



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES**

**CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA
CONSTRUCCIÓN**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS

**INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL SUELO Y
ROCA EN EL TRANSPORTE DE CONTAMINANTES A TRAVÉS DE LA
ZONA VADOSA. CASO DEL RÍO SAN PEDRO, AGUASCALIENTES.**

PRESENTA

M. en Ing. Isaí Gerardo Reyes Cedeño

**PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS DE LOS
ÁMBITOS ANTRÓPICOS**

TUTOR:

Dr. Martín Hernández Marín

COMITÉ TUTORAL:

Dr. Jesús Pacheco Martínez

Dr. Roberto Rico Martínez

Aguascalientes, Ags., 01 de junio de 2023

María Guadalupe Lira Peralta
DECANA DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTE

Por medio del presente como **TUTOR** designado del estudiante **ISAÍ GERARDO REYES CEDEÑO** con ID **140830** quien realizó *la tesis* titulada: "**INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL SUELO Y ROCA EN EL TRANSPORTE DE CONTAMINANTES A TRAVÉS DE LA ZONA VADOSA. CASO DEL RÍO SAN PEDRO, AGUASCALIENTES.**", un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que *él* pueda proceder a imprimirla, así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a día 05 de junio de 2023.



Martín Hernández Marín
Tutor de tesis

c.c.p.- Interesado

c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

María Guadalupe Lira Peralta
DECANA DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTE

Por medio del presente como **ASESOR** designado del estudiante **ISAÍ GERARDO REYES CEDEÑO** con ID **140830** quien realizó la tesis titulada: **"INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL SUELO Y ROCA EN EL TRANSPORTE DE CONTAMINANTES A TRAVÉS DE LA ZONA VADOSA. CASO DEL RÍO SAN PEDRO, AGUASCALIENTES."**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que *él* pueda proceder a imprimirla, así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"
Aguascalientes, Ags., a día 05 de junio de 2023.


Jesús Pacheco Martínez
Asesor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

María Guadalupe Lira Peralta
DECANA DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTE

Por medio del presente como **ASESOR** designado del estudiante **ISAÍ GERARDO REYES CEDEÑO** con ID **140830** quien realizó la tesis titulada: "**INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL SUELO Y ROCA EN EL TRANSPORTE DE CONTAMINANTES A TRAVÉS DE LA ZONA VADOSA. CASO DEL RÍO SAN PEDRO, AGUASCALIENTES.**", un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que **él** pueda proceder a imprimir/a, así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a día 05 de junio de 2023.



Roberto Rico Martínez

Asesor de tesis

c.c.p.- Interesado

c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Fecha de dictaminación dd/mm/aaaa: 05/06/2023

NOMBRE: Isai Gerardo Reyes Cedeño **ID** 140830

PROGRAMA: Doctorado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos **LGAC (del posgrado):** Estudios y proyectos de ingeniería civil

TIPO DE TRABAJO: () Tesis () Trabajo Práctico

TÍTULO: "INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL SUELO Y ROCA EN EL TRANSPORTE DE CONTAMINANTES A TRAVÉS DE LA ZONA VADOSA. CASO DEL RÍO SAN PEDRO, AGUASCALIENTES."

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado): Estudio explorativo que aporta entendimiento acerca de la relación entre el agua superficial y la interacción con el acuífero a través de la zona vadosa.

INDICAR SI NO N.A. (NO APLICA) SEGÚN CORRESPONDA:

INDICAR	SI	NO	N.A. (NO APLICA)	SEGÚN CORRESPONDA:
<i>Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:</i>				
SI				El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
SI				La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
SI				Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
SI				Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
SI				Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
SI				El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
SI				Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
SI				Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
SI				Cumple con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)
<i>El egresado cumple con lo siguiente:</i>				
SI				Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Docencia
SI				Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc)
SI				Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial, en caso de los posgrados profesionales si tiene solo tutor podrá liberar solo el tutor
NO				Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario
SI				Coincide con el título y objetivo registrado
SI				Tiene congruencia con cuerpos académicos
SI				Tiene el CVU del Conacyt actualizado
SI				Tiene el artículo aceptado o publicado y cumple con los requisitos institucionales (en caso que proceda)
<i>En caso de Tesis por artículos científicos publicados</i>				
N.A.				Aceptación o Publicación de los artículos según el nivel del programa
N.A.				El estudiante es el primer autor
N.A.				El autor de correspondencia es el Tutor del Núcleo Académico Básico
N.A.				En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
N.A.				Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
N.A.				La aceptación o publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto

Con base a estos criterios, se autoriza se continúen con los trámites de titulación y programación del examen de grado:

Sí
 No

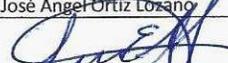
FIRMAS

Elaboró:

* NOMBRE Y FIRMA DEL CONSEJERO SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCIÓN:


Dr. José Ángel Ortiz Lozano

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO TÉCNICO:


Dr. Luis Enrique Santiago García

* En caso de conflicto de intereses, firmará un revisor miembro del NAB de la LGAC correspondiente distinto al tutor o miembro del comité tutorial, asignado por el Decano

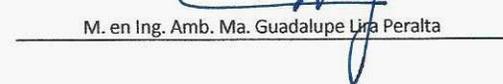
Revisó:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:


Dr. Mario Ernesto Esparza Díaz de León

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:


M. en Ing. Amb. Ma. Guadalupe Lira Peralta

Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado

En cumplimiento con el Art. 105C del Reglamento General de Docencia que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico: Cuidar la eficiencia terminal del programa de posgrado y el Art. 105F las funciones del Secretario Técnico, llevar el seguimiento de los alumnos.

Article

Comprehensive Methodology and Analysis to Determine the Environmental Flow Regime in the Temporary Stream “La Yerbabuena” in Aguascalientes, Mexico

Isaí Gerardo Reyes-Cedeño ¹, Martín Hernández-Marín ^{2,*} , Anuard Isaac Pacheco-Guerrero ³ 
and John P. Gannon ⁴

¹ Centre for Design and Construction Sciences, Autonomous University of Aguascalientes, Aguascalientes 20100, Mexico

² Department of Civil Engineering, Autonomous University of Aguascalientes, Aguascalientes 20100, Mexico

³ Academic Unit of Engineering, Autonomous University of Zacatecas, Zacatecas 98000, Mexico

⁴ Forest Resources and Environmental Conservation, Virginia Tech, Blacksburg, VA 24061, USA

* Correspondence: mhernandez@correo.uaa.mx; Tel.: +449-193-6422

Abstract: In this study, a comprehensive methodology was adapted to determine the environmental flow regime of “La Yerbabuena”, a temporary stream located in the Aguascalientes Valley, Mexico. The analysis was divided into four stages: the geomorphological watershed analysis, a hydrologic analysis, hydraulic modeling, and environmental analysis. The main geomorphological features of the study area were defined from maps in the spatial block, and with them, a synthetic series of daily and monthly discharge was determined and further used in the next stages. In the hydrological stage, the IHA (Indicators of Hydrologic Alteration) methodology and the procedures from the Mexican regulation, named NMX-159, were applied to the stream, and their results were comparatively analyzed. A similar interannual flow variation from both methodologies was found for wet and dry seasons, ranging from 0.010 to 0.108 m³/s. In the hydraulic modeling stage, a micro-basin part of the stream was modeled in the software HEC RAS, observing that the IHA methodology results had water levels that matched the baseflow of the stream, which allows understanding the hydraulic behavior of the water flow through the generation of different profiles in function of the rainy season. Finally, for the environmental stage, the hydrological health of the stream was evaluated using the software Flow Health, additionally observing that the IHA methodology was closer to the desired water level of the reference. This study demonstrates that the proposed methodology achieves the objectives defined by the NMX-159, which establishes a streamflow regime considering a natural interval of hydrologic variability in both ordinary and after-disturbance conditions. This application of the methodology for temporary streams provides an understanding of the hydrological behavior of the environmental flow throughout the year, and regarding the existing regulations, it presents a correlation with the obtained results, as well as greater precision in the dry season.

Keywords: baseflow; temporary streams; environmental flow; hydraulic modeling; hydraulic depth



Citation: Reyes-Cedeño, I.G.; Hernández-Marín, M.; Pacheco-Guerrero, A.I.; Gannon, J.P. Comprehensive Methodology and Analysis to Determine the Environmental Flow Regime in the Temporary Stream “La Yerbabuena” in Aguascalientes, Mexico. *Water* **2023**, *15*, 879. <https://doi.org/10.3390/w15050879>

Academic Editor: Aizhong Ye

Received: 7 January 2023

Revised: 10 February 2023

Accepted: 15 February 2023

Published: 24 February 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Currently, there is a need to define healthy flow conditions in temporary streams, such as the minimum annual baseflow, in order to prevent and manage risks that could affect the surrounding ecosystem [1]. A temporary stream is described in the literature as a stream that does not have year-round surface flow [2].

One way to quantify healthy flow conditions is to define their natural variability regime, better known as environmental flow. This is defined as the duration and quantity of streamflow needed to preserve the recovery capacity of natural ecosystems and safeguard their characteristic species [3–5]. Worldwide, there exist numerous methodologies to assess the environmental flow, however, these methods often yield different results. For

AGRADECIMIENTOS

Primero agradecer infinitamente al CONAHCYT (Consejo nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías) y a mi tan querida Benemérita Universidad Autónoma de Aguascalientes, mi *alma máter*, por todo su apoyo y financiamiento durante este proceso y experiencia tan enriquecedora en el ámbito profesional, académico y personal.

A Dios por darme la dicha de seguir en esta etapa de la investigación que, si alguien me hubiese preguntado al terminar la maestría, no me lo habría imaginado, ya que me estaba inclinando por la etapa profesional.

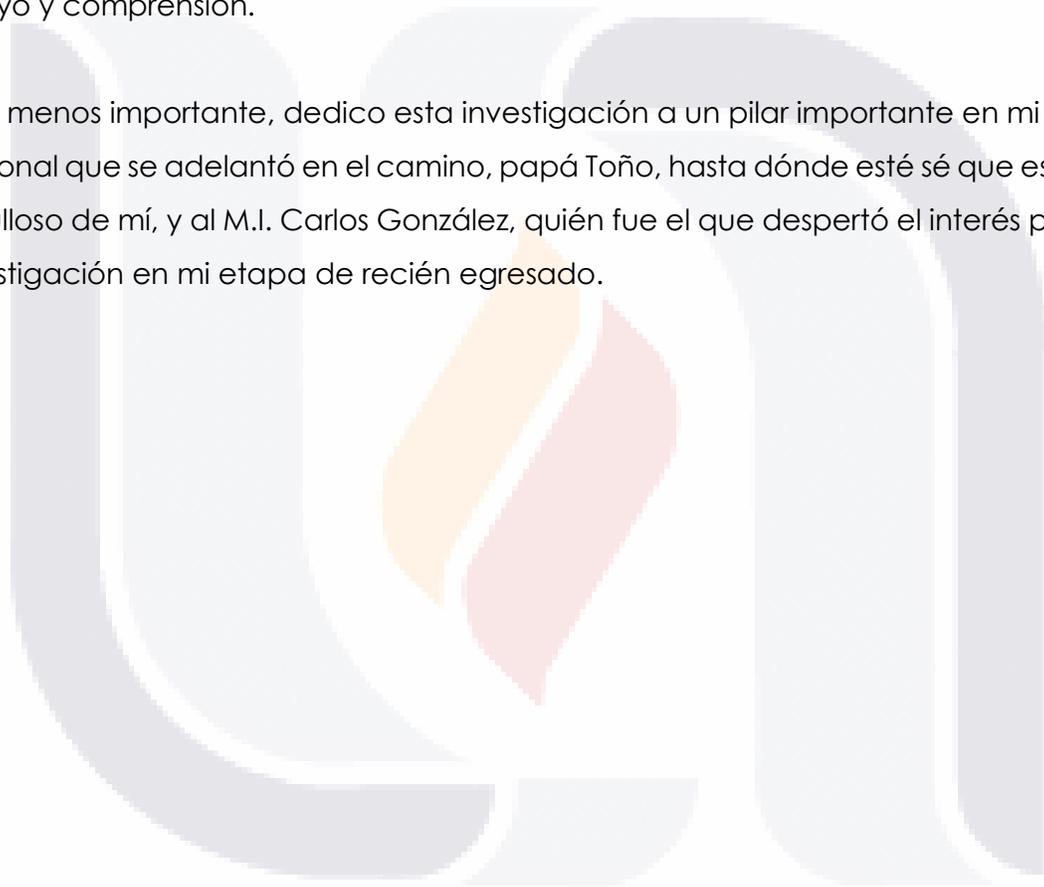
Y sobre todo, quiero expresar un eterno agradecimiento a mi tutor el Dr. Martín Hernández Marín por la infinita paciencia, asesorías, y atenciones durante estos tres años de esta interesante aventura, que, pese a una pandemia, vimos diferentes alternativas para que la falta de presencialidad no fuera excusa.

Por otro lado, quiero externar mi enorme gratitud para mis asesores, el Dr. Jesús Pacheco Martínez por las recomendaciones y asesoría en la etapa geofísica de esta investigación, al Dr. Roberto Rico Martínez y al Dr. Mario Alberto Arzate Cárdenas por la paciencia y finas atenciones en un tema que no iba con mi adn profesional netamente, pero la manera en la que me han explicado lo ha hecho más amigable, y por último al Dr. Anuard Isaac Pacheco Guerrero, que tan amablemente revisó y asesoró esta investigación en toda la etapa hidráulica, a todos ellos muchas gracias!

DEDICATORIAS

Esta investigación va dedicada a toda mi familia, empezando por mi esposa e hijo José Damián, que son esa dosis de inspiración día a día, que me mantiene a flote, a mis padres Martín y Coco, por impulsarme a no darme por vencido en todo el proceso, y a mi hermana Cristina que siempre estuvo al pendiente de mí con su apoyo y comprensión.

Y no menos importante, dedico esta investigación a un pilar importante en mi vida personal que se adelantó en el camino, papá Toño, hasta dónde esté sé que estará orgulloso de mí, y al M.I. Carlos González, quién fue el que despertó el interés por la investigación en mi etapa de recién egresado.



ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL..... 1

ÍNDICE DE TABLAS 3

ÍNDICE DE FIGURAS..... 4

SIGLAS Y ACRÓNIMOS 6

RESUMEN 7

ABSTRACT 8

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN 10

 1.1 Antecedentes..... 10

 1.2 Objetivo General 11

 1.3 Objetivos Particulares 11

 1.4 Alcances 11

 1.5 Definición del Problema 12

 1.6 Hipótesis 12

 1.7 Planteamiento general de campaña experimental 13

 1.8 Narrativa por capítulos 14

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE 18

 2.1 Conectividad vertical al acuífero entre agua superficial y acuífero asociado a actividades antrópicas..... 18

 2.2 Análisis de concentración y transporte de contaminantes en aguas subterráneas 21

 2.3 Identificación de zonas potenciales de contaminación de sistemas acuíferos 24

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO 28

 3.1 Ley de Darcy y flujo en medios porosos..... 28

 3.1.1 Flujo a través de acuíferos 28

 3.1.2 Ecuación de Richards..... 30

 3.1.3 Movimiento vertical del agua en el suelo bajo condiciones unidimensionales saturadas/no saturadas 30

 3.1.4 Modelo de Van Genutchen 31

 3.2 Métodos geofísicos y resistividad en materiales geológicos..... 32

 3.3 Sondeos eléctricos verticales..... 32

3.3.1 Arreglo Wenner36

3.3.2 Arreglo Schlumberger.....36

3.4 Calidad de aguas residuales y superficiales37

3.5 Pruebas de toxicidad en agua residual.....39

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA..... 43

4.1 Etapa espacial 43

4.2 Etapa Hidráulica..... 44

4.3 Etapa geofísica 46

4.4 Etapa hidrogeoquímica50

CAPÍTULO V: RESULTADOS..... 53

5.1 Descripción de la zona de estudio..... 53

5.2 Análisis de resultados de caracterización hidráulica 53

5.3 Análisis de resultados de caracterización geofísica 56

5.4 Análisis de resultados de caracterización hidrogeoquímica 64

CAPÍTULO VI: DISCUSIONES 68

6.1 Correlación entre nivel estático con interpretación de resultados de los SEV 68

6.2 Correlación entre pruebas de toxicidad con resultados de calidad del agua de pozos cercanos a la zona de estudio.....77

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES80

7.1 Conclusión general.....80

7.2 Conclusiones particulares80

7.3 Nichos de investigación82

GLOSARIO83

REFERENCIAS.....85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Límites permisibles establecidos para Promedio Diario (P.D.) y Promedio Mensual (P.M.) , Valor Instantáneo (V.I.) según corresponda al tipo de cuerpo receptor.37

Tabla 2. Límites permisibles establecidos para Metales y Cianuros.....37

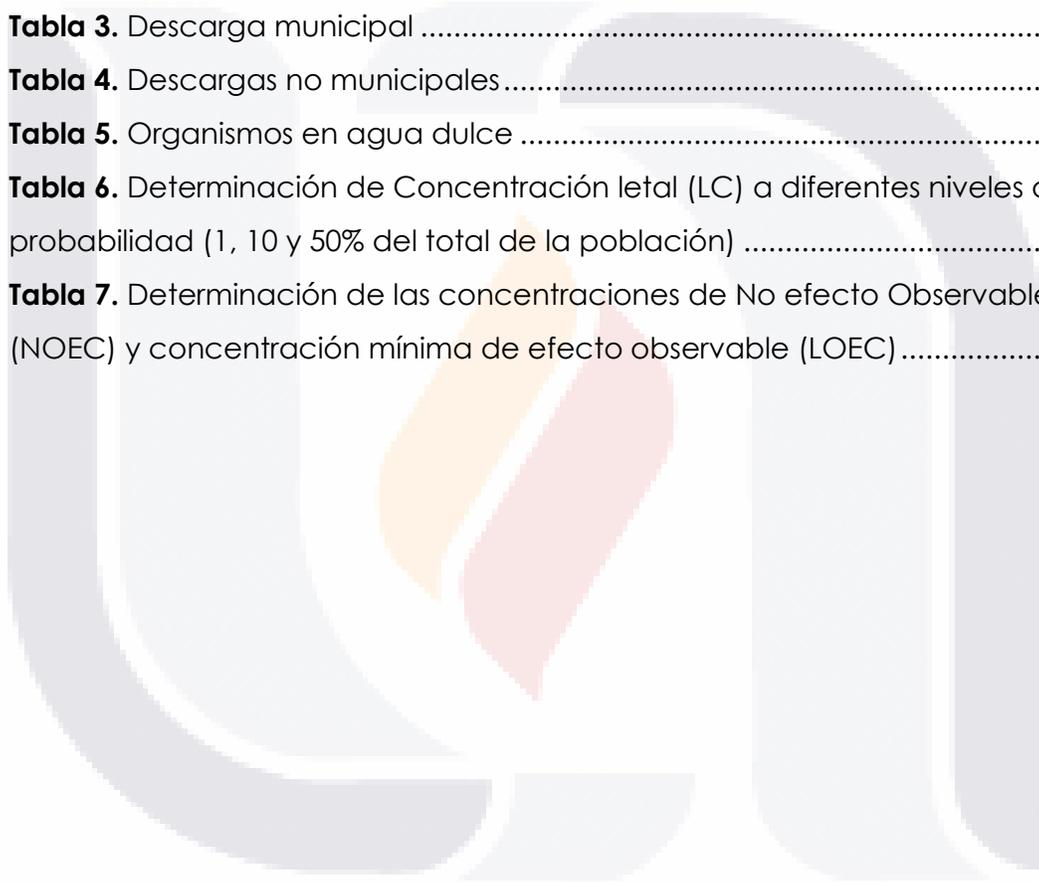
Tabla 3. Descarga municipal38

Tabla 4. Descargas no municipales.....39

Tabla 5. Organismos en agua dulce40

Tabla 6. Determinación de Concentración letal (LC) a diferentes niveles de probabilidad (1, 10 y 50% del total de la población)64

Tabla 7. Determinación de las concentraciones de No efecto Observable (NOEC) y concentración mínima de efecto observable (LOEC) 65



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Valores de resistividad en diferentes materiales geológicos.....	35
Figura 2. Arreglo Wenner.....	36
Figura 3. Arreglo Schlumberger.....	36
Figura 4. Descripción de metodología.....	43
Figura 5. Zona de estudio río San Pedro, Aguascalientes; Ags.	44
Figura 6. Identificación de zonas de retención.....	45
Figura 7. Esquema descriptivo de los SEV	47
Figura 8. Proceso en campo para realización de los SEV	48
Figura 9. Trabajo de campo en los SEV.....	49
Figura 10. Dispositivo experimental para pruebas de toxicidad.....	50
Figura 11. Ejecución de muestreos para pruebas de toxicidad en campo/dispositivo a) Muestreo de agua en zona de estancamiento en SEV 03 salida a Calvillo.	51
Figura 12. Localización del tramo del río San Pedro sobre el cual se realizó el estudio.....	54
Figura 13. Zonas retención de agua en río San Pedro; Aguascalientes	55
Figura 14. Histórico de niveles de extracción de pozos cercanos a la zona de estudio.....	57
Figura 15. Histórico de niveles de extracción de pozos cercanos a la zona de estudio.....	58
Figura 16. Red de flujo hidrogeológico en río San Pedro Aguascalientes.....	59
Figura 17. Inversión de SEV01 y SEV02.....	60
Figura 18. Inversión de SEV03 y SEV04.....	61
Figura 19. Procesamiento de SEV	62
Figura 20. Sondeos eléctricos verticales en río San Pedro.....	63
Figura 21. Pruebas de toxicidad en zonas de retención del río San Pedro	66
Figura 22. Correlación de resultados SEV03 con pozo 101 CNA.....	69

Figura 23. Interpretación de resultados SEV 03 de acuerdo con referencias bibliográficas70

Figura 24. Correlación de resultados SEV04 con pozo 067 CNA.....71

Figura 25. Interpretación de resultados SEV 04 de acuerdo con referencias bibliográficas72

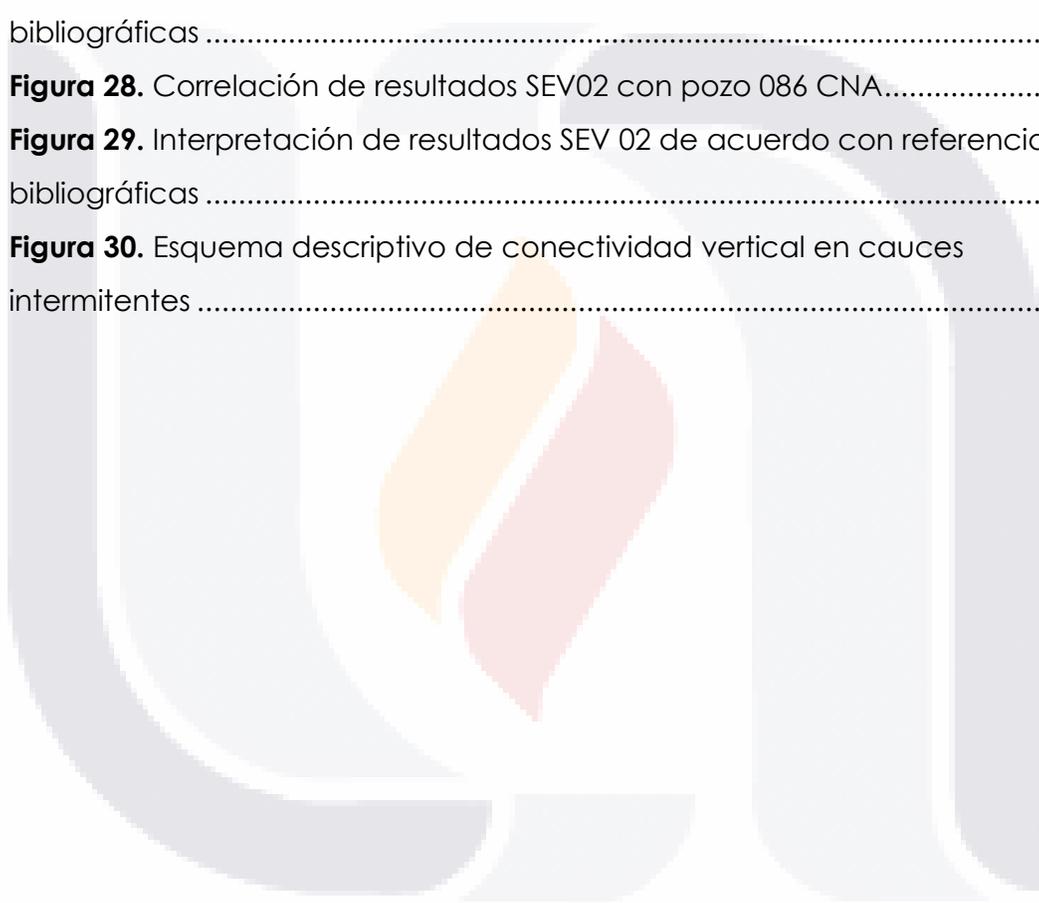
Figura 26. Correlación de resultados SEV01 con pozo 067 CNA.....73

Figura 27. Interpretación de resultados SEV 01 de acuerdo con referencias bibliográficas74

Figura 28. Correlación de resultados SEV02 con pozo 086 CNA.....75

Figura 29. Interpretación de resultados SEV 02 de acuerdo con referencias bibliográficas76

Figura 30. Esquema descriptivo de conectividad vertical en cauces intermitentes78



SIGLAS Y ACRÓNIMOS

CNA	Comisión Nacional del Agua
HEC-RAS	Centro de Ingeniería Hidrológica- Sistema de Análisis de Ríos (Hydrologic Engineering Center- River Analysis System)
IHA	Indicadores de alteración hidrológica (Indicators of Hydrologic Alteration)
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
QGIS	Quantum GIS
SEV	Sondeos Eléctricos Verticales
SIATL	Simulador de flujos de agua de cuencas
SIG	Sistemas de Información Geográfica
TNC	Conservación natural (The Nature Conservancy)
VES	Vertical Electrical Sounding

RESUMEN

En este trabajo se realiza una caracterización hidrogeológica de un tramo de 14 km del río San Pedro, que fluye por el centro del Valle de Aguascalientes. Se procesaron registros de más de 50 años de gastos de aforo, obteniendo caudales base de caudal diario en épocas de sequía y época de lluvias, también se identificaron zonas de estancamiento generadas por la topografía y la acumulación de sedimentos asociados a la época de crecidas, además, mediante un análisis geoespacial se reconocieron las intersecciones entre estas las zonas de estancamiento y la traza de discontinuidades superficiales. Por otro lado, mediante sondeos eléctricos verticales (SEV) se evaluó la potencial conectividad hidráulica entre la superficie y el acuífero en las zonas identificadas de estancamiento. Finalmente, mediante un dispositivo experimental, se evaluó la potencial retención de contaminantes por cloruros y nitratos del agua del río San Pedro, a través del suelo local. Los resultados muestran que, en el tramo estudiado del Río San Pedro, hay tres áreas de retención hidráulica, de las cuales, una es interceptada por una discontinuidad superficial. Además, según los resultados de los VES, el nivel freático en las zonas de estancamiento varía, entre 70 a 90m de profundidad, por otra parte, a partir de los resultados de las pruebas con contaminantes, se pudo observar que la toxicidad se reduce en los muestreos del efluente que sale del dispositivo. La conectividad vertical en corrientes de tipo intermitente hacia sistemas acuíferos es evidente a niveles subsuperficiales, ya que las pruebas geofísicas efectuadas en la zona de estudio mostraron hallazgos de estratos con bajos niveles de resistividad asociados a tener contacto con la zona vadosa. Por otro lado, los trabajos experimentales del dispositivo sugieren que el suelo está actuando cómo un filtro para el transporte de contaminantes.

