



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES**

Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción

Departamento de Ingeniería Civil

Tesis

**Caracterización del suelo adyacente a fallas superficiales en
Aguascalientes y evaluación de su capacidad de infiltración**

Presenta

Ing. Christian Emmanuel Rodríguez Padilla

**Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Civil con especialidad en
Ambiental**

Tutor

Dr. Martín Hernández Marín

Cotutor

Dra. Lilia Guerrero Martínez

Comité Tutorial

M en C. Norma González Cervantes

Dr. Jesús Pacheco Martínez

Aguascalientes, Ags., 17 de junio de 2021

**CARTA DE VOTO APROBATORIO
COMITÉ TUTORAL**

**DR. EN C.T.C HÉCTOR HOMERO POSADA ÁVILA
DECANO (A) DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN**

PRESENTE

Por medio del presente como **Miembros del Comité Tutorial** designado del estudiante **CHRISTIAN EMMANUEL RODRÍGUEZ PADILLA** con ID **138952** quien realizó la tesis titulada: **CARACTERIZACIÓN DEL SUELO ADYACENTE A FALLAS SUPERFICIALES EN AGUASCALIENTES Y EVALUACIÓN DE SU CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia damos nuestro consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que nos permitimos emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Ponemos lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, le enviamos un cordial saludo.

**ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"**

Aguascalientes, Ags., a 12 de junio de 2021.


Dr. Martín Hernández Marín
Tutor de tesis


M. en C. Norma González Cervantes
Asesor de tesis


Lilia Guerrero Mtz.

Dra. Lilia Guerrero Martínez
Co-Tutor de tesis


Dr. Jesús Pacheco Martínez
Asesor de tesis

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

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión de Calidad.
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

Código: DO-SEE-FO-16
Actualización: 00
Emisión: 17/05/19

Fecha de dictaminación dd/mm/aaaa: 15/06/2021

NOMBRE: Christian Emmanuel Rodríguez Padilla ID 138952

PROGRAMA: Maestría en Ingeniería Civil con opción a Ambiental LGAC (del posgrado): Aplicación de Ciencias de la Tierra en proyectos de Ingeniería

TIPO DE TRABAJO: () Tesis () Trabajo Práctico

TÍTULO: Caracterización del suelo adyacente a fallas superficiales en Aguascalientes y evaluación de su capacidad de infiltración

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado): Diseño de una metodología que permita evaluar las zonas de daño por falla superficial y establecer su potencial contribución a la recarga de agua subterránea

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
SI				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
NO				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 Nucleo 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:

SI No

FIRMAS

Elaboró:

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

Dr. Mario Eduardo Ormeño de León

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO TÉCNICO:

Dr. Martín Hernández Marín

* En caso de conflicto de intereses, firmar a 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. Alejandro Acosta Collazo

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

Dr. en C.T.C. Héctor Homero Pasada Avila

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: ... y con la eficiencia terminal del programa de posgrado y el Art. 105F las funciones del Secretario Técnico, llevar el seguimiento de los alumnos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico que hizo posible esta investigación. De igual manera a la Universidad Autónoma de Aguascalientes por permitirme ser parte de este posgrado y brindarme las herramientas para llevarlo a cabo con éxito.

A mi tutor el Dr. Martín Hernández Marín, mi más profundo respeto y agradecimiento, por todo el apoyo entregado, por el tiempo brindado y por compartir sus conocimientos.

Agradezco a mi cotutora y amiga la Dra. Lilia Guerrero Martínez, por alentarme a participar en este posgrado y apoyarme durante todo el camino.

A mis asesores la Mtra. Norma González Cervantes y el Dr. Jesús Pacheco Martínez por su apoyo para que este trabajo de investigación fuera exitoso.

A la empresa GEO, en especial al Ing. Juan Fuentes y al Mtro. Alfredo Zermeño, por todo el apoyo brindado al prestarme los aparatos para la realización de la campaña experimental. Al igual que al Mtro. Hugo Luna, por aportar sus conocimientos a esta investigación.

A mis compañeros y amigos de la maestría, en especial a Fanny, Cadengo, Jorge, Irving, Eddie, Flores, Hiram, Andy y Scott, por hacer de esta etapa una de las mejores.

A mi familia y amigos, que estuvieron en cada momento, con sus consejos, risas y apoyo incondicional, fueron un pilar importante en esta etapa.

DEDICATORIAS

A las personas más importantes en mi vida...

Mis padres Graciela y Manuel, por todo el amor, paciencia y apoyo incondicional.

Nunca me dejan caer, todo lo que soy es por y para ustedes.

A mi hermano Luis, espero hacerte sentir orgulloso siempre.

A mis ángeles, mis abuelos Kika y Chuy, los adoro con el alma.

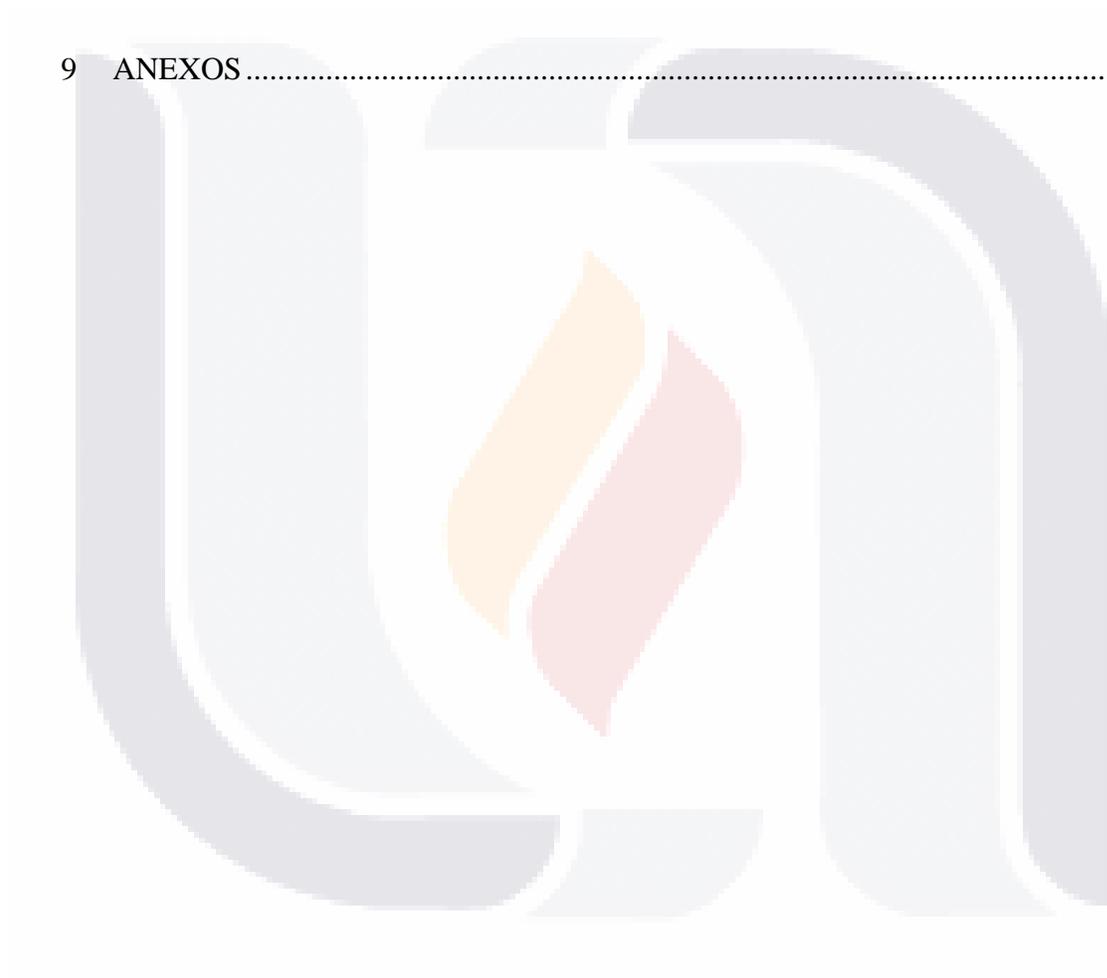
Mi infinito amor y agradecimiento a ustedes, hacen mi vida perfecta.

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN.....	15
1.1	Prólogo	15
1.2	Objetivo general	15
1.3	Objetivos particulares.....	15
1.4	Justificación.....	16
1.5	Hipótesis.....	17
2	ESTADO DEL ARTE	19
3	MARCO TEÓRICO	25
3.1	Fallas superficiales	25
3.2	Subsidencia.....	25
3.3	Flujo de agua en suelos	26
3.4	Métodos geofísicos.....	27
3.4.1	Métodos eléctricos.....	27
3.4.2	Métodos sísmicos	28
3.5	Conductividad hidráulica	29
4	MARCO METODOLÓGICO	32
4.1	Delimitación de la zona de estudio	32
4.2	Pruebas de campo.....	34

4.3	Trabajo de gabinete	38
5	RESULTADOS	41
5.1	Resultados generales hidráulicos y geofísicos de la zona de estudio.....	41
5.1.1	Permeabilidad.....	41
5.1.2	Tomografía eléctrica resistiva	43
5.1.3	Refracción sísmica	45
5.2	Resultados hidráulicos y geofísicos a lo largo de las discontinuidades	47
5.2.1	Permeabilidad y resistividad eléctrica Punto 1.....	48
5.2.2	Permeabilidad y resistividad eléctrica Punto 2.....	55
5.2.3	Permeabilidad y resistividad eléctrica Punto 3.....	62
5.2.4	Permeabilidad y resistividad eléctrica Punto 4.....	69
6	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	78
6.1	Perfil de Conductividad hidráulica.....	78
6.2	Tomografía Eléctrica Resistiva	79
6.3	Refracción sísmica	80
6.4	Pruebas de permeabilidad y perfiles de resistividad eléctrica.....	81
6.4.1	Punto 1.....	81
6.4.2	Punto 2.....	83
6.4.3	Punto 3.....	85
6.4.4	Punto 4.....	87

7	CONCLUSIONES.....	92
7.1	Conclusión general.....	92
7.2	Conclusiones particulares.....	93
7.3	Nichos de investigación	94
8	Referencias	96
9	ANEXOS.....	100



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parámetro de estructura de textura del suelo (Tomado de Reynolds, 1993)..... 30



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes principales de una zona de falla (Modificado de Cello et al., 2001).	20
Figura 2. Determinación del factor de forma C (Tomado de Reynolds, 1993).	30
Figura 3. A) Ubicación del área de estudio, valle de Aguascalientes, Pabellón de Arteaga, Ags., México. B) Ubicación de la zona de estudio localizada en el municipio de Pabellón de Arteaga, Ags., donde se muestran las dos discontinuidades a analizar (líneas verde y roja), la línea amarilla muestra la ubicación de los perfiles de conductividad hidráulica (Figura 10), tomografía eléctrica resistiva (Figura 12) y refracción sísmica (Figura 14), para la caracterización de la zona de estudio; los puntos azules muestran la ubicación de los ensayos de permeabilidad en conjunto con resistividad eléctrica para mapear el flujo del agua infiltrada.	33
Figura 4. Imagen del sitio. La línea roja corresponde a una falla normal y la línea verde a una grieta.	33
Figura 5. Resistivímetro ABEM modelo Terrameter LS 2.	34
Figura 6. Sismógrafo marca Geode modelo Ultra-light.	35
Figura 7. Permeámetro de campo de carga constante construido en laboratorio, con especificaciones de sus elementos estructurales.	36
Figura 8. Resistivímetro marca Iris modelo SYSCAL Jr.	38
Figura 9. A) Ubicación de la línea de pruebas de permeabilidad en la zona de estudio en el municipio de Pabellón de Arteaga, Ags. B) Imagen de la realización de las pruebas de permeabilidad para realizar el perfil de variación de la conductividad hidráulica.	42
Figura 10. Perfil de variación de la conductividad hidráulica, obtenido de las pruebas de permeabilidad. La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 9.A.	43

Figura 11. A) Ubicación del perfil de tomografía eléctrica resistiva en planta en la zona de estudio en el municipio de Pabellón de Arteaga, Ags. B) Imagen del sitio donde se realizó el perfil de tomografía eléctrica resistiva..... 44

Figura 12. Perfil de tomografía eléctrica resistiva. La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 11.A. 45

Figura 13. A) Ubicación del perfil de refracción sísmica en planta en la zona de estudio en el municipio de Pabellón de Arteaga, Ags. B) Imagen del sitio donde se realizó el perfil de refracción sísmica. 46

Figura 14. Perfil de refracción sísmica. La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 7. 47

Figura 15. A) Ubicación de los sondeos de permeabilidad y resistividad eléctrica en conjunto en la zona de estudio en el municipio de Pabellón de Arteaga, Ags. El punto 4 está muy cerca al punto 2. B) Imagen de la realización de la prueba de permeabilidad en conjunto con resistividad eléctrica..... 48

Figura 16. A) Ubicación del perfil de tomografía eléctrica resistiva (TER), realizado en el Punto 1 en planta, en la zona de estudio en el municipio de Pabellón de Arteaga, Ags. B) Imagen del sitio donde se realizaron las pruebas de permeabilidad y TER del punto 1. La falla se ubica sobre la línea roja punteada, mientras que la línea de cables rojos indica el perfil de resistividad (TER). 49

Figura 17. Perfil de TER tomado en el punto 1 antes de la primera prueba de permeámetro. 50

Figura 18. a) Perfil de TER tomado en el punto 1 después de la primera prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración. 51

Figura 19. a) Perfil de TER tomado en el punto 1 después de la segunda prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración. 52

Figura 20. a) Perfil de TER tomado en el punto 1 después de la tercera prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración. 53

Figura 21. a) Perfil de TER tomado en el punto 1 después de la cuarta prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración. 54

Figura 22. Gráfico de la variación de la conductividad hidráulica para el punto 1. 55

Figura 23. A) Ubicación del perfil de tomografía eléctrica resistiva (TER), realizado en el Punto 2 en planta, en la zona de estudio en el municipio de Pabellón de Arteaga, Ags. B) Imagen del sitio donde se realizaron las pruebas de permeabilidad y TER del punto 2. Muestra la grieta en verde. 56

Figura 24. Perfil de TER tomado en el punto 2 antes de la primera prueba de permeámetro. 57

Figura 25. a) Perfil de TER tomado en el punto 2 después de la primera prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración. 58

Figura 26. a) Perfil de TER tomado en el punto 2 después de la segunda prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración. 59

Figura 27. a) Perfil de TER tomado en el punto 2 después de la tercera prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración. 60

Figura 28. a) Perfil de TER tomado en el punto 2 después de la cuarta prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración. 61

Figura 29. Gráfico de la variación de la conductividad hidráulica para el punto 2. 62

Figura 30. A) Ubicación del perfil de tomografía eléctrica resistiva (TER), realizado en el Punto 3 en planta, en la zona de estudio en el municipio de Pabellón de Arteaga, Ags. B) Imágenes del sitio donde se realizaron las pruebas de permeabilidad y TER del punto 3. Muestra la falla en rojo. 63

Figura 31. Perfil de TER tomado en el punto 3 antes de la primera prueba de permeámetro. 64

Figura 32. a) Perfil de TER tomado en el punto 3 después de la primera prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración. 65

Figura 33. a) Perfil de TER tomado en el punto 3 después de la segunda prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración. 66

Figura 34. a) Perfil de TER tomado en el punto 3 después de la tercera prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración. 67

Figura 35. a) Perfil de TER tomado en el punto 3 después de la cuarta prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración. 68

Figura 36. Gráfico de la variación de la conductividad hidráulica para el punto 3. 69

Figura 37. A) Ubicación del perfil de tomografía eléctrica resistiva (TER), realizado en el Punto 4 en planta, en la zona de estudio en el municipio de Pabellón de Arteaga, Ags. B) Imagen del sitio donde se realizaron las pruebas de permeabilidad y TER del punto 4. Muestra la grieta en verde. 70

Figura 38. Perfil de TER tomado en el punto 4 antes de la primera prueba de permeámetro. 71

Figura 39. a) Perfil de TER tomado en el punto 4 después de la primera prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración. 72

Figura 40. a) Perfil de TER tomado en el punto 4 después de la segunda prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración. 73

Figura 41. a) Perfil de TER tomado en el punto 4 después de la tercera prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración. 74

Figura 42. a) Perfil de TER tomado en el punto 4 después de la cuarta prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración. 75

Figura 43. Gráfico de la variación de la conductividad hidráulica para el punto 4. 76

Figura 44. Perfil creado usando la metodología de Luna-Villavicencio (2018), donde se ilustra la zona activa de falla en color rojo, la zona de transición en color naranja y la zona sin falla en color verde..... 81

Figura 45. Comparación del primer perfil TER en "seco" (perfil superior) y el perfil TER después del cuarto proceso de infiltración a través del permeámetro (perfil inferior) para el Punto de estudio 1. 82

Figura 46. Comparación del primer perfil TER en "seco" (perfil superior) y el perfil TER después de la cuarta medición del permeámetro (perfil inferior), para el punto de estudio 2. 84

Figura 47. Comparación del primer perfil TER en "seco" (perfil superior) y el perfil TER después de la cuarta medición del permeámetro (perfil inferior), para el punto de estudio 3. 86

Figura 48. Comparación del primer perfil TER en "seco" (perfil superior) y el perfil TER después de la cuarta medición del permeámetro (perfil inferior), para el punto de estudio 4. 88

Figura 49. Comparación de la variación de la conductividad hidráulica en los cuatro puntos de estudio..... 90

ACRÓNIMOS

Kfs: Conductividad hidráulica de campo

TER: Tomografía eléctrica resistiva

SEV: Sondeo eléctrico vertical



RESUMEN

En los últimos años el valle de Aguascalientes ha estado experimentando un fenómeno llamado subsidencia, que se refiere al hundimiento de la superficie del suelo y en gran medida se debe a la extracción excesiva de agua subterránea. La subsidencia puede venir acompañada de la ocurrencia de discontinuidades (fallas y grietas) debido a los asentamientos diferenciales. Por sus características hidráulicas, las discontinuidades podrían ser franjas de recarga de agua subterránea y mitigar en cierta medida el estrés hídrico actual del acuífero local. Por tal motivo, en este trabajo se aplicó una metodología que permite entender el comportamiento hidráulico de una zona afectada por fallas y establecer su potencial aporte a la recarga de agua al subsuelo. Metodológicamente se realizaron pruebas de permeabilidad y pruebas geofísicas para caracterizar la zona de falla. Las pruebas de permeabilidad se realizaron con ayuda de un permeámetro de carga constante construido en laboratorio; mientras que las pruebas geofísicas realizadas fueron tomografía eléctrica resistiva y refracción sísmica. Las pruebas en conjunto mostraron que la zona con mayor conductividad hidráulica ($8.45E-04$ a $1.06E-02$ cm/s), coincide con la zona de bajas velocidades de ondas sísmicas o zona activa (< 0.35 km/s) obtenida mediante refracción sísmica; de igual manera con la zona de posibles oquedades superficiales (> 90 ohm-metro), obtenidas con los perfiles de tomografía eléctrica resistiva. El mapeo del agua infiltrada demostró que la tendencia del agua es migrar de la zona dañada por actividad de la falla hacia el plano de falla, por lo que se podría decir que dicha zona de daño podría estar comportándose como una potencial zona de recarga de agua subterránea.

Palabras clave: Discontinuidades, conductividad hidráulica, geofísica, recarga.

ABSTRACT

In recent years the Aguascalientes Valley has been experiencing a phenomenon called subsidence, which refers to the sinking of the soil surface and is largely due to the excessive extraction of groundwater. Subsidence can be accompanied by the occurrence of discontinuities (faults and cracks) due to differential settlements. Due to their hydraulic characteristics, the discontinuities could be groundwater recharge strips and mitigate to a certain extent the current water stress of the local aquifer. For this reason, in this work a methodology was applied that allows us to understand the hydraulic behavior of an area affected by faults and establish its potential contribution to the recharge of water to the subsoil. Methodologically, permeability tests and geophysical tests were carried out to characterize the fault zone. The permeability tests were carried out with the help of a laboratory-built constant load permeameter, while the applied geophysical tests were resistive electrical tomography and seismic refraction. The tests as a whole showed that the zone with the highest hydraulic conductivity ($8.45E-04$ to $1.06E-02$ cm/s), coincide with the zone of low seismic wave velocities or active zone (<0.35 km/s) obtained by seismic refraction; in the same way with the area of possible superficial cavities (> 90 ohm-meter), obtained with the resistive electrical tomography profiles. The infiltrated water mapping showed that the tendency of the water is to migrate from the damage zone towards the fault plane, so it could be said that the damage zone could be behaving as a potential groundwater recharge zone.

Keywords: Discontinuities, hydraulic conductivity, geophysics, recharge.



Capítulo I
Introducción

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Prólogo

El valle de Aguascalientes experimenta problemas asociados a la ocurrencia de fallas superficiales, derivadas de la subsidencia diferencial, que a su vez son consecuencia de la excesiva extracción de agua del acuífero, la cual excede a la recarga natural (Pacheco-Martínez *et al.*, 2013). Sin embargo, dentro de las varias características que las fallas presentan, éstas podrían ser zonas de recarga de agua al acuífero, lo que podría resultar beneficioso ya que podrían mitigar el estrés hídrico que actualmente experimenta el acuífero del valle. Estudios previos demuestran que las zonas de daño de las fallas tienden a ser conductos para el flujo de agua (Caine *et al.*, 1996) y podrían estar actuando como canales de recarga, esto debido al incremento de su permeabilidad debido a la reciente actividad mecánica y al proceso de erosión hídrica (Hernández-Marín *et al.*, 2017). Con esto como contexto, este estudio se enfoca en el análisis de una particular zona de falla en el valle de Aguascalientes, para determinar sus características y capacidad de infiltración, asumiendo que otras zonas de falla dentro del valle podrían tener un comportamiento hidráulico similar.

1.2 Objetivo general

El objetivo de este estudio es aplicar una metodología que permita entender el comportamiento hidráulico de una zona afectada por fallas y establecer su potencial de infiltración y contribución a la recarga de agua subterránea.

1.3 Objetivos particulares

- Definir la zona de estudio mediante trabajo de campo. La zona debe tener condiciones y permiso para la experimentación y debe tener al menos una falla que la afecte.

- Realizar exploración geofísica en la zona de estudio mediante el método sísmico para establecer la potencial zona de afectación de la falla o zona de daño geomecánico.
- Realizar exploración geofísica del punto de estudio mediante el método de resistividad eléctrica para definir las características del suelo de la zona de estudio y la geometría del plano principal de falla.
- Caracterizar las condiciones de infiltración del suelo del punto de estudio de la zona de falla, mediante el uso de un permeámetro de campo.
- Realizar exploración geofísica del punto de estudio mediante el método de resistividad eléctrica en conjunto con el permeámetro de campo, para establecer el posible camino que toma en agua una vez infiltrada.

1.4 Justificación

El agua es un recurso no renovable y su utilización desmedida en el valle de Aguascalientes está creando un problema de escasez de ese vital líquido que necesita remediarse o mitigarse a corto plazo. En los últimos años el descenso del nivel freático en el valle de Aguascalientes ha alcanzado niveles críticos, lo cual ha llevado a la aparición de varios problemas geoambientales, entre los que se pueden mencionar el deterioro en la calidad del agua extraída, la reactivación de fallas geológicas y la aparición de nuevas fracturas ocasionadas por la subsidencia (Hernández-Guerra, 2018), lo que ha conllevado a entender la influencia de las fallas en el suelo mecánicamente afectado. El problema que este trabajo ayuda a resolver tiene que ver con la poca información que se tiene sobre la caracterización de los suelos afectados por fallas y el papel que desempeñan éstas en la dinámica del agua subterránea. Particularmente, este estudio aporta datos que permiten evaluar la capacidad de infiltración de agua en zonas de falla superficiales y su contribución a la recarga de agua subterránea.

1.5 Hipótesis

El suelo afectado mecánicamente por una discontinuidad superficial tiene más capacidad de infiltración de agua superficial y puede representar un potencial canal de agua subterránea.





Capítulo II

Estado del arte

2 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se muestran algunas investigaciones relevantes sobre los componentes hidromecánicos de una zona de falla, por ejemplo, la infiltración de agua al subsuelo a través de fallas superficiales ocasionadas por la subsidencia y sobre la aplicación de métodos geofísicos para su análisis.

Según Chester y Logan, (1986) y Caine *et al.*, (1996), los principales componentes hidromecánicos de una falla son:

- Núcleo de falla: es la parte de la zona de falla en donde existe la mayor deformación, formado por un volumen discontinuo de roca, se caracteriza por tener una baja permeabilidad y por actuar como una barrera para el flujo de fluidos.
- Zona de daño: Consiste en rocas densamente fracturadas, lo cual puede provocar un aumento considerable de la permeabilidad y por consiguiente del flujo de fluidos a través de la zona.
- El protolito: Volumen de roca en el cual está incrustada la zona falla donde es raro encontrar características de una zona de falla, sus propiedades de permeabilidad son iguales a las de la roca hospedadora o roca sana.

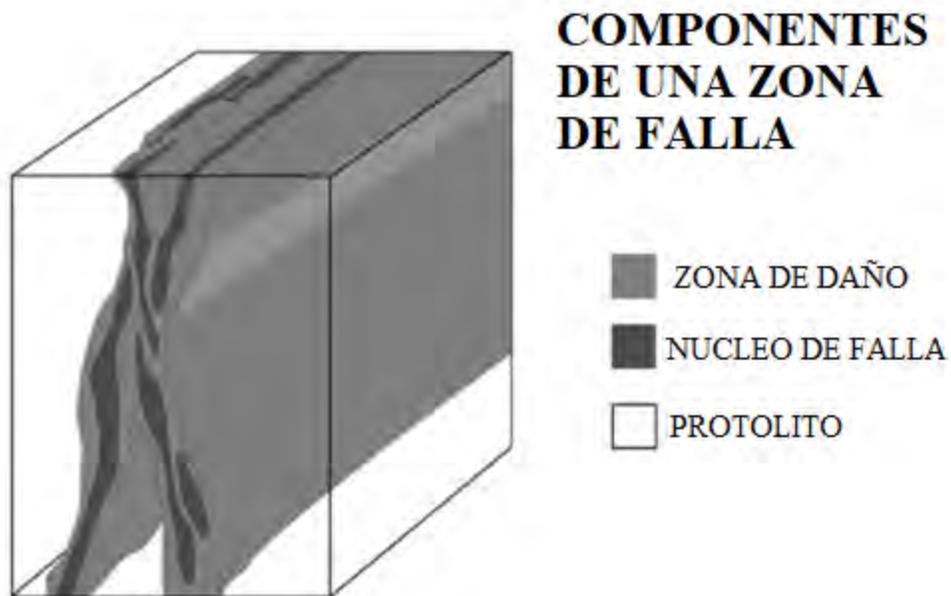


Figura 1. Componentes principales de una zona de falla (Modificado de Cello *et al.*, 2001).

Dichos componentes hidromecánicos serán los considerados en este trabajo para reconocer a la o las zonas que están actuando como potencial canal de recarga de agua subterránea.

Las investigaciones para conocer el comportamiento hidromecánico de las zonas de fallas ocasionadas por subsidencia mediante modelos numéricos idealizados han demostrado que una zona de falla se puede comportar como una barrera al flujo horizontal y como conducto para el flujo vertical, por tanto, entre mayor sea la zona de falla mayor el efecto de sellado o conducto (Bense y Person, 2006). Así mismo, si la falla se encuentra bajo tensión, como es el caso de fallas normales, tenderá a permitir el paso del agua; al contrario, si la falla está a compresión como en fallas inversas, tenderá a estar comprimida y no permitirá tan fácilmente el paso del agua (Apaydin, 2010). No obstante, según el tipo de roca hospedadora las fallas suelen ser más permeables cuando aparecen sobre rocas mecánicamente duras, pero de comportamiento más frágil y al contrario cuando la falla ocurre sobre rocas débiles o de comportamiento más dúctil, tenderán a llenarse con

material triturado que impide el movimiento del agua (Apaydin, 2010). En muchos casos, los geomateriales del núcleo de la zona de falla tienen una baja permeabilidad, aunque no siempre actúan como barrera para el flujo (Caine *et al.*, 1996). Un ejemplo de lo anterior es el trabajo realizado en la falla de Dixie Valley, Nevada, Estados Unidos de América, donde se pudo comprobar que el núcleo de falla está actuando como un conducto de flujo de fluido, sindeformacional y de corta vida, el cual se sella rápidamente formando una barrera para el flujo, mientras que, por el contrario, las zonas de daño tienden a ser conductos hidráulicos en comparación al núcleo de falla, y la permeabilidad del protolito por lo general es más baja (Caine *et al.*, 1996). Así mismo, en la falla de Geleen, ubicada en el sistema de grietas del valle de Roer, al sureste de Países Bajos, se llegó a la conclusión de que la zona de daño que se forma en depósitos arenosos probablemente actúa como zonas de mayor flujo de fluido a poca profundidad por lo que el flujo vertical se ve favorecido, aunque éstas fallas pueden formar fuertes barreras para el flujo horizontal de agua subterránea (Bense *et al.*, 2003).

Por otro lado, con el método de resistividad eléctrica se ha estudiado la distribución del agua a una profundidad somera después del proceso de infiltración, un ejemplo de ello es el estudio realizado en la falla Oriente, localizada en el valle de Aguascalientes, en la cual se realizaron perfiles de resistividad tanto perpendiculares como longitudinales a la falla de estudio (Hernandez-Marin *et al.*, 2017). De ese estudio se concluyó que, a pesar de que el agua se infiltró rápidamente, los perfiles de resistividad eléctrica obtenidos mostraron que hay muy poca variación en las resistividades aparentes, lo cual permitió sugerir que el agua mayormente se infiltra longitudinalmente a través del plano de discontinuidad (Hernandez-Marin *et al.*, 2017). En otro estudio sobre la falla Oriente, se desarrollaron modelos numéricos aplicando varias condiciones

de profundidad y ancho de la zona de influencia de falla, esto permitió conocer que la velocidad de infiltración de agua a través de una discontinuidad depende principalmente de dos parámetros: El ancho de influencia de la zona de falla y la conductividad hidráulica de la zona (Hernández-Guerra, 2018)

De acuerdo con lo investigado, hay dos características principales que se debe tener cuenta para que una zona de falla se pueda considerar como un canal de recarga:

- Que sea falla normal, ya que los esfuerzos tensionales dan lugar a desplazamientos verticales y agrietamientos.
- Que esté activa, de lo contrario, los poros interconectados por efecto de porosidad secundaria se rellenarán de material sedimentario de arrastre y sustancias diluidas en el agua que pueden precipitarse, ya que, si no hay esfuerzos, los sedimentos no se resquebrajarán y el tránsito del flujo será restringido.

