



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias
(Mecánica de Suelos)

ANÁLISIS DE LA SUBSIDENCIA EN VALLES LACUSTRES POR MEDIO DE LA TEORÍA DE
PÉRDIDA VOLUMÉTRICA

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

Presenta:

ING. GIL HUMBERTO OCHOA GONZÁLEZ

Dirigido por:

DR. EDUARDO ROJAS GONZÁLEZ

SINODALES

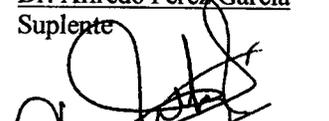
Dr. Eduardo Rojas González
Presidente

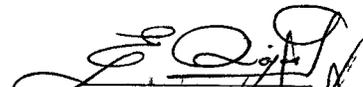
Dr. Jorge Arturo Arzate Flores
Secretario

Dr. Moisés Arroyo Contreras
Vocal

M. en C. Darío Hurtado Maldonado
Suplente

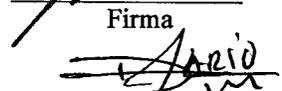
Dr. Alfredo Pérez García
Suplente

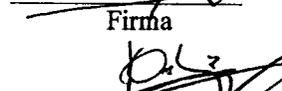

Ing. Jorge Martínez Carrillo
Director de la Facultad
De Ingeniería

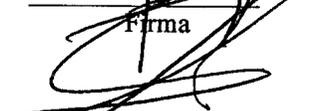

Firma


Firma


Firma


Firma


Firma


Dr. Sergio Quesada Aldana
Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
11 de abril de 2003
México

BIBLIOTECA CENTRAL, U.A.Q.

No. Adq. 167854

No. Título _____

Clas 624.15136

016a

Ej.1

LIBRERIA CENTRAL D.A.C.

RESUMEN

En varias ciudades medianas y pequeñas que se encuentran dentro del Cinturón Volcánico Mexicano se ha presentado subsidencia, agrietamientos y fallas en la superficie del suelo, las cuales han causado daños a diversas obras civiles. Este fenómeno se atribuye principalmente a la sobreexplotación de los acuíferos lo que provoca un abatimiento de los niveles piezométricos. En este trabajo se ha realizado un análisis utilizando la teoría de la pérdida volumétrica el cuál resulta útil para calcular los desplazamientos de la masa de suelo debidos a una extracción finita de material. El análisis se hace analizando el cambio en los esfuerzos efectivos de la masa de suelo con lo cual es posible relacionar el comportamiento volumétrico del suelo con el cambio en la presión del agua en los poros. Esta metodología permite calcular tanto los desplazamientos como las deformaciones dentro de la masa del suelo; así se han modelado diferentes perfiles obtenidos con datos de observación en pozos y con geofísica, en los cuales se observan agrietamientos en la superficie. La parte más importante de los resultados de la modelación es la localización de zonas donde existen esfuerzos de tensión y zonas donde los hundimientos diferenciales son pronunciados. En la comparación con las observaciones de campo, ambas zonas llegan a coincidir por lo que se concluye que esta metodología, combinada con métodos de campo como la geofísica puede ser de gran utilidad para la predicción de la aparición y del desarrollo de agrietamientos.

(Palabras clave: Subsidencia, hundimiento, agrietamiento de suelo, sobreexplotación)

SUMMARY

In several medium and small cities that are inside the Mexican Volcanic Belt there have been subsidence, fissures and displacements in the surface of the soil, which had caused damages to diverse civil works. This phenomenon is attributed mainly to the overexploitation of the aquifer that causes a depression of the piezometrics levels. In this work an analysis has been carried out using the theory of the volumetric loss which it is useful in order to calculate the displacements of the mass of soil due to a finite extraction of material. The analysis is made analyzing the change in the effective stress of the mass of soil. With this it is possible to relate the volumetric behavior of the soil with the change in the pressure of the water in the pores. This methodology permits the calculations of the displacements and the deformations inside the mass of the soil; in such a way these profiles obtained with data of observations in wells and with geophysics have been modeled in which crackings in the surface are observed. The most important part of the results of the modeling is the localization of zones where there is stress of tension and zones where the differential settlements are pronounced. In the comparison with the field observations both zones come to coincide and thus it can be concluded that this methodology, combined with methods of field like the geophysics, could be of great utility for the prediction of the appearance and of the development of fissures.

(Key words: Subsidence, settlement, soil fissures, overexploitation)

A Jaél
A México

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios.

Gracias a mi esposa por su compañía y apoyo.

Gracias a mi familia que me ha apoyado en todos los aspectos.

Gracias a todos mis maestros dentro y fuera de la Universidad por todo lo que me han enseñado.

Gracias a mis compañeros por compartir los mismos anhelos de aprendizaje.

Gracias a todos por que sin ellos no podría alcanzar mis metas.