Palabras clave: conectividad vertical, zona vadosa, sondeos eléctricos verticales, pruebas de toxicidad

ABSTRACT

In this work, a hydrogeological characterization of a 14 km section of the San Pedro River, which flows through the center of the Aguascalientes Valley, is carried out. Records of more than 50 years of gauging expenses were processed, obtaining base flows of daily flow in times of drought and the rainy season, stagnation areas generated by the topography and the accumulation of sediments associated with the flood season were also identified. In addition, through a geospatial analysis, the intersections between these stagnant zones and the trace of surface discontinuities were recognized. On the other hand, through vertical electrical soundings (VES) the potential hydraulic connectivity between the surface and the aquifer was evaluated in the identified stagnant zones. Finally, by means of an experimental device, the potential retention of pollutants by chlorides and nitrates from the water of the San Pedro River, through the local soil, was evaluated. The results show that, in the studied section of the San Pedro River, there are three hydraulic retention areas, one of which is intercepted by a superficial discontinuity. In addition, according to the results of the VES, the water table in the stagnant zones varies, between 70 to 90m deep. On the other hand, from the results of the tests with contaminants, it was possible to observe that the toxicity is reduced in the samples of the effluent leaving the device. The vertical connectivity in intermittent currents towards aquifer systems is evident at subsurface levels, since the geophysical tests carried out in the study area showed findings of strata with low levels of resistivity associated with having contact with the vadose area. On the other hand, the experimental work of the device suggests that the soil is acting as a filter for the transport of contaminants.

Keywords: Vertical connectivity, vadose zone, vertical electrical sounding, toxicity tests



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El transporte de contaminantes con potencial afectación a los sistemas hidrológicos, como corrientes superficiales y acuíferos, es un problema que ha tomado importancia en los últimos años en nuestro país, derivado principalmente a las actividades antropogénicas, como el aumento de población, industria, agricultura y ganadería (Verma et al., 2012).

Algunos fenómenos, que se pueden observar a simple vista, alertan continuamente del deterioro provocado por el uso inadecuado de los recursos naturales, aunque hay otros en los que se necesita una investigación más detallada para detectarlos. Lo que es un hecho, en cualquiera de los casos, los efectos negativos por contaminación en los sistemas hidrológicos se deben en principal medida por procesos de urbanización (Harbuľáková, Zeleňáková et al., 2016).

En los últimos años, en diversas partes del mundo, se han observado cambios en el entorno natural de los ríos debido a la presencia de infraestructuras, como presas principalmente, así como vertederos, descargas de alcantarillado o diques, entre otros. Sin embargo, en la actualidad, estas construcciones deben cumplir con ciertas consideraciones, como la disponibilidad de agua y la presión de uso (Conallin et al., 2017; Datry et al., 2014).

Las características de los ríos y arroyos están estrechamente relacionadas con las cuencas hidrográficas a las que pertenecen. El impacto sobre todo en el aspecto social y ambiental de esta relación se puede ilustrar al considerar los efectos de la urbanización. En este contexto, no solo la precipitación influye en la magnitud, duración y tiempo de escurrimiento del agua, sino también otros factores como la infiltración en el subsuelo, la evaporación y la transpiración de las plantas (Reyes-Cedeño et al., 2023).

Por estas razones, es de vital importancia comprender la respuesta hidráulica del suelo y su papel en el proceso de transporte de contaminantes. Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo es contribuir a la comprensión de la relación entre el agua superficial y la interacción con el acuífero a través de la zona vadosa.

1.2 Objetivo General

Establecer la relación entre la interacción agua superficial y acuífero a través de la zona vadosa y el comportamiento de ésta en el transporte de contaminantes.

1.3 Objetivos Particulares

1. Identificar las zonas de estancamiento hidráulico del tramo del río seleccionado de tipo intermitente bajo el análisis mediante modelación hidráulica de flujo base y análisis geoespacial.
2. Identificar mediante análisis geoespacial, las zonas de estancamiento hidráulico que interceptan a discontinuidades geológicas.
3. Utilizar el método geofísico de sondeos eléctricos verticales (SEV) para establecer la potencial conectividad hidráulica entre las zonas de estancamiento con el acuífero.
4. Realizar pruebas de toxicidad para evaluar el flujo de los contaminantes más comunes en las zonas de estancamiento.

1.4 Alcances

Esta investigación es de carácter exploratorio, pues lo que se pretende es aportar información general respecto a la conectividad vertical que existe entre el agua superficial, en particular aquella del río San Pedro con el acuífero, y por ende, una antesala para encontrar futuros nichos de investigación del comportamiento del suelo en dicho proceso.

Para las caracterizaciones geoespaciales se utilizó el programa QGIS, en el cual se pudo extraer información utilizada en la etapa hidráulica para el análisis del flujo base que circula por el cauce seleccionado en la zona de estudio. Para la modelación de los gastos se utilizó el programa HECRAS para identificar los puntos de conectividad vertical entre agua superficial y acuífero, dónde esos mismos puntos fueron analizados mediante sondeos eléctricos verticales utilizando un resistivímetro y procesados con el software IPI2WIN. Esta investigación se centra únicamente en la identificación y análisis de esos puntos de conectividad vertical.

1.5 Definición del Problema

La contaminación en ríos o arroyos de tipo intermitente, cómo es el caso de la red de drenaje natural del Valle de Aguascalientes, es perjudicial para el entorno misma que se tomará cómo zona de estudio, por lo que realizar una investigación de la relación suelo y como ésta ayuda a mitigar la propagación al acuífero, puede generar un panorama más amplio para comprender la conectividad vertical entre agua superficial y acuífero a través de la zona vadosa.

Por otra parte, la inclusión de herramientas como la modelación hidráulica, los sondeos eléctricos verticales y pruebas de toxicidad en las márgenes de un río natural muestra un enfoque metodológico multidisciplinar para abordar el problema de la conectividad vertical y la cuál favorece a la aportación entendimiento de esta problemática.

1.6 Hipótesis

“A través de la modelación hidráulica y sondeos eléctricos verticales se identificaron puntos de conectividad hidráulica entre el tramo seleccionado y el acuífero, en el cuál dan indicadores de que el suelo se

comporta cómo un filtro para los contaminantes, pues las pruebas de toxicidad dan resultados de reducción de concentración letal en muestras que pasan por el suelo caracterizado en las zonas de estancamiento”

“La profundidad de la zona saturada encontrada con los SEV se aproxima a las profundidades de nivel estático de pozos de extracción cercanos al tramo de cauce natural seleccionado, por lo que la red de drenaje natural se comporta cómo punto de recarga natural”.

1.7 Planteamiento general de campaña experimental

La metodología tiene énfasis en realizar un análisis del comportamiento del suelo asociado al transporte de contaminantes abarcando tres puntos:

- Potencial conectividad dl acuífero por conectividad vertical del acuífero provocado por actividades antropogénicas.
- Análisis de concentración y transporte de contaminantes en aguas subterráneas.
- Identificación de zonas potenciales a contaminación del acuífero.

La presente investigación se compone de varias etapas para lograr los objetivos planteados al inicio de esta:

Etapas Espaciales

Se delimitó un tramo sub-urbano de la región (río San Pedro) utilizando sistemas de información geográfica. Una vez seleccionado se definieron los principales rasgos geomorfológicos del área de estudio, y se identificó de proximidad con pozos de extracción utilizando generación de líneas isopiezométricas.

Etapa Hidráulica

Se realizó un análisis y procesamiento de gastos de aforo para obtener los caudales base, utilizando una metodología enfocada en ríos o arroyos de tipo intermitente. Posteriormente, se llevó a cabo una modelación de caudales base para obtener zonas de retención, asumiendo que son las zonas de conectividad vertical más probables con el acuífero en la zona.

Etapa Geofísica

Se realizó una caracterización geofísica para obtener zonas de infiltración en los márgenes del cauce y se obtuvieron datos para para entender mejor la dinámica del flujo subsuperficial de la zona.

Etapa Hidrogeoquímica

Se realizaron muestreos de suelo alterado en diferentes puntos dentro de la zona de estudio, y se realizaron campañas experimentales con diferentes contaminantes en una columna de suelo cómo posible mitigador de la contaminación del acuífero, para ello se realizaron varias pruebas de toxicidad en efluente de la columna de suelo.

1.8 Narrativa por capítulos

CAPITULO I

En el capítulo primero, se presenta la introducción y planteamiento del problema. Enseguida se plantea el objetivo general de estudio y se definen los objetivos particulares, así como los alcances de este. Por último, se presenta una descripción general la metodología.

CAPITULO II

En el segundo capítulo se muestra un panorama general del estado actual del conocimiento situando al lector en el contexto de los estudios referentes a la conectividad vertical entre acuífero y agua superficial, además del análisis de contaminantes en agua superficial y metodologías para la identificación de zonas potenciales a contaminación, que se favorecerán para desarrollar la campaña experimental de la investigación.

CAPITULO III

En este capítulo se presentan conceptos, fórmulas y modelos que se utilizan en el desarrollo de la metodología de la investigación, y que permitirán al lector familiarizarse con el tema. Se abordan temas desde definiciones y aspectos generales del flujo en medios porosos, además de principios básicos de modelación numérica en cauces naturales y aspectos básicos de los SEV.

CAPITULO IV

Se muestra de manera detallada la metodología que se empleó en la investigación, considerando cuatro etapas de desarrollo: espacial, hidráulica, geofísica e hidrogeoquímica; además de las herramientas y modelos matemáticos a utilizar para el desarrollo de la campaña experimental.

CAPITULO V

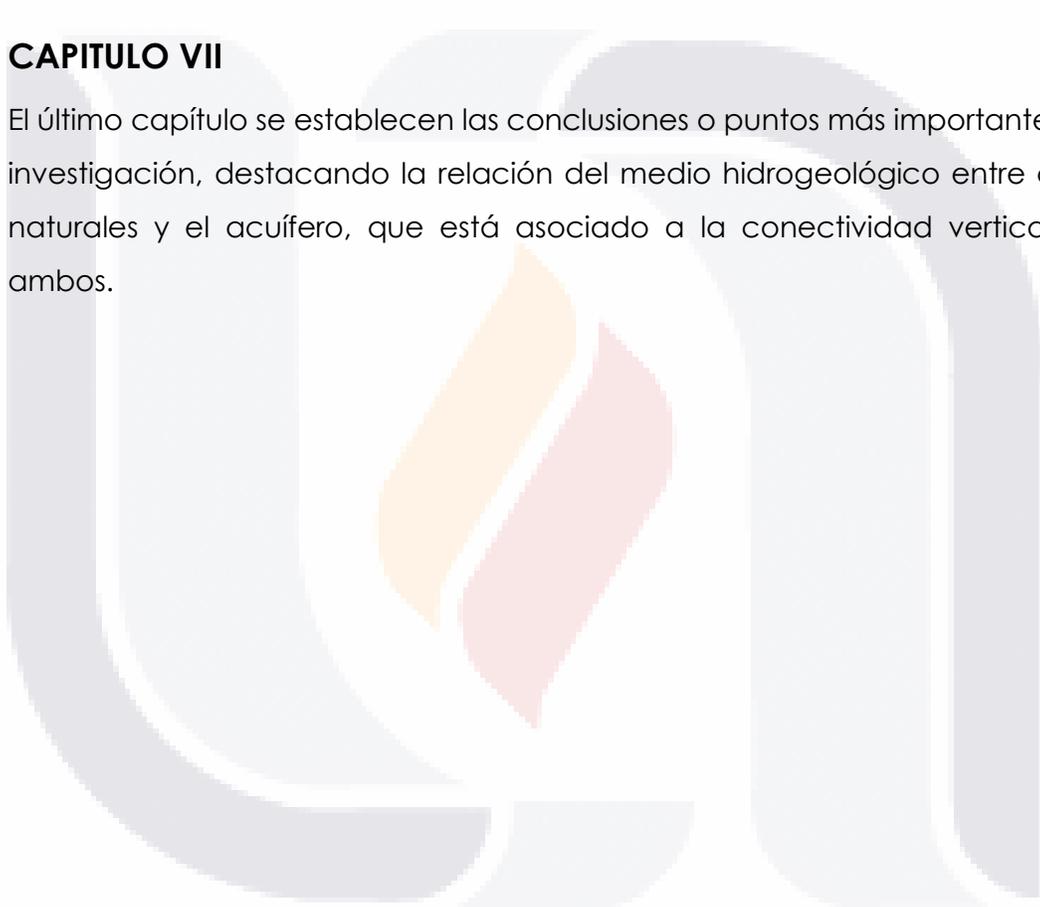
En este capítulo se presentan los resultados de la metodología con un informe desarrollado a partir del desglose de las cuatro etapas ya mencionadas, en las que se observa la descripción de la zona de estudio, la modelación del tramo suburbano del cauce seleccionado, los niveles encontrados además de la ubicación de las zonas de retención, para posteriormente en el bloque hidrogeológico mostrar puntos importantes en la ejecución de los sondeos eléctricos verticales para analizar los puntos de conectividad vertical entre el acuífero y el agua superficial. Por último, se muestra la correlación de los resultados con los muestreos de agua asociados a la columna de suelo característica de la zona de estudio.

CAPITULO VI

Se muestran las discusiones de los puntos más significativos de los resultados obtenidos en la campaña experimental, resaltando la correlación de los sondeos eléctricos verticales con los niveles estáticos de pozos aledaños, además del vínculo entre la relación suelo de la estratigrafía con el transporte de contaminantes.

CAPITULO VII

El último capítulo se establecen las conclusiones o puntos más importantes de la investigación, destacando la relación del medio hidrogeológico entre cauces naturales y el acuífero, que está asociado a la conectividad vertical entre ambos.





CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE

2.1 Conectividad vertical al acuífero entre agua superficial y acuífero asociado a actividades antrópicas.

Para analizar los problemas en recursos hídricos subterráneos, provocado por actividades antropogénicas, se han establecido hoy en día, modelos del régimen de flujo de agua en los sistemas acuíferos, ya que permiten evaluar el comportamiento de agua a diferentes escenarios, sobre todo a escala regional, los cuáles se mencionan a continuación.

Dong et al., (2012), realizó modelaciones con el programa MODFLOW utilizando el método ARD (Areal Recharge and Discharge) de la cuenca del río Pinggu en China, de una extensión de 459 km². Este método permite simular eficientemente la recarga producida por la precipitación, conjuntando información de una posible recarga simultánea generada por la infiltración de los sistemas de riego.

Por otra parte, Campos Moreno (2016) , realizó una estimación del volumen de escurrimiento y su potencial infiltración a través de discontinuidades geológicas, donde la metodología empleada en su campaña experimental puede ser adaptada a esta investigación con el fin de realizar la caracterización geofísica del área de estudio utilizando perfiles de resistividad por el método de sondeo eléctrico vertical (SEV), en los cuales, se pudo inferir que la infiltración del agua es mayor en el sentido longitudinal más que transversalmente a la discontinuidad geológica.

Otra investigación enfocada a conectividad vertical, es la de Zermeño Villalobos (2016) investigó la zona vadosa del valle de Aguascalientes en relación a los tiempos de retención de humedad, utilizando la ecuación de Richards en el programa COMSOL Multiphysics. Se dan a conocer los tiempos de tránsito para

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

diferentes espesores hidrogeológicos de la zona vado del valle de Aguascalientes, conjuntando información litológica, geológica y geofísica.

Por otra parte, Pacheco-Guerrero et al., (2017) acopló modelos hidrológicos e hidráulicos en 2D para tomar las pérdidas de transmisión del canal colocando puntos de control a lo largo de las secciones de la cuenca Walnut Gunch. Se instalaron dos modelos hidráulicos, el primero no incorpora un canal transmisión y el segundo fue desarrollado para tener en cuenta varios hidrogramas con pérdidas de transmisión como condiciones límite, considerando las pérdidas por infiltración.

Además, González-Trinidad et al., (2017) trabajó en la caracterización isotópica de la lluvia y las aguas subterráneas para poder obtener potenciales sitios de recarga en la cuenca de Calera, Zacatecas, tomando como variables principales la zona de fallas y grietas en conjunto con la red hidrográfica de la zona, además de muestreos de agua de isótopos estables. Por otro lado, Guerrero-Martínez et al., (2018), realizó un análisis y evaluación de la recarga de agua subterránea utilizando la ecuación linealizada de Boussinesq y la técnica Water Table Fluctuation (WTF) que involucra variables de rendimiento específico, variación de nivel freático y drenaje subsuperficial de aguas subterráneas. Estas variables funcionaron de apoyo para el mapeo de zonificación, además el modelo numérico que utilizan funciona como parteaguas de la relación suelo en el transporte de contaminantes.

En la investigación de Hernández-Guerra (2018), se presenta una caracterización hidráulica de la falla oriente para determinar la velocidad de flujo que pasa a través de ellos. Los resultados obtenidos muestran una relación de discontinuidades superficiales con una posible infiltración de aguas pluviales que puede permitir a su vez la recarga y/o contaminación del acuífero. La metodología geofísica empleada en esta investigación y el análisis de la dinámica de flujo puede ayudar a detallar los objetivos particulares por cumplir.

Una investigación internacional cómo la de Shishaye et al., (2019) quiénes llevaron a cabo una caracterización en macro escala de la cuenca Haramaya en Etiopía que se ha sobreexplotado por actividades antropogénicas. En el estudio se utilizaron registros de perforación, pruebas de bombeo, y estudios profundos de geofísica utilizando sondeos eléctricos verticales, metodología que servirá para aplicarla en la investigación para obtener datos de profundidades mayores.

Por otro lado, Aguilar-García y Ortega-Guerrero, (2017), realizó un análisis de la dinámica del agua en la zona no saturada por medio de mediciones diarias de diferentes parámetros meteorológicos y de perfiles de humedad. El procedimiento que utilizaron para obtener la estratigrafía de la zona de estudio fue a través de perfiles de resistividad, mientras que el contenido de humedad se determinó utilizando Refractometría en el Dominio del Tiempo (RDT) y la permeabilidad saturada se cuantificó con el Permeámetro de Guelph. Estas pruebas pueden ayudar a la campaña experimental del suelo/roca como posible filtro de diferentes contaminantes.

Referente a las condiciones hidrogeológicas en México, Hernández-Marín et al., (2018) publicaron un artículo referente a la variación espacial y temporal asociado con la recarga natural del acuífero, Esta metodología de análisis geoespacial puede ser aplicada para desarrollar la cartografía de los puntos de muestreo y sus resultados de zonas potenciales a contaminación.

Yin et al., (2011), realizaron una comparación de criterios para la estimación de recarga en la cuenca de Ordos, China, encontrando los niveles con mayor similitud en las teorías del método WTF, Zona Saturada Darciana y con variación espacio temporal similar, ya que las zonas con mayor potencial de recarga es en la zona oriente con estratigrafía. Las variables para estimar la recarga, y la comparación de los criterios puede funcionar para utilizarla como relación de la conectividad vertical del medio hidrogeológico con el hidrogeológico.

Zhang et al., (2019), relacionan la variación por periodos de lluvia con el PRC (Precipitation Recharge Coefficient) en la cuenca Ordos en China. En su estudio utiliza dos métodos para estimar la recarga por el método WTF e isótopos estables de hidrógeno y oxígeno, cuyos resultados muestran un aumento del doble del coeficiente de recarga en temporada invernal (octubre-marzo). Estos métodos permiten conocer la interacción precipitación-infiltración y niveles de extracción para comprender el comportamiento del flujo hidrogeológico.

2.2 Análisis de concentración y transporte de contaminantes en aguas subterráneas

Para proponer algún método que tenga correlación con calidad de agua y transporte de contaminantes en la interacción entre agua superficial y acuífero, se revisaron diferentes investigaciones acerca de calidad del agua en ríos y arroyos intermitentes, además de cómo funciona el transporte de contaminantes hacia el acuífero los cuáles se mencionan a continuación.

Guzmán-Colis et al., (2011), evaluaron la variación espacio-temporal de las concentraciones de materia orgánica, nutrientes, tóxicos orgánicos y organismos coliformes y metales pesados en el río San Pedro, Aguascalientes; caracterizando geoquímicamente aproximadamente 90 km del cauce que recibe la aportación de 24 corrientes auxiliares y cerca del 96 % de las aguas residuales tratadas y crudas generadas por los diversos sectores.

Torres-Guzmán et al., (2010) utilizaron dos pruebas de toxicidad (*Daphnia Magna* & *Lecane Quadridentata*) en las principales plantas de tratamiento del estado de Aguascalientes, durante época de sequía y de lluvia. Se observó que los valores de DBO5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno) y DQO (Demanda Química de Oxígeno), oxígeno disuelto, conductividad y Ph cumplían con los niveles

máximos permitidos por la NOM-001. Sin embargo, los niveles de Al, Fe, Zn, Mn, Pb y As estaban por encima de los niveles permitidos.

Avelar González et al., (2011), en su trabajo presentan un análisis de las características del agua subterránea en el estado de Aguascalientes, utilizando la normatividad de calidad del agua en el país, para evaluar los efectos de la presencia de altos contenidos de fluoruros y arsénico que a su vez generan daños en la salud de la población.

