



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

TESIS

Proceso de agrietamientos superficiales debido a pérdida de sustentación hidráulica en el valle de Matatipac, Nayarit México

PRESENTA

William Herbe Herrera León

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

TUTOR

Dr. Jesús Pacheco Martínez

COMITÉ TUTORAL

Dr. María de la Luz Pérez Rea

Dr. Gerardo Araiza Garygordobil

Dr. Martín Hernández Marín

Dr. Sergio Ignacio Martínez Martínez

Aguascalientes, Ags., a 20 de Octubre del 2018



Centro de Ciencias
del Diseño y de
la Construcción

Oficio: CCDC-D-518-2018
Asunto: Carta de Aprobación para
continuar con los Trámites

DRA. EN ADMÓN. MARÍA DEL CARMEN MARTÍNEZ SERNA
DIRECTORA GENERAL DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
PRESENTE

Estimada Dra. Martínez

Por medio de este conducto informo que el documento final de Tesis/Trabajo Práctico Titulado:
**PROCESO DE AGRIETAMIENTOS SUPERFICIALES DEBIDO A PÉRDIDA DE
SUSTENTACIÓN HIDRÁULICA EN EL VALLE DE MATATIPAC, NAYARIT, MÉXICO,**
presentado por el sustentante **WILLIAM HERBE HERRERA LEÓN** con ID 200064 egresado
del **DOCTORADO EN CIENCIAS DE LOS ÁMBITOS ANTRÓPICOS**, cumple las normas
y lineamientos establecidos institucionalmente para presentar el examen de grado.

Sin más por el momento aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"SE LUMEN PROFERRE"

Aguascalientes, Ags., 23 de noviembre de 2018

M. en Fil. Omar Vázquez Gloria
Decano del Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción

- c.c.p.- Mtro. William Herbe Herrera León- Estudiante del Doctorado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos
 - c.c.p.- Dr. Ricardo Arturo López León- Secretario Técnico del Doctorado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos
 - c.c.p.- Mtra. Imelda Jiménez García- Jefa del Departamento de Control Escolar
 - c.c.p.- Archivo
- OVG/cxr.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

Asunto: Voto aprobatorio impresión
Tesis de William Herbe Herrera León.

DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS
DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
M. EN FIL. OMAR VAZQUEZ GLORIA
PRESENTE

Por medio del presente como tutor designado del estudiante **WILLIAM HERBE HERRERA LEÓN** con ID 200064 quien realizó la tesis titulada: **PROCESO DE AGRIETAMIENTOS SUPERFICIALES DEBIDO A PÉRDIDA DE SUSTENTACIÓN HIDRÁULICA EN EL VALLE DE MATATIPAC, NAYARIT MÉXICO.** y con fundamento en el artículo 175, apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

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

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 16 de Noviembre de 2018


Dr. Jesús Pacheco Martínez
Tutor de tesis


V.o.B.o.

Dr. Sergio Ignacio Martínez Martínez.
Cotutor


V.o.B.o.

Dr. Martín Hernández Marín
Cotutor



WESSEX INSTITUTE



It is certified that paper "Land subsidence and its effects on the Urban area of Tepic City, México" by Professor William Herbe Herrera León, Jesús Pacheco Martínez, Martín Hernández Marín, Raudel Padilla Cenicerros & María de la Luz Perez Rea has been presented at the conference

Urban Growth 2018

1st International Conference on on Urban Growth and the Circular Economy

Held from 8 – 10 May 2018, Alicante, Spain

Priscilla Cook
Conference Coordinator
June 2018



AGRADECIMIENTOS

A mi amigo y tutor Jesús Pacheco Martínez por contar con su apoyo incondicional para la realización de esta tesis, así como también para sucesos más y menos triviales.

Al Dr. Martín Hernández por su puntual y certero análisis de este trabajo.

Al Dr. Sergio Martínez que sin duda sus comentarios y observaciones mejoraron este escrito.

A la Universidad Autónoma de Aguascalientes y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada.

Al Tecnológico Nacional de México por las facilidades prestadas y por darme la oportunidad de desarrollarme profesional y académicamente.

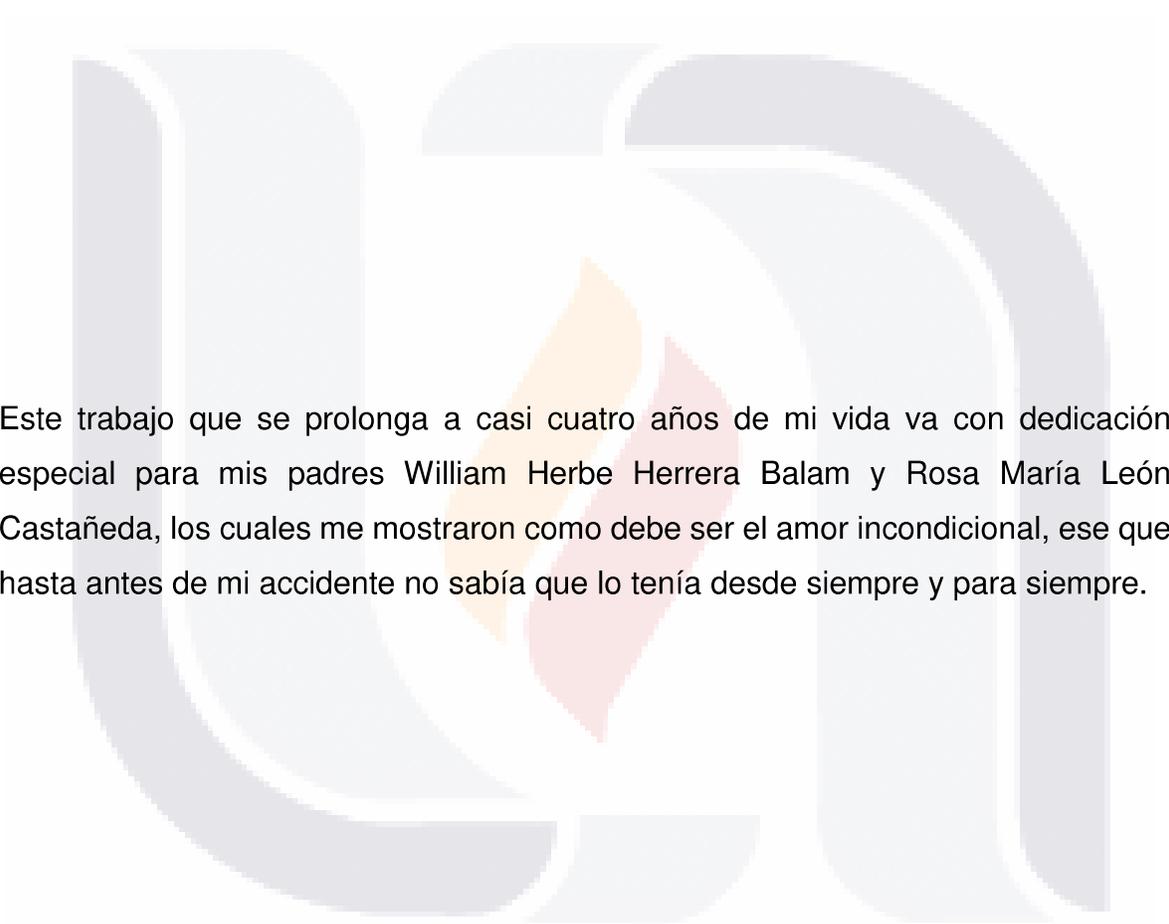
A mis amigos de Aguascalientes Raudel, Laura, Ivan, Zurita, Fernando, Hugo, Alejandro, Beto, Memo sin duda me fueron de mucha ayuda.

A mis Amigos de Tepic, Lobo, Tamara, Christian, Gomy, Pepe, Oso, Limón, Landín, Tavo, Almanza, Treviño, Pedrito, Chespi, Gallo, Melisa, Atahualpa, Victor Torres.

A mis Hermanas y sus hijos, Liliana, Sayil, Victor, Regina, Paola, Nicté, Canek, sin faltar los primos, que son muchos.

Mención especial a Ruby que sin proponértelo me hiciste ser una persona más fuerte, más completa, más feliz de eso se trata la vida.

DEDICATORIA



Este trabajo que se prolonga a casi cuatro años de mi vida va con dedicación especial para mis padres William Herbe Herrera Balam y Rosa María León Castañeda, los cuales me mostraron como debe ser el amor incondicional, ese que hasta antes de mi accidente no sabía que lo tenía desde siempre y para siempre.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS	11
ÍNDICE DE FÓRMULAS	15
RESUMEN.	17
ABSTRACT.	19
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	23
1.1. Introducción.....	23
1.2. Problemática y justificación.....	29
1.3. Hipótesis.....	29
1.4. Objetivo.	30
1.5. Estructura de la tesis.....	30
CAPITULO 2. ESTADO GENERAL DEL CONOCIMIENTO.	35
2.1. Introducción.....	35
2.2. Marco teórico.....	35
2.2.1. Descripción de casos históricos de subsidencia a nivel mundial.	35
2.2.2. Descripción de casos históricos en México.....	36
2.2.3. Proceso de generación de agrietamientos.....	37
2.2.4. Modelos existentes para el estudio de la subsidencia.....	39
2.2.4.1. Modelos empíricos.....	39
2.2.4.2 Modelos Semiteóricos.	39
2.2.4.3. Modelos Teóricos.	39
2.2.4.4 Modelos a escala.	41
2.2.4.5 Modelos analógicos.....	41
2.2.4.6 Interferometría.....	42
CAPITULO 3. GEOLOGÍA Y GEOHIDROLOGÍA DEL VALLE DE MATATIPAC. .	47
3.1. Geología Regional.....	47
3.2. Marco geológico regional.	47
3.3. Graben Tepic – Zacoalco.	48

3.4. Geología del local.....	49
3.5. Acuífero del valle de Matatipac.	54
3.5.1. Mediciones geofísicas.	56
3.5.2. Rellenos del cuaternario.....	60
3.5.3. Características físicas del relleno pumicitico.....	63
3.5.4. Resumen de resultados de pruebas de laboratorio.....	65
CAPITULO 4. SUBSIDENCIA Y DAÑOS RELACIONADOS CON LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO EN EL VALLE DE MATATIPAC.	69
4. 1. Introducción.....	69
4.2. Subsistencia en el valle de Matatipac.	69
4.3. Problemas asociados a subsidencia.	72
4.4. Interferogramas 2014 a 2018	75
4.5. Conclusiones y discusión de resultados.....	78
CAPITULO 5. MODELO ANALÓGICO.....	83
5.1. Introducción.....	83
5.2. Desarrollo de un prototipo.	84
5.2.1 Materiales del prototipo.....	84
5.3.1. Características del modelo.....	88
5.3.2 Características mecánicas de los materiales a utilizar.....	89
5.3.2.1. Prueba de corte directo consolidado drenado.	89
Figura 38. Esfuerzo normal vs esfuerzo cortante.	90
5.3.2.2. Prueba Triaxial consolidada drenada.	91
5.3.2.3. Pruebas a la tensión directa.	92
5.4. Preparación de la prueba	93
5.5. Resultados modelo analógico	94
5.5.1. Ensaye No 1.....	94
5.5.2. Ensaye No 2.....	95
5.5.3. Ensaye No 3.....	98
5.6. Conclusiones y discusión de resultados.....	100
CAPITULO 6. PROCESO DE FRACTURAMIENTO DEL SUELO.	103

6.1. Etapa 1. Sustentación hidráulica.....	104
6.2. Etapa 2. Pérdida de sustentación hidráulica.	104
6.3. Cálculo de la deformación vertical.....	105
6.4. Deformación horizontal.....	108
6.4. Comportamiento mecánico del relleno deformable	115
6.4.1. Zona I.....	115
6.4.2. Zona II.....	116
6.4.3. Zona III.....	116
6.5. Detección de asentamientos y fracturamientos incipientes en el valle de Matatipac y en general.	118
CAPITULO 7. CONCLUSIONES.....	123
CAPITULO 8. PERSPECTIVAS.....	129
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	131
ANEXO A GRANULOMETRIA MATERIALES PUMICITICOS	135
ANEXO B. LÍMITES DE CONSISTENCIA.....	145
ANEXO C. PRUEBA DE ABSORCIÓN.....	153
ANEXO D. FOTOGRAFÍAS.....	157

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. MAPA DE LA LOCALIZACIÓN DEL VALLE DE MATATIPAC..... 27

FIGURA 2 DELIMITACIÓN DEL VALLE DE MATATIPAC CON FINES ADMINISTRATIVOS. 28

FIGURA 3. MODELO GEOMÉTRICO BÁSICO PARA UN SISTEMA DE INTERFEROMETRÍA SAR.
..... 43

FIGURA 4. FAJA VOLCÁNICA TRANSMEXICANA. 48

FIGURA 5. BLOQUE JALISCO. 49

FIGURA 6. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DEL VALLE DE MATATIPAC. 51

FIGURA 7. MAPA GEOLÓGICO MODIFICADO DE (SGM, 1988)..... 51

FIGURA 8. ABATIMIENTOS DEL NIVEL ESTÁTICO DE 1985 A 2003 EN METROS 56

FIGURA 9. LOCALIZACIÓN DE PERFILES SEV'S 57

FIGURA 10. PERFIL FERROCARRIL. 58

FIGURA 11. PERFIL LIBRAMIENTO 58

FIGURA 12. PERFIL SAN CAYETANO 59

FIGURA 13. SEDIMENTOS ALUVIALES DE ACARREO..... 61

FIGURA 14. CORTES DE BANCO DE MATERIALES EN EL VOLCÁN SAN JUAN. 62

FIGURA 15. CORTES DE BANCO DE MATERIALES EN EL VOLCÁN SAN JUAN. 62

FIGURA 16. CORTES DE BANCO DE MATERIALES EN EL VOLCÁN SAN JUAN. 63

FIGURA 17. MAPA DE LOCALIZACIÓN DE MUESTREOS. 64

FIGURA 18. MAPA DE VELOCIDAD Y NIVEL FREÁTICO EN EL AÑO 2002 MODIFICADO DE
(CHAUSSARD ET AL., 2014) 70

FIGURA 19. DESPLAZAMIENTO VERTICAL POR AÑO EN 3 PUNTOS, MODIFICADO DE
(CHAUSSARD ET AL., 2014). 71

FIGURA 20. DAÑOS EN INFRAESTRUCTURA EN LA CIUDAD DE TEPIC..... 72

FIGURA 21. FRACTURA EN ESTACIONAMIENTO DE TRÁNSITO Y VIALIDAD DEL ESTADO DE
NAYARIT VISTA HACIA EL OESTE..... 73

FIGURA 22. FRACTURA EN ESTACIONAMIENTO DE TRÁNSITO Y VIALIDAD DEL ESTADO DE
NAYARIT VISTA HACIA EL ESTE..... 73

FIGURA 23. POSIBLE TRAZA DE LA FRACTURA..... 74

FIGURA 24. COMPARACIÓN ENTRE HUNDIMIENTOS Y ABATIMIENTOS DE NIVEL FREÁTICOS..... 75

FIGURA 25. PAR INTERFEROMETRICO 2014/10/21 - 2015/08/17. 76

FIGURA 26. PAR INTERFEROMETRICO 2015/08/17 - 2016/06/12. 77

FIGURA 27. PAR INTERFEROMETRICO 2016/06/12, 2016/06/12. 77

FIGURA 28. PAR INTERFEROMETRICO 2017/08/30 - 2018/04/15. 78

FIGURA 29. COLOCACIÓN DE GRENETINA COLOR ROJO COMO BASE 85

FIGURA 30. PAPEL BOND COMO INTERFACE Y CUBO DE CONCRETO COMO BASAMENTO.
..... 86

FIGURA 31. LLENADO DE PROTOTIPO CON ARENA SÍLICE 86

FIGURA 32. MODELO YA COMPLETO PARA COMENZAR LA PRUEBA. 86

FIGURA 33. MODELO SOMETIDO A TEMPERATURA AMBIENTE. 87

FIGURA 34. GRENETINA DRENÁNDOSE POR LA PARTE INFERIOR..... 87

FIGURA 35. MODELO DE ACRÍLICO CON DRENAJE EN LA PARTE INFERIOR..... 88

FIGURA 36. GEOMETRÍAS UTILIZADAS PARA SIMULAR BASAMENTO ROCOSO
INDEFORMABLE..... 89

FIGURA 37. GRÁFICAS DE ESFUERZO VS DEFORMACIÓN DE LAS PRUEBAS DE CORTE
DIRECTO. 90

FIGURA 38. ESFUERZO NORMAL VS ESFUERZO CORTANTE. 90

FIGURA 39. GRÁFICA DE ESFUERZO DEFORMACIÓN EN ENSAYO TRIAXIAL CONSOLIDADO-
DRENADO. 91

FIGURA 40. CÍRCULOS DE MORH PARA ESFUERZOS.....	92
FIGURA 41. COLOCACIÓN DE PAPEL FILTRO EN DRENAJES.....	93
FIGURA 42. A) VISTA DEL MODELO, FOTO TOMADA HACIA LADO IZQUIERDO, PENDIENTE DE BASAMENTO ROCOSO DE 90° B) FOTO TOMADA HACIA EL LADO DERECHO, PENDIENTE DE BASAMENTO ROCOSO 60°	94
FIGURA 43. MOVIMIENTO DE LOS BLOQUES CON RESPECTO A LAS FALLAS.	95
FIGURA 44. CONFIGURACIÓN DEL ENSAYE NO 2. FOTOS EN CORTE	96
FIGURA 45. FORMACIÓN DE AGRIETAMIENTOS EN ENSAYO NO 2. FOTO EN PLANTA.....	97
FIGURA 46. AGRIETAMIENTOS EN LA CAPA SUPERIOR.	97
FIGURA 47. AGRITAMIENTOS EN LA CAPA SUPERIOR.....	98
FIGURA 48. CONFORMACIÓN DEL ENSAYE NO 3.	99
FIGURA 49. FALLA POR TENSIÓN EN ENSAYE NO 3	100
FIGURA 50. UN SISTEMA EN EQUILIBRIO, EN DONDE NO EXISTEN DEFORMACIONES O PROCESOS EN CURSO QUE ROMPAN EL EQUILIBRIO DEL ACUÍFERO.	104
FIGURA 51. DEFORMACIÓN DEL RELLENO ALUVIAL POR PÉRDIDA DE SUSTENTACIÓN HIDRÁULICA.	105
FIGURA 52. HUNDIMIENTOS VERTICALES.....	107
FIGURA 53. REPRESENTACIÓN DE LA MAGNITUD DE LOS MOVIMIENTOS VERTICALES... ..	107
FIGURA 54. (A) SISTEMA EN EQUILIBRIO Y (B) SISTEMA DEFORMADO	109
FIGURA 55. DEFORMACIÓN DE COLUMNAS VERTICALES.	109
FIGURA 56. ELEMENTO DIFERENCIAL PARA LA ECUACIÓN DIFERENCIAL.....	111
FIGURA 57. FORMACIÓN DE GRIETA POR CORTANTE EN EL MATERIAL DEFORMABLE....	114
FIGURA 58. ESFUERZOS PRINCIPALES EN LA SUPERFICIE DEL TERRENO.	114
FIGURA 59. COMPORTAMIENTOS DE LA ZONA I Y ZONA II EN UN ACUÍFERO.....	115
FIGURA 60. FORMACIÓN DE ZONA III EN EL PROCESO.	117
FIGURA 61. EROSIÓN DE ZONA III.....	117
FIGURA 62. EQUILIBRIO EN LA ZONA III.	118

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. ESPESORES DE LAS UNIDADES ELECTRO-ESTRATIGRÁFICAS OBSERVADOS EN LOS PERFILES DE LAS FIGURAS 10, 11 Y 12.....	60
TABLA 2. RESUMEN DE LOCALIZACIÓN DE MUESTRAS.....	64
TABLA 3. RESUMEN DE PRUEBAS DE LABORATORIO REALIZADAS AL AGREGADO PUMITICO.....	65
TABLA 4. RESUMEN DE RESULTADOS EN PRUEBAS DE TENSIÓN DIRECTA.....	93



ÍNDICE DE FÓRMULAS

$\Delta H' = 1 + w\gamma s - \gamma s'2EH'2$1 106

$\Delta H = 1 + w\gamma s - \gamma s'H'EH$ 2 106

$\Delta L = L2 + grad\Delta H2 - L$3 110

$\Delta L = grad\Delta Hsin \alpha -L$4 110

$\Delta L = \epsilon L$5 111

$\Delta dx = \epsilon dx$6 111

$0L\Delta dx = 0L\epsilon dx$7 111

$\Delta L = 0L\epsilon dx$8 111

$\Delta L = 0LL2 + grad\Delta H2 - LLdx$...9 111

$\Delta L = L2 + grad\Delta H2L - 10Ldx$...10 112

$\Delta L = L2 + grad\Delta H2L - 1L$11 112

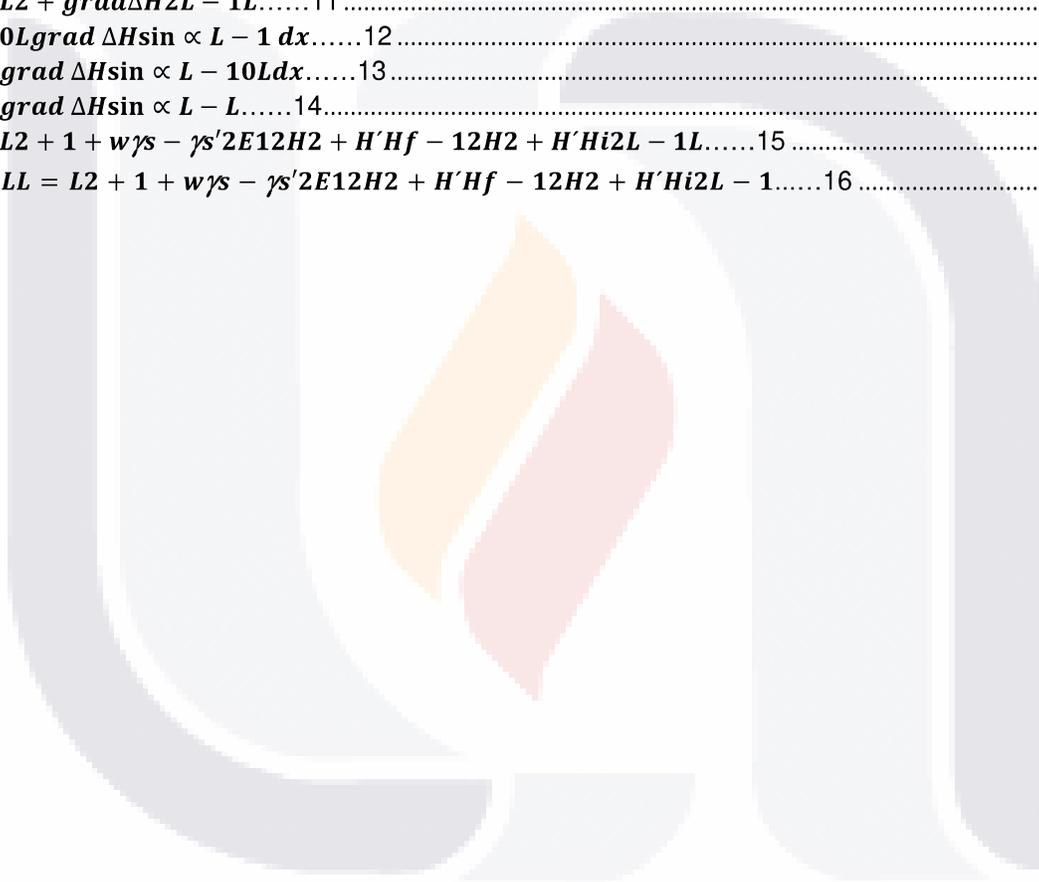
$\Delta L = 0Lgrad \Delta Hsin \alpha L - 1 dx$12 112

$\Delta L = grad \Delta Hsin \alpha L - 10Ldx$13 112

$\Delta L = grad \Delta Hsin \alpha L - L$14 112

$\Delta L = L2 + 1 + w\gamma s - \gamma s'2E12H2 + H'Hf - 12H2 + H'Hi2L - 1L$15 112

$\epsilon = \Delta LL = L2 + 1 + w\gamma s - \gamma s'2E12H2 + H'Hf - 12H2 + H'Hi2L - 1$16 112



RESUMEN.

El fenómeno de subsidencia es un problema que se agrava cada vez más en el mundo entero. La subsidencia causada por la pérdida de sustentación hidráulica consiste en un proceso de hundimiento paulatino que se presenta en acuíferos formados por rellenos sedimentarios con potencial de deformación considerable, debido a la extracción de agua en pozos para uso urbano e industrial. En este trabajo se reporta una investigación teórica-experimental que tuvo como objetivo dar una explicación plausible de la mecánica de generación de agrietamientos debidos a subsidencia, así como su propagación a profundidad, longitudinal y ancho de influencia, para poder implementar una metodología económicamente aplicable para la predicción de zonas de riesgo y que el fenómeno de subsidencia y sus consecuencias asociadas sean lo menos perjudiciales para la infraestructura urbana, industrial y evitar impactos de gran magnitud a la población.

Para cumplir con este objetivo, se construyó un modelo analógico en el cual se realizaron experimentos para reproducir la formación de agrietamientos asociados a subsidencia y establecer cuáles son los factores que intervienen en el mecanismo de su formación. La modelación analógica incluyó la caracterización mecánica del material granular usado para recrear el acuífero mediante ensayos a la tensión, de corte directo y ensayos triaxiales.

Los resultados de la modelación analógica permitieron hacer una descripción cualitativa del mecanismo de formación de los agrietamientos, de su evolución y de su propagación. Adicionalmente, a partir de las observaciones del fenómeno reproducido en el modelo analógico, se formuló una explicación numérica del proceso de formación de fracturamientos.

La investigación incluyó el procesamiento y análisis de imágenes de Radar Interferométrico de Apertura Sintética (InSAR) del satélite Sentinel 1, de los cuales se eligieron pares de imágenes que van desde el 21 de octubre del año 2014 hasta el 15 de abril de 2018 con el fin de obtener interferogramas para conocer cómo ha evolucionado la deformación del relleno en la zona urbana de la ciudad de Tepic y del valle de Matatipac.

Se realizaron muestreos alterados de los rellenos granulares que conforman el acuífero del área de estudio, específicamente pumicitas, para obtener sus características granulométricas, densidad, contenido de agua, absorción, masa volumétrica seca, masa volumétrica del material y parámetros índice, tales como: límite líquido, límite plástico e índice plástico, esto con el fin de comparar estos materiales con los que se puede usar en el modelo analógico a escala.



ABSTRACT.

The phenomenon of subsidence is a problem that is becoming more and more worse in the whole world. The subsidence consists of a gradual sinking process caused by the loss of hydraulic support in aquifers formed by sedimentary deposits with deformation potential, due to the extraction of water from wells for urban and industrial use. In this work, a theoretical-experimental research was performed that had as objective to give a plausible explanation of the mechanics of generation of cracks due to subsidence, as well as its propagation to depth, longitudinal and width of influence, in order to implement an economically applicable methodology for the prediction of risk zones, and that the phenomenon of subsidence and its associated consequences be the least harmful for the urban, industrial infrastructure and avoid impacts of large magnitude to the population.

To achieve this objective, an analog model was built in which tests were performed to reproduce the formation of cracks associated with subsidence, and to establish the factors that influence the mechanism of their formation. The analogical modeling included the mechanical characterization of the granular material used to recreate the aquifer by testing stress tests, direct cutting and triaxial tests.

The results of the analogical modeling allowed to make a qualitative description of the mechanism of formation of the cracks, of their evolution and their propagation. Additionally, from the observations of the phenomenon reproduced in the analog model, a numerical explanation of the fracture formation process was formulated.

The investigation included the processing and analysis of images of Synthetic Aperture Interferometric Radar (InSAR) of the Sentinel 1 satellite, of which pairs of images were chosen from October 21, 2014 to April 15, 2018 in order to obtain interferograms to know how the deformation of the filling has evolved in the urban area of the city of Tepic and the Matatipac valley.

Altered samples were taken from the granular fillings that make up the aquifer of the study area, specifically pumicite, to obtain their granulometric characteristics,

density, water content, absorption, dry volumetric mass, volumetric mass of the material and index parameters, such as: limit liquid, plastic limit and plastic index, this in order to compare these materials with those that can be used in the analog scale model.





CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

1.1. Introducción.

En muchos países el agua almacenada en los acuíferos granulares es uno de los recursos naturales que mayor aprovechamiento ha tenido desde hace aproximadamente cien años; esto se debe al agotamiento de los cuerpos de agua superficiales, a la facilidad de extracción y a la buena calidad del agua de dichos acuíferos. En México el 52% del agua utilizada para el servicio urbano, industrial y agrícola proviene de cuerpos subterráneos ([CONAGUA, 2012](#)), en muchos casos esta extracción suele ser mayor que la recarga registrada.

El abatimiento de los niveles piezométricos de un sistema acuífero en una cuenca sedimentaria induce el hundimiento paulatino de la superficie del suelo, a este fenómeno se le conoce como subsidencia por extracción de agua del subsuelo. El material con potencial de ser consolidado, en combinación con la existencia de un basamento rocoso irregular del acuífero, han inducido hundimientos diferenciales y la generación de una gran cantidad de fracturas del suelo dentro de los centros poblacionales, parques industriales y zonas rurales.

La subsidencia, es el resultado de un fuerte impacto antropogénico que consiste en la extracción de algún recurso del subsuelo, ya sea hídrico o mineral, este fenómeno se está presentando en diferentes valles y costas alrededor del mundo desde el siglo pasado hasta nuestros días ([Steedman, 2005](#)). Su mayor impacto económico se genera en zonas urbanas donde existe mayor probabilidad de que cause daños a infraestructura, bienes raíces, planta productiva, etc.

La pérdida de sustentación hidráulica, el cambio en el régimen de esfuerzos y la presión de poro dan como resultado una deformación en gravas, arenas, limos o arcillas, un reacomodo irreversible cuando se excede el coeficiente de preconsolidación ([Terzaghi 1925](#)).

A través de los años el estudio de la subsidencia se ha intensificado y existen infinidad de estudios antecedentes a este trabajo como los realizados por, ([Álvarez](#)

Manilla Aceves, 1999; Valencia Domingo; 1995, Rojas et al., 2002; Pacheco Martínez, 2007), entre muchos otros. Este fenómeno es muy difícil de detectar a simple vista ya que afecta extensas superficies de terreno y su magnitud es solo de unos pocos centímetros por año.

En algunos casos de poblaciones o industrias que se localizan en zonas afectadas por subsidencia cercanas al océano, en donde el nivel de la superficie del terreno está por debajo del nivel medio del mar, la subsidencia obliga a construir obras de protección contra inundaciones, como ejemplo podemos mencionar los países bajos. En estos casos se agudiza el problema dado que las zonas costeras están sujetas a fenómenos meteorológicos como huracanes y tifones; en caso de maremotos estas áreas son más vulnerables a tener pérdidas económicas y humanas.

Con el paso del tiempo el hundimiento regional propicia que se presenten otros problemas asociados, como por ejemplo, la generación de zonas de inundación en donde antes no existían, debido a los cambios en el drenaje natural en la zona afectada, otro fenómeno asociado que se presenta en zonas de subsidencia son los agrietamientos del terreno que producen daños en todo tipo de edificios y en la infraestructura urbana, principalmente en caminos, vialidades, redes subterráneas de drenaje, de agua potable, gas, etc. Adicionalmente, es probable que cuando existen rupturas de tubería de drenaje, en o cerca de agrietamientos, los mantos acuíferos pueden estar expuestos a la contaminación por infiltración de los desechos, suponiendo que el agrietamiento esté en comunicación con los depósitos subterráneos de agua.

Éstos son algunos de los problemas más tangibles en zonas urbanas y rurales. Sin embargo, existen otros riesgos para la infraestructura industrial, como tuberías para transportar hidrocarburos o gas que generalmente están fuera de estas zonas, pero también son susceptibles de ser afectadas por los hundimientos diferenciales del suelo.

Hasta el momento, los estudios enfocados a entender cuál es la dinámica del funcionamiento mecánico e hidráulico de un acuífero no son del todo satisfactorios.

En parte debido a la dificultad de obtener parámetros que permitan utilizar modelos o ecuaciones, cuyos resultados reflejen la realidad del comportamiento del acuífero, y de esta manera entender la relación que existe entre todos sus componentes, para minimizar los efectos negativos de la extracción del líquido (Arévalo y Rivera, 2013; Carrillo-Rivera, 2000; Huizar-Alvarez et al., 2004).

Los factores naturales que más influyen en la magnitud de los daños y las implicaciones económicas y sociales son, la geología y la ubicación de la zona afectada, ya que generalmente el terreno, una vez comienza el proceso de subsidencia, tiende a deformarse siguiendo los patrones geométricos del basamento rocoso, además de que el tipo de material de relleno no es homogéneo.

En el caso del valle de Matatipac, la subsidencia se ha extendido aproximadamente en un área de 20 km² en las zonas urbanas de las ciudades de Tepic y Xalisco, además de que se tiene evidencia de agrietamientos que afectan algunas colonias e infraestructura en la zona sur de la ciudad de Tepic, aunque no es del todo concluyente.

Actualmente no se tiene un padrón de afectaciones a propiedades por lo que difícilmente se puede definir las implicaciones económicas que causa el fenómeno. La traza del o de los agrietamientos no han sido cartografiada ni ha sido reconocida por las autoridades encargadas del desarrollo urbano, lo que implica un problema mayor, ya que no se ha restringido o previsto requerimientos adicionales para la construcción de estructuras en la traza de este fracturamiento.

El problema de definir los sitios donde se puede generar una grieta por subsidencia en el futuro, ha sido estudiados por diversos autores en todo el mundo (Holzer, 1984; Pacheco-Martínez et al; 2013; Rojas et al., 2002; Baruni, 1994). En la actualidad se reconoce que la principal línea de investigación en problemas de subsidencia es el estudio de la generación de grietas con fin de predecirlos (Burbey, 2002).

En resumen, algunas de estas condiciones se deben reunir para que el material de un acuífero sea propenso a presentar subsidencia y fallamiento.

(Burbey, 2002):

- a) un clima árido a semiárido,
- b) la extracción del líquido prolongada y los niveles estáticos abatidos de forma considerable,
- c) un considerable grosor acumulado de estratos compresibles,
- d) una distribución variable de estratos compresibles,
- e) que los índices de compresibilidad del material granular sean variables y
- f) la existencia de estructuras geológicas tales como fallas geológicas anteriores a la extracción.

Por otro lado (Rojas et al., 2002) señala que qué cuando se cumplen las siguientes condiciones, se presenta el fenómeno de hundimiento y agrietamiento del suelo:

- 1) Que exista un basamento incompresible con importantes irregularidades (superiores a los 30 metros).
- 2) Que exista un abatimiento del nivel freático importante (superior a los 30 m).
- 3) Que por lo menos algún estrato del material de relleno (suelo o sedimentos compresibles de espesor de más de 30 m), sobre el basamento incompresible o somero, posea una plasticidad de media a baja.

El valle de Matatipac reúne algunas de estas características, entre las que destacan:

1) La ubicación del acuífero y del valle se muestra en la (Figura. 1). Y los límites de este valle están comprendidos entre los paralelos 21° 15' 48.5" y 21° 33' 6.1" de latitud norte y los meridianos 104° 39' 24.4" y 104° 58' 36.7" de longitud oeste (Figura 2). Este valle forma parte del graben Tepic-Zacoalco que tiene su origen en el Lago de Chapala en Jalisco y termina en San Blas Nayarit, su orientación es NW-SE (Demant, 1978) (Demant, Alain, 1978).

2) El material de relleno del acuífero comprende materiales volcánicos del cuaternario y del terciario y variable coeficiente de consolidación; cabe destacar que entre estos materiales se encuentran materiales pumiciticos producto de explosiones plineales del volcán San Juan, en su mayoría de muy baja plasticidad.

3) A pesar de que en la zona no existe un clima árido o semiárido la precipitación promedio anual es de 1245 mm; esto muestra que se tiene un déficit si se compara con la evapotranspiración promedio anual que está indicada en 1700 mm.

4) Y por último y derivado del punto anterior existe declive de los niveles estáticos debidos al bombeo excesivo para abastecer de servicios municipales en la ciudad.

