC 523/2022

ARQ. JUAN IGNACIO BARRAGAN VILLARREAL
Director General Servicios De Agua Y Drenaje De Monterrey, I.P.D.
Presente. -

De manera cordial nos dirigimos a usted con el fin de solicitar autorización para recopilar información hidrogeológica en sitio denominado Galena del Elizondo ubicado en el Camino al Diente, municipio de Monterrey, N.L.

La petición anterior es con la finalidad de realizar una investigación de tesis doctoral titulada "Investigación sobre recarga superficial y subterránea en Acuífero Metropolitano de Monterrey mediante métodos de inyección, como fuente subterránea alterna para el abastecimiento de agua potable de Monterrey, Nuevo León".

Con el objetivo de recabar mayor información, se pretende instalar por medio de una perforadora montada y equipo de perforación tres piezómetros y monitorearlos por un periodo de 2 años, en adición, también se pretende recolectar datos y muestras del pozo profundo que se estará realizando por parte de ustedes. Cabe señalar que la información obtenida de la zona será utilizada con fines académicos y no interferirá con los trabajos que se pudieran estar llevando a cabo en el área antes mencionada.

Sin más por el momento y en espera de vernos favorecidos ante dicha petición, nos despedimos de usted para cualquier duda y/o aclaración.

Atentamente
"Alere Flamman Veritatis"
Cd. Universitaria a 12 de septiembre del 2022.

DR. RICARDO GONZÁLEZ ALCORTA
Director



DR. RICARDO ALBERTO CAVAZOS GONZÁLEZ
Director de Tesis

DR. HÉCTOR DE LEÓN GÓMEZ
Co-director de Tesis:

M.I. GERARDO AUGUSTO MONTEMAYOR AHUJA
Tesisista

C.c.p. M.I. Raúl López Corzo. - Director De Ingeniería SADM
C.c.p. Ing. Manuel Gerardo Ochoa Miramontes. - Director De Operación SADM



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

Figura 47. Solicitud para autorización de recopilación de datos en el sitio de estudio. Nota. Reproducido de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (2022).



SERVICIOS DE
**AGUA Y
DRENAJE**
DE MONTERREY, I.P.D.



Monterrey, Nuevo León, 5 de octubre del 2022

Oficio: SADM-ING-1660-2022

Asunto: Autorización

Dr. Ricardo Gonzalez Alcorta

Director de la Facultad de Ingeniería Civil (F.I.C.).

Universidad Autónoma de Nuevo León (U.A.N.L.).

P r e s e n t e:

Estimado Dr. Ricardo Gonzalez Alcorta; con respecto al Oficio con número FIC 523/2022 emitido por Usted, de fecha 12 de septiembre del 2022; mediante el cual solicita la autorización de que se proporcionen las facilidades necesarias para la recabación de información Hidrogeológica en el sitio denominado Galería Los Elizondo, ubicado en Camino al Diente municipio de Monterrey Nuevo León, en ese orden sirva el presente para informar que se autoriza continuar con la recopilación de la información en sitio, así mismo nos menciona sobre la colocación de 3 -tres- piezómetros que serán monitoreados por parte del interesado durante un periodo de 2 -dos- años, para los cuales se anexa el croquis con la ubicación, se propone que se instale dentro del polígono que delimita el área correspondiente a Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (S.A.D.M.); mucho agradeceré nos proporcione datos de la estratigrafía, valores de textura de la muestra, porosidades y los resultados obtenidos en cada avance, así como los resultados finales de esta investigación, mismos que serán de gran utilidad para la Institución.

Sin más por el momento, le reitero la seguridad de mi aprecio y le envío cordial saludo.

Atentamente

M.C. LUIS ALBERTO VERDUZCO CEDEÑO
GERENTE DE INFRAESTRUCTURA
SERVICIOS DE AGUA Y DRENAJE DE MONTERREY, I.P.D.

C.c.e.p. Arq. Juan Ignacio Barragán Villarreal
Ing. José Mario Esparza Hernandez
M.I. Raúl López Corzo
Ing. Manuel Gerardo Ochoa Miramontes
M.I. Sergio Ramos Tapia
Archivo

-Director General
-Director Adjunto
-Director de Ingeniería
-Director de Operaciones
-Sub Director de Proyectos

Expediente INFRA-291-22
Control C2022-2345



www.nl.gob.mx

Matamoros 1717 Pte. Col. Obispaño, Mty, N.L. C.P. 64060 | Tel. 81 2033 2033
www.sadm.gob.mx

Figura 48. Autorización para proporción de facilidades necesarias para la recabación de información hidrogeológica en Galería Los Elizondo. Nota. Reproducido de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (2022).