Aragón-Sulik et al., (2015), realizaron una investigación para comprobar la existencia de arsénico en pozos de extracción de agua para consumo humano y además determinó su alcance geográfico, tomando como zona de estudio los Valles Centrales de Oaxaca. Por la geología de la zona, el incremento en arsénico se asocia a formaciones circundantes de riolitas y que es agua con mucho tiempo de confinamiento.

Esteller et al., (2012), realizaron una evaluación del impacto asociado a la sobreexplotación de los sistemas acuíferos, caracterizando tres zonas de estudio en Valle de Toluca, Salamanca y San Luis Potosí. Encontró en sus resultados que la mayoría de los elementos que predominan son fluoruros, arsénico y manganeso, esto es derivado de la profundidad en la que son extraídos, ya que se trata de aguas subterráneas fósiles que requieren un tratamiento adicional para que el consumo no genere problemas en la salud.

Soud et al., (2017), mostraron una caracterización hidrogeoquímica para evaluar la contaminación del acuífero Djerba al sudeste de Túnez (acuífero arenoso no confinado), cuya alteración está vinculada con la intrusión de agua de mar y actividades antropogénicas. En la caracterización, encontró altos valores de nitrato en los 70 pozos caracterizados, y en la investigación de impacto social se encontró que esos niveles están asociados con las fosas sépticas que no son impermeables y cuya infiltración afecta al acuífero.

Djorfi et al., (2017), presentaron una investigación referente al análisis de riesgo por contaminación del acuífero Kherraza en el noreste de Algeria. Para evaluar el índice de riesgo, tomaron en cuenta los factores a exposición diaria de diferentes contaminantes asociado a los límites máximos permitidos en la región, tomando datos de 34 pozos de extracción. Al final, se determinó que existe un índice de riesgo alto provocado en gran medida por el avance en actividades agrícolas e industriales de la región.

Xanke et al., (2015) realizaron una caracterización hidrogeológica del reservorio Wala en Jordania. La investigación se enfocó en un anteproyecto de recarga natural de acuíferos kársticos. El estudio presentó la caracterización hidrológica, hidrogeológica, química, geofísica y un modelo conceptual para ayudar a entender el flujo en medios porosos de acuíferos de este tipo.

Dragon et al., (2016) presentaron un estudio en la cuenca de Tusko, Polonia, para analizar la contaminación del acuífero. Realizando monitoreos en la región se encontró alta evidencia de alteración del flujo subterráneo derivado del uso excesivo de fertilizantes. El método de análisis espacio-temporal que utilizaron en ese trabajo puede funcionar como base para la modelación de diferentes contaminantes a través del acuífero.

Chitsazan et al., (2017) presentaron un análisis espacio temporal de la concentración de nitrato en el acuífero Karaj, en Irán. Se correlacionó la concentración de nitrato con los niveles piezométricos de 194 pozos, donde asocian a las velocidades de transmisibilidad con el medio geológico. Este artículo sirvió de base en la metodología para determinar diferentes concentraciones de contaminantes en márgenes de cauces principales.

Salinas-Reyes y Ortega-Guerrero (2019) realizaron un análisis en aguas subterráneas utilizando Elementos de Tierras Raras (ETR) y determinaron la

interacción con medios granulares y fracturados en dos provincias geológicas en el centro de México: la Mesa Central y la Faja Volcánica Mexicana. Los ETR funcionaron como trazadores naturales en la definición del flujo regional en este medio geológico complejo.

García et al., (2010), realizaron una modelación numérica utilizando redes neuronales artificiales en el transporte de contaminantes en aguas subterráneas tomando un caso hipotético de clases texturales de suelo. En la modelación consideraron la ecuación de Ogata y Banks, que involucra variables como lo son porosidad efectiva y conductividad hidráulica.

Zhao et al., (2013), correlacionaron espacialmente la urbanización con la contaminación del agua en cauces naturales, tomando como zona de estudio la cuenca del lago Taihu en China, mediante una caracterización de diferentes zonas de muestreo en la red de drenaje de la cuenca, obteniendo datos de demanda de oxígeno, total de nitrógeno y fósforo. Los resultados los correlacionaron utilizando un procesador de datos espaciales en ArcGIS, con LISA (Local Indicators of Spatial Association).

2.3 Identificación de zonas potenciales de contaminación de sistemas acuíferos

Por último, en el presente apartado se citan los diferentes artículos que se analizaron y revisaron para considerar detalles en la metodología geoespacial para identificación de zonas potenciales a contaminación, los cuáles se mencionan a continuación.

Por ejemplo, Ávila-Sandoval et al., (2018) integraron la determinación de los sistemas de flujo presentes en el acuífero Calera, y la definición de los niveles de fondo natural en cada sistema de flujo al hacer mapas de estimación en ArcGIS para evaluar la variación espacio-temporal del arsénico en el agua subterránea. Los resultados indicaron un aumento notable en la probabilidad de exceder el

NBL de arsénico, principalmente en el flujo intermedio, que puede deberse al movimiento resultante de las actividades mineras.

Por otra parte, para realizar un análisis cualitativo de la contaminación, existen estudios como el de González-Trinidad et al., (2017), quienes utilizaron una matriz cualitativa para asignar diferentes valores para estimar el potencial de una cubierta de tierra específica, esa base de metodología puede apoyar para la realización del análisis cartográfico. La matriz se combinó con un análisis cuantitativo de los cambios en la cubierta terrestre en el acuífero de Aguanaval, dentro de la zona central del estado de Zacatecas, México.

Además, Boughariou et al., (2015), en su artículo muestran una metodología utilizando SIG's para realizar un mapeo de principales zonas de recarga en la región Sfax, de clima árido en el sur de Túnez. La metodología se basa en una matriz en la cual les asigna diferentes pesos a las variables de: pendiente, litología, densidad de drenaje y topografía. Además, utilizaron 4 métodos numéricos para estimar la recarga natural: ERAS (estimación de recarga en acuíferos sobreexplotados), la ecuación de Schoeller, ecuación de Fersi, y método DGRE, presentando un mapeo comparativo entre ambos.

Aplicando álgebra de mapas, Díaz-García y Sanvicente-Sánchez, (2011), realizaron una propuesta de metodología para encontrar zonas potenciales a recarga en la zona Metropolitana de la Ciudad de México utilizando una matriz multicriterio, en la cual utilizó diferentes variables como: porosidad, uso de suelo y litología. De una manera similar, Lima et al., (2013) en su artículo, mostraron un modelo para evaluar la contaminación del acuífero en Pampa Argentina. Utilizando los modelos de vulnerabilidad DRASTIC y GOD se creó una nueva matriz en la que se evaluaron variables como profundidad, recarga, porosidad, geología, conductividad hidráulica, cobertura de suelo y topografía.

Por otra parte, Foster et al., (2013) realizaron una investigación en la que presentan un marco teórico referente a la evaluación de la vulnerabilidad por contaminación del acuífero, realizando una clasificación de diferentes clases de vulnerabilidad con diferentes tipos de contaminantes y contramedidas requeridas para remediación.

Finalmente, Yin et al., (2013) llevaron a cabo un análisis DRASTIC para evaluar la vulnerabilidad a contaminación del acuífero en la cuenca Ordos en China, utilizando variables como conductividad hidráulica, profundidad de extracción, recarga neta, topografía, litología e impacto de la zona vadosa.



CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO



CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta un resumen de los principales fundamentos de hidrogeología que entran en los alcances del marco conceptual de la investigación, además de mencionar lo que son los sondeos eléctricos verticales (SEV) y cuáles son las consideraciones que se tomaron en cuenta para el desarrollo de la campaña experimental de la investigación.

Para realizar un análisis de conectividad vertical entre acuífero y agua superficial, el vínculo es la interacción del suelo que existe entre ambos, por lo tanto, el analizar el flujo de agua en medio poroso implica considerar un material compuesto por dos fases: una matriz sólida que a través de esta tiene un sistema de poros (huecos) que pueden estar conectados entre sí. Esto varía dependiendo el tipo de suelo, geometría, topología u origen de formación.

Por lo tanto, el comprender el vínculo entre la probable filtración del agua superficial entra en el suelo bajo la acción de la gravedad y de la fuerza capilar ayuda al análisis de las principales variables de interés en la investigación.

3.1 Ley de Darcy y flujo en medios porosos

3.1.1 Flujo a través de acuíferos

El flujo a través de acuíferos se representa mediante la ley de Darcy. Dicha ley establece que la tasa de flujo a través de medios porosos es proporcional a la pérdida de carga e inversamente proporcional a la longitud de la trayectoria de flujo, expresado mediante la siguiente ecuación

$$Q = vA = -kA \left(\frac{dh}{dl} \right) \quad (1)$$

Dónde

Q : es el gasto total

A : área transversal

v : velocidad

k : conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad, es una tasa de flujo de agua a través de un área transversal unitaria del acuífero bajo un gradiente de presión unitario.

$\left(\frac{dh}{dl}\right)$: tasa de pérdida de carga por unidad de longitud de un medio poroso

Además, en la consideración del efecto del bombeo de agua desde un acuífero, se remueve el agua que rodea al pozo produciendo una disminución del nivel de la superficie libre en acuíferos libres, o de la superficie piezométrica en acuíferos confinados. La disminución del nivel de abatimiento se conoce cómo s .

La curva de abatimiento de un flujo radial a un pozo describe un cono de depresión, el cual define el área de influencia del pozo para $s > 0$.

Por otro lado, si se requiere identificar el alcance o cobertura radial de un pozo se deberá de considerar el siguiente modelo:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial h}{\partial r} \right) = \frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

Dónde:

r : distancia radial desde el pozo de bombeo

t : tiempo desde el comienzo del bombeo

s : disminución del nivel de abatimiento

T : transmisividad (tasa de flujo bajo un gradiente unitario, a través de una franja unitaria vertical que se extiende a todo el espesor saturado del acuífero)

- Para un acuífero confinado

$$T = Kb$$

- Para un acuífero libre:

$$T = Kh$$

Dónde:

b: espesor saturado

h: carga

Por último, si la ecuación 2 se considera para flujo establecido, esto es que *h* no varía con *t*, la expresión se reduce a lo siguiente:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = 0 \quad (3)$$

3.1.2 Ecuación de Richards

De manera alterna, otra opción a la ya mencionada Ley de Darcy para medios porosos es la ecuación de Richards sobre todo para la zona no saturada. Que se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{d}{dz} \left[D(\theta) \left(\frac{d\theta}{dz} \right) \right] \quad (4)$$

Donde:

θ : contenido volumétrico del agua en m^3m^{-3}

D: es la difusividad en m^2/s

z: es la altura con respecto a un plano de referencia en metros

t: tiempo en segundos

Para esta expresión, diferentes investigaciones la han aplicado para la caracterización de diferentes tipos de suelos asociados al contenido de humedad y a su potencial hidráulico.

3.1.3 Movimiento vertical del agua en el suelo bajo condiciones unidimensionales saturadas/no saturadas

Por ejemplo, una aplicación de la ecuación de Richards es para el movimiento vertical del agua en el suelo para condiciones unidimensionales, en dónde este fenómeno se aplica para la interacción entre el acuífero y el agua superficial.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (5)$$

h : carga hidráulica

$K(h)$: conductividad hidráulica para condiciones no saturadas

t : tiempo

z : coordenada vertical

θ : contenido de agua

3.1.4 Modelo de Van Genutchen

Partiendo de las ecuaciones anteriores, las variables de condiciones de humedad del suelo y la transmisibilidad están ampliamente ligadas a las características físicas del subsuelo, mediante la ecuación que Van Genutchen (1980) modificó en relación con lo siguiente:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (6)$$

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|]^m}, & h < 0 \\ \theta_s, & h \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$K(h) = \begin{cases} K_s S_e^{0.5} \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2, & h < 0 \\ K_s, & h \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

S_e : Saturación efectiva

θ_s : Contenido de agua en zona saturada

θ_r : Contenido de agua restante (residuo)

K_s : Conductividad hidráulica en zona saturada

3.2 Métodos geofísicos y resistividad en materiales geológicos

En la actualidad los métodos geofísicos se utilizan en varias aplicaciones de las ciencias de la tierra, incluyendo el análisis de agua subterránea, identificación de discontinuidades subsuperficiales, además de aplicación en el estudio de propiedades mecánicas del subsuelo y detectar algunos yacimientos de hidrocarburos (Hernández-Guerra (2018); Sauret *et al.*, (2015); Zermeño-Villalobos (2016)).

De acuerdo con el Instituto Mexicano del Transporte (2003), los métodos geofísicos se clasifican: magnéticos, gravimétricos, eléctricos y sísmicos. Los métodos de resistividad eléctrica tienen diferentes acomodados o técnicas, los principales son: Schlumberger, Wenner y dipolo-dipolo, de los cuáles, para la aplicación y alcances de esta investigación, la metodología utilizada es la de los métodos eléctricos.

Los métodos eléctricos, consisten en aplicar una corriente eléctrica al suelo a través de una determinada zona de estudio, para posteriormente determinar la resistividad al flujo eléctrico que se encuentra en la masa del suelo (Lowrie y Fichtner, 2020)

El método de resistividad eléctrica se puede aplicar de tres maneras diferentes: sondeos eléctricos verticales (SEV), calicatas y tomografía eléctrica resistiva (TER), en esta investigación se utilizaron los sondeos eléctricos verticales, cómo se observa en el siguiente esquema.

3.3 Sondeos eléctricos verticales

La finalidad del sondeo eléctrico vertical (SEV) es averiguar la distribución vertical en profundidad de las resistividades aparentes bajo el punto sondeado a partir de medidas de la diferencia de potencial en la superficie. Se utiliza sobre todo

para detectar y establecer los límites de capas horizontales de suelo estratificado (Sattar et al., 2016).

Para aplicar este método se utiliza un conjunto de cuatro electrodos que recibe el nombre de dispositivo electródico. La medición del potencial eléctrico en un semiespacio homogéneo se hace mediante un dispositivo electródico o un arreglo geométrico de electrodos. Consta de cuatro electrodos, A y B los electrodos de corriente, positivo y negativo respectivamente, M y N los electrodos de potencial, entre los cuales se mide la diferencia de potencial del campo eléctrico creado por A y B.

Para ambos casos, la ecuación general para determinar la resistividad es (Sattar et al., 2016):

$$A = \frac{\rho L}{D} \quad (9)$$

Dónde:

A: Resistividad total

ρ : Resistividad geolétrica

L: Longitud

D: Área de la sección transversal

Por otra parte, la resistividad total se obtiene de manera experimental a través de la ley de Ohm $R = V/I$, dónde V es la diferencia potencial y I es la intensidad de corriente en determinada sección.

Aplicado a materiales geológicos, la resistividad del material es una propiedad intrínseca del mismo, que se puede calcular como el producto de la resistencia aparente $R_{app} = V/I$ y un factor geométrico $K = A/L$ que lleva información sobre la geometría del cilindro.

Ahora, si consideramos una sección transversal, con un espesor h y una resistividad ρ , la resistencia R y la conductancia S se pueden escribir cómo:

$$R = h\rho$$

$$S = \frac{h}{\rho}$$

Entonces, de acuerdo con Groves et al., (2011), es posible utilizar la resistividad eléctrica para identificar los estratos en una zona determinada. Si se cuenta con información sobre la configuración de la estratigrafía en los pozos de esa zona, se podría lograr una interpretación más precisa de los perfiles. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la aplicación de este método puede estar sujeta a diversos factores que pueden influir en los resultados, como el grado de saturación, la porosidad y la temperatura del suelo, así como la concentración de electrólitos en el subsuelo y la presencia de minerales de arcilla y coloidales. Además, es importante destacar que la resistividad también puede variar dependiendo del tipo de roca. A continuación, en la figura 1 se muestra una imagen con los valores comunes utilizados para diferentes materiales geológicos.

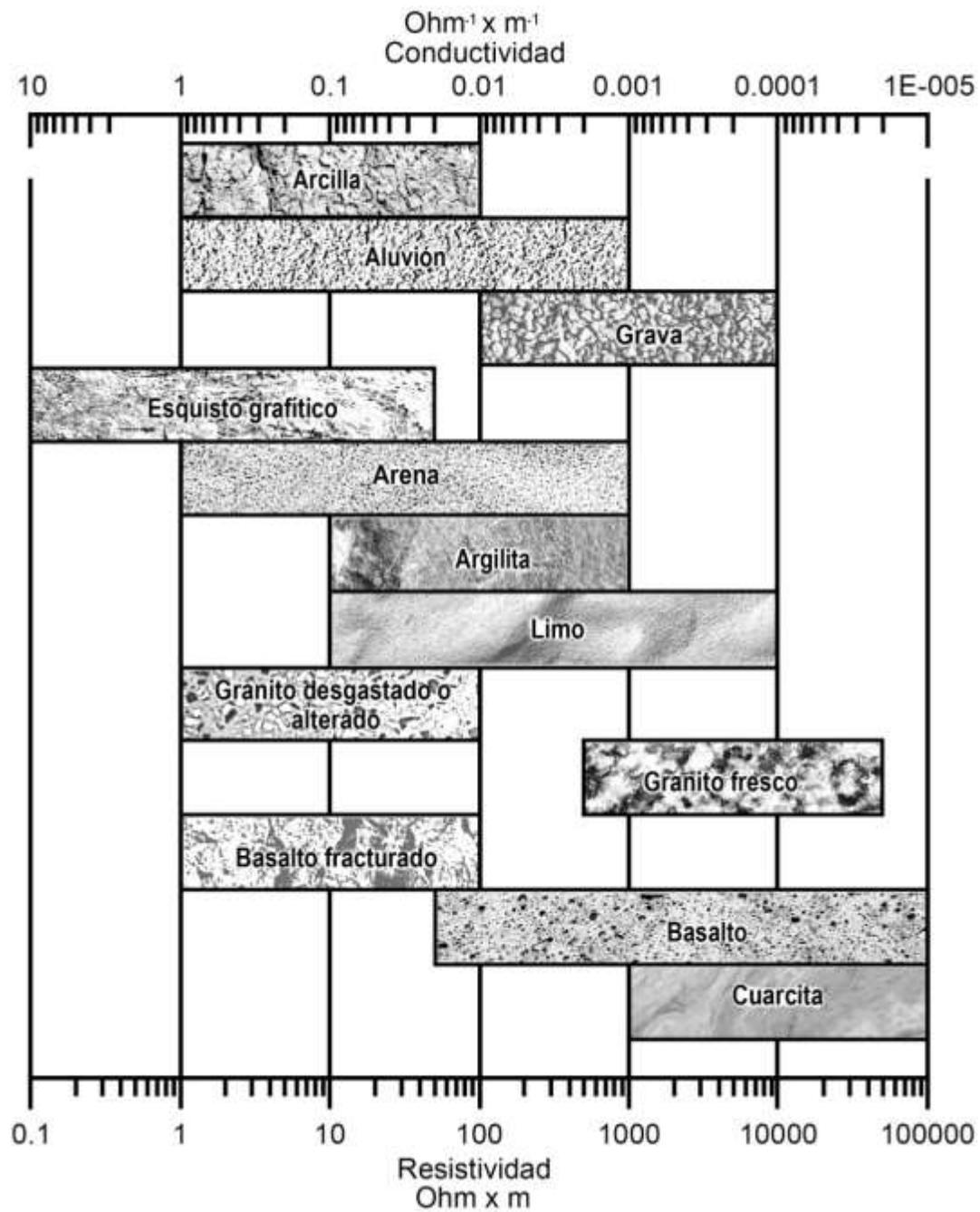


Figura 1. Valores de resistividad en diferentes materiales geológicos
Modificado de Lowrie (2020)

3.3.1 Arreglo Wenner

El arreglo tipo Wenner consiste en cuatro electrodos ordenados de manera A, M, N, B, en los cuales se toman lecturas de la resistividad moviendo los electrodos A y B a cierta distancia que cambiara según la profundidad que se desea sondear. Mientras tanto los electrodos M y N se colocarán de tal manera que la distancia entre los cuatro electrodos sea de $AB/3$ (figura 2).

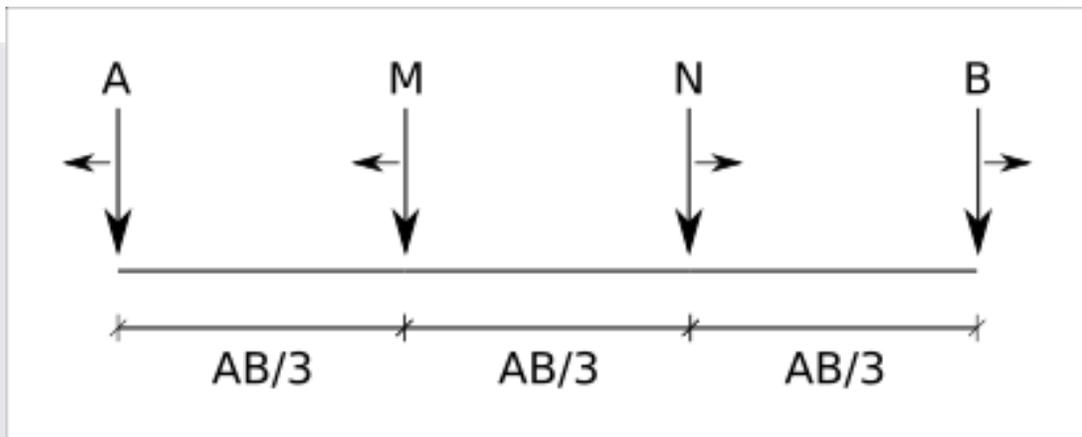


Figura 2. Arreglo Wenner

3.3.2 Arreglo Schlumberger

El dispositivo Schlumberger se caracteriza por mantener fijos los electrodos M y N mientras se alejan los electrodos A y B (figura 2).

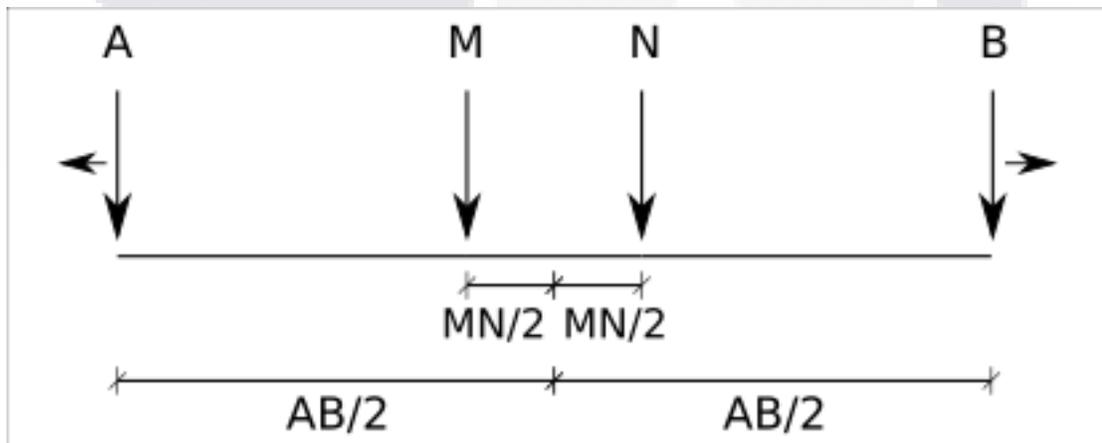


Figura 3. Arreglo Schlumberger

3.4 Calidad de aguas residuales y superficiales

Para el análisis de la calidad del agua en la interacción entre río y acuífero, se tomó como base normatividad de CNA. Empezando con la NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores, las tablas 1 y 2 muestran los límites de acuerdo con dicha normativa.

Tabla 1. Límites permisibles establecidos para Promedio Diario (P.D.) y Promedio Mensual (P.M.) , Valor Instantáneo (V.I.) según corresponda al tipo de cuerpo receptor.

Parámetros (*) (miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	Ríos, arroyos, canales, drenes		
	P.M.	P.D.	V.I.
Temperatura (°C)	35	35	35
Grasas y Aceites	15	18	21
Sólidos Suspendidos Totales	60	72	84
Demanda Química de Oxígeno	150	180	210
Carbono Orgánico Total*	38	45	53
Nitrógeno Total	25	30	35
Fósforo Total	15	18	21
Huevos de Helmintos (huevos/litro)	NA	NA	NA
Escherichia coli, (NMP/100 ml)	250	500	600
Enterococos fecales* (NMP/100 ml)	250	400	500
pH (UpH)	06-sep		
Color verdadero	Longitud de onda		
	436 nm		
	525 nm		
	620 nm		
Toxicidad aguda (UT)	2 a los 15 minutos de exposición		

Tabla 2. Límites permisibles establecidos para Metales y Cianuros

	Ríos, arroyos, canales, drenes
--	--------------------------------

Parámetros (miligramos por litro)	P.M.	P.D.	V.I.
Arsénico	0.2	0.3	0.4
Cadmio	0.2	0.3	0.4
Cianuro	1	2	3
Cobre	4	5	6
Cromo	1	1.25	1.5
Mercurio	0.01	0.015	0.02
Níquel	2	3	4
Plomo	0.2	0.3	0.4
Zinc	10	15	20

La frecuencia de los muestreos, análisis e informes de resultados se especifica en la Tabla 3 para descargas de naturaleza municipal y en la Tabla 4 para descargas no municipales. En circunstancias que requieran un mayor control, como la protección de las fuentes de agua para consumo humano, situaciones de emergencia hidroecológica o procesos productivos fuera de control, la CNA puede ajustar la frecuencia de los muestreos, análisis e informes de resultados según sea necesario.