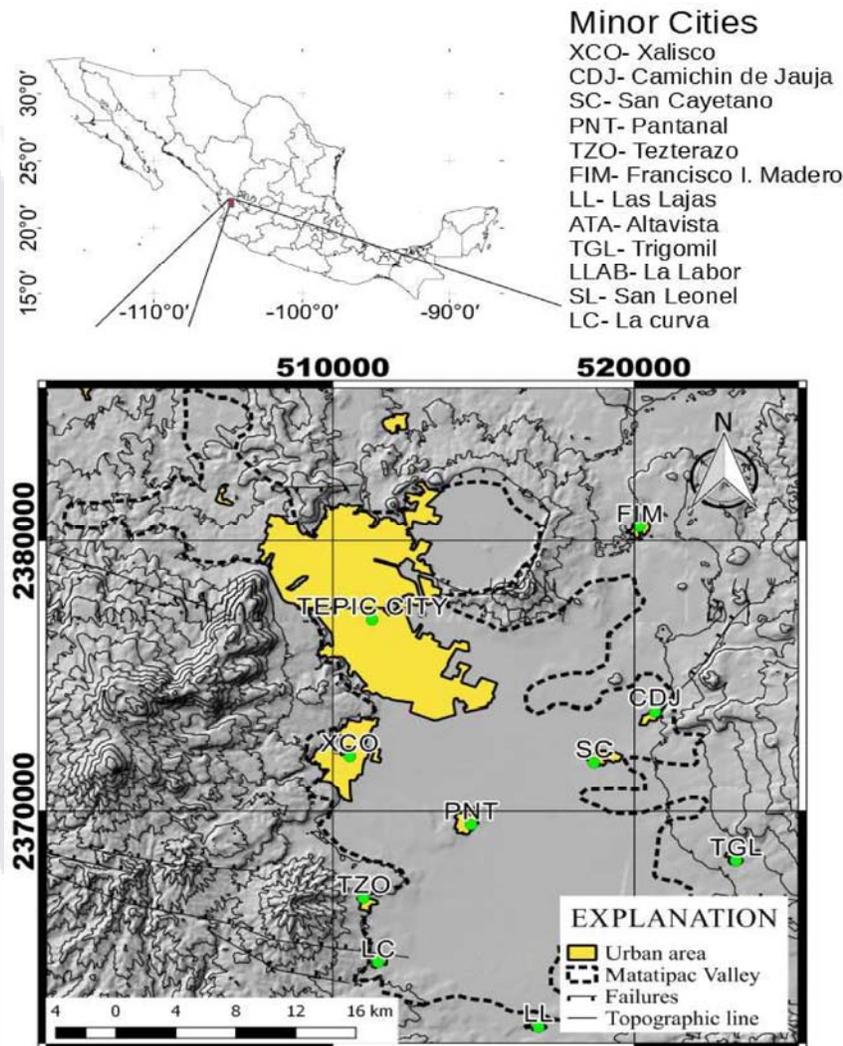


Figura 1. Mapa de la localización del Valle de Matatipac

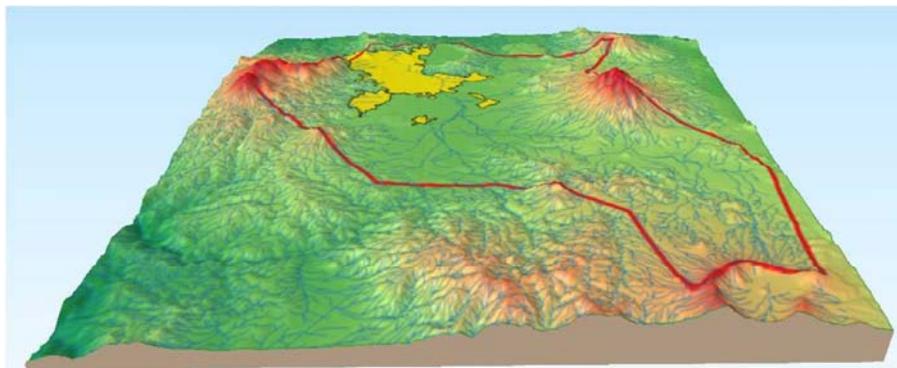


Figura 2 Delimitación del valle de Matatipac con fines administrativos.

El rasgo hidrográfico principal lo constituye el Río Mololoa, que cruza el valle de sur a norte, al igual que los arroyos Las Cuevas, El Puente Grande, El Cordoncillo, El Llorón de Mora, San Francisco y Mal Paso, entre otros, que vierten sus aguas al Río Grande de Santiago (CONAGUA, 2003a).

De acuerdo con (CONAGUA, 1998) la precipitación promedio anual es de 1245 mm; esto muestra que se tiene un déficit si se compara con la evapotranspiración promedio anual que está indicada en 1700 mm. La consecuencia inmediata de esto es, que existe una sobreexplotación del acuífero causado por el abastecimiento del líquido para los servicios municipales, y en menor medida para la agricultura que en su mayoría se trata de riego de temporal (INEGI, 1981).

De acuerdo con el estudio de (CONAGUA, 1992), en los años de 1977 a 1979 el abasto de agua se daba por medio de norias y algunos cuantos pozos pilotos, y hasta esa fecha, no se reportaron cambios significativos en cuanto abatimiento del nivel freático, más bien presentaba una condición estable.

Desde 1980, a medida que se amplió la red de pozos piloto de observación piezométrica, se definió en forma más clara las tendencias locales en el distrito de riego y la ciudad de Tepic, es decir, de 1977 a 1979 no existió cambio significativo en la piezometría, para 1983 se reportó en la zona de riego un pequeño cono de abatimiento en la parte norte de la ciudad de Tepic, señalado por la curva cerrada con valor 905 msnm (CONAGUA, 1998).

1.2. Problemática y justificación.

En México el problema de agrietamiento en suelos se está convirtiendo en un asunto cada vez más importante ya que varias ciudades medias y grandes han sido afectadas por este fenómeno, por ejemplo, Aguascalientes, Ameca, Celaya, Irapuato, Morelia y Querétaro entre otras. Estas ciudades están localizadas en o cerca del sector central de la provincia geológica conocida como el Cinturón Volcánico Mexicano. Aquí se desarrollaron estructuras geológicas tipo graben, que se rellenaron con materiales granulares produciendo valles fértiles, donde crecieron centros urbanos, industriales y agrícolas, razón por la cual se han explotado los mantos acuíferos para satisfacer las necesidades de agua para el desarrollo.

Los daños a edificios y casas habitación son evidentes una vez el fenómeno de agrietamiento comienza, estos daños pueden ser desde cristales rotos hasta pérdida total de la estructura. Los costos de estos deterioros no están cuantificados en su totalidad, ya que no existe una base de datos que permita el correcto seguimiento de estos costos.

Los problemas sociales que genera es bastante justificación como para invertir esfuerzos en la búsqueda de una solución o mitigación del fenómeno a largo plazo, el cual debe ser tomado en cuenta en los atlas de riesgos geológicos y en los reglamentos de construcción municipal y estatal.

En el Valle de Matatipac no existe una cultura de prevención en cuanto a riesgos geológicos se refiere y el fenómeno de la subsidencia para los ayuntamientos es totalmente desconocido, es posible que en un futuro no muy lejano en esta zona las afectaciones por los hundimientos diferenciales sea un problema grave y requiera mayor atención por parte de los que administran el gobierno.

1.3. Hipótesis.

Es posible hacer una predicción aproximada de la propagación de los agrietamientos debidos a subsidencia, así como también conocer su ancho de influencia contando con mapas de interferometría, conociendo los parámetros mecánicos del relleno y utilizando modelos analógicos, para poder considerar estas

zonas de riesgo en los atlas de peligro que se elaboran para los municipios y estados.

1.4. Objetivo.

En este trabajo se pretende dar una explicación plausible de la mecánica de generación de agrietamientos debidos a subsidencia, así como su propagación a profundidad, longitudinal y ancho de influencia, para poder implementar una metodología económicamente aplicable para la predicción de zonas de riesgo y que el fenómeno de subsidencia y sus consecuencias asociadas sean lo menos perjudiciales para la infraestructura urbana, industrial y evitar impactos de gran magnitud a la población.

Un objetivo particular es, conociendo la mecánica de la generación de agrietamientos del modelo analógico y contando con otros métodos de medición de bajo costo poder predecir la aparición y propagación de agrietamientos en el valle de Matatipac.

1.5. Estructura de la tesis.

La estructuración de esta tesis consiste en los siguientes puntos:

La realización de una base de datos en un software especializado en sistemas de información geográfica (Qgis) para organizar y entender información geológica e hidrogeológica, así como las características físicas del relleno granular, cartografiar grietas existentes, y también la organización de la información cualitativa y cuantitativa generada por la búsqueda bibliográfica, mediciones de campo y pruebas de laboratorio.

La revisión de las teorías existentes fue fundamental para poder recrear el modelo análogo de fracturamiento y así tener bases de lo que se debe esperar al momento de la experimentación.

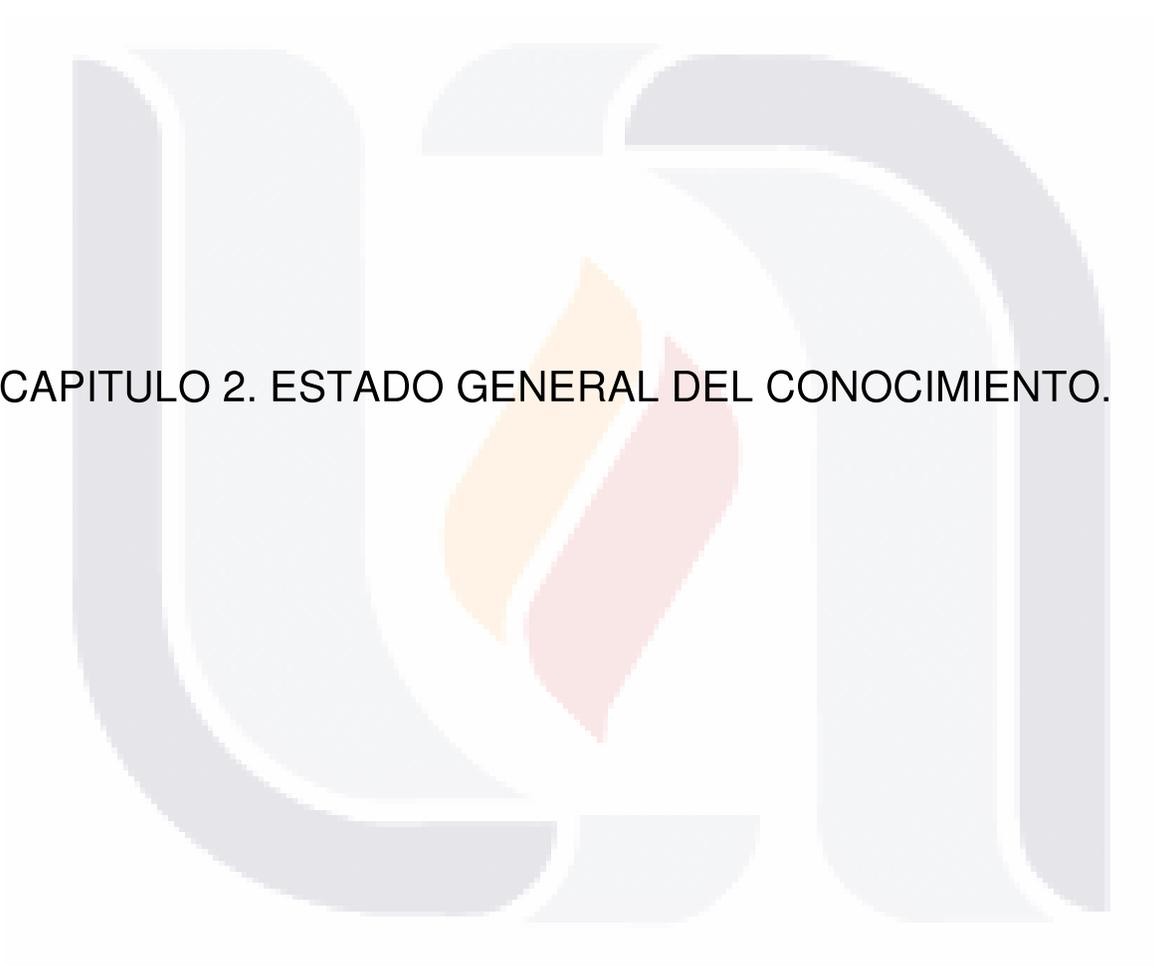
La observación y análisis de los hundimientos a través del tiempo, para esto la adquisición y procesamiento de imágenes InSar para obtener diferentes interferogramas diferenciales fueron importantes.

Por otro lado, con la observación y desarrollo del problema en el modelo análogo se puede comprender la génesis y formación de agrietamientos en el suelo de acuíferos libres granulares.

Por lo tanto, en este trabajo se propone un modelo conceptual de cómo se genera un agrietamiento en el suelo por pérdida de sustentación hidráulica y cómo evoluciona en su traza y su ancho de influencia.







CAPITULO 2. ESTADO GENERAL DEL CONOCIMIENTO.



CAPITULO 2. ESTADO GENERAL DEL CONOCIMIENTO.

2.1. Introducción.

La principal causa del fenómeno de subsidencia en México se presenta debido a la extracción de agua para abastecer centros urbanos o campos de producción agrícola e industrial. Este fenómeno se concentra en estructuras geológicas tipo graben que con el paso del tiempo se convirtieron en valles lacustres o aluviales dónde el material de relleno resulta poco consolidado.

Muchas ciudades en México presentan este problema, poblaciones como: Ciudad de México, Aguascalientes, Celaya, Apaseo el Grande, Irapuato, Morelia, Querétaro, entre otras. Estas ciudades que van de tamaños de medio a grande experimentan este fenómeno debido a que la demanda de agua de los acuíferos ha estado en constante crecimiento, producto del rápido aumento de la población, así como del incremento de las actividades industriales y agropecuarias.

2.2. Marco teórico.

2.2.1. Descripción de casos históricos de subsidencia a nivel mundial.

La subsidencia como tal se ha reportado desde la década de 1920. En Shanghái fue reportada desde 1921 cuando se formó una depresión en forma de cuenco, que alcanzó un máximo hundimiento de 2.36 m, a una velocidad de 200 mm por año, (Guy, X. Y., Tsien, S. I., Huang, H. C., Liu, Y).

En Murcia España, en la década de 1990 se presentó un periodo de sequía atípico, el cual dio como resultado asentamientos diferenciales en algunos edificios. Los expertos llegaron a la conclusión de que se presentó el primer caso de subsidencia conocido en España (Vázquez Carretero and Justo Alpañés, 2002).

Otro caso es el hundimiento del Valle de San Joaquín en California EU, en donde a partir de 1940 se registra un incremento en la extracción de agua para irrigar campos de cultivo y los registros muestran un decremento en el nivel de aguas freáticas de 122 mts en el acuífero profundo, para 1970 ya se contaba una

afectación por subsidencia de más de 4000 kilómetros cuadrados (Poland et al., 1972)

En algunos lugares como en el sur de Nueva Jersey, se ha reportado desde 1999 una disminución del nivel del terreno con respecto al nivel del mar, por lo tanto en sitios como este, la subsidencia puede provocar un incremento en la frecuencia y en la intensidad de las inundaciones (Sun et al., 1999).

También para los años 1980, en Japón se reporta subsidencia en ciudades como Tokio, Chiba, Kanagawa, Osaka, Niigata entre otras, estos hundimientos diferenciales van desde los 2 cm hasta los 4 cm por año (Akagi, T., 1992).

Existen muchos casos alrededor del mundo, los cuales, por falta de espacio es imposible describir uno por uno, sin embargo, a manera de resumen se han medido hundimientos en el valle de San Joaquín de 8.90 m en el Valle de Santa Clara en California E.U. aproximadamente de 8.50 metros y hasta de 4 mts en Tokio, el rango de subsidencia por año para Tokio esta alrededor de los 38 cm y 50 cm para el Valle de San Joaquín en E.U. y Niigata Japón. (Vázquez Carretero y Justo Alpañés, 2002)

2.2.2. Descripción de casos históricos en México.

En la ciudad de México el problema de subsidencia fue detectado en 1925 durante la construcción de las compuertas del canal principal de desagüe, donde se observó que se mostraban deformaciones verticales. Se demostró que las deformaciones verticales era el resultado de la subsidencia general del valle, pero también se creía que esta subsidencia era producto de las cargas generadas por la construcción que se llevaba a cabo (Gayol, R, 1925).

Nabor Carrillo, 1948 demostró que la causa principal de los hundimientos se debían a la extracción de agua del subsuelo por pozos para uso público del agua.

En el año 1972 se presentó un trabajo predictivo sobre el hundimiento de la ciudad de México, asociándolo con el cambio y evolución de las presiones neutrales a diferentes profundidades, ya que según Terzaghi la disminución de la presión neutra transfiere carga a la matriz sólida del suelo (Figuroa Vega., 1973).

Por otro lado, a partir del año de 1980, habitantes de varias ciudades asentadas en antiguas depresiones lacustres o fluvio-lacustres localizadas en la zona norte de la provincia geológica conocida como el Cinturón Volcánico Mexicano (CVM), que es una zona volcánica con dirección Este-Oeste, de entre 20 y 200 km de ancho y 1,000 km de largo; comenzaron a observar que sus casas-habitación, pavimentos de las calles, edificios públicos, líneas de alcantarillado, líneas de agua potable e industrias, eran afectadas por hundimientos diferenciales del suelo. Dichas ciudades son principalmente: Aguascalientes, Querétaro, Celaya, Silao, Apaseo el Grande, Morelia, entre otras poblaciones (Referencias).

2.2.3. Proceso de generación de agrietamientos.

Los agrietamientos de suelo generalmente aparecen en terrenos aluviales que han sufrido un abatimiento importante en su nivel freático y bajo los cuales existen basamentos rocosos irregulares, [Jachens y Holzer, 1979](#). También [Robinson. Et. al 1962](#), [Holzer, 1984](#) hacen las siguientes observaciones de campo de algunos estados sureños de Estados Unidos, respecto al agrietamiento por extracción de agua, las cuales se destacan a continuación:

- a) Generalmente coinciden con fallas geológicas sepultadas por aluviones.
- b) Pueden alcanzar varios kilómetros de extensión,
- c) Aparecen súbitamente en la superficie del terreno en donde se presentaron asentamientos diferenciales previos.
- d) Generalmente aparecen en la zona donde la pendiente de los asentamientos alcanza su valor máximo,
- e) Nuevos agrietamientos pueden aparecer en dirección paralela a los primeros,
- f) Algunos agrietamientos se interceptan, pero nunca se cruzan.
- g) El ancho inicial del agrietamiento puede ser de uno a dos centímetros, sin embargo, generalmente se ensanchan debido a la erosión.
- h) La deformación de tensión necesaria para el desarrollo de un agrietamiento depende de las propiedades mecánicas del suelo, sin embargo, generalmente varía entre 0.1 a 0.4% de deformación total.

- i) La evolución de un agrietamiento depende de la velocidad a la que se abate el nivel freático. Si éste declina rápidamente, los agrietamientos también se desarrollan rápidamente.

Muchos investigadores han tratado de explicar el mecanismo de generación de agrietamientos debidos a subsidencia, sin embargo hasta nuestros días no existe la metodología que satisfaga una predicción con la exactitud necesaria para poder aplicarlo en la práctica (Pacheco Martínez, 2007). Entre los trabajos más importantes podemos nombrar a (Jachens y Holzer, 1982) que trabajaron en el sur de Arizona realizando estudios geofísicos y asociándolos con grietas ya existentes tomando como base los trabajos de (Lee and Shen, 1969).

En un trabajo presentado por (Zhuping y Helm, 1996) proponen algunos escenarios donde se pueden originar agrietamientos por abatimiento de nivel freático, los cuales se describen a continuación.

Escenario 1: Este modelo considera que los diferentes estratos que conforman el cuerpo del acuífero actúan como planos de debilidad, proponen que se generan fuerzas hidráulicas por el flujo del agua hacia el pozo que drena al acuífero, que inducen esfuerzos de cortante en los planos de debilidad y provocan un deslizamiento sobre los contactos entre estratos.

Escenario 2: Se considera que el cuerpo del acuífero es discontinuo debido a la presencia de una falla preexistente de origen no especificado. Las fuerzas hidráulicas generadas por el bombeo de agua pueden ocasionar desplazamientos entre los dos bloques definidos por la falla, tales desplazamientos pueden hacer que la falla se abra en superficie y genere nuevos fracturamientos secundarios similares a fallas sintéticas y antitéticas.

Escenario 3: Considera un acuífero con cambios abruptos en el espesor del relleno granular o con heterogeneidades debido a esto se provoca rotación del material, esfuerzos cortantes y deformación de extensión a diferentes profundidades, provocando la falla de la masa de suelo que se manifiesta en superficie como un fallamiento.

2.2.4. Modelos existentes para el estudio de la subsidencia.

El reto principal en el estudio del fenómeno de subsidencia es no sólo el conocimiento del comportamiento sino la predicción de la evolución de la misma, ya que esta predicción permite identificar zonas de riesgo y la planeación en las zonas de afectadas.

Según la guía de la UNESCO ([Group 8.4, 1984](#)) para el estudio de la subsidencia debida a la extracción de agua, existen a grandes rasgos tres tipos diferentes de modelos: modelos empíricos, semi-teóricos y teóricos.

En cualquier de estos modelos es necesario tener los datos adecuados, recolectados a través de un tiempo suficiente, dependiendo de las necesidades la utilidad y la precisión que se requiera del modelo, ya que sin estos requisitos los modelos serán de poca utilidad.

2.2.4.1. Modelos empíricos.

Extrapolación de datos sin ajuste. En este caso solamente se hace una relación de magnitud de hundimiento en un periodo de tiempo y se calcula a una fecha futura con la misma proporción encontrada.

Ajuste de algún tipo de curva (extrapolación no lineal). En este procedimiento se intentan ajustar los datos de hundimiento y fecha a curvas, que permiten mostrar el comportamiento y la predicción de fenómeno.

2.2.4.2 Modelos Semiteóricos.

Las observaciones semi-teóricas para el análisis de la subsidencia se basan fundamentalmente en la búsqueda de alguna relación entre los desplazamientos verticales del nivel del suelo a través del tiempo, el abatimiento del nivel freático y los espesores de suelo compresible.

2.2.4.3. Modelos Teóricos.

Los modelos teóricos son modelos que incluyen propiedades mecánicas de los suelos para predecir su comportamiento, como se menciona anteriormente, estas propiedades son muy difíciles de obtener y analizar de manera que sean representativas de toda una zona. Además, el incluir todas las variables en un solo

modelo analítico, puede resultar muy complicado. Por lo que generalmente, los modelos teóricos hacen una serie de hipótesis simplificadoras, con la finalidad de facilitar el análisis. La idea es que estas hipótesis hagan que el proceso sea práctico, intentando afectar lo menos posible a los resultados. Cuando se usa este tipo de modelos se recomienda no perder de vista cual es el nivel de precisión necesario. Algunas de las suposiciones que se realizan cuando se trabaja con modelos numéricos son las siguientes (Group 8.4, 1984):

- a) No hay materia orgánica presente.
- b) Existen solo dos fases (sólida – líquida).
- c) No hay viscosidad.
- d) No existe plasticidad.
- e) No hay anisotropía.
- f) La estructura del suelo se comporta de manera elástica.
- g) Sólidos y líquidos son incompresibles.
- h) Los parámetros son constantes (al menos dentro de zonas predefinidas, ej. compresión virgen, recompresión, descarga).

Estas suposiciones son consideradas para analizar el comportamiento mecánico de los suelos. Respecto a la composición del acuífero es necesario hacer otras suposiciones:

- i) Estratos horizontales.
- j) Flujo horizontal en estratos permeables y verticales en estratos poco permeables.
- k) La subsidencia es debida principalmente a la consolidación de los estratos poco permeables o arcillosos.

Todas estas simplificaciones se deben de hacer de acuerdo a los datos reales que se tengan de campo, a la simplicidad que se quiera del modelo, la aplicación de éste, la precisión requerida, entre otras.

Existen principalmente dos tipos de modelos teóricos que se han encontrado para analizar la subsidencia: los que relacionan la compresibilidad de los materiales con

el potencial de subsidencia; y los que usan ecuaciones diferenciales para modelar el flujo de agua subterránea en sistemas poco permeables.

2.2.4.4 Modelos a escala.

Un modelo a escala es una técnica que nos permite estudiar los fenómenos naturales bajo condiciones controladas de laboratorio (Cobbold y Castro, 1999), los modelos intentan representar de forma simple y a escala diferentes fenómenos que suceden en la naturaleza (Hubbert, 1937).

Estos modelos a escala están elaborados con materiales con los cuales se pretende reproducir de la forma más fiel posible las condiciones geométricas, mecánicas y reológicas en los cuales se encuentra el área en estudio.

2.2.4.5 Modelos analógicos.

Un modelo **analógico** aprovecha las similitudes formales que existen entre dos fenómenos físicos cualesquiera para simular a partir de uno de ellos el otro. Las relaciones matemáticas que explican el comportamiento entre ambos fenómenos son idénticas.

Estas relaciones, normalmente, se expresan en forma de ecuaciones diferenciales que generalmente se basan en algún principio de conservación (masa, energía, etc.).

Un ejemplo típico de un tipo de modelo análogo es el presentado por Terzaghi en su teoría de la consolidación unidimensional en un suelo fino, en este caso propone un cilindro de sección recta provisto de un resorte sin fricción fijo en la base y con una pequeña abertura en él cilindro, este cilindro está lleno completamente de un fluido incompresible, si se coloca sobre el sistema una carga y se mantiene la ranura cerrada, es lógico que el resorte no presentara deformación alguna y así toda la carga estará soportada por el fluido.

Si se permite que el fluido salga abriendo la ranura, entonces existirá una transferencia gradual de la carga del fluido al resorte. En el suelo la estructuración de las partículas sólidas está representada por el resorte y el agua intersticial libre

está figurada por el fluido incompresible en el cilindro y los tubos capilares por la ranura en el mismo.

Debido a estas características se puede simular el comportamiento de un suelo sometido a una carga que puede ser como ejemplo, en la construcción de una cimentación en el que los elementos homólogos estuvieran adecuadamente reproducidos.

2.2.4.6 Interferometría.

Los datos obtenidos a partir de la interferometría son las distancias entre el satélite y la superficie del terreno, se calculan a partir de la medición de tiempos y desfases. La mayoría de los usos de las imágenes SAR implican un despliegue de la magnitud de la imagen reflectiva y descartan la fase cuando la imagen compleja tiene la magnitud detectada. La fase de un píxel de imagen que representa un único difusor es determinística; sin embargo, la fase de un píxel de imagen representa múltiples difusores (en la misma celda de resolución), y está compuesta tanto de la parte determinística, como de la no determinística o estadística. Por esta razón, la fase de píxel en una sola imagen SAR no es generalmente útil. Sin embargo, con la selección apropiada de una geometría de imagen, se pueden adquirir dos imágenes SAR que tengan casi idénticos componentes de fase no determinísticos. Estas imágenes SAR pueden ser restadas, dejando solamente la diferencia de fase determinística de dos imágenes que es muy útil, en la siguiente **Figura 3** se muestra el modelo geométrico básico para un sistema de interferometría SAR. (Sillerico et al., 2010)

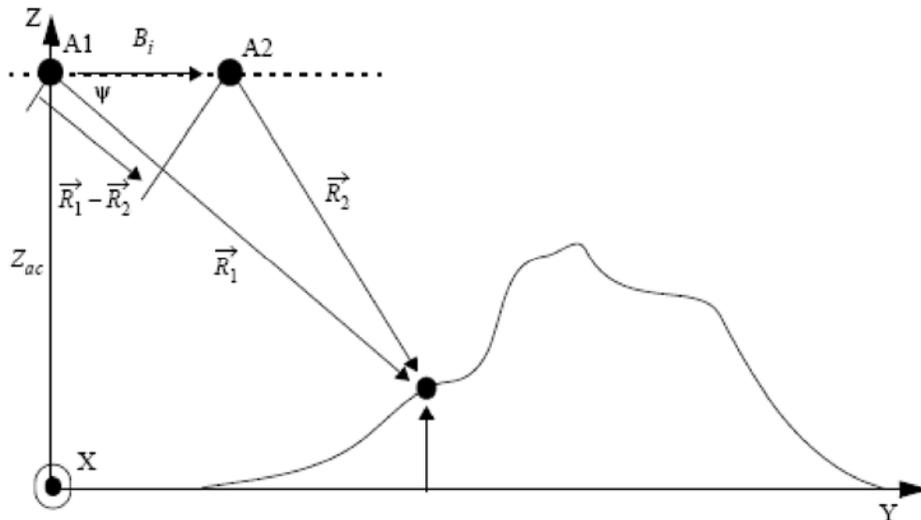


Figura 3. Modelo geométrico básico para un sistema de interferometría SAR.

Donde:

A1 = Antena 1

A2 = Antena 2

B_i = Línea Base

\vec{R}_1 = Vector desde la antena al primer punto de interés

\vec{R}_2 = Vector desde la antena al segundo punto de interés

ψ = Ángulo entre \vec{R}_1 y la línea base (ángulo de depresión)

Z_{ac} = Altura de la antena 1

El interferograma se forma mediante una multiplicación cruzada de la imagen maestra con el conjugado complejo de la imagen esclava. La amplitud de ambas imágenes se multiplica mientras que la fase representa la diferencia de fase entre las dos imágenes. La fase interferométrica de cada píxel de imagen SAR dependerá únicamente de la diferencia en las rutas de viaje de cada una de las dos imágenes SAR a la celda de resolución considerada. La variación de fase interferométrica $\Delta\phi$

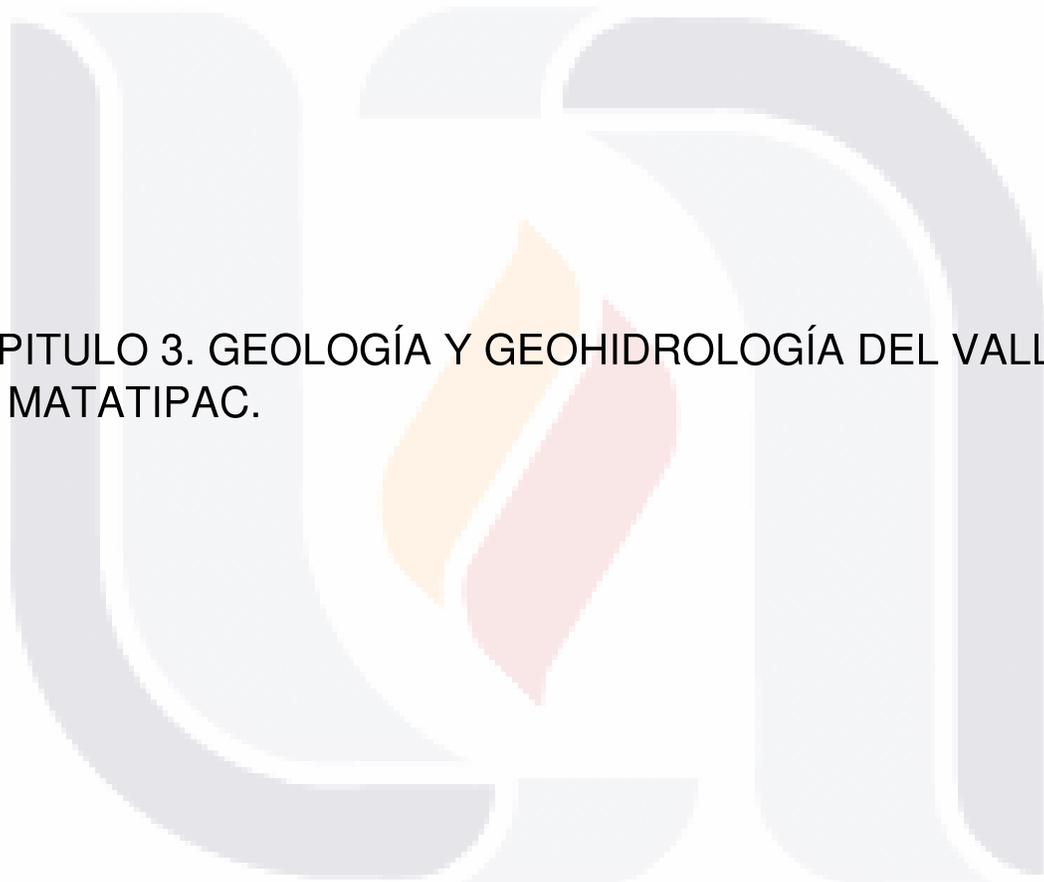
es entonces proporcional a ΔR dividida por la longitud de onda transmitida λ (Sillerico et al., 2010).

$$\phi_1 = \frac{4\pi R}{\lambda}, \quad \phi_2 = \frac{4\pi(R + \Delta R)}{\lambda}$$

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = \frac{4\pi\Delta R}{\lambda}$$



CAPITULO 3. GEOLOGÍA Y GEOHIDROLOGÍA DEL VALLE DE MATATIPAC.





CAPITULO 3. GEOLOGÍA Y GEOHIDROLOGÍA DEL VALLE DE MATATIPAC.

3.1. Geología Regional.

El subsuelo del Valle de Matatipac es una mezcla de materiales de diferentes eras geológicas que se fueron depositando a través del tiempo en la depresión formada por el graben. Para este documento nos enfocaremos en el material de la era cuaternaria (aluvión Qal y Pumicitas QPu) ya que en este material es donde se han presentado deformaciones en la superficie del terreno y que afectan la infraestructura de la ciudad de Tepic.

Los materiales que se presentan son mezclas homogéneas entre aluviones de tamaños gruesos a medios, así como material pumicitico, brechas, arenas de origen volcánico saturadas, limos y arcillas

3.2. Marco geológico regional.

El valle de Matatipac, geológicamente hablando, se encuentra ubicado dentro de lo que se conoce como la provincia geológica de la Faja Volcánica Transmexicana (en lo posterior abreviada como FVTM) que consiste en un arco magmático del mioceno medio-tardío (Pasquaré et al. 1988; Ferrari et al. 1999,) que forma un ángulo de 16° con respecto a la Trinchera Mesoamericana (Gómez Tuena et al., 2007).

La FVTM se extiende desde las costas de Veracruz y termina en San Blas en el estado de Nayarit (Demant 1978), esta provincia fisiográfica se divide en tres secciones (Demant 1978; Pasquaré et al. 1988) (Figura 4), una parte occidental que va desde San Blas en el estado de Nayarit, y que comprende el bloque Jalisco (Allan 1986), una zona centro que va desde donde termina el bloque Jalisco hasta llegar al sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende (Alaniz-Álvarez et al. 2002) y finalmente una oriental que va desde estas fallas hasta el golfo de México (Gómez-Tuena et al. 2007).

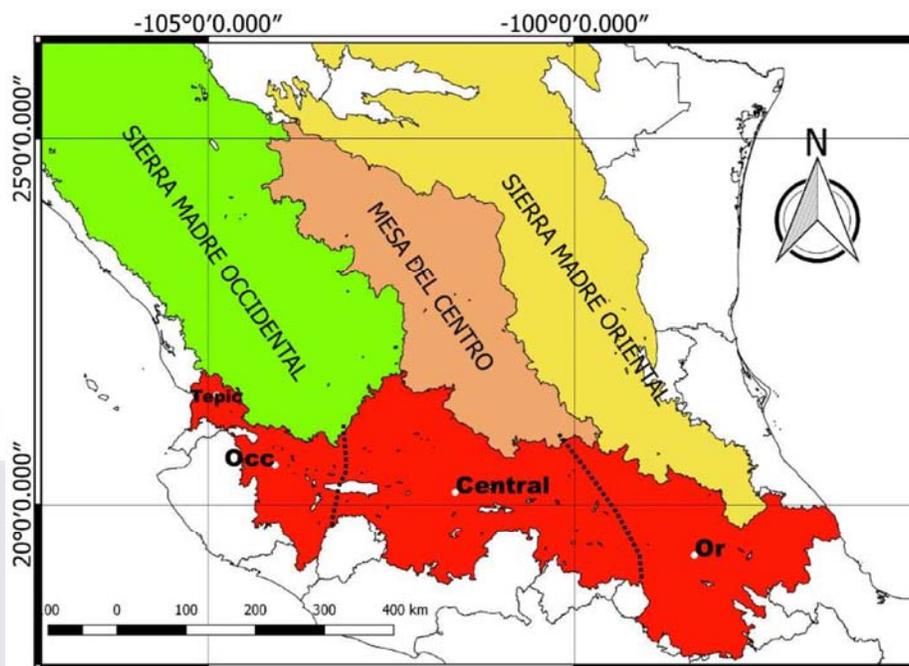


Figura 4. Faja volcánica transmexicana.

El valle de Matatipac se encuentra en el sector occidental y es parte del bloque Jalisco que se delimita en el continente por tres estructuras extensionales (Stock 1993) (Figura 5.) las cuales son el graben de Colima, el graben de Chapala y el Graben Tepic Zacoalco, (Luhr et al. 1985; Bourgois and Michaud 1991).

3.3. Graben Tepic – Zacoalco.

El graben Tepic-Zacoalco se formó por un régimen de extensión durante el plioceno-cuaternario (Nieto-Obregon et al. 1992; Legorreta et al. 1993; Rosas-Elguera et al. 1996), el cual es una estructura cortical con una dirección aproximada NW, donde sus fallas tienen una distancia aproximada de 250 km y un ancho entre ellas de 50 km (Frey et al. 2007).

El graben Tepic-Zacoalco está constituido por una serie de grabenes y semi grabenes los cuales se dividen según Ferrari y Rosas-Elguera 2000 en:

1) Sistema de fallas Pochotitán las cuales se encuentran al NW y que son un sistema de fallas listricas normales de alto ángulo de inclinación con orientación NNE.

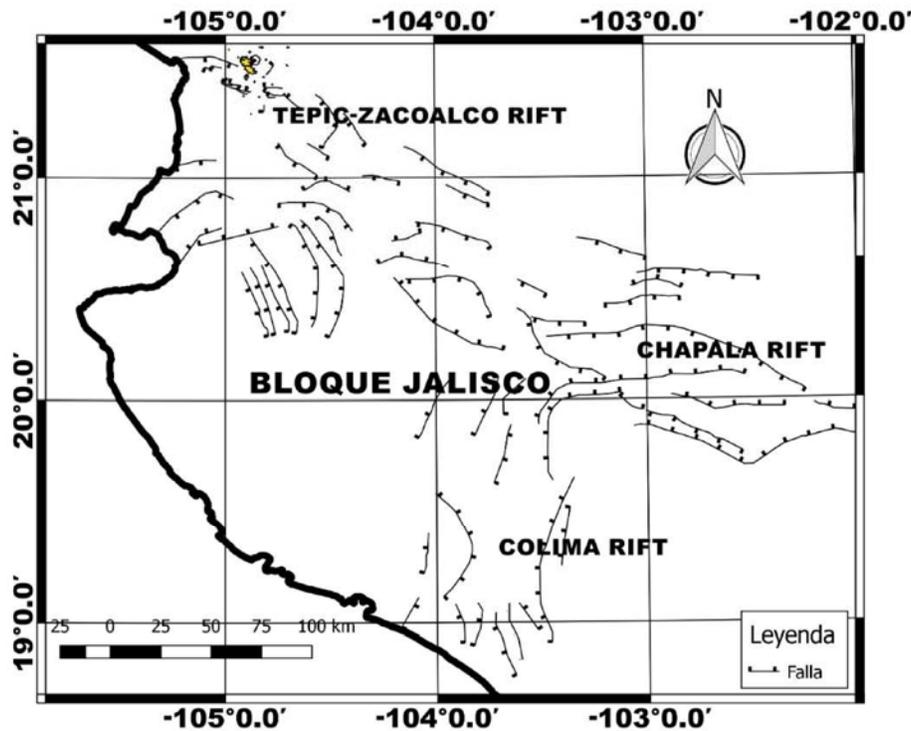


Figura 5. Bloque Jalisco.