SERVICIOS DE
**AGUA Y
DRENAJE**
DE MONTERREY, I.P.D.



ANEXO

Delimitación del área comprendida por Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey en
Camino al diente Monterrey N.L.



www.nl.gob.mx
Matamoros 1717 Pte. Col. Obispado, Mty, N.L. C.P. 64060 | Tel. 81 2033 2033
www.sadm.gob.mx

Figura 49. Delimitación del área comprendida por Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey en Camino al Diente, Monterrey, Nuevo León. Nota. Reproducido de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (2022).

Anexo B

- **Registro fotográfico del sitio de estudio y de las actividades de campo**

El presente anexo contiene un registro fotográfico representativo del sitio de estudio Galería Los Elizondo y de las condiciones observadas durante las actividades de campo asociadas al proyecto institucional analizado. Las imágenes incluidas tienen un carácter documental y técnico, y su finalidad es respaldar visualmente la descripción del sitio y de los procesos referidos en el Capítulo 2.



Figura 50. Equipo de bombeo utilizado por Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey durante las actividades operativas asociadas al pozo de inyección profunda en el área de estudio Galería Los Elizondo.

Nota: Elaboración propia.



Figura 51. Vista de la caseta y tuberías utilizadas para la conducción y control del agua hacia el pozo en el sitio Galería Los Elizondo.

Nota. Elaboración propia.



Figura 52. Piezómetro instalado para el monitoreo.

Nota. Elaboración propia.

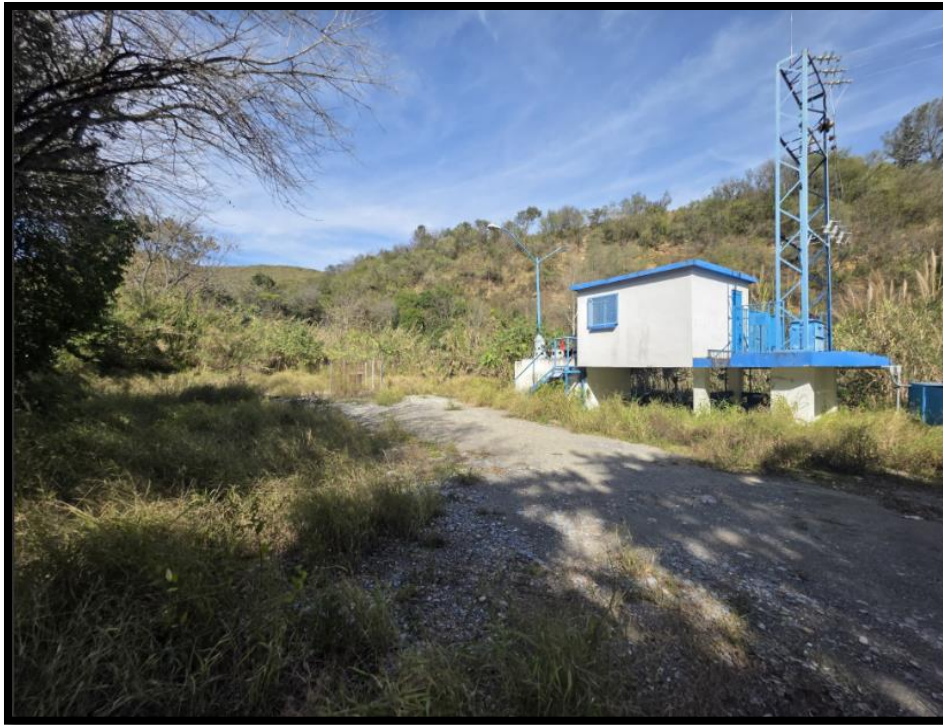


Figura 53. Panorámica del entorno donde se localiza el pozo y la infraestructura asociada.
Nota. Elaboración propia.



Figura 54. Pozo de extracción controlada desde el acuífero kárstico.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 55. Infraestructura y equipo utilizados en campo.

Nota. Elaboración propia.



Figura 56. Trabajos operativos en campo.

Nota. Elaboración propia.