ÍNDICE

RESUMEN.....	i
SUMMARY	ii
DEDICATORIAS.....	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE.....	v
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
I.1. Objetivo	2
II. SUBSIDENCIA.....	3
II.1. Problema de subsidencia y agrietamiento	4
II.2. Casos de Querétaro y Aguascalientes.	7
III. MODELOS EXISTENTES.....	12
III.1. Modelos empíricos.	12
III.2. Modelos semi – teóricos.	15
III.3. Modelos teóricos.	19
III.4. Comentarios sobre los modelos analizados	23
IV. MARCO TEÓRICO.....	24
IV.1. Teoría de la perdida de volumen.....	24
IV.2. Teoría de la consolidación	27
IV.3. Aplicación en el análisis de subsidencia.....	29
V. CÓDIGO DE COMPUTADORA.....	30
V.1. Antecedentes	30
V.2. Hipótesis y limitaciones.....	30
V.3. Desarrollo	31
V.4. Ejemplos con el código de computadora.....	41
V.5. Validación teórica del modelo	52
V.6. Comentarios sobre la calibración.....	52
VI. ANÁLISIS USANDO EL CÓDIGO COMPUTACIONAL	58
VI.1. Aguascalientes:	58
VI.1.1. Perfil Geofísico:	58
VI.1.2. Perfiles a partir de observación en los pozos:	60
VI.2. Querétaro:	67
VI.2.1. Carretera a Tlacote modelo uno:	68
VI.2.2. Carretera a Tlacote modelo dos:.....	74
VI.2.3. Predio Ensueño perfil No 1	77
VI.2.4. Prolongación Zaragoza:	80
VI.2.5. Calle Epigmenio González:	82

VII.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	85
VII.1.	Conclusiones	85
VII.2.	Recomendaciones.....	87
VIII.	REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.....	89
IX.	ANEXO (CÓDIGO COMPUTACIONAL)	91

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación	Página
Ecuación III.1. Ley de la conservación de la masa.	21
Ecuación III.2. Ley de Darcy.	21
Ecuación III.3. Ecuación de Laplace.	21
Ecuación III.4. Flujo no establecido.	22
Ecuación III.5. Acuífero horizontal, homogéneo, de espesor “b” y flujo horizontal.	22
Ecuación III.6. Flujo vertical.	22
Ecuación IV.1. Desplazamiento en la dirección x debido a una extracción y su imagen.	25
Ecuación IV.2. Desplazamiento en la dirección y debido a una extracción y su imagen.	25
Ecuación IV.3. Deformación en la dirección x debida a la liberación de esfuerzos en la superficie	26
Ecuación IV.4. Deformación en la dirección z debida a la liberación de esfuerzos en la superficie	26
Ecuación IV.5: Esfuerzo efectivo.	28
Ecuación IV.6. Deformación vertical.	28
Ecuación IV.7. Factor de compresión.	28
Ecuación V.1. Integración de las deformaciones en x.	32
Ecuación V.2. Integración de las deformaciones en z.	32
Ecuación V.3. Deformaciones totales en la dirección x.	32
Ecuación V.4. Deformaciones totales en la dirección z.	32
Ecuación V.5. Relación de esfuerzos efectivos en abatimiento total.	35
Ecuación V.6. Relación de esfuerzos efectivos en abatimiento parcial.	36
Ecuación V.7. Valores constantes para el calculo de C_f en caso de abatimiento parcial.	36
Ecuación V.8. Calculo de C_f abajo del nivel freático.	37
Ecuación V.9. Función sinusoidal.	39
Ecuación V.10. Función exponencial.	39
Ecuación V.11. Función línea recta.	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figura II.1. Subsistencia en el Valle San Joaquín, California (GALLOWAY et al., 1999).	5
Figura II.2. Dique en el lago Okeechobee, Everglades, Florida (GALLOWAY et al., 1999).	5
Figura II.3. Señal avisando a los automovilistas de los peligros de la subsidencia en una zona donde han aparecido grietas en Pima County, Arizona (GALLOWAY et al., 1999).	6
Figura II.4. Tubería de gas natural expuesta en una grieta, el estudio de la tubería indicó que estaba sometida a tensión (GALLOWAY et al., 1999).	7
Figura II.5. Fachada sur del templo San Felipe de Jesús, Aguascalientes.	9
Figura II.6. Interior del templo San Felipe de Jesús, Aguascalientes.	9
Figura II.7. Fallas en banquetas y calzadas de las vías de comunicación, Falla Oriente, punto 7, calle Armando A. Tezozón; Celaya, Gto.	10
Figura II.8. Daños en autoconstrucciones ligeras ausentes de un diseño técnico, Falla Oriente, punto 21, calle Fresnillo; Celaya, Gto.	10
Figura II.9. Grieta en área agrícola, camino afectado por ésta, Silao Gto.	11
Figura II.10. Grieta que afecta instalaciones subterráneas y asentamiento ligero; Silao, Gto.	11
Figura III.1. Ajuste con curva cuadrática en Niigata Japón.	13
Figura III.2. Ajuste de curva exponencial en Niigata, Japón.	13
Figura III.3. Relación log-log entre subsidencia y años.	13
Figura III.4. Correlación de subsidencia con el nivel de agua en un pozo de 610 metros de profundidad en Tokio, Japón.	14
Figura III.5. Relación de cambio de altitud en testigos y cambio del nivel de agua en pozos (Hwang y Wu 1969)	14
Figura III.6. Relación entre nivel de agua y ritmo de subsidencia.	15
Figura III.7. Relación de extracción con subsidencia.	16
Figura III.8. Relación entre subsidencia y extracción.	16