Tabla 3. Descarga municipal

Rango de población	Frecuencia de muestreo y análisis	Frecuencia de Informe de resultados de muestreo y análisis
Mayor de 50 000 habitantes	Mensual	Trimestral
de 10 001 a 50 000 habitantes	Trimestral	Trimestral
de 2 501 a 10 000 habitantes	Semestral	Trimestral

Tabla 4. Descargas no municipales

Demanda Química de Oxígeno (toneladas/día)	Carbono Orgánico Total* (toneladas/día)	Sólidos Suspendidos Totales (toneladas/día)	Rango de población	Frecuencia de muestreo y análisis	Frecuencia de Informe de resultados de muestreo y análisis
Mayor a 3.0	Mayor a 0.75	Mayor a 3.0	Mayor de 50 000 habitantes	Mensual	Trimestral
De 1.2 a 3.0	De 0.3 a 0.75	De 0.3 a 0.75	de 10 001 a 50 000 habitantes	Trimestral	Trimestral
Menor a 1.2	Menor a 0.3	Menor a 0.3	de 2 501 a 10 000 habitantes	Semestral	Trimestral

*Aplica para aguas residuales con una concentración mayor a 1 000 mg/L de cloruros.

** Aplicará la frecuencia de muestreo y análisis del parámetro con mayor carga contaminante

3.5 Pruebas de toxicidad en agua residual

De acuerdo con Rico-Martínez et al., (2016) los equipos analíticos pueden identificar y cuantificar una sustancia química pero no su toxicidad en los organismos o el medio ambiente, la cual solo puede ser evaluada en organismos vivos. Los ensayos de toxicidad en muestras de agua evalúan la concentración y el tiempo de exposición de las sustancias químicas que producen un efecto adverso en los organismos acuáticos, generando datos útiles para la evaluación de riesgos.

La comunidad científica puede aceptar una prueba de toxicidad si es capaz de predecir efectos adversos para una variedad de compuestos en diferentes organismos, debe ser replicable con análisis estadístico, sus datos deben incluir efectos adversos en un rango de concentraciones en tiempos reales de exposición, debe ser útil para evaluar un riesgo, es económico y fácil de realizar,

y es sensible y realista. Se han desarrollado pruebas de toxicidad para rotíferos para evaluar muchos y diversos puntos finales como mortalidad, reproducción, producción de hembras amícticas, producción de quistes, probabilidad de extinción, comportamiento, tasas de ingestión, actividad de natación, actividad enzimática in vivo y expresión genética, entre otros (Rico-Martínez et al., 2013).

Tabla 5. Organismos en agua dulce

Organismo en agua dulce	Clase	Orden	Familia	Especies
Cladocera	Branchiopoda	Diplostraca	Daphniidae	Daphnia magna
				D. pulex
				D. similis
				D. carinata
				Ceriodaphnia dubia
Copepoda	Branchiopoda	Anostraca	Thamnocephalidae	Thamnocephalus platyurus
	Maxillopoda	Calanoida	Cyclopidae	Eurytemora affinis
				Eucyclops serrulatus
Rotifera	Monogonta	Ploima	Brachionidae	Brachionus calyciflorus
				B. rubens
				B. patulus
			Lecanidae	Lecane quadridentata
				L. hamata and L. luna
				Euchlanis dilatata
			Asplanchnidae	Asplanchna brightwelli

Para determinar los valores y concentraciones de los parámetros establecidos en esta Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 para determinar la toxicidad aguda de las descargas de aguas residuales vertidas a cuerpos receptores, en este caso un cauce de tipo intermitente, los análisis deberán efectuarse mediante muestras simples, para posteriormente realizar la misma medición con el efluente de la columna de suelo.

La evaluación se realizará aplicando límites de toxicidad, en la que el rango permisible es menor o igual a 2 Unidades de Toxicidad (UT). Las Unidades de Toxicidad (UT), se determinan por la fórmula:

$$1UT = 100/CE50$$

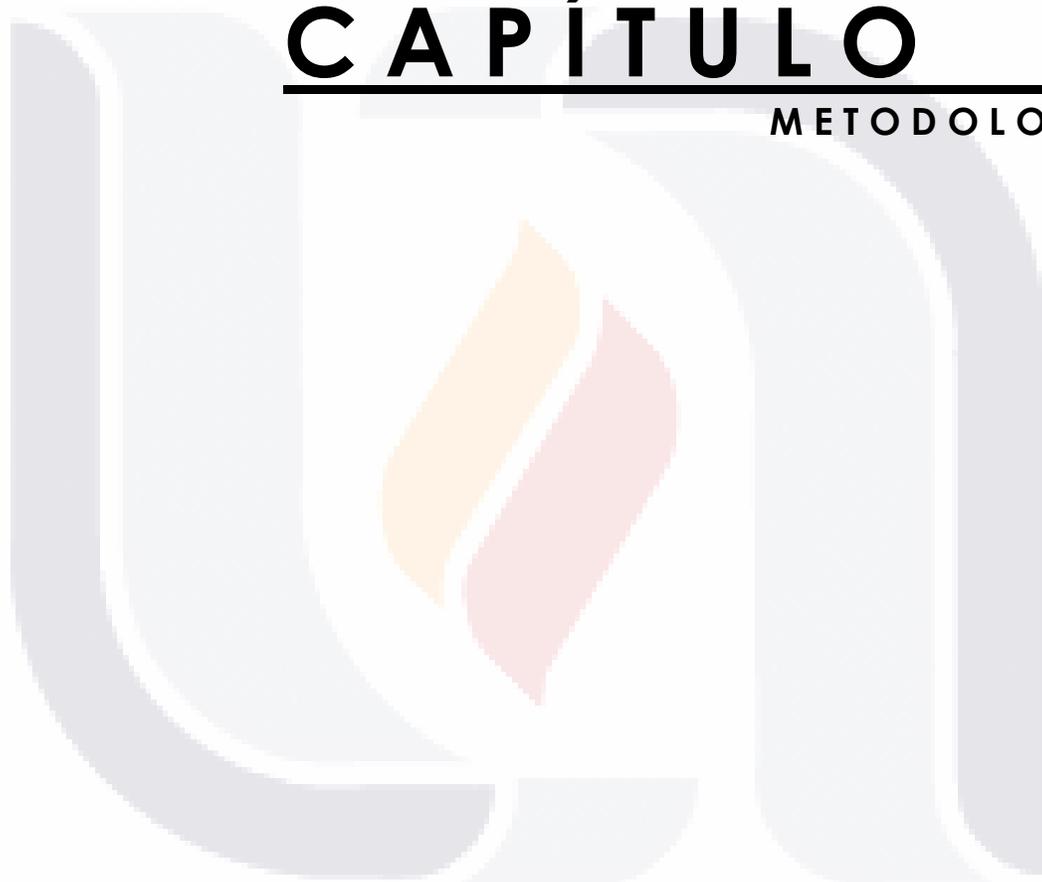
Dónde:

CE50: es la concentración que genera efectos adversos, letales o no letales en el 50% de los organismos de prueba expuestos o en el parámetro biológico seleccionado para evaluar el efecto tóxico.



CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA



CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA

La presente investigación se compone de varias etapas que son: espacial, hidráulica, hidrogeológica e hidrogeoquímica para lograr los objetivos planteados. En la figura 4 se muestran las etapas y las actividades que la conforman.

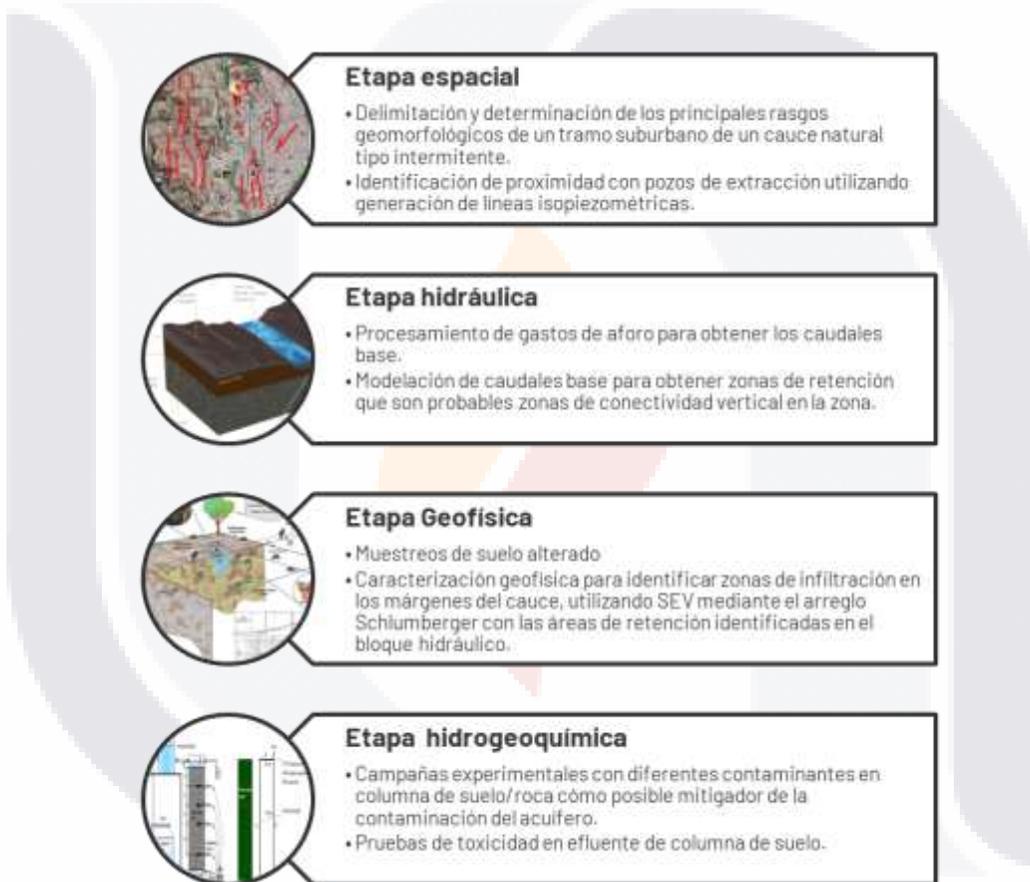


Figura 4. Descripción de metodología

4.1 Etapa espacial

Se llevó a cabo la ubicación de un tramo suburbano del cauce natural del río San Pedro, el cual pertenece a la región hidrológica Lerma-Santiago. En esta actividad, se estimaron los principales rasgos geomorfológicos de la zona de estudio, como lo son: área drenada, pendiente del cauce principal, cobertura

vegetal, uso de suelo, ubicación de estaciones climatológicas e hidrométrica, por mencionar algunas. Para ello se realizó un análisis geoespacial en el programa de código abierto Qgis, utilizando modelos digitales de elevación, y algunas herramientas de geoprocreso vectorial cómo se muestra en la figura 5.

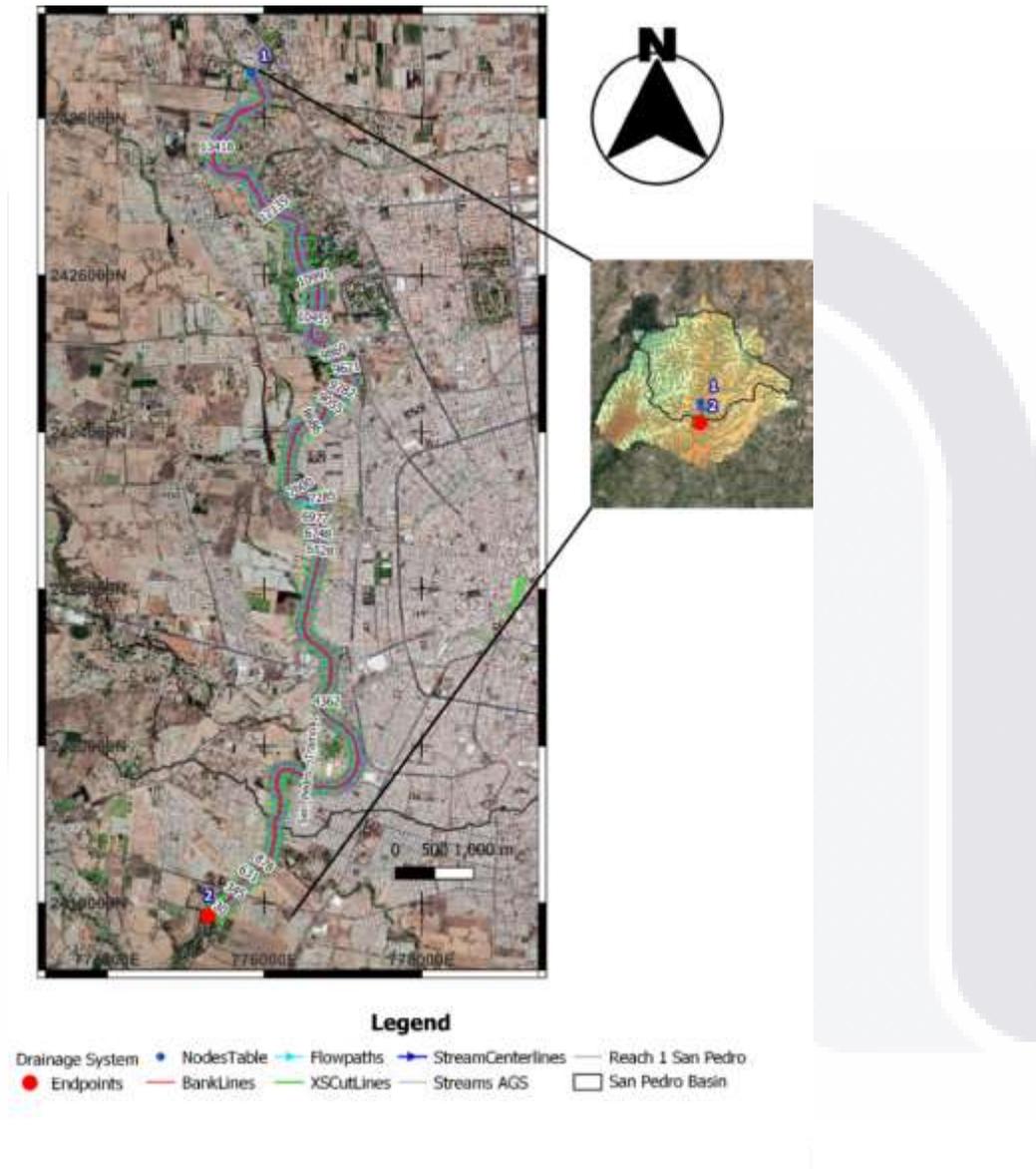


Figura 5. Zona de estudio río San Pedro, Aguascalientes; Ags.

4.2 Etapa Hidráulica

Se realizó el ajuste de datos hidrométricos utilizando la metodología de indicadores de alteración hidrológica (IHA) para obtener caudales diarios y

estimar los caudales base que se presenta en corrientes de tipo intermitentes, que son características de la región de estudio. Para la determinación de gastos, se tomó la base de datos de la estación hidrométrica de la presa del Niágara, ubicada en el parteaguas debajo de la zona de estudio.

Se procesó la topografía de la zona de estudio y con los gastos obtenidos, en el bloque hidráulico se delimitó un tramo del cauce analizado, para realizar una modelación unidimensional del caudal medio mensual y analizar el comportamiento hidráulico de manera superficial, así como para identificar zonas de retención, utilizando el programa HECRAS con el plugin para Qgis de RiverGIS, cómo se muestra en la figura 6.

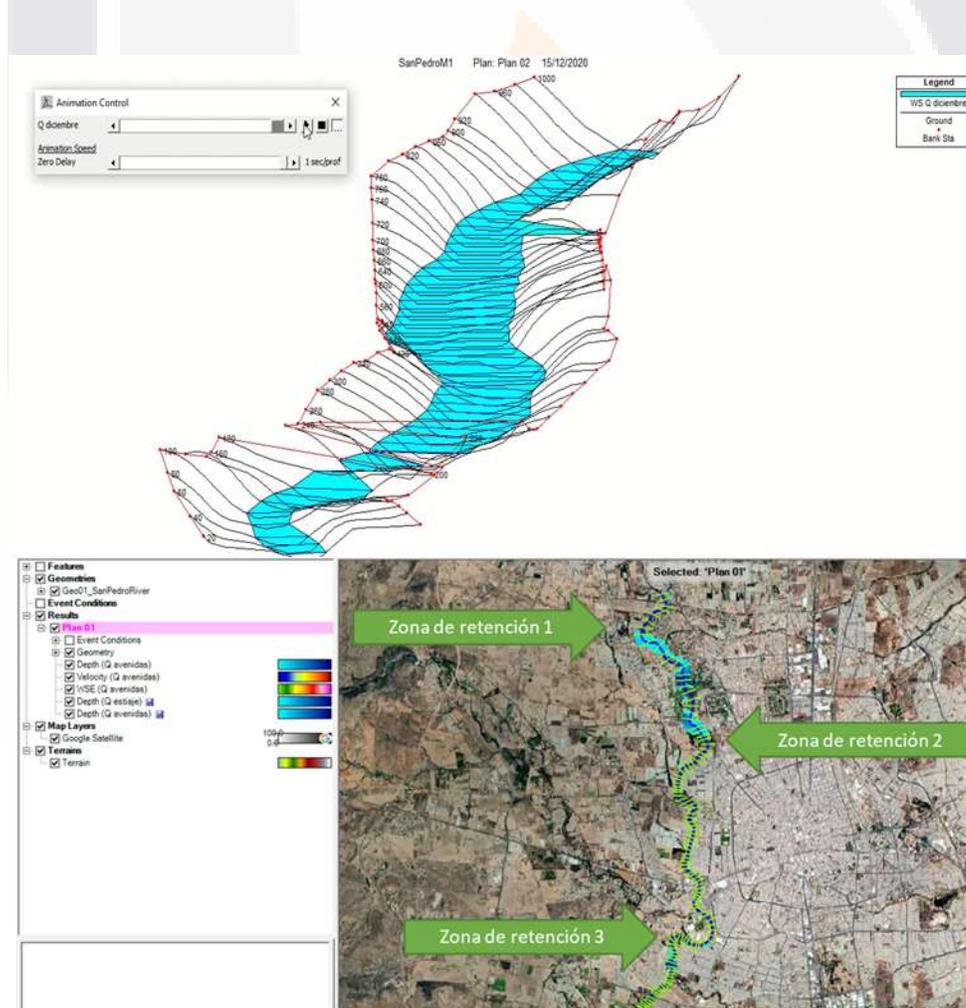


Figura 6. Identificación de zonas de retención.

4.3 Etapa geofísica

En la etapa geofísica, se llevó a cabo una caracterización física del suelo, realizando muestreos inalterados de suelo en la zona de estudio, y pruebas de granulometría, para comprender de mejor manera los rasgos principales del tipo de suelo de la zona de estudio. Por último, en las zonas de retención se llevó a cabo una caracterización geofísica con el fin de generar un perfil estratigráfico de la zona, y poder evaluar si existe conectividad vertical de las zonas de retención de cauces principales con el medio acuífero a través de la zona vadosa. Para esto, se utilizó la prueba de los sondeos eléctricos verticales (SEV) utilizando el arreglo Schlumberger, por la mayor longitud de espaciado entre electrodos que permite.

La finalidad de los SEV fue determinar la distribución vertical en profundidad de las resistividades aparentes bajo el punto sondeado a partir de medidas de la diferencia de potencial en la superficie. En otras palabras, este método se utilizó sobre todo para detectar y establecer los límites de capas horizontales de suelo estratificado, que en este trabajo se aplicó a las inmediaciones de las zonas de estancamiento hidráulico, para detectar una potencial conectividad hidráulica vertical en la zona de estudio. Los resultados de campo se procesaron en el software IPI2WIN y se identificaron curvas de resistividad que se muestran más adelante en el apartado de resultados. La figura 7 muestra una esquematización del método VES Schlumberger, mientras que la figura 8 muestra un diagrama de flujo para la aplicación de los SEV. Finalmente, la figura 9 muestra unas fotografías tomadas durante la aplicación de los SEV.

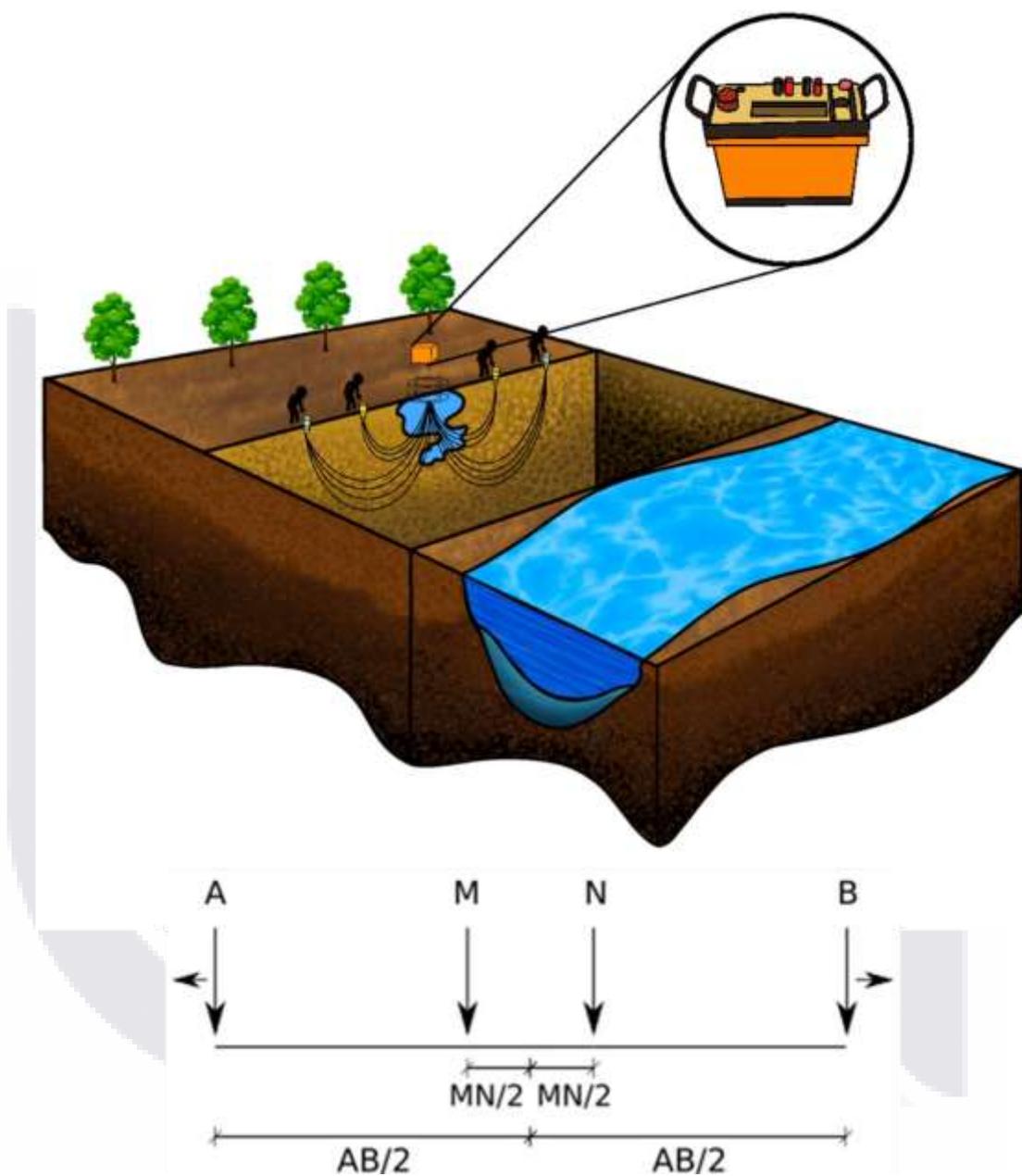


Figura 7. Esquema descriptivo de los SEV

Esta figura muestra el arreglo que se utilizó en el lecho del cauce de la zona de estudio.