- 2) Escalones de rift que se encuentran en el centro y que consta de dos graben llamados Compostela-Ceboruco y el graben Plan de Barrancas-Santa Rosa y
- 3) Fallas localizadas en el Bloque Jalisco conformado por un semi graben llamado Amatlán de Cañas.

Dentro del sistema de fallas Pochotitan se encuentra el valle de Matatipac, el cual es objeto de este estudio.

3.4. Geología del local.

Como ya se mencionó anteriormente el valle de Matatipac se encuentra en la parte central del estado de Nayarit, uno de los mayores aportes de los suelos en el valle de Matatipac lo generó el volcán San Juan que se encuentra al poniente de la ciudad de Tepic, se caracteriza por altos niveles de andesita-dacita y pumicita.

Se estima para estas rocas un espesor máximo de 540 m, su depósito se relaciona a una depresión tectónica reciente, el hundimiento de bloques en el Cuaternario Medio permitió la acumulación de sedimentos volcanoclásticos, depósitos

pumicíticos, de toba riolítica y conglomerado polimíctico de ambiente lacustre (SGM, 1988).

Como eventos más recientes se tiene la unidad llamada aluvión (Qa1) cubriendo parcialmente a rocas anteriores. Debido al volcán San Juan, se presenta el depósito de pumicitas, se trata de un vulcanismo piroclástico félsico, de tipo Pliniano y Peleano, en donde se tiene mayormente una secuencia de flujos con intercalación de brecha de la misma composición y arenas, depositadas por aire, y escasas intercalaciones de toba riolítica (SGM, 1988).

La pumicita se distribuye en un área amplia cubre la mayor parte del volcán San Juan, volcán Cerro Alto, faldas del cerro Coatepec, ciudad de Xalisco y la porción poniente de la ciudad de Tepic. Luhr F.J. (2000), da una estimación de los espesores piroclásticos de 15 m con una extensión aproximada de 15 km a partir del cráter del volcán San Juan.

El volcán San Juan emitió pumicitas como último evento, considerado por Ferrari L. et al. (1997), de edad aproximada a 15,000 años por relaciones estratigráficas. Las pumicitas se consideran como un segundo evento de actividad explosiva del volcán San Juan hace 14,770, fecha que fue datada por el método de Carbono (Luhr F.J., 1999)

De acuerdo con (SGM, 1988) (Figura 7.) la geología se describe a continuación en el orden de las unidades más antiguas a las más recientes incluyendo la estratigrafía que se puede observar gráficamente en la (Figura 6).



Figura 6. Columna estratigráfica del Valle de Matatipac.

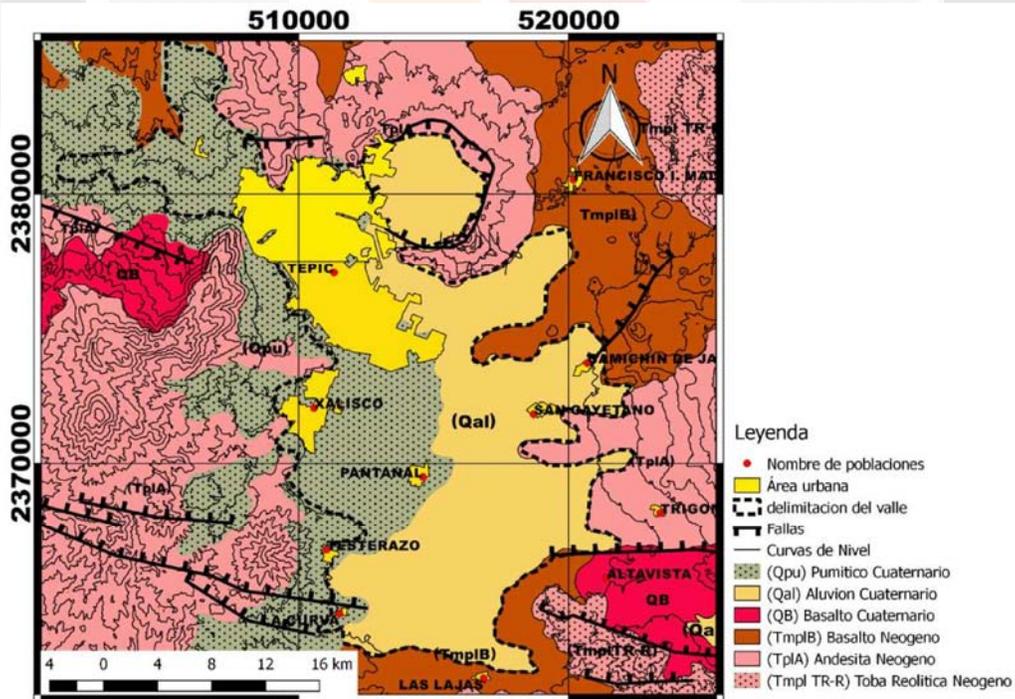


Figura 7. Mapa geológico modificado de (SGM, 1988).

Riolitas (TmplTR-R).

Se encuentran sobreyaciendo a las rocas andesíticas y tobas ignimbríticas, se presentan en forma de derrames y cuerpos dómicos de estructura fluidal, pseudoestratificadas con abundantes fragmentos de obsidiana.

Esta unidad de rocas pliocénicas se encuentra distribuida en los alrededores de la Caldera de Tepic (La Laguna) en algunas estructuras dómicas aisladas, en el Volcán Las Navajas y en el poblado Francisco I. Madero.

Andesitas Basálticas (TplA).

Estas rocas se encuentran en la parte oriental del área formando estructuras complejas, tales como el Volcán Sangangüey y otros de menor importancia, de franca composición basáltica; las rocas representativas de esta unidad presentan texturas de afanítica a porfídica, estructura compacta y color gris oscuro que intemperiza a gris verdoso, se le atribuye una edad del Plioceno.

Basaltos (TmplB).

Estas rocas se encuentran localizadas en la parte Este del valle y comprenden las rocas volcánicas jóvenes, representadas por amplias mesetas de espesor considerable, que se observan como acumulaciones de derrames densos que cubrieron el relieve preexistente a su emisión, presentan una textura afanítica que varía a vesicular, con cristales algo alterados por su exposición a los agentes atmosféricos, se observan en ciertos puntos, cubiertos por capas delgadas de material piroclástico.

Basaltos (QB).

Constituyen las emisiones volcánicas más recientes en el valle y están representadas por aparatos cónicos y cuerpos escoriáceos, distribuidos en forma dispersa, pero algunos siguen lineamientos de fallas superficialmente enmascaradas, dichos centros de emisión se encuentran inactivos en la actualidad, en los cuales el material expulsado se observa muy fresco, lo que revela su edad reciente.

En el campo se observan de color gris oscuro brillante, de textura vesicular y con cristales muy sanos, estos derrames marcan la etapa final del vulcanismo presente en el área.

Con esta unidad también se agrupó un afloramiento de cenizas volcánicas “Lapilli”, constituidas por fragmentos de varios tamaños, de estructura compacta, localizado en la parte central inferior de la Caldera de Tepic.

Finalmente tenemos una cubierta del cuaternario la cual consiste en:

Aluvión y Suelos (Qal).

En este grupo se incluyen materiales de acumulación formados por la alteración y disgregación de rocas preexistentes, expuestos al aire, la humedad y los efectos de la materia orgánica.

Su composición es limo-arcillosa y de fragmentos de pómez poco consolidados, son de colores diversos: café, rojizo, amarillento y gris claro, dependiendo de la roca que les dio origen.

Las mayores acumulaciones se encuentran en la parte NW y SW del valle, así como en las depresiones, transportados por corrientes fluviales y depósitos lacustres, con espesores que van desde pocos centímetros hasta algunos metros.

Esta unidad fue la última en acumularse y se encuentra en la parte superficial de toda la columna estratigráfica descrita.

Pumicitas (QPu)

Materiales sueltos o poco consolidados de origen piroclástico que se observan en la parte Oeste del valle formando gruesos depósitos con alternancia de capas de grano fino con capas de fragmentos de grano grueso de composición pumítica que originan pseudoestratos bien definidos y clasificados, se presentan poco alteradas y cubren pendientes suaves y abruptas que delimitan valles.

Su espesor varía de unos cuantos centímetros a algunos metros; estos materiales de origen explosivo, al compactarse y cementarse, formaron una brecha de color rojizo constituida de fragmentos mal clasificados, cementados en una matriz

tobácea que infrayace a tobas pumíticas, estas brechas se pueden observar en las inmediaciones de la Ciudad de Tepic, existiendo algunos bancos de extracción; el origen de estas tobas y brechas se encuentran relacionado con el vulcanismo ácido reciente del Volcán de San Juan.

3.5. Acuífero del valle de Matatipac.

Por las condiciones geológicas en el subsuelo del valle, no se identifican unidades litológicas que puedan considerarse como confinantes de las zonas en donde se reportan separación entre niveles someros y profundos de agua (CONAGUA, 2003a). Las profundidades máximas exploradas en la zona del valle son de 250 a 300 m, en las que no se reportan unidades que puedan ser consideradas como el basamento del acuífero, de ahí que el espesor de la zona saturada del sistema acuífero se estima en 500 o 600 m de acuerdo con los resultados de los geotermómetros calculados con los análisis hidrogeoquímicos de la zona (CONAGUA, 2003a).

Este mismo documento reporta un sistema de flujo local en el centro del valle, en donde las aguas que se explotan provienen de los sistemas someros; situación que se comprueba por la gran cantidad de norias que existían en el valle, las cuales, hoy en día han desaparecido en su mayoría. Por otra parte, el sistema local descarga agua para mantener el nivel base del Río Mololoa, sin embargo el nivel y flujo de este río también se ha visto mermado en los últimos años.

De acuerdo con (CONAGUA, 2003a), el sistema acuífero fue clasificado como un acuífero libre, el estudio menciona también que las direcciones del flujo subterráneo siguen de forma natural al de las corrientes superficiales, cuyas descargas principales se realizan en la corriente del Río Mololoa.

Datos del 2002 indican que por esos años ya se presentaba una sobreexplotación local, manifestada por el descenso progresivo del nivel dinámico de los aprovechamientos del valle, causando la desaparición de norias y asentamientos del terreno. El día de hoy es de esperar que las mediciones y observaciones recientes relaten una historia más crítica, aunque no se tiene la certeza de con que magnitud se esté sobreexplotando el acuífero, ya que los registros de pozos

administrados por el Ayuntamiento de Tepic no existen, o bien, estos trabajos los consideran de su exclusividad por lo que no se encuentran disponibles para su consulta.

Los niveles estáticos en la zona han evolucionado en un franco descenso, lo cual es de esperarse ya que con el paso del tiempo y el crecimiento de la población aumenta la necesidad de abastecimiento de agua.

En la (Figura 8) se observa que la variación de los niveles estáticos están en un rango de 1 hasta 9 metros, este abatimiento comprende el periodo de mayo de 1985 a abril del año 2003 (CONAGUA, 2003a).

Se observa que, en las fechas de estos análisis, el mayor abatimiento se localiza en la zona central del valle, hacia el sur de la ciudad de Tepic, y los menores abatimientos se presentan en la parte norte de la ciudad. El abatimiento mayor en la parte central se produjo debido a que la mayor concentración de pozos de extracción está ubicada en estas áreas.

La evolución media es del orden de -3 a -4 m en dicho período, equivalente a una ritmo promedio anual de abatimiento hasta de 0.5 m (CONAGUA, 2003a).

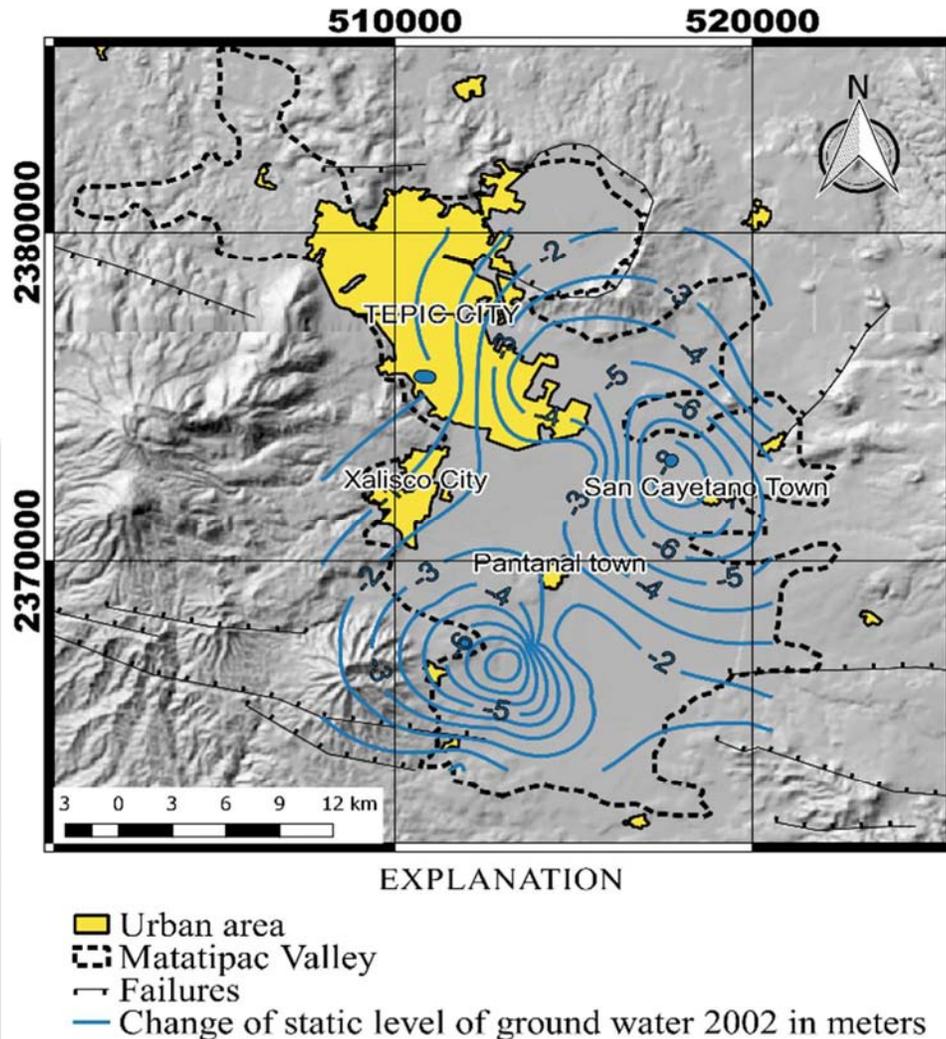


Figura 8. Abatimientos del nivel estático de 1985 a 2003 en metros

3.5.1. Mediciones geofísicas.

En el año de 1980 se realizó un estudio llamado “Estudio geohidrológico preliminar de las zonas Matatipac – Zacualpan y Las Varas, Nayarit” en el cual se obtuvieron 3 perfiles de sondeos eléctricos verticales, a los cuales en este trabajo se les da una nueva interpretación, el método utilizado fue el de Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs) con un arreglo Wenner; en la (Figura 9) se puede observar la localización de los trabajos realizados, la nomenclatura es la usada en el trabajo antes mencionado.

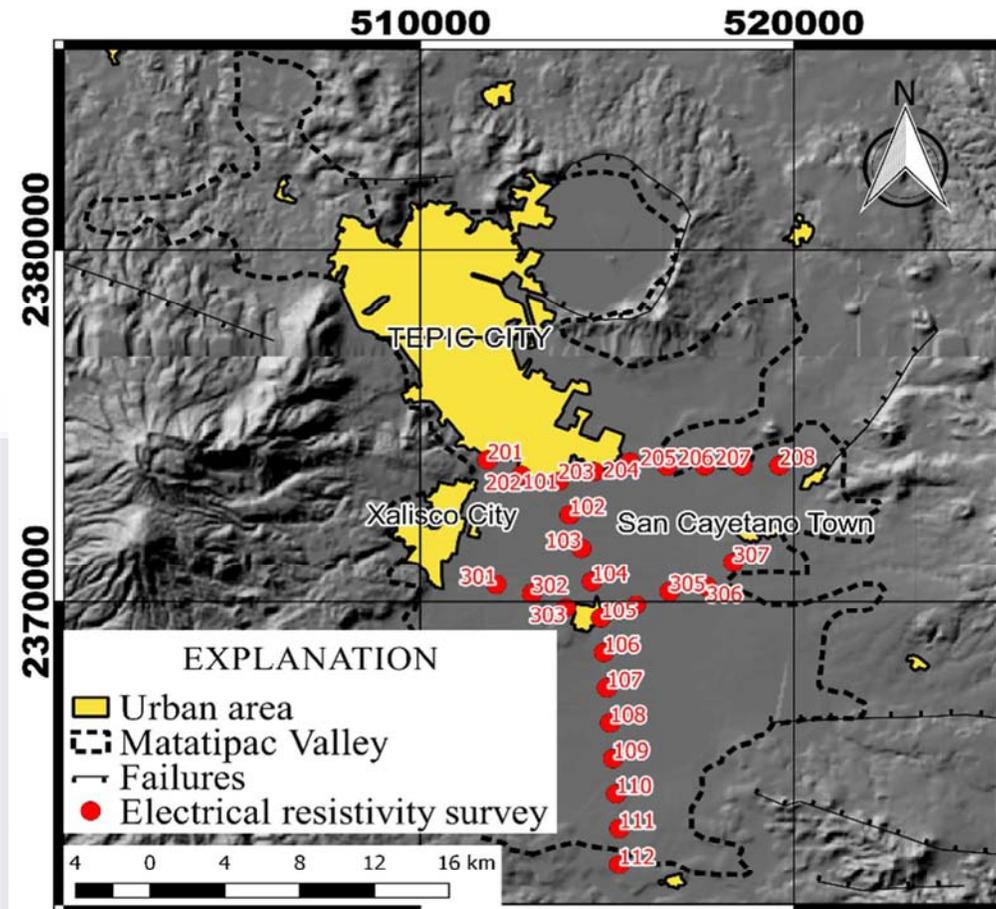


Figura 9. Localización de perfiles SEV'S.

La nueva interpretación de los SEVs permitió caracterizar 4 unidades hidrogeológicas en base a los intervalos de valores de la resistividad que se observaron en prácticamente todos los perfiles. Los modelos 2D de los sondeos y su interpretación se muestran en las Figuras 10, 11 y 12.

Los SEVs muestran una disminución de la resistividad entre los 10 y 20 metros lo que sugiere que el espejo de agua se encuentra a esta profundidad, y es alojado por la unidad geohidrológica U3 y U4 que se interpretan como las unidades hidrogeológicas que se están aprovechando actualmente.

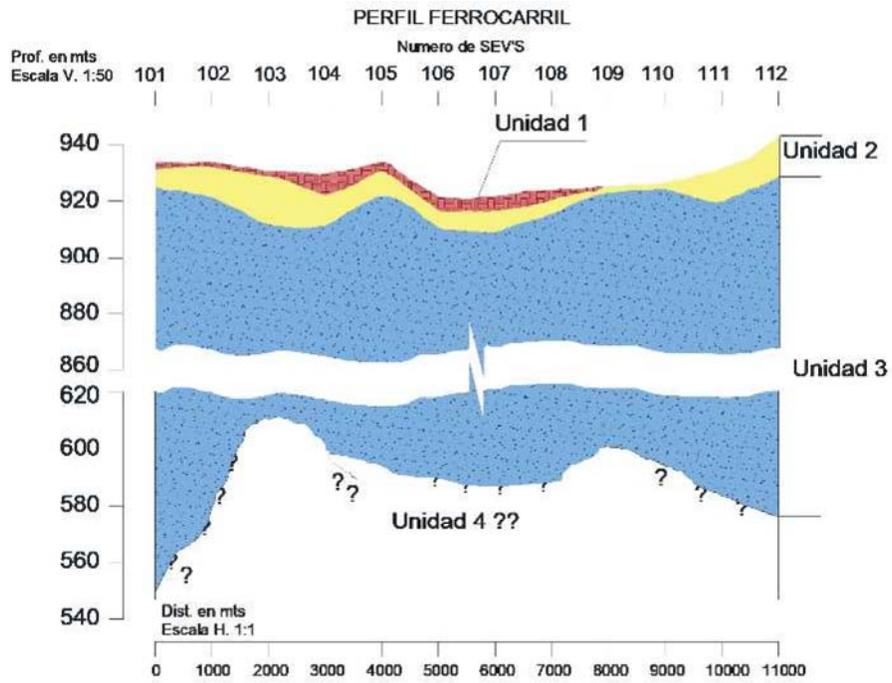


Figura 10. Perfil Ferrocarril.

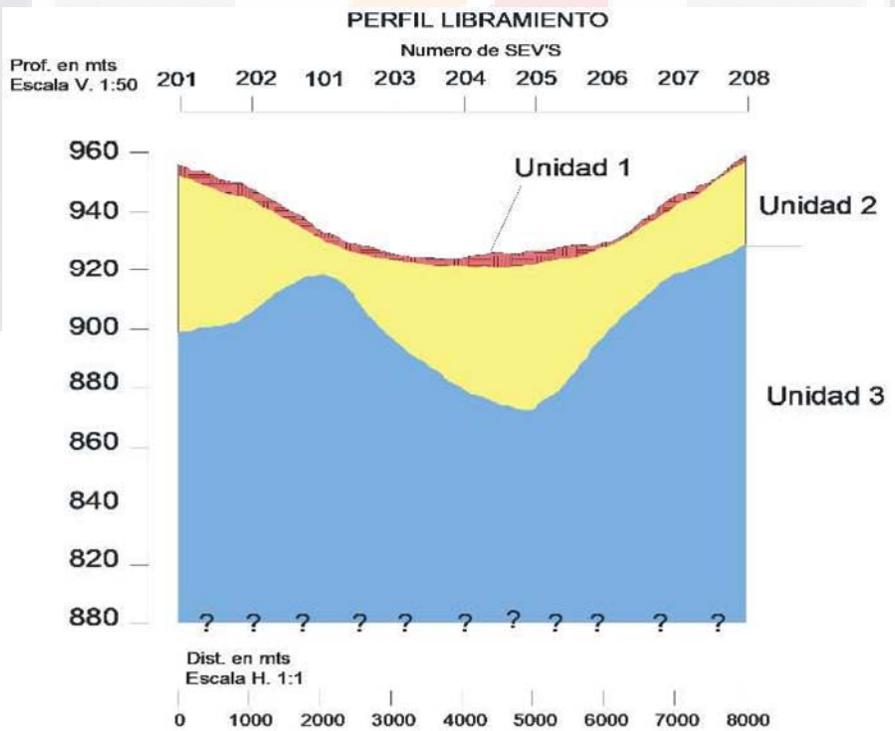


Figura 11. Perfil Libramiento

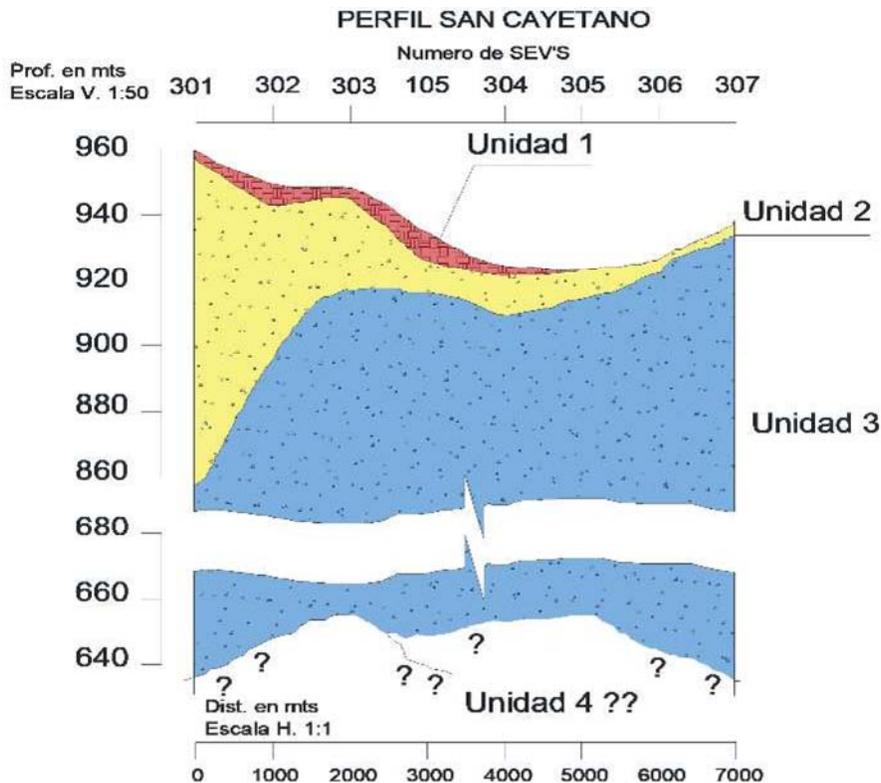


Figura 12. Perfil San Cayetano

El perfil I, llamado en este texto “Perfil Ferrocarril” que va del Sondeo 101 al 112 y que tienen una separación de aproximadamente un kilómetro entre sí, se pueden observar 4 unidades de importancia.

La Unidad 1 (100 a 400 Ohm-m), es una capa pequeña que se asocia a aluviones de tamaño grueso que se han ido depositando e intemperizando con el paso del tiempo esta capa no presenta más de 2 metros de espesor.

La Unidad 2 (5 a 100 Ohm-m) es una capa que va desde un metro hasta diez y se asocia a aluviones depositados de tamaños gruesos a medios, así como material pumicitico depositado por la actividad del volcán San Juan.

La Unidad 3 (50 a 1700 Ohm-m) se interpreta como un material muy parecido al de la Unidad 2. Los valores de resistividad de esta unidad, su profundidad y espesor, sugieren que es la unidad acuífera aprovechable. Se interpreta como constituida por aluviones de medios a gruesos con arenas pumiciticas e incluso arenas de origen

volcánico saturadas, limos y arcillas. No fue posible determinar el espesor de esta unidad.

La Unidad 4 (15 a 100 Ohm-m) de composición y espesor desconocidos

Los espesores de cada unidad para cada uno de los perfiles se resumen en la tabla 1.

Perfil	Unidad 1	Unidad 2	Unidad 3	Unidad 4
1.Ferrocarril	1 a 2 mts	10 a 30 mts	200 a 400 mts	¿?
2.Libramniento	1 a 2 mts	10 a 60 mts	¿?	No
3.Pantanal	1 a 2 mts	10 a 100 mts	50 a 400 mts	¿?

Tabla 1. Espesores de las unidades electro-estratigráficas observados en los perfiles de las figuras 10, 11 y 12.

3.5.2. Rellenos del cuaternario.

Este par de unidades del cuaternario Qpu y Qal se encuentra en la parte superficial de gran parte del valle, los hundimientos diferenciales se dan en estos materiales, el suelo correspondiente al elemento Pumiciticos (QPu) corresponde a gravas arenas de origen volcánico muy apreciadas en la industria de la construcción lo que explica la existencia de un número importante de áreas de extracción de materiales pétreos.

Es este material un producto del vulcanismo piroclástico félsico asociado al volcán San Juan; esta unidad se presenta en una secuencia de flujos con intercalación de brecha y arenas de la misma composición con escasas intercalaciones de toba riolítica-ignimbrita.

El material pumicítico blanquizco observado, se presenta en cortes de caminos y bancos de material en un radio de al menos ocho kilómetros desde el cráter del cerro de San Juan. Esta capa se compone de clastos pumicíticos empacados en

capas con espesor que varía decenas de metros, originados a partir del último evento del volcanismo en la zona.

En el corte expuesto en un banco de explotación de materiales se observa también un paquete aluvial conglomerático no consolidado muy poroso de potencia considerable intercalado con capas delgadas y escasas de sedimentos lacustres **Figura. 13, 14, 15, 16.**

En cuanto al Aluvión (Qal) que se concentra en la parte oeste de la ciudad de Tepic, se puede describir como acarreo producto de la degradación y descomposición de materiales más antiguos, quizás procedentes de los volcanes Las Navajas, Santa María del Oro, Tepetitlic, San Juan entre otros.



Figura 13. Sedimentos aluviales de acarreo.



Figura 14. Cortes de banco de materiales en el volcán San Juan.



Figura 15. Cortes de banco de materiales en el volcán San Juan.



Figura 16. Cortes de banco de materiales en el volcán San Juan.

3.5.3. Características físicas del relleno pumicitico.

El relleno del graben se dio con materiales volcánicos que paulatinamente fueron depositados y acarreados que se compactaron de forma natural por superposición de capas; en estudios Geotécnicos se obtuvieron valores de $N_{60} > 25$, masas específicas de 4400 N/m^3 , Límite líquido 25 o inexistentes y absorciones de hasta el 115% de su peso.

Debido a que en la zona no existen pozos de extracción profundos no se tiene registro del espesor de estos estratos y tampoco a que profundidad se encuentra el basamento rocoso. El material superficial es bastante favorable para la construcción de cimentaciones ya que su capacidad portante es relativamente alta.

Se obtuvieron siete muestras (**Tabla 2.**) de distintos sitios (**Figura 17**) donde afloraba el estrato de material pumicitico para su análisis en laboratorio, en sacos con aproximadamente 20 kilos y bolsas de 1 kilo para preservar su humedad natural.

Muestra	Localización (UTM)		Profundidad (m)
	X	Y	
1	506402.29	2379338.84	1
2	507390.28	2380009.04	3
3	508289.44	2379709.49	6
4	506058.30	2381524.67	3
5	508487.13	2375032.10	10
6	508629.92	2373959.13	8
7	509301.00	2372074.00	8

Tabla 2. Resumen de localización de muestras.

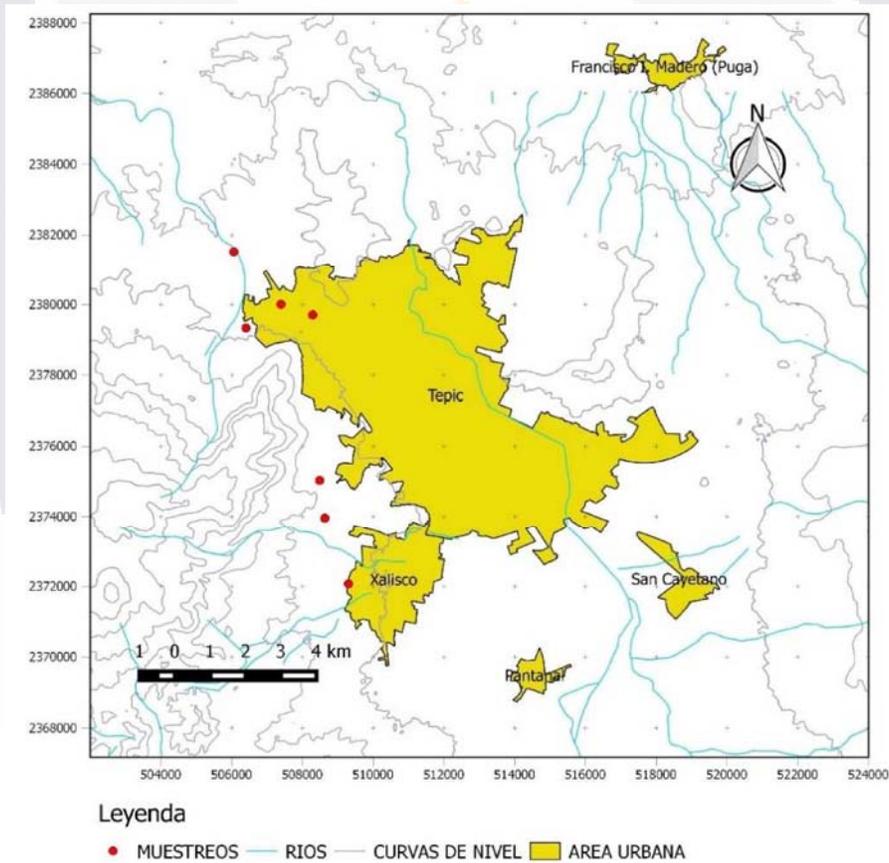


Figura 17. Mapa de localización de muestreos.

3.5.4. Resumen de resultados de pruebas de laboratorio.

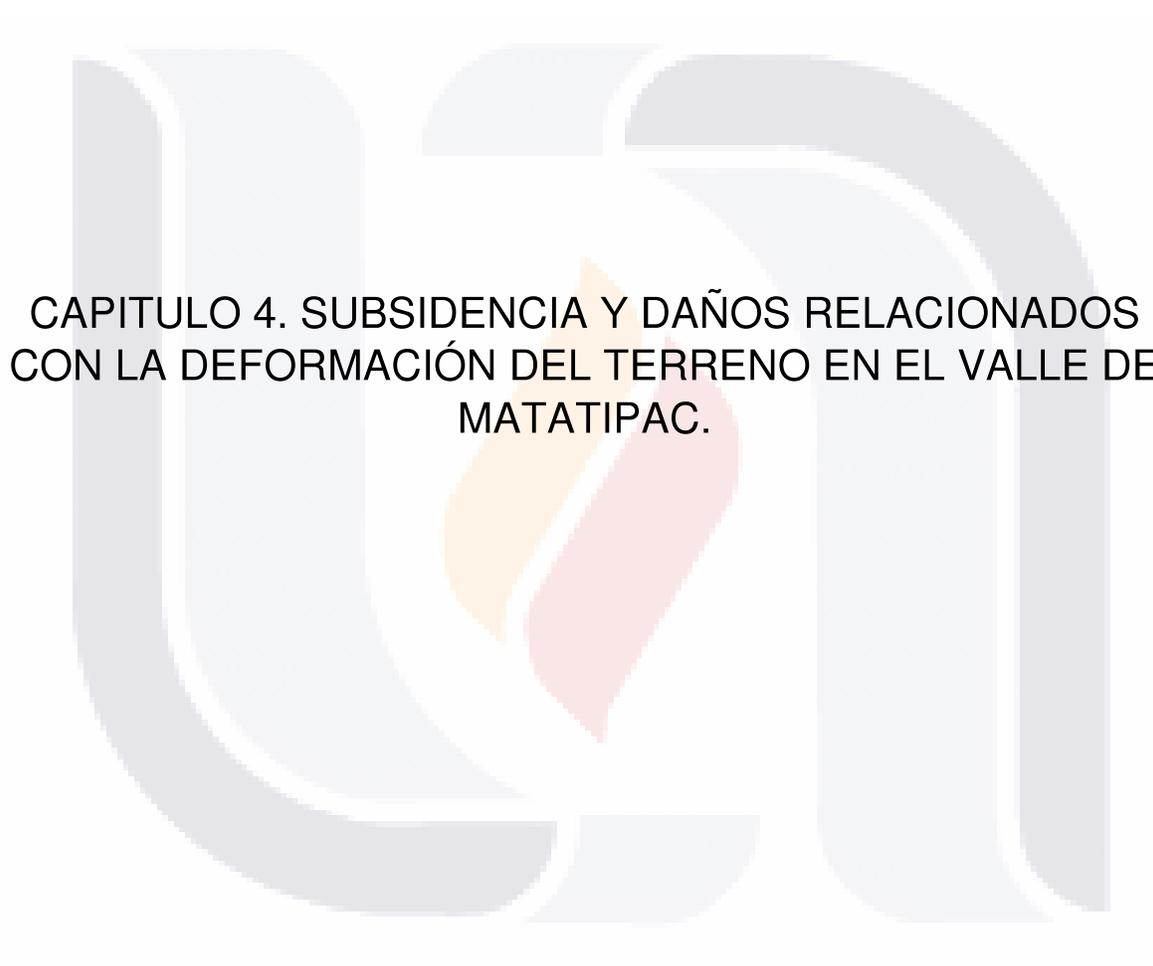
De cada una de las muestras se procedió a realizar ensayos de peso volumétrico, humedad natural, absorción, límite líquido, obtuvieron los siguientes datos (Tabla 3.):

Muestra	Peso volumétrico seco (kg/m³)	Humedad natural (%)	Absorción (%)	Límite líquido
1	467.35	86.92	109.87	35.5
2	450.00	2.18	99.60	36
3	468.38	84.05	115.47	36.6
4	519.39	28.21	95.70	31
5	522.45	68.54	86.40	22.4
6	492.86	21.26	87.40	
7	526.53	36.48	93.85	

Tabla 3. Resumen de pruebas de laboratorio realizadas al agregado pumítico.

Es de especial atención que la absorción es relativamente alta y que el peso volumétrico seco es muy bajo en comparación con los otros materiales que se pueden encontrar en la región, el material pumítico es muy rentable en la explotación de materiales por sus propiedades índice y el bajo peso que presentan para las estructuras.





CAPITULO 4. SUBSIDENCIA Y DAÑOS RELACIONADOS
CON LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO EN EL VALLE DE
MATATIPAC.



CAPITULO 4. SUBSIDENCIA Y DAÑOS RELACIONADOS CON LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO EN EL VALLE DE MATATIPAC.

4. 1. Introducción.

En el Valle de Matatipac los daños causados por el fenómeno de subsidencia no han sido lo suficientemente notorios para alarmar a los gobiernos locales o a la ciudadanía afectada, es complicado además diferenciar los daños causados por asentamientos diferenciales debido a otras causas, de los daños causados por subsidencia.

Esto sumado a que no existe evidencia concluyente sobre la presencia de agrietamientos en el valle, propicia un desinterés de las autoridades, y en general de la comunidad de geotecnistas, en estudiar más a fondo el fenómeno.

Sin embargo, en el año 2014 se publicó un estudio ([Chaussard et al., 2014](#)), el cual presenta evidencias de hundimientos regionales del terreno en varias ciudades del país enclavadas en el cinturón volcánico mexicano. Son ciudades con población de más de 100,000 habitantes y desplantadas sobre rellenos compresibles, entre las que se listan Morelia, Aguascalientes; Ciudad de México, Celaya, Querétaro, Irapuato, San Luis Potosí, Ahuacatlán, incluyéndose también la ciudad de Tepic, entre otras.

Para dicho estudio se utilizaron más de 600 imágenes SAR de pistas ascendentes adquiridas por el satélite ALOS entre 2007 y 2011, abarcando un área de 200,000 km².

4.2. Subsistencia en el valle de Matatipac.

Para la ciudad de Tepic en particular, las adquisiciones utilizadas fueron a partir del 30 de abril del 2007 hasta el 24 de diciembre de 2011, con esto se obtuvo un mapa de velocidades medias y se identifican áreas de deformación activas.