Figura III.9. Relación entre volumen de bombeo y volumen de subsidencia.	16
Figura III.10. Relación de subsidencia con abatimiento al oeste del valle de San Joaquín (Bull y Poland, 1975, figura 32)	18
Figura III.11. Relación entre el porcentaje de arcilla y índice de subsidencia con abatimiento de presión (Gabrysch 1969).	19
Figura IV.1. (a) deformaciones dentro de un medio infinito, (b) esfuerzos generados en una superficie considerada.	24
Figura IV.2. (a) Imagen negativa de la extracción simétrica a la superficie; (b) Cancelación de esfuerzos normales en la superficie.	25
Figura IV.3. Punto "P" donde se calcula el desplazamiento debido a una extracción y su imagen.	26
Figura IV.4. Series infinitas de imágenes para considerar una frontera rígida.	27
Figura V.1	33
Figura V.2. Esfuerzo efectivo inicial.	35
Figura V.3. Esfuerzo efectivo final en el caso de abatimiento total.	35
Figura V.4. Esfuerzo efectivo final en el caso de abatimiento parcial.	36
Figura V.5. Entrada del programa, para cada fila de pilotes: $H_1, H_2, AT_1, AT_2, C_f$.	37
Figura V.6. Ecuación de una línea con forma de la frontera rígida.	38
Figura V.7. Conjunto de curvas para modelar el basamento.	39
Figura V.8. Imágenes dentro de un basamento rectangular.	40
Figura V.9. Imágenes verticales y horizontales en un basamento sinusoidal.	40
Figura V.10. Hundimiento en basamento rectangular.	42
Figura V.11. Deformación volumétrica en basamento rectangular prácticamente igual a C_f (0.08).	43
Figura V.12. Deformaciones en la pared de la excavación (Ou, Liao y Cheng, 2000).	44
Figura V.13. Modelado de la excavación.	44
Figura V.14. Hundimientos y deformaciones verticales medidas y calculadas.	45
Figura V.15. Desplazamientos obtenidos con la teoría de pérdida volumétrica.	46
Figura V.16. Desplazamientos calculados con el método de elementos finitos (Eduardo Rojas, Com. Personal)	46

Figura V.17. Deformaciones horizontales obtenidas con la Teoría de la pérdida volumétrica.	47
Figura V.18. Deformaciones horizontales por medio de elementos finitos (Eduardo Rojas, com. Personal).	47
Figura V.19. Grieta de abertura según la mecánica de fracturas.	48
Figura V.20. Deformaciones volumétricas obtenidas con la teoría de la pérdida volumétrica.	49
Figura V.21. Deformaciones volumétricas por elementos finitos (Eduardo Rojas, Com. Personal).	49
Figura V.22. Desplazamientos para diferentes abatimientos.	50
Figura V.23. Deformaciones horizontales para diferentes abatimientos.	50
Figura V.24. Deformaciones volumétricas para diferentes abatimientos.	51
Figura V.25. Deformación volumétrica con tres estratos diferentes.	52
Figura V.26. Grieta tipo desplazamiento según la mecánica de fracturas.	55
Figura V.27. Hundimientos, perfil Tlacote (a escala numérica de 1:2, una unidad = 2 metros).	55
Figura V.28. Desarrollo de hundimientos conforme se incrementa el abatimiento.	56
Figura V.29. Desarrollo de los escalonamientos conforme se incrementa el abatimiento.	57
Figura VI.1. Perfil Geofísico en el valle de Aguascalientes. (JORGE ARZATE, com. Personal)	58
Figura VI.2. Perfil que se introdujo al modelo.	58
Figura VI.3. Desplazamientos, Aguascalientes.	59
Figura VI.4. Curvas de igual desplazamiento en x, Aguascalientes.	59
Figura VI.5. Curvas de igual desplazamiento en y, también se presenta un perfil de la superficie, Aguascalientes.	59
Figura VI.6. Deformaciones horizontales, Aguascalientes.	59
Figura VI.7. Deformaciones verticales, Aguascalientes.	60
Figura VI.8. Deformaciones volumétricas, Aguascalientes.	60
Figura VI.9. Curvas de nivel de basamento y perfiles.	62
Figura VI.10. Resultados perfil A-A'.	63
Figura VI.11. Resultados perfil A'-A''.	64

Figura VI.12. Resultado perfil B-B'.	65
Figura VI.13. Resultado perfil C-C'.	66
Figura VI.14. Resultado perfil D-D'.	67
Figura VI.15. Ubicación de perfiles geofísicos en la ciudad de Santiago de Querétaro (Jesús Pacheco, Com. Personal).	68
Figura VI.16. Modelo Geofísico del basamento en carretera a Tlacote (Jesús Pacheco)	69
Figura VI.17. Desplazamientos, carretera a Tlacote.	70
Figura VI.18. Vectores de desplazamientos con métodos de elementos finitos (Eduardo Rojas, com. Personal).	70
Figura VI.19. Curvas de igual desplazamiento horizontal, carretera a Tlacote.	70
Figura VI.20. Curvas de igual desplazamiento vertical y perfil de nivel superficial, carretera a Tlacote.	71
Figura VI.21. Curvas de igual deformación horizontal, carretera a Tlacote.	71
Figura VI.22. Deformaciones horizontales con métodos de elementos finitos (Eduardo Rojas, com. Personal).	72
Figura VI.23. Curvas de igual deformación vertical, carretera a Tlacote.	72
Figura VI.24. Deformaciones verticales con métodos de elementos finitos (Eduardo Rojas, com. Personal).	73
Figura VI.25. Curvas de igual deformación volumétrica, carretera a Tlacote.	73
Figura VI.26. Deformaciones volumétricas con métodos de elementos finitos (Eduardo Rojas, com. Personal).	73
Figura VI.27. Modelo Gravimétrico de la carretera a Tlacote (Jesús Pacheco, Com. Personal)	74
Figura VI.28. Desplazamientos horizontales en carretera a Tlacote.	75
Figura VI.29. Desplazamientos verticales en carretera a Tlacote.	75
Figura VI.30. Deformaciones horizontales en carretera a Tlacote.	76
Figura VI.31. Deformaciones verticales en carretera a Tlacote.	76
Figura VI.32. Deformaciones volumétricas en carretera a Tlacote.	77
Figura VI.33. Modelo gravimétrico en el predio ensueño, perfil 1 (Jesús Pacheco, com. Personal).	77
Figura VI.34. Desplazamientos horizontales perfil Ensueño 1.	78