Además de lo anterior, se puede realizar trabajos con reflectómetros de dominio de tiempo para tener evaluaciones exactas sobre cómo funciona el proceso de recarga vertical y horizontal hacia los acuíferos que se encuentran en zonas semiáridas con características físicas y ambientales similares a las del valle de Aguascalientes. Para ilustrarlo, se tiene el trabajo desarrollado en la subcuenca El Mogor en el Valle de Guadalupe en Baja California por Del Toro y Kretzschmar, (2013), en esta área se instaló un laboratorio de hidrogeología de campo, tratando de preservar las condiciones iniciales del entorno, se instalaron un reflectómetro de dominio de tiempo, para estimar el contenido de humedad del suelo y una estación climatológica, con los que obtuvieron mediciones continuas a intervalos definidos, posteriormente se comparó la relación existente entre la variación de la permanencia del contenido de humedad en el suelo y las fluctuaciones o

interacciones con las variables climatológicas a lo largo del año hidrológico, además de conocer el límite de saturación del suelo para determinar el momento del escurrimiento superficial.





Capítulo III
Marco Teórico

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Fallas superficiales

Las fallas son fracturas en la corteza a lo largo de las cuales ha tenido lugar un desplazamiento apreciable (Tarbuck y Lutgens, 2005). Adicionalmente, se ha observado en muchos valles y regiones costeras alrededor del mundo, que estas fallas, originalmente formadas por procesos principalmente tectónicos, se reactivan resultado del excesivo bombeo de agua subterránea en regiones áridas a semiáridas (por ejemplo: Aranda-Gómez, 1989; Lee et al., 1996; Rojas *et al.*, 2002; Hernández-Marín, 2009; Hernández-Marín et al 2015).

Las fallas se clasifican en función de su desplazamiento en verticales u horizontales, siendo las primeras aquellas en las que el movimiento es fundamentalmente paralelo al buzamiento (o inclinación), las cuales pueden producir pequeños escarpes; mientras que aquellas en las que el desplazamiento dominante es horizontal y paralelo a la dirección de la superficie de la falla se denominan horizontales o desgarres. A su vez, las fallas con desplazamiento vertical se clasifican en fallas normales e inversas; siendo las normales cuando el bloque de techo se desplaza hacia abajo en relación con el bloque de piso, pero si ocurre lo contrario se denomina falla inversa (Tarbuck y Lutgens, 2005).

El valle de Aguascalientes se encuentra dentro de un graben tectónico representando una depresión topográfica flanqueada por dos fallas normales con tendencia de norte-sur (Aranda-Gómez, 1989; Nieto-Samaniego *et al.*, 1997).

3.2 Subsistencia

El término subsidencia se refiere al hundimiento de la superficie del suelo, tal fenómeno se refiere al desplazamiento vertical, el cual es principalmente hacia abajo (Galloway *et al.*, 1999;

Galloway y Burbey, 2011). Dentro de este concepto, la extracción de agua del subsuelo juega un papel directo en el hundimiento del terreno al causar compactación de sistemas de acuífero susceptibles (Aranda-Gómez, 1989; Galloway *et al.*, 1999; Galloway y Burbey, 2011), y por lo tanto detonar el movimiento de subsidencia. Según Burbey (2002), las condiciones que favorecen la deformación del terreno debido a la extracción de agua subterránea son: 1) un clima árido o semiárido, 2) bombeo a largo plazo del acuífero, 3) estratos de depósitos no consolidados muy compresibles, 4) una discontinuidad abrupta en la conductividad hidráulica horizontal de los estratos, 5) compactación vertical diferencial.

La subsidencia del terreno debido a la extracción de agua subterránea es común en valles aluviales y lacustres, donde el acuífero está compuesto por sedimentos pobremente consolidados (Burbey, 2002; Pacheco-Martínez, *et al.*, 2013). En Aguascalientes, por ejemplo, el acuífero del valle está formado por sedimentos aluviales y fluviales con un grado de consolidación medio-bajo con un clima árido a semiárido en la región, que serían las condiciones más críticas a favor de la ocurrencia de este fenómeno (Pacheco-Martínez, *et al.*, 2013).

3.3 Flujo de agua en suelos

Dentro de los varios procesos de flujo de agua en el suelo, la infiltración se define como el agua que atraviesa la superficie del suelo, humedeciéndolo. Cuando el suelo alcanza un alto grado de saturación como consecuencia del humedecimiento, el flujo de agua a través de él se ve favorecido. Cuando este proceso es prolongado, el agua percolada puede sobrepasar la zona vadosa por el efecto de la gravedad, y si el movimiento descendente continúa, el agua puede alcanzar la zona saturada, a lo que se le podría llamar recarga (Martínez-Alfaro, *et al.*, 2006).

3.4 Métodos geofísicos

Los métodos geofísicos se utilizan para el estudio de la estructura y composición de los materiales geológicos y recursos naturales como agua, petróleo, vapor y minerales; así como el monitoreo de flujo y transporte de contaminantes, y mapeo de eventualidades geológicas (Instituto Mexicano del Transporte, 2003). Algunos de los métodos geofísicos son: eléctricos, sísmicos, gravimétricos y magnéticos. En este trabajo se explicarán los dos primeros, ya que son los que se utilizaron en el estudio.

3.4.1 Métodos eléctricos

Los métodos eléctricos consisten en aplicar un flujo de energía eléctrica a través de la zona de estudio, para determinar la resistividad al flujo eléctrico que se encuentra en la masa de este. Los sondeos eléctricos verticales (SEV), calicatas y tomografía eléctrica (TER) son las tres maneras de aplicar este método.

3.4.1.1 Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica de una sustancia es la medida de la dificultad con la que la corriente eléctrica puede fluir a través de ella. En particular para suelos y rocas, la resistividad eléctrica es determinada por su contenido de arcillas, humedad, salinidad, temperatura, porosidad, tipo de suelo y estratigrafía (McNeill, 1980).

3.4.1.2 Tomografía eléctrica (TER)

Este método es muy utilizado en estudios debido a su principio físico simple y eficaz. Las mediciones mediante este método se realizan en superficie, obteniendo resistividades aparentes,

que representan variaciones de la resistividad del subsuelo, reflejando alteraciones verticales u horizontales del subsuelo.

3.4.2 Métodos sísmicos

Los métodos sísmicos son aquellos donde se utilizan las velocidades de propagación de las ondas sísmicas a través del medio geológico, y con base en su variación se pueden determinar propiedades mecánicas del medio (Lavergne, 1989).

Las ondas sísmicas se dividen en dos tipos: las ondas de cuerpo y las ondas de superficie. En concreto, las ondas de cuerpo se dividen en las de compresión o primarias (P) y las transversales o de corte (S). Asimismo, las ondas superficiales se dividen en: las Rayleigh y Love (Lavergne, 1989). A continuación, se describen las principales características de los métodos sísmicos.

3.4.2.1 Refracción sísmica

El método de refracción sísmica mide la velocidad de las ondas sísmicas de cuerpo refractadas desde diferentes capas del subsuelo (Lavergne, 1989). De modo que, las velocidades de propagación de las ondas P (V_p) y las ondas S (V_s) a través de un material homogéneo se obtienen a partir de las ecuaciones 1 y 2 respectivamente (Groves, *et al.*, 2011).

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (\text{ecuación 1})$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (\text{ecuación 2})$$

Donde E es el módulo de Young, ν es la relación de Poisson, G es el módulo de cortante, y ρ es la densidad del medio (Groves, *et al.*, 2011).

El método requiere un arreglo lineal con geófonos con un espaciado igual entre cada uno de ellos, los cuales miden el movimiento vertical u horizontal en la superficie de la onda sísmica generada por una fuente sísmica, como un mazo golpeado al piso, caída de peso o carga explosiva. Así pues, los rastros sísmicos (velocidad vs tiempo) son registrados por los geófonos. En concreto, el método consiste en establecer y analizar los arribos de las ondas sísmicas en cada geófono del arreglo (Groves, *et al.*, 2011).

3.5 Conductividad hidráulica

Según Herath y Musiaka, (1987), la conductividad hidráulica saturada del suelo es una propiedad clave en la descripción de los procesos de infiltración y redistribución del agua en el suelo. Esta propiedad puede ser estimada a través de métodos de campo. Uno de los métodos utilizados para esto es el método del pozo de carga constante (Elrick y Reynolds, 1986; Reynolds, 1993). El método se basa en que cuando existe una altura constante de agua (carga hidráulica) en un pozo en un suelo insaturado, se crea un bulbo de suelo saturado alrededor del pozo (ecuación 1). Conforme se establece este bulbo, el flujo del agua que sale del pozo y entra al suelo comienza a ser constante. Cuando la tasa de infiltración de agua se torna constante, la conductividad hidráulica saturada (K_{fs}) del suelo se puede determinar mediante la tasa de flujo de agua constante, el radio del pozo (a) y la altura del agua en el pozo (H).

La medida de la tasa de descenso del nivel de agua en el depósito del permeámetro (r) y el área transversal del depósito, hacen posible calcular el caudal infiltrado (Q) en el suelo, con lo que se puede calcular la K_{fs} con la ecuación que propone Reynolds (1993):

$$K_{fs} = \frac{cQ}{\left[2\pi H^2 + C\pi a^2 + \left(\frac{2\pi H}{\alpha^*}\right)\right]} \quad \text{(ecuación 3)}$$

El valor de C es un factor de forma que se obtiene de la Figura 2, con el valor H/a y α^* es un parámetro de estructura de textura del suelo, que se obtiene de la Tabla 1.

Tabla 1 Parámetro de estructura de textura del suelo (Tomado de Reynolds, 1993).

Estructura y textura del suelo	α^* (cm-1)
Arcillas compactadas (por ejemplo, revestimientos de arcilla)	0.001
Suelos no estructurados de textura fina y arenas finas	0.04
Suelos más estructurados y arenas medias	0.12
Arenas gruesas y suelos muy estructurados	0.36

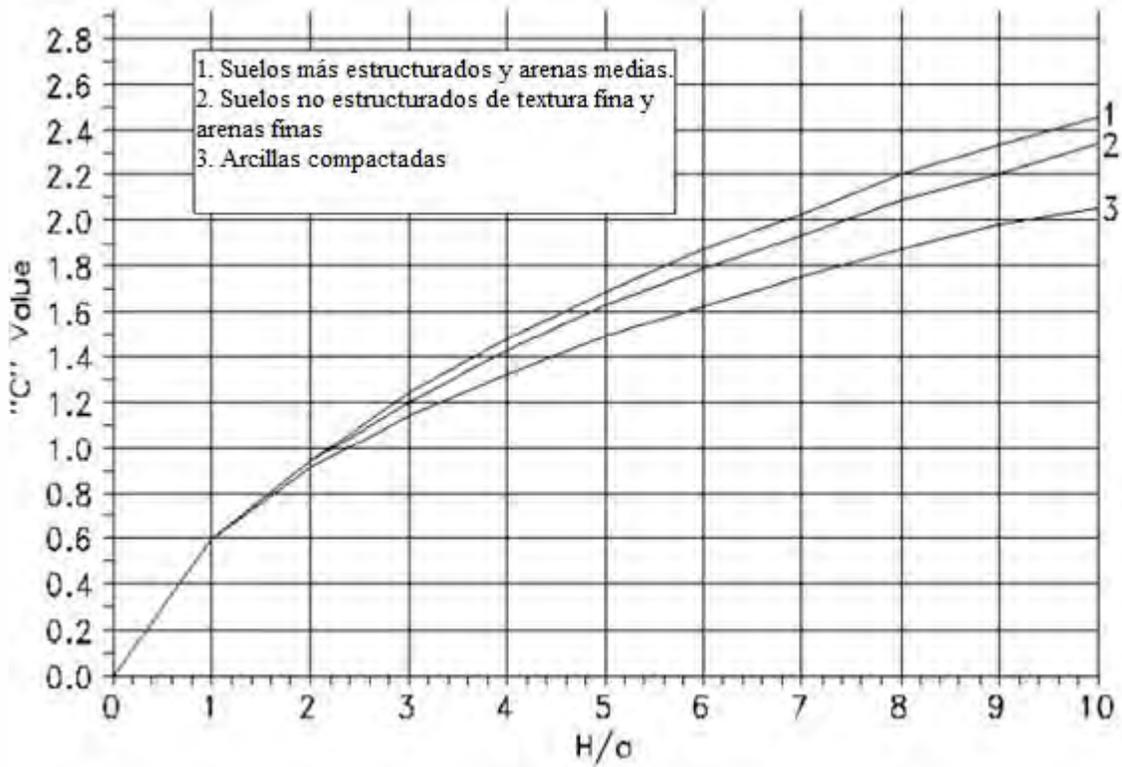


Figura 2. Determinación del factor de forma C (Tomado de Reynolds, 1993).



Capítulo IV

Marco Metodológico

4 MARCO METODOLÓGICO

En términos generales el trabajo se realizó en tres fases; i) delimitación de la zona de estudio, que consistió en buscar el sitio que cumpliera con todos los requerimientos para realizar dicho estudio; ii) pruebas de campo, que consistió en mediciones con el resistivímetro, sismógrafo y permeámetro de campo. Por último, iii) trabajo de gabinete, en el cual se analizaron los resultados de las pruebas.

4.1 Delimitación de la zona de estudio

El área de estudio se ubica en el valle de Aguascalientes, estado de Aguascalientes, México (Figura 3-A). Se propuso una zona de estudio dentro del municipio de Pabellón de Arteaga (Figura 3-B), se seleccionó en base a la caracterización del suelo en una zona de falla (UTM 780335E, 2449914N). En la Figura 4, se muestra una foto del sitio, donde se observan las discontinuidades analizadas, la línea roja representa una falla normal que tiene un escarpe aproximado de 0.80 metros y la línea verde representa una grieta, que tiene un escarpe de 0.30 metros, para fines de esta investigación se les llamará discontinuidades y se analizarán en conjunto.

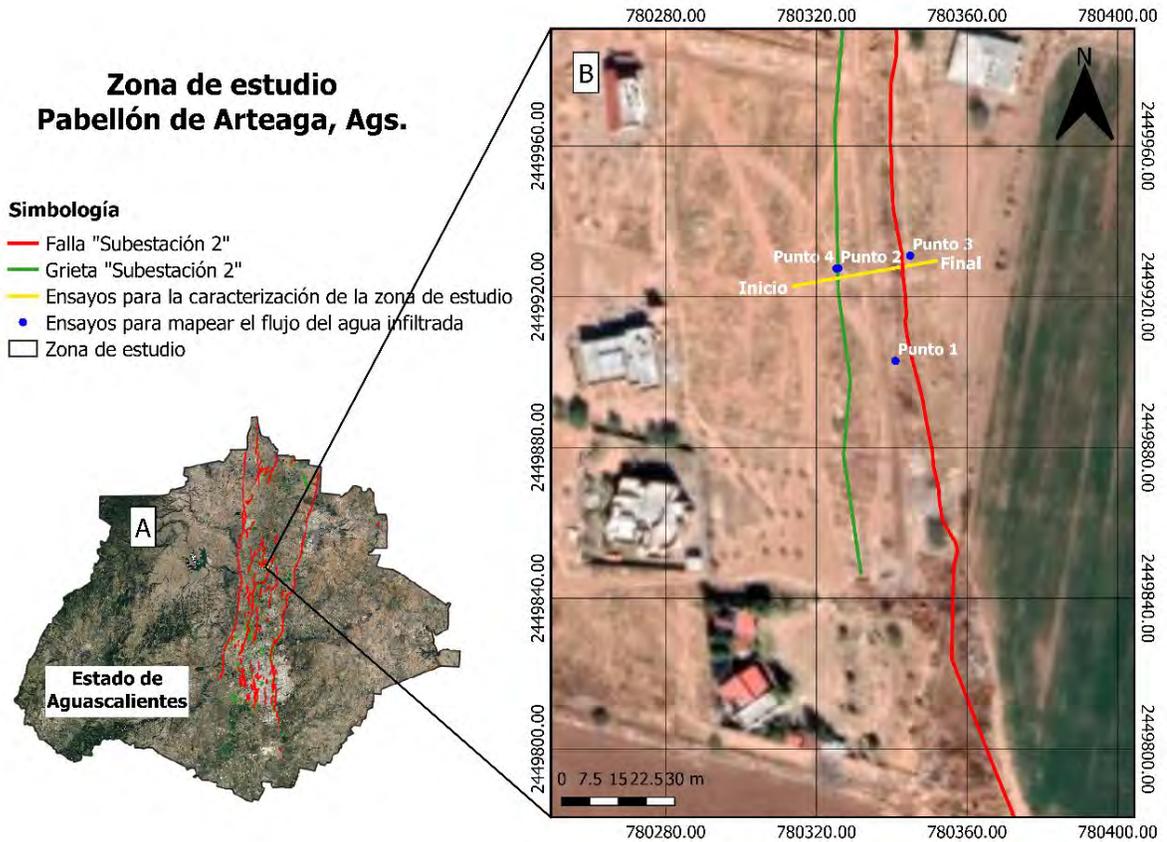


Figura 3. A) Ubicación del área de estudio, valle de Aguascalientes, Pabellón de Arteaga, Ags., México. B) Ubicación de la zona de estudio localizada en el municipio de Pabellón de Arteaga, Ags., donde se muestran las dos discontinuidades a analizar (líneas verde y roja), la línea amarilla muestra la ubicación de los perfiles de conductividad hidráulica (Figura 10), tomografía eléctrica resistiva (Figura 12) y refracción sísmica (Figura 14), para la caracterización de la zona de estudio; los puntos azules muestran la ubicación de los ensayos de permeabilidad en conjunto con resistividad eléctrica para mapear el flujo del agua infiltrada.



Figura 4. Imagen del sitio. La línea roja corresponde a una falla normal y la línea verde a una grieta.

4.2 Pruebas de campo

Utilizando el método de resistividad eléctrica, se caracterizó la geometría de las discontinuidades y se identificaron zonas de bajas y altas resistividades que podrían estar relacionadas a daños ocasionados por la falla. Se utilizó el método de tomografía eléctrica resistiva, con el arreglo dipolo-dipolo, para el cual se emplearon 21 electrodos con una separación entre electrodos de 2 metros, con el cual se obtuvo un perfil en 2D de las resistividades del suelo perpendiculares a la falla a una profundidad de 6 metros (Figura 12), la cual se analizará en el capítulo de resultados. El equipo utilizado fue un resistivímetro marca *ABEM* modelo *Terrameter LS 2* (Figura 5).



Figura 5. Resistivímetro ABEM modelo *Terrameter LS 2*.

Utilizando el método sísmico, se definió la potencial zona de afectación de la falla. En particular, se utilizó el método de refracción sísmica, para el cual se emplearon 24 geófonos de 4.5

Hz, con una separación de 1.5 metros, generando siete ondas sísmicas en diferentes puntos del perfil, con una placa de acero colocada en el suelo y golpeada con un mazo de 10 libras, con el cual se obtuvo un perfil en 2D de las velocidades de propagación de las ondas sísmicas a una profundidad de 10 metros (Figura 14), la cual se analizará en el capítulo de resultados. El equipo utilizado fue un sismógrafo marca *Geode* modelo *Ultra-light* (Figura 6).



Figura 6. Sismógrafo marca *Geode* modelo *Ultra-light*.

Utilizando un permeámetro de campo de carga constante (Figura 7), construido en laboratorio, se obtuvieron las conductividades hidráulicas del suelo. La metodología de la prueba consistió en:

1. Excavar un pozo cilíndrico de dos pulgadas de radio y 19 centímetros de profundidad, con ayuda de un barrenador.
2. Cargar el permeámetro con agua y colocarlo en el pozo.
3. Esperar a que el agua dentro del pozo se estabilice a una altura constante de aproximadamente 19 cm y comience a descender el agua dentro del permeámetro producto de la infiltración, en este momento se toma la primera medición del nivel inicial de agua dentro de los tubos del permeámetro, con ayuda de la cinta métrica colocada en el permeámetro.

- Se toman medidas del nivel del agua dentro de los tubos del permeámetro cada 30 segundos, hasta llegar a un régimen estacionario, es decir que el nivel descienda a tasa constante. Para agilizar las mediciones, para este estudio se definió un tiempo de prueba máximo de 10 minutos.

Se realizaron 33 mediciones perpendiculares a la falla, con una separación entre ellas de un metro (Figura 9-A), con las cuales se obtuvo un perfil de variación de la conductividad hidráulica a lo ancho de la zona falla (Figura 10), la cual se analizará en el capítulo de resultados. El procesamiento de los datos se muestra en la sección de anexos (Anexo A).

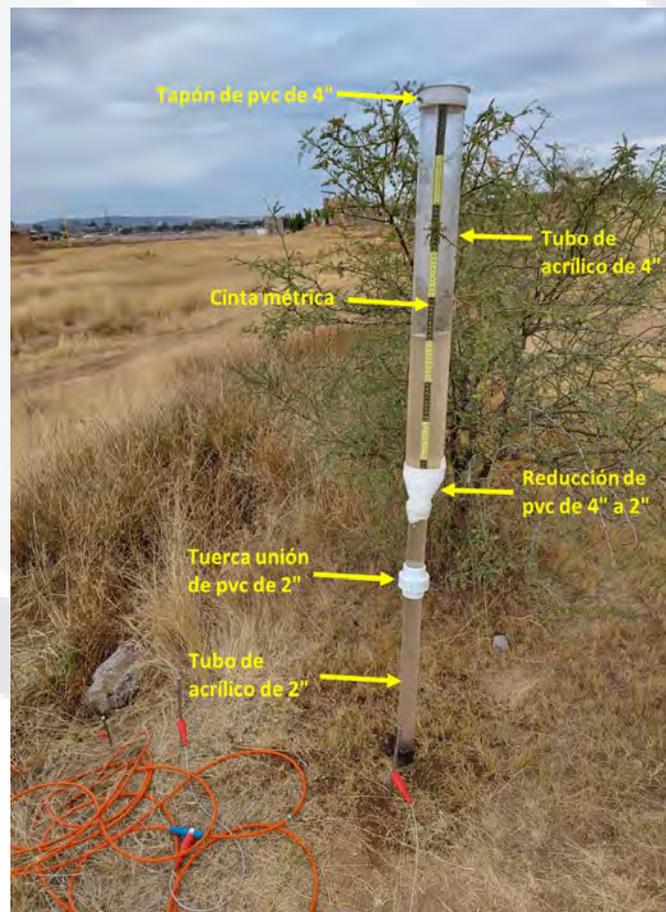


Figura 7. Permeámetro de campo de carga constante construido en laboratorio, con especificaciones de sus elementos estructurales.

Utilizando las pruebas de permeabilidad en conjunto con resistividad eléctrica, se monitoreó el flujo de agua una vez infiltrada, para obtener una sección con la visualización del desplazamiento del agua a través del subsuelo. La metodología de la prueba consistió en la siguiente secuencia de acciones:

1. Se excava el pozo donde se realizará la prueba de permeabilidad, a un metro de distancia de la discontinuidad superficial. El pozo es de un diámetro un poco mayor a las 2 pulgadas, de modo que permita el ingreso del tubo menor del permeámetro.
2. Se realiza un perfil de tomografía eléctrica resistiva antes de la primera prueba de permeabilidad, con el arreglo dipolo-dipolo, empleando 21 electrodos, con una separación entre electrodos de 0.75 metros, lo que permite obtener un perfil en 2D de las resistividades del suelo a una profundidad de hasta 3 metros aproximadamente. La ubicación del electrodo 11 debe coincidir con la del pozo para la prueba de permeabilidad.
3. Al terminar la medición de resistividad, se realiza la prueba de permeabilidad, para este estudio se definió un tiempo de prueba máximo de 20 minutos, tomando lecturas cada 5 minutos.
4. Se realiza otro perfil de tomografía eléctrica resistiva, con la misma configuración que el anterior (paso 2).
5. Se repiten tres veces los pasos 3 y 4.
6. Al final se obtienen 5 perfiles de resistividad eléctrica resistiva y cuatro pruebas de permeabilidad.

Para la zona de estudio, se realizó esta metodología en 4 puntos, ubicados a cada lado de las discontinuidades superficiales existentes (Figura 15.A). El punto uno fue analizado con el

resistivímetro marca *Iris* modelo *SYSCAL Jr.* (Figura 8), mientras que los puntos 2, 3 y 4 con el resistivímetro marca *ABEM* modelo *Terrameter LS 2* (Figura 5).



Figura 8. Resistivímetro marca *Iris* modelo *SYSCAL Jr.*

4.3 Trabajo de gabinete

Los perfiles de tomografía eléctrica resistiva se procesaron utilizando una versión de prueba del *software Res2Dinv*, con el que se invirtieron y crearon dichos perfiles. Los datos obtenidos se exportaron al *software Surfer*, donde se les dio formato y se pudieron visualizar.

Para el procesamiento de los perfiles de refracción sísmica, se utilizó una versión de prueba del *software PickWin*, con el cual se obtuvieron los primeros arribos de las ondas sísmicas. Una vez teniendo esta información, se procesó con una versión de prueba del *software ZondST2D*, con el que se invirtieron y crearon los perfiles. Por último, al igual que con los perfiles de resistividad se les dio formato utilizando el *software Surfer*.

Los datos obtenidos del permeámetro se analizaron utilizando el modelo analítico propuesto por Reynolds (1993), (ecuación 1) que permite obtener primero la tasa de infiltración (cm/min), con la cual se puede calcular posteriormente el caudal promedio infiltrado (cm³/min). Conforme lo observado en campo se tomó un valor de α^* de 0.12 cm⁻¹ que corresponde a suelos más estructurados y arenas medias, siendo el más afín a la zona de estudio; y después se obtuvo el factor de forma C utilizando la Figura 2, obteniendo un valor de 2.10, permitiendo finalmente calcular la conductividad hidráulica Kfs.

Con los datos de los 33 ensayos a lo ancho de la falla (Anexo A), se obtuvo un perfil de la variación de la conductividad hidráulica (Figura 10). Para los datos obtenidos de las pruebas en conjunto con resistividad eléctrica, se realizó un gráfico de la variación de la conductividad hidráulica de cada uno de los 4 puntos de análisis (Ejemplo: Figura 22) y se calculó el volumen de agua inyectada en cada medición del permeámetro.



Capítulo V
Resultados

5 RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados de las pruebas realizadas en campo, los perfiles de conductividad hidráulica (Figura 10), tomografía eléctrica resistiva (Figura 12) y refracción sísmica (Figura 14), se realizaron sobre la misma línea perpendicular al terreno, esto con el fin de caracterizar la zona de discontinuidades y/o área de estudio (línea de falla normal y fractura) y se analizarán en el capítulo de discusión de resultados. Asimismo, se muestran los resultados de las pruebas de permeabilidad en conjunto con resistividad eléctrica que se realizaron en 4 puntos de la zona de estudio (Figura 15). Los resultados se describen en los puntos de sur a norte y cada punto cuenta con 5 perfiles de tomografía eléctrica resistiva perpendiculares a las discontinuidades y un gráfico de variación de conductividad hidráulica. De modo que en el capítulo de discusión estos 4 puntos se compararán entre sí.

5.1 Resultados generales hidráulicos y geofísicos de la zona de estudio

5.1.1 Permeabilidad

A continuación, se presenta el perfil de conductividad hidráulica para la caracterización de la zona, el cual se encuentra ubicado al sur de las discontinuidades (Figura 9-A). La Figura 9-B muestra una fotografía donde se observa cómo se realizaron las pruebas de permeabilidad para la creación del gráfico de variación de la conductividad hidráulica a lo ancho de la falla. Los resultados del procesamiento se encuentran en los anexos (Tabla 2).

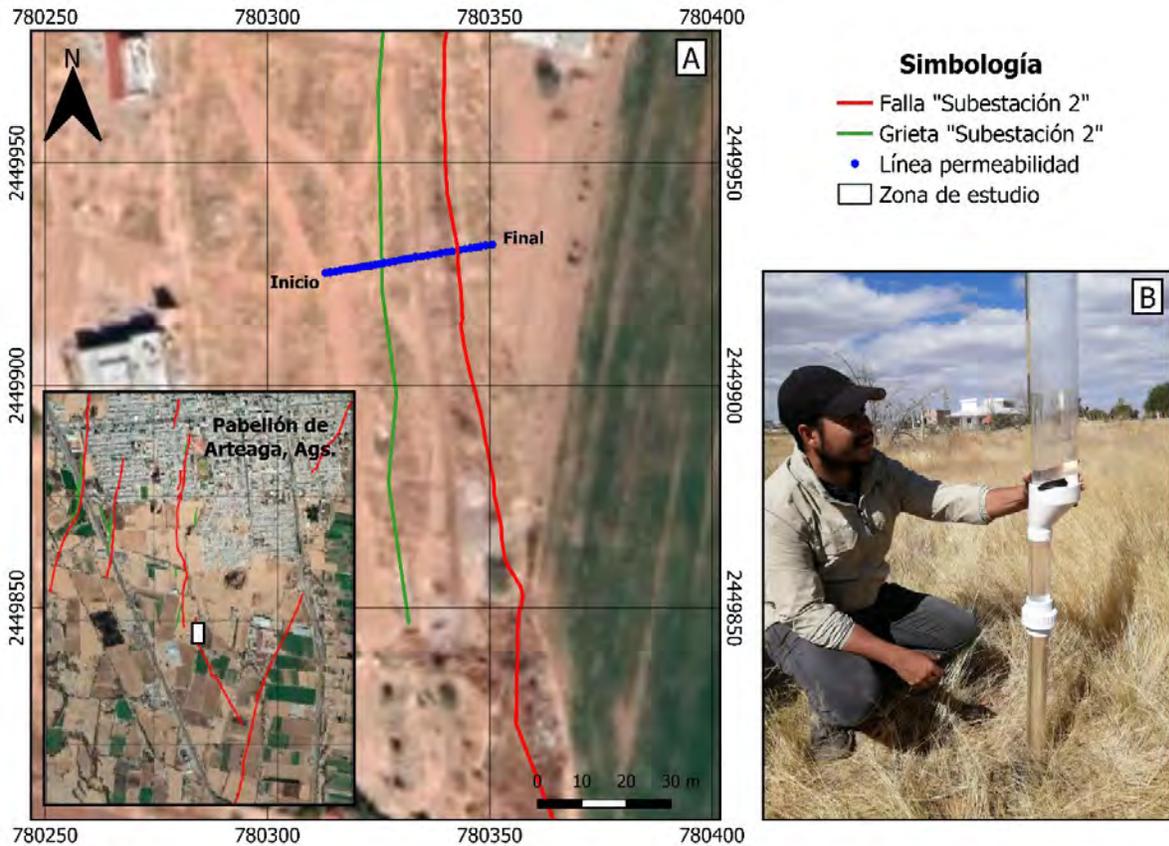


Figura 9. A) Ubicación de la línea de pruebas de permeabilidad en la zona de estudio en el municipio de Pabellón de Arteaga, Ags. B) Imagen de la realización de las pruebas de permeabilidad para realizar el perfil de variación de la conductividad hidráulica.