En la [figura 18](#) se observa en colores azules las velocidades positivas lo que quiere decir movimientos hacia el satélite y las velocidades negativas en rojo representan

Capítulo 4. Subsistencia y daños relacionados con la deformación del terreno en el valle de Matatipac.

subsistencia y en la **figura 19** se muestra la velocidad del movimiento vertical en cm en 3 diferentes puntos en la ciudad de Tepic.

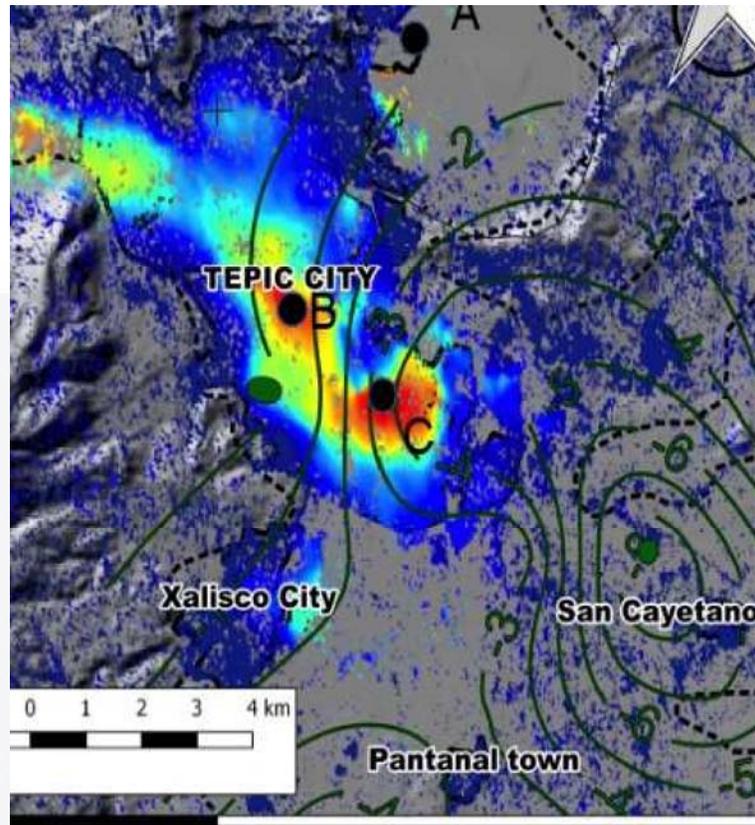


Figura 18. Mapa de Velocidad y nivel freático en el año 2002 modificado de (Chaussard et al., 2014)

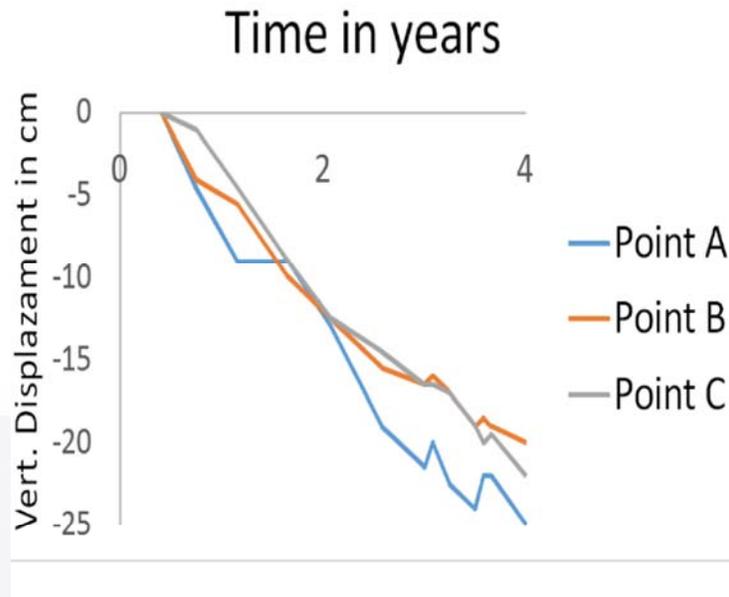


Figura 19. Desplazamiento vertical por año en 3 puntos, modificado de (Chaussard et al., 2014).

En el mismo trabajo presentado por Chaussard et al (2014), propone una clasificación de la subsidencia según sus características. La ciudad de Tepic se colocó en la categoría de Subsistencia rápida a escala local no limitada por agrietamientos donde se tienen hundimientos mayores de 5 cm por año y la afectación va de 10 a 100 km². Los resultados del estudio muestran que Tepic está afectado por subsidencia aproximadamente en 20 km² la cual ocurre de forma distribuida a lo largo de la ciudad y tiene un rango de hasta 7 cm de hundimiento por año.

La subsidencia que experimenta el valle de Matatipac se concentra en los centros urbanos de Tepic y Xalisco, no se tiene reporte de hundimientos en las zonas de explotación agrícola. Estos hundimientos se localizan en los rellenos aluviales y pumiciticos del cuaternario y están delimitados por el volcán San Juan al poniente y el Rio Mololoa al Oriente de la ciudad; también se detectaron puntos de subsidencia dentro de lo que es la caldera de Tepic en la zona que localmente se conoce como la Laguna.

Capítulo 4. Subsistencia y daños relacionados con la deformación del terreno en el valle de Matatipac.

4.3. Problemas asociados a subsidencia.

Por otro lado, un fenómeno que va directamente ligado con la subsidencia es el de los agrietamientos del terreno. En la literatura no se ha reportado este fenómeno en la zona del valle, sin embargo, existe evidencia de agrietamientos en la parte sureste de la ciudad de Tepic, los cuales atraviesan varias colonias y el edificio donde se encuentran alojadas las oficinas de Tránsito y vialidad del estado de Nayarit.

Se hizo un levantamiento de deterioros a infraestructura urbana como banquetas, jardineras, ruptura de tubería, muros en casas habitación entre otros y se identificó un patrón de daños alineados que coincide con los gradientes máximos de velocidad derivados del mapa de [Chaussard et al \(2014\)](#), lo cual sugiere sobre la génesis de un agrietamiento en esta zona **Figura 20**.

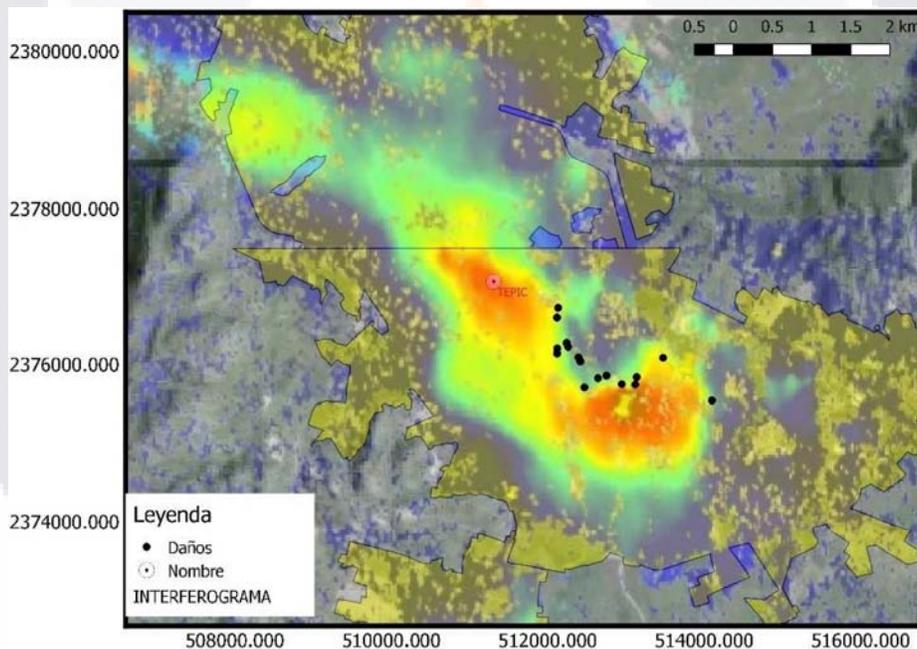


Figura 20. Daños en infraestructura en la ciudad de Tepic.

La deformación diferencial que se presenta es de apenas unos pocos centímetros, tanto, que para el ojo no entrenado pueda ser desapercibido (**Figura. 21 y, 22**), sin embargo, tiene todas las características de una fractura debida a perdida de sustentación hidráulica.

Capítulo 4. Subsistencia y daños relacionados con la deformación del terreno en el valle de Matatipac.



Figura 21. Fractura en estacionamiento de tránsito y vialidad del estado de Nayarit vista hacia el Oeste.

En **Figura 23.** se presenta un mapa de la traza posible de la falla.



Figura 22. Fractura en estacionamiento de tránsito y vialidad del estado de Nayarit vista hacia el Este.

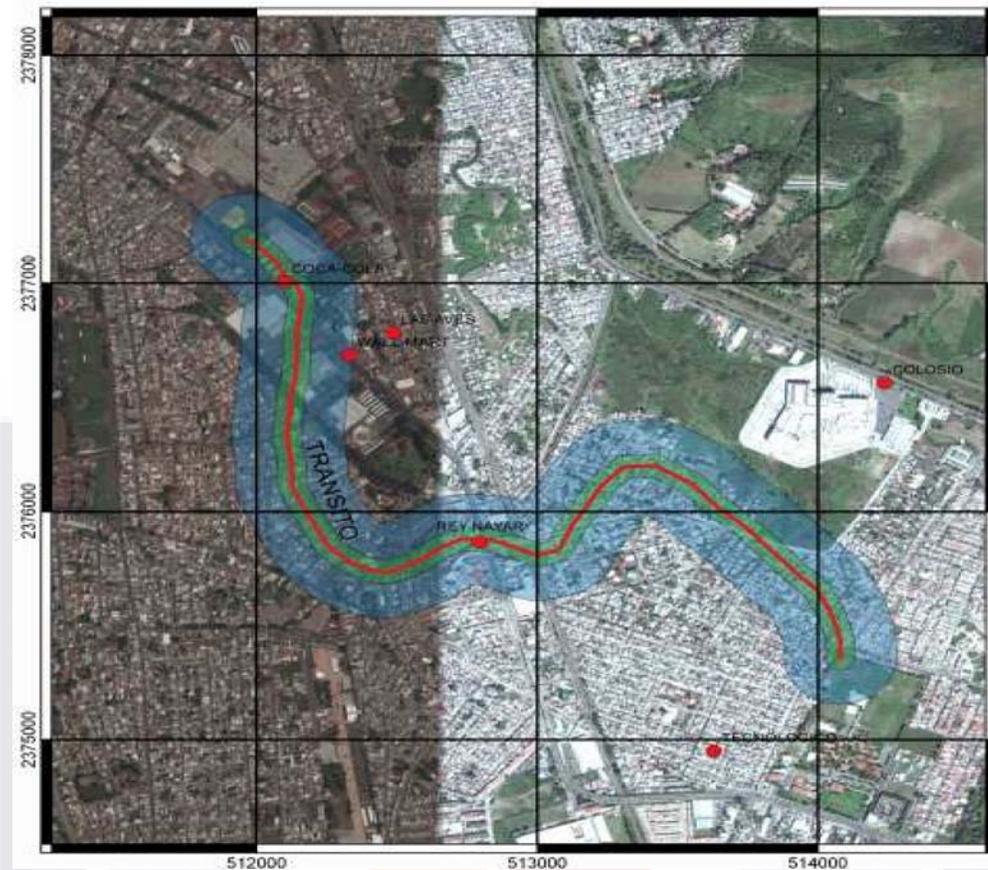


Figura 23. Posible traza de la fractura.

Si comparamos los abatimientos de nivel freático de los que se tienen datos (1985 a 2002) con los hundimientos reportados del interferograma Figura 24, no se observa correlación con las deformaciones, esto puede ser explicado de la forma siguiente.

La primera imagen que se utilizó para la realización del interferograma fue del año 2007 y la última es del año 2011, es de esperar que, en estos años de desfase, la configuración de los abatimientos sea diferente.

En la zona cercana al Instituto Tecnológico de Tepic (una de las zonas más afectadas por el hundimiento) el abatimiento evolucionó de -3 metros a -5.5 metros y de -4 metros a -6.5 metros aproximadamente del 2007 al 2011. Esta suposición de abatimiento es bastante conservadora, ya que es probable que la tasa de abatimiento haya crecido exponencialmente en los últimos años junto con el crecimiento de la población.

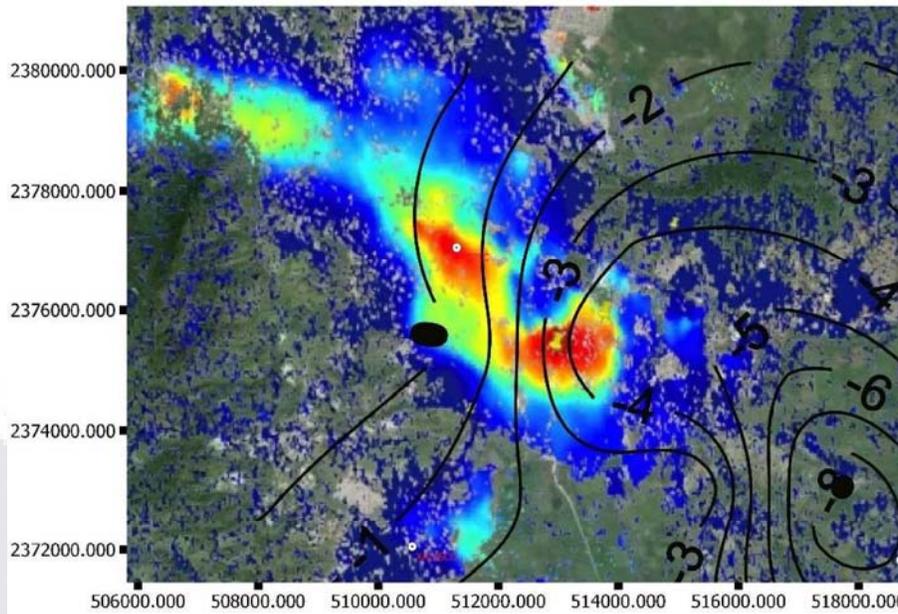


Figura 24. Comparación entre hundimientos y abatimientos de nivel freáticos.

4.4. Interferogramas 2014 a 2018

Para esta tesis se consiguieron imágenes de radar del satélite Sentinel 1, a partir del 21 de octubre del año 2014 hasta el 15 de abril de 2018, es decir, que no se tienen datos de los años 2012 y 2013, por lo tanto, no se tiene un acumulado histórico de hundimientos.

Se usaron 16 imágenes Sentinel 1 Complejas "Single light complex" (SLC), para el periodo (2014-2018), adquiridas a la Agencia Espacial Europea (ESA European Space Agency). De las cuales se seleccionaron cuatro pares interferométricos complejos con la finalidad de obtener resultados veraces, todo el procesamiento de las imágenes se hizo en el software SNAP (Sentinel Application Platform).

A continuación, se muestran los resultados de los interferogramas diferenciales obtenidos a partir de 4 pares interferométricos correspondientes a las fechas 2014/10/21 - 2015/08/17, 2015/08/17 - 2016/06/12, 2016/06/12 - 2017/08/30, 2017/08/30 - 2018/04/15, para la zona Acuífero del Valle de Matatipac. Los interferogramas implican una aproximación asociada a la deformación del terreno del área iluminada por el radar en valores complejos de ciclos 2π que en términos gráficos se asocia a un ciclo de color completo en el mapa.

Capítulo 4. Subsistencia y daños relacionados con la deformación del terreno en el valle de Matatipac.

En las Figuras, 25, 26, 27, 28 se muestra los mapas diferenciales, donde los ciclos de color (2π) se observan completos lo que indica un factor de cambio; los cuales se concentran en las zonas urbanas de Tepic y Xalisco. Cabe destacar que un ciclo de color del azul al rojo indica que la distancia disminuye entre el sensor y el terreno, mientras que cuando el ciclo es invertido indica un aumento de la distancia existente entre el sensor y el terreno.

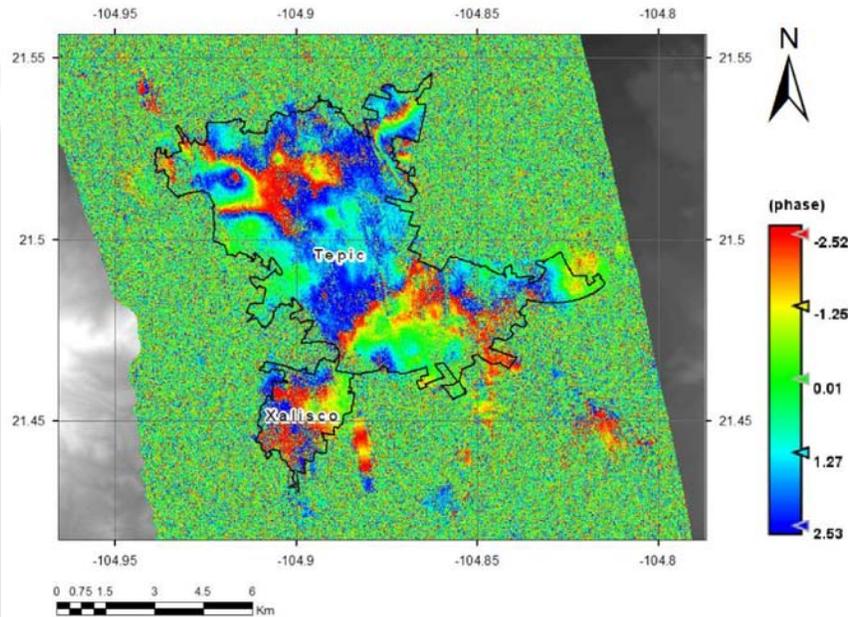


Figura 25. Par interferométrico 2014/10/21 - 2015/08/17.

Capítulo 4. Subsistencia y daños relacionados con la deformación del terreno en el valle de Matatipac.

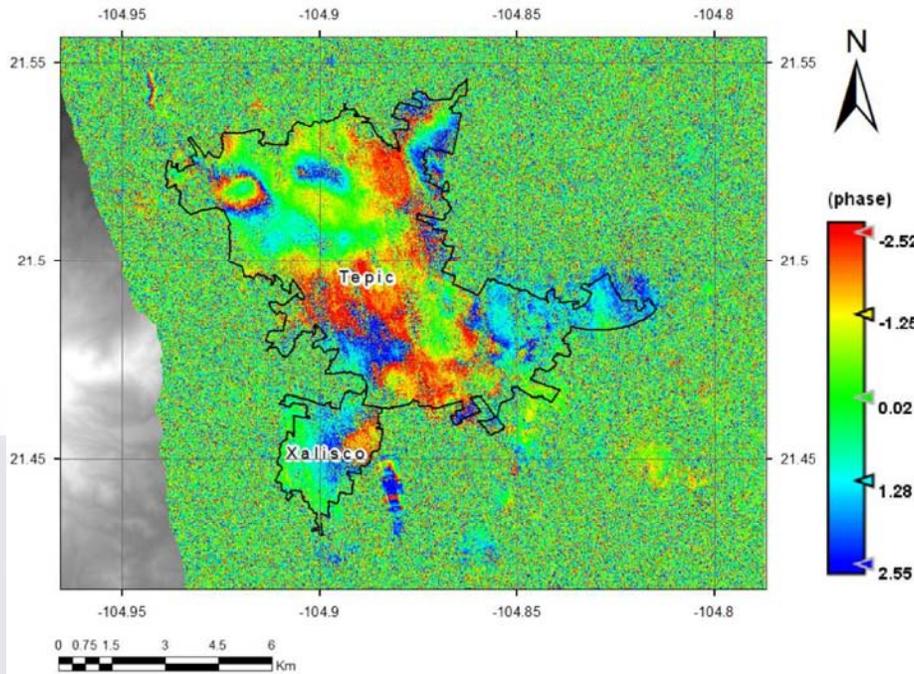


Figura 26. Par interferometrico 2015/08/17 - 2016/06/12.

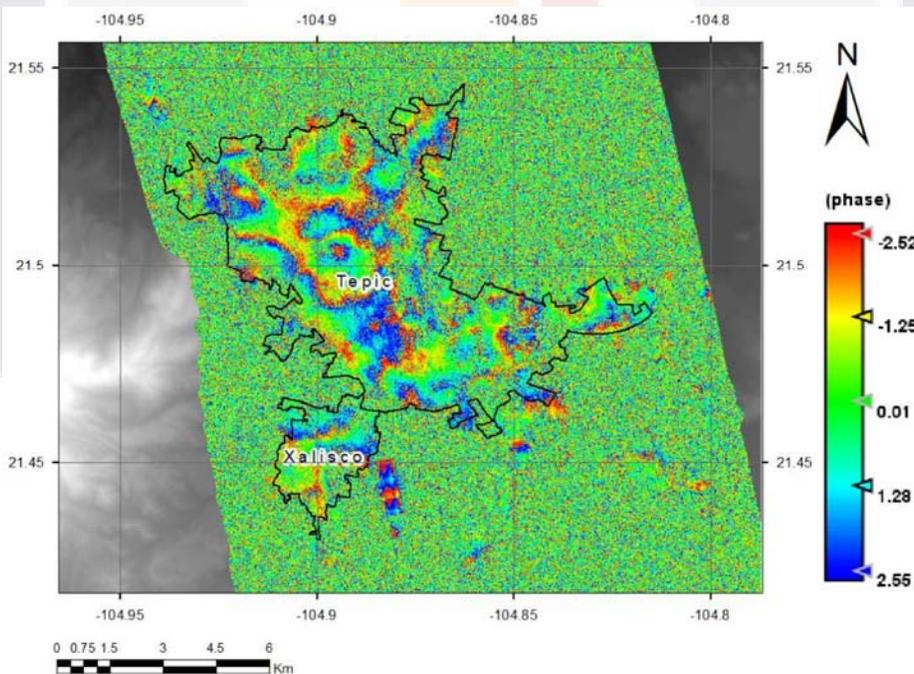


Figura 27. Par interferometrico 2016/06/12, 2016/06/12.

Capítulo 4. Subsistencia y daños relacionados con la deformación del terreno en el valle de Matatipac.

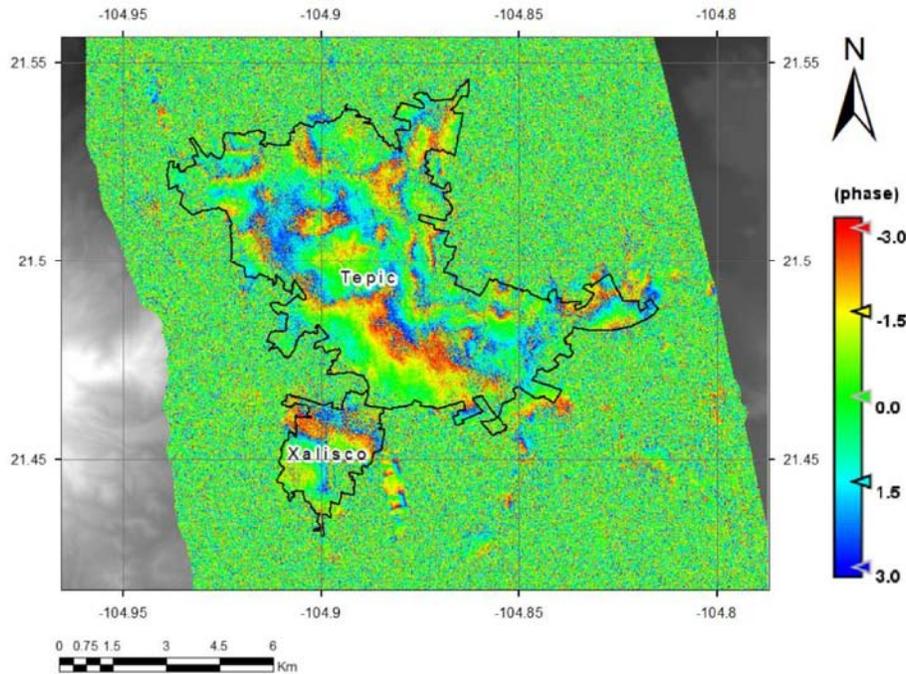


Figura 28. Par interferométrico 2017/08/30 - 2018/04/15.

4.5. Conclusiones y discusión de resultados.

Para el caso del valle de Matatipac, no se conoce a ciencia cierta cual es el estado de los daños causados por subsidencia en infraestructura y tampoco daños a particulares. Se tiene poca información en general ya que es un fenómeno que todavía no ha causado alarma en la población.

Desde el año 2007 es que se tiene monitoreado el valle de Matatipac con interferometría diferencial, reportándose los mayores movimientos en la zona centro sur y centro norte de la ciudad de Tepic.

Los interferogramas presentados en esta tesis muestran gran variación de movimientos en las diferentes fechas que fueron analizadas, sin embargo, los mayores cambios mostrados siguen siendo en las mismas áreas. Como ejemplo podemos nombrar en la zona centro sur colonias como, Tecnológico, Dos de Agosto, Hermosa provincia, Matatipac, Gobernadores, entre otras y en la zona centro norte colonias como Fovissste, El Rodeo, Santa Teresita, Heriberto Casas etc.

Capítulo 4. Subsistencia y daños relacionados con la deformación del terreno en el valle de Matatipac.

El monitoreo de la subsidencia con interferometría diferencial es una herramienta bastante poderosa para recaudar información acerca de las zonas afectadas por hundimientos, con esta técnica se puede conocer también, el espacio donde existen los mayores gradientes de asentamientos los cuales se asocian a la aparición de fracturamientos del terreno.

Todavía no existe una metodología que logre acoplar esta técnica para la predicción de agrietamientos y su evolución, es por eso que se vuelve necesario tomar en cuenta otros métodos indirectos de observación como lo son los modelos analógicos para poder entender y observar la naturaleza de un fracturamiento por subsidencia.





CAPITULO 5. MODELO ANALÓGICO.



CAPITULO 5. MODELO ANALÓGICO.

5.1. Introducción.

Los modelos a escala son utilizados con el fin de obtener resultados del comportamiento de fenómenos que en la naturaleza no son posibles observar con cierto control en las variables. Para que los resultados obtenidos en un modelo a escala sean extrapolables a la escala real, se deben satisfacer dos criterios:

1) el modelo debe ser geoméricamente similar. La similitud geométrica puede establecerse mediante una escala de longitudes como la razón entre el sitio y el modelo.

2) el modelo debe ser dinámicamente similar. La similitud dinámica establece que los dos sistemas con fronteras geoméricamente iguales tengan patrones geoméricamente similares, en instantes de tiempo correspondientes.

Esto requiere que todas las fuerzas individuales que actúan sobre elementos correspondientes tengan las mismas razones (proporciones) en los dos sistemas. El problema principal en el desarrollo de modelos físicos no es encontrar los requerimientos de similitud geométrica, sino asegurar la similitud dinámica.

Muchos materiales, están sometidos a fuerzas o cargas que pueden variar a través del tiempo, ejemplo de ello puede ser un suelo sometido a cargas derivadas a partir de la construcción de una cimentación que soportará una estructura o bien la construcción de un depósito que contendrá algún líquido en su interior, debido a esto es necesario conocer las características de los materiales que estarán sometidos a dichos requerimientos de esfuerzos.

El comportamiento mecánico o las propiedades mecánicas de un material definirán el comportamiento y evolución del sistema que está formado por dicho material, ya que reflejan la relación entre la deformación y las fuerzas o situaciones desfavorables que perturben su equilibrio natural; el material del cual está formado un acuífero no es la excepción.

5.2. Desarrollo de un prototipo.

Con el fin de obtener información sobre el comportamiento de un acuífero bajo el efecto de subsidencia, se elaboró un prototipo de un modelo a escala, con el cual se reprodujo el cómo evolucionan los hundimientos en un material puramente friccionante y cómo es la génesis de los agrietamientos debidos a la deformación vertical del terreno y al basamento indeformable irregular que subyace al material sedimentario, el cual tienen diferente espesor y en consecuencia, los asentamientos son mayores en donde este es también mayor.

Cuando las deformaciones diferenciales tienen lugar, las partículas de suelo experimentan un esfuerzo de cortante producto de la diferencia de asentamientos, su resistencia a la fractura está determinada por el ángulo de rozamiento de las partículas y su cohesión y por otro lado un esfuerzo de tensión provocado por la deformación longitudinal derivada del mismo asentamiento cuya resistencia a la fractura es la atracción ejercida entre partículas o cohesión, si los esfuerzos de cortante y tensión generados superan la capacidad soportante del suelo, entonces se generan agrietamientos en el relleno.

La dificultad para observar el fenómeno de los hundimientos y la generación de fracturas es alta ya que la heterogeneidad de los materiales complican en gran medida la observación, debido a esto, un modelo analógico puede representar en buena aproximación las condiciones de campo. Una vez que el modelo tenga comportamientos parecidos a los realesse podrán proponer ecuaciones para explicar este fenómeno.

5.2.1 Materiales del prototipo.

Los materiales utilizados en el prototipo fueron: una caja de plástico de aproximadamente 30 cm de lado y 15 cm de altura, arena de sílice y grenetina natural, esta primera prueba se hizo con el fin de realizar pruebas preliminares, analizar su funcionamiento, resultados y establecer la viabilidad de realizar un modelo más perfeccionado, con más control de los factores que intervienen en su gestación y desarrollo.

Se presenta a continuación una serie de imágenes que explican las características del experimento realizado:

Se utilizó grenetina de color rojo para simular la capa compresible del acuífero, en este caso no se tomó en cuenta propiedades de escala geométrica ni dinámica, solo se requería tener información sobre el funcionamiento del modelo.

En la **figura 29 y 30** se observa la caja de plástico con el material en su interior. Se le colocó una hoja de papel bond como interface entre la arena de sílice y la grenetina, se colocó además en el fondo un cubo de concreto, el cual tomó la función de un basamento irregular



Figura 29. Colocación de grenetina color rojo como base.



Figura 30. Papel bond como interface y cubo de concreto como basamento.

En las **Figura 31 y 32** se observa la colocación de la arena de sílice en el modelo, esta capa se vertió de manera que no tuviera compactación y se dejó en reposo mientras la grenetina alcanzaba la temperatura ambiente.



Figura 31. Llenado de prototipo con arena sílice



Figura 32. Modelo ya completo para comenzar la prueba.

Una vez colocada la arena de sílice se dejó a temperatura ambiente para que la grenetina se derritiera (**Figura 33 y 34**), cuando esto sucedió la arena comenzó a tener deformaciones que se explicarán a continuación:



Figura 33. Modelo sometido a temperatura ambiente.



Figura 34. Grenetina drenándose por la parte inferior.

El experimento no permitió apreciar si la fractura que se desarrolló en el estrato de arena sílica comienza en la parte superior del cubo de concreto colocado debajo de dicho estrato; sin embargo, se pudo observar que la fractura concuerda con los lados del cubo de concreto, y se genera en forma diagonal desde su principio. Aquí se hipotetizó que la orientación en diagonal de la fractura tiene relación con el ángulo de fricción interna. Se observó que los agrietamientos desarrollan un tamaño mayor que las dimensiones del cubo, lo que sugiere que todas las fracturas se forman en diagonal.

Una vez que la fractura se generó, se observó que se formaron dos bloques que tienen diferente comportamiento y contribución en el desarrollo y crecimiento de la fractura. Las observaciones sugieren que el bloque de mayor masa tiende a “jalar” al de menor tamaño hasta que este cede por volteo.

En cuanto a los movimientos de los bloques, estos tienen una componente marcadamente en dirección perpendicular a la fractura, mientras el bloque pequeño permanece estático, el bloque mayor se dirige hacia donde existe una mayor concentración de masa.

5.3. Características del modelo y de los materiales empleados.

5.3.1. Características del modelo.

El modelo constó de una caja de acrílico con medidas de 60 cm de largo, 20 cm de ancho y 30 cm de altura, con drenaje en la parte inferior (Figura 35).

El basamento fue simulado con bloques de acrílico con diferentes formas geométricas los cuales son incompresibles y completamente impermeables (Figura 36).



Figura 35. Modelo de acrílico con drenaje en la parte inferior.



Figura 36. Geometrías utilizadas para simular basamento rocoso indeformable.

5.3.2 Características mecánicas de los materiales a utilizar.

Con el fin de conocer las características mecánicas del material a emplear en el modelo, se realizaron pruebas triaxiales, pruebas de corte directo y pruebas a la tensión directa (Frias; 2017).

Se determinó utilizar arena sílice en los ensayos, ya que este material es fácil de encontrar en cualquier lugar y es muy homogénea, así las características mecánicas no varían en gran medida.

Como un resumen general el peso volumétrico seco del material es aproximadamente de 1.71 gr/cm^3 , su peso volumétrico saturado es de 1.79 gr/cm^3 , su densidad de sólidos es de 2.51, como ya se dijo anteriormente el material es bastante homogéneo y no varía mucho.

5.3.2.1. Prueba de corte directo consolidado drenado.

El ensayo de corte directo consiste en hacer deslizar una porción de suelo respecto a otra a lo largo de un plano de falla predeterminado mediante la acción de una fuerza de corte horizontal incrementada, mientras se aplica una carga normal al plano del movimiento.

Cuatro muestras cúbicas se sometieron diferentes cargas, 6.8 Kpa, 12.74 Kpa, 24.5 Kpa y 50 Kpa de fuerza normal. La fuerza normal se aplica y se demora la fuerza del corte hasta que se haya desarrollado todo el asentamiento, se aplica a continuación la fuerza cortante tan lenta como sea posible para evitar la elevación de presiones de poros en la muestra. A continuación, se muestran las gráficas de esfuerzo *vs* deformación de las pruebas de corte directo (Figura 37) así como la gráfica de esfuerzo normal *vs* esfuerzo cortante (Figura 38)

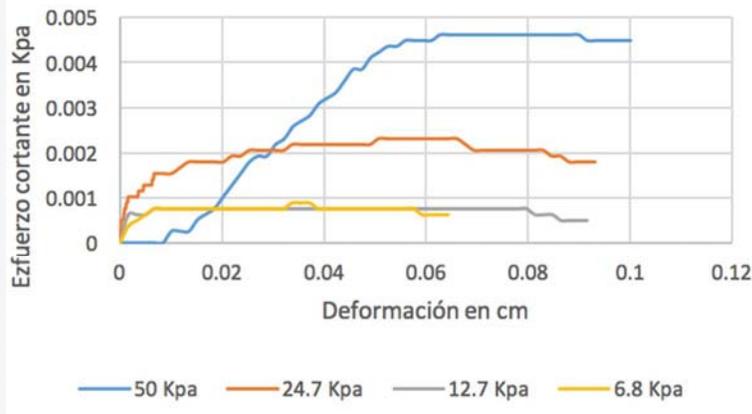


Figura 37. Gráficas de esfuerzo vs deformación de las pruebas de corte directo.

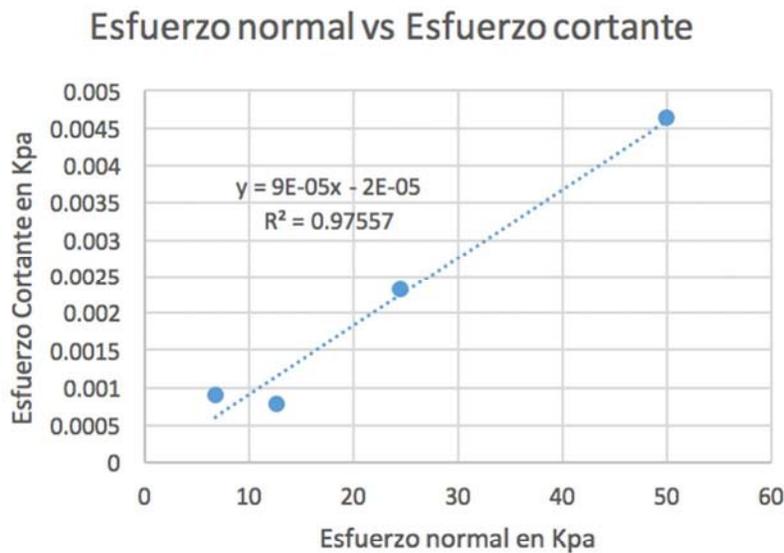


Figura 38. Esfuerzo normal vs esfuerzo cortante.

Las gráficas anteriores muestran que, a mayor fuerza de confinamiento es también mayor la resistencia al cortante y puede soportar mayores deformaciones antes de llegar a la falla lo cual es absolutamente normal

5.3.2.2. Prueba Triaxial consolidada drenada.

Seis muestras cilíndricas cúbicas se sometieron a la prueba triaxial con valores de confinamiento de 75 kpa, 100 kpa, 125 kpa, 150 kpa y 200 kpa. En el ensayo triaxial consolidado-drenado (CD) la muestra previamente saturada y con el drenaje impedido se somete a compresión isotrópica ($\Delta\sigma_3$), con lo que la presión de poro aumenta (Δu_c).

A continuación, se muestran las gráficas de esfuerzo vs deformación de las probetas analizadas, (Figura 39) así como los círculos de Morh correspondientes para cada esfuerzo confinante (Figura 40).