Figura VI.35. Desplazamientos verticales perfil Ensueño 1.	78
Figura VI.36. Deformaciones horizontales perfil ensueño 1.	78
Figura VI.37. Deformaciones verticales perfil Ensueño 1.	79
Figura VI.38. Deformaciones volumétricas perfil Ensueño 1.	79
Figura VI.39. Modelo gravimétrico en el predio ensueño (prolongación Zaragoza), perfil 2 (Jesús Pacheco, com. Personal).	80
Figura VI.40. Desplazamientos horizontales perfil Ensueño 2.	80
Figura VI.41. Desplazamientos verticales perfil Ensueño 2.	81
Figura VI.42. Deformaciones horizontales perfil ensueño 2.	81
Figura VI.43. . Deformaciones verticales perfil Ensueño 2.	81
Figura VI.44. Deformaciones volumétricas perfil Ensueño 2.	81
Figura VI.45. Modelo gravimétrico de la calle Epigmenio González (Jesús Pacheco, Com. Personal).	82
Figura VI.46. Desplazamientos horizontales Epigmenio González.	83
Figura VI.47 . Desplazamientos verticales Epigmenio González.	83
Figura VI.48 . Deformaciones horizontales Epigmenio González.	83
Figura VI.49 . Deformaciones verticales Epigmenio González.	84
Figura VI.50 . Deformaciones volumétricas Epigmenio González.	84

I. INTRODUCCIÓN

Alrededor del mundo se han observado hundimientos y agrietamientos de los suelos. Se ha identificado que la causa de este fenómeno en muchos de los casos es la subsidencia generada por el aprovechamiento de vapor para la generación de electricidad, la extracción de petróleo o gas o la sobreexplotación de aguas subterráneas.

En México se ha presentado este problema en diferentes ciudades, generalmente por la extracción del agua de los mantos acuíferos. Algunas de las ciudades afectadas son Aguascalientes, Ameca, Celaya, Irapuato, Morelia, y Querétaro entre otras. En estos lugares se han dañado un sin número de obras civiles, como son edificios, caminos, instalaciones, etc.

En este trabajo se ha hecho una extensa investigación documental de los diferentes modelos existentes que predicen la subsidencia, para así conocer el panorama del fenómeno y de las investigaciones hasta ahora realizadas en este tema.

Con la finalidad de analizar el fenómeno y prever los daños provocados por éste, se ha tomado un modelo matemático basado en la teoría de la pérdida volumétrica, modelo que necesita para su resolución un código computacional debido al gran volumen de cálculos que son necesarios realizar. Este código se elaboró en este trabajo pensando en su utilidad para diversos casos de subsidencia y los resultados arrojados se presentan en esta investigación.

Los casos que se han estudiado más de cerca son los de las ciudades de Aguascalientes y de Querétaro debido a la disponibilidad de datos y sobretodo de la información geológica y geofísica que nos permite conocer de forma aproximada la geometría del basamento incompresible, la cual está relacionada con la aparición de grietas superficiales.

I.1. Objetivo

Desarrollar el modelo para analizar la subsidencia por medio de la teoría de la pérdida volumétrica, con la finalidad de comprender mejor la aparición y desarrollo de grietas debidas a la extracción del agua, de manera que estas se puedan prever y así planear adecuadamente la construcción y mantenimiento de las obras civiles dentro de las ciudades afectadas por este fenómeno.

II. SUBSIDENCIA

Según el diccionario de la Real Academia Española el término de “subsistencia” (del latín *subsidentia*, sedimento) es un “Hundimiento paulatino del suelo, originado por las cavidades subterráneas producidas por las extracciones mineras”.

Conforme al glosario utilizado en la circular 1182 de U.S. Geological Survey (Galloway D. et al., 1999); “la subsistencia es el hundimiento o asentamiento de la superficie de la tierra debido a diferentes causas, y generalmente a gran escala, usualmente el término se refiere al movimiento vertical descendente pero sin descartar que pueden presentarse pequeños movimientos horizontales. El término no incluye derrumbes que tienen grandes desplazamientos horizontales, ni asentamientos de rellenos artificiales.”

La subsistencia regional debida a la extracción de agua, gas, petróleo u otros materiales geológicos es un problema complejo difícil de analizar cuantitativamente, debido a la complejidad de los materiales geológicos que conforman el sitio. La extracción de dichos materiales es una manera indirecta de realizar excavaciones subterráneas; ya que se sustrae una parte de los componentes del suelo en estado natural, teniendo en cuenta que el suelo no solo es la fase sólida sino una mezcla de estas (sólida, líquida y gaseosa).