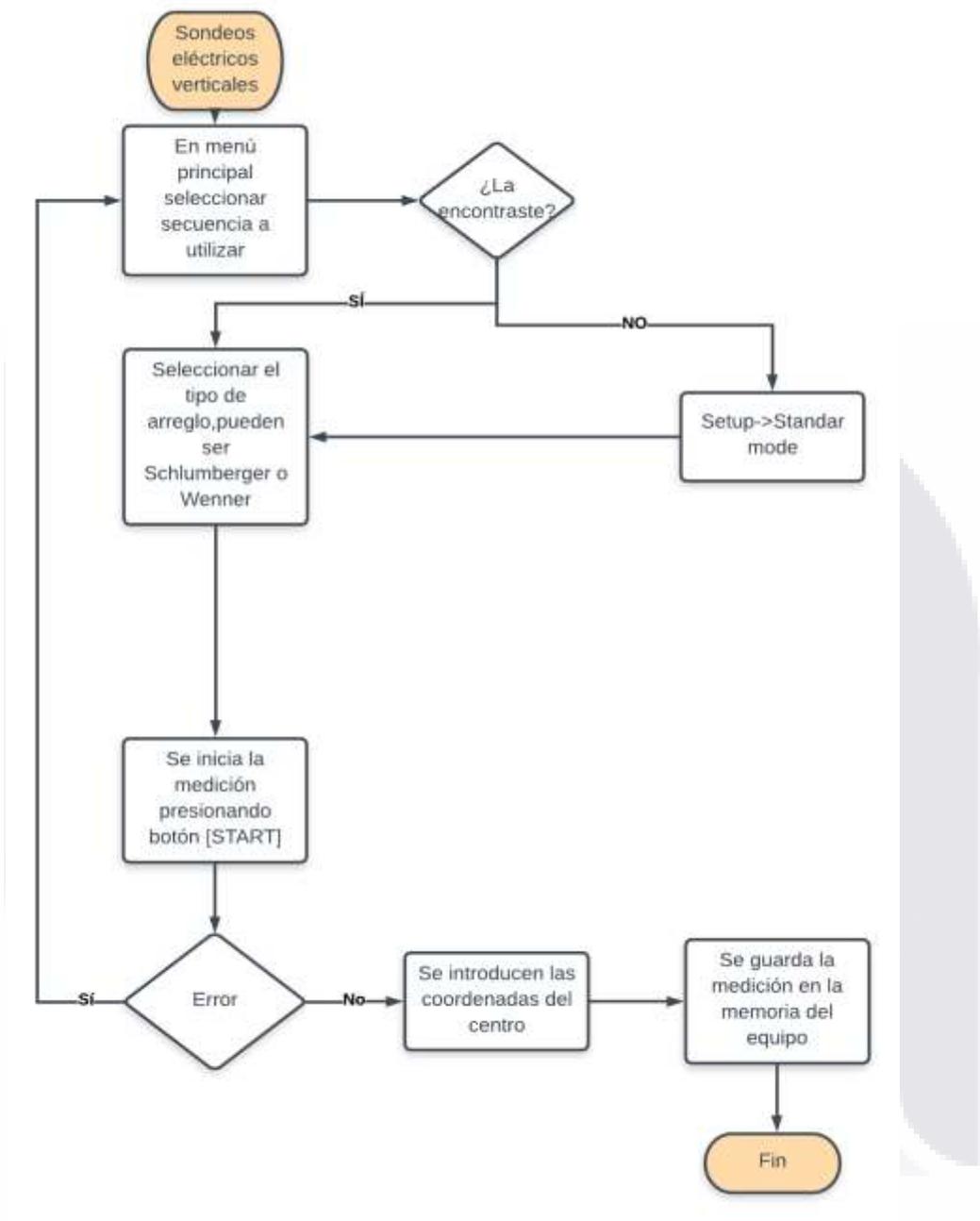


Figura 8. Proceso en campo para realización de los SEV



Figura 9. Trabajo de campo en los SEV

- a) Configuración inicial de SEV 03 ubicado en salida a Calvillo
- b) Toma de mediciones en SEV 03
- c) Cambio de distancia electrodos M y N
- d) Configuración inicial SEV04 ubicado en fraccionamiento Bosque Sereno

4.4 Etapa hidrogeoquímica

En la etapa hidrogeoquímica, se llevó a cabo la elaboración de un dispositivo para evaluar las velocidades de flujo en medios porosos y permeabilidad, con diferentes contaminantes, llevando a cabo pruebas de toxicidad utilizando la especie de prueba *Lecane Papuana* (Rotífera: Monogononta), para estas pruebas se tomaron 9 muestreos de agua en sitio, para realizar análisis de toxicidad antes y después de circular agua a través de la columna de suelo recuperado de las zonas de retención hidráulica. La figura 10 muestra los principales componentes del dispositivo experimental que se utilizó mientras que en la figura 11 se puede observar la evidencia del trabajo en campo y laboratorio para obtener el efluente de la columna de suelo.

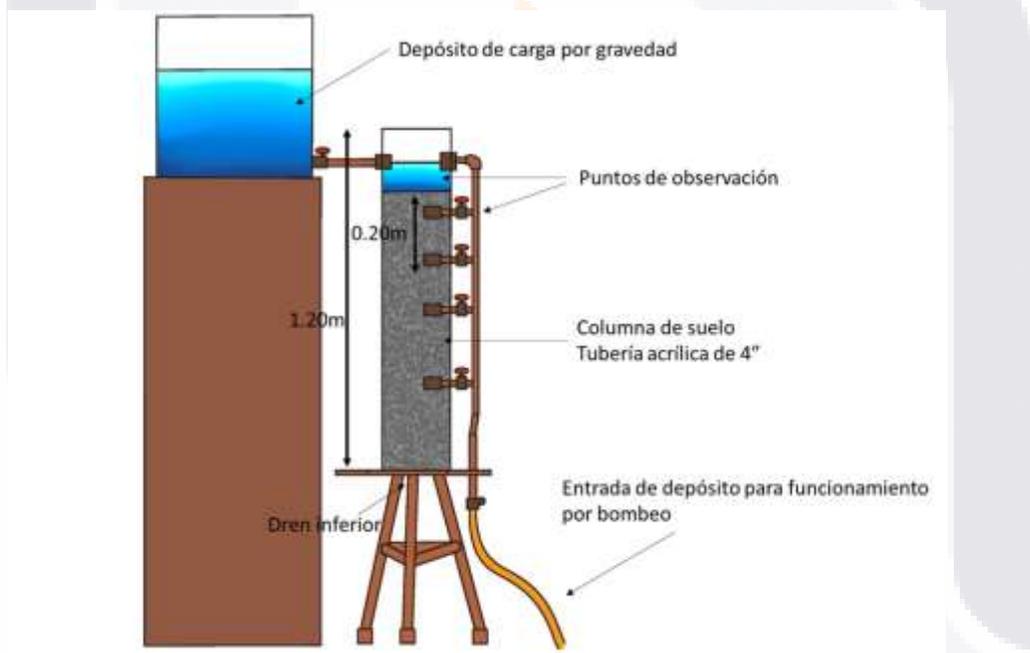


Figura 10. Dispositivo experimental para pruebas de toxicidad



Figura 11. Ejecución de muestreos para pruebas de toxicidad en campo/dispositivo
 a) Muestreo de agua en zona de estancamiento en SEV 03 salida a Calvillo.
 b) Muestreo de agua en zona de estancamiento en SEV01 Av. Guadalupe González.
 c) Prueba en columna de suelo con diferentes contaminantes.

CAPÍTULO V

RESULTADOS



CAPÍTULO V: RESULTADOS

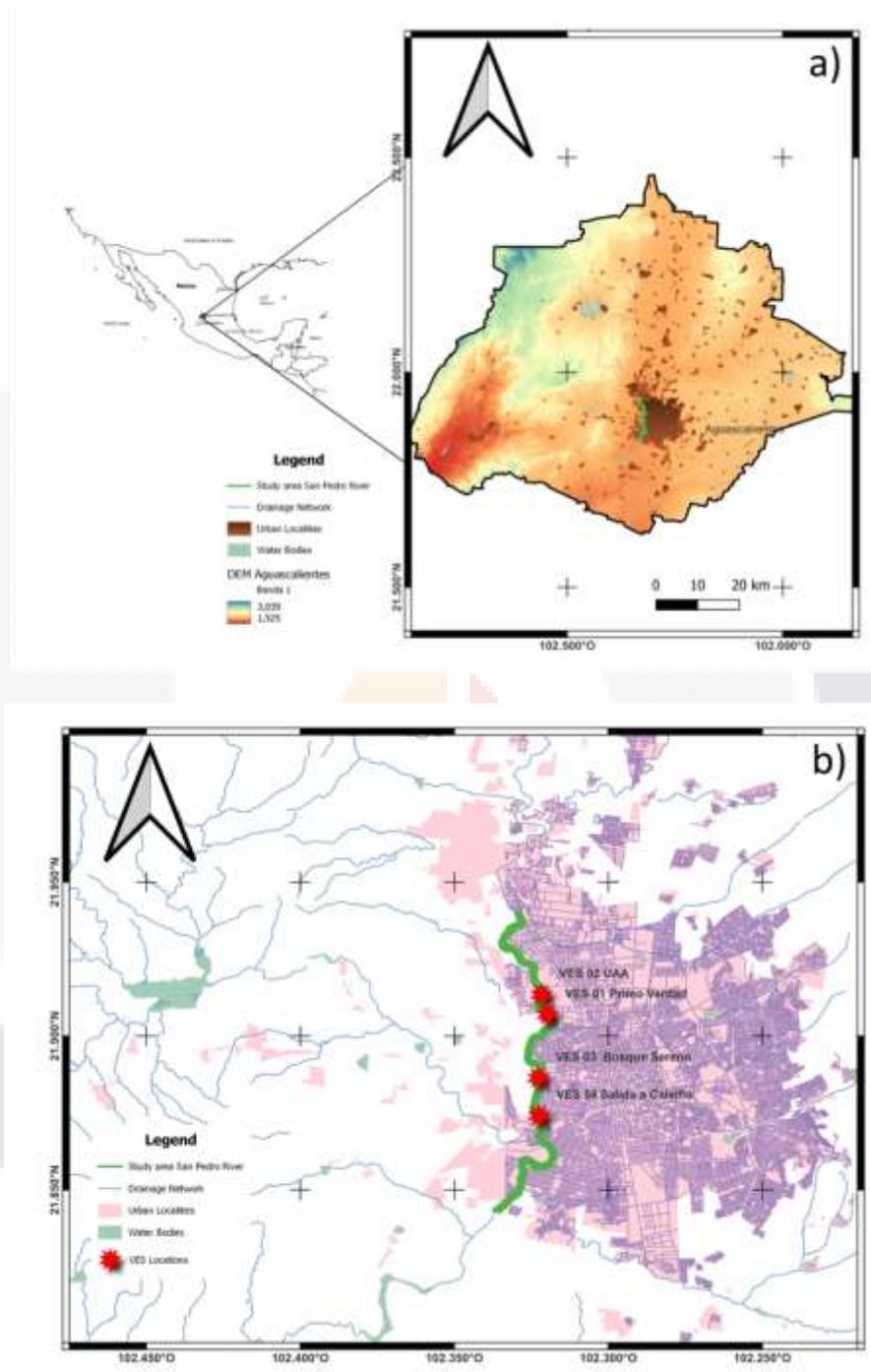
5.1 Descripción de la zona de estudio

La zona de estudio se localiza en.... Dentro de la Region hidrológica RH12, la cual pertenece a la zona hidrológica Lerma-Santiago cuenca Río Verde Grande, subcuenca Río Aguascalientes. Se trata de una cuenca de tipo exorreica, mientras que la microcuenca en la que se ubica la zona de estudio corresponde al río "San Pedro", misma que tiene un área aproximada de 198 km² (Figura 12). El tramo selecto para el análisis tiene una longitud de 14 km y se localiza dentro de la zona urbana de la ciudad de Aguascalientes.

5.2 Análisis de resultados de caracterización hidráulica

En la campaña hidráulica se identificaron zonas de retención generadas por la topografía y la acumulación de sedimentos asociada a temporada de avenidas, realizando la modelación para todos los meses correspondientes al año hidrológico (enero-diciembre). Además, cotejando con ubicación fallas y grietas, se identificaron puntos de intersección con agrietamientos en la superficie, en el cual se encontraron probables áreas de conectividad hacia la zona vadosa, cómo se puede observar en la figura 13.

Se procesaron registros de gastos de aforo de más de 50 años, obteniendo flujos base de caudal diario en épocas de sequía y temporada de lluvias, utilizando registros de la estación hidrométrica del embalse de la presa "El Niágara", ubicada aguas abajo del tramo de la zona de estudio.



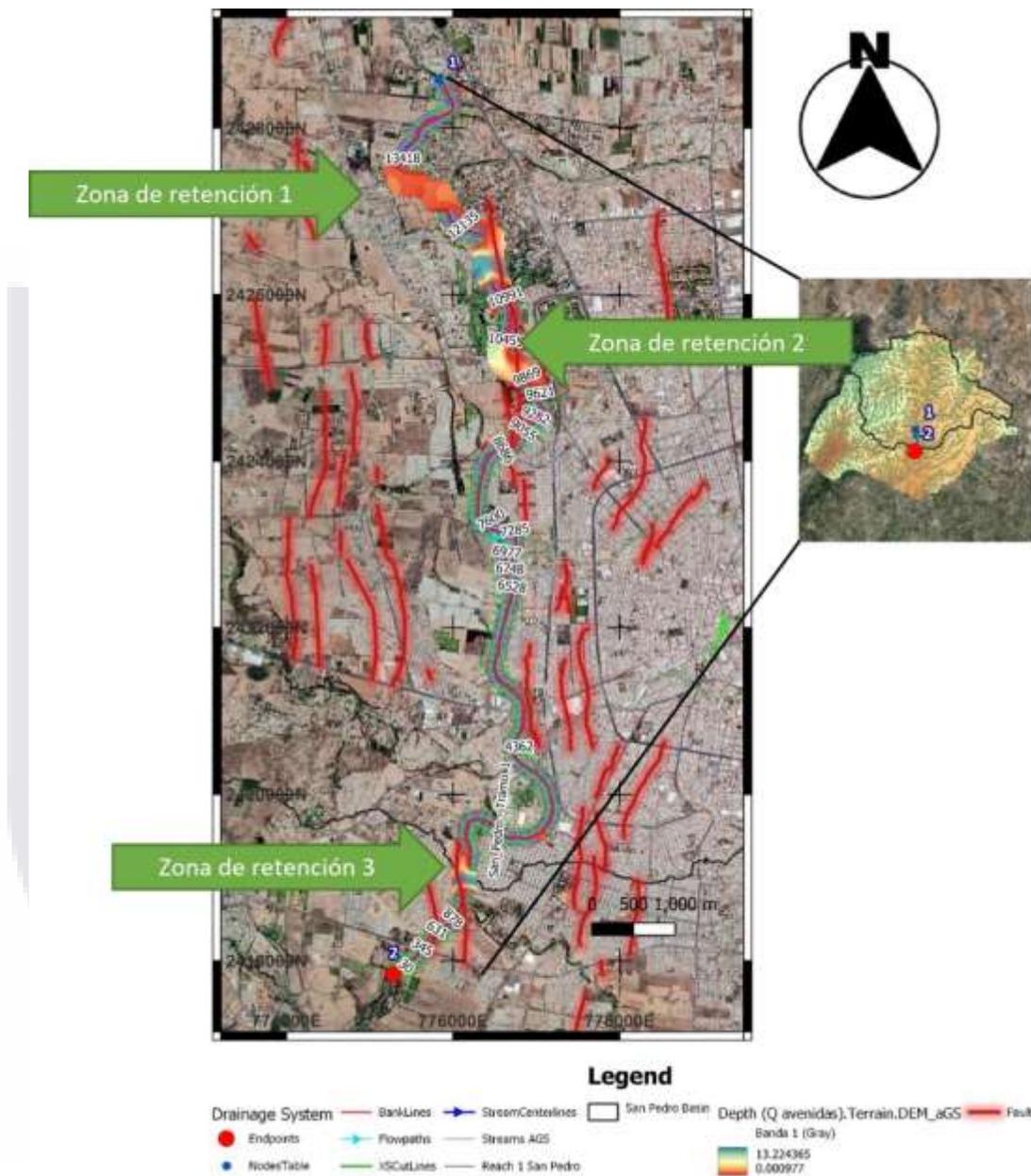


Figura 13. Zonas retención de agua en río San Pedro; Aguascalientes

Se incluyen capas de los diferentes cadenamamientos, zonas de retención y agrietamientos de la base de datos SIFFAG.

5.3 Análisis de resultados de caracterización geofísica

Por otra parte, para realizar un análisis cartográfico y ubicar a través de la red de flujo las zonas potenciales a contaminación se procesó información de niveles de extracción cómo se observa en las figuras 14 y 15 sobre algunos pozos de extracción cercanos a la zona de estudio. Con la información disponible de los niveles freáticos históricos fue posible generar una línea de tendencia para estimar la proyección del descenso del nivel freático en los pozos analizados, así por ejemplo, las profundidades aproximadas del nivel freático para el año 2020 para los pozos 35-A y 145 serían de 200 y 63 m, respectivamente. Por otro lado, a través de métodos de interpolación de distancia inversa (IDW) las curvas isopiezométricas o de igual elevación de nivel freático (figura 16), en las cuales se identificaron diferentes conos de abatimiento dentro del valle,

Con base en la configuración de red de flujo definida para la zona de estudio, se pueden observar dos conos de abatimiento del lado oriente, además el sentido del flujo subterráneo obedece una dirección de norte a sur tomando cómo puntos más bajos los puntos observados en la modelación de hidráulica. Así, con las principales zonas de retención que detectaron en el bloque hidráulico, se llevó a cabo una caracterización física del subsuelo de esas áreas, llevando a cabo pruebas de granulometría para identificar el tipo de material. Además, se realizaron diferentes SEV para analizar el comportamiento del flujo subsuperficial en las zonas identificadas.

La metodología empleada para el desarrollo de los SEV consistió en aplicar el arreglo Schlumberger, con los espaciamientos en línea recta de hasta 600 m, encontrando los resultados que se muestran en las figuras 17 a 20.

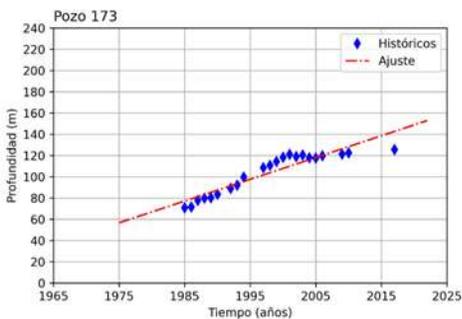
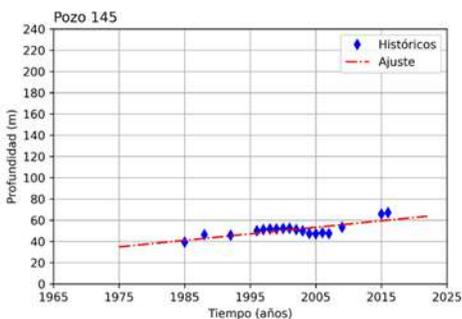
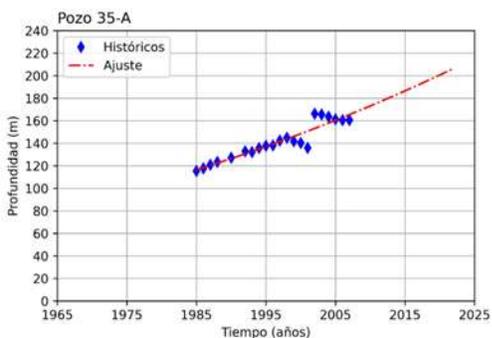


Figura 14. Histórico de niveles de extracción de pozos cercanos a la zona de estudio

Pozos 35-A, 145 y 173

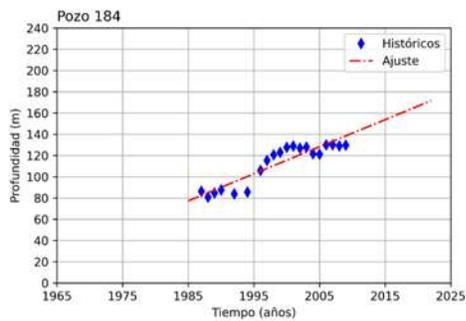
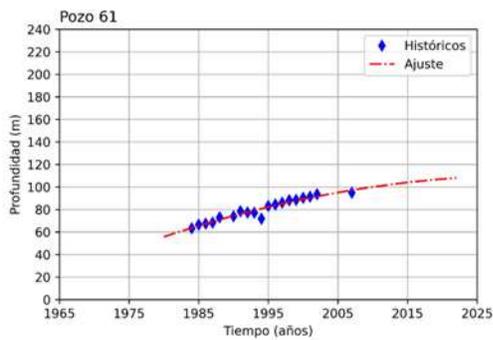
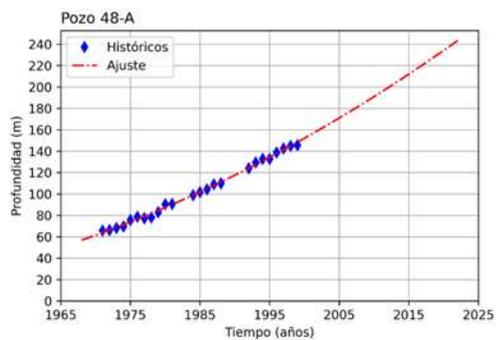


Figura 15. Histórico de niveles de extracción de pozos cercanos a la zona de estudio

Pozos 48-A,61 y 184

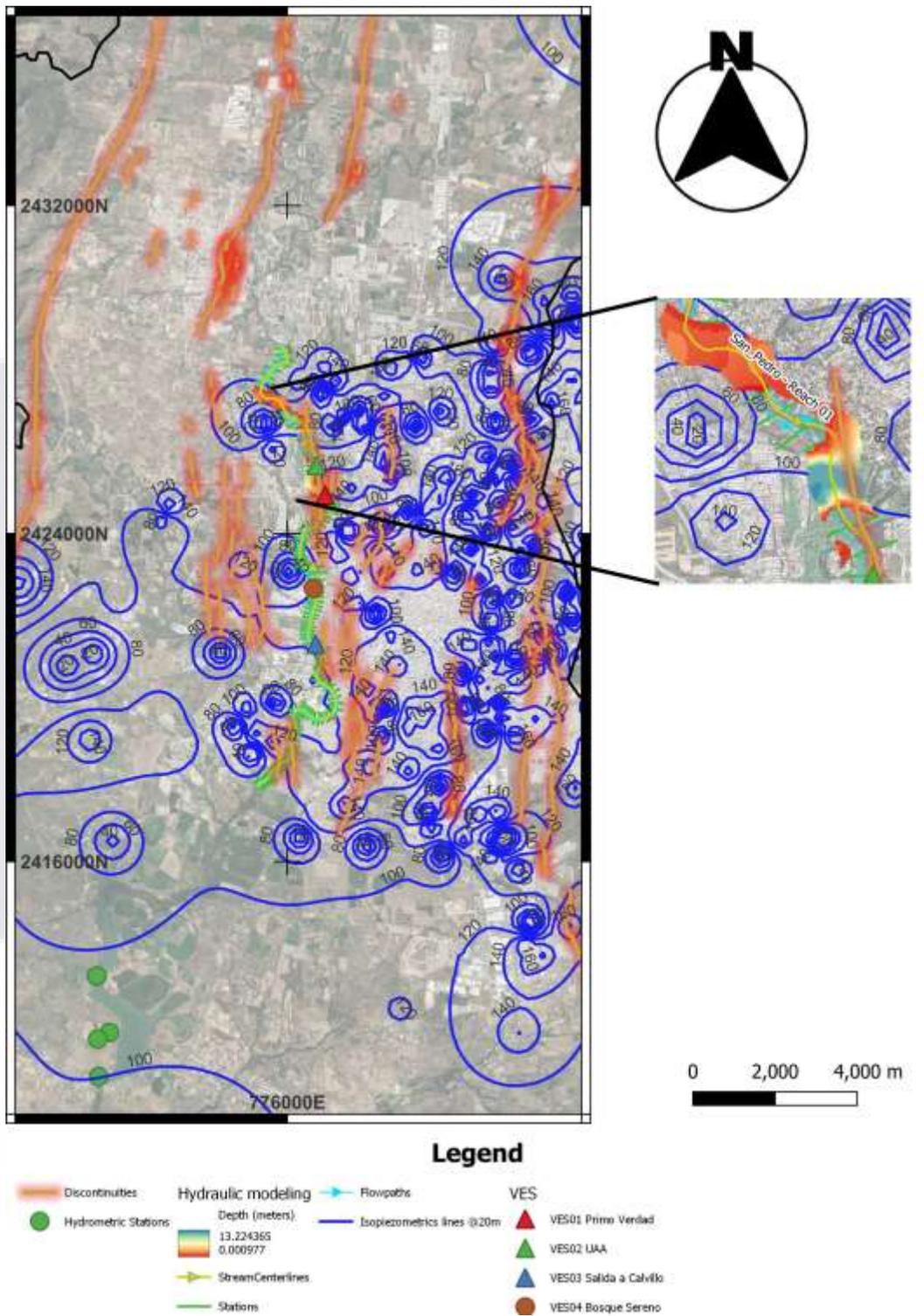


Figura 16. Red de flujo hidrogeológico en río San Pedro Aguascalientes

Esta red de flujo utiliza la interpolación del método IDW de los pozos que se observan en las figuras 14 y 15.