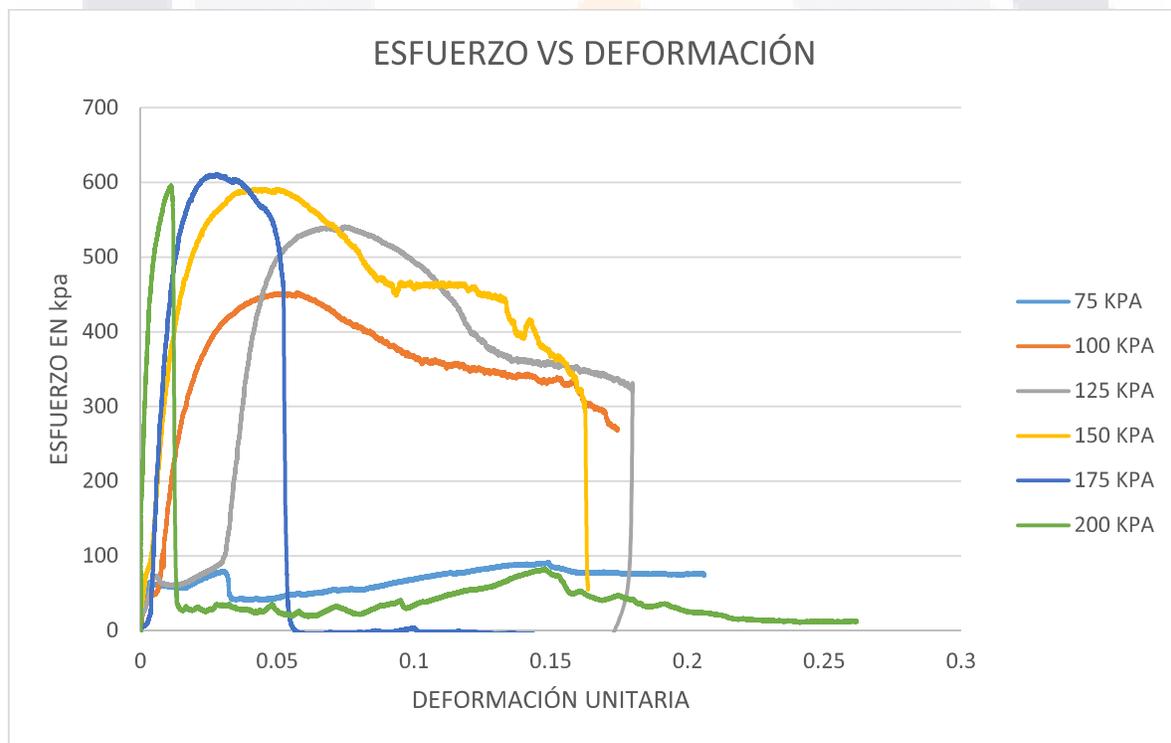


Figura 39. Gráfica de esfuerzo deformación en ensayo triaxial consolidado-drenado.

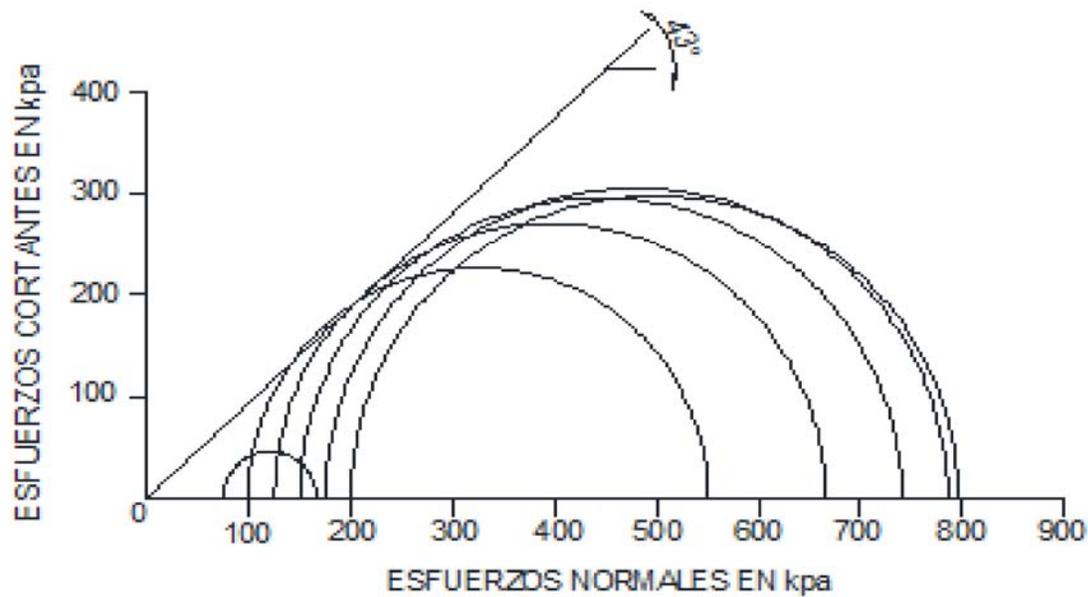


Figura 40. Círculos de Mohr para esfuerzos.

Las pruebas triaxiales muestran un comportamiento totalmente friccionante, el ángulo de fricción interna que se estimó fue de 43° , las gráficas de esfuerzo – deformación son bastante homogéneas.

5.3.2.3. Pruebas a la tensión directa.

Con el objetivo de medir la resistencia a la tensión de la arena de sílice se recurrió al aparato adaptado por (Frias; 2017), que consiste en un marco sobre el cual se colocan dos placas, una está fija al marco y la otra se mueve libremente en forma axial.

En la siguiente tabla (Tabla 3) se muestran los resultados a la tensión de 8 muestras, del ensaye 1 al 4 la arena saturada se colocó en el molde y se procedió a proporcionarle carga. Del ensaye 5 al 8 la arena se mezcló con agua y grenetina en igual proporción, es decir, cincuenta por ciento en volumen para cada material.

Ensaye No	Resistencia a la tensión en Kpa	Ensaye No	Resistencia a la tensión en Kpa
1	0.96	5	0.477
2	1.06	6	0.426
3	1.08	7	0.396
4	1.01	8	0.409
Promedio	1.0275	Promedio	0.427

Tabla 4. Resumen de resultados en pruebas de tensión directa.

5.4. Preparación de la prueba

Debido a lo observado en el modelo preliminar se procedió a perfeccionar el modelo, así que dependiendo de la conformación que el operador le quiera dar, es necesario que todo el equipo a utilizar este limpio y tener todo el material a la mano.

Al fondo de la caja de acrílico, (vista en planta en la figura 41) se coloca papel filtro, de tal forma que queden cubiertos los drenajes con el fin de evitar pérdida de material fino (**Figura 41**), solo se filtrará el líquido que es desalojado por gravedad.



Figura 41. Colocación de papel filtro en drenajes.

Posteriormente se colocan en el fondo de la caja las figuras geométricas según se quiera tener la conformación del basamento, se puede hacer combinaciones con diferentes figuras de basamento.

Posteriormente se prepara el material de relleno, puede ser arena de sílice saturada o la mezcla de arena de sílice con agua y grenetina al 50 % de su volumen.

El modelo se llenará con las capas que el operador desee, las combinaciones pueden ser varias y los espesores de las capas que simulan los estratos se dejan al criterio del operador.

5.5. Resultados modelo analógico

Se realizaron tres ensayos con diferentes conformaciones de estratos y de basamentos, la deformación vertical estará controlada por medio de capas alternadas que constan de una mezcla de cincuenta por ciento de arena de sílice y el restante de agua y grenetina o bien, solo arena de sílice saturada con agua.

5.5.1. Ensaye No 1

La conformación del primer ensaye es como sigue, se describe a partir de la capa inferior hacia la capa superior:

Primer capa: relleno de arena de sílice 2.5 cm de grosor promedio saturada, la segunda capa: mezcla de grenetina, agua y arena de sílice en una proporción del 50% de su volumen total con 7.5 cm de espesor promedio, Tercera capa: arena de sílice saturada con un espesor de 5 cm promedio, el basamento indeformable se representó con un cubo de acrílico para generar un escalón a 90° y un triángulo donde su hipotenusa simula una pendiente a 60° de la horizontal (Figura 42 a y 42 b).



Figura 42. a) Vista del modelo, foto tomada hacia lado izquierdo, pendiente de basamento rocoso de 90° b) foto tomada hacia el lado derecho, pendiente de basamento rocoso 60°

Al terminar de drenarse por completo, en el ensayo No 1 se observó lo siguiente:

La deformación máxima soportada antes de que se presentara alguna fractura en el material de arena de sílice saturada fue de 4 a 6 mm en forma vertical. Se forma primeramente la fractura No 1 en la **Figura 42 a** y se propaga por encima del gradiente de pendiente máximo, es decir por la arista del cubo a 90°, para posteriormente formarse la fractura No 2 una vez que la falla se genera parece ser que se forman dos bloques que tienen características diferentes entre sí, ya que, tal parece que el bloque de mayor masa tiende a “jalar” al de menor tamaño hasta que este cede por volteo.

En cuanto al movimiento del bloque 2 parece tener tendencia a seguir una dirección perpendicular a la falla, mientras en bloque 1 se queda estático (**Figura 43**), el bloque 2 se contrae hacia donde existe mayor concentración de masa.

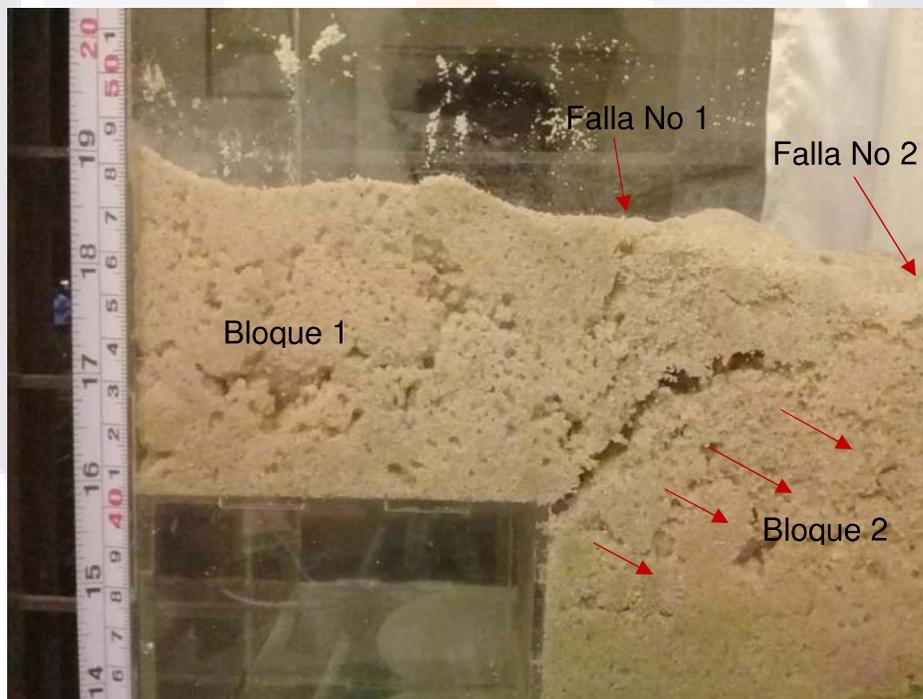


Figura 43. movimiento de los bloques con respecto a las fallas.

5.5.2. Ensayo No 2

Configuración del ensayo No 2, se describe a partir de la capa inferior hacia la capa superior.

Primer capa, mezcla con grenetina, agua y arena de sílice en una proporción del 50% de su volumen total con 4 cm de espesor promedio, segunda capa, mezcla de grenetina, agua y arena de sílice en una proporción del 50% de su volumen total con 5 cm de espesor promedio, Tercera capa: grenetina, agua y arena de sílice en una proporción del 50% de su volumen con 3.0 cm de espesor promedio, cuarta capa arena de sílice saturada con un espesor de 3 cm en promedio, el basamento indeformable se representó con un cubo para generar un escalón a 90° y un triángulo donde su hipotenusa simula una pendiente a 60° de la horizontal (**Figura 44**).

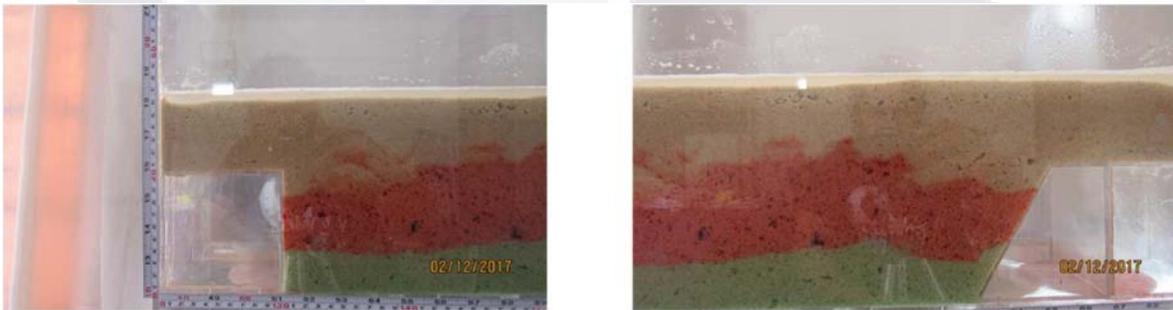


Figura 44. Configuración del ensayo No 2. Fotos en corte

Al terminar de drenarse por completo, en el ensayo No 2 se observó lo siguiente:

La deformación máxima soportada antes de que se presentara alguna fractura en el material de arena de sílice saturada, al igual que en el ensayo No 1 fue de 4 a 6 mm en forma vertical medidos con una regla de acero, se forma primeramente la fractura No 1 (**Figura 45**) y se propaga por encima del gradiente de pendiente máximo, es decir por la arista del cubo a 90°, casi al mismo momento comienza a formarse la fractura No 2.



Figura 45. Formación de agrietamientos en ensayo No 2. Foto en planta

Al igual que en el ensayo anterior cuando la falla se genera parece ser que se forman dos bloques ya explicados anteriormente y que en este ensayo se comportaron de manera similar.

Una observación pertinente en el ensayo es que la capa superficial de material no está mezclada con grenetina y es la capa que sufre de agrietamientos, no la capa inmediata inferior que una vez que los materiales estuvieron drenados, el agrietamiento no emigró a las capas inferiores (Figura 46 y 47).



Figura 46. Agrietamientos en la capa superior.



Figura 47. Agritamientos en la capa superior.

5.5.3. Ensaye No 3

La conformación del tercer ensaye es como sigue, se describe a partir de la capa inferior hacia la capa superior:

Primer capa: relleno de arena de sílice 7.5 cm de grosor promedio saturada, la segunda capa: mezcla de grenetina, agua y arena de sílice en una proporción del 50% de su volumen total con 6.5 cm de espesor promedio, Tercera capa: arena de sílice saturada con un espesor de 8.5 cm promedio, el basamento indeformable se representó con un cubo para generar un escalón a 90° y un triángulo donde su hipotenusa simula una pendiente a 60° de la horizontal (**Figura. 48**)



Figura 48. Conformación del ensaye No 3.

Al igual que en los dos ensayos anteriores la falla que se genera en la parte superficial parece indicar que estas fallas son por tensión (**Figura 49**), y al igual que antes se forman dos bloques ya explicados anteriormente, de la misma forma la grieta se forma justo arriba de la arista del basamento y se propaga de forma longitudinal, en forma vertical se propaga hasta encontrar el material mezclado con grenetina y detiene su avance, esto hace sugerir que tiene mayor resistencia a la tensión y mayor capacidad de deformación.

La deformación máxima antes de la falla estuvo entre 4 y 6 mm en promedio, igual que en el ensaye 1 y 2.



Figura 49. Falla por tensión en ensaye No 3

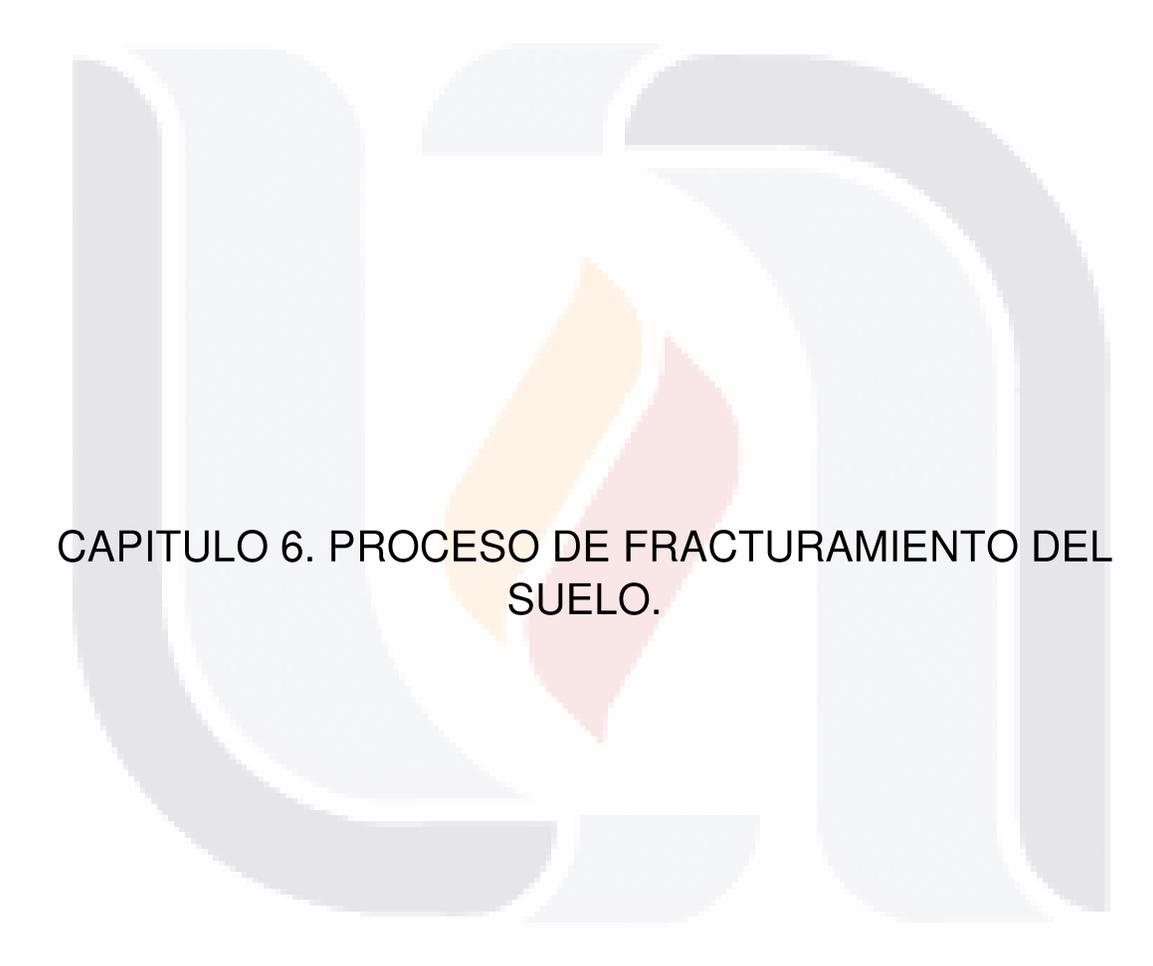
5.6. Conclusiones y discusión de resultados.

En general el modelo resulto muy útil para la observación de la generación de agrietamientos y la evolución de su traza, sin embargo, es necesario implementar una metodología que permita la observación de estos resultados en condiciones más favorables y controladas que solo lo puede dar un laboratorio especializado.

Los materiales que se utilizaron para la realización del modelo son los más comerciales en el mercado, estos pueden ser intercambiados por otros con el fin de hacer más eficiente el uso de esta técnica.

El fin de utilizar arena de sílice y grenetina simulando acuitardos en los ensayos fue por el hecho de que no se tenía el tiempo suficiente para simularlos con materiales como por ejemplo arcilla.

Las observaciones que se realizaron en este capítulo fueron de primordial importancia para la realización de capítulo numero seis el cual trata sobre el fracturamiento del suelo y explica de forma detallada como se genera y evoluciona un fracturamiento debido a subsidencia



CAPITULO 6. PROCESO DE FRACTURAMIENTO DEL SUELO.



CAPITULO 6. PROCESO DE FRACTURAMIENTO DEL SUELO.

Como ya se explicó anteriormente la deformación diferencial que se presenta en la superficie del valle de Matatipac es de apenas unos pocos centímetros, sin embargo, las anomalías que se están presentando dan evidencia que se está formando una fractura debida a subsidencia por pérdida de sustentación hidráulica sobre una estructura rocosa de topografía no uniforme e indeformable.

La combinación de diferentes factores entre los que se cuentan los antropogénicos y los naturales, dan como resultado el fenómeno de la subsidencia y relacionada a esta, se presentan fracturamientos del terreno, los cuales suelen ser más dañinos a la infraestructura como la subsidencia por sí misma, el incremento de los esfuerzos efectivos en la masa de suelo da como resultado que acuíferos y acuitardos sean comprimidos a través del tiempo (Poland y Davis 1969; Ortega-Guerrero et al., 1983; Poland, 1984; Holzer, 1998; USGS, 1999).

El Valle de Matatipac contiene un acuífero en el cual el relleno granular para fines de estudio se considera como permeable, isótropo y homogéneo con características físicas de peso volumétrico de los materiales, ángulo de fricción interna, cohesión, módulo de elasticidad, permeabilidad y humedad, que se encuentra sobre un basamento rocoso indeformable e impermeable el cual funciona como frontera. La forma y profundidad de este basamento y las características mecánicas del material de relleno condicionan directamente la aparición de fallamientos en la superficie. Para explicar de una forma más detallada la fenomenología, se dividirá por etapas de análisis, partiendo de condiciones iniciales, cuando el nivel de aguas freáticas se encuentra en la superficie, pasando hasta un abatimiento total del nivel piezométrico.

Con el fin de explicar el proceso de subsidencia y fracturamiento del suelo se propone dividirlo en dos etapas que se explican a continuación a detalle.

6.1. Etapa 1. Sustentación hidráulica

En esta primera etapa existe un equilibrio en el sistema, el nivel de aguas freáticas se encuentra en su punto más alto (Figura 50), el aprovechamiento de agua del acuífero es mínima ya que las necesidades a satisfacer son muy básicas.

La mayoría de la explotación se da en norias o cauces de ríos y la recarga en la temporada de precipitación es suficiente para mantener los niveles estables.

Aquí en esta etapa todos los materiales del relleno aluvial, así como el agua contenida están acoplados y en equilibrio. Los estratos que se encuentran en las partes más profundas fueron consolidados por las capas suprayacentes a través del tiempo de formación del acuífero y no existen más deformaciones o alteraciones en el sistema.

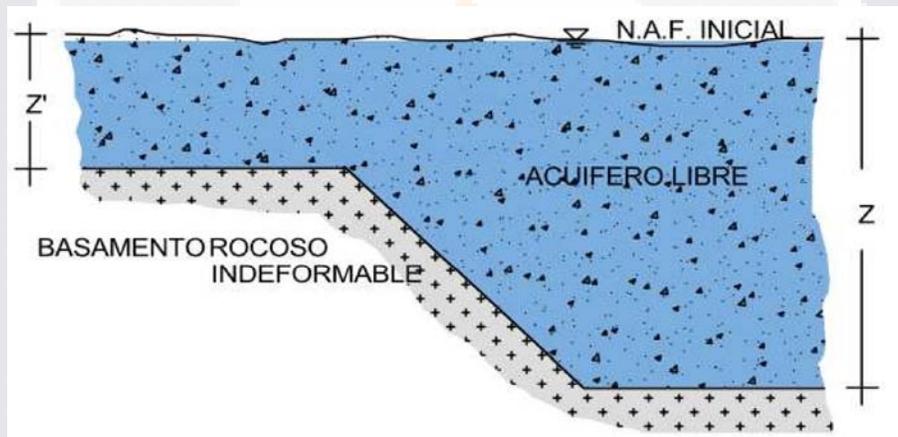


Figura 50. Un sistema en equilibrio, en donde no existen deformaciones o procesos en curso que rompan el equilibrio del acuífero.

6.2. Etapa 2. Pérdida de sustentación hidráulica.

En esta segunda etapa la obtención de recursos hidráulicos es cada vez más apremiante, se requiere una mayor profundidad de explotación del acuífero para satisfacer las necesidades crecientes de la población o industria, las norias desaparecen y es necesario la construcción de pozos de extracción a profundidades considerables.

Durante esta etapa (Figura 51), el acuífero se drena lentamente y la masa de sedimentos experimenta deformación por efecto de su peso propio y la pérdida de

sustentación hidráulica (Pacheco 2007), la masa de suelo experimenta un aumento en los esfuerzos efectivos conforme el nivel freático continúa descendiendo, el incremento de presión efectiva es constante a lo largo de toda la profundidad del estrato saturado bajo el nivel final de agua, por lo que el relleno saturado se estará deformando por efecto de esta presión y lo hará de manera que su deformación unitaria será la misma a cualquier profundidad.

Por otro lado, la zona drenada también experimenta una deformación cuya fenomenología es diferente. En esta zona el material granular se deforma por efecto de la pérdida de la sustentación hidráulica.

En este caso la deformación unitaria varía desde cero a la profundidad inicial del nivel piezométrico, hasta un valor máximo en la profundidad final del nivel de agua. En la zona drenada el incremento en la presión efectiva dependerá del espesor de material drenado.

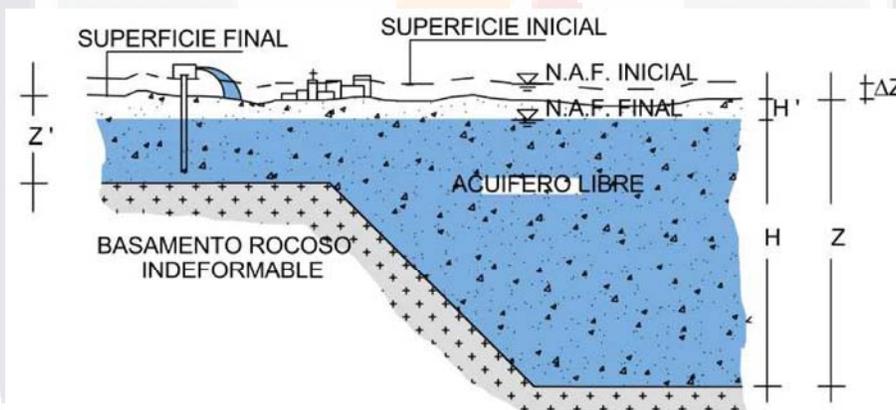


Figura 51. Deformación del relleno aluvial por pérdida de sustentación hidráulica.

6.3. Cálculo de la deformación vertical

Analizaremos entonces como sucede el comportamiento de las partículas del suelo en el acuífero, podemos calcular la deformación vertical con las ecuaciones debidas a Pacheco-Martínez 2007, quien propone una ecuación para calcular el acortamiento de una columna de relleno aluvial ocasionado por abatimiento de nivel freático.

Como ya se vio anteriormente una vez que ocurre el descenso del nivel freático, el comportamiento de la masa de sedimentos parcialmente saturada se comporta de diferente manera que la masa que queda por debajo del nivel piezométrico, la deformación vertical que se presentará en el estrato parcialmente saturado por efecto de la pérdida de sustentación hidráulica causada por un abatimiento del nivel piezométrico queda definida por:

$$\Delta H' = \frac{[(1+w)\gamma_s - \gamma_s']}{2E} H'^2 \dots\dots\dots 1$$

Donde:

w = Contenido de agua del relleno después de ser drenado.

γ_s = Densidad de sólidos.

γ_s' = Densidad de solidos sumergidos.

H' = Zona de Abatimiento.

E = Módulo de Young.

Y la deformación vertical que se presentará en el estrato saturado que se encuentra bajo el nivel piezométrico.

$$\Delta H = \left[\frac{[(1+w)\gamma_s - \gamma_s'] H'}{E} \right] H \dots\dots\dots 2$$

Donde:

w = Contenido de agua del relleno después de ser drenado.

γ_s = Densidad de sólidos.

γ_s' = Densidad de solidos sumergidos.

H = Zona que permanece bajo el nivel freático.

H' = Zona de Abatimiento.

E = Módulo de Young.

El hundimiento total está en función del abatimiento H', del peso volumétrico de los sólidos, del contenido de humedad remanente en la zona drenada y del Módulo de elasticidad del material granular, los hundimientos diferenciales se generan cuando

en las zonas menos profundas del acuífero, el espesor de sedimentos desarrolla menor deformación vertical mientras que en las partes más profundas, el espesor de sedimentos desarrolla mayor deformación vertical para cualquier punto en la masa del acuífero (Figura 52).

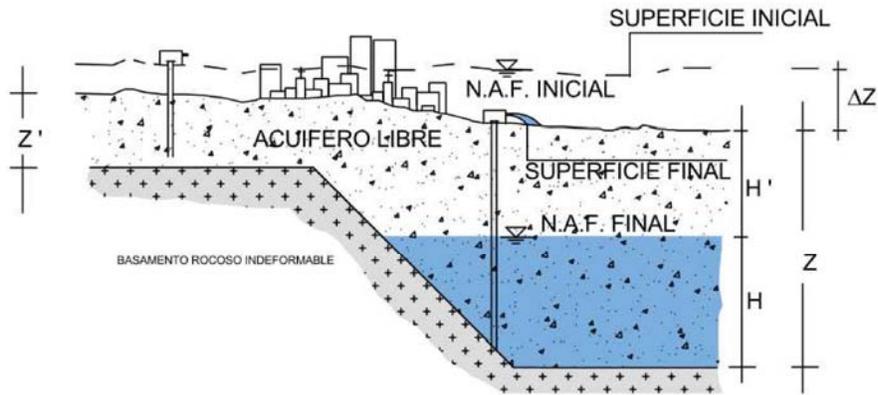


Figura 52. Hundimientos verticales.

Supongamos que tenemos columnas con ancho unitario en la masa del suelo, cuando se genera una deformación vertical por efecto del abatimiento y la diferencia de espesores, se experimenta un acortamiento mayor en la parte más profunda, esto da como resultado un diferencial de alturas que a su vez genera un desplazamiento diferencial y por consiguiente se generan esfuerzos de cortante y tensión debido a la diferencia en la magnitud de los desplazamientos verticales (Figura 53).

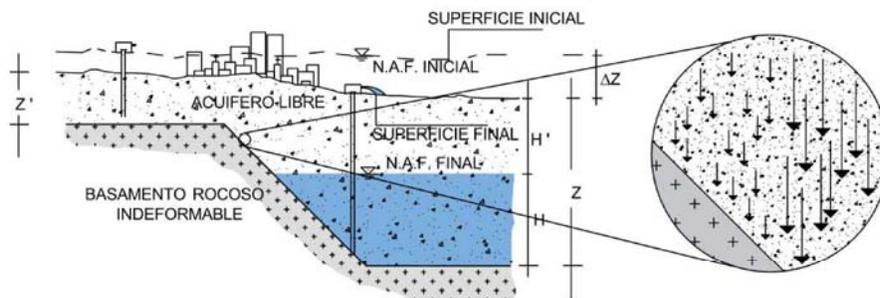


Figura 53. Representación de la magnitud de los movimientos verticales.

El proceso de subsidencia y fracturamiento en el valle de Matatipac es similar a otros graben que se encuentran alrededor del mundo y se han tratado en la literatura donde se estudia el estado de esfuerzos en un medio isótropo y homogéneo cuando

que está sometido a esfuerzos una vez que pierde el equilibrio hidrostático (Jachenz & Holzer, 1982; Carpenter, 1999; Holzer, 2000; Garduño-Monroy et al., 2001; Rojas et al., 2002; Pacheco-Martínez et al., 2006; Pacheco-Martínez y Arzate-Flores, 2007; Budhu, 2008; Ávila-Olvera y Garduño-Monroy, 2008; Pacheco-Martínez et al., 2010; Huizar-Alvarez et al., 2011).

6.4. Deformación horizontal.

El fenómeno de subsidencia no solo genera esfuerzos de cortante también se manifiestan esfuerzos de tensión, ya que como los desplazamientos verticales no son uniformes, existe una componente horizontal de extensión o estiramiento en el medio. Para explicar el movimiento de extensión que genera esfuerzos de tensión, hagamos la analogía de visualizar el relleno como una serie de resortes helicoidales en un cuerpo elástico, esto llevará a idealizar el material de la manera más sencilla posible.

Tenemos un arreglo como el que se muestra en la **Figura 54**, en (a) se observa un sistema en equilibrio, sin ninguna clase de deformación, consta de dos resortes con longitud Z y Z' y un resorte con longitud L , este arreglo representa al sistema cuando existe sustentación hidráulica.

Una vez que se abate el nivel freático (b), comienzan las deformaciones, si suponemos que los resortes tienen parámetros de módulo de elasticidad iguales, es lógico pensar que el resorte que tiene mayor longitud Z es el que va a sufrir la mayor deformación, estos desarreglos o reacomodos en las partículas, van a generar un diferencial de altura ΔZ entre los resortes, cuando esto ocurre el resorte con longitud L sufrirá un alargamiento medible con respecto a la posición original 0 el cual podemos nombrarlo ΔL , la nueva longitud, después de la deformación será ahora, L más un diferencial ΔL .

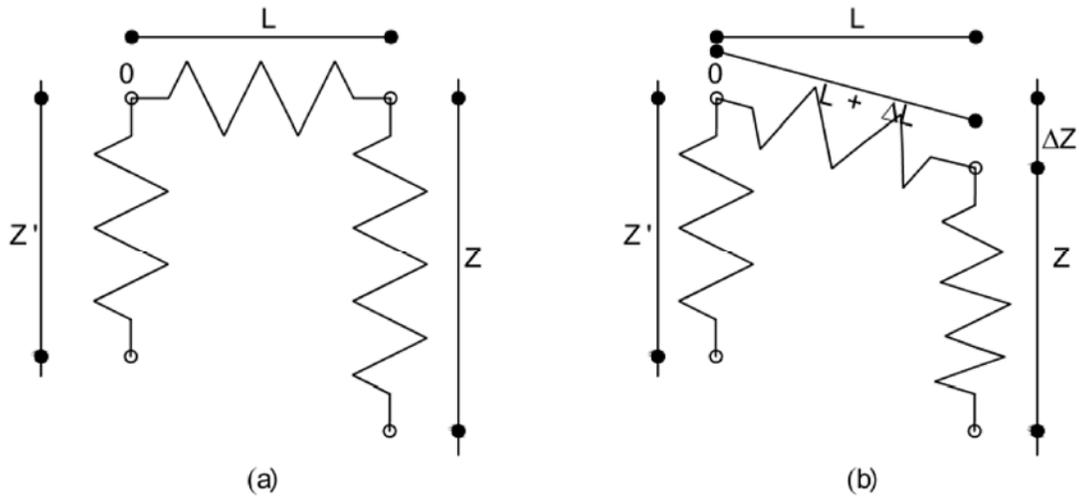


Figura 54. (a) Sistema en equilibrio y (b) sistema deformado

Como ya lo mencionamos anteriormente, con las fórmulas 1 y 2 conseguimos calcular el hundimiento en cualquier punto de la masa del suelo, si tomamos columnas de longitud unitaria, obtenemos las deformaciones unitarias verticales entre columnas, a esta medida le llamaremos $\text{grad}\Delta H$ y al ángulo que se forma le llamaremos α (Figura 55).

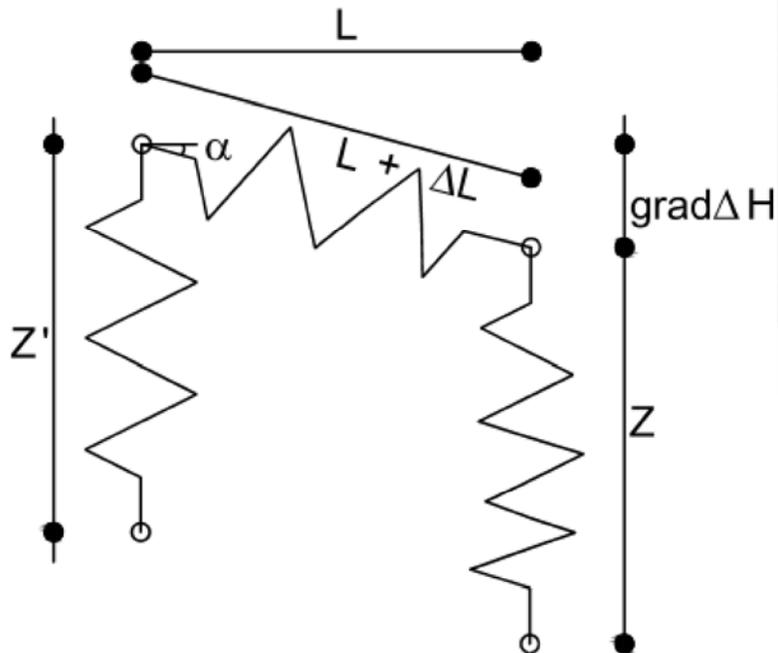


Figura 55. Deformación de columnas verticales.

Ahora bien, podemos calcular fácilmente el diferencial ΔL con la ecuación siguiente:

$$\Delta L = \sqrt{L^2 + \text{grad}\Delta H^2} - L \dots\dots\dots 3$$

Donde:

ΔL = Diferencial de la longitud después de la deformación.

L = Longitud del resorte.

grad ΔH = Diferencial de acortamiento entre los dos resortes verticales.

Y también:

$$\Delta L = \frac{\text{grad}\Delta H}{\sin\alpha} - L \dots\dots\dots 4$$

Donde:

ΔL = Diferencial de la longitud después de la deformación.

L = Longitud del resorte.

grad ΔH = Diferencial de acortamiento entre los dos resortes verticales.

Sin α = ángulo formado por la deformación en el acortamiento vertical

Esto permite estimar el movimiento horizontal de las partículas del suelo que está sometido a deformaciones verticales causadas por subsidencia, el cambio en la posición horizontal relativa de las partículas es la causante principal de los esfuerzos de tensión en el medio, la zona donde las deformaciones unitarias tienen mayor magnitud está determinada por la morfología del basamento, la profundidad del relleno y las características mecánicas del suelo, presumiblemente en esta zona es donde se rompe el vínculo entre partículas, generando un desgarramiento. Si estas deformaciones generan esfuerzos mayores que los que puede resistir el relleno, entonces es inminente la formación de un agrietamiento que se manifestara en la superficie. Si una columna sedimentaria experimenta un incremento de esfuerzos en la fase granular ocasionado por un abatimiento del nivel freático, esta apreciará un acortamiento que traerá como consecuencia un cambio en la cota inicial, a su vez, por causa de la irregularidad del basamento indeformable y el fenómeno de

distención o alargamiento en el relleno y se presentará una deformación unitaria horizontal entre sus partículas, la cual podemos definir como ε (Figura 56):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

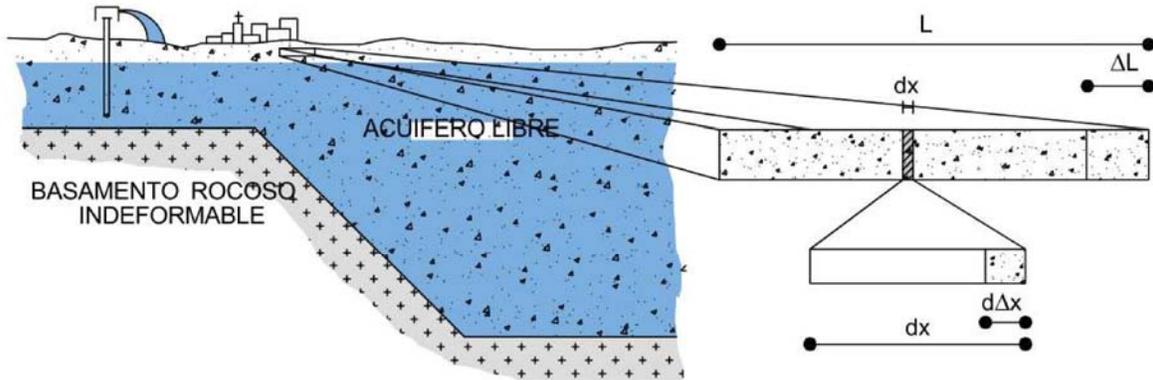


Figura 56. Elemento diferencial para la ecuación diferencial.