La complejidad del fenómeno se debe en parte a la composición del suelo; éste es un sistema multi-fases que incluye sólidos, líquidos, gases y sustancias como materia orgánica, iones, etc. Para analizar un sistema así de complejo se debe tener en cuenta la elasticidad y la plasticidad de los sólidos, la permeabilidad de éstos, la viscosidad de los líquidos, la compresibilidad de los gases, la descomposición de la materia orgánica, la atracción o repulsión de los iones, etc. Muchas de estas propiedades no son lineales, ni isotrópicas, dependen de la historia de esfuerzos, cambian con el tiempo, etc.

Una manera de entender la subsistencia cuando ocurre por extracción de algún fluido, es basándose en el principio del esfuerzo efectivo de Terzaghi; La presión total en el

suelo a una cierta profundidad es la sobrecarga del suelo superior. Si ésta sobrecarga se resiste por una combinación de la presión del fluido en los poros y el esfuerzo intergranular de la matriz sólida; entonces cuando la presión de poro se reduce o desaparece (debido a la extracción de fluidos) la presión total se transfiere enteramente a la matriz sólida. Si la formación no ha sido preconsolidada a ese rango de presiones, entonces ésta se compacta hasta que se forma una estructura más densa y resistente viable a soportar la presión extra.

La sobreexplotación de los mantos acuíferos se ha debido al rápido crecimiento de las poblaciones así como el incremento de las actividades industriales y agropecuarias, por lo que la demanda de agua de los acuíferos ha estado en constante crecimiento. El rápido abatimiento de los acuíferos ha inducido la consolidación o subsidencia mencionada. Si se combina la consolidación con una topografía del basamento y fronteras irregulares entonces pueden llegar a aparecer agrietamientos en la superficie de la tierra (E. Rojas et al., 2002).

II.1. Problema de subsidencia y agrietamiento

La subsidencia se inicia cuando se empieza a extraer más agua de los acuíferos de la que se recarga naturalmente. Este fenómeno también se presenta en o cerca, de campos petroleros donde se extrae gas o petróleo o de donde se extrae vapor con fines energéticos. Uno de los grandes retos que nos impone este fenómeno es la predicción del comportamiento de los hundimientos y en su caso de la aparición y desarrollo de grietas.

La subsidencia como tal se ha reportado desde los 1920's en diferentes partes del mundo: en Shangai empezó en 1921 cuando se formó una depresión en forma de plato, alcanzando un máximo hundimiento de 2.36 m a una velocidad de 200 mm/año fenómeno que disminuyó hasta que la extracción de agua se redujo en 1963 (GU X. Y., 1991). Otro ejemplo es el que se muestra en la Figura II.1 ésta es una de las fotos más famosas relativas a la subsidencia, en ella se puede apreciar el hundimiento regional en el Valle de San Joaquín, California a través del tiempo (nótese que la primer marca es del año 1925).

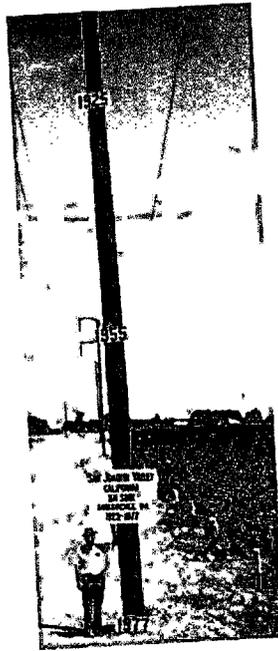


Figura II.1. Subsistencia en el Valle San Joaquín, California (GALLOWAY et al., 1999).

En algunos lugares como en el Sur de Nueva Jersey, específicamente en la costa Este donde además de hundimiento de la superficie del suelo se ha reportado una elevación del nivel del mar, la subsidencia puede provocar -conjuntamente con el daño a las estructuras- un incremento en la frecuencia y gravedad de las inundaciones (Sun., 1999). Otra zona de riesgo se puede ver en la Figura II.2, en Florida donde se ha construido un dique; en lugares donde el nivel de tierra es muy cercano al nivel del agua es riesgosa la subsidencia debido al riesgo de inundaciones. Tal vez uno de los mejores ejemplos sea Holanda, donde constantemente se tienen que reparar y construir diques.

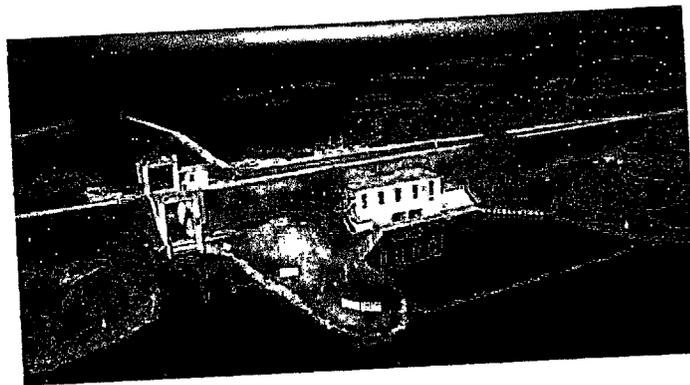


Figura II.2. Dique en el lago Okeechobee, Everglades, Florida (GALLOWAY et al., 1999).