La permeabilidad obtenida varió de $8.45E-05$ a $1.06E-02$ cm/s, a lo largo del perfil de medición, con un promedio de $2.26E-03$ cm/s (Anexos, tabla 2). El perfil de conductividad hidráulica (Figura 10), muestra valores bajos en los primeros 13 puntos de análisis, que van desde $8.45E-05$ a $1.27E-03$ cm/s. Sin embargo, a partir del punto 13 se observa una tendencia al aumento de la conductividad hidráulica. Cabe mencionar que entre los puntos 13 y 14 se ubica una de las discontinuidades superficiales estudiadas; el aumento de la conductividad hidráulica continúa hasta el punto 26 con valores que van desde $8.45E-04$ hasta $1.06E-02$ cm/s, con algunas excepciones como lo son los puntos 23 y 24, que muestran una disminución de la conductividad. A partir del punto 26 se observa una tendencia descendiente de los valores de conductividad

hidráulica, resaltando que entre los puntos 26 y 27 se encuentra otra de las discontinuidades superficiales. Los puntos siguientes continúan con la tendencia descendente de su conductividad hidráulica con valores entre los $2.96E-03$ a $6.34E-04$ cm/s, a excepción del punto 31 que muestra un valor de $8.03E-03$ cm/s.



Figura 10. Perfil de variación de la conductividad hidráulica, obtenido de las pruebas de permeabilidad. La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 9.A.

5.1.2 Tomografía eléctrica resistiva

A continuación, se presenta el perfil de resistividad eléctrica para la caracterización de la zona, el cual se encuentra ubicado al sur de las discontinuidades y /o exactamente en el mismo lugar que el perfil de conductividad hidráulica (Figura 11-A). La Figura 11-B muestra una fotografía donde se observa cómo se realizaron las pruebas mediante un arreglo dipolo-dipolo con separación entre electrodos a cada 2 metros, lo que resultó una longitud total de 37.5 metros.

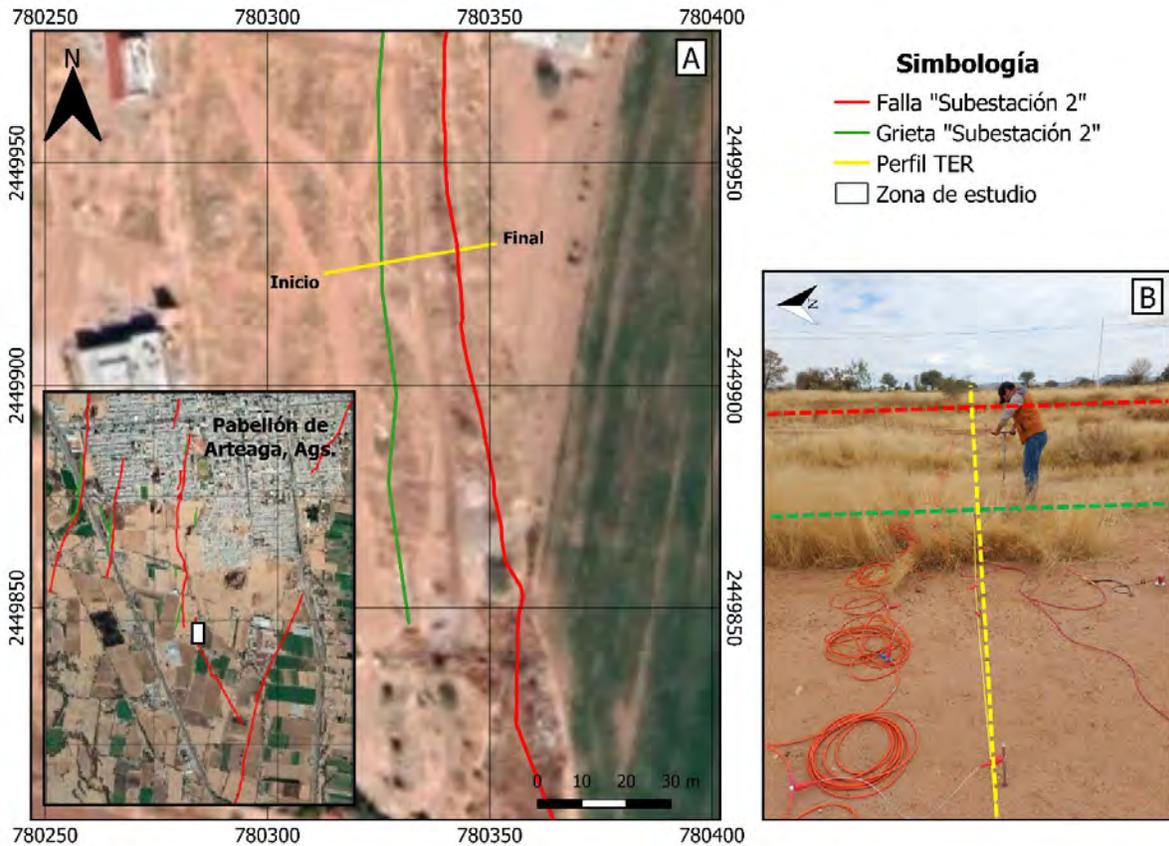


Figura 11. A) Ubicación del perfil de tomografía eléctrica resistiva en planta en la zona de estudio en el municipio de Pabellón de Arteaga, Ags. B) Imagen del sitio donde se realizó el perfil de tomografía eléctrica resistiva.

El perfil de resistividad eléctrica muestra resistividades que van desde 0 a 365 ohm-metro, así como, varias anomalías asociadas a zonas de bajas y altas resistividades, las bajas se localizan a una profundidad aproximada de 3 metros, con valores no mayores a 14 ohm-metro; las altas se encuentran en los primeros dos metros de profundidad con valores mayores a los 90 ohm-metro (Figura 12). Las discontinuidades superficiales se localizan aproximadamente a los 10 y 30 metros de distancia del origen del perfil (Figura 12, Líneas punteadas en negro) y se puede observar que las bajas anomalías en estas zonas son cercanas a los 2 m de la superficie, así mismo, existe una anomalía de baja resistividad entre los 14 y 18 m aproximadamente pero un metro más abajo que donde se encuentran las bajas resistividades en las discontinuidades. De hecho, las anomalías de 23 ohm-metro (color verde) se pueden ver en la discontinuidad de fractura.

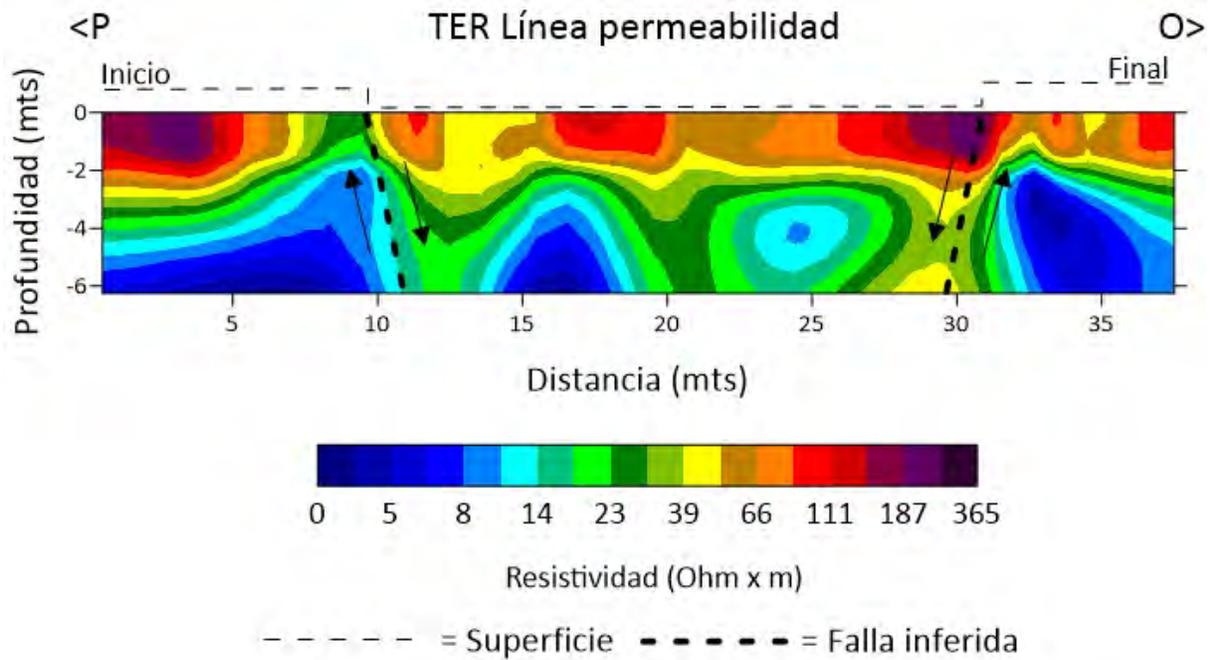


Figura 12. Perfil de tomografía eléctrica resistiva. La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 11.A.

5.1.3 Refracción sísmica

A continuación, se presenta el perfil de refracción sísmica para la caracterización de la zona, el cual se ubica hacia la porción de las discontinuidades, adyacente a o sobre los perfiles de conductividad hidráulica y resistividad eléctrica (Figura 13-A). La Figura 13-B muestra una fotografía donde se observa cómo se realizaron las mediciones mediante el método de refracción con separación entre geófonos a cada 1.5 metros, lo que resultó una longitud total de 41 metros.

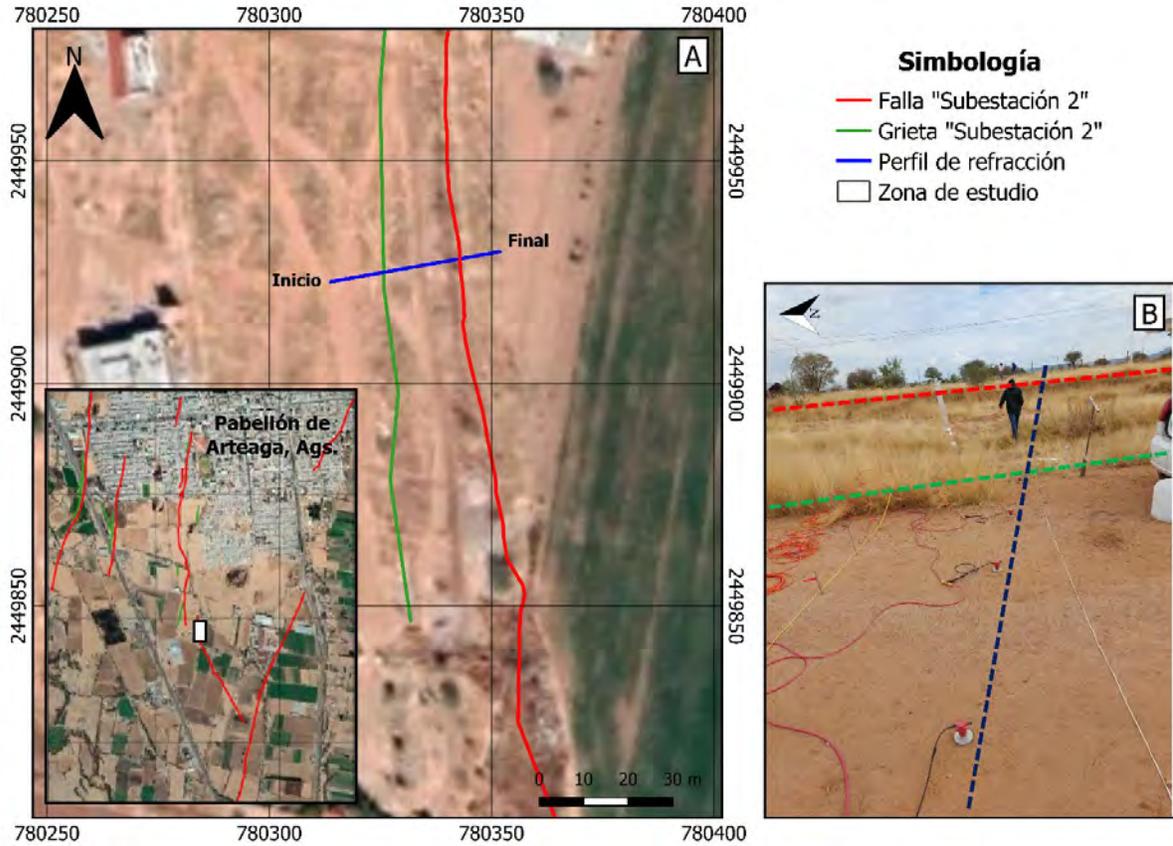


Figura 13. A) Ubicación del perfil de refracción sísmica en planta en la zona de estudio en el municipio de Pabellón de Arteaga, Ags. B) Imagen del sitio donde se realizó el perfil de refracción sísmica.

La Figura 14 muestra el perfil de refracción sísmica, en el cual se puede observar cómo los primeros 2 metros desde el inicio, de la superficie del terreno hasta los 3 metros de profundidad aproximadamente muestran un material con velocidades a partir de los 0.82 km/seg. A partir de los 2 metros hasta los 35 metros se tiene un material con velocidades no mayores a los 0.68 km/seg. Para los últimos 5 metros del perfil se tiene un material parecido al del inicio, con velocidades mayores a los 0.82 km/seg, a una profundidad de 2 metros. La velocidad menor que corresponde a 0.35 km/seg, se encuentra en la mayor parte del perfil, que va desde los 6 metros hasta los 30 metros aproximadamente, a una profundidad de 10 metros visibles en el perfil y está prácticamente delimitada por las dos discontinuidades registradas en el terreno (Líneas blancas punteadas).

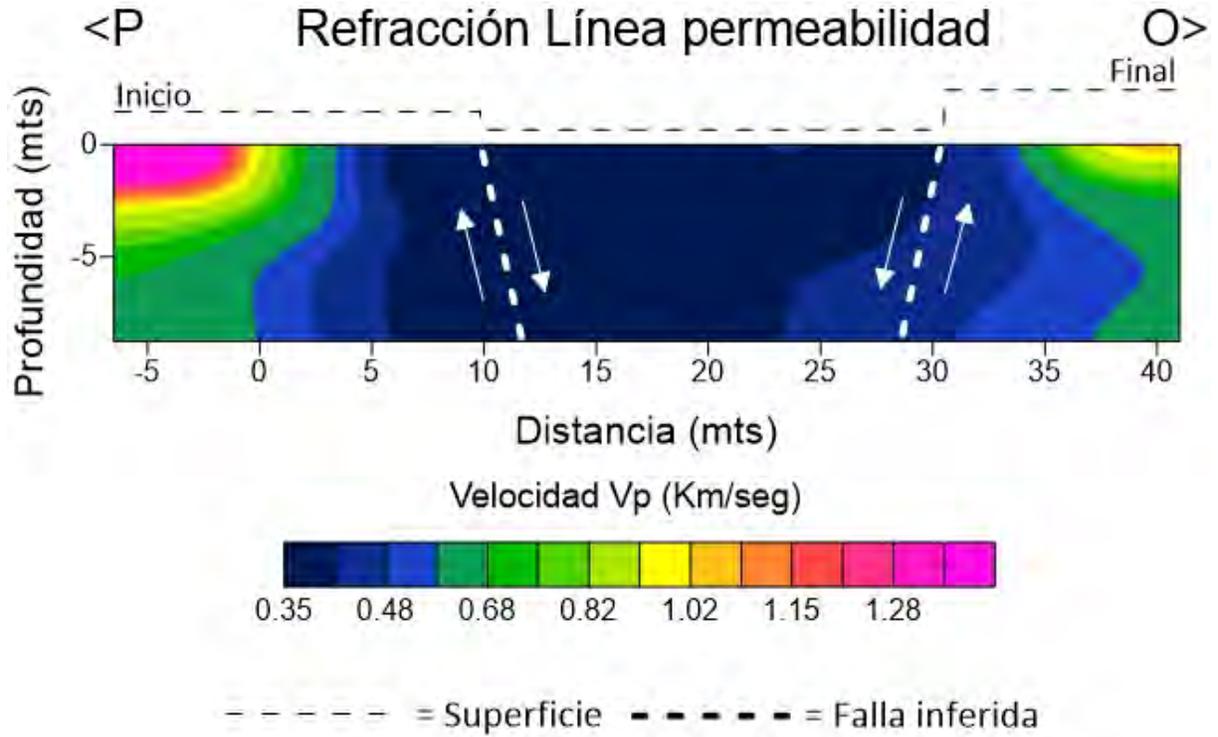


Figura 14. Perfil de refracción sísmica. La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 7.

5.2 Resultados hidráulicos y geofísicos a lo largo de las discontinuidades

En este apartado, se presenta la ubicación de los cuatro puntos en los que se realizaron las pruebas de permeabilidad en conjunto con resistividad eléctrica (Figura 15-A). Los puntos de medición se ubicaron a un metro de la línea de las discontinuidades. La Figura 15-B muestra una fotografía donde se observa cómo se realizaron las mediciones de los sondeos de permeabilidad y resistividad eléctrica en conjunto.

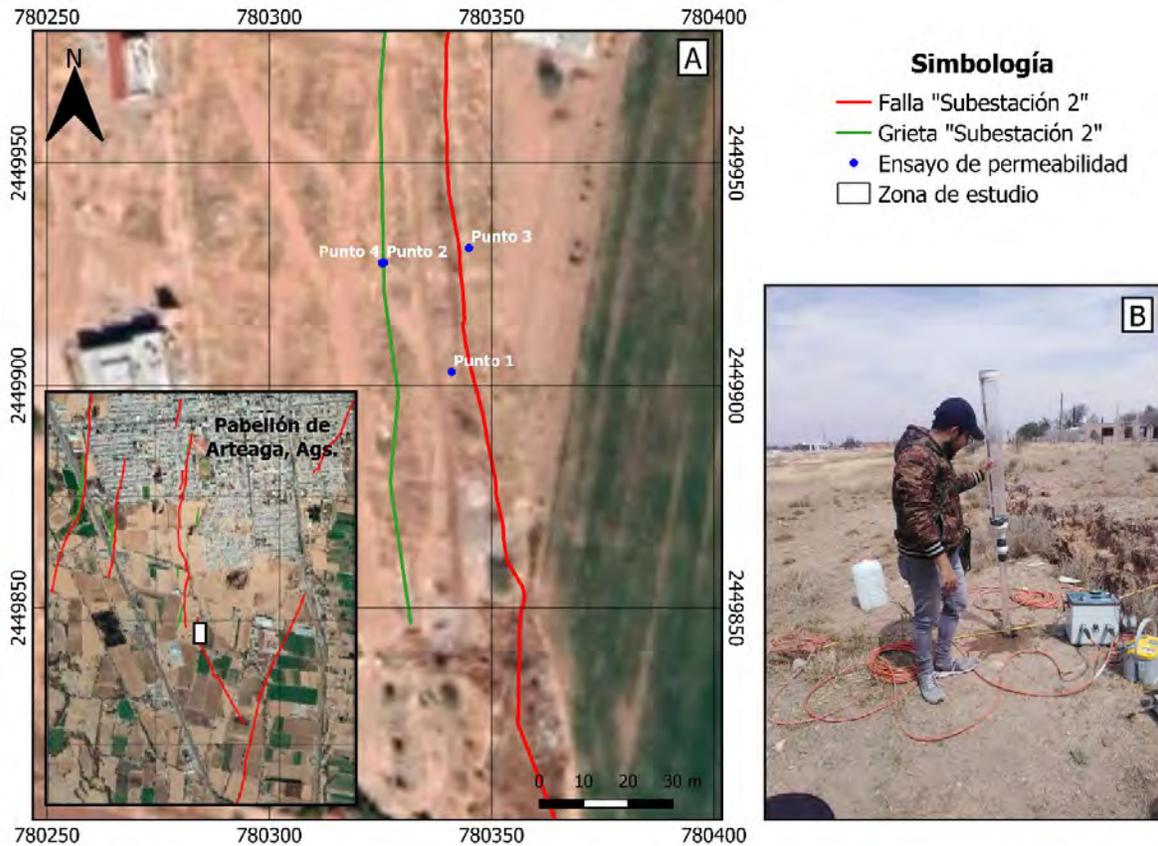


Figura 15. A) Ubicación de los sondeos de permeabilidad y resistividad eléctrica en conjunto en la zona de estudio en el municipio de Pabellón de Arteaga, Ags. El punto 4 está muy cerca al punto 2. B) Imagen de la realización de la prueba de permeabilidad en conjunto con resistividad eléctrica.

5.2.1 Permeabilidad y resistividad eléctrica Punto 1

A continuación, se observa en la Figura 16-A la ubicación de los perfiles de resistividad eléctrica y las pruebas de permeabilidad realizadas en el punto 1. La Figura 16-B muestra una fotografía donde se ve cómo se realizaron las mediciones para ambas pruebas. En este apartado, se presenta los cinco perfiles de resistividad (Antes de infiltrar agua y después de la primera, segunda, tercer y cuarta vez de infiltrar agua) (Figura 17, 18, 19, 20 y 21 respectivamente), y el gráfico de variación de la conductividad hidráulica (Figura 22).

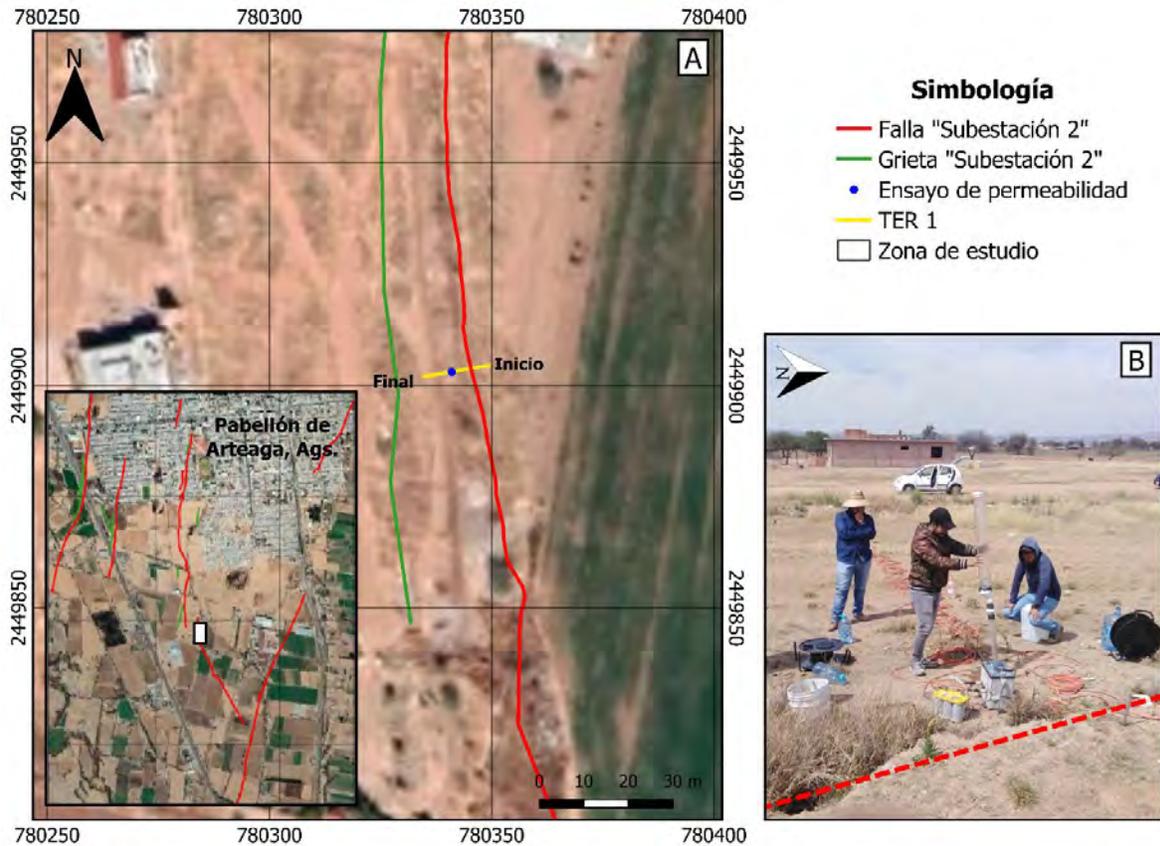


Figura 16. A) Ubicación del perfil de tomografía eléctrica resistiva (TER), realizado en el Punto 1 en planta, en la zona de estudio en el municipio de Pabellón de Arteaga, Ags. B) Imagen del sitio donde se realizaron las pruebas de permeabilidad y TER del punto 1. La falla se ubica sobre la línea roja punteada, mientras que la línea de cables rojos indica el perfil de resistividad (TER).

La Figura 17 muestra el perfil de resistividad eléctrica antes de colocar por primera vez el permeámetro, el cual se ubicó en el bloque de techo de la falla, a una distancia de 8.5 metros del inicio. La discontinuidad superficial se localizó aproximadamente a los 8 metros de distancia del inicio. El perfil muestra resistividades que van desde 0 a 97 ohm-metro, además se observan varias anomalías, entre las que resaltan zonas de bajas resistividades a una profundidad de 2 metros a lo largo de casi todo el perfil y en los primeros 6 metros a una profundidad de 1 metro. También en superficie y hasta una profundidad de 2 metros, se tienen valores altos de resistividad de los 6 a los 16 metros.

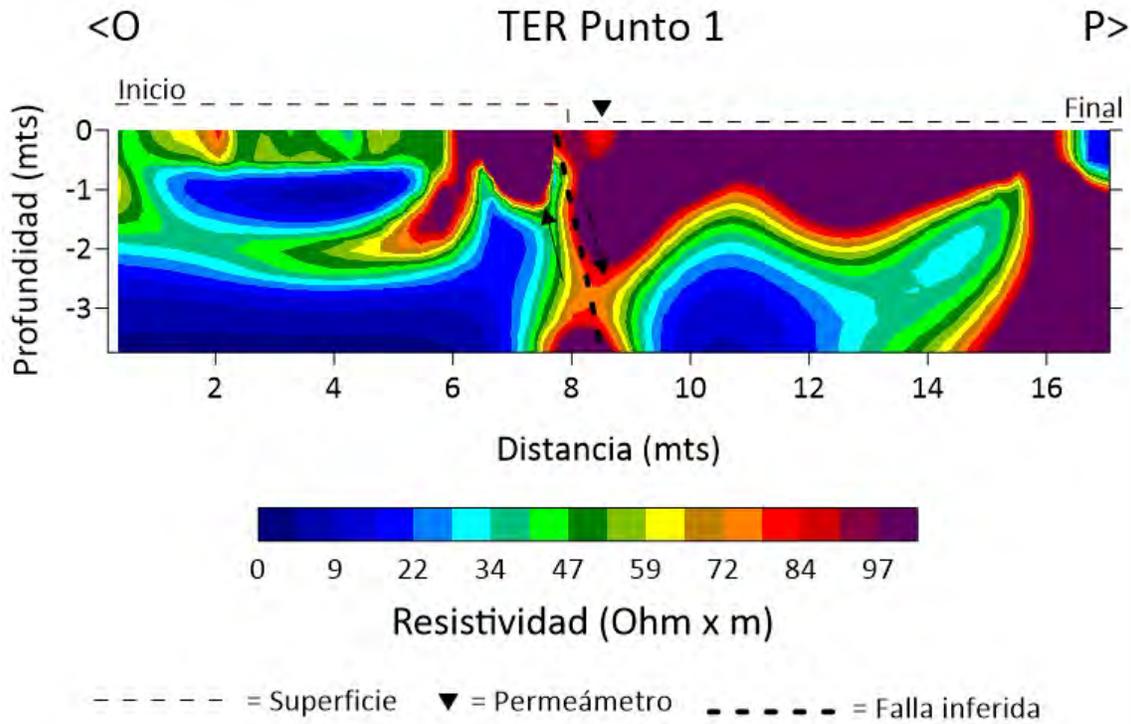


Figura 17. Perfil de TER tomado en el punto 1 antes de la primera prueba de permeámetro.

La Figura 18-a muestra el perfil de resistividad eléctrica después de infiltrar agua por primera vez con el permeámetro, el volumen de agua total infiltrado para esta medición fue de 0.0035 m^3 . El perfil muestra una disminución de la resistividad del suelo a los 8.5 metros del inicio, que llega hasta los 0.5 metros (Figura 18-b).

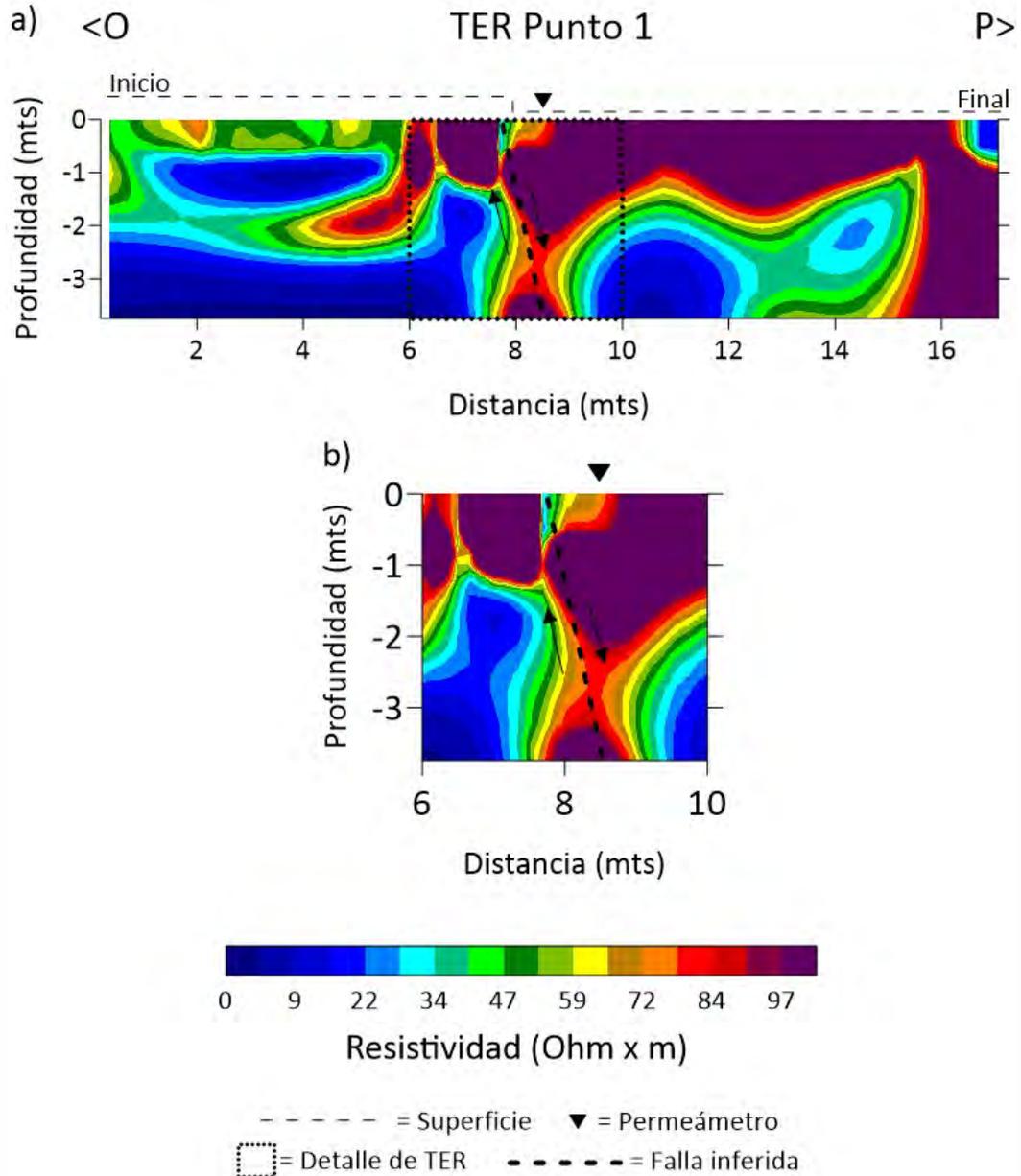


Figura 18. a) Perfil de TER tomado en el punto 1 después de la primera prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración.