Entonces, el alargamiento ΔL será:

$$\Delta L = \varepsilon L \dots \dots \dots 5$$

Para el elemento diferencial dx el estiramiento $d\Delta x$ será:

$$\Delta dx = \varepsilon dx \dots \dots \dots 6$$

Entonces integrando esta expresión desde cero hasta una longitud L cuando se alcanza la máxima deformación vertical:

$$\int_0^L \Delta dx = \int_0^L \varepsilon dx \dots \dots \dots 7$$

$$\Delta L = \int_0^L \varepsilon dx \dots \dots \dots 8$$

Sustituimos el valor de ΔL de la ecuación 3 en la ecuación ε y luego en la ecuación 8, tenemos:

$$\Delta L = \int_0^L \frac{\sqrt{L^2 + grad\Delta H^2} - L}{L} dx \dots \dots 9$$

$$\Delta L = \frac{\sqrt{L^2 + grad\Delta H^2}}{L} - 1 \int_0^L dx \dots 10$$

$$\Delta L = \left(\frac{\sqrt{L^2 + grad\Delta H^2}}{L} - 1 \right) L \dots 11$$

O también sustituyendo la ecuación 4 puede quedar como sigue:

$$\Delta L = \int_0^L \frac{grad \Delta H}{\sin \alpha} - 1 dx \dots 12$$

$$\Delta L = \frac{grad \Delta H}{\sin \alpha} - 1 \int_0^L dx \dots 13$$

$$\Delta L = \left(\frac{grad \Delta H}{\sin \alpha} - L \right) \dots 14$$

Las expresiones 9 y 12 representan la deformación horizontal en una columna de suelo sometida a deformación vertical en cualquier punto de una masa de relleno aluvial.

Simplificando algebraicamente y sustituyendo las ecuaciones 1 y 2 por el valor del gradiente $grad\Delta H$ de la ecuación 9 tenemos:

$$\Delta L = \left(\frac{\sqrt{L^2 + \left[\frac{(1+w)\gamma_s - \gamma_s'}{2E} \left[\left(\frac{1}{2}H^2 + H'H \right) \right]_f - \left[\left(\frac{1}{2}H^2 + H'H \right) \right]_i \right]^2}}{L} - 1 \right) L \dots 15$$

Entonces:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \left(\frac{\sqrt{L^2 + \left[\frac{(1+w)\gamma_s - \gamma_s'}{2E} \left[\left(\frac{1}{2}H^2 + H'H \right) \right]_f - \left[\left(\frac{1}{2}H^2 + H'H \right) \right]_i \right]^2}}{L} - 1 \right) \dots 16$$

La ecuación 14 representa la deformación unitaria horizontal que está en función del movimiento vertical debido a un abatimiento de nivel freático que a su vez genera un fenómeno de distensión en la masa del suelo.

El agrietamiento que se genera es al principio, solo de algunos milímetros y se da por una combinación de esfuerzos de cortante y tensión, lo observado en el modelo analógico indica que en la parte superior se da por tensión y en la parte más profunda se da por cortante, una explicación para este fenómeno puede ser la siguiente:

Supongamos una muestra de suelo de magnitud unitaria que se encuentra a una profundidad considerable en el sistema acuífero, en este caso, las fuerzas a las que está sujeto van en todas las direcciones de sus planos, pero en la parte más profunda, donde se da el contacto entre el basamento y el suelo deformable, la presión normal de compresión es la mayor soportada en toda la columna, así como la presión que confina esta muestra.

Donde existe un gradiente de presiones debidas al aumento del esfuerzo efectivo por abatimiento de nivel freático, y también algún rasgo geológico tal, que posea un cambio de pendiente considerable puede decirse que en esta zona la diferencia entre el acortamiento entre columnas genera un esfuerzo de cortante, la deformación por extensión puede considerarse nula ya que la presión de confinamiento es tal que no permite esfuerzos de tensión (Figura 57).

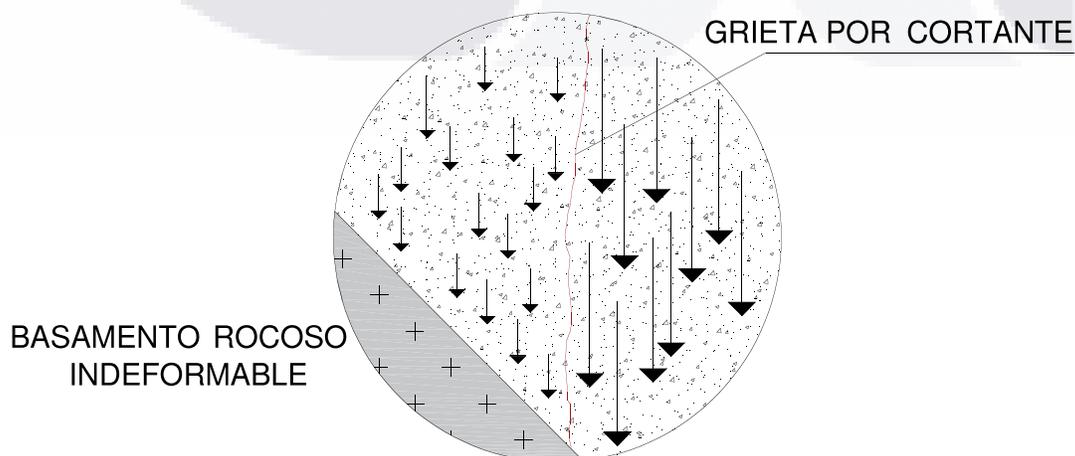


Figura 57. Formación de grieta por cortante en el material deformable

Siendo una falla puramente de cortante el ángulo al cual se forma estará o será muy cercano a los 90° de la horizontal, el esfuerzo normal σ_n será la resistencia que opone el suelo a ser desplazado, (dada su condición de confinamiento) y σ_τ será el esfuerzo de cortante debido a la diferencia de desplazamientos entre las partículas de las columnas de suelo antes señaladas.

Analicemos ahora el caso extremo, en donde no existe esfuerzo de compresión, en la superficie. En la superficie los esfuerzos de tensión llegan a su máximo y puede decirse que la distensión debida a los cambios volumétricos en la masa del suelo está induciendo este esfuerzo, si lo vemos desde el punto de vista de la teoría de falla de Mohr-Coloumb los esfuerzos principales serán los que se muestran en la figura siguiente (**Figura 58**).

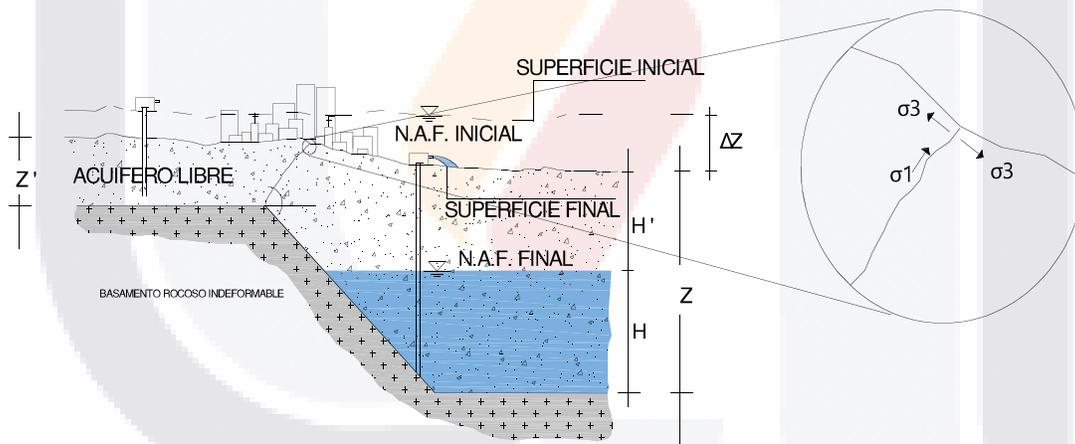


Figura 58. Esfuerzos principales en la superficie del terreno.

En este caso el ángulo de la fractura tendrá que ver con la magnitud del asentamiento diferencial que sufra el material de relleno y en gran medida de los parámetros mecánicos como la cohesión, físicos como la granulometría del material y a la deformación sufrida, así que los esfuerzos serán a tensión.

Es de suponer que conforme se vaya profundizando a través de la línea de falla los esfuerzos vayan evolucionando de un esfuerzo a tensión hasta un esfuerzo por cortante, pasando por una combinación de ambos con contribuciones iguales en

algún punto de la profundidad, las contribuciones de estos esfuerzos están por verificarse en un futuro.

6.4. Comportamiento mecánico del relleno deformable

La razón de que la falla se produzca de forma diagonal es debido a que las condiciones de cohesión y humedad del material que juegan un papel primordial, así como la gravedad y la condición de esfuerzos que se dan en la línea de falla. Una vez que sucede la fractura el cuerpo con mayor masa, tiende a “jalar” a las partículas, en este momento la fractura tiene solo unos milímetros de abertura y se pueden diferenciar dos zonas con comportamientos diferentes entre sí, los cuales se expondrán a continuación (Figura 59), en las que se diferencian tres zonas para su análisis conceptual.

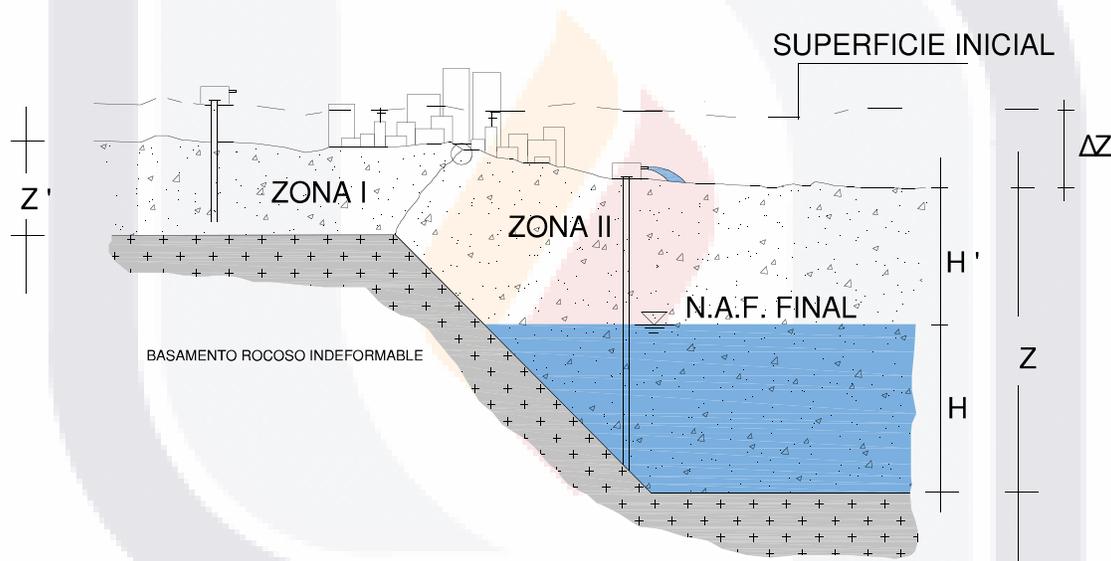


Figura 59. Comportamientos de la Zona I y Zona II en un acuífero.

6.4.1. Zona I

La Zona I se caracteriza por ser la faja donde menos deformación se presenta ya que su espesor es menor que la Zona II, recordemos que a estas zonas las divide la grieta una vez que se haya formado por completo.

Su comportamiento es más estable que la zona II, podría decirse que se encuentra en equilibrio, el proceso del cambio de esfuerzos ya se completó y solo es cuestión de tiempo para que termine el proceso de subsidencia.

6.4.2. Zona II

Aquí las deformaciones son más pronunciadas, cuando la grieta aparece en la superficie, la masa jala las partículas adjuntas hacia el centro de esta zona y ensancha la fractura cada vez más, se presume que esto pasa a mayor magnitud en la superficie, conforme se va aumentando la profundidad estos movimientos van disminuyendo, el fallamiento entonces de pasando de algunos milímetros a unos pocos centímetros.

Las características mecánicas del material se van modificando conforme el nivel freático se abate y la humedad se va perdiendo, parámetros mecánicos como la cohesión, el ángulo de fricción interna y la permeabilidad están relacionados con el contenido de humedad del material.

En este momento del proceso, cuando el agrietamiento tiene ya algunos pocos centímetros de abertura, la grieta es susceptible de sufrir erosión y en este momento se genera una tercera zona (Figura 60) y que también su comportamiento es diferente a las otras dos ya descritas y la cual se detallará a continuación.

6.4.3. Zona III

El proceso de erosión juega el papel más importante en el desarrollo de la Zona III las características mecánicas en esta zona son diferentes a las otras dos, en primer lugar, existe una inestabilidad que se va propagando al material subsecuente, es decir que va afectando a las zonas contiguas, en las siguientes figuras se describe este proceso.

Cuando la grieta es lo suficientemente grande, comienza el proceso de erosión, es en este momento que la zona III se presenta ya que esta zona estaba soportada entre las zonas I y II y viene una volcadura o deslizamiento.

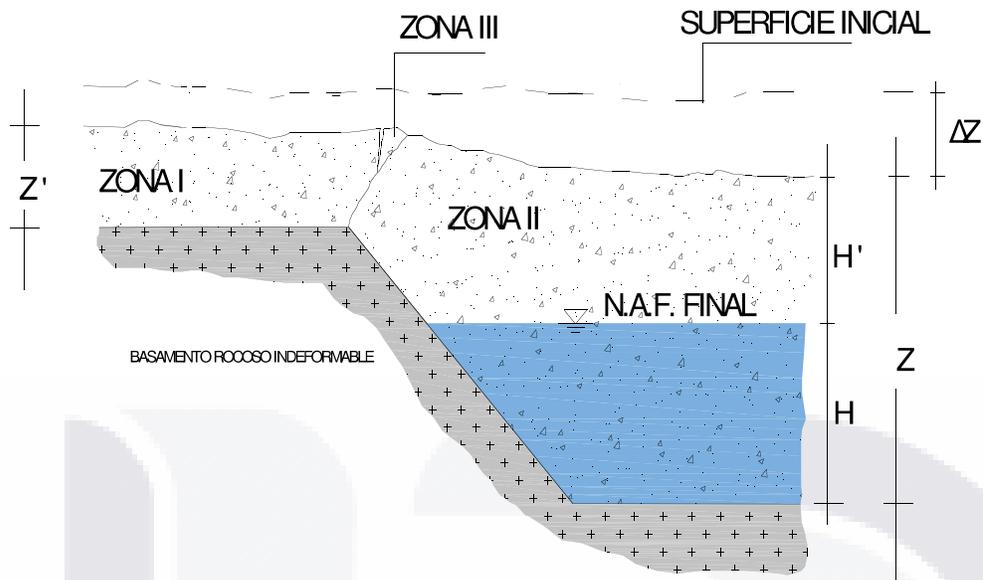


Figura 60. Formación de zona III en el proceso.

La grieta se va ensanchando por erosión y también por pérdida de estabilidad de los bloques subsecuentes en la zona I, es de suponer que la zona II dada la configuración y el ángulo de falla tiende a estar más estable, sin embargo, no se descartan volcaduras o deslizamientos, la zona II va sufriendo cada vez más pérdida de estabilidad (Figura 61).

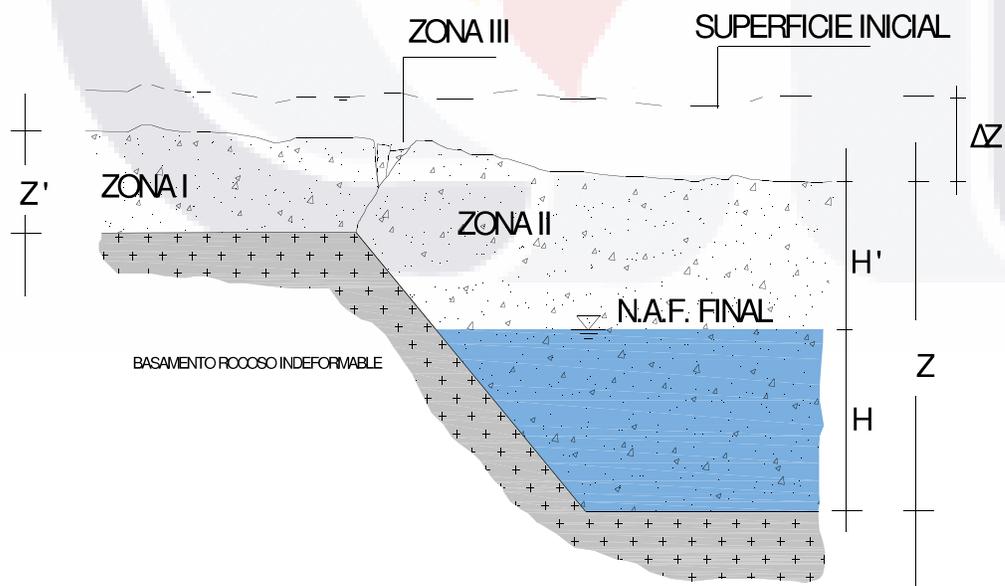


Figura 61. Erosión de zona III.

Conforme la erosión avanza, la zona I va perdiendo estabilidad, hasta que llega a su equilibrio y termina el proceso de la generación de la grieta.

Al fin la grieta llega a tener estabilidad y entonces el proceso se detiene, el ancho de afectación va en función de diferentes parámetros, en la zona I como ya se dijo tiene que ver con la máxima deformación y por consiguiente los esfuerzos generados a tensión y cortante, mientras en la zona II van a ir relacionados con la estabilidad de esta y va en función del ángulo de fricción interna y de la cohesión del material, la zona III se irá degradando por erosión (Figura 62).

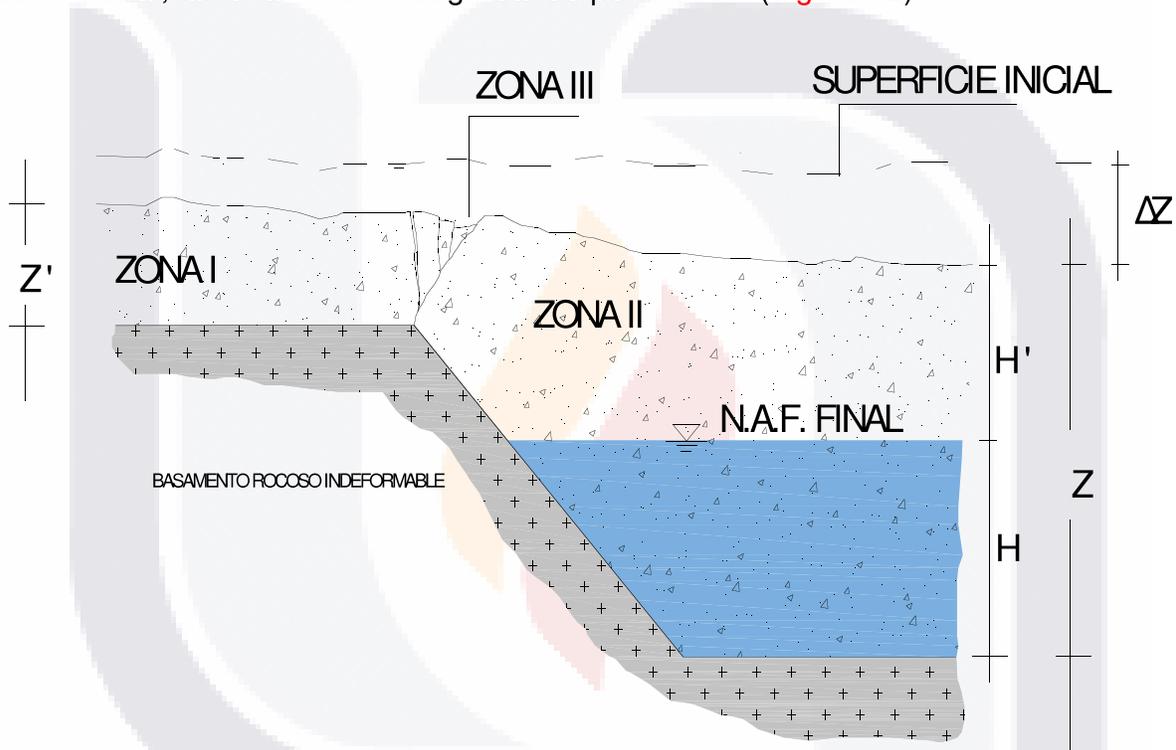


Figura 62. Equilibrio en la zona III.

6.5. Detección de asentamientos y fracturamientos incipientes en el valle de Matatipac y en general.

No se sabe a ciencia cierta cuando comenzó la ciudad de Tepic a sufrir asentamientos debidos a subsidencia y hasta el presente año (2017) no existen reportes de daños a la infraestructura en las dependencias gubernamentales atribuidos a este fenómeno. Los problemas geotécnicos para cimentación y construcción de estructuras se limitan a determinar la capacidad de carga del suelo.

Este escenario nos pone en inmejorable situación para poder estudiar el fenómeno desde sus comienzos, ya que los daños que se presentarán a futuro estarán vigilados prácticamente desde su iniciación.

Las nuevas condiciones que se presentan en el valle y sobre todo en la ciudad de Tepic y Xalisco requerirán nuevas metodologías para los análisis geotécnicos entre los que se deben incluir observaciones geológicas y estudios geofísicos. Actualmente, se dispone de dos tipos de estudios para evaluar el fracturamiento del suelo en las prospecciones geofísicas ([Pacheco-Martinez et al; 2013](#)).

El primer tipo implica la detección de fisuras en sus primeras etapas de evolución o la detección de fallas en el suelo ocultas por procesos de erosión o por actividades antropogénicas. En esta etapa, las fallas en el terreno son difíciles de identificar, ya que aún no han causado daños significativos. Para detectar estas fallas en el suelo, se han realizado exitosamente estudios de resistividad del subsuelo en zonas con estratigrafía semi homogénea e inalterada.

Las fallas del suelo incipientes aparecen como anomalías de alta resistividad. Las ambigüedades en la interpretación de los perfiles de resistividad pueden ocurrir cuando la zona analizada tiene una estratigrafía natural compleja, rellenos artificiales o variaciones laterales en la humedad del suelo. Cuando se identifica que una anomalía está posiblemente asociada con una falla oculta, es común excavar trincheras, el cual tienen como fin corroborar físicamente si la anomalía de resistividad observada está relacionada con la falla.

El segundo tipo de investigación implica una evaluación de la probabilidad de que se produzcan fallas futuras, independientemente de que existan o no evidencias actuales. El análisis consiste en evaluar el potencial de generación de una falla. Para abordar este problema, algunas de las técnicas que se han implementado incluyen, por ejemplo, análisis de gravimetría para determinar la configuración del lecho rocoso subyacente y caracterización geotécnica del suelo.

Como se indicó anteriormente, la configuración del lecho rocoso subyacente tiene una gran influencia en la aparición y formación de fallas según, [Jachens y Holzer \(1979, 1982\)](#) y [Holzer \(1984\)](#) en una campaña de mediciones en Arizona. USA,

realizada en las inmediaciones de una zona de fallas y también según el caso reportado por [Pacheco-Martínez et al. \(2006, 2010\)](#) en los valles de Querétaro y San Luis Potosi en el centro de México. [Pacheco-Martínez et al. \(2006\)](#) presentan una metodología para identificar los cambios en el basamento rocoso utilizando el gradiente horizontal de la anomalía gravimétrica.

Con el paso del tiempo nuevas técnicas de análisis y estudio evolucionan para resolver de manera más eficaz el problema de la subsidencia inducida por la extracción de agua del subsuelo, un ejemplo de esto es el desarrollo de software que modela el comportamiento hidromecánico del acuífero sujeto a deformaciones (ejemplo [ABAQUS \(Hernández-Marín y Burbey, 2010\)](#), [PLAXIS, \(Budhu y Adiyaman, 2013\)](#) and [MODFLOW \(Thu y Fredlund, 2000\)](#)).

Sin embargo, la aplicación de estas técnicas de análisis a menudo se restringe principalmente debido a la ausencia de datos disponibles ya que los costos para obtenerlos son muy elevados, la dificultad para conseguirlos, la mala calidad o inexistencia de litologías de pozos y también la mala administración de la información histórica en cuanto a evolución de niveles freáticos.

La aplicación de modelos numéricos es una herramienta importante para entender los impactos a largo plazo del hundimiento inducido por el bombeo; sin embargo, debido a la ausencia de datos de buena calidad, se deben implementar muchos supuestos, lo que reduce la fiabilidad de los resultados del modelado debido a la incertidumbre en los resultados que pueden contener errores significativos ([Pacheco-Martinez et al; 2013](#)).



CAPITULO 7. CONCLUSIONES



CAPITULO 7. CONCLUSIONES

- En el valle de Matatipac, se tiene evidencia de fracturas incipientes debidas a subsidencia, aunque estas evidencias se presentan en el borde de la zona de subsidencia, en donde la subsidencia diferencial es más significativa, la evidencia no es concluyente debido a que las observaciones son daños en infraestructura y construcciones, que pudieran deberse a otras causas y no a subsidencia diferencial.
- Gracias a los interferogramas diferenciales se conoce que en algunas zonas urbanas de la ciudad de Tepic y Xalisco los hundimientos críticos son del orden de los 7 cm por año. En la fractura llamada Tránsito puede observarse una alineación con el gradiente de hundimientos presentado en el trabajo de Chaussard, este podría ser una primera aproximación para la predicción de la propagación longitudinal de agrietamientos.
- El método de la interferometría diferencial es una herramienta útil para la determinación de los hundimientos del terreno a escala regional; el costo de los análisis es relativamente bajo y fácil de llevar a cabo, por lo que su implementación periódica proporcionaría información para documentar la evolución de la subsidencia, y entonces poder hacer extrapolaciones de esa evolución para realizar predicciones muy cercanas a la realidad de su evolución.
- En base a la experimentación con el modelo a escala, se observó que la generación de los agrietamientos debidos a subsidencia se presenta por dos tipos de esfuerzo, primeramente, debido a un esfuerzo a tensión en la superficie del terreno y un esfuerzo a cortante que se presenta entre la superficie y el piso rocoso. Se observó que la fractura comienza en la superficie y conforme las deformaciones se acentúan se propaga hacia las partes profundas hasta topar con el basamento indeformable, o bien con algún otro material que tenga diferente comportamiento mecánico.
- Cuando la fractura topa con un material con diferente comportamiento mecánico, esta se detiene y no crece hasta que las deformaciones sean de tal magnitud que el estrato en cuestión falle igual, por tensión en la parte más superficial y por cortante a cierta profundidad.

- La migración de la falla hacia la profundidad se observa casi a 90 grados y topa en la arista más pronunciada de las figuras geométricas que fungieron como basamento rocoso indeformable, posteriormente se presentan fracturas longitudinales paralelas a la primer fractura y que de igual forma migran de arriba hacia abajo y llegan a topar con la arista más pronunciada del piso rocoso, estas nuevas fracturas se presentan con diferentes grados de inclinación y siempre se presenta hacia lo más profundo del relleno.
- En el caso de la propagación de la grieta en forma longitudinal en el modelo a escala se observó que la fractura sigue la forma del basamento indeformable tomando aproximadamente la forma de este. Posiblemente las desviaciones que toma la fractura son debidas a las deformaciones diferenciales que se presentan por la diferente compresibilidad de los materiales, es decir que la principal influencia de la traza de la fractura es el basamento indeformable y en segundo lugar la compresibilidad de los materiales y el espesor de las columnas estratigráficas.
- Antes de que un fracturamiento debido a subsidencia aparece, el acuífero se comporta de una manera semejante en toda su masa.
- Una vez que el primer fracturamiento se manifiesta en el acuífero, los comportamientos entre la zona I y II ya no son iguales debido a diferentes factores que intervienen, como puede ser, la gravedad, la cohesión y el ángulo de fricción interna del material.
- El comportamiento de la zona III, está más bien influenciada por el intemperismo, erosión, la gravedad, entre otros, la zona III se hará cada vez mayor conforme esté más expuesta a la erosión.
- El ancho de influencia crece con el paso del tiempo siguiendo una consecutiva formación de fallas de talud paralelas conforme el material comienza a experimentar los efectos de la gravedad al perder continuidad y confinamiento lateral por la formación de la fractura.
- Las ecuaciones presentadas en esta tesis en el capítulo 7 prometen ser buena referencia para los cálculos de asentamientos en columnas de suelos de acuíferos libres, es necesario que conforme avance el estudio de la subsidencia se modifiquen con el fin de obtener mejores resultados.

- En cuanto al valle de Matatipac, al no tener conocimiento de la profundidad del basamento rocoso y tampoco su forma, no es posible hasta el momento elaborar un mapa de posibles afectaciones por ancho de influencia y tampoco por la aparición de otros agrietamientos asociados a la subsidencia.







CAPITULO 8. PERSPECTIVAS



CAPITULO 8. PERSPECTIVAS

- Los resultados de este trabajo se pueden complementar con más información, con el fin de dar mayor certidumbre en cuanto al proceso de generación de grietas y fallas por subsidencia en el Valle de Matatipac; por ejemplo, la implementación de métodos geofísicos de exploración como puede ser MASW1D para poder obtener parámetros mecánicos, de los cuales podemos relacionar con las deformaciones del suelo en estudio.
- Por otro lado, los resultados del modelo analógico a escala resultaron ser muy prometedores, es necesario entonces implementar un mayor grado de control para la experimentación, así como también controlar todas sus variables en un laboratorio con temperatura y humedad controlada.
- Medir las deformaciones en el modelo analógico a escala no es tarea fácil y es necesario en un futuro implementar dispositivos que monitoreen todas y cada una de las deformaciones que se presenten.
- En este mismo tenor, la utilización de un software que permita modelar de forma matemática las deformaciones que se presentan en el modelo a escala es imprescindible, teniendo controladas todas las variables en un laboratorio especializado.
- La búsqueda de un modelo reológico que incluya la fractura del material para describir el fenómeno adecuadamente, primero en laboratorio, y después a una escala de un acuífero real.



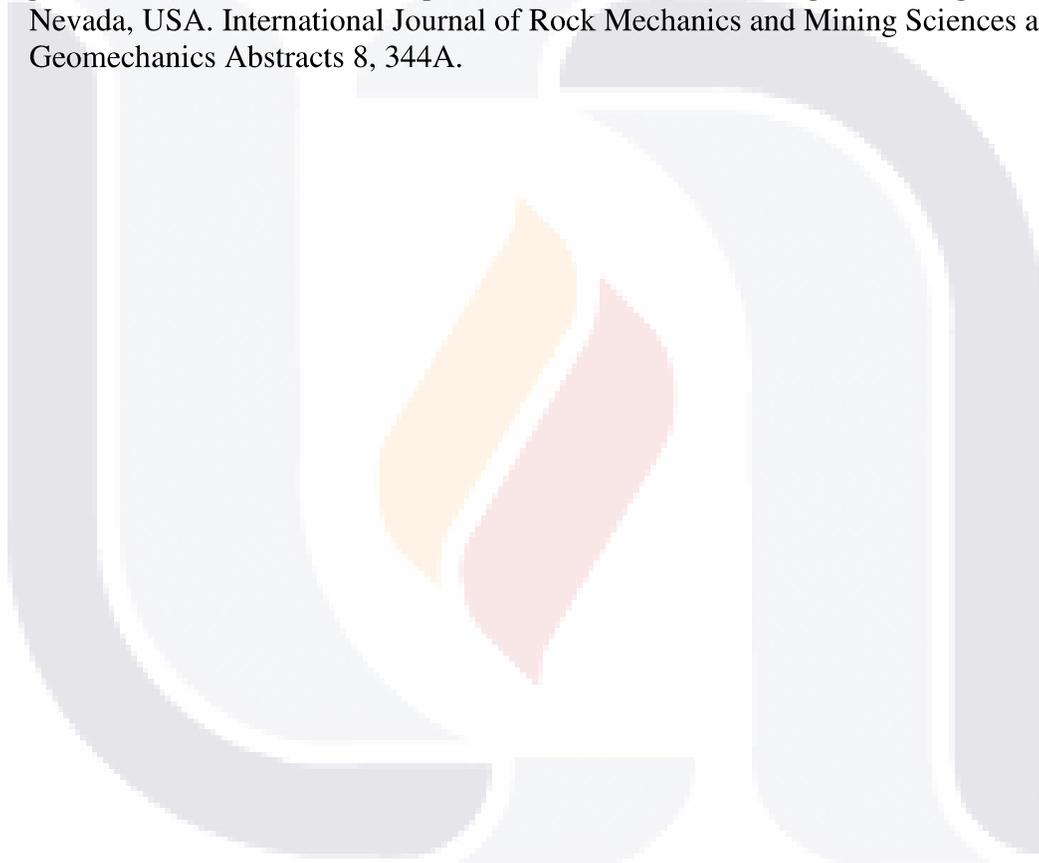
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akagi, T., 1992. National contributions by TC12 land subsidence committee members Japan. 12th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng.
- Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A.F., Morán-Zenteno, D.J., Alba-Aldave, L., 2002. Rhyolitic volcanism in extension zone associated with strike-slip tectonics in the Taxco region, southern Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 118, 1–14. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(02\)00247-0](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00247-0)
- Allan, J.F., 1986. Geology of the Northern Colima and Zacoalco Grabens, southwest Mexico: Late Cenozoic rifting in the Mexican Volcanic Belt. *GSA Bulletin* 97, 473–485. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1986\)97<473:GOTNCA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1986)97<473:GOTNCA>2.0.CO;2)
- Álvarez Manilla Aceves, A., 1999. Modelo del mecanismo de agrietamiento en el valle y zona metropolitana de Querétaro (Thesis).
- Arévalo, L.A.P., Rivera, J.J.C., 2013. Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: centro-sur de la Mesa Central, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía* 2013, 18–32.
- Baruni, S.S.E., 1994. Earth Fissures Caused By Groundwater Withdrawal In Sarir South Agricultural Project Area, Libya. *HYJO* 2, 45–52. <https://doi.org/10.1007/s100400050045>
- Bourgeois, J., Michaud, F., 1991. Active fragmentation of the North America plate at the Mexican triple junction area off Manzanillo. *Geo-Marine Letters* 11, 59–65. <https://doi.org/10.1007/BF02431030>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10040-002-0215-7>
- Carrillo-Rivera, J., 2000. Application of the groundwater-balance equation to indicate interbasin and vertical flow in two semi-arid drainage basins, Mexico. *Hydrogeology Journal* 8, 503–520. <https://doi.org/10.1007/s100400000093>
- Chaussard, E., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., Amelung, F., 2014. Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series. *Remote Sensing of Environment* 140, 94–106. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.038>
- Cobbold, P.R., Castro, L., 1999. Fluid pressure and effective stress in sandbox models. *Tectonophysics* 301, 1–19. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)00215-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00215-7)
- CONAGUA, 2012. Estadísticas del agua en México.
- CONAGUA, 2003a. ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA SUBTERRÁNEA ACUÍFERO (1804) VALLE DE MATATIPAC ESTADO DE NAYARIT.
- CONAGUA, 2003b. ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA SUBTERRÁNEA ACUÍFERO (1804) VALLE DE MATATIPAC ESTADO DE NAYARIT.
- CONAGUA, 1998. Estudio Geohidrológico del Valle de Matatipac, en Nayarit.