Otro de los problemas relacionados con la subsidencia es la aparición de grietas en la superficie del suelo. Las grietas suelen aparecer en zonas agrícolas y urbanas causando grandes daños en edificios, caminos, canales y otras obras civiles. De ahí que resulta sumamente importante predecir los agrietamientos con objeto de construir diseñar estructuras adecuadas o bien construirlas en lugares fuera de la influencia de éstas. En la foto de la Figura II.3 se ve una señal que advierte sobre la posible aparición de grietas en el camino. En la Figura II.4 se observa una tubería de gas natural que se construyó en un lugar donde posteriormente apareció una grieta. Este caso es interesante ya que al analizar la tubería se encontró que ésta estaba sometida a esfuerzos de tensión, más no de cortante, por lo que se puede deducir que la grieta en cuestión se formó debido a que dichos esfuerzos de tensión estaban actuando en suelo.



Figura II.3. Señal avisando a los automovilistas de los peligros de la subsidencia en una zona donde han aparecido grietas en Pima County, Arizona (GALLOWAY et al., 1999).



Figura II.4. Tubería de gas natural expuesta en una grieta, el estudio de la tubería indicó que estaba sometida a tensión (GALLOWAY et al., 1999).

II.2. Casos de Querétaro y Aguascalientes.

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.

Aguascalientes en particular se encuentra ubicado sobre el graben de Aguascalientes, que es una estructura que atraviesa de norte a sur el Estado del mismo nombre. Morfológicamente es una depresión topográfica de unos 20 Km de ancho máximo y unos 10 Km de ancho mínimo. Hablando de manera general la estratigrafía del valle esta compuesta por dos conjuntos uno inferior, Mesozoico, plegado y con un ligero

metamorfismo regional de bajo grado que constituye el basamento de la región y otro superior, cenozoico, sin más deformación que un importante fallamiento vertical, que representa su cubierta. Esta última a su vez está representada por una gruesa serie de diversos productos volcánicos de composición riolítica de edad Terciaria y por una espesa sucesión de formaciones sedimentarias y volcanoclásticas lacustres de edad Cuaternaria. Ambas series representan un basamento irregular y un relleno puede ser susceptible a sufrir consolidación bajo un incremento en el esfuerzo efectivo.

En el caso del Valle de Querétaro, que también está ubicado dentro del cinturón volcánico mexicano, la geomorfología del área presenta estructuras volcánicas y planicies que abarcan la mayor parte de la zona. Dentro del ciclo geomorfológico el área se encuentra en una etapa de “madurez avanzada” en la zona del valle con líneas de drenaje espaciadas de baja pendiente, en las partes altas presenta una etapa de “juventud tardía” porque las pendientes topográficas son todavía fuertes.

La actividad volcánica del Terciario y Cuaternario se encuentran íntimamente relacionadas, porque han originado áreas montañosas, constituidas principalmente por rocas andesíticas y basálticas con un patrón estructural de fallas, se observan mesas y mesetas cuyo relieve es característicamente plano, cortadas abruptamente por fallas normales. Se constituyen por rocas de composición andesítica y basáltica cuya red de drenaje sigue el patrón de fracturas perpendiculares entre sí, que drenan al valle. Los depósitos de sedimentos aluviales y materiales volcanoclásticos lacustres, alternados con coladas volcánicas rellenan la fosa tectónicas que forma el Valle de Querétaro lo cual constituye basamentos incompresibles rellenos de materiales potencialmente consolidables respectivamente.

En ambos casos se han presentado grietas que afectan construcciones. De la Figura II.5 a la Figura II.10 se muestran varios casos de daños provocados por la subsidencia en estos y otros lugares.



Figura II.5. Fachada sur del templo San Felipe de Jesús, Aguascalientes.



Figura II.6. Interior del templo San Felipe de Jesús, Aguascalientes.



Figura II.9. Grieta en área agrícola, camino afectado por ésta, Silao Gto.

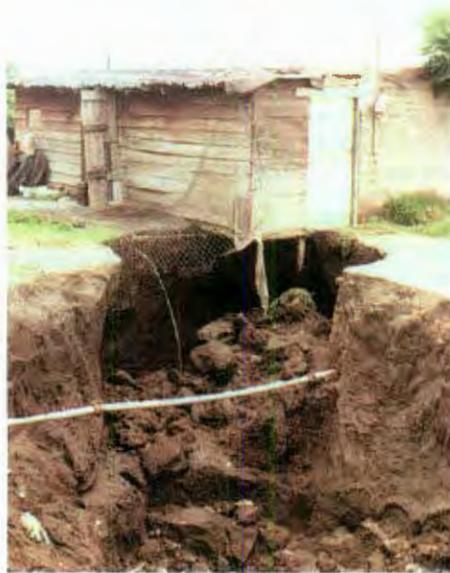


Figura II.10. Grieta que afecta instalaciones subterráneas y asentamiento ligero; Silao, Gto.

Actualmente debido a la aparición de estas grietas, los Gobiernos están buscando solución a éste problema, una de las cuales puede ser la identificación de las zonas de riesgo, para que sean incluidas como tales en los reglamentos de construcción y en los planes de desarrollo.

III. MODELOS EXISTENTES

Según la guía de la UNESCO (1994) para el estudio de la subsidencia debida a la extracción de agua, existen a grandes rasgos tres tipos diferentes de modelos: (1) modelos empíricos, (2) semi-teóricos y (3) teóricos.

Hay que hacer notar que para cualquier modelo es necesario tener datos adecuados, recolectados a través de un tiempo suficiente dependiendo de la utilidad y la precisión que se requiera del modelo ya que sin estos requisitos los modelos serán poco útiles.