La Figura 19-a muestra el perfil de resistividad eléctrica después de infiltrar agua por segunda vez con el permeámetro, el volumen de agua total infiltrado para esta medición fue de 0.0019 m³. El perfil muestra una disminución de la resistividad del suelo a los 8.5 metros del inicio, que llega hasta los 0.6 metros (Figura 19-b). Aumentando 0.1 metro más que el anterior perfil de resistividad (Figura 18-b).

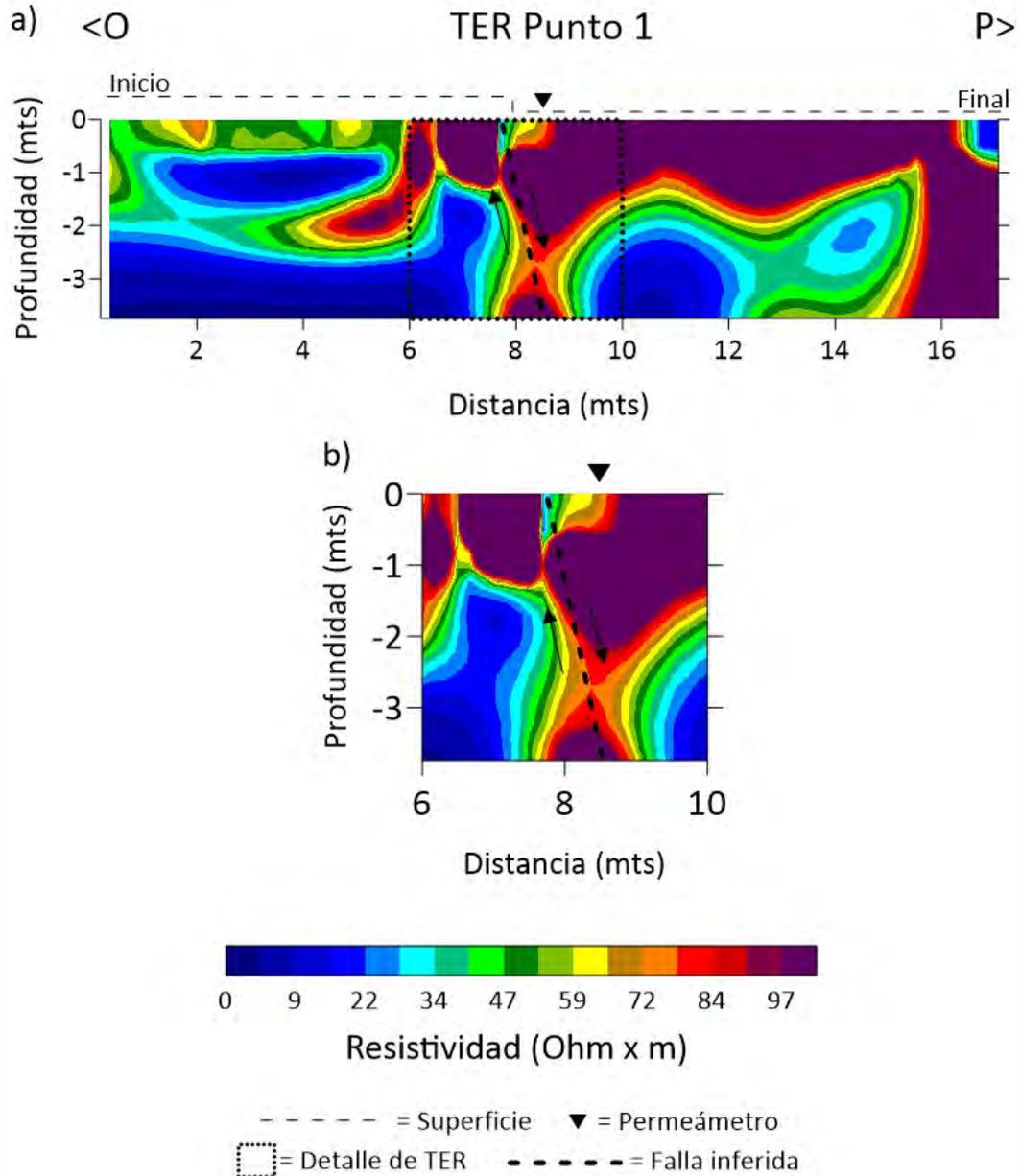


Figura 19. a) Perfil de TER tomado en el punto 1 después de la segunda prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración.

La Figura 20-a muestra el perfil de resistividad eléctrica después de infiltrar agua por tercera vez el permeámetro, el volumen de agua total infiltrado para esta medición fue de 0.0013 m³. El perfil muestra una disminución de la resistividad del suelo a los 8.5 metros del inicio, que llega hasta los 0.7 metros (Figura 20-b). Aumentando 0.1 metro más que el anterior perfil de resistividad (Figura 19-b).

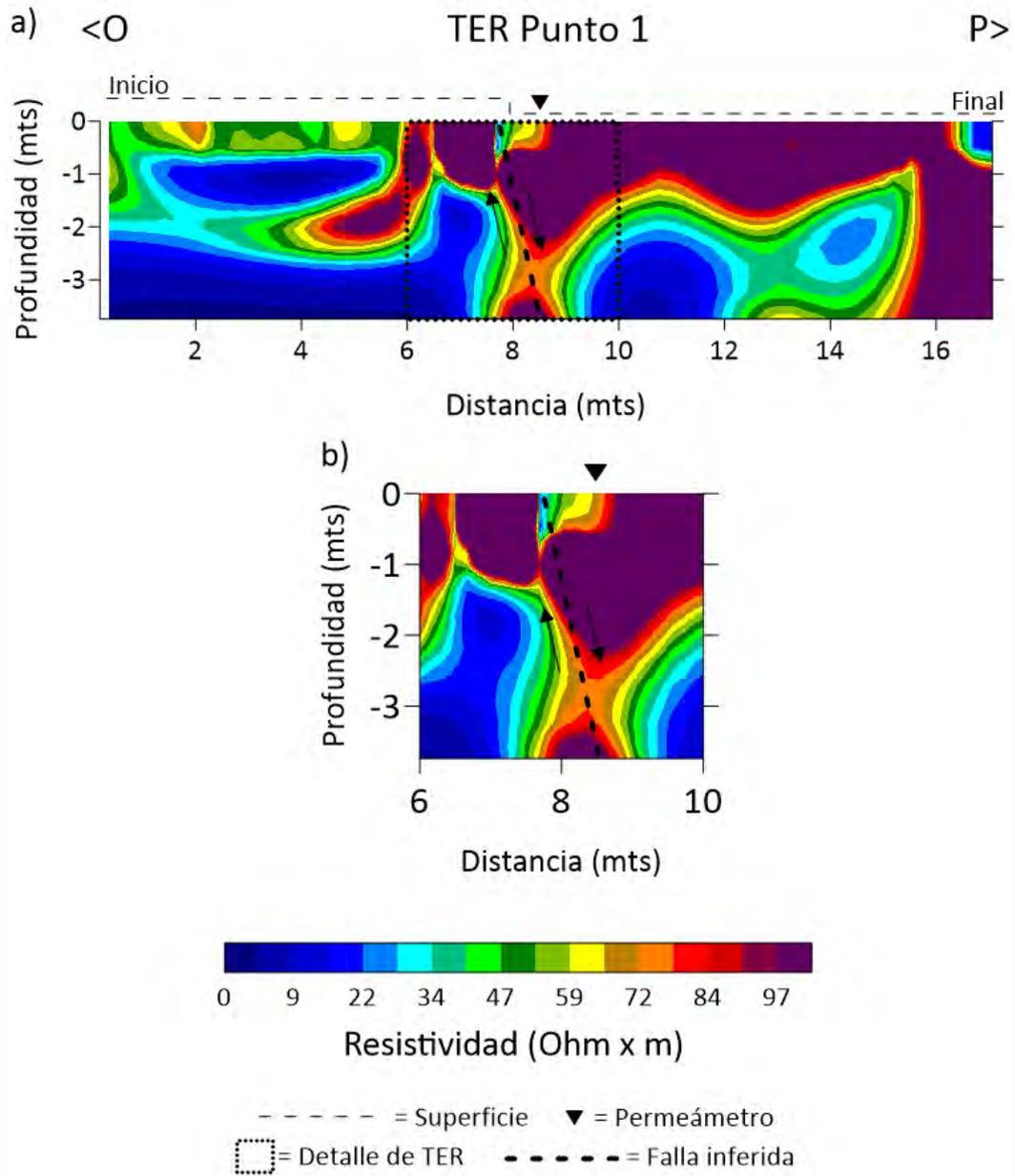


Figura 20. a) Perfil de TER tomado en el punto 1 después de la tercera prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración.

La Figura 21-a muestra el perfil de resistividad eléctrica después de infiltrar agua por cuarta vez con el permeámetro, el volumen de agua total infiltrado para esta medición fue de 0.0012 m³. El perfil muestra una disminución de la resistividad del suelo a los 8.5 metros del inicio, que llega

hasta aproximadamente 1 metro (Figura 21-b). Aumentando 0.3 metro más que el anterior perfil de resistividad (Figura 20-b).

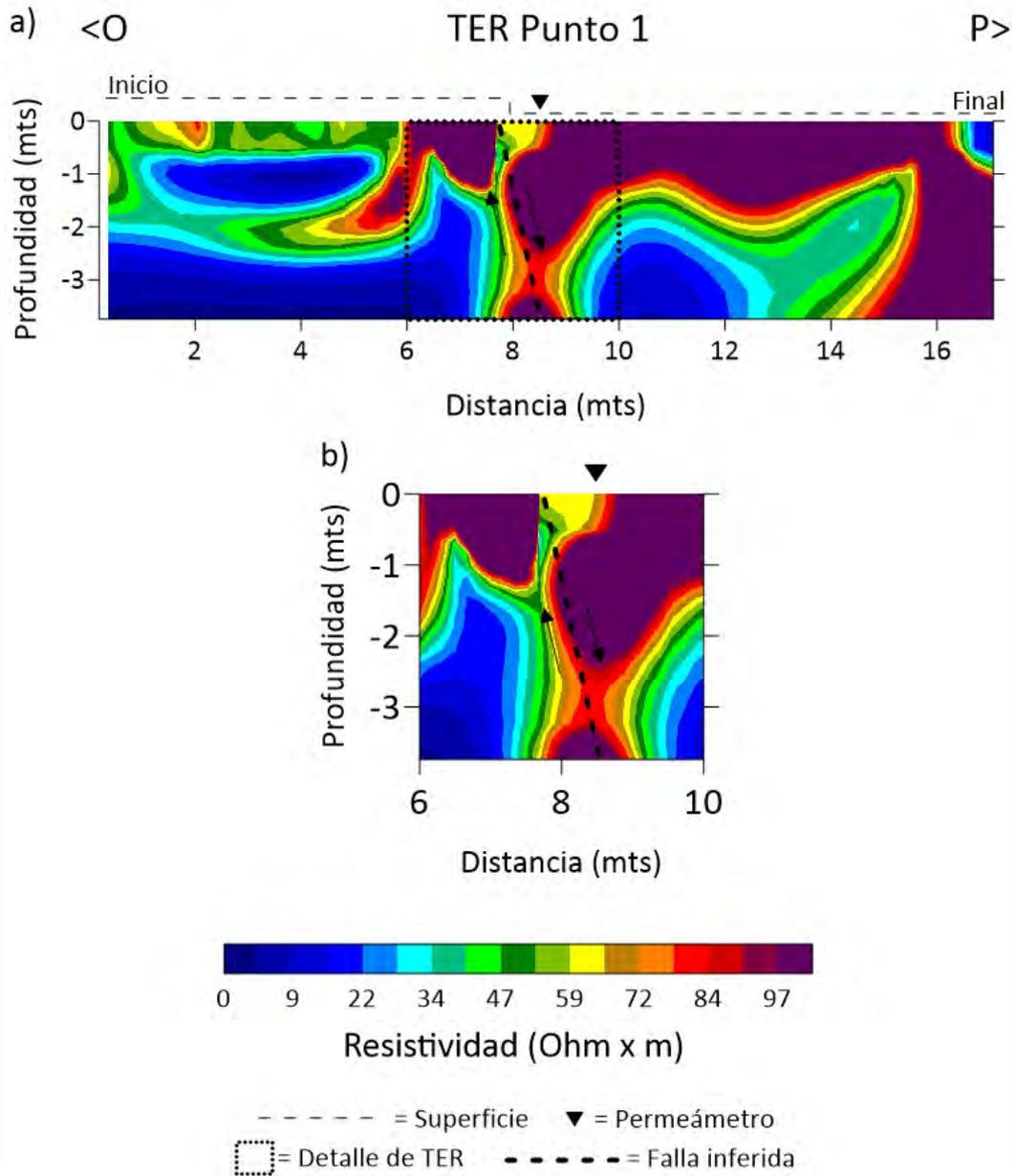


Figura 21. a) Perfil de TER tomado en el punto 1 después de la cuarta prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración.

Con los resultados obtenidos de las pruebas de permeabilidad para el punto 1 (Anexo B) se graficó la variación de la conductividad hidráulica, en donde se observa cómo se comporta la conductividad hidráulica, obteniendo un valor inicial de 0.0025 cm/s y uno final de 0.0008 cm/s,

habiendo transcurrido un tiempo entre la prueba inicial y la final de 71 minutos y 40 segundos, mientras que en las mediciones 2 y 3 se llegó a 0.0010 cm/s y 0.0007cm/s, respectivamente. La Figura 22 muestra una disminución en la conductividad hidráulica.

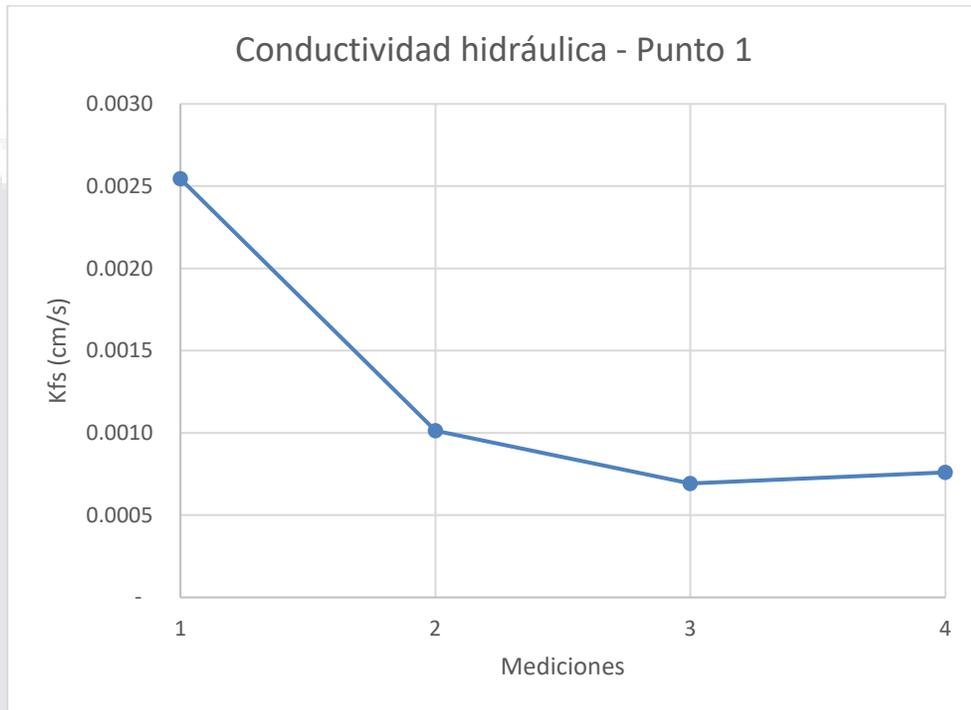


Figura 22. Gráfico de la variación de la conductividad hidráulica para el punto 1.

5.2.2 Permeabilidad y resistividad eléctrica Punto 2

A continuación, se observa en la Figura 23-A la ubicación de los perfiles de resistividad eléctrica y las pruebas de permeabilidad realizadas en el punto 2. La Figura 23-B muestra una fotografía de la realización de las mediciones para ambas pruebas. Se presentan los cinco perfiles de resistividad realizadas, el primer perfil corresponde a una medición antes de infiltrar el agua, y los siguientes son posteriores al proceso de infiltración (Figuras 24, 25, 26, 27 y 28 respectivamente). Se muestra también el gráfico de variación de la conductividad hidráulica (Figura 29).

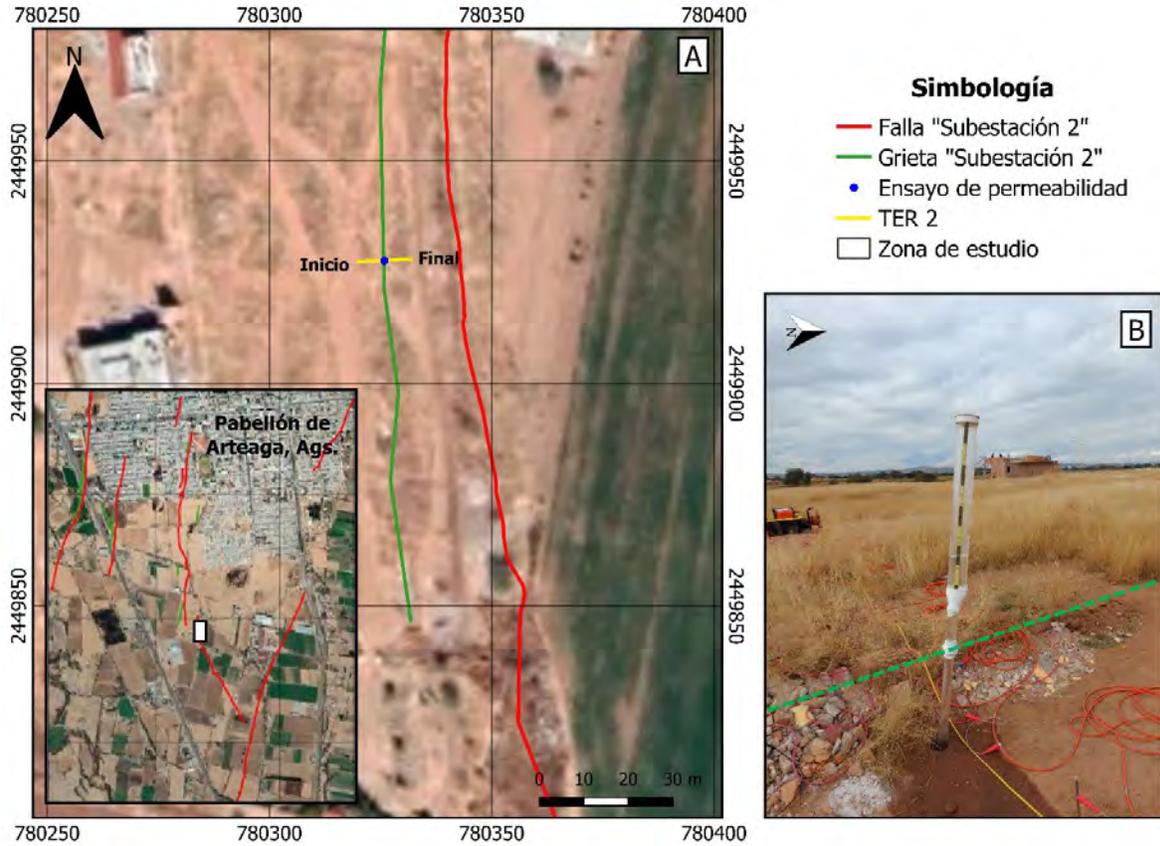


Figura 23. A) Ubicación del perfil de tomografía eléctrica resistiva (TER), realizado en el Punto 2 en planta, en la zona de estudio en el municipio de Pabellón de Arteaga, Ags. B) Imagen del sitio donde se realizaron las pruebas de permeabilidad y TER del punto 2. Muestra la grieta en verde.

La Figura 24 muestra el perfil de resistividad eléctrica antes de colocar por primera vez el permeámetro, el cual se encuentra en el bloque de techo de la falla, a una distancia de 7.5 metros del inicio. La discontinuidad superficial se localiza aproximadamente a los 7 metros de distancia del origen. El perfil muestra resistividades que van desde 0 a 97 ohm-metro, además se observan varias anomalías, zonas de bajas resistividades a una profundidad de 1 metro del origen hasta los 7 metros; y de los 8.5 a 14 metros a una profundidad de 1 metro. También en superficie y hasta una profundidad de 1 metro, se tienen valores altos de resistividad de todo el perfil.

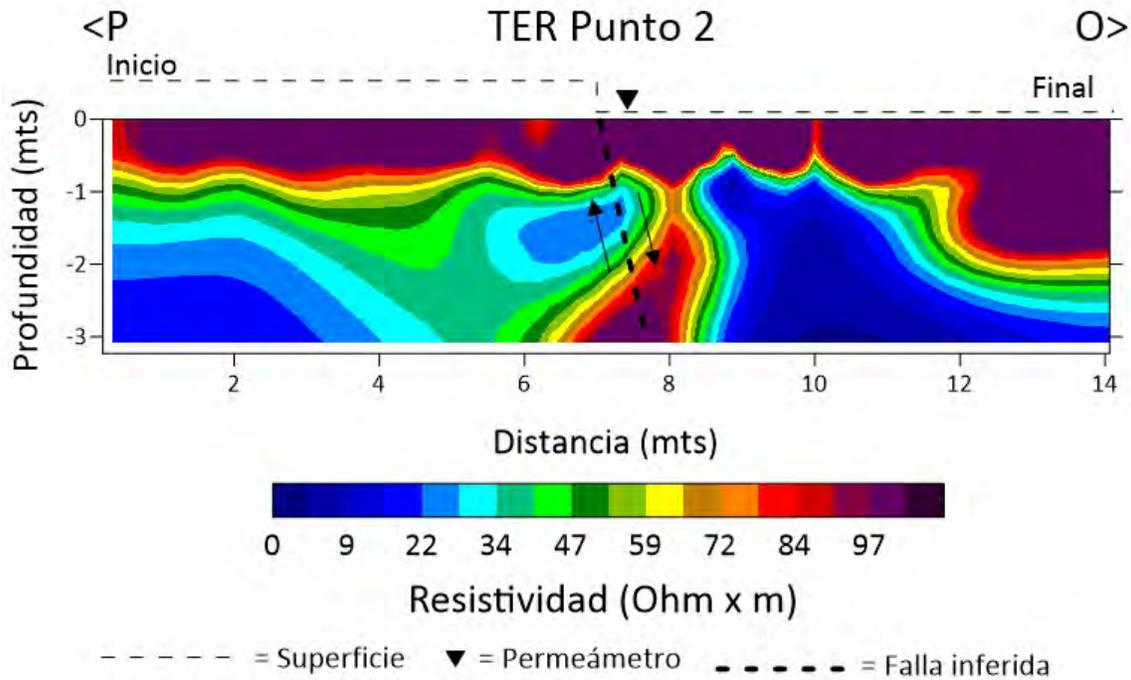


Figura 24. Perfil de TER tomado en el punto 2 antes de la primera prueba de permeámetro.

La Figura 25-a muestra el perfil de resistividad eléctrica después de infiltrar agua por primera vez con el permeámetro, el volumen de agua total infiltrado para esta medición fue de 0.0045 m^3 . El perfil muestra una disminución de la resistividad del suelo entre los 7.5 y 8 metros, que llega hasta los 2 metros (Figura 25-b).

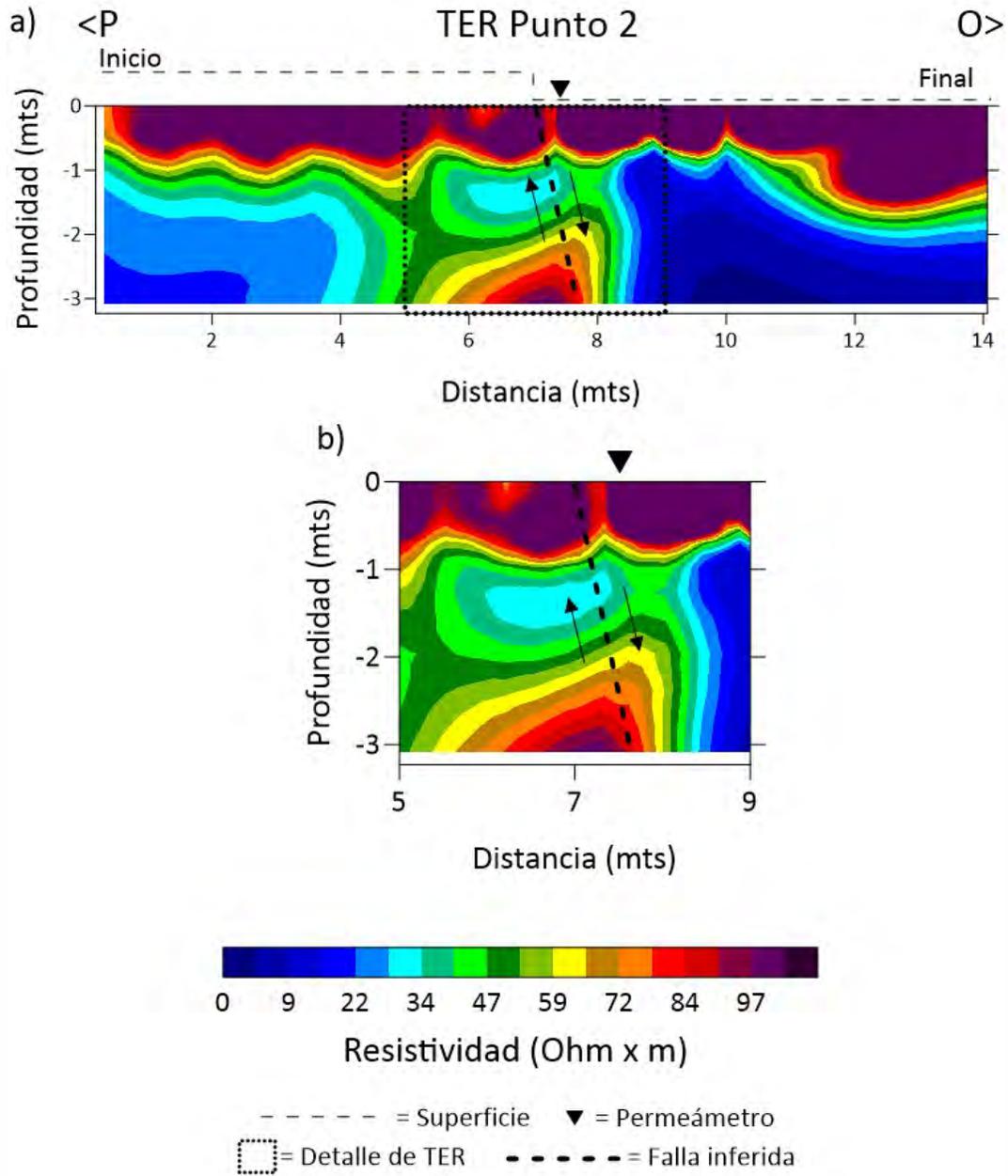


Figura 25. a) Perfil de TER tomado en el punto 2 después de la primera prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración.

La Figura 26-a muestra el perfil de resistividad eléctrica después de infiltrar agua por segunda vez con el permeámetro, el volumen de agua total infiltrado para esta segunda medición fue de 0.0044 m³. El perfil muestra una disminución de la resistividad del suelo entre los 5 y 8

metros del inicio del perfil, se registra a partir del metro de profundidad y llega aproximadamente hasta los 2.2 metros (Figura 26-b).

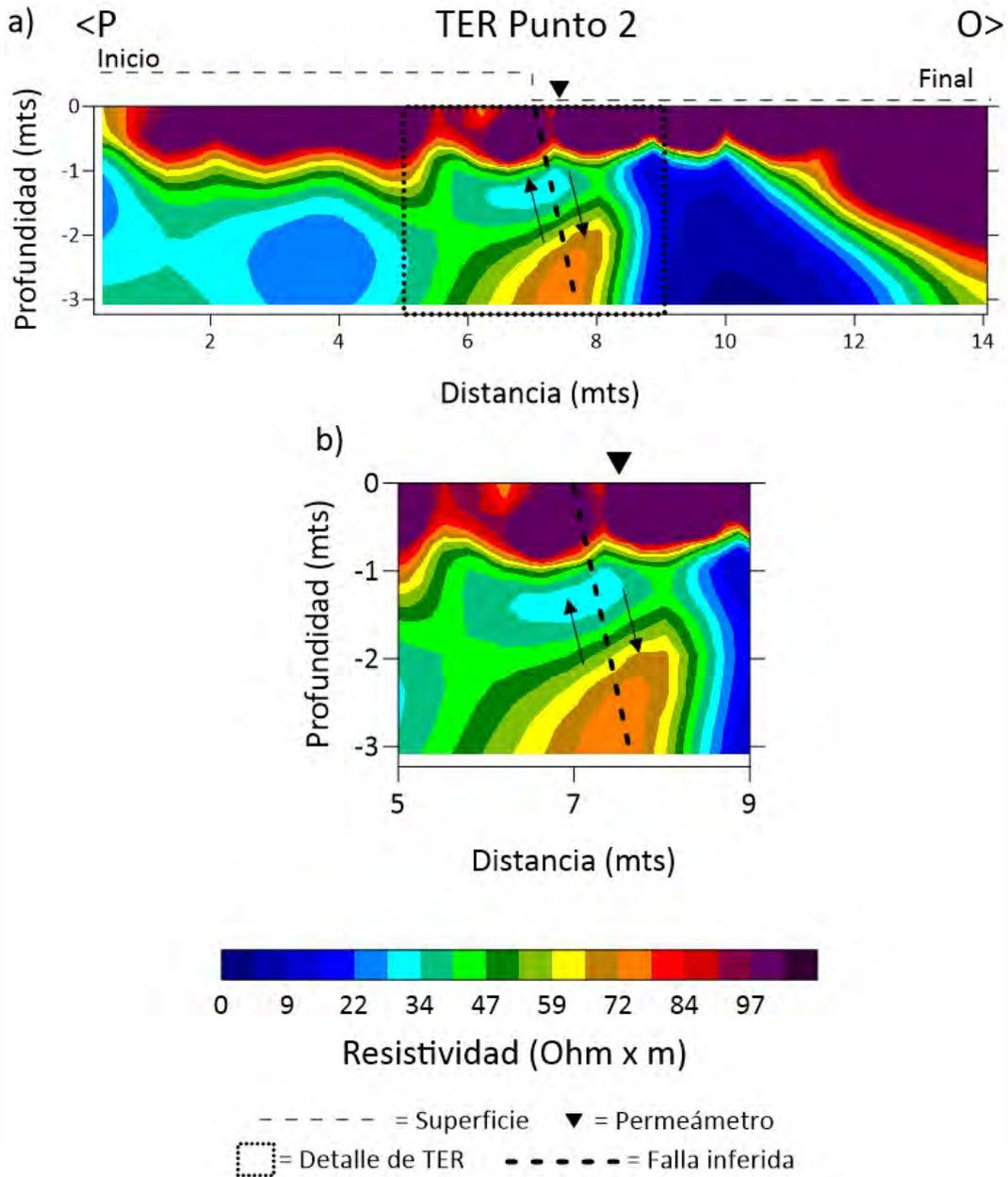


Figura 26. a) Perfil de TER tomado en el punto 2 después de la segunda prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración.