- CONAGUA, 1992. Informe del Modelo Matemático de Simulación del Acuífero del Valle de Matatipac, Estado de Nayarit.
- Demant, A., 1978. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. *Revista mexicana de ciencias geológicas* 2, 172–187.
- Demant, Alain, V., P., 1978. A preliminary report on the comenditic dome and ash flow complex of Sierra La Primavera, Jalisco. *Revista mexicana de ciencias geológicas* 2, 218–222.
- Ferrari, L., Pasquare, G., Venegas, S., Castillo, D., Romero, F., 1994. Regional tectonics of western Mexico and its implications for the northern boundary of the Jalisco block. *Geofísica Internacional* 33, 139–151.
- Ferrari, L., Pasquarè, G., Venegas-Salgado, S., Francisco Romero-Rios, 1999. Geology of the western Mexican volcanic belt and adjacent Sierra Madre Occidental and Jalisco block. *Cenozoic tectonics and volcanism of Mexico* 334, 65.
- Figuroa Vega., 1973. El Hundimiento de la Ciudad de México. Breve Descripción Recursos Hidráulicos. II, 525–534.
- Frey, H.M., Lange, R.A., Hall, C.M., Delgado-Granados, H., Carmichael, I.S., 2007. A Pliocene ignimbrite flare-up along the Tepic-Zacoalco rift: Evidence for the initial stages of rifting between the Jalisco block (Mexico) and North America. *Geological Society of America Bulletin* 119, 49–64.
- Frias D., 2017. Estudio experimental, geoestadístico y numérico sobre los procesos de fracturamiento superficial. El caso del valle de Aguascalientes. Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, Aguascalientes.
- Gayol, R, 1925. Estudio de las perturbaciones que en el fondo, de la Ciudad de México ha producido el drenaje de las aguas del subsuelo, por las obras del desaque y rectificación de los errores a que ha dado lugar una incorrecta interpretación de los efectos producidos. *Revista Mexicana de Ingeniería y Arquitectura* 96–132.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M.T., Ferrari, L., 2007. Igneous petrogenesis of the Trans-Mexican Volcanic Belt, in: *Special Paper 422: Geology of México: Celebrating the Centenary of the Geological Society of México*. Geological Society of America, pp. 129–181. [https://doi.org/10.1130/2007.2422\(05\)](https://doi.org/10.1130/2007.2422(05))
- Group 8.4, I.H.P.W., 1984. Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal. Unesco.
- Guy, X. Y., Tsien, S. I., Huang, H. C., Liu, Y., n.d. Analysis if Shanghai Land Subsidence. IAHS, Land Subsidence, Proceedings of the Fourth Int. Symp. Land Subs 603–612.
- Holzer, T.L., 1984. Ground failure induced by ground-water withdrawal from unconsolidated sediment, in: *Reviews in Engineering Geology*. Geological Society of America, pp. 67–106. <https://doi.org/10.1130/REG6-p67>
- Hubbert, M.K., 1937. Theory of Scale Models as Applied to the Study of Geologic Structures. Geological Society of America.
- Huizar-Alvarez, R., Carrillo-Rivera, J.J., Ángeles-Serrano, G., Hergt, T., Cardona, A., 2004. Chemical response to groundwater extraction southeast of Mexico City. *Hydrogeology Journal* 12. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0343-3>
- INEGI, I., 1981. Síntesis geográfica del estado de Nayarit.
- Jachens, R.C., Holzer, T.L., 1982. Differential compaction mechanism for earth fissures near Casa Grande, Arizona. *GSA Bulletin* 93, 998–1012. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1982\)93<998:DCMFEF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1982)93<998:DCMFEF>2.0.CO;2)

- Jachens, R.C., Holzer, T.L., 1979. Geophysical Investigations of Ground Failure Related to Ground-Water Withdrawal — Picacho Basin, Arizona. *Groundwater* 17, 574–585. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1979.tb03358.x>
- Lee, K.L., Shen, C.K., 1969. HORIZONTAL MOVEMENTS RELATED TO SUBSIDENCE. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.*
- Legorreta, O.Q., Michaud, F., Bourgois, J., Barrier, E., 1993. Evolución de la frontera septentrional del bloque de Jalisco, México, desde hace 17 Ma. *Revista mexicana de ciencias geológicas* 10, 2.
- Luhr, J.F., Nelson, S.A., Allan, J.F., Carmichael, I.S.E., 1985. Active rifting in southwestern Mexico: Manifestations of an incipient eastward spreading-ridge jump. *Geology* 13, 54–57. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1985\)13<54:ARISMM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1985)13<54:ARISMM>2.0.CO;2)
- Nabor Carrillo, N.C., 1948. Influence of artesian wells in the sinking of Mexico City.
- Nieto-Obregon, J., Urrutia-Fucugauchi, J., Cabral-Cano, E., de la Campa, A.G., 1992. Listric faulting and continental rifting in western Mexico—A paleomagnetic and structural study. *Tectonophysics* 208, 365–376. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90435-9](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90435-9)
- Pacheco Martínez, 2007. Doctor en Ciencias de la Tierra.
- Pacheco-Martínez, J., Hernandez-Marín, M., Burbey, T.J., González-Cervantes, N., Ortíz-Lozano, J.Á., Zermeño-De-Leon, M.E., Solís-Pinto, A., 2013. Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México. *Engineering Geology* 164, 172–186. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.06.015>
- Pasquaré, G., Garduno, V.H., Tibaldi, A., Ferrari, M., 1988. Stress pattern evolution in the central sector of the Mexican Volcanic Belt. *Tectonophysics, The Origin and Evolution of Arcs* 146, 353–364. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(88\)90099-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(88)90099-6)
- Poland, J.F., Lofgren, B.E., Ireland, R.L., Pugh, R.G., 1972. Land Subsidence in the San Joaquin Valley, California, As of 1972 87.
- Rojas, E., Arzate, J., Arroyo, M., 2002. A method to predict the group fissuring and faulting caused by regional groundwater decline. *Engineering Geology* 65, 245–260. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00135-1](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00135-1)
- Rosas-Elguera, J., 2000. Late Miocene to Quaternary extension at the northern boundary of the Jalisco block, western Mexico: The Tepic-Zacoalco rift revised. *Cenozoic Tectonics and Volcanism of Mexico* 334, 41.
- Rosas-Elguera, J., Ferrari, L., Garduño-Monroy, V.H., Urrutia-Fucugauchi, J., 1996. Continental boundaries of the Jalisco block and their influence in the Pliocene-Quaternary kinematics of western Mexico. *Geology* 24, 921–924.
- SGM, 1988. Carta Geologica Minera Tepic Segunda edición. Servicio Geológico Mexicano.
- Sillerico, E., Marchamalo, M., Rejas, J.G., Martínez, R., 2010. La técnica DInSAR: bases y aplicación a la medición de subsidencias del terreno en la construcción. *Informes de la Construcción* 62, 47–53. <https://doi.org/10.3989/ic.09.063>
- Steedman, R.S., 2005. Land Subsidence: Proceedings of the Seventh International Symposium on Land Subsidence : Multi-disciplinary Assessment of Subsidence Phenomena in the Ravenna Area : Shanghai, P.R. China, 23-28 October, 2005. Millpress.

- Stock, J.M., 1993. Tectónica de placas y la Evolución del Bloque Jalisco, México. *GEOS* 13, 3–9.
- Sun, H., Grandstaff, D., Shagam, R., 1999. Land subsidence due to groundwater withdrawal: potential damage of subsidence and sea level rise in southern New Jersey, USA. *Environmental Geology* 37, 290–296.
<https://doi.org/10.1007/s002540050386>
- Valencia Domingo, 1995. Fallamiento de los Suelos en la Ciudad de Querétaro. Facultad de Ingeniería U.A.Q. Tesis de Maestría.
- Vázquez Carretero, N.J., Justo Alpañés, J.L., 2002. La subsidencia en Murcia: implicaciones y consecuencias en la edificación. Consejería de Obras Públicas, Vivienda y Transportes, Murcia.
- Zhuping, S., Helm, D.C., 1996. Conceptual models for earth fissuring in Las Vegas Valley, Nevada, USA. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts* 8, 344A.





ANEXO A GRANULOMETRIA MATERIALES PUMICITICOS



Localización: 506402.29, 2379338.84
 Muestra No: 1 Prof. : 1 metro
 Descripción: _____
 Pero de la muestra total: 2290 gr

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Fecha: _____ Operador: _____ Calculista: _____

Composición Granulométrica del Material retenido en la Malla No. 4

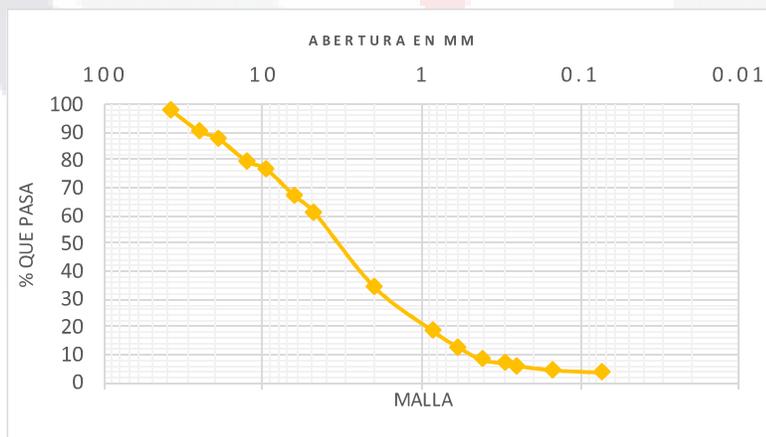
Malla N°	Abertura	Recipiente N°	Peso Suelo retenido	Retenido Parcial	Retenido acumulado	Porcentaje que pasa
-	mm	-	gr	%	%	%
1 1/2"	37.5		50.6	2.21	2.21	97.79
1"	25.4		166.6	7.28	9.48	90.52
3/4"	19.1		62.2	2.72	12.20	87.80
1/2"	12.7		184.9	8.07	20.28	79.72
3/8"	9.52		66.8	2.92	23.19	76.81
1/4"	6.35		218.8	9.55	32.75	67.25
4	4.76		135.2	5.90	38.65	61.35
	Pasa la No 4		1404.9			

Composición Granulométrica del Material retenido en la Malla No. 4

Peso: 150 gr

Malla N°	Abertura	Recipiente N°	Peso Suelo retenido	Porcentaje retenido	Retenido acumulado	Porcentaje que pasa
-	mm	-	gr	%	%	%
10	2.00		65.3	26.71	26.71	34.64
20	0.840		39.4	16.11	42.82	18.53
30	0.590		13.8	5.64	48.47	12.88
40	0.420		10.9	4.46	52.92	8.43
50	0.297		3.6	1.47	54.40	6.95
60	0.250		2.1	0.86	55.26	6.09
100	0.149		3.6	1.47	56.73	4.62
200	0.074		2.2	0.90	57.63	3.72
pasa la 200			9.1	3.72		

Totales: 150 100.00 100.00



Peso del suelo humedo (g)	Peso del suelo seco (g)	w(%)
300	160.5	86.92

CONTENIDO DE HUMEDAD

Localización: 507390.28, 2380009.04
 Muestra No: 2 Prof.: 3.00 metros
 Descripción: _____
 Pero de la muestra total: 2205 gr

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Fecha: _____ Operador: _____ Calculista: _____

Composición Granulométrica del Material retenido en la Malla No. 4

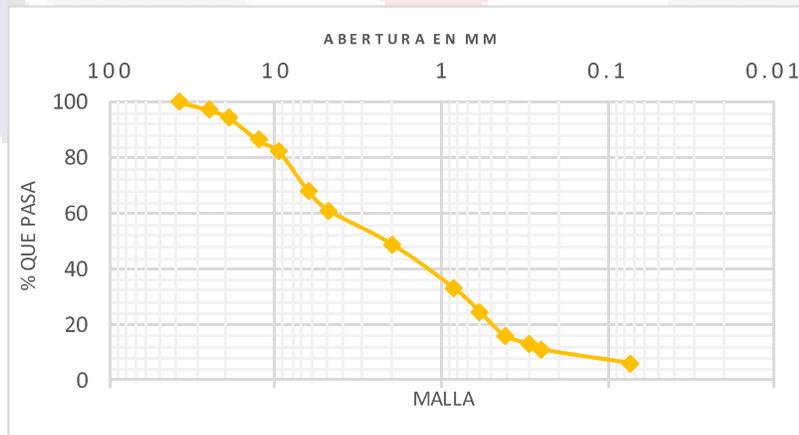
Malla N°	Abertura	Recipiente N°	Peso Suelo retenido	Retenido Parcial	Retenido acumulado	Porcentaje que pasa
-	mm	-	gr	%	%	%
1 1/2"	37.5		0	0.00	0.00	100.00
1"	25.4		62.8	2.85	2.85	97.15
3/4"	19.1		61.7	2.80	5.65	94.35
1/2"	12.7		179.5	8.14	13.79	86.21
3/8"	9.52		92.7	4.20	17.99	82.01
1/4"	6.35		308.2	13.98	31.97	68.03
4	4.76		153.9	6.98	38.95	61.05
	Pasa la No 4		1346.2			

Composición Granulométrica del Material retenido en la Malla No. 4

Peso: 150 gr

Malla N°	Abertura	Recipiente N°	Peso Suelo retenido	Porcentaje retenido	Retenido acumulado	Porcentaje que pasa
-	mm	-	gr	%	%	%
10	2.00		29.5	12.01	12.01	49.05
20	0.840		39.2	15.95	27.96	33.09
30	0.590		20.7	8.43	36.39	24.67
40	0.420		21	8.55	44.93	16.12
50	0.297		7.7	3.13	48.07	12.98
60	0.250		4.9	1.99	50.06	10.99
200	0.074		11.9	4.84	54.91	6.15
pasa la 200			15.1	6.15		

Totales: 150 100.00 100.00



Peso del suelo húmedo (g)	Peso del suelo seco (g)	w(%)
300	160.5	86.92

CONTENIDO DE HUMEDAD

Anexos

Localización 508289.44, 2379709.49
 Muestra No 3 Prof. : 6 metros
 Descripción:
 Pero de la muestra total: 2295 gr

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Fecha: _____ Operador: _____ Calculista: _____

Composición Granulométrica del Material retenido en la Malla No. 4

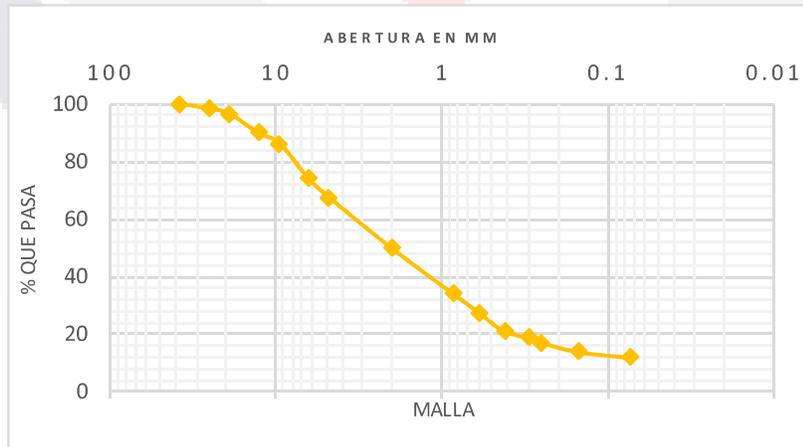
Malla N°	Abertura	Recipiente N°	Peso Suelo retenido	Retenido Parcial	Retenido acumulado	Porcentaje que pasa
-	mm	-	gr	%	%	%
1 1/2"	37.5		0	0.00	0.00	100.00
1"	25.4		40.3	1.76	1.76	98.24
3/4"	19.1		40	1.74	3.50	96.50
1/2"	12.7		152.7	6.65	10.15	89.85
3/8"	9.52		81.7	3.56	13.71	86.29
1/4"	6.35		281	12.24	25.96	74.04
4	4.76		151.3	6.59	32.55	67.45
	Pasa la No 4		1548			

Composición Granulométrica del Material retenido en la Malla No. 4

Peso 150 gr

Malla N°	Abertura	Recipiente N°	Peso Suelo retenido	Porcentaje retenido	Retenido acumulado	Porcentaje que pasa
-	mm	-	gr	%	%	%
10	2.00		39	17.54	17.54	49.91
20	0.840		35.7	16.05	33.59	33.86
30	0.590		14.5	6.52	40.11	27.34
40	0.420		13.8	6.21	46.32	21.13
50	0.297		4.95	2.23	48.54	18.91
60	0.250		3.9	1.75	50.30	17.16
100	0.149		7.2	3.24	53.53	13.92
200	0.074		4.35	1.96	55.49	11.96
pasa la 200			26.6	11.96		

Totales: 150 100.00 100.00



Peso del suelo humedo (g)	Peso del suelo seco (g)	w(%)
300	163	84.05

CONTENIDO DE HUMEDAD

Localización: 506058.30, 2381524.67
 Muestra No: 4 Prof.: 3 metros
 Descripción:
 Pero de la muestra total: 2545 gr

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Fecha: _____ Operador: _____ Calculista: _____

Composición Granulométrica del Material retenido en la Malla No. 4

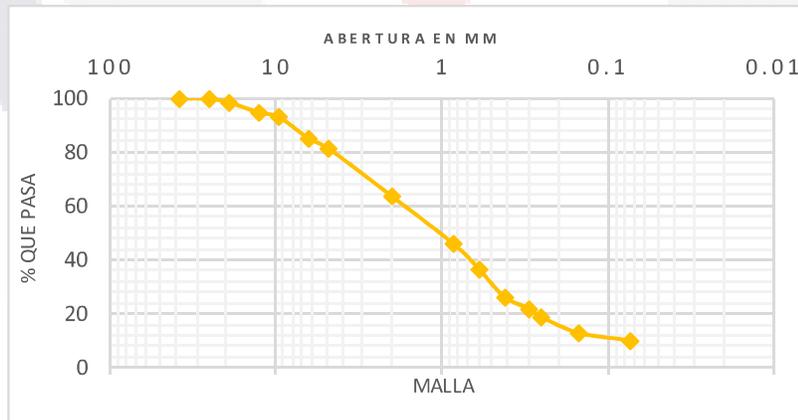
Malla N°	Abertura	Recipiente N°	Peso Suelo retenido	Retenido Parcial	Retenido acumulado	Porcentaje que pasa
-	mm	-	gr	%	%	%
1 1/2"	37.5		0	0.00	0.00	100.00
1"	25.4		4.9	0.19	0.19	99.81
3/4"	19.1		36	1.41	1.61	98.39
1/2"	12.7		90.7	3.56	5.17	94.83
3/8"	9.52		48.7	1.91	7.08	92.92
1/4"	6.35		198.3	7.79	14.88	85.12
4	4.76		101.2	3.98	18.85	81.15
	Pasa la No 4		2065.2			

Composición Granulométrica del Material retenido en la Malla No. 4

Peso: 150 gr

Malla N°	Abertura	Recipiente N°	Peso Suelo retenido	Porcentaje retenido	Retenido acumulado	Porcentaje que pasa
-	mm	-	gr	%	%	%
10	2.00		32.3	17.47	17.47	63.67
20	0.840		33.2	17.96	35.43	45.71
30	0.590		17.4	9.41	44.85	36.30
40	0.420		18.5	10.01	54.86	26.29
50	0.297		8.2	4.44	59.29	21.86
60	0.250		5.8	3.14	62.43	18.72
100	0.149		10.9	5.90	68.33	12.82
200	0.074		5	2.70	71.03	10.12
pasa la 200			18.7	10.12		

Totales: 150 100.00 100.00



Peso del suelo húmedo (g)	Peso del suelo seco (g)	w(%)
300	234	28.21

CONTENIDO DE HUMEDAD

Localización: 508487.13, 2375032.10
 Muestra No: 5 Prof. : 10 metros
 Descripción: _____
 Pero de la muestra total: 2560 gr

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Fecha: _____ Operador: _____ Calculista: _____

Composición Granulométrica del Material retenido en la Malla No. 4

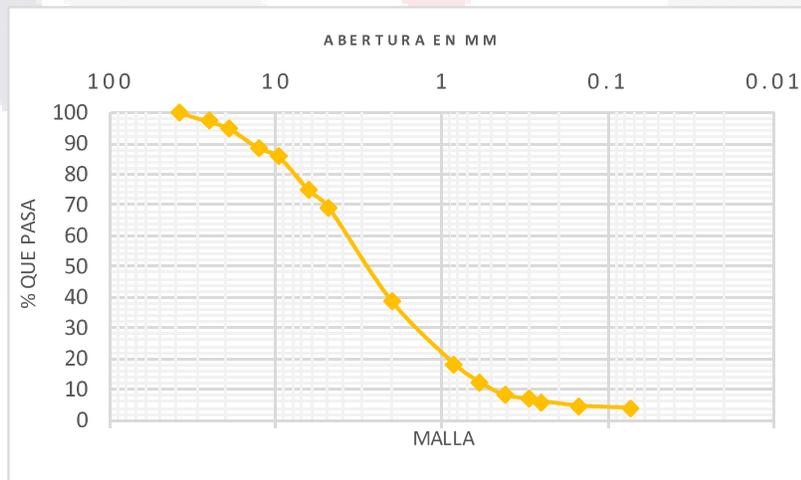
Malla N°	Abertura	Recipiente N°	Peso Suelo retenido	Retenido Parcial	Retenido acumulado	Porcentaje que pasa
-	mm	-	gr	%	%	%
1 1/2"	37.5		0	0.00	0.00	100.00
1"	25.4		68.4	2.67	2.67	97.33
3/4"	19.1		62.5	2.44	5.11	94.89
1/2"	12.7		159.5	6.23	11.34	88.66
3/8"	9.52		79.9	3.12	14.46	85.54
1/4"	6.35		271.8	10.62	25.08	74.92
4	4.76		155.4	6.07	31.15	68.85
	Pasa la No 4		1762.5			

Composición Granulométrica del Material retenido en la Malla No. 4

Peso: 150 gr

Malla N°	Abertura	Recipiente N°	Peso Suelo retenido	Porcentaje retenido	Retenido acumulado	Porcentaje que pasa
-	mm	-	gr	%	%	%
10	2.00		66	30.29	30.29	38.55
20	0.840		44.6	20.47	50.76	18.08
30	0.590		13	5.97	56.73	12.12
40	0.420		9.1	4.18	60.91	7.94
50	0.297		2.78	1.28	62.18	6.66
60	0.250		1.7	0.78	62.96	5.88
100	0.149		3.11	1.43	64.39	4.46
200	0.074		1.6	0.73	65.13	3.72
pasa la 200			8.11	3.72		

Totales: 150 100.00 100.00



Peso del suelo humedo (g)	Peso del suelo seco (g)	w(%)
300	178	68.54

CONTENIDO DE HUMEDAD

Anexos

Localización 508629.92, 2373959.13
 Muestra No 6 Prof. : 8 metros
 Descripción:
 Pero de la muestra total: 2415 gr

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Fecha: _____ Operador: _____ Calculista: _____

Composición Granulométrica del Material retenido en la Malla No. 4

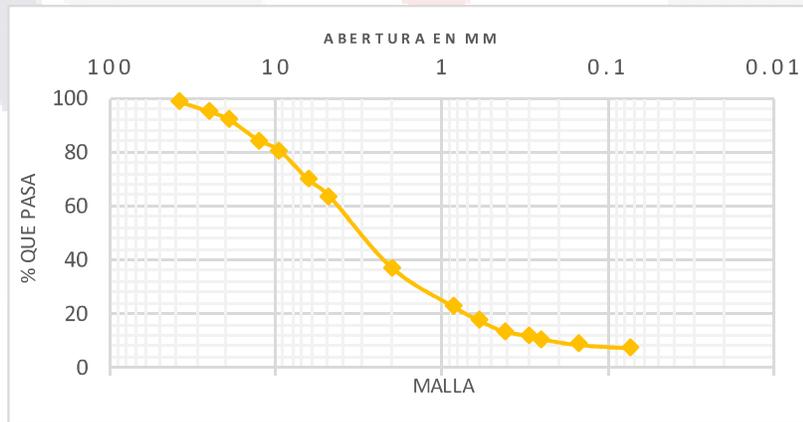
Malla N°	Abertura	Recipiente N°	Peso Suelo retenido	Retenido Parcial	Retenido acumulado	Porcentaje que pasa
-	mm	-	gr	%	%	%
1 1/2"	37.5		33.2	1.37	1.37	98.63
1"	25.4		83.5	3.46	4.83	95.17
3/4"	19.1		72.7	3.01	7.84	92.16
1/2"	12.7		183	7.58	15.42	84.58
3/8"	9.52		93	3.85	19.27	80.73
1/4"	6.35		261.5	10.83	30.10	69.90
4	4.76		146	6.05	36.14	63.86
	Pasa la No 4		1542.1			

Composición Granulométrica del Material retenido en la Malla No. 4

Peso 150 gr

Malla N°	Abertura	Recipiente N°	Peso Suelo retenido	Porcentaje retenido	Retenido acumulado	Porcentaje que pasa
-	mm	-	gr	%	%	%
10	2.00		62.2	26.48	26.48	37.38
20	0.840		34.3	14.60	41.08	22.77
30	0.590		11.8	5.02	46.10	17.75
40	0.420		9.4	4.00	50.10	13.75
50	0.297		3.8	1.62	51.72	12.13
60	0.250		3	1.28	53.00	10.86
100	0.149		4.9	2.09	55.09	8.77
200	0.074		2.8	1.19	56.28	7.58
pasa la 200			17.8	7.58		

Totales: 150 100.00 100.00



Peso del suelo humedo (g)	Peso del suelo seco (g)	w(%)
300	247.4	21.26

CONTENIDO DE HUMEDAD

Localización: 509301, 2372074
 Muestra No: 7 Prof. : 8 metros
 Descripción: _____
 Pero de la muestra total: 2580 gr

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Fecha: _____ Operador: _____ Calculista: _____

Composición Granulométrica del Material retenido en la Malla No. 4

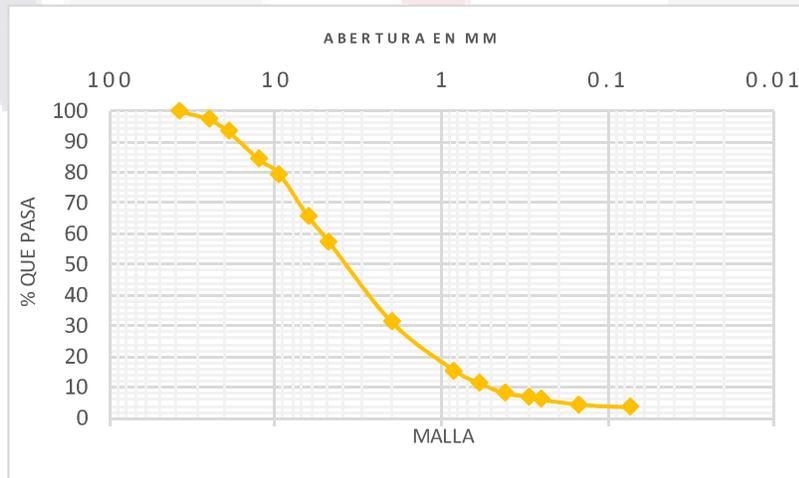
Malla N°	Abertura	Recipiente N°	Peso Suelo retenido	Retenido Parcial	Retenido acumulado	Porcentaje que pasa
-	mm	-	gr	%	%	%
1 1/2"	37.5		0	0.00	0.00	100.00
1"	25.4		63.9	2.48	2.48	97.52
3/4"	19.1		109	4.22	6.70	93.30
1/2"	12.7		226.5	8.78	15.48	84.52
3/8"	9.52		126.2	4.89	20.37	79.63
1/4"	6.35		358.8	13.91	34.28	65.72
4	4.76		211.4	8.19	42.47	57.53
	Pasa la No 4		1484.2			

Composición Granulométrica del Material retenido en la Malla No. 4

Peso 150 gr

Malla N°	Abertura	Recipiente N°	Peso Suelo retenido	Porcentaje retenido	Retenido acumulado	Porcentaje que pasa
-	mm	-	gr	%	%	%
10	2.00		68	26.08	26.08	31.45
20	0.840		41.2	15.80	41.88	15.65
30	0.590		10.71	4.11	45.99	11.54
40	0.420		8.42	3.23	49.22	8.31
50	0.297		3.1	1.19	50.41	7.12
60	0.250		2.5	0.96	51.36	6.16
100	0.149		4.2	1.61	52.97	4.55
200	0.074		2.4	0.92	53.90	3.63
pasa la 200			9.47	3.63		

Totales: 150 100.00 100.00



Peso del suelo humedo (g)	Peso del suelo seco (g)	w(%)
300	219.8	36.49

CONTENIDO DE HUMEDAD





ANEXO B. LÍMITES DE CONSISTENCIA

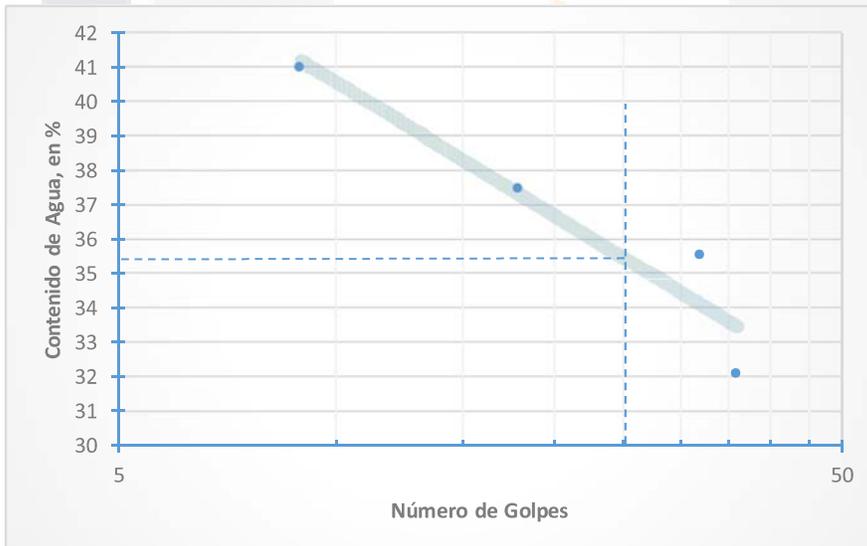


Localización: 506402.29, 2379338.84
 Muestra: 1 Prof. : 1 metro
 Descripción: _____

LIMITES DE CONSISTENCIA

LIMITE LIQUIDO

Prueba N°	Capsula N°	Número de Golpes	Peso cápsula + Suelo húmedo gr	Peso cápsula + Suelo Seco gr	Peso del Agua gr	Peso de la cápsula gr	Peso del suelo seco gr	Contenido de agua %
1	5	9	37.1	33.38	3.72	24.3	9.08	40.97
2	116	18	37.8	34.45	3.35	25.5	8.95	37.43
3	114	32	39.6	35.8	3.8	25.1	10.7	35.51
4	120	36	37.6	34.59	3.01	25.2	9.39	32.06



%

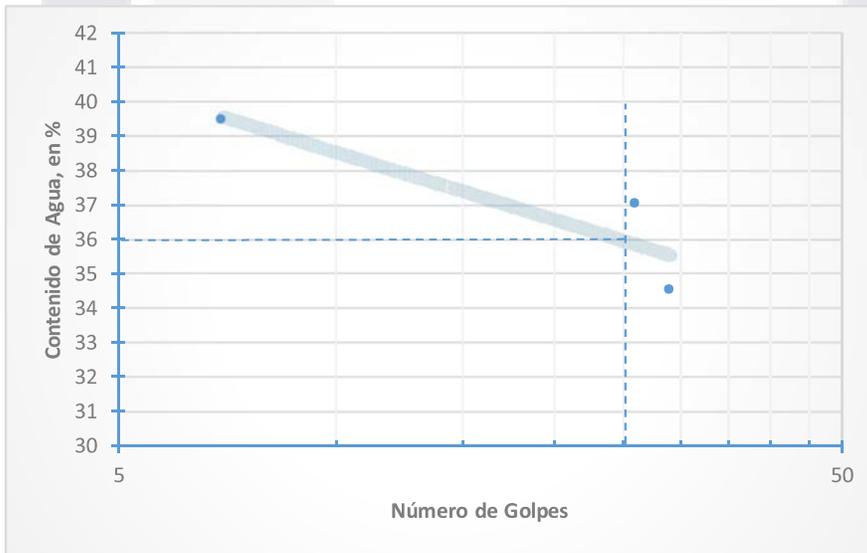
LL= 35.5
 Lp= NP
 Ip= -

Localización: 507390.28, 2380009.04
 Muestra: 2 Prof. : 3.00 metros
 Descripción: _____

LIMITES DE CONSISTENCIA

LIMITE LIQUIDO

Prueba N°	Capsula N°	Número de Golpes	Peso cápsula + Suelo húmedo	Peso cápsula + Suelo Seco	Peso del Agua	Peso de la cápsula	Peso del suelo seco	Contenido de agua
---	---	---	gr	gr	gr	gr	gr	%
1	1	7	49	42.49	6.51	26	16.49	39.48
3	4	26	37.1	34.1	3	26	8.1	37.04
4	3	29	34.8	32.03	2.77	24	8.03	34.50



%

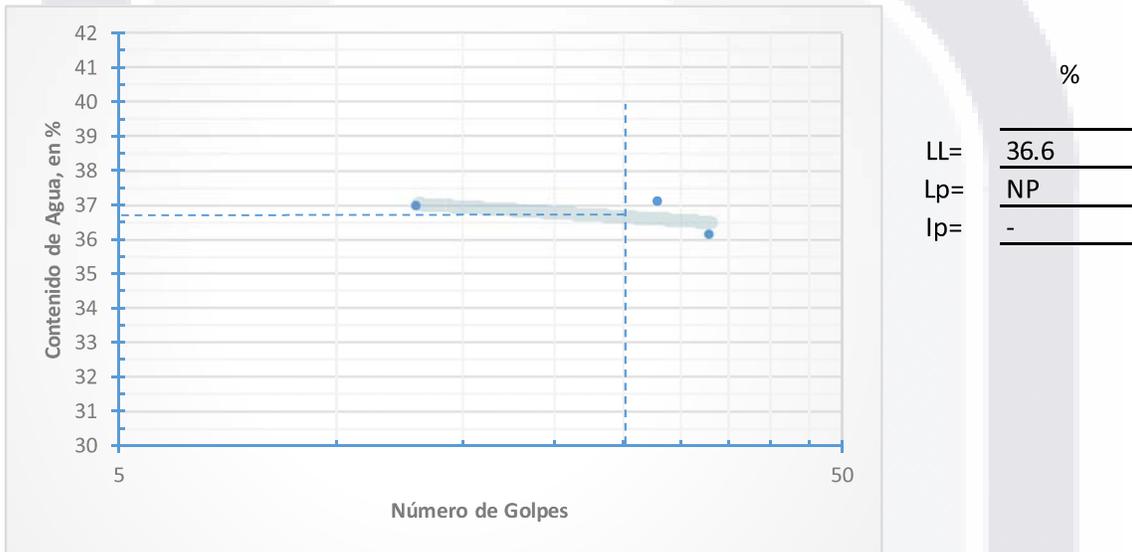
LL= 36
 Lp= NP
 Ip= -

Localización: 508289.44, 2379709.49
 Muestra: 3 Prof. : 6 metros
 Descripción: _____

LIMITES DE CONSISTENCIA

LIMITE LIQUIDO

Prueba N°	Capsula N°	Número de Golpes	Peso cápsula + Suelo húmedo gr	Peso cápsula + Suelo Seco gr	Peso del Agua gr	Peso de la cápsula gr	Peso del suelo seco gr	Contenido de agua %
1	61	28	38.4	34.95	3.45	25.645	9.305	37.08
2	120	33	35.23	32.6	2.63	25.32	7.28	36.13
3	5	13	38.805	34.85	3.955	24.15	10.7	36.96

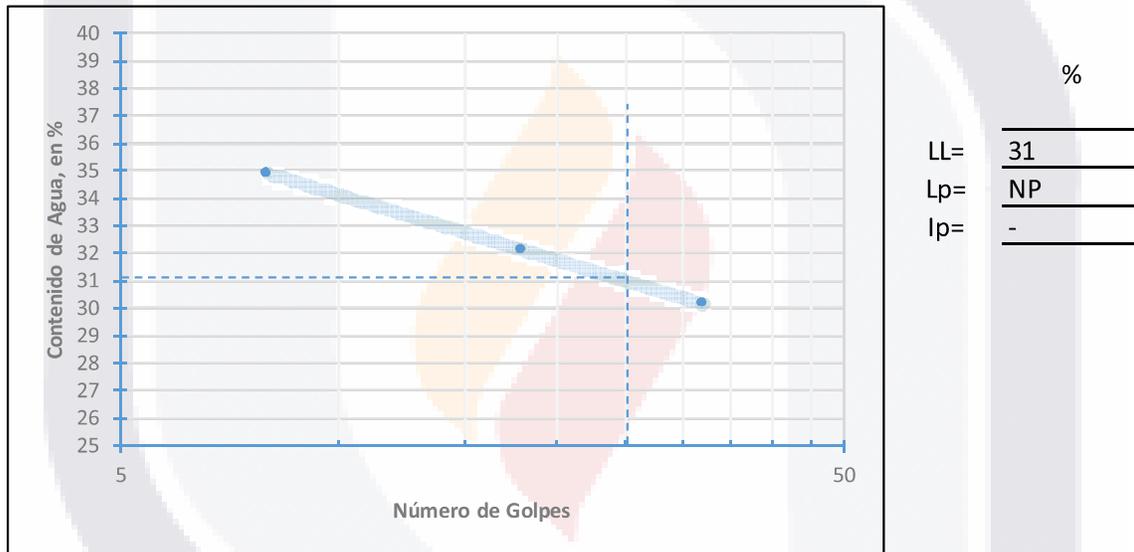


Localización: 506058.30, 2381524.67
 Muestra: 4 Prof. : 3 metros
 Descripción: _____

LIMITES DE CONSISTENCIA

LIMITE LIQUIDO

Prueba N°	Capsula N°	Número de Golpes	Peso cápsula + Suelo húmedo gr	Peso cápsula + Suelo Seco gr	Peso del Agua gr	Peso de la cápsula gr	Peso del suelo seco gr	Contenido de agua %
1	1	8	43.75	38.41	5.34	23.11	15.3	34.90
2	6	18	45.8	40.99	4.81	26	14.99	32.09
3	2	32	41.35	37.11	4.24	23.05	14.06	30.16

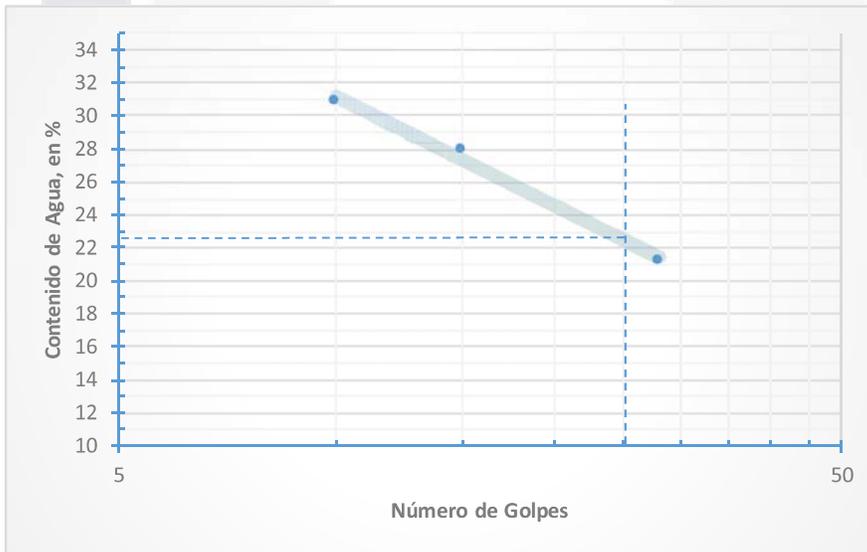


Localización: 508487.13, 2375032.10
 Muestra: 5 Prof. : 10 metros
 Descripción: _____

LIMITES DE CONSISTENCIA

LIMITE LIQUIDO

Prueba N°	Capsula N°	Número de Golpes	Peso cápsula + Suelo húmedo gr	Peso cápsula + Suelo Seco gr	Peso del Agua gr	Peso de la cápsula gr	Peso del suelo seco gr	Contenido de agua %
1	7	10	33.67	31.35	2.32	23.82	7.53	30.81
2	18	15	31.53	29.65	1.88	22.92	6.73	27.93
3	8	28	45.46	43.08	2.38	31.85	11.23	21.19



%

LL= 22.4
 Lp= NP
 Ip= -





ANEXO C. PRUEBA DE ABSORCIÓN



Resultados de la prueba de absorción

Muestra	Peso suelo seco gr	Peso suelo saturado gr	Peso del Agua gr	Absorción %
1	150.0	314.80	164.80	109.87
2	250.0	499.00	249.00	99.60
3	150.0	323.20	173.20	115.47
4	200.0	391.40	191.40	95.70
5	150.0	279.60	129.60	86.40
6	200.0	374.80	174.80	87.40
7	200.0	387.70	187.70	93.85





ANEXO D. FOTOGRAFÍAS



Fotografías



LAND SUBSIDENCE AND ITS EFFECTS ON THE URBAN AREA OF TEPIC CITY, MEXICO

WILLIAM H. HERRERA LEÓN¹, JESÚS PACHECO MARTÍNEZ², MARTÍN HERNÁNDEZ MARÍN³,
RAUDEL PADILLA CENICEROS² & MARÍA DE LA LUZ PÉREZ REA⁴

¹Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Mexico

²Departamento de Construcción Estructuras, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Mexico

³Departamento de Geotecnia y Hidráulica, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Mexico

⁴Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Mexico

ABSTRACT

Fresh water is one of the natural resources needed for supply of urban, industrial and agricultural development; and its scarcity could be critical for urban growth. In the last decades, ground water exploitation has had a great negative impact in arid and semi-arid areas around the world, where groundwater is the only source for fresh water and the aquifer system is composed of unconsolidated sediment. Intense groundwater extraction results in a drop in the groundwater level, which in turn induces the gradual subsidence of surface terrain, due to the compaction of unconsolidated sediments. This phenomenon known as subsidence is due to groundwater extraction, and currently several alluvial and lacustrine valleys with large growing cities around the world are undergoing its effects. When the aquifer system lies on bedrock with irregular topography, uneven settlement is generated, leading to the occurrence of surface ground failures that damage both urban infrastructure and housing. Tepic City is a growing city located in an incipient subsidence area in central West Mexico. Even though the subsidence process in Tepic City was detected in 2014, the local government agencies responsible for urban planning have not realized this new hazard for city growth, and consequently there are still no regulations for new urban developments that may become exposed to subsidence effects. Herein we analyze and discuss the relationship between natural factors and anthropogenic ones which have conditioned and triggered the subsidence process in the Tepic area. Additionally, we present a description of the current effects of subsidence on the urban areas of Tepic City, and discuss subsidence damages' expected evolution if no actions are undertaken for their mitigation and prevention.