III.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):

Aquí se intentan ajustar los datos de hundimiento y fecha a alguna curva para así calcular la subsidencia a futuro. Enseguida se presentan varias figuras tomadas de "Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal". (International Hydrological Programmed Working Group 8.4, Joseph F. Poland, Chairman and Editor, UNESCO), que muestran ajustes de curvas cuadrática, exponencial, logarítmica, etc. para diferentes regiones que presentan hundimientos.

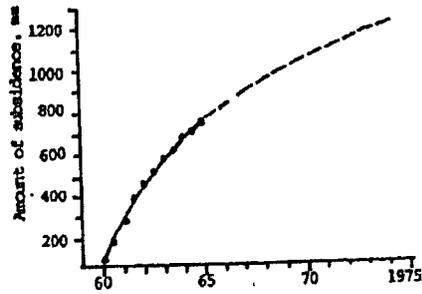


Figura III.1. Ajuste con curva cuadrática en Niigata Japón.

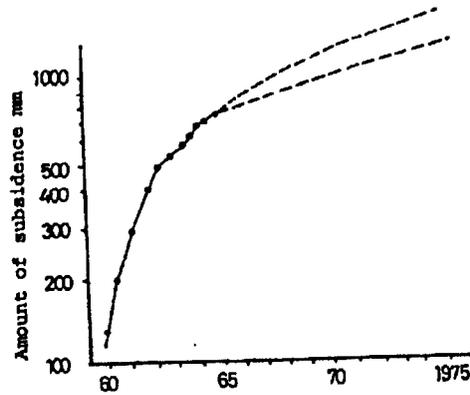


Figura III.2. Ajuste de curva exponencial en Niigata, Japón.

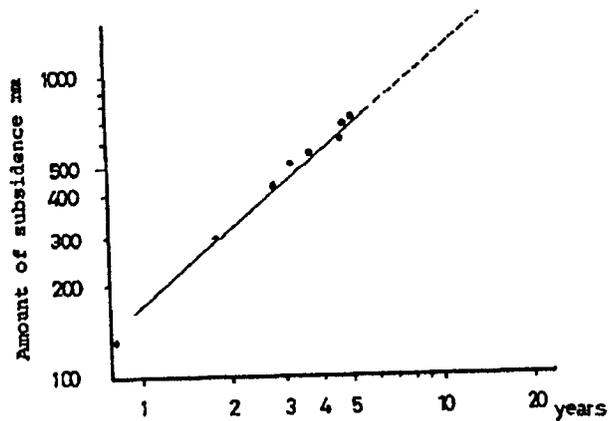


Figura III.3. Relación log-log entre subsidencia y años.

No solo se ha relacionado la subsidencia con el tiempo, también existen relaciones con el nivel de agua Figura III.4 y Figura III.5.

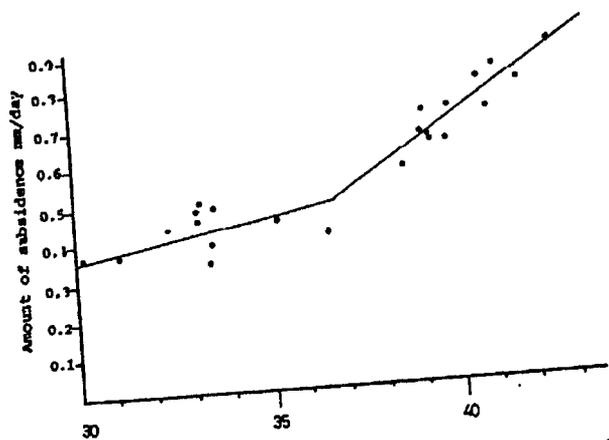


Figura III.4. Correlación de subsidencia con el nivel de agua en un pozo de 610 metros de profundidad en Tokio, Japón.

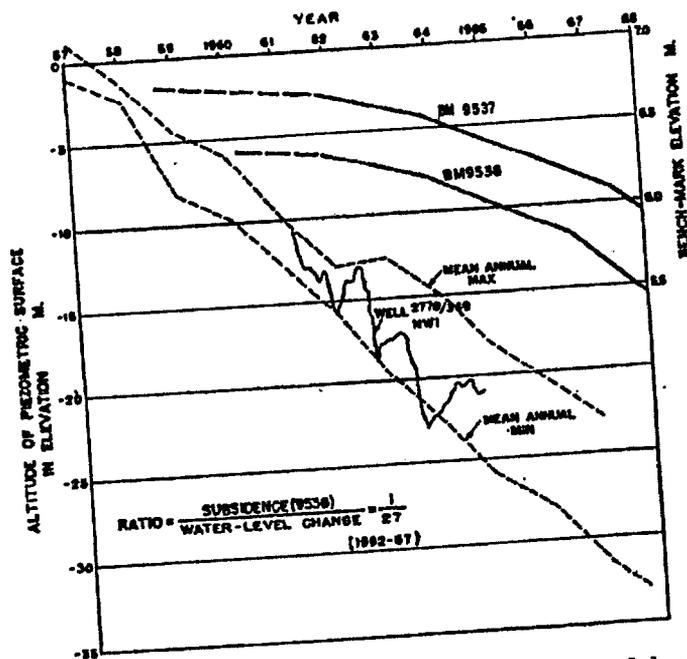


Figura III.5. Relación de cambio de altitud en testigos y cambio del nivel de agua en pozos (Hwang y Wu 1969)

Uno de los problemas que puede haber en éste tipo de relaciones es que si cambia la magnitud de extracción, o si se empieza con una recarga artificial de los mantos acuíferos (en el caso que la subsidencia se de por extracción de agua) entonces lo más seguro es que cambie la relación de subsidencia por unidad de tiempo que se tenía hasta ese momento.