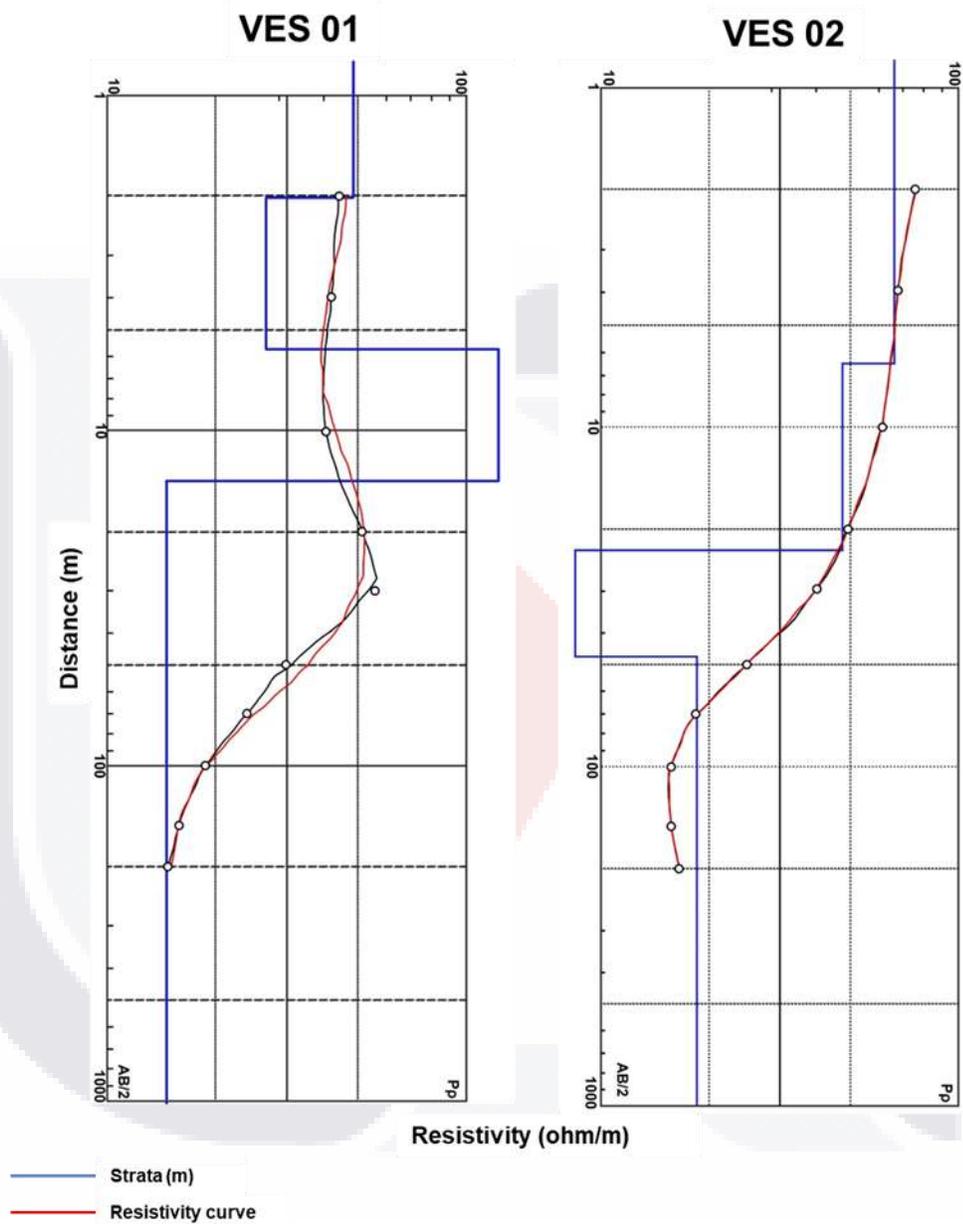


Figura 17. Inversión de SEV01 y SEV02

Procesado en el software IPI2WIN, la línea azul indica los diferentes estratos o cambios de acuerdo con variaciones con la curva de resistividad que se indica con línea roja.

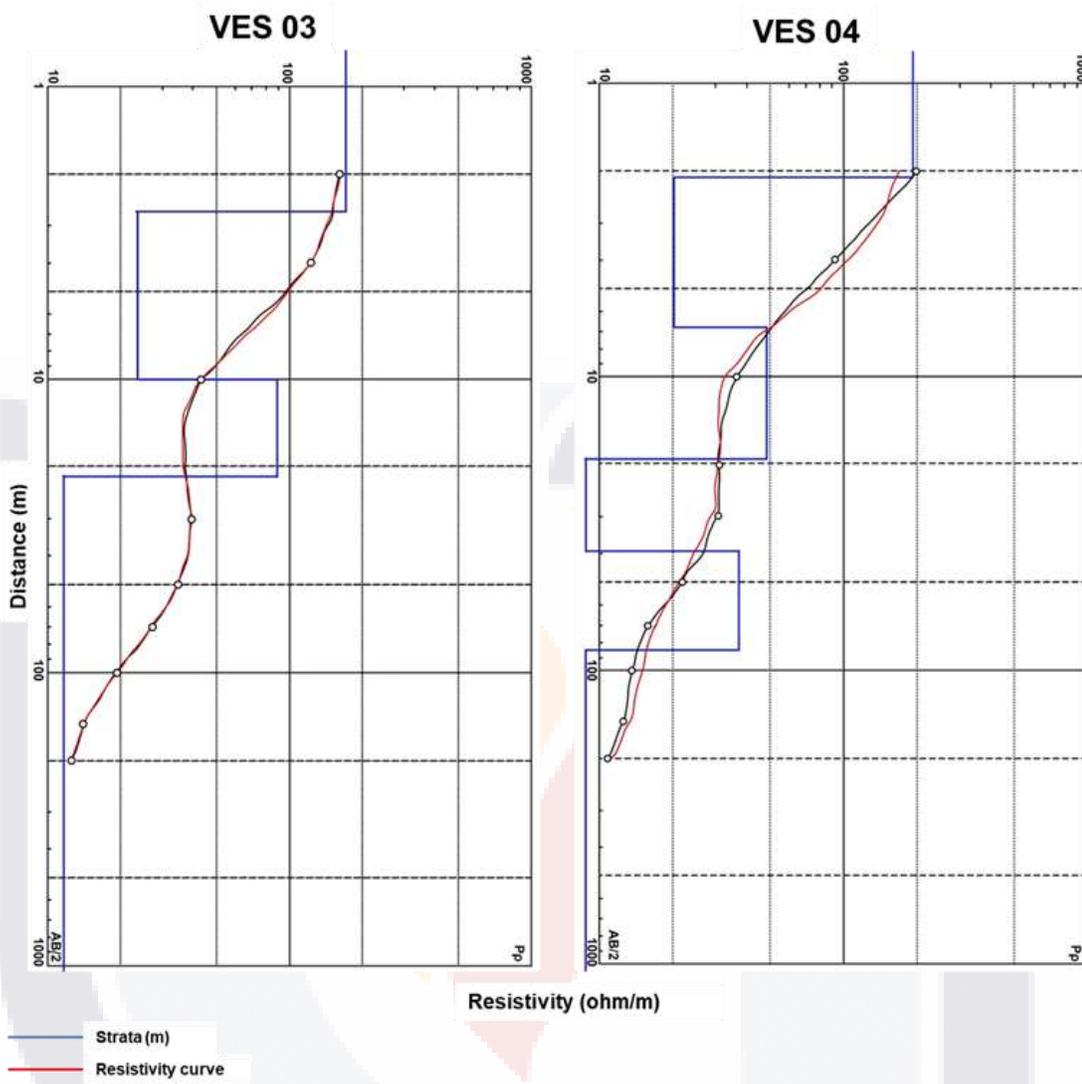


Figura 18. Inversión de SEV03 y SEV04

Procesado en el software IPI2WIN, la línea azul indica los diferentes estratos o cambios de acuerdo con variaciones con la curva de resistividad que se indica con línea roja.

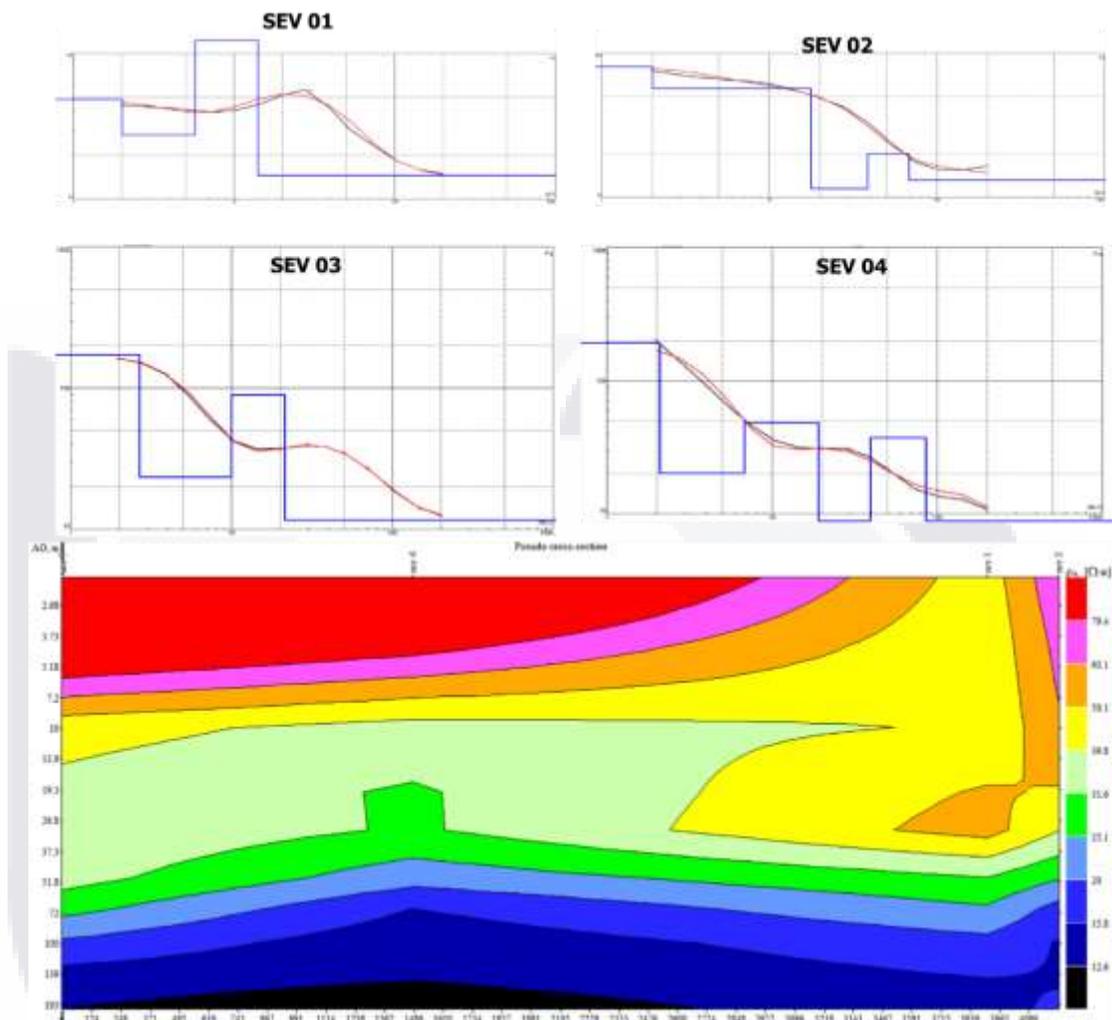


Figura 19. Procesamiento de SEV

La barra de colores indica los valores más altos (rojo) de resistividad a los más bajos (azul), correlacionados con la diferente profundidad que va proporcional al espaciamiento entre electrodos.



Figura 20. Sondeos eléctricos verticales en río San Pedro

Perfil conjuntando los resultados de los 4 SEV. El sondeo es paralelo a la traza del río. Los colores rojizos indican los valores más altos de resistividad mientras que los azules sugieren los valores más bajos de resistividad, que dan indicios de contacto con la zona saturada, a partir de los 90m.

5.4 Análisis de resultados de caracterización hidrogeoquímica

El último paso, fue confirmar la manera en que se efectúa esa conectividad hidráulica en el sentido hidrogeológico, es decir, de cómo algunas sustancias agregadas al río San Pedro pueden ser transportadas hasta el acuífero. Para ello, se llevaron a cabo pruebas de toxicidad a través del dispositivo experimental como se describió anteriormente (ver figura 10) Los resultados obtenidos fueron muy significativos, ya que el nivel de toxicidad disminuye una vez que el agua sale de la columna de suelo. Los resultados puntuales se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Determinación de Concentración letal (LC) a diferentes niveles de probabilidad (1, 10 y 50% del total de la población)

		Influyente	Efluente*
Retention zone 1 C. Gonzalez	LC ₀₁	20.43 (15.57 – 25.28)	>95
	LC ₁₀	30.49 (26.90 – 34.08)	>100
	LC ₅₀	44.01 (41.51 – 46.52)	>100
Retention zone 2 Salida a Calvillo	LC ₀₁	30.57 (23.74 – 37.39)	>95
	LC ₁₀	40.80 (35.69 – 45.92)	>100
	LC ₅₀	53.17 (50.14 – 56.19)	>100

	LC ₀₁	5.94 (1.95 – 9.93)	>95
Retention zone 3	LC ₁₀	18.19 (13.34 – 23.04)	>100
Siglo XXI	LC ₅₀	50.74 (33.65-67.82)	>100

SEM, Standard Error of the Mean; LL, lower limit; UL, Upper limit

La especie de prueba fue *Lecane papuana* (Rotifera: Monogononta)

*La concentración letal mediana (LC50) no se estimó en el efluente debido a que la mortalidad de los organismos de prueba no fue significativa en comparación con los controles ($\leq 5\%$). Las concentraciones letales se estimaron con la ayuda del paquete R para Windows (v4.1.2).

Tabla 7. Determinación de las concentraciones de No efecto Observable (NOEC) y concentración mínima de efecto observable (LOEC)

		Percentage
G. Gonzalez	NOEC	40.0
	LOEC	60.0
Salida a Calvillo	NOEC	30.0
	LOEC	45.0
Siglo XXI	NOEC	12.5
	LOEC	25.0

Los valores están dados en porcentaje del total de la muestra

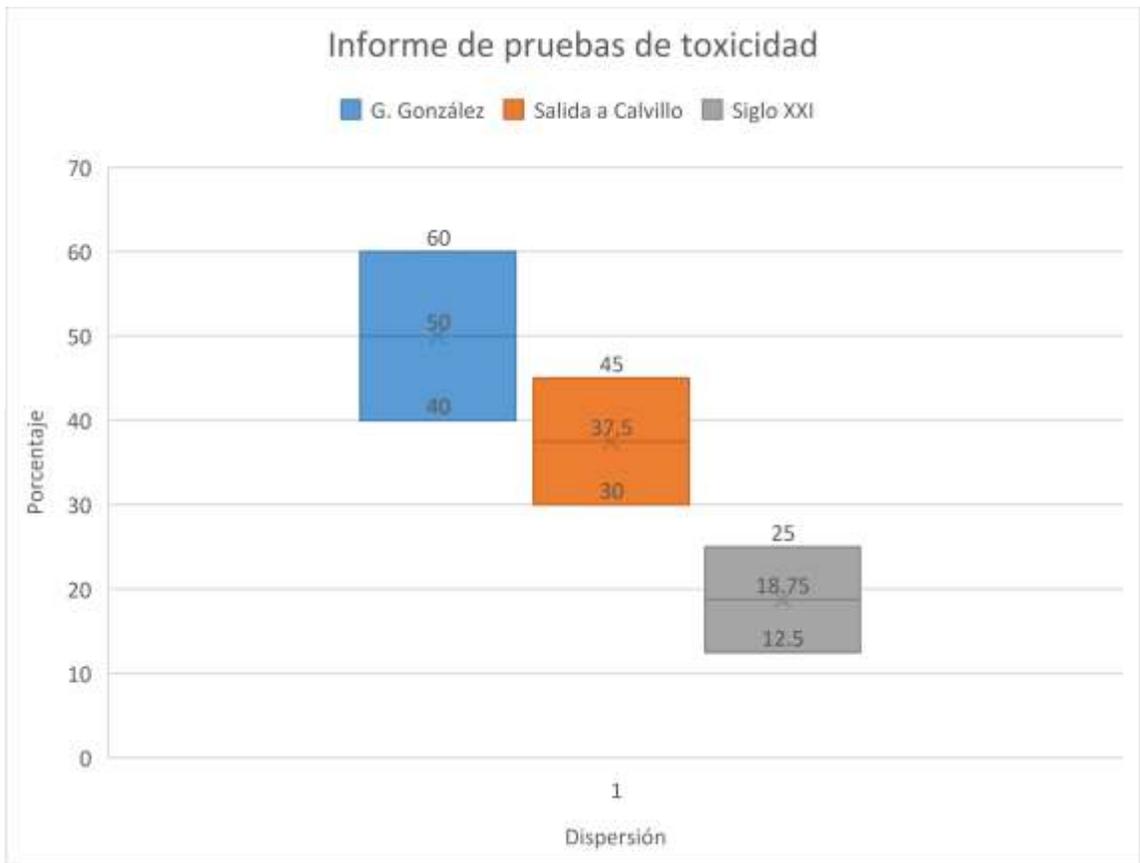


Figura 21. Pruebas de toxicidad en zonas de retención del río San Pedro

Gráfico que indica las variaciones de las pruebas de toxicidad en las tres principales zonas de retención.



CAPÍTULO VI

DISCUSIONES

CAPÍTULO VI: DISCUSIONES

6.1 Correlación entre nivel estático con interpretación de resultados de los SEV

La herramienta de la modelación hidráulica para identificar zonas de retención en cauces intermitentes es bastante útil para evaluar la asociación de inundaciones con el proceso de conectividad vertical hacia la zona vadosa, sin embargo, se debe de tener información detallada de gastos de aforo para su correcto análisis e interpretación.

Los resultados analizados en el bloque geofísico muestran evidencia de la conectividad vertical en la zona del río San Pedro, que coincide con investigaciones como la de Pacheco-Guerrero et al., (2017), en las que se encontraron pérdidas por infiltración a nivel subsuperficial, dependiendo de las condiciones físicas del suelo esto puede variar, pero en la zona de estudio se encontraron en tres de cuatro SEV hallazgos de conectividad al acuífero a partir de profundidades de 70 a 90 m, como se puede observar a partir de la figura 22 a la 29. Respecto a la correlación de la litología con los resultados obtenidos en los SEV, se tiene una zonificación hasta los 30m con alternancias con estratos areno-arcillosos coincidiendo con los valores de resistividad que le corresponden, además de que en el algún caso a partir de los 70m se encuentra la conectividad con la zona vadosa a través de estratos de conglomerado alternante con arena y arcilla.

Interpretación SEV03

Curva resistividad profundidad Columna estratigráfica pozo tipo 101

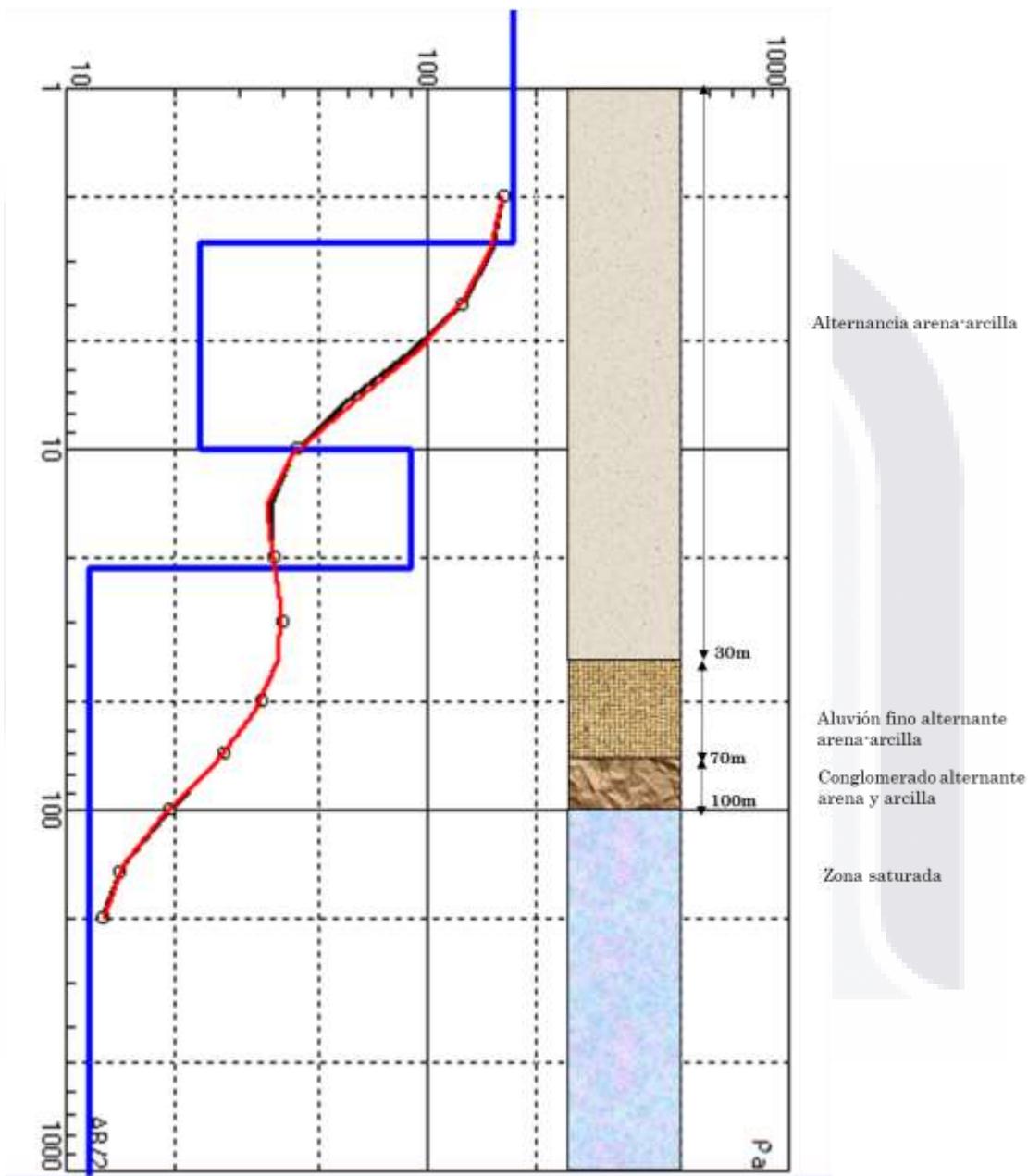


Figura 22. Correlación de resultados SEV03 con pozo 101 CNA

Interpretación SEV03

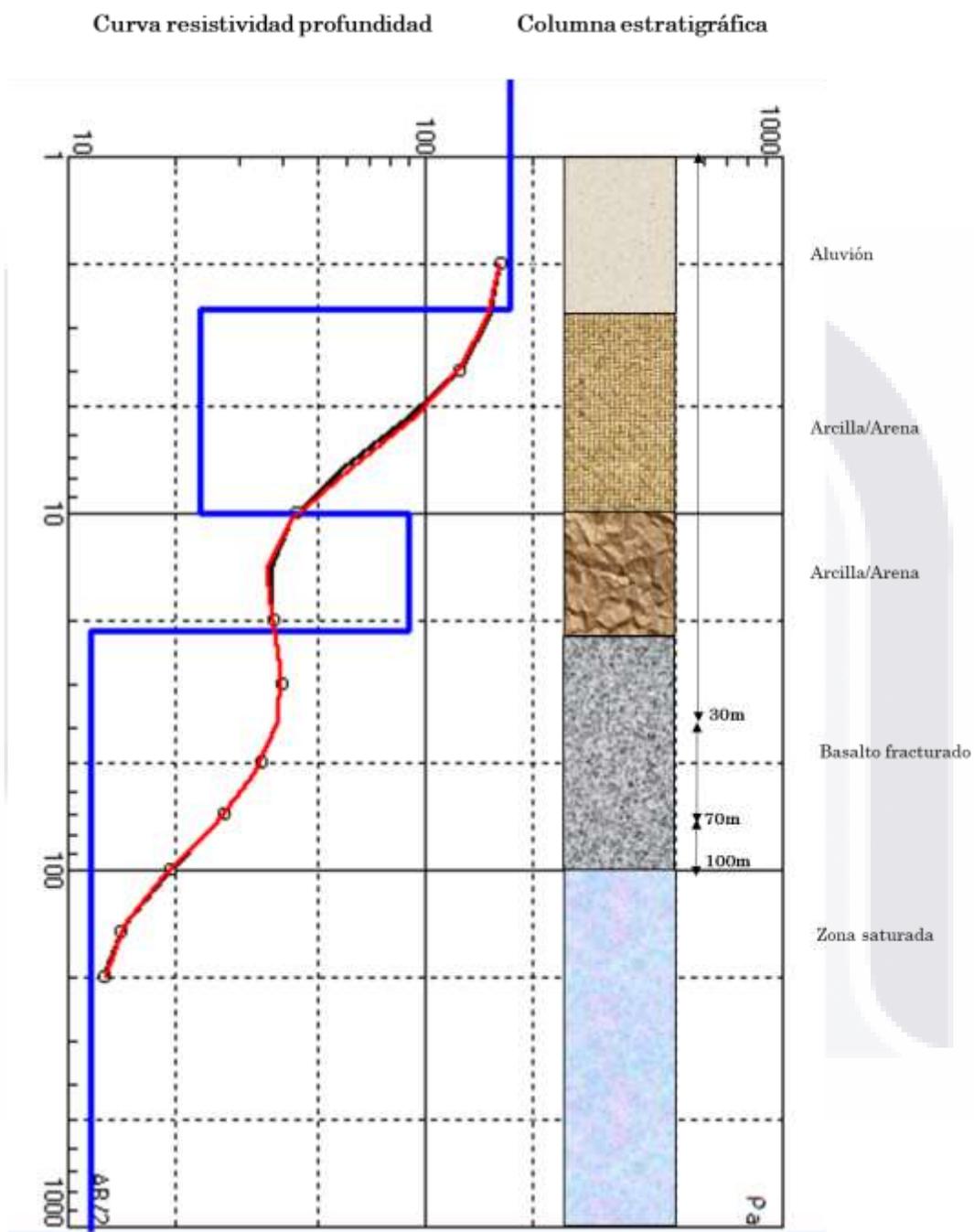


Figura 23. Interpretación de resultados SEV 03 de acuerdo con referencias bibliográficas