La Figura 27-a muestra el perfil de resistividad eléctrica después de infiltrar agua por tercera vez con el permeámetro, el volumen de agua total infiltrado para esta medición fue de

0.0032 m³. El perfil muestra una disminución de la resistividad del suelo entre los 5 y 8 metros del inicio, a partir del metro de profundidad y llega aproximadamente a los 2.6 metros (Figura 27-b).

Aumentando su profundidad 0.4 metros más que el anterior perfil de resistividad (Figura 26-b).

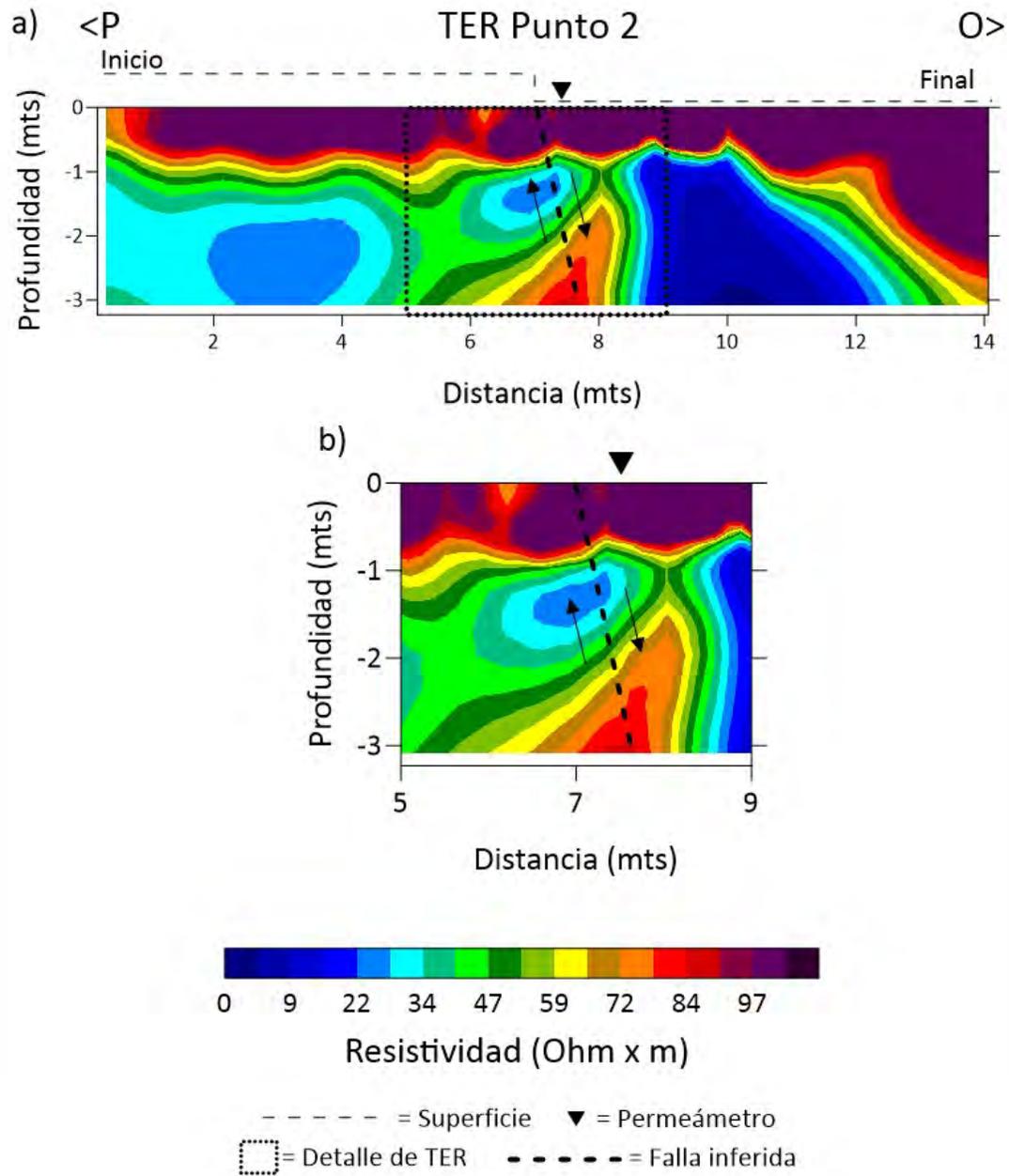


Figura 27. a) Perfil de TER tomado en el punto 2 después de la tercera prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración.

La Figura 28-a muestra el perfil de resistividad eléctrica después de infiltrar agua por cuarta vez con el permeámetro, el volumen de agua total infiltrado para esta medición fue de 0.0003 m³. El perfil muestra una disminución de la resistividad del suelo entre los 5 y 8 metros del inicio, a partir del metro de profundidad y llega hasta los 3 metros (Figura 28-b). Aumentando su profundidad 0.4 metros más que el anterior perfil de resistividad (Figura 27-b).

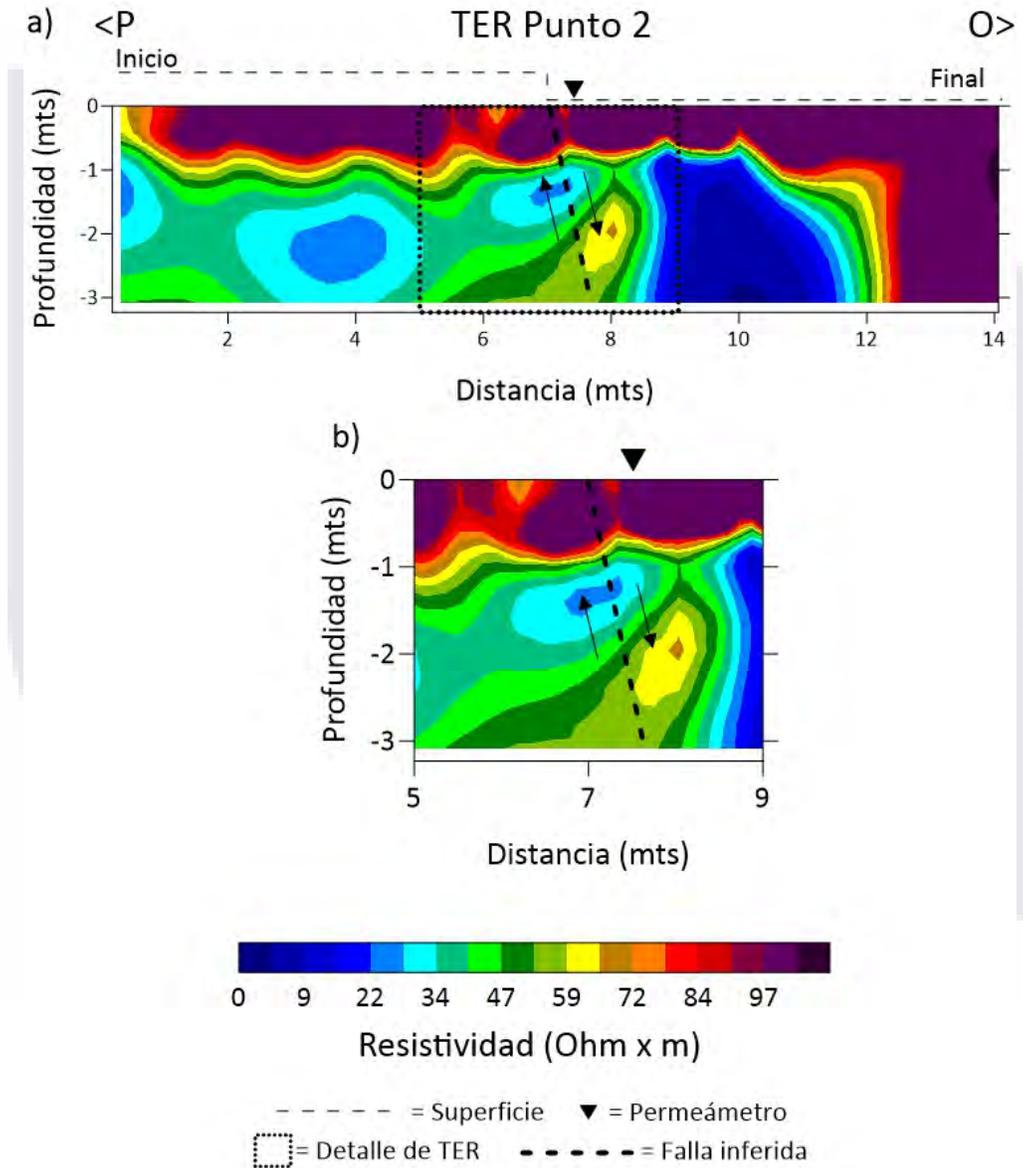


Figura 28. a) Perfil de TER tomado en el punto 2 después de la cuarta prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración.

Con los resultados obtenidos de las pruebas de permeabilidad para el punto 2 (mostradas en el Anexo C) se graficó la variación de la conductividad hidráulica con el número de mediciones, en donde se observa cómo se comporta la conductividad hidráulica, obteniendo un valor inicial de 0.0089 cm/s y uno final de 0.0002 cm/s, habiendo transcurrido un tiempo entre la prueba inicial y la final de 51 minutos y 50 segundos, mientras que en las mediciones 2 y 3 se llegó a 0.0083 cm/s y 0.0003 cm/s, respectivamente (Figura 29). Por lo que se puede observar una disminución en la conductividad hidráulica.

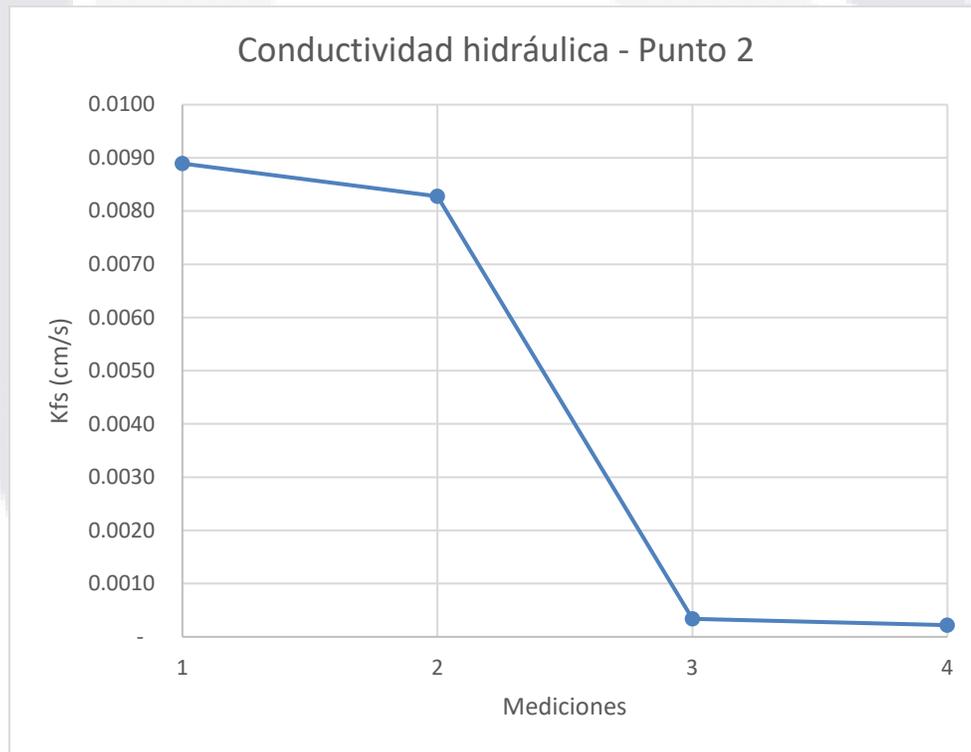


Figura 29. Gráfico de la variación de la conductividad hidráulica para el punto 2.

5.2.3 Permeabilidad y resistividad eléctrica Punto 3

A continuación, se observa en la Figura 30-A la ubicación de los perfiles de resistividad eléctrica y las pruebas de permeabilidad realizadas en el punto 3. La Figura 30-B muestra una

fotografía donde se ve cómo se realizaron las mediciones para ambas pruebas. En este apartado se presenta los cinco perfiles de resistividad (Antes de infiltrar agua y después de la primera, segunda, tercer y cuarta vez de infiltrar agua) (Figura 31, 32, 33, 34 y 35 respectivamente), y el gráfico de variación de la conductividad hidráulica (Figura 36).

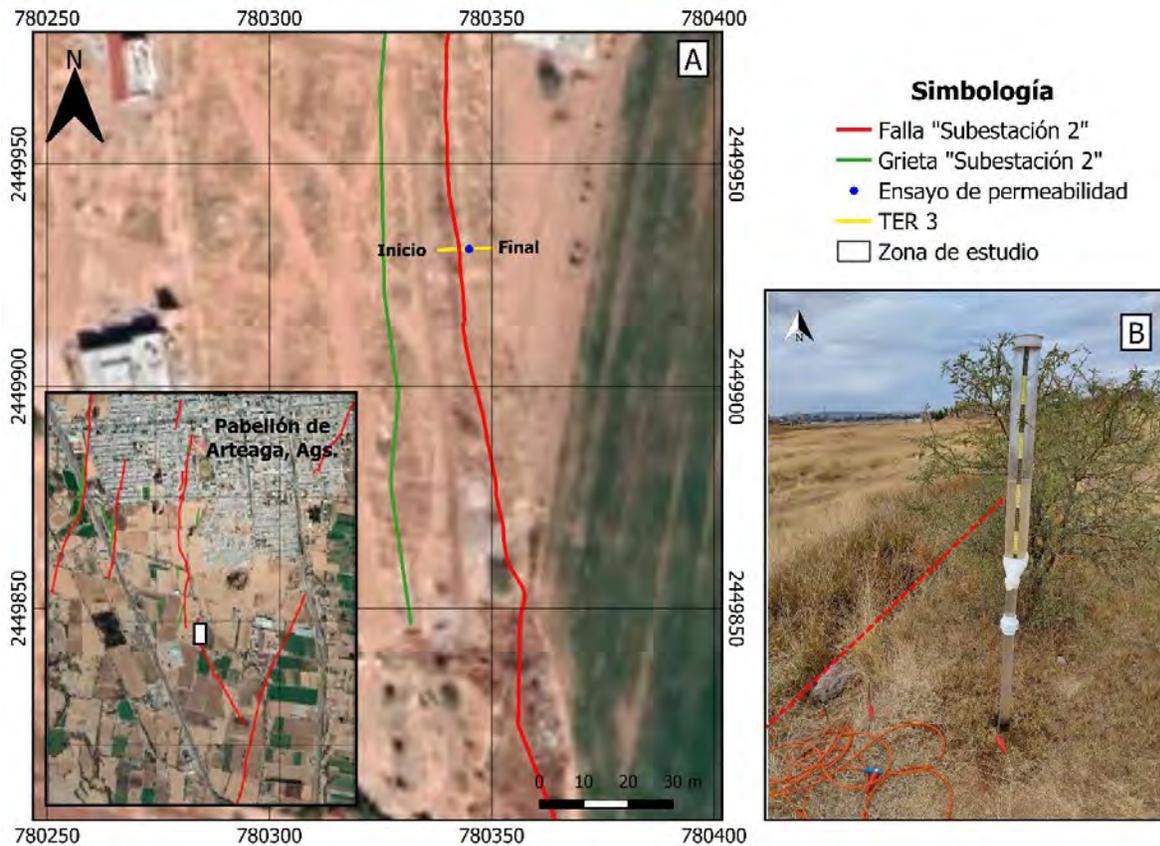


Figura 30. A) Ubicación del perfil de tomografía eléctrica resistiva (TER), realizado en el Punto 3 en planta, en la zona de estudio en el municipio de Pabellón de Arteaga, Ags. B) Imágenes del sitio donde se realizaron las pruebas de permeabilidad y TER del punto 3. Muestra la falla en rojo.

La Figura 31 muestra el perfil de resistividad eléctrica antes de colocar por primera vez el permeámetro, el cual se encuentra en el bloque de piso de la falla, a una distancia de 7.5 metros del inicio. La discontinuidad superficial se localiza aproximadamente a los 7 metros de distancia del origen. El perfil muestra resistividades que van desde 0 a 833 ohm-metro, además se observan varias anomalías, zonas de bajas resistividades a partir de una profundidad de 1 metro a lo largo

de todo el perfil. También en superficie y hasta una profundidad de 1 metro, se tienen valores altos de resistividad de todo el perfil, destacando en superficie a los 9.5 metros una anomalía con valores muy altos de resistividad.

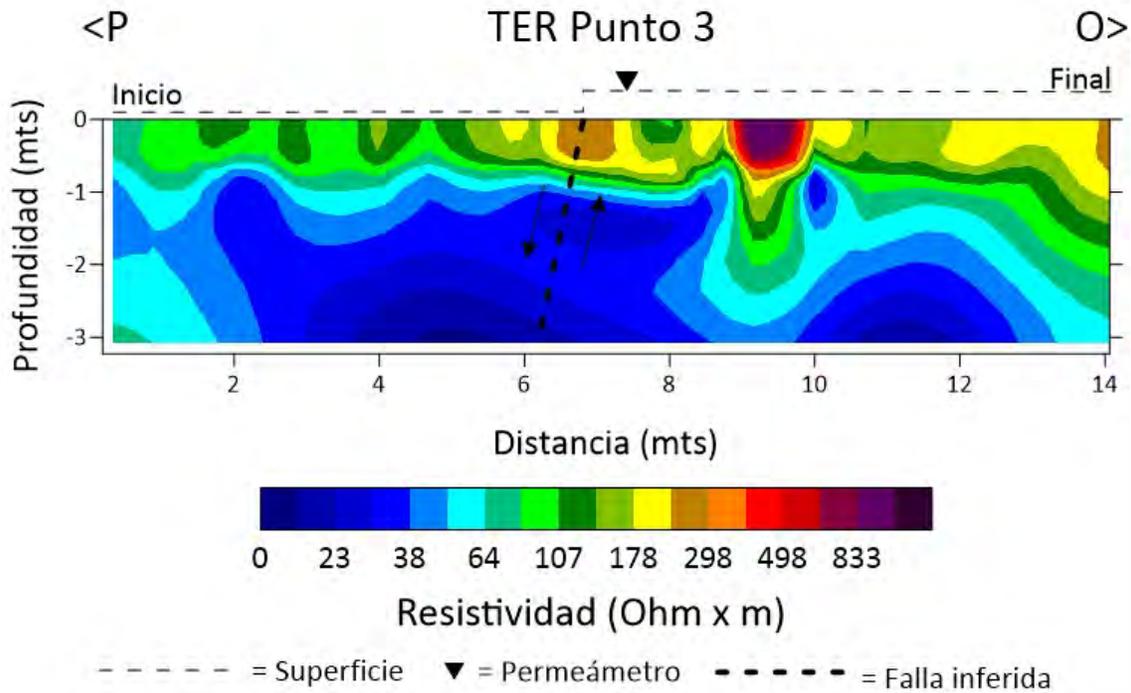


Figura 31. Perfil de TER tomado en el punto 3 antes de la primera prueba de permeámetro.

La Figura 32-a muestra el perfil de resistividad eléctrica después de infiltrar agua por primera vez con el permeámetro, el volumen de agua total infiltrado para esta medición fue de 0.0025 m^3 . El perfil muestra una disminución de la resistividad del suelo entre los 7.5 y 8 metros en la superficie, que llega hasta cercanos los 0.5 metros de profundidad (Figura 32-b).

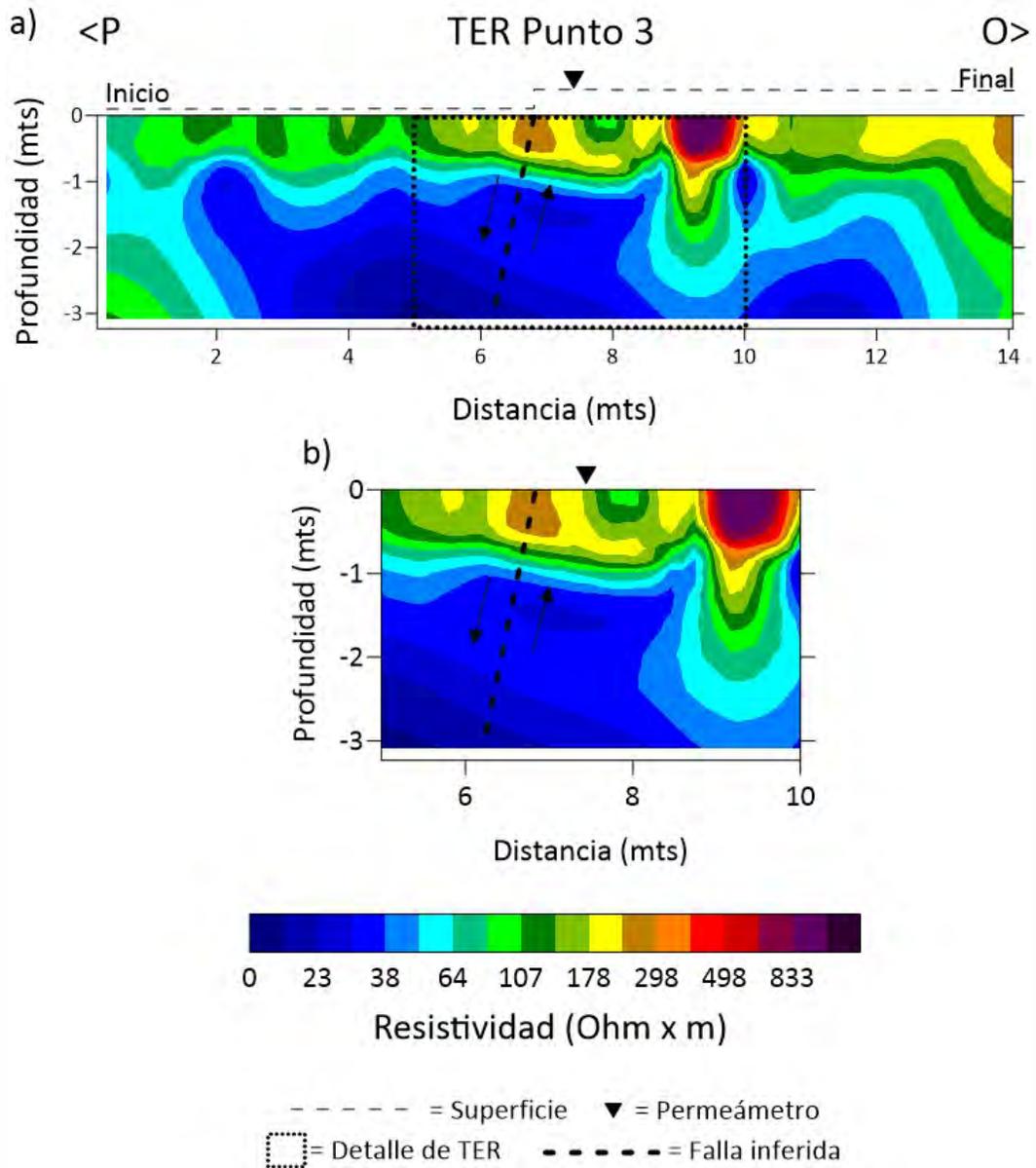


Figura 32. a) Perfil de TER tomado en el punto 3 después de la primera prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración.

La Figura 33-a muestra el perfil de resistividad eléctrica después de infiltrar agua por segunda vez con el permeámetro, el volumen de agua total infiltrado para esta medición fue de 0.0024 m^3 . El perfil muestra una disminución de la resistividad del suelo entre los 7.5 y 8 metros

en la superficie, que aumenta un poco en profundidad hasta los 0.6 metros (Figura 33-b). Aumentando su profundidad 0.1 metros más que el anterior perfil de resistividad (Figura 32-b).

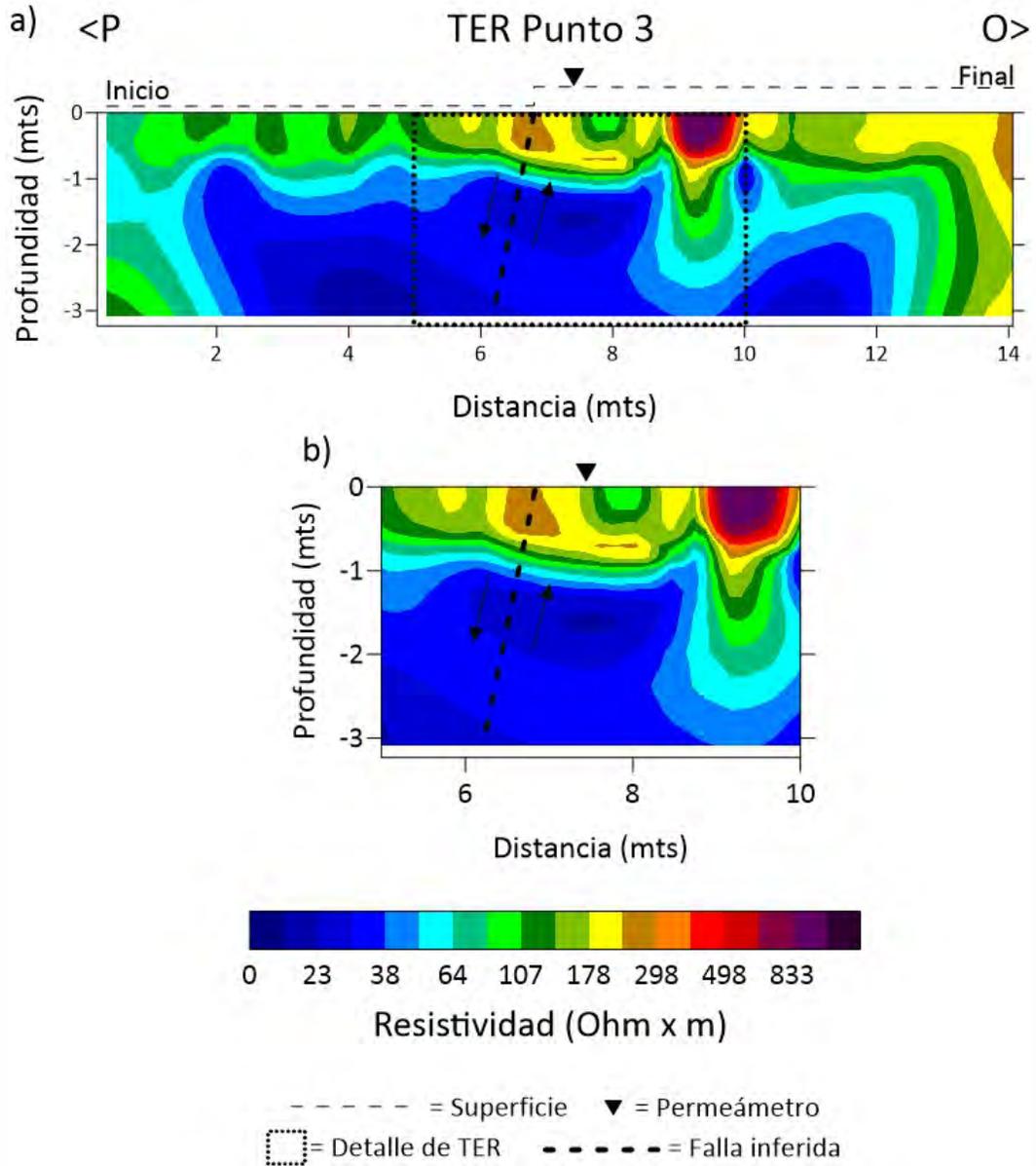


Figura 33. a) Perfil de TER tomado en el punto 3 después de la segunda prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración.

La Figura 34-a muestra el perfil de resistividad eléctrica después de infiltrar agua por tercera vez con el permeámetro, el volumen de agua total infiltrado para esta medición fue de 0.0020 m^3 . El perfil muestra una disminución de la resistividad del suelo entre los 7.5 y 8 metros

en la superficie, a una profundidad de hasta los 0.8 metros (Figura 34-b). Aumentando su profundidad 0.2 metros más que el anterior perfil de resistividad (Figura 33-b).