Keywords: aquifer, groundwater, bedrock, groundwater extraction, failures, Mexico, sinking land, subsidence, Tepic City.

1 INTRODUCTION

Subsidence is the gradual settlement of large areas of the earth's surface. This phenomenon has its origin in the extraction of subsoil resources, whether minerals, hydrocarbons, gas or water. In Mexico, reported subsidence is mainly caused by the extraction of water from granular aquifers, which are exploited in order to supply potable water to urban, industrial and agricultural centers, resulting in a strong anthropogenic impact that is manifested by differential land settlement. In Mexico, this phenomenon is concentrated in the trans-Mexican volcanic belt (except for some cases in the north of the country), mainly geological structures of the *graben* type that over time were filled with alluvial or lacustrine water carried there, forming fertile valleys suitable for agriculture or livestock. Since the last century, subsidence and cracking of the surface occurs in different valleys and coasts around the world [1], [2], affecting mainly urban areas where there is a greater probability of damage to infrastructure, housing areas, productive plant and industrial zones, etc. Subsidence, its causes and its effects have been documented, investigated and discussed in different scientific forums around the world [1]–[8].



Burbey [9] mentioned the climatic and geohydrological conditions associated with zones prone to present subsidence and ground failure. Some of these conditions occur in the Matatipac Valley, among which are:

- The Valley is part of the Tepic-Zacoalco graben (Fig. 1) that has NW-SE orientation and extends from the Chapala Lake in Jalisco until San Blas Nayarit [10], [11].
- The filling material of the Matatipac Valley comprises quaternary and tertiary volcanic materials of little to medium consolidation.
- Although there is no arid or semi-arid climate in the Matatipac Valley area, the volume of water recharged to the aquifer is less than the volume of water extracted.
- As a consequence of the previous point, there has been a decline in static levels that is due to excessive pumping of groundwater.

In the studied area, the most notorious hydrographic feature is the Mololoa River, which crosses the Matatipac Valley from south to north. The secondary surface currents are the streams Las Cuevas, El Puente Grande, El Cordoncillo, El Llorón de Mora, San Francisco and Mal Paso, among others that discharge their waters to the Rio Grande de Santiago. All of them are tributaries of the Mololoa river that lead the precipitated water in the high parts that surround the Valley to the low part [12]–[14].

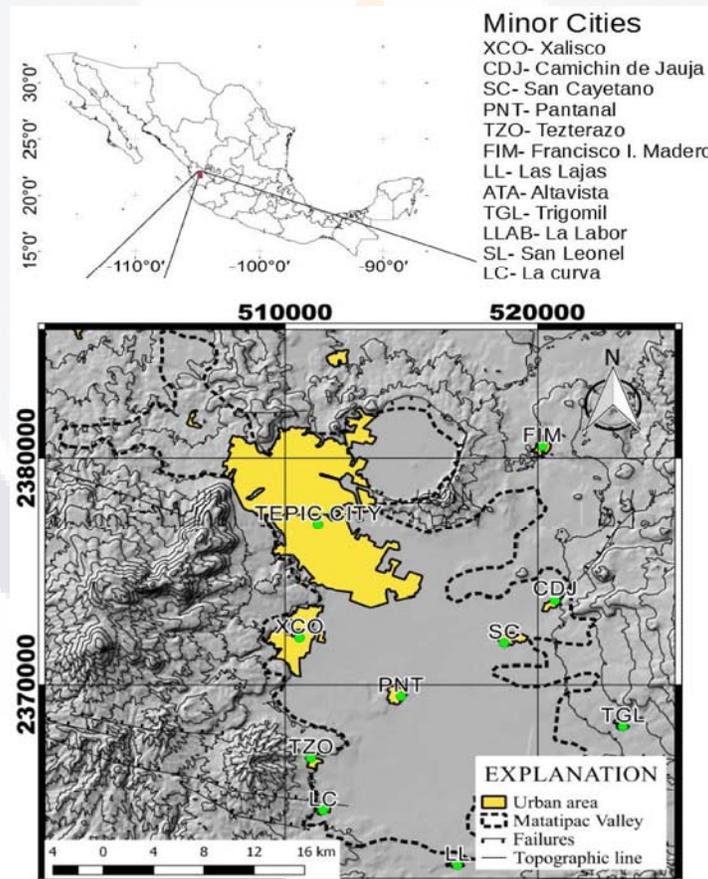


Figure 1: Map showing location of Matatipac Valley and Tepic City.

Despite the existence of surface currents, in recent decades the use of groundwater was favored because it is more economical to drill a shallow well than to construct hydraulic works for the use of surface water currents. In the region studied, the average annual rainfall is 1245 mm, which is less than the average annual evapotranspiration potential (1700 mm). According to this, the potential for recharging the aquifer naturally is limited and depends on the speed with which the water infiltrates the subsoil, thus preventing its evaporation. Regarding the hydrogeology of the Matatipac Valley: Although the local government and the federal office in charge of the administration of water resources have carried out exploratory and hydraulic water studies, much of the information is lost in the archives of different government agencies involved. Although this type of information is public in Mexico, its access is delayed and difficult because the government agencies do not have a program or initiative to publicize the type of studies they have, their special and temporary coverage, or the results achieved to date. Hence, this work presents information that was generated in several unpublished and published technical reports about the Matatipac Valley aquifer. The information presented is aimed at explaining the subsidence process that is currently presented and its current consequences. It also presents an analysis and a discussion about the expected effects due to subsidence and fracture of the land in the urban development, if the same tendency of exploitation of the aquifer continues.

2 GEOLOGY OF MATATIPAC VALLEY

The Matatipac Valley is located in the geological province of the trans-Mexican volcanic belt (FVTM) which is a magmatic arch from the mid-late Miocene [15], [16], which forms a 16° angle with the Mesoamerican Trench [17]. The FVTM extends from the coast of the state of Veracruz and ends in the town of San Blas in the state of Nayarit [10], [11]. This physiographic province is divided into three sections [10], [16] (Fig. 2): a western section that extends from San Blas in the state of Nayarit and includes the Jalisco block [18]; another central section that begins at the western boundary of the Jalisco block and is limited to the Taxco-San Miguel de Allende fault system [19]; finally, an eastern section that extends from this fault system to the Gulf of Mexico [17].

The Matatipac Valley is located in the western sector of the FVTM and is part of the Jalisco block that is delimited on the continent by three extension structures [20], which are: the graben of Colima, the graben of Chapala and the Graben Tepic-Zacoalco [21], [22]. The Tepic-Zacoalco graben was formed by an extension regime during the Pliocene-Quaternary period [23]–[26], which is a cortical structure with an approximate NW direction, where its faults have an approximate distance of 250 km and a width between them of 50 km [27]. It is constituted of a series of graben and semi-graben, which are divided [15], [28] into:

- a) The Pochotitan fault system located at the NW, which is a system of normal listric faults at a high angle of inclination, with N-NE orientation;
- b) Rift steps that are in the center and that consist of two graben called Compostela-Ceboruco and the graben Plan de Barrancas-Santa Rosa;
- c) Faults localized in the Jalisco Block conformed by a semi-graben called Amatlán de Cañas.

Within the Pochotitan fault system is the Matatipac Valley, the subject of this study. Broadly speaking and according to the Mexican Geological Survey (Fig. 3), the geology is described below in order from the oldest units to the most recent ones.

Rhyolites (TmplTR-R). They are overlying the andesitic rocks and ignimbritic tuffs that appear in the form of spills and dome bodies of a fluid structure, pseudo-stratified with abundant obsidian fragments.



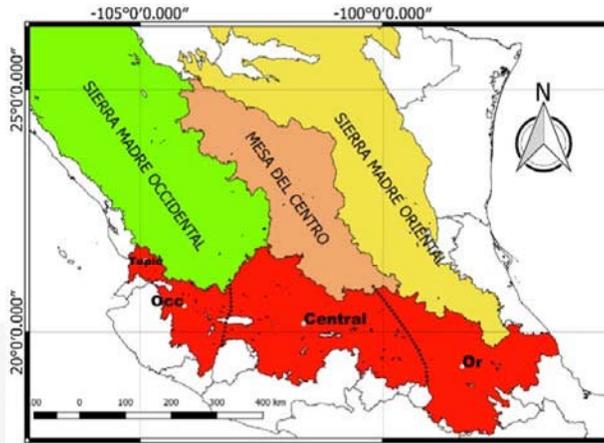


Figure 2: Trans-Mexican Volcanic Belt: (Occ) occidental or West; central; and (Or) oriental or East.

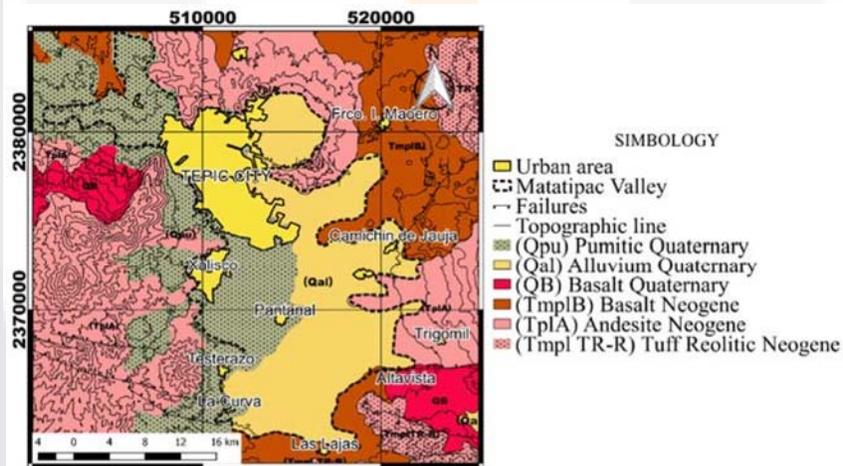


Figure 3: Geology of Matatipac Valley.

Basaltic Andesites (TplA). These rocks are found in the eastern part of the area, forming complex structures such as the Sangangüey Volcano and others of minor importance, of basaltic composition; The representative rocks of this unit present textures from aphanitic to porphyry, with a compact structure and dark gray color that intertwines to greenish gray. An age of the Pliocene is attributed to it.

Basalts (TmplB). These rocks are located in the eastern part of the Valley and comprise the young volcanic rocks, represented by wide plateaus of considerable thickness, which are observed as accumulations of dense spills that cover the pre-existing relief. They have an aphanitic texture that varies from vesicular, with crystals somewhat altered by their exposure to atmospheric agents; and are observed at certain points, covered by thin layers of pyroclastic material.



Basalts (QB). They constitute the most recent volcanic emissions in the Valley and are represented by conical apparatuses and coriaceous bodies, distributed in dispersed form, but some follow superficially masked fault lines.

Alluvium and Soils (Qal). This group includes accumulation materials formed by the alteration and disintegration of pre-existing rocks exposed to air, humidity and the effects of organic matter. Its composition is limo-clayey and little consolidated fragments of pumice. It is found in the superficial part of the entire stratigraphic column described.

Pumicites (QPu) Loose or little consolidated materials of pyroclastic origin observed in the western part of the Valley forming thick deposits with alternating layers of fine grains with layers of coarse-grained fragments of pumice composition that originate well-defined, classified pseudo-strata.

Due to the geological conditions in the subsoil, there are no lithological units that define confinement in the areas that report separation between shallow and deep levels [12]. The maximum thicknesses explored in the area of the Valley are from 250 to 300 m; however, no units are reported that should be considered as a basement of the aquifer, so the thickness of the saturated area of the aquifer system is located at 500 or 600 m in depth, based on the results of the hydrogeochemical analysis of the area [13].

We observed that in the dates of these analyses, the greatest defection occurs towards the central zone of the Valley, towards the south of the city of Tepic and that the minor ones appear in the northern part of the city. The greater defection in the central part is because the highest concentration of extraction wells are located in these areas. The average evolution is around -3 to -4 m in said period, equivalent to an average annual rate of abatement of up to 0.5 m [12].

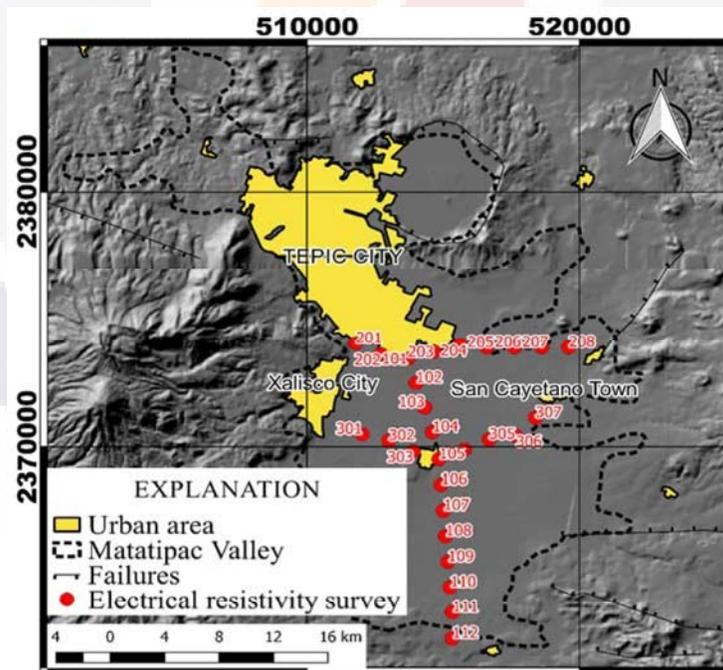


Figure 4: ERS location.

3 GEO-HYDROLOGY OF THE MATATIPAC VALLEY

We obtained three profiles of electrical resistivity survey [13], to which in this work we give a new interpretation: The method used was Wenner. In Fig. 4 the location of the measurements is observed and the nomenclature is the one used in the aforementioned work. The new interpretation allowed us to characterize four hydrogeological units in practically all the profiles, based on the intervals of values of resistivity. The two-dimensional (2D) models of the probes and their interpretation are shown in Fig. 5.

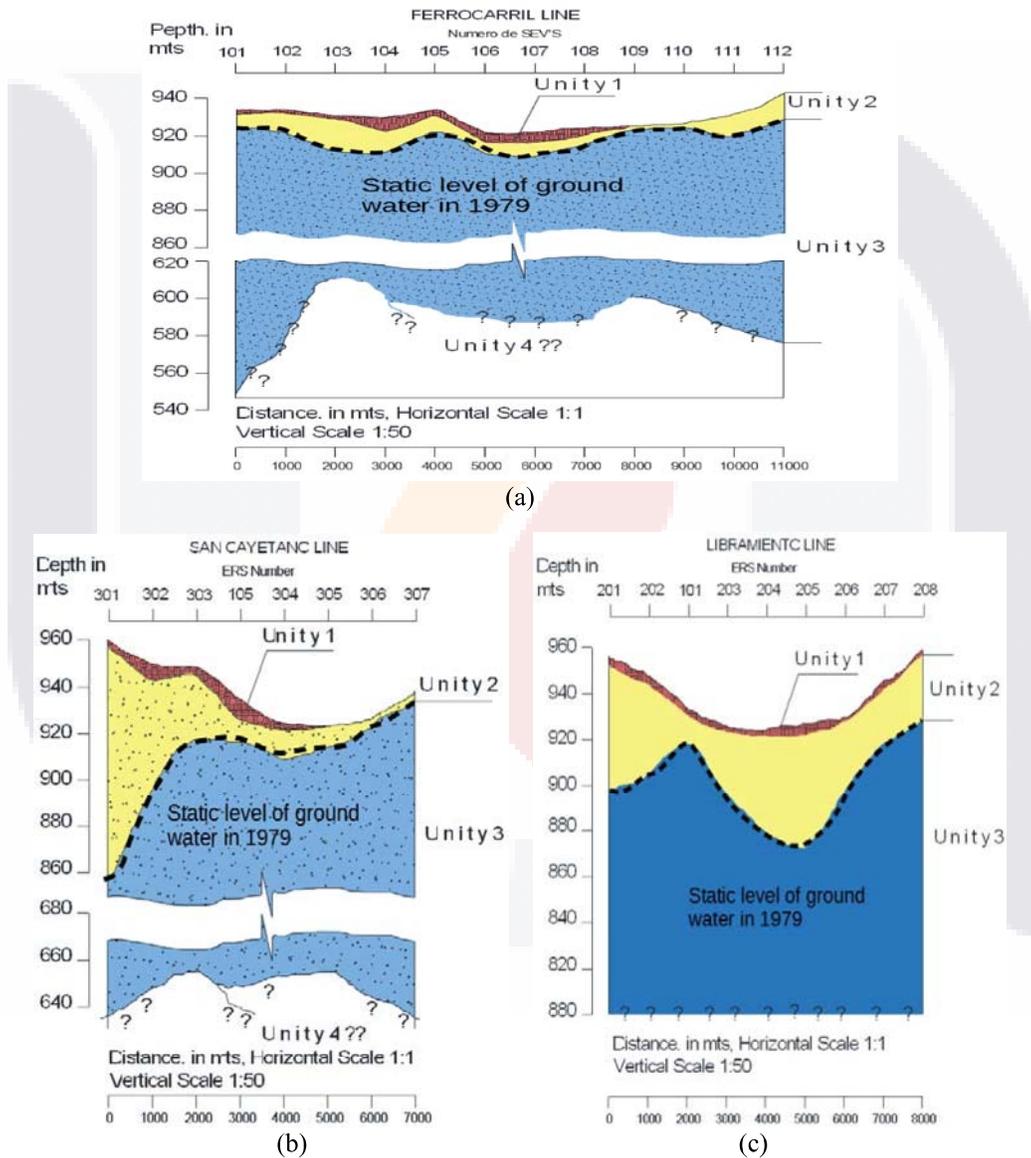


Figure 5: Interpretations of electrical resistivity survey. (a) Train line; (b) San Cayetano line; and (c) Libramiento Line.

The ERS show a decrease in resistivity between 10 and 20 meters, which suggests that the water mirror is at this depth and is hosted by the geohydrological units U3 and U4 that are interpreted as the hydrogeological units currently being used. The three profiles have a separation of approximately one kilometer between SEV. In the three profiles, there are three units that are described from the shallowest to the deepest:

Unit 1: Layer associated with alluvium (QA1) of coarse size (sand and gravel) up to 10 meters thick in the “San Cayetano” profile.

Unit 2: Stratum with variable 1-meter thickness in the railway profile, up to 100 m to the west on the San Cayetano profile. It is associated with the vadose zone of alluvium (QA1) and the pumice fillings (Qpu).

Unit 3: The low resistivity values of this stratum suggest that it is saturated, which is why it is considered to be the hydrogeological unit producing the Valley’s aquifer.

It is composed of alluviums (QA1) from medium to coarse with pumice sands of volcanic origin (Qpu). The SEVs do not register the lower contact of this stratum, so its thickness is unknown.

The fourth unit could not be identified. In Fig. 6 it is observed that the variation of the static levels are in a range of 1 to 9 meters. The abatement comprises the period from May 1985 to April 2003 [12].

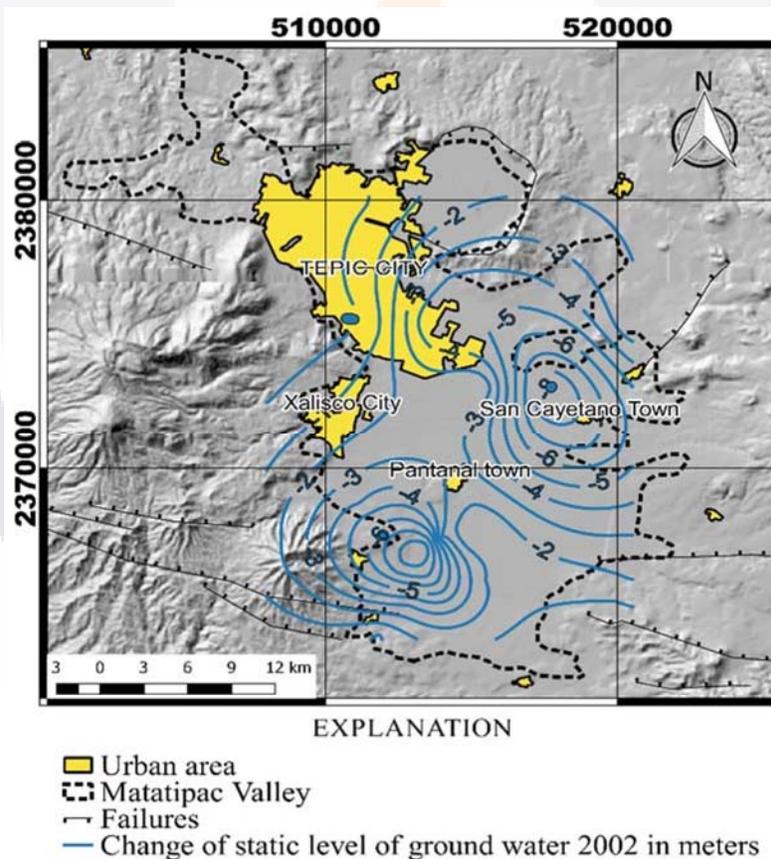


Figure 6: Changes in static level of ground water, 1985 to 2002, in meters.

4 FIRST REPORTS OF DAMAGE RELATED TO THE DEFORMATION OF THE LAND IN THE MATATIPAC VALLEY

The subsoil of the Matatipac Valley is a mixture of materials from different geological eras deposited in the depression formed by the Tepic graben. The materials are homogeneous mixtures of alluviums of coarse to medium sizes, as well as pumicy material, breccias, sands of saturated volcanic origin, silts and clays. In geotechnical studies it is common to obtain values of $N_{60} < 25$, specific weights of 4400 N/m^3 , and Liquid Limit 25 or nonexistent; plus removals of up to 115% of their weight. The surface material is quite favorable for the construction of foundations because its load capacity is relatively high.

The damage caused by this phenomenon has not been quantified, because the phenomenon has not been sufficiently noticeable to alarm governments or those affected; however, for the year 2014 a study was published [29] where the situation of several cities of the country located in the Mexican volcanic belt is described, cities with a population of over 100,000 inhabitants and displaced on compressible landfills, cities such as: Morelia, Aguascalientes, Mexico City, Celaya, Querétaro, Irapuato, San Luis Potosí, Ahuacatlan and Tepic, among others.

SAR images of the ALOS satellite were used between 2007 and 2011, for the city of Tepic in particular, and the acquisitions used were from April 30, 2007 to December 24, 2011: with this we obtained a map of the average speeds and active deformation and areas are identified in Fig. 7(a); the positive velocities are observed in blue, which means movement towards the satellite, and the negative velocities in red represent subsidence. In Fig. 7(b), the speed of the vertical movement in cm is shown in three different points within the city of Tepic.

In the city of Tepic, the area affected by subsidence is approximately 20 km^2 and occurs in a distributed manner throughout the urban area (it has a range of up to 7 cm of subsidence per year), is concentrated in the urban centers of Tepic and Xalisco.

There is no report of subsidence in the areas of agricultural exploitation, it is delimited by the San Juan volcano to the west and the Mololoa River to the east of the city, also points of subsidence are detected within what is the Caldera de Tepic in what is known as La Laguna (the lake).

On the other hand, no cracking of the associated land is reported; however, there is evidence of cracking in SE Tepic, which crosses several colonies and the building where the offices of transit and highway of the state of Nayarit are housed. The evidence is not conclusive; however, a survey was made of deterioration of urban infrastructure such as sidewalks, planters, ruptured pipes and walls in houses, among others: a pattern of damage was discovered that coincides with the maximum speed gradients in the Chaussard map, which gives suspicion about the genesis of cracking in this area (Fig. 8). The differential deformation that occurs is only a few centimeters, so for the untrained eye it can be unnoticed; however, it has all the characteristics of an incipient fracture due to subsidence, due to loss of hydraulic support on a rocky structure of topography, uniform and non-deformable.

The first image used to perform the interferogram was from 2007 and the last one from 2011: it is expected that in years of lag, the configuration of the abatements would be different. If we take the rate of abatement that occurred when the analysis of the aquifer was done, which is approximately 50 cm per year, it would have to be for the year 2011, the date of the last image of the interferogram in the area near the Technological Institute of Tepic (one of the most affected): the abatement would decrease from -3 meters to -5.5 meters and from -4 meters to -6.5 meters, approximately. This assumption of abatement is quite conservative, since it is to be expected that the rate of abatement has grown exponentially in recent years.



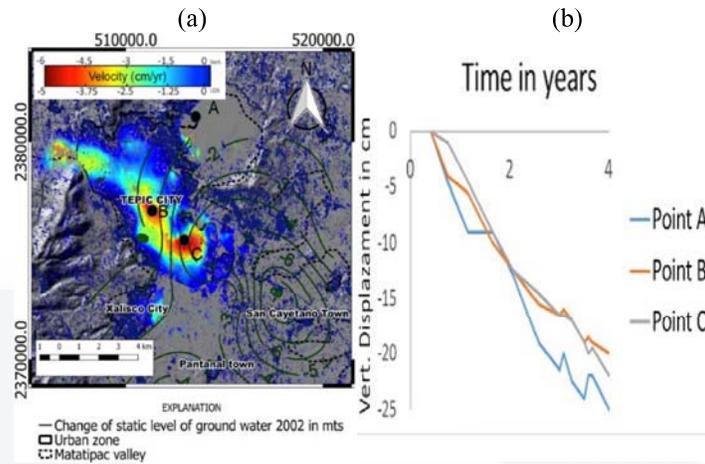


Figure 7: (a) Map of velocity; (b) Vertical displacement per year in 3 points. (Source: modified from Chaussard et al.)

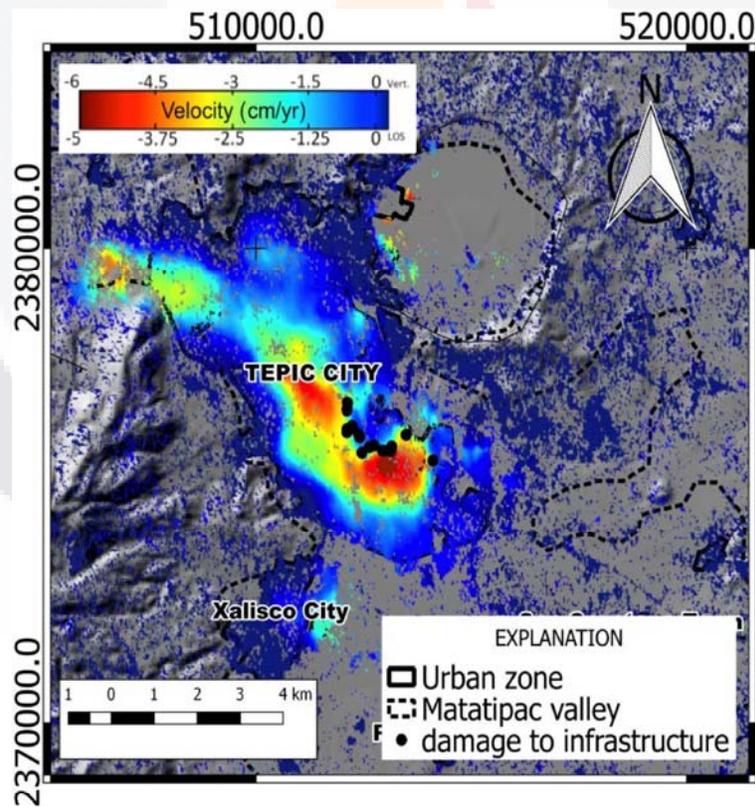


Figure 8: Infrastructure damage in Tepic City.

5 SUMMARY AND CONCLUSIONS

Subsidence of the land, as well as the supposed cracking that occurs in the Matatipac Valley, is a problem that involves several factors that favor the occurrence of deformation of the surface of the land. It can be summarized that there is a granular aquifer system with undefined, unconfined compressibility; intensive pumping of groundwater that exceeds the natural recharge; and an irregular topography of the underlying bedrock of unknown depth. The hydrogeology of the Valley is represented by undefined granular aquifers that have been heavily depleted since the 1980s. The manifestations of surface deformation include differential land subsidence, with maximum recorded rates of 6–7 cm/yr. The problem has not been addressed by the local government, as the damages to infrastructure and individuals have not generated alarm in the population; however, due to the continuous growth of the city of Tepic, as well as of its conurbated zones, increasing demand for groundwater resources will continue in the future. As a result, it is likely that the sinking will continue and related ground failures will appear.

There is inconclusive evidence of cracking forming in the southern part of the city, which crosses human settlements, road infrastructure, and urban equipment, among others.

It is imperative that measures are taken to minimize economic losses related to the problems of collapse, among which we can mention: update construction designs to make them more resistant to the effects of the deformation of the land; and encourage research that leads to greater knowledge of the form and composition of the aquifer system, as well as its piezometric evolution, so that accurate numerical models can be developed that lead to better analysis and prediction of the land subsidence process.

REFERENCES

- [1] Steedman, R.S., Multi-disciplinary assessment of subsidence phenomena in the ravenna area. *Proceedings of the Seventh International Symposium on Land Subsidence*, Shanghai, P.R. China, p. 192, 23–28 Oct. 2005.
- [2] Carreón-Freyre, D., Cerca, M., Galloway, D.L. & Silva-Corona, J.J., *Land Subsidence, Associated Hazards and the Role of Natural Resources Development*, IAHS Press, p. 522, 2010.
- [3] Group 8.4 IHPW, *Guidebook to Studies of Land Subsidence due to Ground-Water Withdrawal*, Unesco, p. 346, 1984.
- [4] Barends, F.B.J., Brouwer, F.J.J. & Schröder, F.H., Land subsidence: by fluid withdrawal, by solid extraction: theory and modelling, environmental effects and remedial measures. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Land Subsidence*, The Hague, the Netherlands, p. 528, 16–20 Oct. 1995.
- [5] Prince, K.R., Galloway, D.L. & Leake, S.A., U.S. geological survey subsidence interest group conference, Edwards Air Force Base, Antelope Valley, CA, 18–19 Nov. 1992: abstracts and summary. *The Survey*, p. 96, 1995.
- [6] U.S. geological survey subsidence interest group conference. *Proceedings of the Technical Meeting, Las Vegas, Nevada, 14–16 Feb. 1995*, p. 48, 1997.
- [7] US geological survey (USGS). Open file report 03-308. USGS subsidence interest group conference. *Proceedings of the Technical Meeting*, Galveston, Texas, 27–29 Nov. 2001, Department of Interior: Austin, Texas. <https://pubs.usgs.gov/of/2003/ofr03-308/pdf/OFR03-308.pdf>. Accessed on: 24 Jan. 2018.
- [8] Borchers, J.W., Land Subsidence Case Studies and Current Research. *Proceedings of the Dr. Joseph F. Poland Symposium on Land Subsidence*, 1998.
- [9] Burbey, T.J., The influence of faults in basin-fill deposits on land subsidence, Las Vegas Valley, Nevada, USA. *Hydrogeol J.*, **10**(5), pp. 525–538, 2002.



- [10] Demant, A., Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. *Rev Mex Cienc Geológicas*, **2**(2), pp. 172–187, 1978.
- [11] Demant, A., A preliminary report on the comenditic dome and ash flow complex of Sierra La Primavera, Jalisco. *Rev Mex Cienc Geológicas*, **2**, pp. 218–222, 1978.
- [12] CONAGUA, Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea acuífero (1804) Valle de Matatipac, estado de Nayarit, 2003.
- [13] SARH, Estudio Geohidrológico Preliminar de las zonas de Matatipac-Zacualpan y Las Varas, Nayarit, 1980.
- [14] CONAGUA, Informe del Modelo Matemático de Simulación del Acuífero del Valle de Matatipac, Estado de Nayarit, 1992.
- [15] Ferrari, L., Pasquarè, G., Venegas-Salgado, S. & Romero-Rios, F., Geology of the western Mexican volcanic belt and adjacent Sierra Madre Occidental and Jalisco block. *Cenozoic Tecton Volcanism Mex.*, **65**, p. 334, 1999.
- [16] Pasquarè, G., Garduno, V.H., Tibaldi, A. & Ferrari, M., Stress pattern evolution in the central sector of the Mexican volcanic belt. *Tectonophysics*, **146**(1), pp. 353–364, 1988.
- [17] Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M.T. & Ferrari, L., Igneous petrogenesis of the Trans-Mexican Volcanic Belt. Special Paper 422: Geology of México: Celebrating the Centenary of the Geological Society of México. Geological Society of America, Online. <https://pubs.geoscienceworld.org/books/book/581/chapter/3803636/>. Accessed on: 14 Dec. 2017.
- [18] Allan, J.F., Geology of the Northern Colima and Zacoalco Grabens, southwest Mexico: Late Cenozoic rifting in the Mexican volcanic belt. *GSA Bull.*, **97**(4), pp. 473–485, 1986.
- [19] Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A.F., Morán-Zenteno, D.J. & Alba-Aldave, L., Rhyolitic volcanism in extension zone associated with strike-slip tectonics in the Taxco region, southern Mexico. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **118**(1), pp. 1–14, 2002.
- [20] Stock, J.M., Tectónica de placas y la evolución del Bloque Jalisco, México. *GEOS.*, **13**(3), pp. 3–9, 1993.
- [21] Bourgois, J. & Michaud, F., Active fragmentation of the North America plate at the Mexican triple junction area off Manzanillo. *Geo-Mar. Lett.*, **11**(2), pp. 59–65, 1991.
- [22] Luhr, J.F., Nelson, S.A., Allan, J.F. & Carmichael, I.S.E., Active rifting in southwestern Mexico: Manifestations of an incipient eastward spreading-ridge jump. *Geology*, **13**(1), pp. 54–57, 1985.
- [23] Nieto-Obregon, J., Urrutia-Fucugauchi, J., Cabral-Cano, E. & de la Campa, A.G., Listric faulting and continental rifting in western Mexico – A paleomagnetic and structural study. *Tectonophysics*, **208**(4), pp. 365–376, 1992.
- [24] Legorreta, O.Q., Michaud, F., Bourgois, J. & Barrier, E., Evolución de la frontera septentrional del bloque de Jalisco, México. *Rev. Mex. Cienc. Geológicas*, **10**(2), p. 2, 1993.
- [25] Ferrari, L., Pasquare, G., Venegas, S., Castillo, D. & Romero, F., Regional tectonics of western Mexico and its implications for the northern boundary of the Jalisco block. *Geofísica Int.*, **33**(1), pp. 139–151, 1994.
- [26] Rosas-Elguera, J., Ferrari, L., Garduño-Monroy, V.H., & Urrutia-Fucugauchi, J., Continental boundaries of the Jalisco block and their influence in the Pliocene-Quaternary kinematics of western Mexico. *Geology*, **24**(10), pp. 921–924, 1996.
- [27] Frey, H.M., Lange, R.A., Hall, C.M., Delgado-Granados, H. & Carmichael, I.S., A Pliocene ignimbrite flare-up along the Tepic-Zacoalco rift: Evidence for the initial



- stages of rifting between the Jalisco block (Mexico) and North America. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **119**(1–2), pp. 49–64, 2007.
- [28] Rosas-Elguera, J., Late Miocene to Quaternary extension at the northern boundary of the Jalisco block, western Mexico: The Tepic-Zacoalco rift revised. *Cenozoic Tecton Volcanism Mex.*, **41**, p. 334, 2000.
- [29] Chaussard, E., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E. & Amelung, F., Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series. *Remote Sens. Environ.*, **140**(Suppl. C), pp. 94–106, 2014.