Interpretación SEV04

Curva resistividad profundidad Columna estratigráfica pozo tipo 067

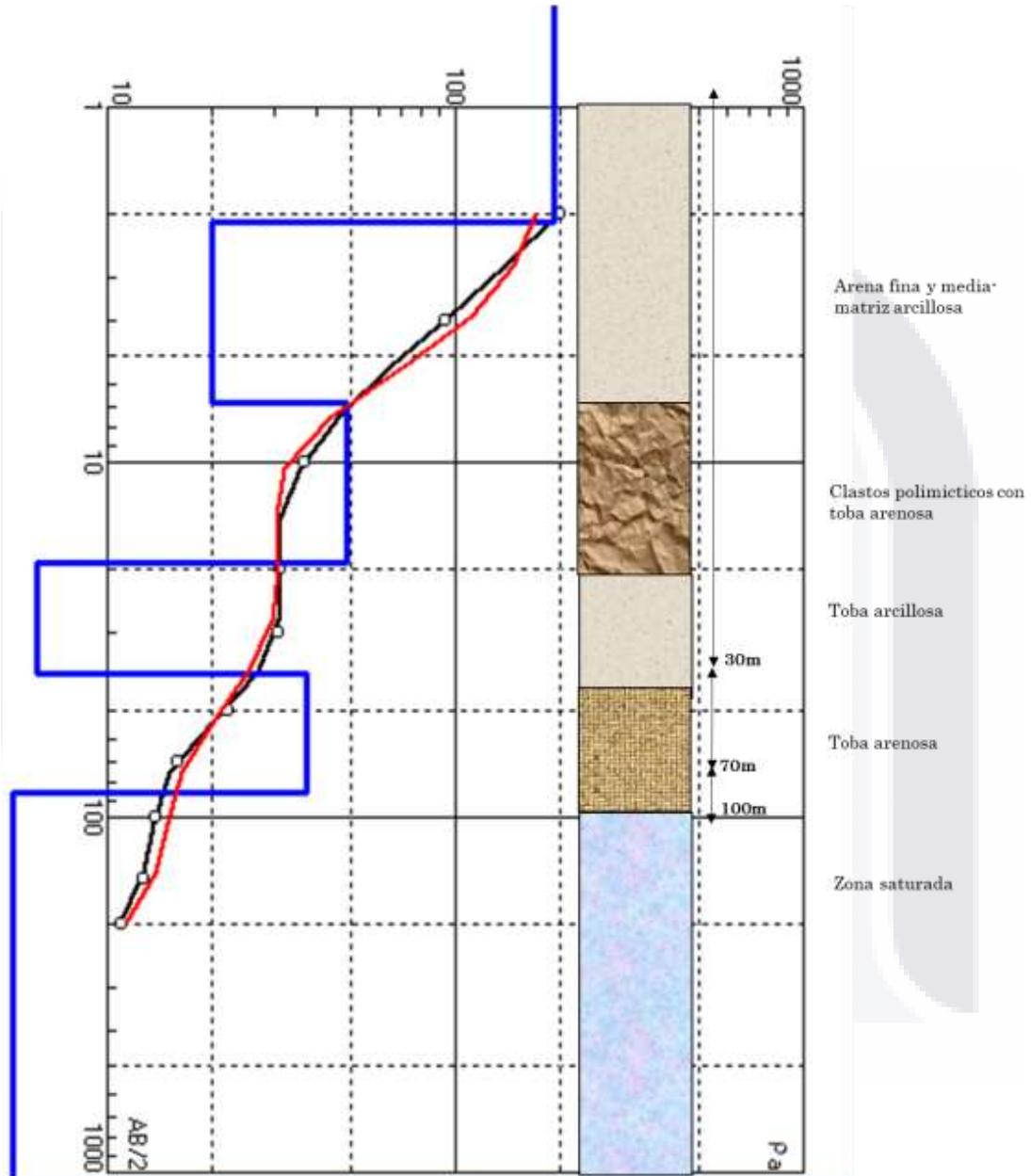


Figura 24. Correlación de resultados SEV04 con pozo 067 CNA

Interpretación SEV04

Curva resistividad profundidad Columna estratigráfica pozo tipo 067

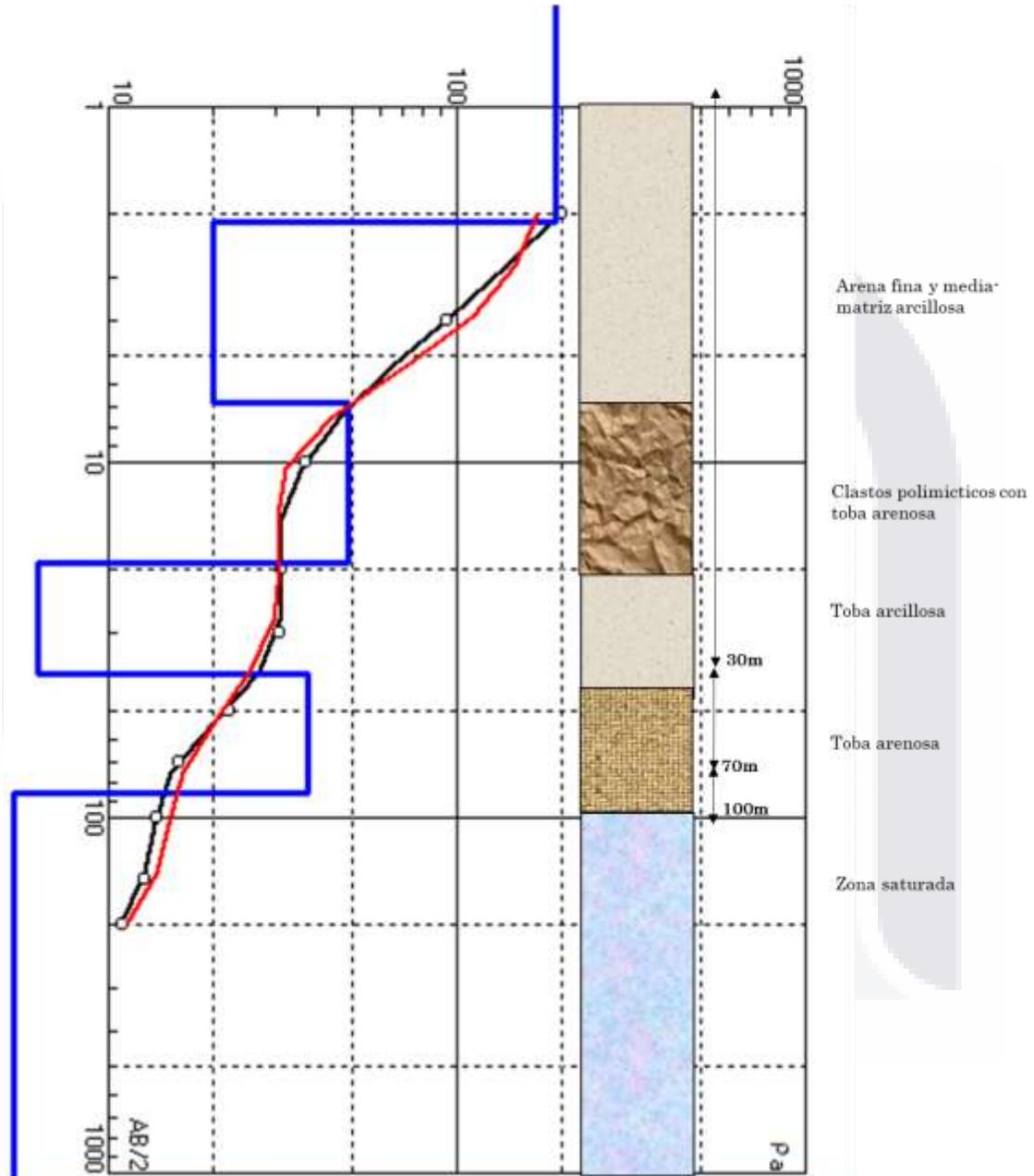


Figura 25. Interpretación de resultados SEV 04 de acuerdo con referencias bibliográficas

Interpretación SEV01

Curva resistividad profundidad Columna estratigráfica pozo tipo
067

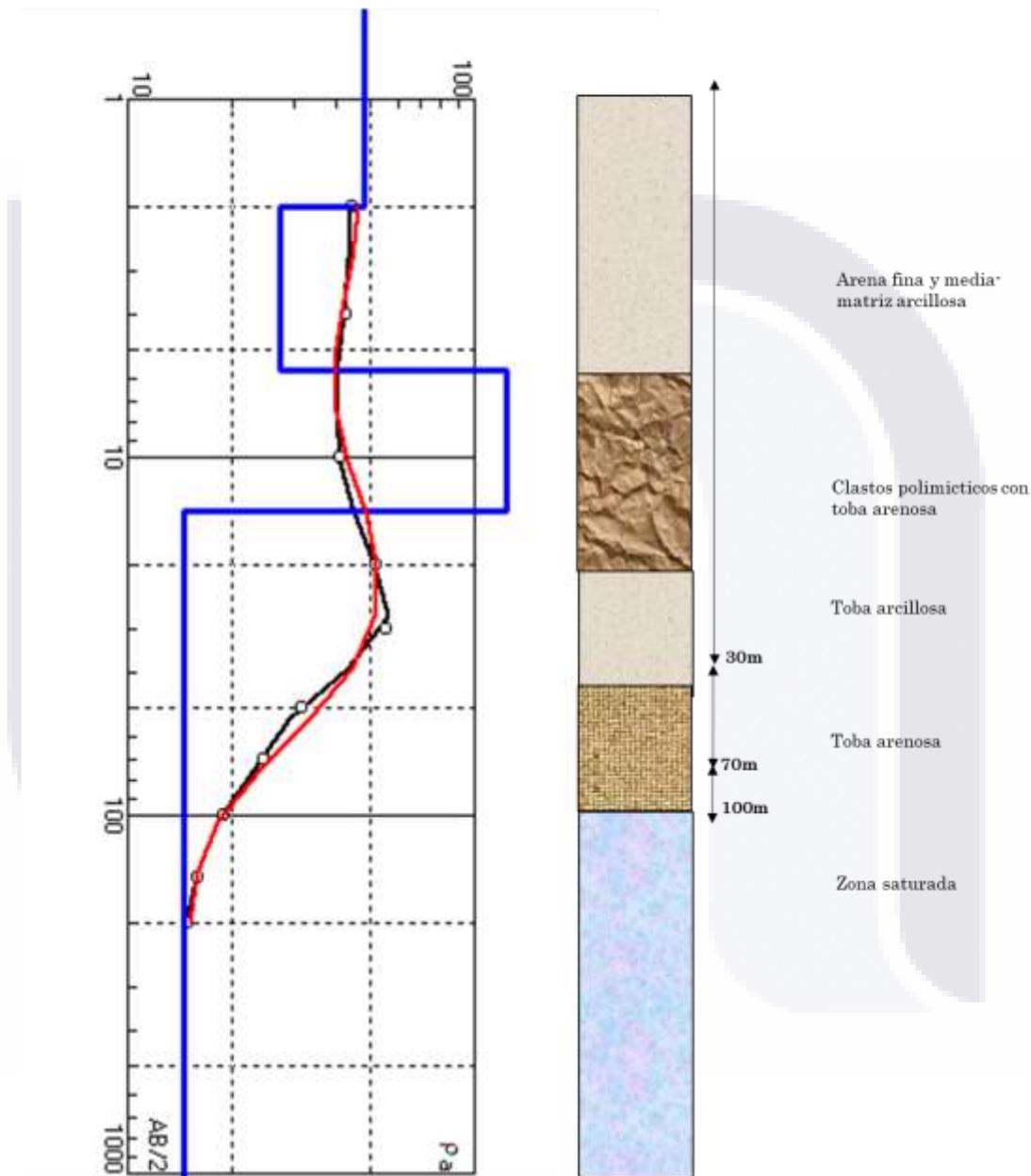


Figura 26. Correlación de resultados SEV01 con pozo 067 CNA

Interpretación SEV01

Curva resistividad profundidad

Columna estratigráfica

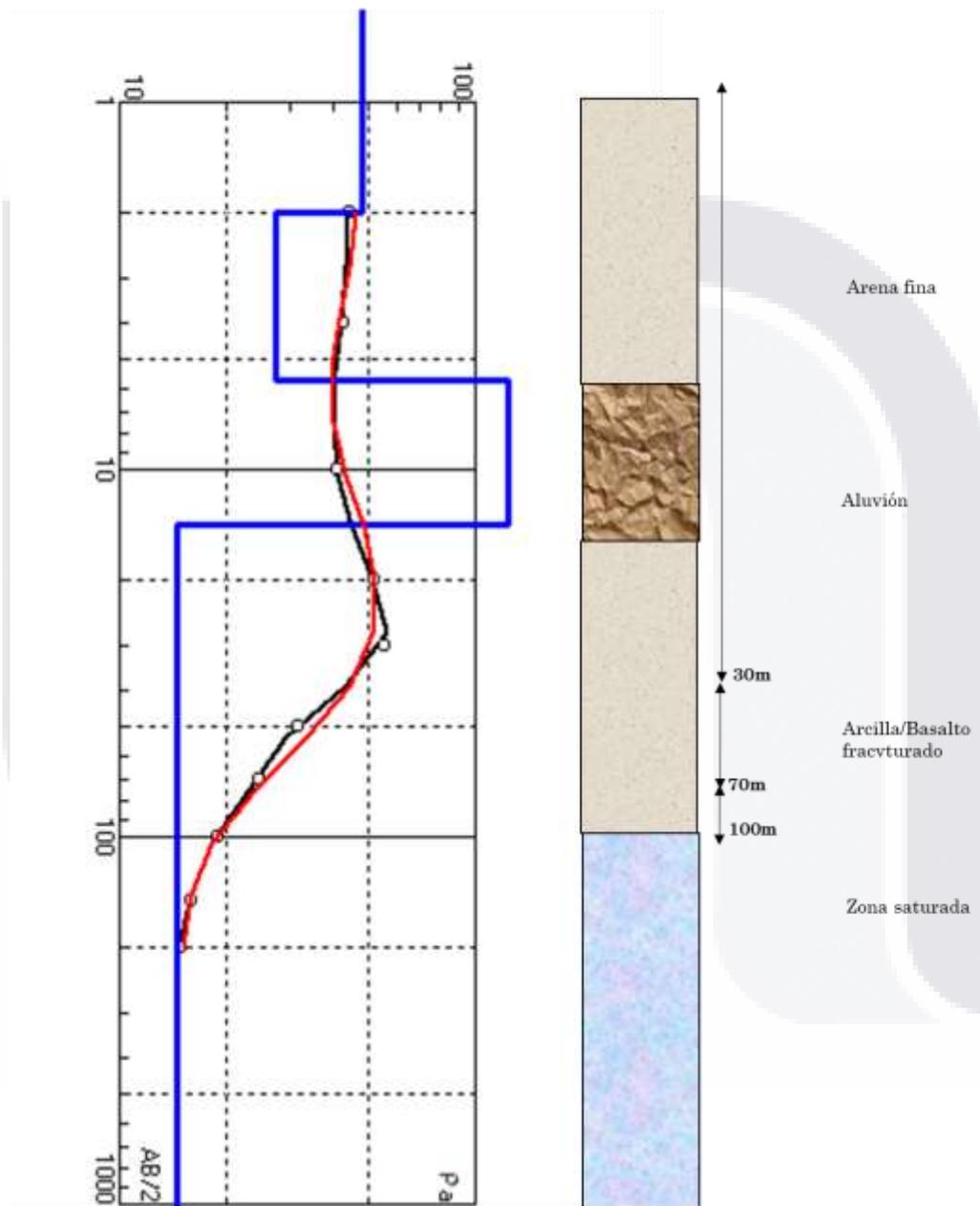


Figura 27. Interpretación de resultados SEV 01 de acuerdo con referencias bibliográficas

Interpretación SEV02

Curva resistividad profundidad Columna estratigráfica pozo tipo 086

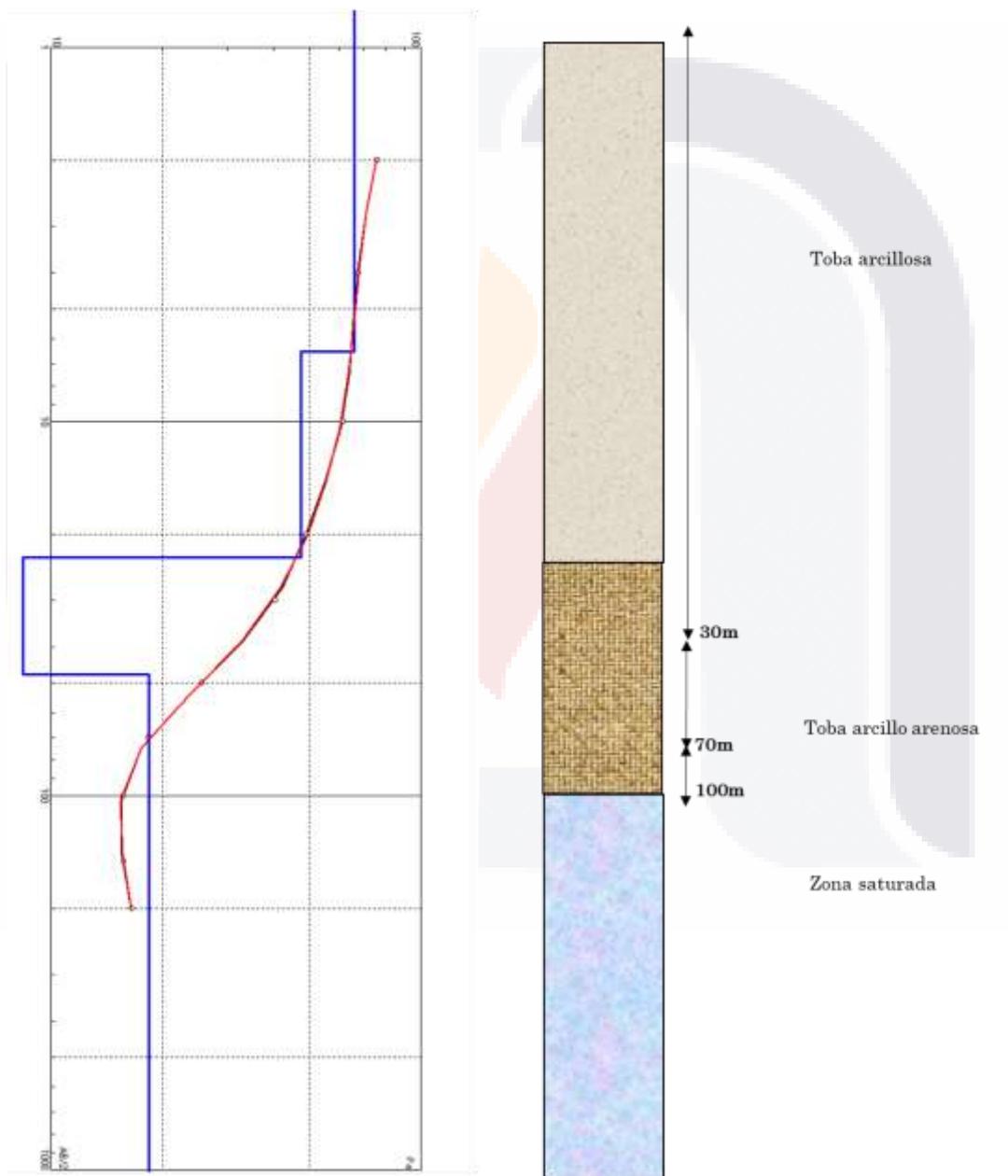


Figura 28. Correlación de resultados SEV02 con pozo 086 CNA

Interpretación SEV02

Curva resistividad profundidad

Columna estratigráfica

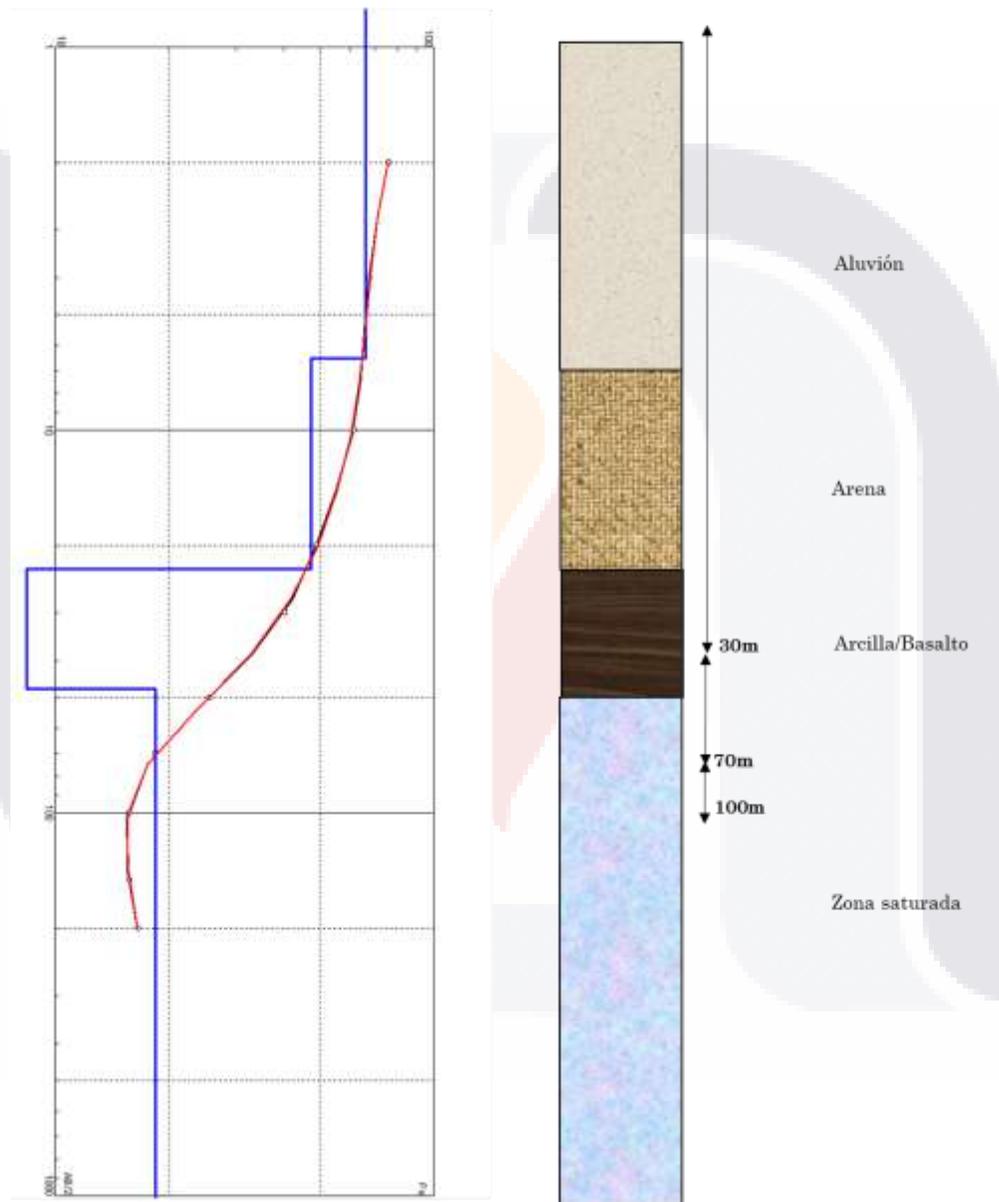


Figura 29. Interpretación de resultados SEV 02 de acuerdo con referencias bibliográficas

6.2 Correlación entre pruebas de toxicidad con resultados de calidad del agua de pozos cercanos a la zona de estudio

En el bloque hidrogeológico, cotejando con los niveles de extracción en las líneas isopiezométricas, el sentido del flujo en márgenes del río San Pedro, está próximo a las profundidades encontradas en las pruebas geofísicas cómo se observa en la figura descriptiva 30, por ello, se deberán de hacer pruebas a detalle de calidad de agua en los pozos de extracción que tengan cercanía con los cauces naturales para evaluar la conectividad vertical en zonas más profundas.