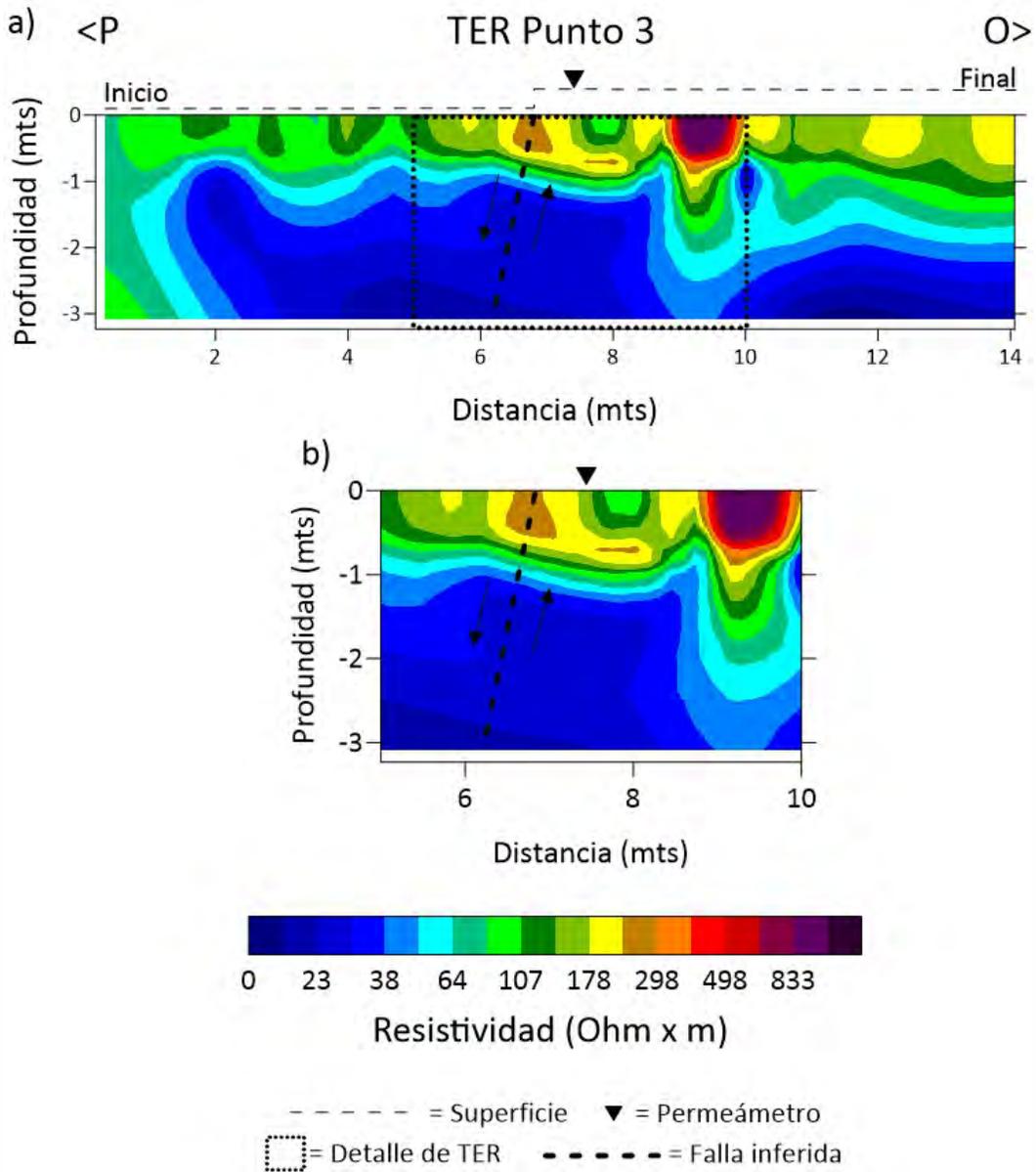


Figura 34. a) Perfil de TER tomado en el punto 3 después de la tercera prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración.

La Figura 35-a muestra el perfil de resistividad eléctrica después de infiltrar agua por cuarta vez con el permeámetro, el volumen de agua total infiltrado para esta medición fue de 0.0018 m³.

El perfil muestra una disminución de la resistividad del suelo entre los 7.5 y 8 metros en la

superficie, que llega hasta el metro de profundidad (Figura 35-b). Aumentando su profundidad 0.2 metros más que el anterior perfil de resistividad (Figura 34-b).

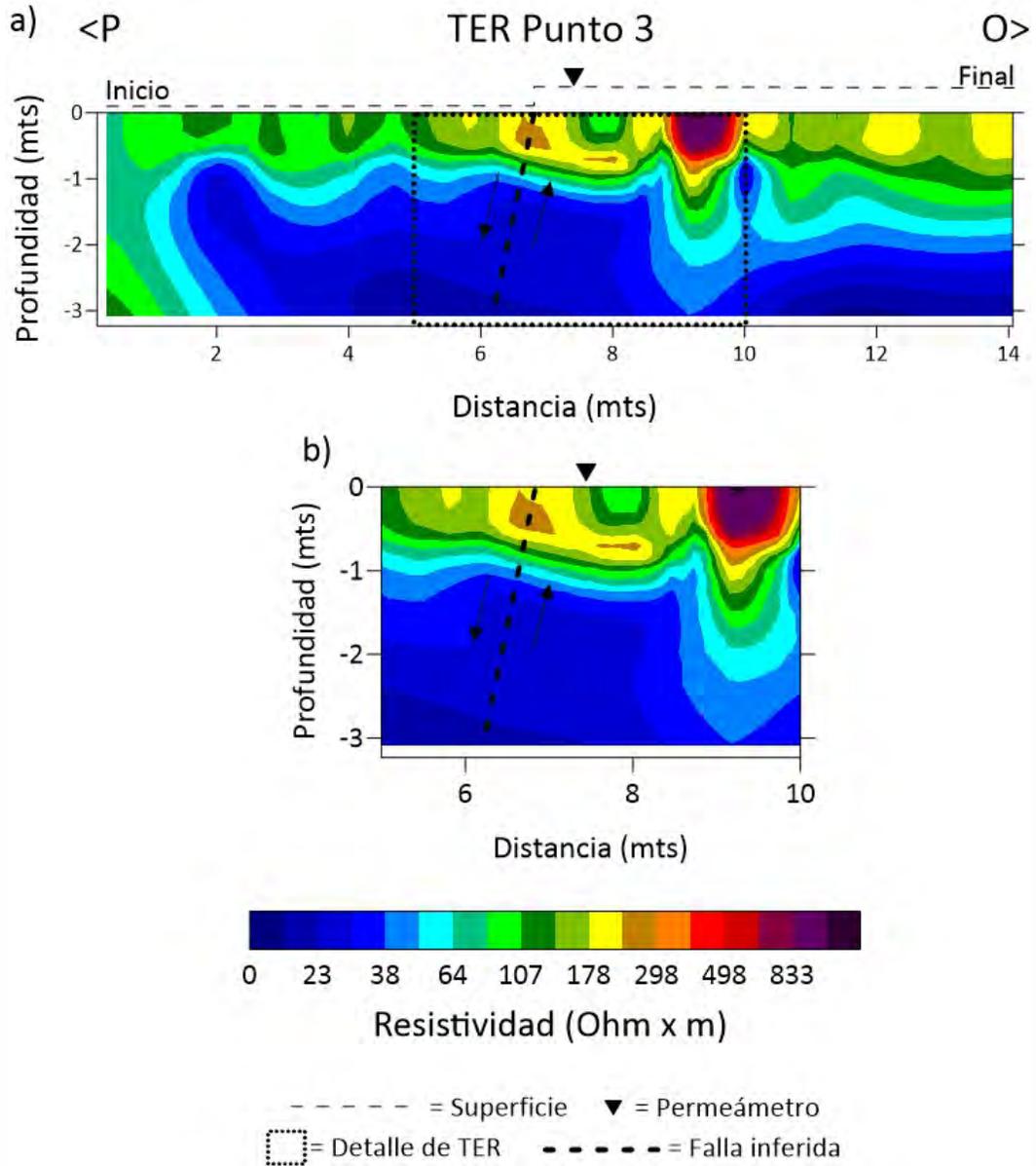


Figura 35. a) Perfil de TER tomado en el punto 3 después de la cuarta prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración.

Con los resultados obtenidos de las pruebas de permeabilidad para el punto 3 (Anexo D) se graficó la variación de la conductividad hidráulica, en donde se observa cómo se comporta la conductividad hidráulica, obteniendo un valor inicial de 0.0033 cm/s y uno final de 0.0010 cm/s,

habiendo transcurrido un tiempo entre la prueba inicial y la final de 68 minutos y 40 segundos, mientras que en las mediciones 2 y 3 se llegó a 0.0014 cm/s y 0.0011 cm/s, respectivamente (Figura 36). Por lo que se puede observar una disminución en la conductividad hidráulica.

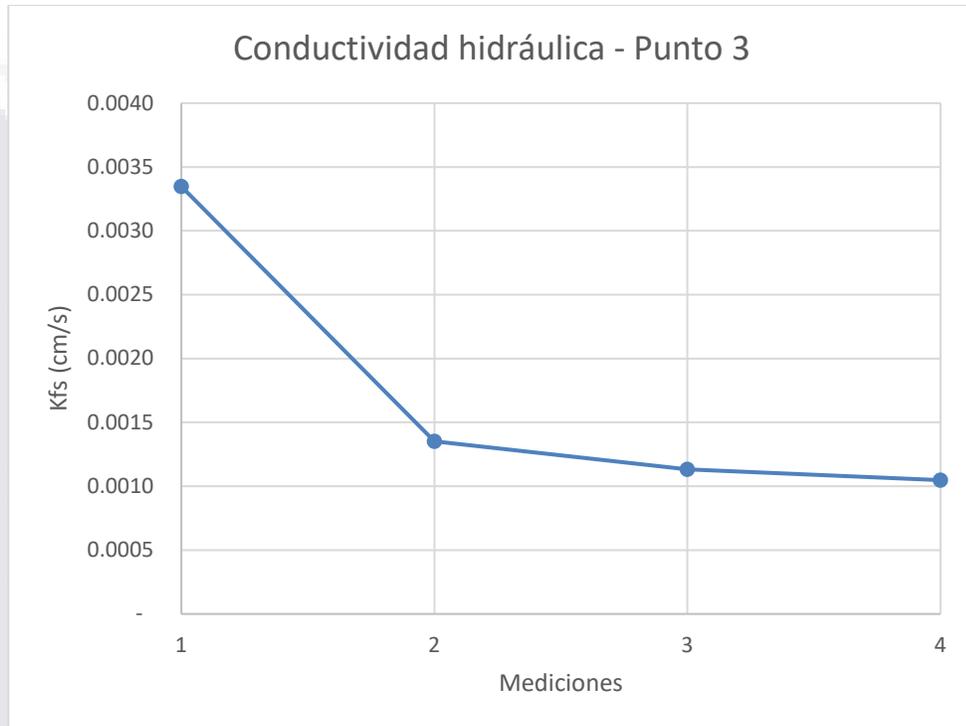


Figura 36. Gráfico de la variación de la conductividad hidráulica para el punto 3.

5.2.4 Permeabilidad y resistividad eléctrica Punto 4

A continuación, se observa en la Figura 37-A la ubicación de los perfiles de resistividad eléctrica y las pruebas de permeabilidad realizadas en el punto 4. La Figura 37-B muestra una fotografía donde se ve cómo se realizaron las mediciones para ambas pruebas. En este apartado se presenta los cinco perfiles de resistividad (Antes de infiltrar agua y después de la primera, segunda,

tercer y cuarta vez de infiltrar agua) (Figura 38, 39, 40, 41 y 42 respectivamente), y el gráfico de variación de la conductividad hidráulica (Figura 43).

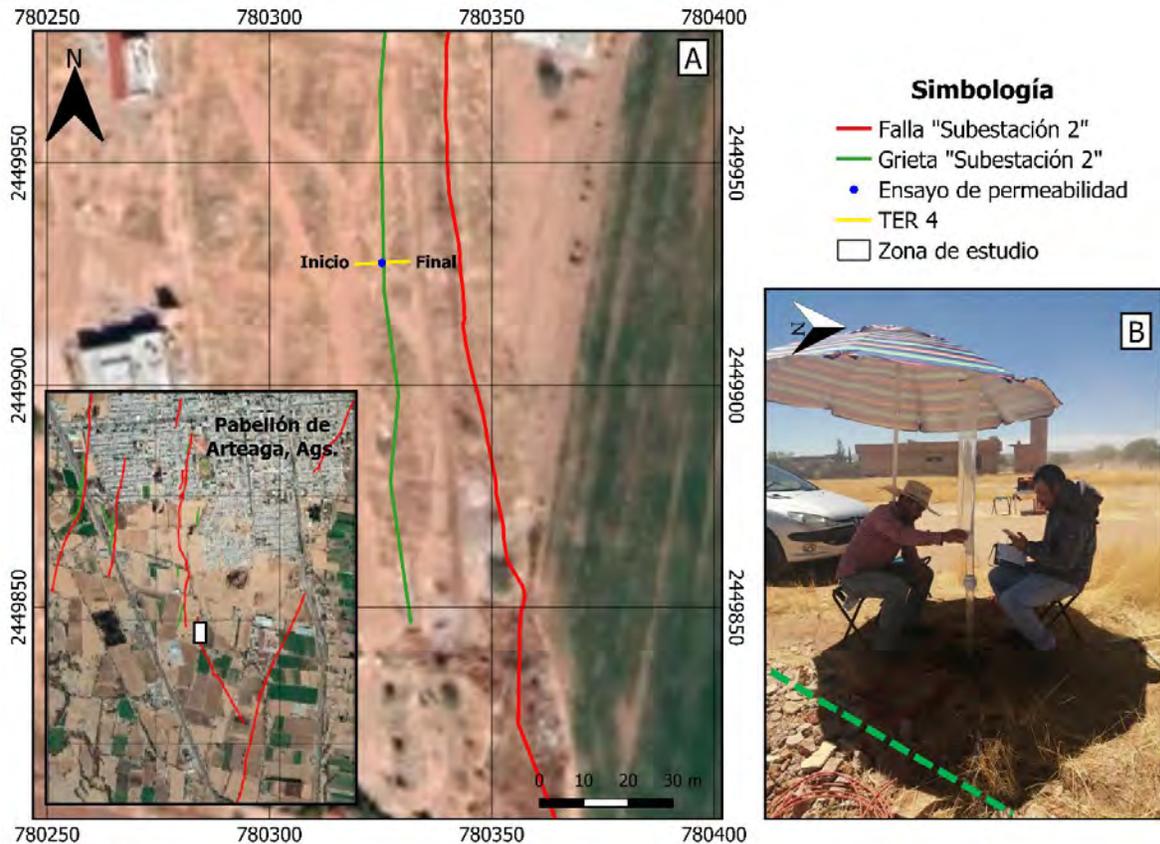


Figura 37. A) Ubicación del perfil de tomografía eléctrica resistiva (TER), realizado en el Punto 4 en planta, en la zona de estudio en el municipio de Pabellón de Arteaga, Ags. B) Imagen del sitio donde se realizaron las pruebas de permeabilidad y TER del punto 4. Muestra la grieta en verde.

La Figura 38 muestra el perfil de resistividad eléctrica antes de colocar por primera vez el permeámetro, el cual se encuentra en el bloque de techo de la falla, a una distancia de 7.5 metros del inicio. La discontinuidad superficial se localiza aproximadamente a los 8 metros de distancia del origen. El perfil muestra resistividades que van desde 0 a 237 ohm-metro, además se observan varias anomalías, zonas de bajas resistividades a partir de una profundidad de 1 metro de los 7 a los 13 metros. También en superficie y hasta una profundidad de 1 metro, se tienen valores altos de resistividad en todo el perfil.

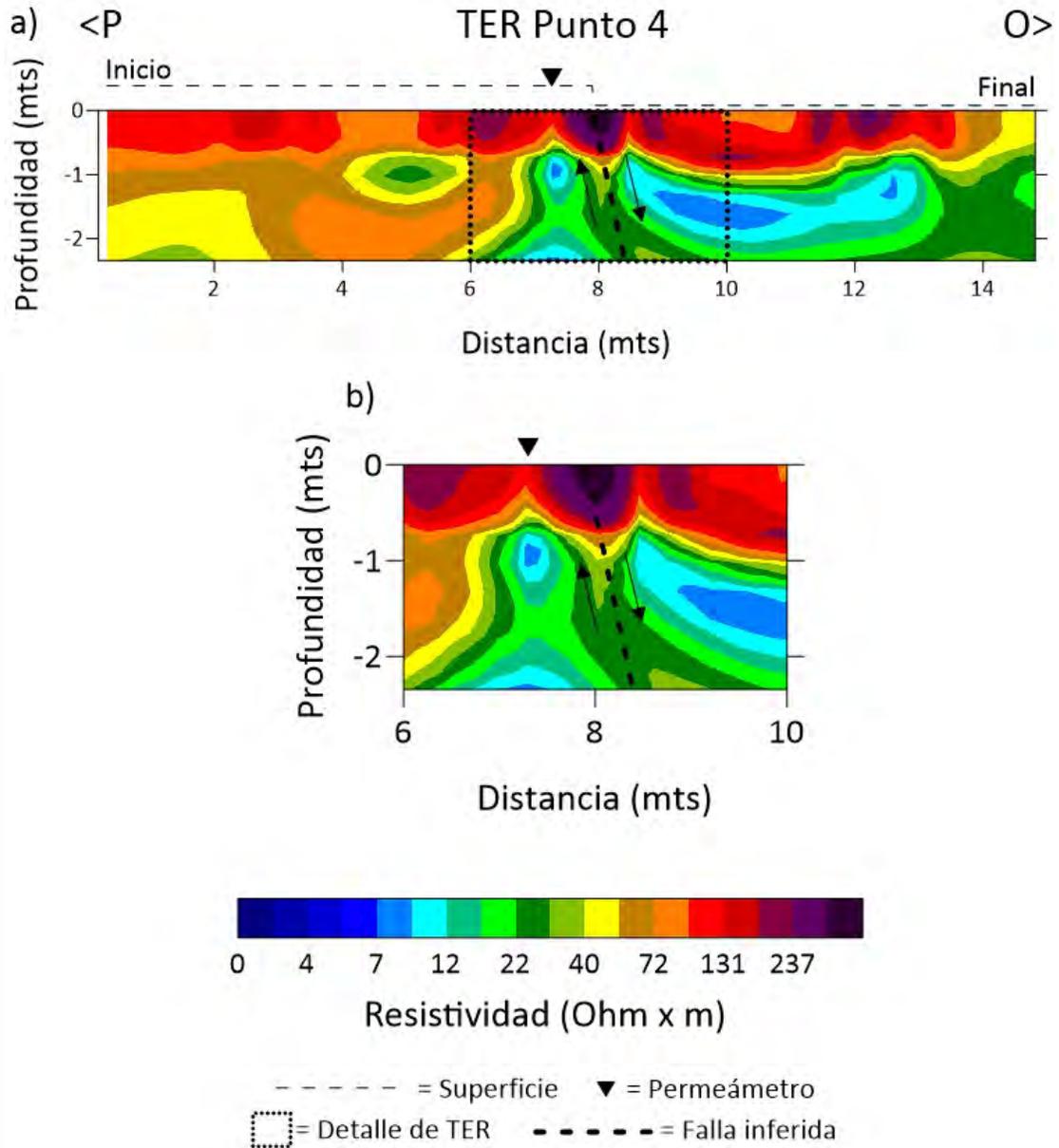


Figura 39. a) Perfil de TER tomado en el punto 4 después de la primera prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración.

La Figura 40-a muestra el perfil de resistividad eléctrica después de infiltrar agua por segunda vez con el permeámetro, el volumen de agua total infiltrado para esta medición fue de 0.0005 m³. El perfil muestra una disminución de la resistividad del suelo a los 7.5 metros desde la

superficie hasta los 2.2 metros; entre los 4 y 7 metros desde el inicio a una profundidad de 1 metro; así como de los 8.5 a 10 metros desde una profundidad de 1.5 metros (Figura 40-b).

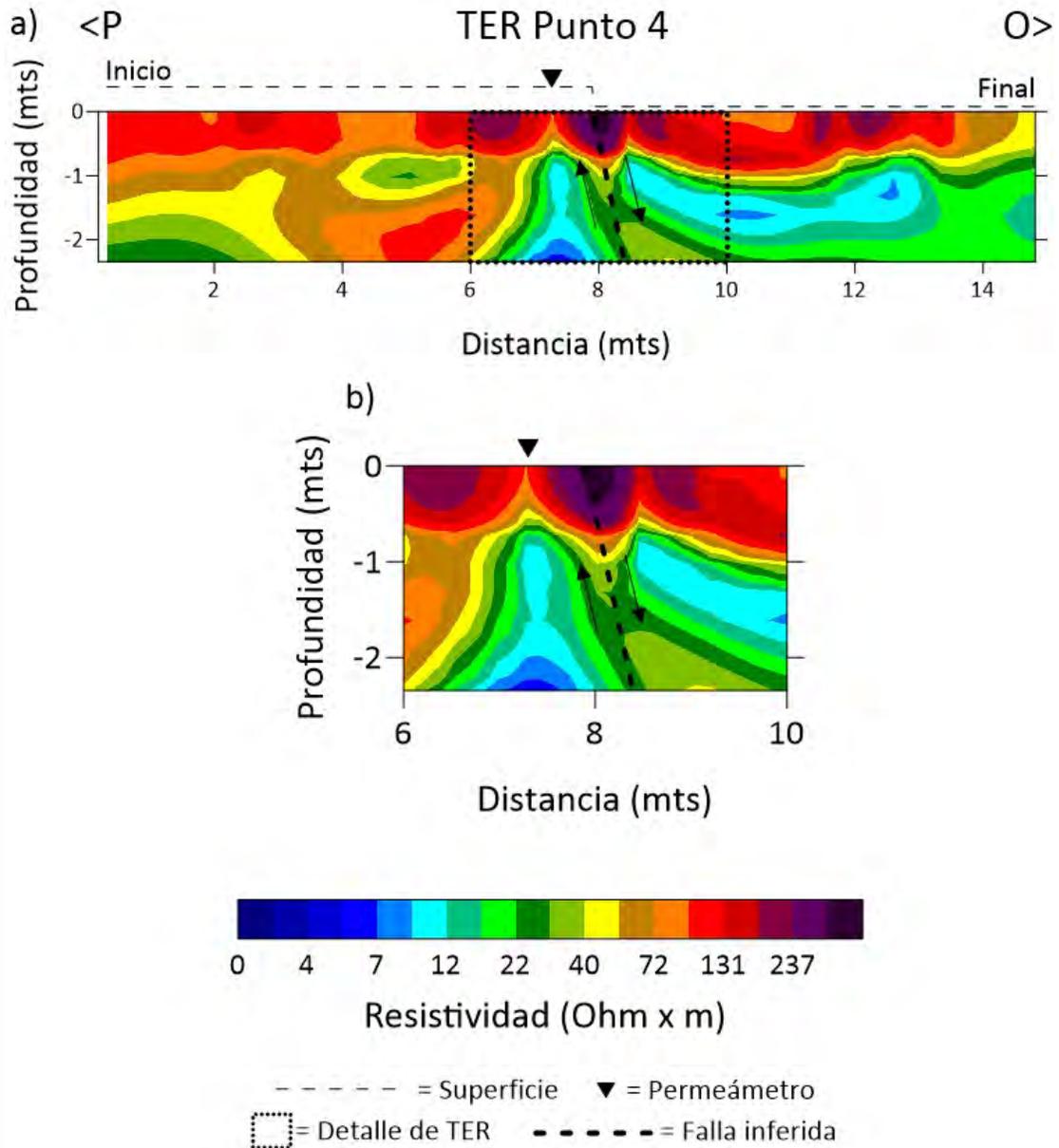


Figura 40. a) Perfil de TER tomado en el punto 4 después de la segunda prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración.

La Figura 41-a muestra el perfil de resistividad eléctrica después de infiltrar agua por tercera vez el permeámetro, el volumen de agua total infiltrado para esta medición fue de 0.0004

m³. El perfil muestra una disminución de la resistividad del suelo a los 7.5 metros desde la superficie hasta los 2.2 metros; entre los 4 y 7 metros a partir de una profundidad de 1 metro; así como de los 8.5 a 10 metros a una profundidad de 1.5 metros a los 2 metros (Figura 41-b).

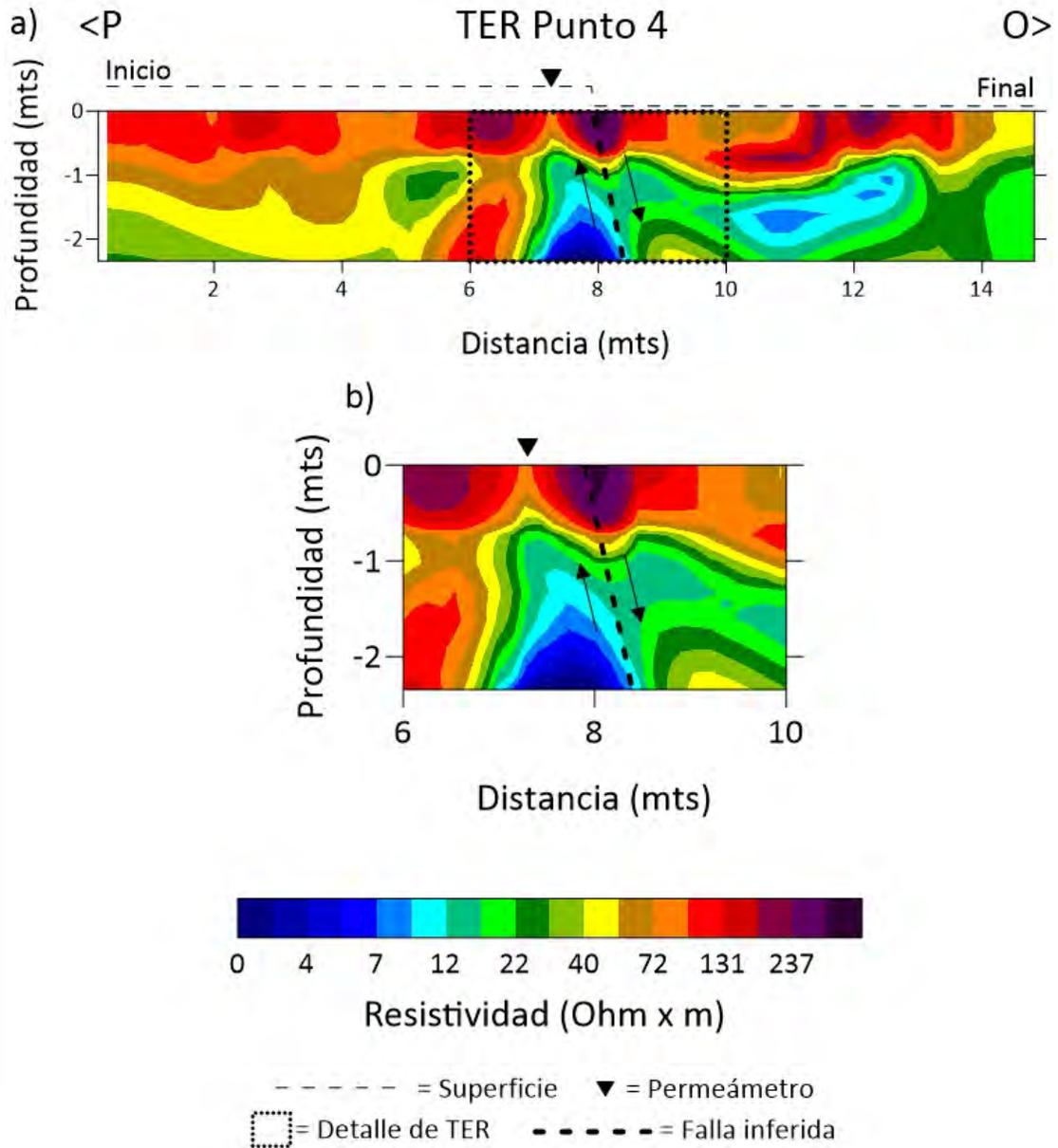


Figura 41. a) Perfil de TER tomado en el punto 4 después de la tercera prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración.

La Figura 42-a muestra el perfil de resistividad eléctrica después de infiltrar agua por cuarta vez con el permeámetro, el volumen de agua total infiltrado para esta medición fue de 0.0005 m³. El perfil muestra una disminución de la resistividad del suelo a los 7.5 metros desde la superficie hasta los 2.2 metros; entre los 4 y 7 metros en superficie a partir de una profundidad de 1 metro; así como de los 8.5 a 10 metros a una profundidad de 1.5 hasta los 2.2 metros (Figura 42-b).

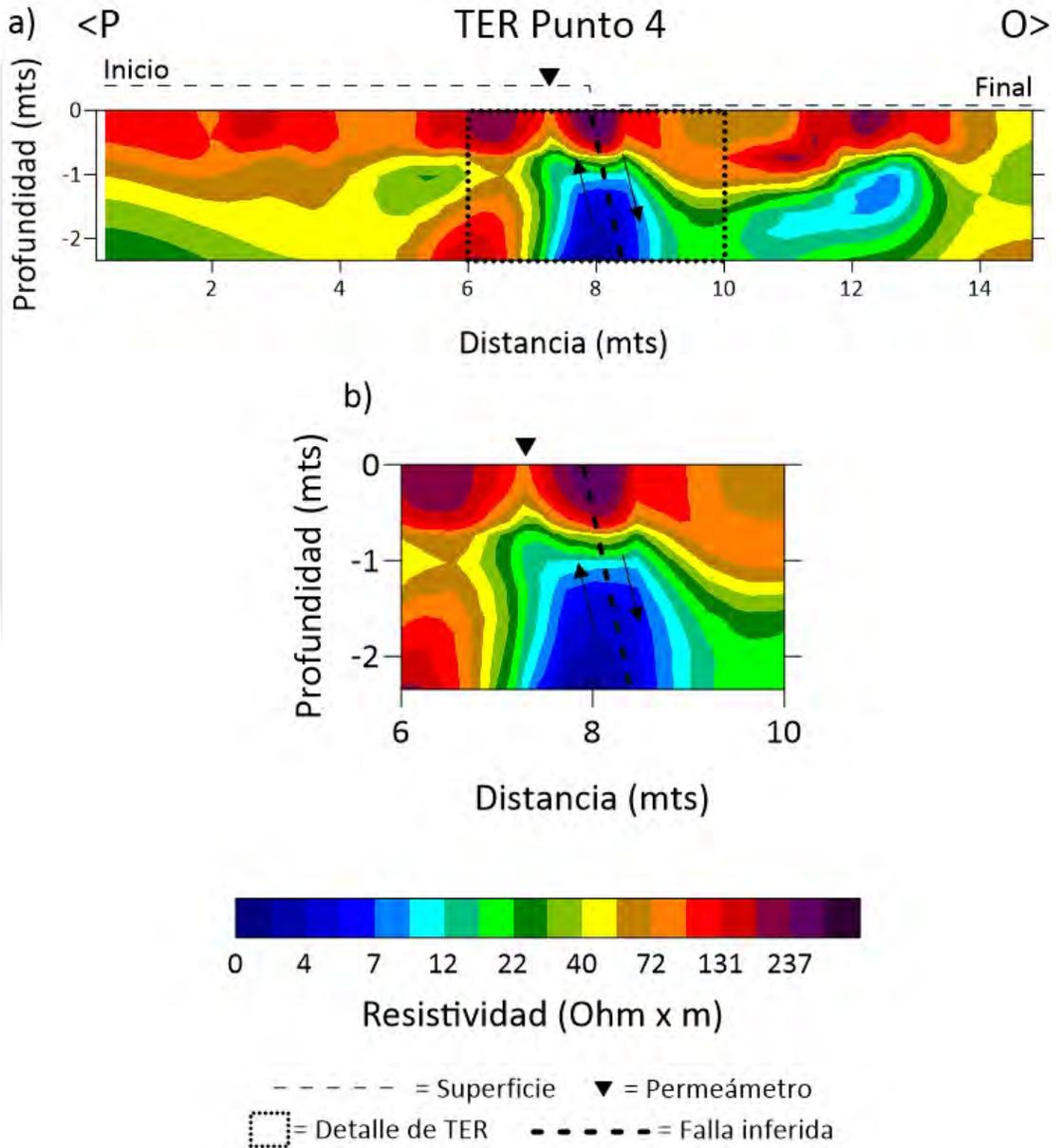


Figura 42. a) Perfil de TER tomado en el punto 4 después de la cuarta prueba de permeámetro. b) Detalle del perfil que muestra disminución de la resistividad eléctrica por influencia de la infiltración.

Con los resultados obtenidos de las pruebas de permeabilidad para el punto 4 (Anexo E) se graficó la variación de la conductividad hidráulica, en donde se observa cómo se comporta la conductividad hidráulica, obteniendo un valor inicial de 0.0009 cm/s y uno final de 0.0003 cm/s, habiendo transcurrido un tiempo entre la prueba inicial y la final de 80 minutos, mientras que en las mediciones 2 y 3 se llegó a 0.0002 cm/s para ambas (Figura 43).

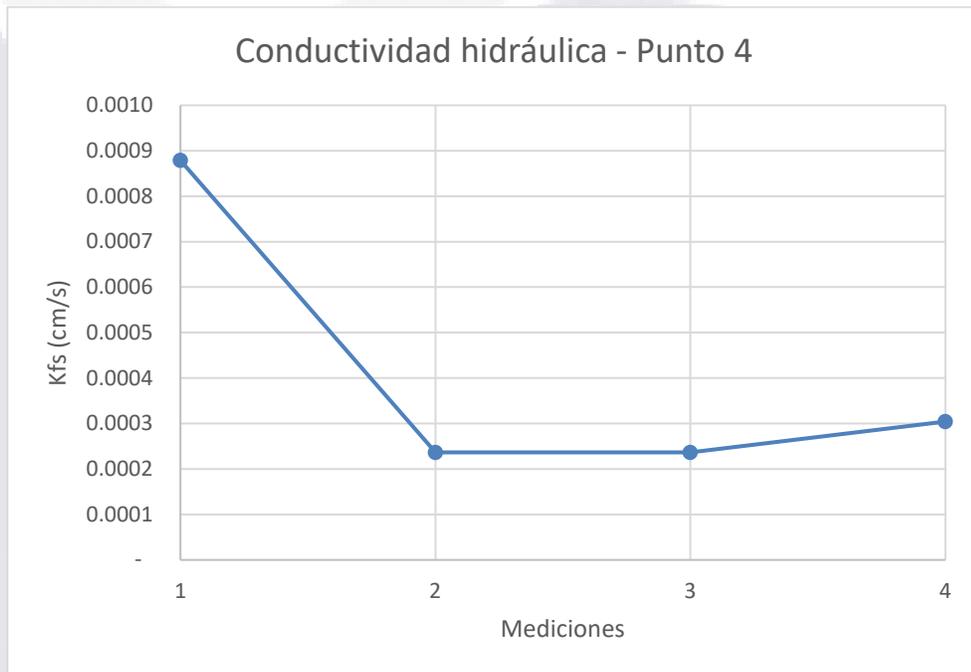
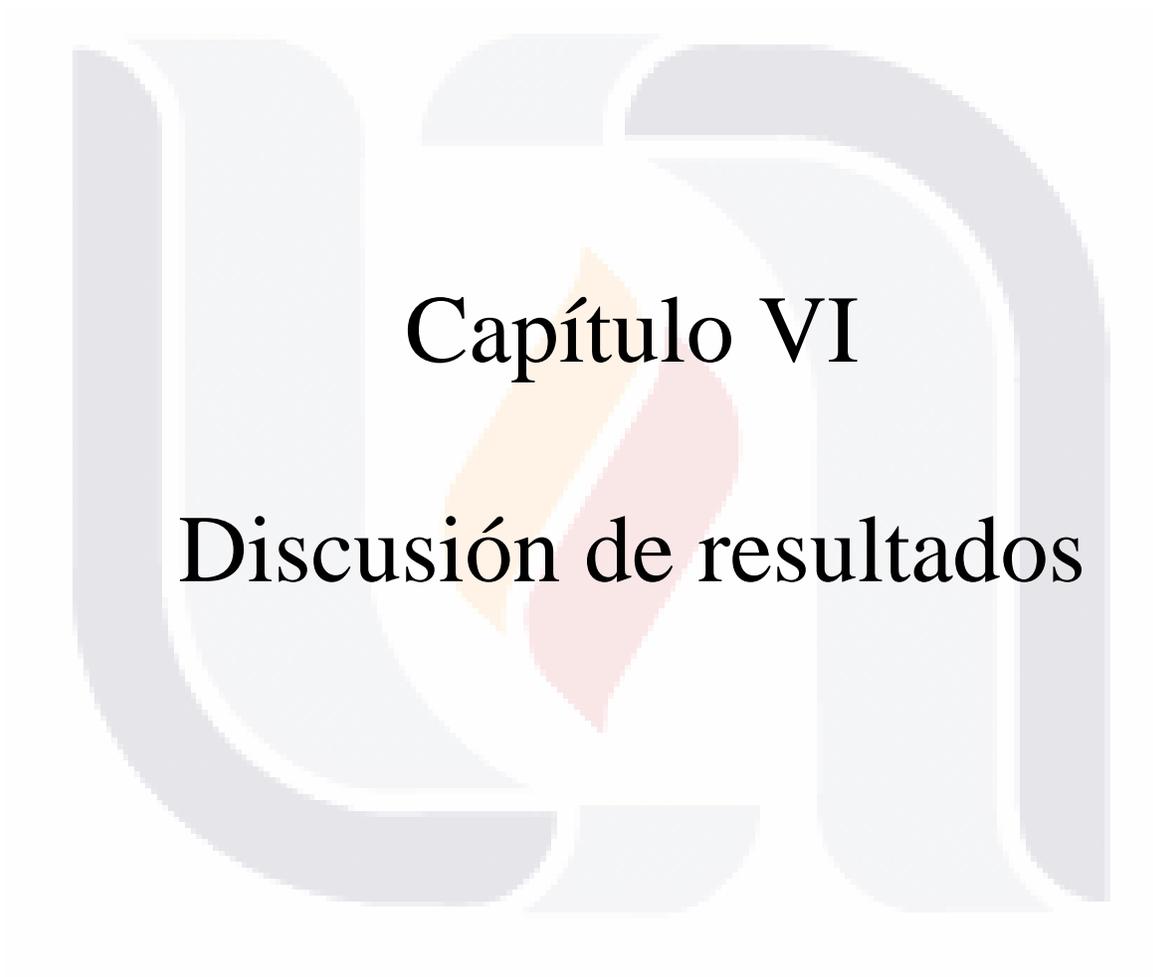


Figura 43. Gráfico de la variación de la conductividad hidráulica para el punto 4.



Capítulo VI

Discusión de resultados

6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Perfil de Conductividad hidráulica

El perfil de conductividad hidráulica (Figura 10), muestra resistividades bajas en los primeros 13 puntos (metros), al encontrarse en el bloque de techo de la discontinuidad se esperaría encontrar valores mayores, esto no sucede debido probablemente a que esta zona ha sido alterada por actividad antropogénica, al utilizarla como caminos de terracería con tránsito constante de vehículos, los cuales posiblemente hayan compactado el terreno de manera artificial, disminuyendo así la capacidad de infiltración en la superficie del terreno.

Entre los puntos 13 y 14 se localiza una de las discontinuidades, por lo que en esta zona se esperaría un suelo con mayor conductividad hidráulica, como se menciona en estudios recientes realizados por Hernández-Marín *et al.*, (2017), donde se dice que las fallas podrían actuar como canales de recarga debido al incremento de su permeabilidad debido a su vez a la reciente actividad mecánica y el proceso de erosión hídrica. Sin embargo, en este trabajo dicho comportamiento no se observa, un factor que podría explicar este comportamiento del suelo adyacente a la falla sería de nueva cuenta la actividad antropogénica, ya que la fractura se observa rellena de escombros y compactada, lo cual probablemente causó una disminución su permeabilidad.

A partir del punto 14 y hasta el punto 26, se observa un aumento de los valores de conductividad hidráulica, en esta zona se observó en campo la presencia de oquedades superficiales posiblemente ocasionadas por la falla y pequeños agujeros por actividad biológica de insectos, en particular de hormigas, lo que podría estar favoreciendo la infiltración debido al incremento de la permeabilidad ocasionado por la aparición de más oquedades, como lo menciona Caine *et al.*, (1996). Esta zona se encuentra dentro de una especie de mini graben, posiblemente creado por la actividad de las dos discontinuidades dentro de las que se encuentra la zona de

estudio. Dentro de esta zona, los puntos (23 y 24) resultaron con conductividades hidráulicas bajas, aunque se esperarían valores más altos debido a su proximidad a la discontinuidad, esto probablemente no sucede debido a que debajo de estos puntos se instaló una tubería y el terreno se encuentra compactado artificialmente.

La discontinuidad del oriente se localiza entre los puntos 26 y 27, de entre ellos, el punto 26 presentó un valor más alto de conductividad hidráulica debido probablemente a su proximidad a la fractura, la cual se observa inalterada y con una apertura aproximada de 15 cm, comprobable con la investigación hecha por Apaydin, (2010), que menciona que las fallas normales, las cuales se encuentran a tensión, tienden a permitir más el paso del agua. Por su parte el punto 27 resultó con una conductividad hidráulica considerablemente menor con respecto al punto 26, esto se podría deber a que el punto 27 se localiza dentro del bloque de piso de la falla, el cual tiende a no estar tan mecánicamente dañado a comparación del bloque de techo. Hacia el oriente del punto 27 los valores de conductividad hidráulica disminuyen, lo cual hasta cierto punto era esperado ya que esta zona no se encuentra alterada ni hay indicios de daño por la falla por lo menos en superficie, por lo que las propiedades de permeabilidad son similares a una roca sana (Chester y Logan, 1986; Caine *et al.*, 1996). Tenemos una excepción en el punto 31, el cual tiene un valor alto, que podría deberse a la presencia de un hormiguero o de raíces de un árbol cercano al punto.

6.2 Tomografía Eléctrica Resistiva

El perfil de tomografía eléctrica (Figura 12), muestra valores altos de resistividad en los primeros 5 metros a partir del inicio, llegando esta característica hasta una profundidad aproximada de 2 metros. Esta zona de alta resistividad se debe probablemente a que se ubica sobre caminos de terracería. También desde los 10 metros hasta los 37, se tienen valores relativamente altos de

resistividad, desde la superficie hasta una profundidad de 2 metros, esto podría deberse a que el suelo en esta zona se observa muy dañado por la actividad de la falla (oquedades y pequeñas grietas), lo cual dificulta el paso de la corriente eléctrica, ya que el aire tiene una alta resistividad (Howell, 1962). A los 30 metros desde el inicio se observa una anomalía en superficie con un valor alto de resistividad, el cual podría deberse a que en esta zona se ubica la falla, por lo tanto, el espacio vacío por la erosión hídrica superficial sería el causante de esa respuesta.

A lo largo de todo el perfil TER, por debajo de los dos metros se observaron valores bajos de resistividad, esto podría deberse a la presencia de humedad, la cual podría estar llegando a esa profundidad por medio de las discontinuidades como menciona Hernández-Marín *et al.*, (2017), a través del suelo dañado por las mismas, producto de la infiltración. Una prueba de esto se podría observar a los 10 metros del inicio, en donde se localiza una de las discontinuidades con valores bajos de resistividad.

6.3 Refracción sísmica

Utilizando la metodología aplicada por Luna-Villavicencio (2018), se creó una figura que ilustra tres zonas de importancia (Figura 44). La zona activa de falla, la cual es producto de la deformación del suelo; la zona de transición, donde la falla no se ha manifestado, pero es susceptible a deformaciones del suelo; y la zona inactiva, donde no existe riesgo de daño.

La figura muestra el perfil de refracción sísmica, con una zona activa de falla de aproximadamente 24 metros y una zona de transición de 39 metros aproximadamente (Figura 44).

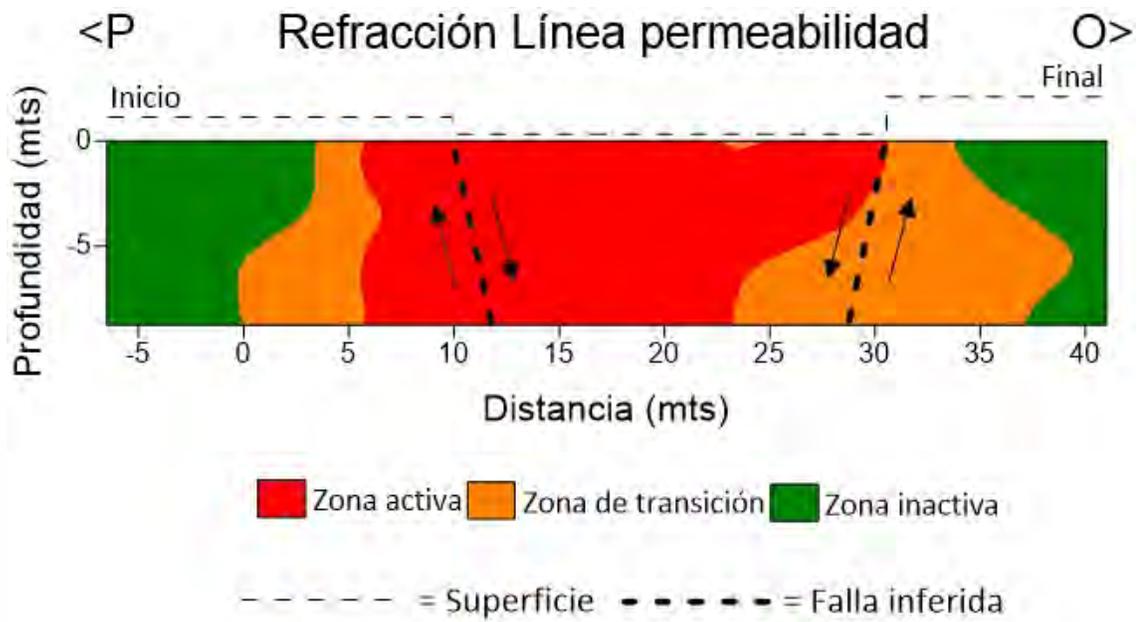


Figura 44. Perfil creado usando la metodología de Luna-Villavicencio (2018), donde se ilustra la zona activa de falla en color rojo, la zona de transición en color naranja y la zona sin falla en color verde.

6.4 Pruebas de permeabilidad y perfiles de resistividad eléctrica

6.4.1 Punto 1

Los perfiles de tomografía eléctrica resistiva muestran el recorrido del agua que se infiltró durante la prueba con el permeámetro, al comparar la medición de resistividad eléctrica en seco con la quinta medición realizada después del proceso de infiltración (Figura 45), se observa una disminución de la resistividad del suelo a lo largo del plano de falla, por lo que se supone que el agua en el primer metro migró hacia el plano de la falla y al llegar a éste, migró a través de dicho plano hasta llegar a una profundidad de 3 metros, esto debido a que en esta zona la falla se encuentra abierta, es decir con oquedad por la erosión hídrica, como lo menciona Hernández-Marín *et al.*, (2017)

Los perfiles muestran anomalías de bajas y altas resistividades eléctricas, las bajas podrían deberse a la presencia de humedad y las altas a la presencia de oquedades en el suelo ocasionadas por el movimiento de la falla.

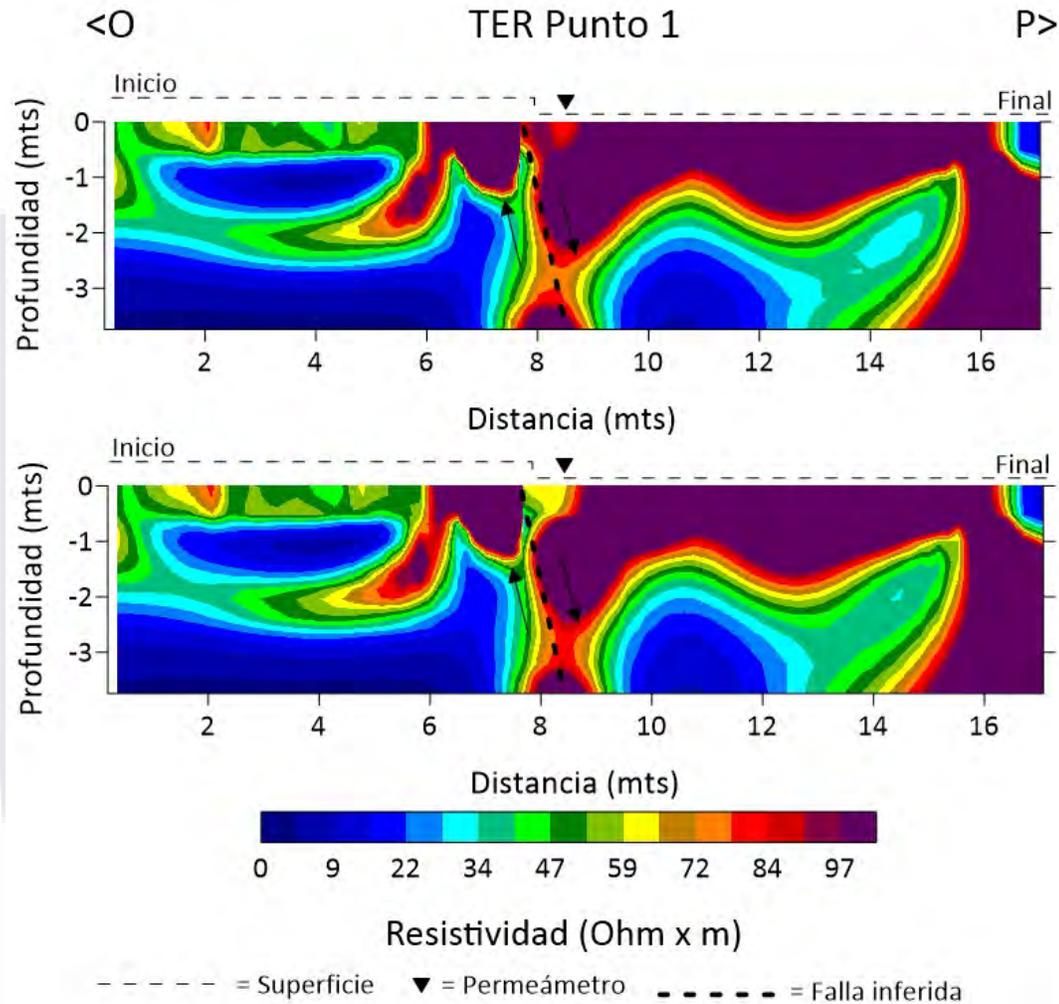


Figura 45. Comparación del primer perfil TER en "seco" (perfil superior) y el perfil TER después del cuarto proceso de infiltración a través del permeámetro (perfil inferior) para el Punto de estudio 1.

Para las pruebas de permeabilidad, la primera medición mostró un valor alto de Kfs con respecto a las posteriores, esto se podría deber a que el suelo no se encontraba saturado; para las otras tres mediciones encontramos valores muy cercanos entre sí pero menores en comparación con el primero, esto quiere decir que la tasa de infiltración se hizo constante una vez que se alcanzó

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

un alto grado de saturación, por lo que se asume que estos valores de conductividad hidráulica son teóricamente válidos (Elrick y Reynolds, 1986; Reynolds, 1993).

6.4.2 Punto 2

Para el punto se observó una disminución poco visible de la resistividad eléctrica del suelo en el primer metro de profundidad, esto se podría deber a que en esta zona la falla se estaba rellena de escombros de gran tamaño el cual podría no estar reteniendo el agua, por lo que se puede infiltrar con más facilidad dejando poco rastro de humedad en esta zona. A partir del metro de profundidad y hasta los 3 metros, se tiene una baja resistividad eléctrica, que se observa en el plano de falla, por lo que se podría suponer que el agua se transportó primero hacia la falla y después a través de esta, ya que a poca profundidad la zona de daño puede actuar como zona de mayor flujo de fluido como menciona Bense *et al.*, (2003).

Los perfiles muestran anomalías de altas resistividades eléctricas a lo largo de su superficie y hasta 1 metro de profundidad aproximadamente, esto podría deberse a que los primeros 7 metros están alterados por la existencia de caminos de terracerías que son transitados frecuentemente, ocasionando posiblemente una compactación artificial en la superficie. De los 7 a los 14 metros en superficie, las resistividades eléctricas altas podrían deberse a que el suelo está dañado por la falla, creando pequeñas oquedades. Mientras que las zonas de baja resistividad observadas a partir del primer metro de profundidad y hasta los 3 metros, se podrían deber a la presencia de humedad en el suelo mecánicamente dañado por la actividad de la falla (Figura 46).

que la tasa de infiltración se hizo constante, al igual que en la prueba del punto 1, por lo también se asume estos valores de conductividad hidráulica son teóricamente válidos.

6.4.3 Punto 3

Como resultados de las pruebas conjuntas para el punto tres se observa un pequeño descenso en la resistividad eléctrica del suelo en el primer metro de profundidad, por lo que se supone que el agua migró de la superficie hacia el plano de la falla y al llegar, se condujo a través de éste. Esto se podría deber a que en esta zona la falla está abierta, es decir con oquedad por la erosión hídrica por lo que el agua se infiltró rápidamente dejando poco rastro de humedad a esta profundidad. A partir del metro de profundidad y hasta los 3 metros, se observa una disminución de la resistividad eléctrica en el plano de falla, por lo que se podría suponer que el agua se transportó primero hacia la falla y después a través de esta, como fue el caso del estudio realizado por Hernandez-Marin *et al.*, (2017) en la falla Oriente del valle de Aguascalientes.

Los perfiles muestran anomalías de altas resistividades a lo largo de su superficie y hasta 1 metro de profundidad aproximadamente, los primeros 7 metros con esta alta resistividad se observan en el bloque de techo, los cuales se observan alterados por la actividad de la falla, ocasionando posiblemente oquedades. El tramo de perfil comprendido entre los 7 a los 14 metros se localiza en el bloque de piso de la falla, en esa zona las resistividades altas podrían deberse a que el suelo está mecánicamente dañado por la actividad falla o a un suelo sano. También se observan zonas de baja resistividad a partir del primer metro de profundidad y hasta los 3 metros, las cuales se podrían deber a la presencia de humedad en el suelo (Figura 47).

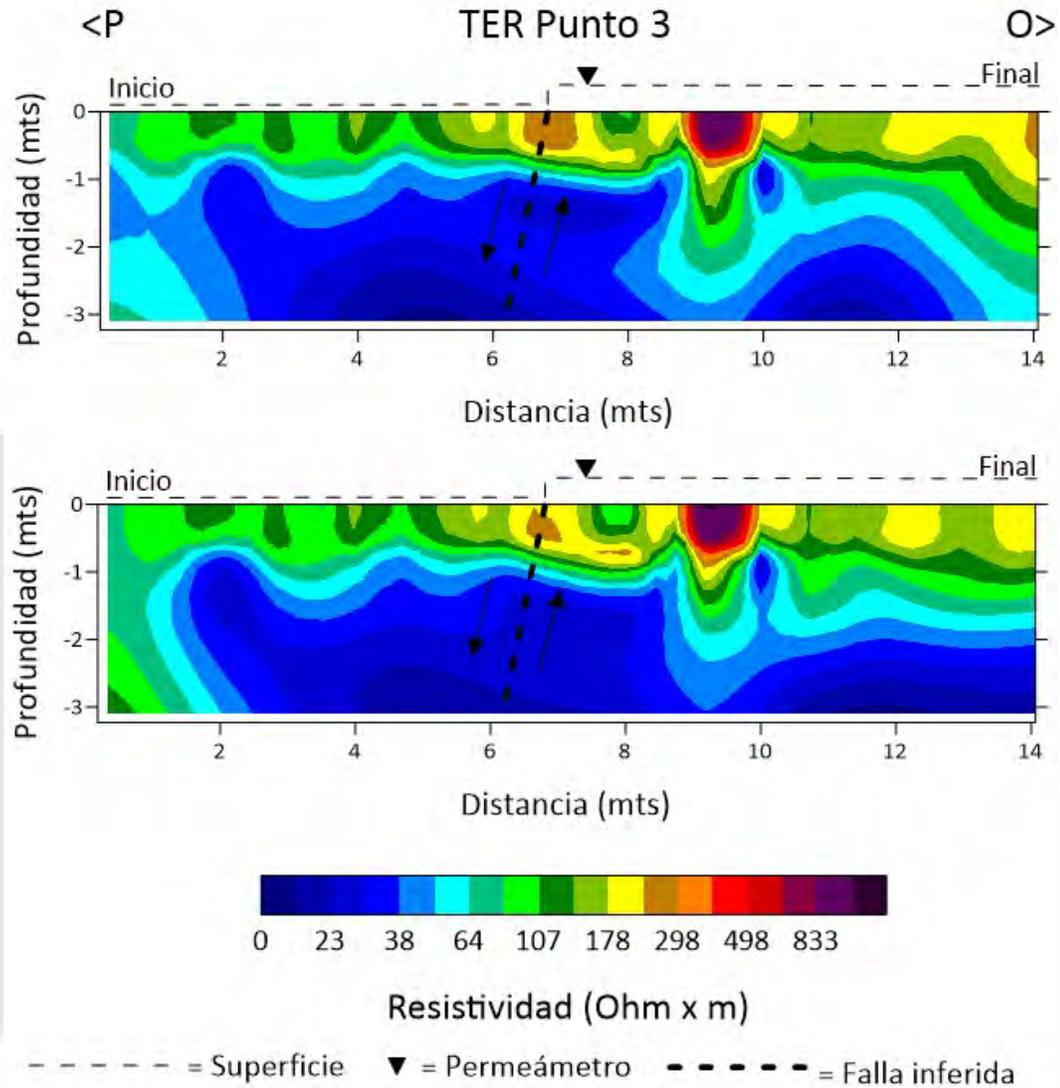


Figura 47. Comparación del primer perfil TER en "seco" (perfil superior) y el perfil TER después de la cuarta medición del permeámetro (perfil inferior), para el punto de estudio 3.

Al igual que en las pruebas de los puntos anteriores, la conductividad hidráulica empieza alta, pero se reduce debido a que el suelo alcanza una alta saturación.

6.4.4 Punto 4

Para el punto cuatro, al comparar la medición en seco con la quinta medición realizada, se observa una disminución de la resistividad eléctrica del suelo a lo largo del plano de falla y la zona adyacente, por lo que se podría suponer que el agua se transportó hacia el plano de falla y después a través de la discontinuidad.

Los perfiles muestran anomalías de altas resistividades eléctrica a lo largo de su superficie y hasta 1 metro de profundidad aproximadamente, los primeros 7 metros a partir del inicio del perfil se observan alterados por la existencia de caminos de terracerías que son transitados frecuentemente, ocasionando posiblemente una compactación artificial en la superficie. De los 7 a los 14 metros a partir del inicio del perfil, las resistividades altas podrían deberse a que el suelo está dañado por la falla, creando pequeñas oquedades. También tenemos una zona de baja resistividad de los 7 a los 14 metros, a partir del primer metro de profundidad y hasta los 3 metros, las cuales se podrían deber a la presencia de humedad presente en el suelo mecánicamente dañado por la falla (Figura 48).

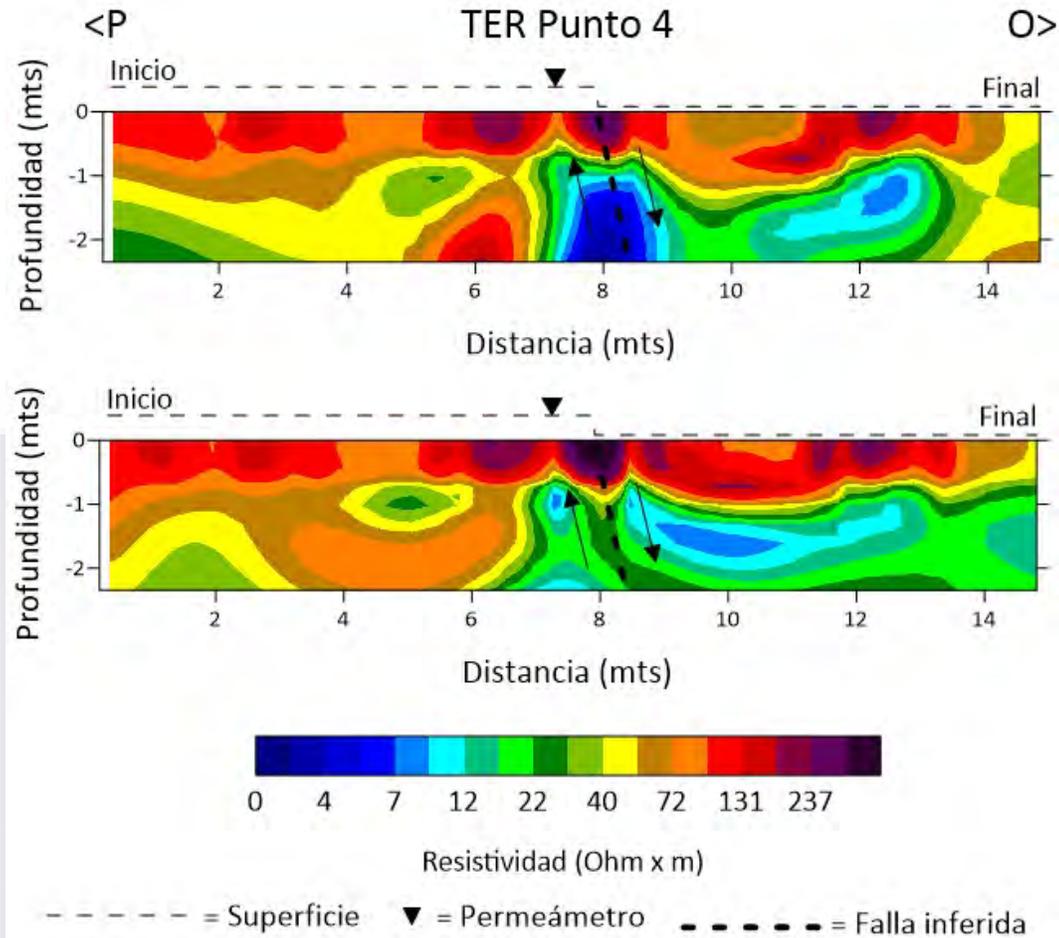


Figura 48. Comparación del primer perfil TER en "seco" (perfil superior) y el perfil TER después de la cuarta medición del permeámetro (perfil inferior), para el punto de estudio 4.