A través de una red de flujo que se observa en la figura 16, se puede observar la dirección y zonas de retención que se asocian a la conectividad vertical de un cauce natural con el sistema acuífero hasta la zona vadosa además de las intersecciones con agrietamientos en la superficie.

Respecto al nivel de contaminación, es evidente que la capa que está a nivel subsuperficial del río está funcionando cómo buen filtro y está reteniendo contaminantes cómo se observa en las pruebas de toxicidad en las que fueron sometidos diferentes muestreos de agua a través de la columna de suelo de la zona. El nicho de investigación para futuras investigaciones tendrá que ser en establecer un modelo numérico para comprender de mejor manera cómo es que se comporta el transporte de contaminantes a macro escala.

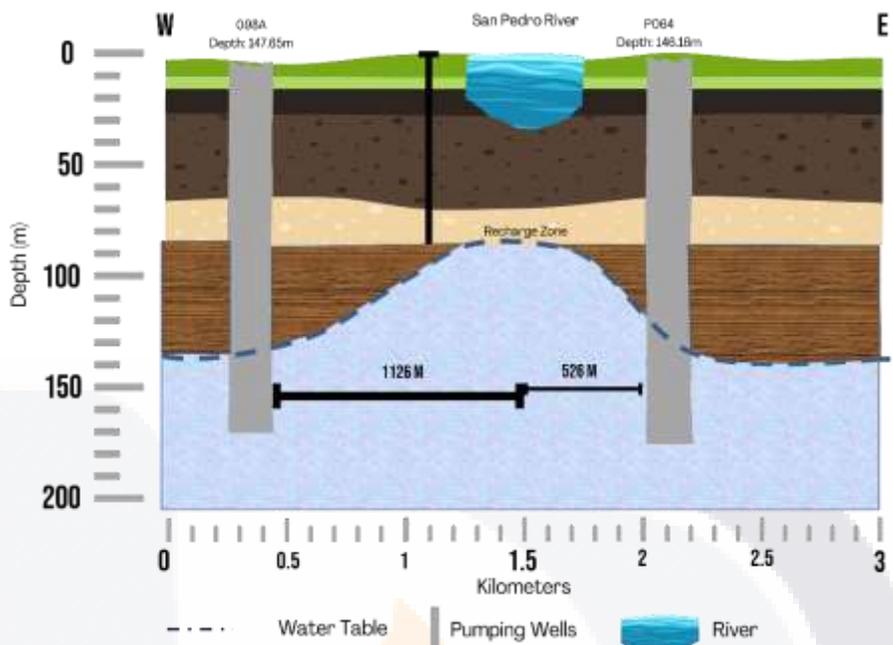


Figura 30. Esquema descriptivo de conectividad vertical en cauces intermitentes



CAPÍTULO VII
CONCLUSIONES

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES

7.1 Conclusión general

Lo que es evidente en esta investigación, es la alteración de cauces naturales producto de las actividades humanas, por ello a partir de la caracterización física se pudo comprender la modificación a entornos naturales derivado principalmente de procesos de urbanización.

La conectividad vertical en corrientes de tipo intermitente hacia sistemas acuíferos es evidente a niveles subsuperficiales, ya que las pruebas geofísicas efectuadas en la zona de estudio mostraron hallazgos de estratos con bajos niveles de resistividad asociados a tener contacto con la zona vadosa.

Por otra parte, cómo antesala a la evaluación de cómo el suelo funciona en el transporte de contaminantes en este fenómeno, a escala subsuperficial se está comportando cómo un filtro el cual hace que pierda nivel de toxicidad el agua que circula a través de medios porosos. El reto para futuras investigaciones es desarrollar análisis utilizando simulación numérica para adaptar escenarios a macro escala dependiendo la región hidrogeológica en cuestión.

7.2 Conclusiones particulares

Partiendo de los objetivos particulares y alcances, se obtuvieron los siguientes puntos más destacados:

1. A través de una caracterización geoespacial se obtuvo la topografía de un cauce de tipo intermitente que tiene tres principales zonas de retención de las cuáles se realizaron caracterizaciones hidrogeológica e hidro-geoquímica.
2. Se encontró a través de las zonas de retención, que son puntos de conectividad vertical entre acuífero y agua superficial, con materiales que tienen alto contenido de finos y que tiene una profundidad entre los 70 a 90 m.
3. De acuerdo con la correlación de la litología, se tienen estratos de baja capacidad de resistividad que están asociados a alternancias entre arenas y arcillas, de las cuáles proporcionan indicadores de una conectividad vertical entre acuífero y agua superficial.
4. Por otra parte, con las pruebas de toxicidad mediante el dispositivo experimental arrojan resultados que, para esa escala, el hacer circular en medios porosos agua contaminada muestreada directamente de un cauce natural, da cómo resultados bajos niveles de contaminantes una vez que se colecta el efluente en la columna de suelo.
5. Por otra parte, con la información de los pozos de extracción cercanos, se realizó una red de flujo hidrogeológico en la que coinciden los niveles estáticos con las profundidades en las que se encontraron los valores de resistividad de menor magnitud.
6. El mapeo de la red de flujo coincide con investigaciones enfocadas en recarga, en las que los principales puntos de recarga se dan sobre red de drenaje natural, en la que, para los alcances de esta investigación, tiene algunos puntos de conectividad vertical que están asociados a la interacción de agua superficial y acuífero.

Por lo tanto, con el seguimiento de los objetivos general y particulares, surgen algunos puntos importantes que por los alcances de la investigación no se pudieron cumplir y dan apertura para futuras investigaciones.

7.3 Nichos de investigación

Dados los alcances de la investigación, surgen algunas áreas de oportunidad que pueden ser analizadas en algunos proyectos o líneas del conocimiento que permitan comprender de mejor manera la conectividad vertical entre acuífero y agua superficial, los cuáles se mencionan a continuación:

1. Realizar un análisis de transporte de contaminantes aplicando simulación numérica con algún software para evaluar la interacción suelo que fue encontrada en el bloque hidrogeológico.
2. Llevar a cabo un estudio geológico para obtener litología más precisa de los pozos de extracción cercanos a algún cauce de tipo intermitente.
3. Aplicar la técnica SEV en diferentes cauces intermitentes para cotejar la profundidad en la cual se encuentra esa interacción entre el agua superficial y acuífero.

GLOSARIO

Caudal base

El caudal base se refiere al flujo de agua constante o mínimo que se encuentra en un río, arroyo o cualquier corriente de agua durante períodos de sequía o escasez de precipitaciones.

Conectividad vertical

Capacidad de comunicación o interconexión entre diferentes unidades geológicas o acuíferos a lo largo de una columna vertical en el subsuelo. Implica la existencia de vías de flujo vertical a través de capas de suelo, rocas o formaciones geológicas que permiten el movimiento del agua subterránea de una unidad a otra.

Corriente intermitente

Se refiere a un tipo de corriente de agua (río o arroyo) que no fluye de manera continua, sino que tiene períodos alternados de flujo y sequía. Es común encontrar corrientes intermitentes en regiones con patrones climáticos estacionales o en áreas donde el suministro de agua es limitado.

Modelación hidráulica

Técnica utilizada para simular y predecir el comportamiento del flujo del agua en sistemas hidráulicos, como ríos, canales, redes de alcantarillado o sistemas de drenaje.

Pruebas de toxicidad

Ensayos que se llevan a cabo para evaluar los posibles efectos adversos de sustancias químicas o contaminantes presentes en el agua sobre los organismos vivos acuáticos.

Resistividad

La resistividad es una característica física de los materiales que señala su habilidad para oponerse al paso de corriente eléctrica. En el ámbito de la hidrogeología, la resistividad eléctrica se refiere a la impedancia que el subsuelo presenta ante el flujo de corriente eléctrica.

Sondeos eléctricos verticales

Técnica geofísica utilizada para investigar las propiedades eléctricas del subsuelo en profundidad.

Zonas de retención

Áreas en la superficie terrestre donde el movimiento del agua superficial se desacelera o se interrumpe debido a elementos del relieve (topografía) o la geología. Estas áreas funcionan como espacios temporales de almacenamiento de agua, donde ésta se detiene en lugar de fluir hacia abajo o hacia corrientes de mayor tamaño.

Zona vadosa

También conocida como zona no saturada o zona de aireación, es una región del subsuelo que se encuentra por encima del nivel freático o de agua subterránea. En esta zona, los espacios porosos del suelo, como los intersticios entre partículas de arena o grava, contienen tanto aire como agua, pero la cantidad de agua presente no es suficiente para saturar completamente los poros.

REFERENCIAS

- Aguilar García, R., & Ortega-Guerrero, M. A. (2017). Análisis de la dinámica del agua en la zona no saturada en un suelo sujeto a prácticas de conservación: Implicaciones en la gestión de acuíferos y adaptación al cambio climático. | *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, V. 34(núm. 2.), p 91-104.
- Aragón-Sulik, M., Escolero Fuentes, O., Navarro Mendoza, S., & Ortiz Guzmán, M. (2015). Distribución geográfica de arsénico en acuífero de los Valles Centrales de Oaxaca, México. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 36(1), 102–110.
- Avelar González, F. J. A., Ramírez López, E. M. R., Martínez Saldaña, Ma. C. M., Guerrero Barrera, A. L. G., Juárez, F. J., & Reyes Sánchez, J. L. R. (2011). Water Quality in the State of Aguascalientes and its Effects on the Population's Health. En *Water Resources in Mexico: Scarcity, Degradation, Stress, Conflicts, Management, and Policy* (pp. 217–229). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-05432-7_16
- Ávila-Sandoval, C., Júnez-Ferreira, H., González-Trinidad, J., Bautista-Capetillo, C., Pacheco-Guerrero, A., & Olmos-Trujillo, E. (2018). Spatio-Temporal Analysis of Natural and Anthropogenic Arsenic Sources in Groundwater Flow Systems. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(11). <https://doi.org/10.3390/ijerph15112374>
- Boughariou, E., Saidi, S., Barkaoui, A. E., Khanfir, H., Zarehloul, Y., & Bouri, S. (2015). Mapping recharge potential zones and natural recharge

calculation: Study case in Sfax region. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(7), 5203–5221. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1512-x>

Campos Moreno, G. E., Hernandez-Marin, M., Martínez Martínez, S. I., & López López, J. L. (2016). *Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes*. Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Chitsazan, M., Mohammad Rezapour Tabari, M., & Eilbeigi, M. (2017). Analysis of temporal and spatial variations in groundwater nitrate and development of its pollution plume: A case study in Karaj aquifer. *Environmental Earth Sciences*, 76(11), 391. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6677-7>

Conallin, J., Wilson, E., & Campbell, J. (2017). Implementation of Environmental Flows for Intermittent River Systems: Adaptive Management and Stakeholder Participation Facilitate Implementation. *Environmental Management*, 1–9. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0922-4>

Datry, T., Larned, S. T., & Tockner, K. (2014). Intermittent Rivers: A Challenge for Freshwater Ecology. *BioScience*, 64(3), 229–235. <https://doi.org/10.1093/biosci/bit027>

Díaz García, V. M., & Sanvicente Sánchez, H. (2011). *Metodología para la localización de zonas de recarga de acuíferos en el Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México mediante sistemas de información geográfica*. <http://hdl.handle.net/20.500.12013/359>

Djorfi, S., Djorfi, S., & Beloulou, L. (2017). Urban and Industrial Wastes Induced Water Pollution Diagnosis and Risk Assessment of the Kherraza Plain

Aquifer (NE Algeria). *Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration*, 1223–1225.

Dong, Y., Li, G., & Xu, H. (2012). An areal recharge and discharge simulating method for MODFLOW. *Computers & geosciences*, 42, 203–205.

Dragon, K., Kasztelan, D., Gorski, J., & Najman, J. (2016). Influence of subsurface drainage systems on nitrate pollution of water supply aquifer (Tursko well-field, Poland). *Environmental Earth Sciences*, 75(2), 100.
<https://doi.org/10.1007/s12665-015-4910-9>

Esteller, M. V., Rodríguez, R., Cardona, A., & Padilla-Sánchez, L. (2012). Evaluation of hydrochemical changes due to intensive aquifer exploitation: Case studies from Mexico. *Environmental Monitoring and assessment*, 184(9), 5725–5741.

Foster, S., Hirata, R., & Andreo, B. (2013). The aquifer pollution vulnerability concept: Aid or impediment in promoting groundwater protection? *Hydrogeology Journal*, 21(7), 1389–1392. <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1019-7>

García, I., Rodríguez, J. G., López, F., & Tenorio, Y. M. (2010). Transporte de Contaminantes en Aguas Subterráneas mediante Redes Neuronales Artificiales. *Información tecnológica*, 21(5), 79–86.
<https://doi.org/10.4067/S0718-07642010000500011>

González-Trinidad, J., Pacheco-Guerrero, A., Júnez, H., Olmos, E., & Bautista-Capetillo, C. (2017). Dynamics of land cover changes and delineation of groundwater recharge potential sites in the Aguanaval aquifer,

Zacatecas, México. *Applied Ecology and Environmental Research*, 15, 387–402. https://doi.org/10.15666/aeer/1503_387402

González-Trinidad, J., Pacheco-Guerrero, A., Júnez-Ferreira, H., Bautista-Capetillo, C., & Hernández-Antonio, A. (2017). Identifying Groundwater Recharge Sites through Environmental Stable Isotopes in an Alluvial Aquifer. *Water*, 9(8), 569. <https://doi.org/10.3390/w9080569>

Groves, P., Cascante, G., Dundas, D., & Chatterji, P. K. (2011). Use of geophysical methods for soil profile evaluation. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(9), 1364–1377.

Guerrero Martínez, L., Hernandez-Marín, M., & Burbey, T. J. (2018). Estimation of natural groundwater recharge in the Aguascalientes semiarid valley, Mexico | *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2018.2.1022>

Guzmán-Colis, G., Thalasso, F., Ramírez-López, E. M., Rodríguez-Narciso, S., Guerrero-Barrera, A. L., & Avelar-González, F. J. (2011). Evaluación espacio-temporal de la calidad del agua del río San Pedro en el Estado de Aguascalientes, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 27(2), 89–102.

Harbuláková, V. O., Zeleňáková, M., Rysulová, M., Repel, A., & Simonová, D. (2016). Evaluation of Ecological Flow and Concentrations of Pollutants in Selected River Basin in Eastern Slovakia. *Procedia Engineering*, 162, 98–105. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.021>

Hernández Guerra, S. J., Hernández-Marín, M., Pacheco-Martínez, J., & González-Cervantes, N. (2018). *Estudio mediante el uso de simulaciones*

numéricas para determinar las características de velocidad y volumen de recarga natural al acuífero del valle de Aguascalientes a través de discontinuidades superficiales [Thesis, Universidad Autónoma de Aguascalientes].

<http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/handle/11317/1628>

Hernández-Marín, M., Guerrero-Martínez, L., Zermeño-Villalobos, A., Rodríguez-González, L., Burbey, T. J., Pacheco-Martínez, J., Martínez-Martínez, S. I., & González-Cervantes, N. (2018). Spatial and temporal variation of natural recharge in the semi-arid valley of Aguascalientes, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 26(8), 2811–2826. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1819-x>

Instituto Mexicano del Transporte, A. (2003). Geofísica aplicada en los proyectos básicos de ingeniería civil. *Publicación Técnica*, 229.

Lima, M. L., Romanelli, A., & Massone, H. E. (2013). Decision support model for assessing aquifer pollution hazard and prioritizing groundwater resources management in the wet Pampa plain, Argentina. *Environmental monitoring and assessment*, 185(6), 5125–5139.

Lowrie, W., & Fichtner, A. (2020). *Fundamentals of geophysics*. Cambridge university press.

Pacheco-Guerrero, A., Goodrich, D. C., González-Trinidad, J., Júnez-Ferreira, H. E., & Bautista-Capetillo, C. F. (2017). Flooding in ephemeral streams: Incorporating transmission losses. *Journal of Maps*, 13(2), 350–357. <https://doi.org/10.1080/17445647.2017.1305303>

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Reyes-Cedeño, I. G., Hernández-Marín, M., Pacheco-Guerrero, A. I., & Gannon, J. P. (2023). Comprehensive Methodology and Analysis to Determine the Environmental Flow Regime in the Temporary Stream "La Yerbabuena" in Aguascalientes, Mexico. *Water*, 15(5), Article 5.

<https://doi.org/10.3390/w15050879>

Rico-Martínez, R., Arzate-Cárdenas, M. A., Robles-Vargas, D., Pérez-Legaspi, I. A., Jesús, A.-F., Santos-Medrano, G. E., Rico-Martínez, R., Arzate-Cárdenas, M. A., Robles-Vargas, D., Pérez-Legaspi, I. A., Jesús, A.-F., & Santos-Medrano, G. E. (2016). Rotifers as Models in Toxicity Screening of Chemicals and Environmental Samples. En *Invertebrates—Experimental Models in Toxicity Screening*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/61771>

Rico-Martínez, R., Snell, T. W., & Shearer, T. L. (2013). Synergistic toxicity of Macondo crude oil and dispersant Corexit 9500A® to the *Brachionus plicatilis* species complex (Rotifera). *Environmental Pollution*, 173, 5–10. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.09.024>

Salinas-Reyes, T., & Ortega-Guerrero, M. A. (2019). Rare earth elements dissolved in groundwater and its relation with the flow systems in marine and volcanic rocks in the Bajío of Guanajuato, central Mexico. | *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*.

<https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2019.1.714>

Sattar, G. S., Keramat, M., & Shahid, S. (2016). Deciphering transmissivity and hydraulic conductivity of the aquifer by vertical electrical sounding (VES) experiments in Northwest Bangladesh. *Applied Water Science*, 6(1), 35–45. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0203-9>

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Sauret, E. S. G., Beaujean, J., Nguyen, F., Wildemeersch, S., & Brouyere, S. (2015).

Characterization of superficial deposits using electrical resistivity tomography (ERT) and horizontal-to-vertical spectral ratio (HVSZ) geophysical methods: A case study. *Journal of Applied Geophysics*, *121*, 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.07.012>

Shishaye, H. A., Tait, D. R., Befus, K. M., & Maher, D. T. (2019). An integrated

approach for aquifer characterization and groundwater productivity evaluation in the Lake Haramaya watershed, Ethiopia. *Hydrogeology Journal*, *27*(6), 2305–2305. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-01964-7>

Soud, F., Agoubi, B., & Kharroubi, A. (2017). Assessing the Groundwater Pollution

Problem by Nitrate and Faecal Bacteria: Case of Djerba Unconfined Aquifer (Southeast Tunisia). En *Water and Land Security in Drylands* (pp. 87–96). Springer.

Torres-Guzmán, F., Avelar-González, F. J., & Rico-Martínez, R. (2010). An

assessment of chemical and physical parameters, several contaminants including metals, and toxicity in the seven major wastewater treatment plants in the state of Aguascalientes, Mexico. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, *45*(1), 2–13.

<https://doi.org/10.1080/10934520903388517>

Verma, V., Rico-Martinez, R., Kotra, N., King, L., Liu, J., Snell, T. W., & Weber, R. J.

(2012). Contribution of Water-Soluble and Insoluble Components and Their Hydrophobic/Hydrophilic Subfractions to the Reactive Oxygen Species-Generating Potential of Fine Ambient Aerosols. *Environmental*

Science & Technology, 46(20), 11384–11392.

<https://doi.org/10.1021/es302484r>

Xanke, J., Goeppert, N., Sawarieh, A., Liesch, T., Klinger, J., Ali, W., Hötzl, H.,

Hadidi, K., & Goldscheider, N. (2015). Impact of managed aquifer

recharge on the chemical and isotopic composition of a karst aquifer,

Wala reservoir, Jordan. *Hydrogeology Journal*, 23(5), 1041–1041.

<https://doi.org/10.1007/s10040-015-1262-1>

Yin, L., Hu, G., Huang, J., Wen, D., Dong, J., Wang, X., & Li, H. (2011).

Groundwater-recharge estimation in the Ordos Plateau, China:

Comparison of methods. *Hydrogeology Journal*, 19(8), 1563–1575.

<https://doi.org/10.1007/s10040-011-0777-3>

Yin, L., Zhang, E., Wang, X., Wenninger, J., Dong, J., Guo, L., & Huang, J. (2013).

A GIS-based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in the

Ordos Plateau, China. *Environmental Earth Sciences*, 69(1), 171–185.

<https://doi.org/10.1007/s12665-012-1945-z>

Zermeño Villalobos, A., Hernández Marin, M., Martínez Martínez, S. I., &

González-Cervantes, N. (2016). *Utilización de modelos numéricos para*

entender el rol de la zona vadosa en el proceso de recarga natural.

<http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/handle/11317/660>

Zhang, J., Wang, W., Wang, X., Yin, L., Zhu, L., Sun, F., Dong, J., Xie, Y., Robinson,

N. I., & Love, A. J. (2019). Seasonal variation in the precipitation recharge

coefficient for the Ordos Plateau, Northwest China. *Hydrogeology*

Journal, 27(2), 801–813. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1891-2>

Zhao, H., Duan, X., Stewart, B., You, B., & Jiang, X. (2013). Spatial correlations between urbanization and river water pollution in the heavily polluted area of Taihu Lake Basin, China. *Journal of Geographical Sciences*, 23(4), 735–752. <https://doi.org/10.1007/s11442-013-1041-7>