El comportamiento del parámetro de conductividad hidráulica es similar al de los casos anteriores, aunque en este caso, el efecto de la infiltración puntual en los cambios en los perfiles de resistividad eléctrica es más evidente después a profundidad después de los ~80 cm de profundidad, lo cual sugiere que el agua se infiltra por pequeños ductos y a partir de los 80 cm se esparce a profundidad.

La Figura 49 muestra una comparación de las pruebas de permeabilidad en cada punto de análisis, se observa que la conductividad hidráulica tiende a estabilizarse entre los 40 y 60 minutos, que corresponden a las mediciones 2 y 3.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Los puntos de análisis 1 y 3 se localizan al lado de la discontinuidad al oriente, la cual tiene un escarpe de 80 cm y una separación de 15 centímetros aproximadamente. Los valores de conductividad hidráulica en estos dos puntos son muy cercanos entre sí, con lo que se podría decir que el daño que produce una discontinuidad es muy parecido tanto para el bloque de piso, como para el de techo, sobre todo en los primeros metros cercanos a esta. Los puntos de análisis 2 y 4 se encuentran al lado de la discontinuidad poniente, la cual tiene un escarpe de 30 cm aproximadamente, la cual esta rellena de escombros (desechos de construcción). Por otro lado, para el punto 2, los valores de conductividad hidráulica en las primeras dos mediciones deben su alto valor a que cuando se realizó el estudio esta zona recientemente había sido alterada en su superficie, rellenando la discontinuidad con escombros y compactándolo; mientras que para el punto 4 los valores de conductividad hidráulica en las primeras dos mediciones deben su bajo valor a la compactación artificial de la superficie del terreno debido al paso de vehículos. En estos dos puntos, las últimas dos mediciones tienen valores casi idénticos entre sí, con lo que se podría decir que el suelo tiene propiedades hidráulicas dinámicas muy parecidas en cada lado de la discontinuidad.

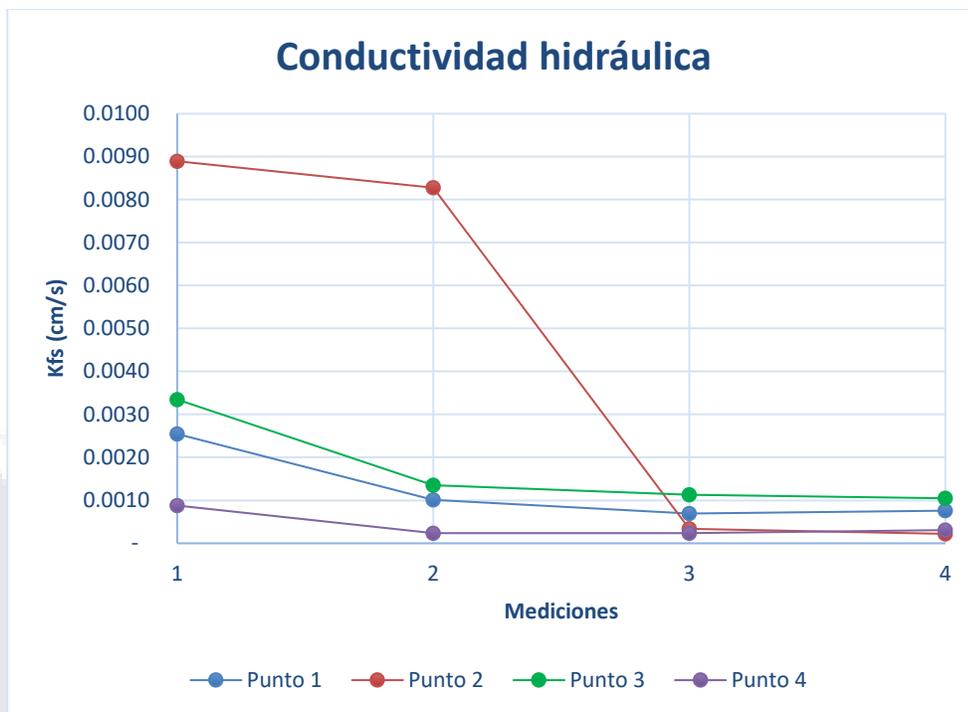
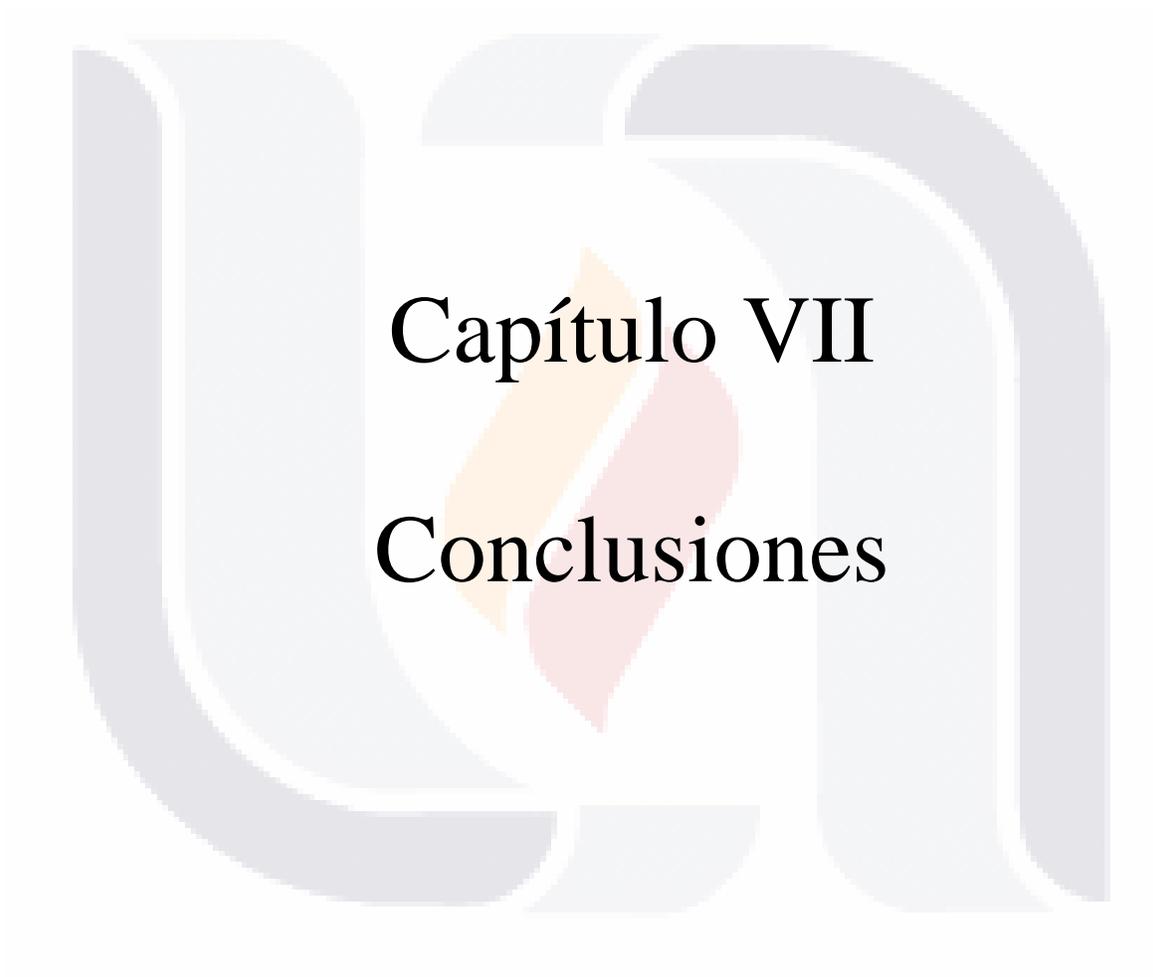


Figura 49. Comparación de la variación de la conductividad hidráulica en los cuatro puntos de estudio.



Capítulo VII
Conclusiones

7 CONCLUSIONES

A continuación, se muestran las conclusiones generales y particulares de esta investigación, así como los nichos de investigación.

7.1 Conclusión general

De acuerdo con los datos obtenidos de la exploración geofísica, se identificó la zona afectada por las discontinuidades. Mediante el perfil de refracción sísmica (Figura 14), se observó una zona de bajas velocidades de ondas sísmicas (<0.35 km/s) localizada entre las dos discontinuidades, la cual corresponde a la zona activa de falla o zona de daño. Asimismo, el perfil de tomografía eléctrica resistiva (Figura 12), mostró en esta misma zona valores altos de resistividad (> 90 ohm-metro), posiblemente debidos a la presencia de oquedades superficiales producto de la actividad mecánica de las discontinuidades. Por otra parte, en el perfil de conductividad hidráulica (Figura 10), la zona con mayor conductividad hidráulica ($8.45E-04$ a $1.06E-02$ cm/s), coincide con la zona de daño definida por la exploración geofísica. Por lo tanto, podemos concluir que en la zona afectada por las discontinuidades aumentó la capacidad de infiltración.

En cuanto al mapeo del agua infiltrada, se obtuvo que el agua migró de la zona de daño hacia el plano de falla, posiblemente a través de las oquedades y pequeñas fracturas ocasionadas por la actividad mecánica de las discontinuidades, por lo que podemos concluir que la zona de daño se podría estar comportando como una potencial zona de recarga de agua al subsuelo.

Cabe mencionar que la actividad humana dentro de la zona de estudio podría haber alterado los resultados, ya que se observó compactación artificial de la superficie en algunas zonas y relleno con escombros en las discontinuidades, lo cual podría haber reducido la capacidad de infiltración y también arrojado errores en la interpretación de los perfiles de geofísica. Por lo que se recomendarían más estudios en otras zonas de falla dentro del valle para comprobar la metodología aplicada.

7.2 Conclusiones particulares

A continuación, se enumeran las siguientes conclusiones particulares:

a) La exploración geofísica fue la base para detectar la zona de afectación de las discontinuidades y la geometría de estas; así como las características del suelo. Además, la interpretación de los perfiles permitió encontrar similitudes entre métodos geofísicos, obteniendo que la zona de bajas velocidades de ondas sísmicas coincide con la zona de altas resistividades eléctricas, las cuales se asocian a la zona de daño ocasionada por las discontinuidades superficiales.

b) En cuanto al método de medición de la conductividad hidráulica, la zona con mayor conductividad coincidió con la zona de daño obtenida con los métodos geofísicos, comprobando que los daños ocasionados por las discontinuidades aumentan la permeabilidad de la zona de daño. Además, para que la prueba de permeabilidad arroje valores de Kfs confiables se recomienda aplicarla por un tiempo mayor a los 40 minutos.

c) Las zonas más cercanas a las discontinuidades es donde se presentan los valores más altos de conductividad hidráulica, esto debido a que la distancia hacia la discontinuidad es menor que en los otros puntos de análisis, por lo que los resultados sugieren que la discontinuidad podría estar actuando como conducto para el flujo de agua hacia el subsuelo.

d) El mapeo del flujo del agua demostró que el agua principalmente tiende a fluir verticalmente y una vez que llega a la zona húmeda que se observa en los perfiles de resistividad eléctrica, esta tiende a desplazarse horizontalmente. Además, se observó que el agua tiende a migrar hacia el plano de falla. Por lo que se podría concluir que la zona de daño está actuando como un canal de recarga para el acuífero.

e) Los métodos eléctricos son muy eficientes para mapear el flujo de un líquido en un suelo.

7.3 Nichos de investigación

Los siguientes puntos podrían considerarse como nichos de investigación para validar, reforzar o continuar con la temática de estudio del comportamiento hidráulico de las fallas activas en valles sedimentarios como el de Aguascalientes.

- Realizar esta metodología en diferentes discontinuidades superficiales dentro del valle de Aguascalientes, para de esta forma darle más validez.
- Realizar una modelación con los datos obtenidos de las pruebas geofísicas y de permeabilidad para ver si existe un comportamiento parecido.
- Realizar pruebas de permeabilidad con los tiempos de aplicación recomendados a lo ancho de una discontinuidad para obtener valores más confiables.



Capítulo VIII

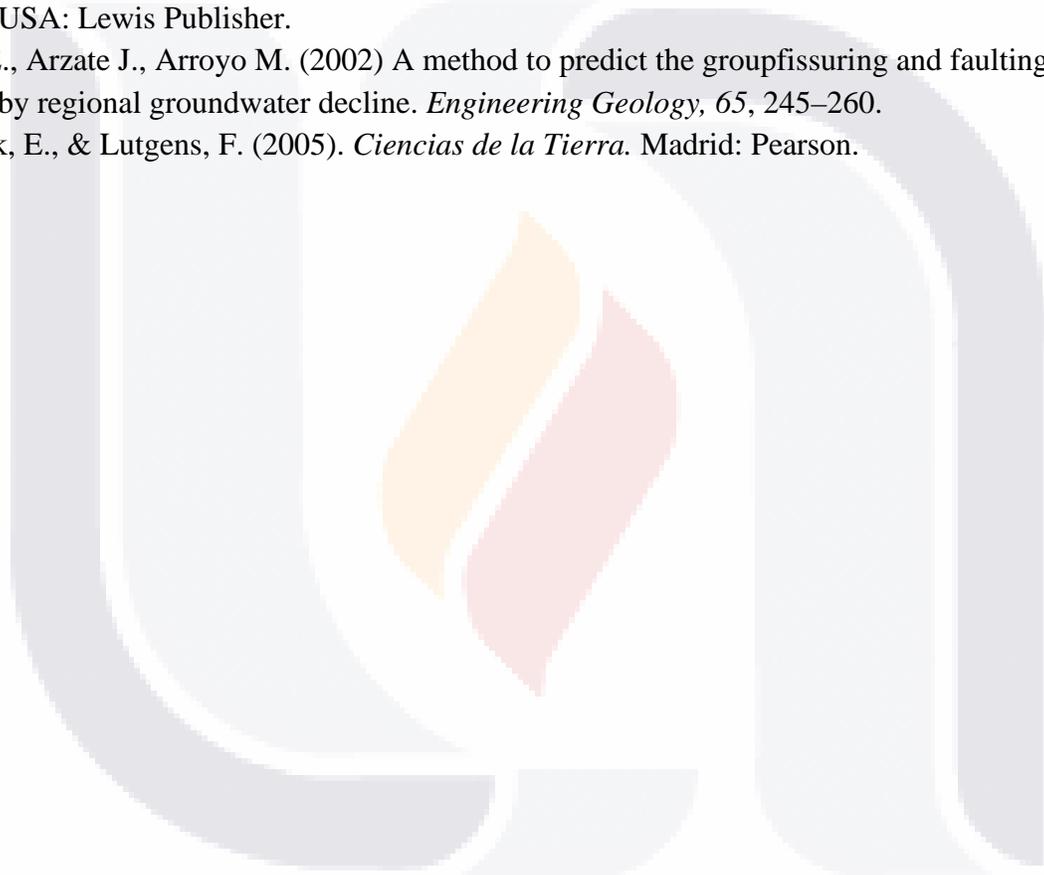
Referencias

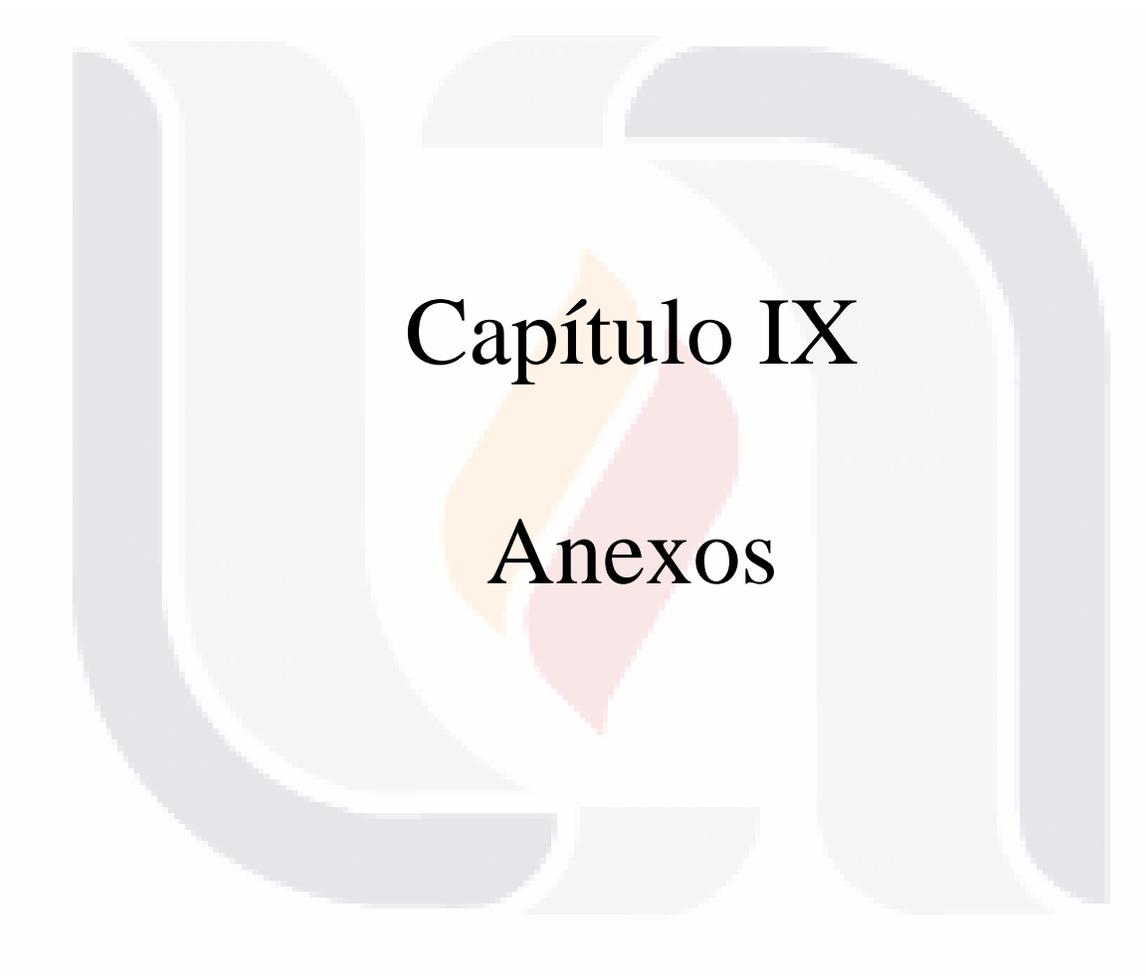
8 REFERENCIAS

- Apaydin, A. (2010). Relation of tectonic structure to groundwater flow in the Beypazari region, NW Anatolia, Turkey. *Hydrogeology Journal*, 18(6), 1343-1356. Obtenido de <http://link.springer.com/10.1007/s10040-010-0605-1>
- Aranda-Gómez, J. J. (1989). Geología Preliminar del Graben de Aguascalientes. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 8(1), 22-31.
- Bense, V., & Person, M. (2006). Faults as conduit-barrier systems to fluid flow in siliciclastic sedimentary aquifers. *Water Resources Research*, 42(5), 1-18. Obtenido de <http://doi.wiley.com/10.1029/2005WR004480>
- Bense, V., Van den Berg, E., & Van Balen, R. (2003). Deformation mechanisms and hydraulic properties of fault zones in unconsolidated sediments; the Roer Valley Rift System, The Netherlands. *Hydrogeology Journal*, 11(3), 319-332. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/226966914_Deformation_mechanisms_and_hydraulic_properties_of_fault_zones_in_unconsolidated_sediments_the_Roer_Valley_Rift_System_The_Netherlands
- Burbey, T. J. (2002). The influence of faults in basin-fill deposits on land subsidence, Las Vegas Valley, Nevada, USA. *Hydrogeology Journal*, 10, 525-538.
- Caine, J., Evans, J., & Forster, C. (1996). Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24(11), 1025-1028. Obtenido de <https://pubs.geoscienceworld.org/geology/article/24/11/1025-1028/187969>
- Cello, G., Tondi, E., Micarelli, L., & Invernizzi, C. (2001). Fault zone fabrics and geofluid properties as indicators of rock deformation modes. *Journal of Geodynamics*, 32(4), 543-565. Obtenido de <https://www-sciencedirect-com.dibpxy.uaa.mx/science/article/pii/S0264370701000473>
- Chester, F. M., & Logan, J. M. (1986). Composite planar fabric of gouge from the Punchbowl fault, California. *Journal of Structural Geology*, 9, 621-634.
- Del Toro, F., & Kretzschmar, T. (2013). Recarga vertical de acuíferos en zonas semiáridas. *Reunión Anual Unión Geofísica Mexicana A.C.* 33, pág. 60. Puerto Vallarta, Jalisco, México: GEOS. Obtenido de <https://www.ugm.org.mx/publicaciones/geos/pdf/geos13-1/geos33-1.pdf>
- Elrick, D., & Reynolds, W. (1986). An analysis of the percolation test based on three-dimensional saturated-unsaturated flow from a cylindrical test hole. *Soil Science*. doi:142:308-321
- Galloway, D. L., & Burbey, T. J. (2011). Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19, 1459-1486.
- Galloway, D., Jones, D. R., & Ingebritsen, S. E. (1999). *Land subsidence in The United States*. US Geological Survey.
- Groves, P., Cascante, G., Dundas, D., & Chatterji, P. (2011). Use of geophysical methods for soil profile evaluation. *Canadian Geotechnical Journal*, 48, 1-14.

- Herath, S., & Musiake, K. (1987). Analysis of infiltration facility performance based on in-situ permeability test. *Proc. 4th International Conference on Urban Storm Drainage*. Lausanne.
- Hernández-Guerra, S. (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*. (Tesis de maestría inédita): Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes.
- Hernández-Marín, M. (2009). *Numerical evaluation and analysis of the occurrence of earth fissures in faulted sedimentary basins*. Blacksburg, Virginia, USA.: Virginia Polytechnic Institute and State.
- Hernández-Marín, M., Frías-Guzmán, D., Hernández-Guerra, S., & Pacheco-Martínez, J. (2017). Aportes al entendimiento de la influencia de las discontinuidades superficiales en el proceso de recarga acuífera valle de aguascalientes. *Reunión Anual Unión Geofísica Mexicana A.C.* 37, pág. 56. Puerto Vallarta, Jalisco, México.: GEOS. Obtenido de <https://www.raugm.org.mx/2017/doc/geos37-1.pdf>
- Hernández-Marín, M., González-Cervantes, N., Pacheco-Martínez, J., Frías-Guzmán DH. (2015). Discussion on the origin of surface failures in the Valley of Aguascalientes, México. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences.*, 372(235-238).
- Hernandez-Marin, M., Pacheco-Martínez, J., Burbey, T., Carreón-Freyre, D., Ochoa-González, G., Campos-Moreno, G., & Lira-Gómez, P. (2017). Evaluation of subsurface infiltration and displacement in a subsidence-reactivated normal fault in the Aguascalientes Valley, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 76(812), 1-12. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-017-7163-y>
- Howell, B. F. (1962). *Introducción a la Geofísica*. Omega.
- Instituto Mexicano del Transporte. (2003). *Geofísica Aplicada en los Proyectos Básicos de Ingeniería Civil*.
- Lavergne, M. (1989). *Seismic methods*. Editions OPHRYS.
- Lee C.F., Zhang J.M., Zhang Y.X. (1996) Evolution and origin of the ground fissures in Xian, China. *Engineering Geology*, 43, 45–55.
- Luna Villavicencio, H. (2018). *Estudio de susceptibilidad de fracturamiento y fallamiento del terreno debido a subsidencia y reactivación de paleocauces en el municipio de Jesús María, Aguascalientes*. Aguascalientes: Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- Luna-Sáez, D., Sánchez-Reyes, C., & Muñoz-Pardo, J. (2005). Métodos para medir la conductividad hidráulica saturada de campo. *Ingeniería hidráulica en México*, 20(2), 95-107.
- Martínez Alfaro, P. E., Martínez Santos, P., & Castaño Castaño, S. (2006). *Fundamentos de Hidrogeología*. Madrid, Barcelona, México: Ediciones Mundi-Prensa.
- McNeill, J. D. (1980). Electrical Conductivity of Soils and Rocks. *Geonics Limited*, 1-21.

- Nieto-Samaniego, A. F., Alaniz-Álvarez, S. A., & Labarthe-Hernández, G. (1997). La deformación cenozoica poslaramídica en la parte meridional de la Mesa Central, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 14(1), 13-25.
- Pacheco-Martínez, J., Hernández-Marín, M., Burbey, T., González-Cervantes, N., Ortíz-Lozano, J., Zermeño-De-León, M., & Solís-Pinto, A. (2013). Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México. *Engineering Geology*, 164, 172-186. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795213002147>
- Reynolds, W. (1993). Saturated hydraulic conductivity: field measurement. En C. S. Science, & M. Carter (Ed.), *Soil Sampling and Methods of Analysis* (págs. 599-613). Boca Ratón, USA: Lewis Publisher.
- Rojas E., Arzate J., Arroyo M. (2002) A method to predict the groupfissuring and faulting caused by regional groundwater decline. *Engineering Geology*, 65, 245–260.
- Tarbutck, E., & Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la Tierra*. Madrid: Pearson.





9 ANEXOS

Anexo A. Tabla de datos obtenidos de las pruebas de permeabilidad, utilizando un factor de forma $C = 2.1$ para todos los puntos de medición.

Punto	Tasa de infiltración (cm/min)	Q (cm³/min)	Kfs (cm/s)
1	0.70	55.86	5.91E-04
2	0.60	47.88	5.07E-04
3	1.50	119.70	1.27E-03
4	0.90	71.82	7.60E-04
5	1.00	79.80	8.45E-04
6	0.60	47.88	5.07E-04
7	0.40	31.92	3.38E-04
8	1.00	79.80	8.45E-04
9	0.40	31.92	3.38E-04
10	0.60	47.88	5.07E-04
11	0.80	63.84	6.76E-04
12	0.10	7.98	8.45E-05
13	0.60	47.88	5.07E-04
14	1.00	79.80	8.45E-04
15	2.00	159.60	1.69E-03
16	2.20	175.56	1.86E-03
17	1.50	119.70	1.27E-03
18	2.00	159.60	1.69E-03
19	2.50	199.50	2.11E-03
20	4.20	335.17	3.55E-03
21	6.50	518.71	5.49E-03
22	6.50	518.71	5.49E-03
23	4.00	319.21	3.38E-03
24	1.50	119.70	1.27E-03
25	12.50	997.52	1.06E-02
26	11.50	917.72	9.72E-03
27	3.00	239.40	2.53E-03
28	3.50	279.31	2.96E-03
29	1.50	119.70	1.27E-03
30	2.00	159.60	1.69E-03
31	9.50	758.12	8.03E-03
32	1.05	83.79	8.87E-04
33	0.75	59.85	6.34E-04

Anexo B. Tabla de resultados obtenidos de las pruebas de permeabilidad para el punto 1, utilizando un factor de forma $C = 2.1$ para todos los puntos de medición.

Medición	Tasa de infiltración (cm/min)	Q (cm ³ /min)	Kfs (cm/s)	Observaciones
SECO	-	-	-	
1	3.01	240.37	0.0025	Disminución de la resistividad eléctrica en los primeros 50 cm de profundidad bajo el permeámetro.
2	1.20	95.76	0.0010	Disminución de la resistividad eléctrica en los primeros 60 cm de profundidad bajo el permeámetro, el agua parece migrar hacia la falla.
3	0.82	65.44	0.0007	Disminución de la resistividad eléctrica en los primeros 70 cm de profundidad bajo el permeámetro, el agua parece migrar hacia la falla.
4	0.90	63.84	0.0008	Disminución de la resistividad eléctrica en el primer metro de profundidad bajo el permeámetro, el agua parece migrar hacia la falla.

Anexo C. Tabla de resultados obtenidos de las pruebas de permeabilidad para el punto 2, utilizando un factor de forma $C = 2.1$ para todos los puntos de medición.

Medición	Tasa de infiltración (cm/min)	Q (cm ³ /min)	Kfs (cm/s)	Observaciones
1	-	-	-	
2	10.53	840.02	0.0089	Disminución de la resistividad eléctrica en los primeros 2 metros de profundidad bajo el permeámetro.
3	9.80	782.06	0.0083	Disminución de la resistividad eléctrica a partir del primer metro de profundidad, de los 5 a los 8 metros del inicio del perfil, parece que el agua fluye de manera horizontal.
4	0.40	31.92	0.0003	Continúa la tendencia a disminuir de la resistividad eléctrica en la zona comprendida entre los 5 y 8 metros desde el inicio, a partir del metro de profundidad.
5	0.26	63.84	0.0002	Continúa la tendencia a disminuir de la resistividad eléctrica en la zona comprendida entre los 5 y 8 metros desde el inicio, a partir del metro de profundidad.

Anexo D. Tabla de resultados obtenidos de las pruebas de permeabilidad para el punto 3, utilizando un factor de forma $C = 2.1$ para todos los puntos de medición.

Medición	Tasa de infiltración (cm/min)	Q (cm ³ /min)	Kfs (cm/s)	Observaciones
1	-	-	-	
2	3.96	316.15	0.0033	Disminución de la resistividad eléctrica en los primeros 50 cm de profundidad bajo el permeámetro.
3	1.60	127.68	0.0014	Disminución de la resistividad eléctrica en los primeros 60 cm de profundidad bajo el permeámetro, el agua parece migrar hacia la falla.
4	1.34	106.93	0.0011	Disminución de la resistividad eléctrica en los primeros 80 cm de profundidad bajo el permeámetro, el agua parece migrar hacia la falla.
5	1.24	63.84	0.0010	Disminución de la resistividad eléctrica en el primer metro de profundidad bajo el permeámetro, el agua parece migrar hacia la falla.

Anexo E. Tabla de resultados obtenidos de las pruebas de permeabilidad para el punto 4, utilizando un factor de forma $C = 2.1$ para todos los puntos de medición.

Medición	Tasa de infiltración (cm/min)	Q (cm ³ /min)	Kfs (cm/s)	Observaciones
1	-	-	-	
2	1.04	82.99	0.0009	Se observa una disminución de la resistividad eléctrica del suelo abajo del permeámetro y el suelo aledaño a una profundidad de 1 metro.
3	0.28	22.34	0.0002	Continúa la disminución de la resistividad eléctrica en las zonas mencionadas anteriormente, y se extiende a profundidad y horizontalmente.
4	0.28	22.34	0.0002	El comportamiento del agua infiltrada se mantiene igual que la medición anterior, disminuyendo aún más la resistividad de las zonas mencionadas.

5	0.36	63.84	0.0003	El comportamiento del agua se comportó de la misma manera, se observa que principalmente fluyó por la falla.
---	------	-------	--------	--