II.2. Modelos semi - teóricos.

Los modelos semi - teóricos son modelos que buscan relacionar la subsidencia con un fenómeno medible relacionado a esta. Si bien no es una relación estrictamente teórica es más real que relacionar solamente el tiempo. Ya que si cambia la relación de volumen de extracción durante el tiempo, los modelos pueden seguir funcionando.

Modelo de Wadachi (1939):

Wadachi (1940) sugirió que el ritmo de subsidencia, no la subsidencia en si misma, esta relacionada con el cambio en el nivel de agua, como ejemplo podemos ver la Figura III.6, se ve que la figura no sigue un patrón establecido.

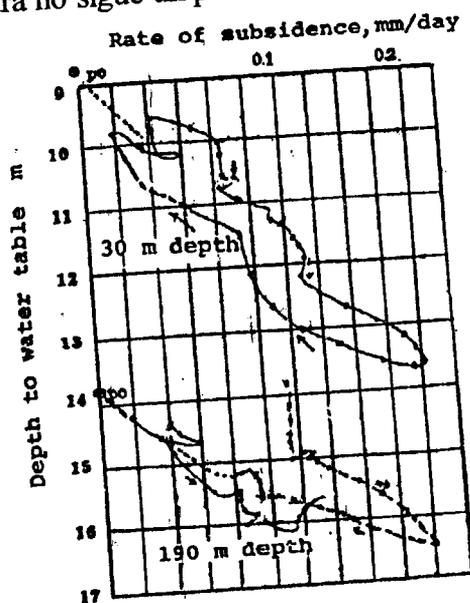


Figura III.6. Relación entre nivel de agua y ritmo de subsidencia.

Ritmo de subsidencia relacionado con la extracción de líquidos:

Castle, Yerkes y Riley (1969) muestran comparaciones directas de la extracción de líquidos con el total de subsidencia, se muestra en la Figura III.7, allí la subsidencia medida en el centro del hundimiento es la señalada como (A) y hacia el sur del hundimiento es la señalada como (B).

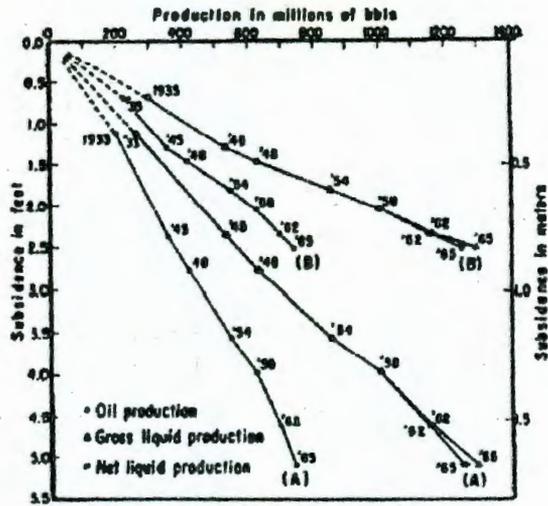


Figura III.7. Relación de extracción con subsidencia.

Otros ejemplos de esta relación se muestran en la Figura III.8 y la Figura III.9.

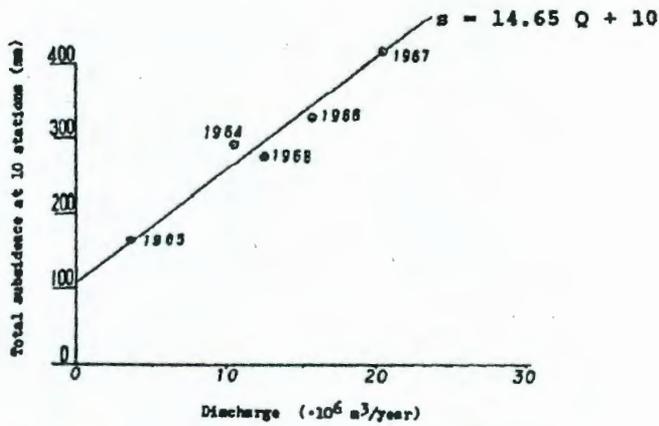


Figura III.8. Relación entre subsidencia y extracción.

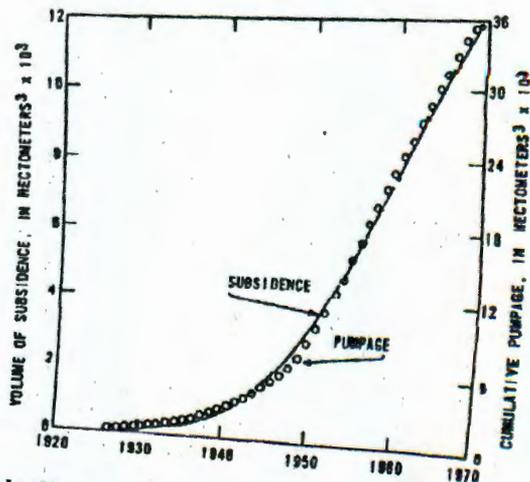


Figura III.9. Relación entre volumen de bombeo y volumen de subsidencia.

Relaciones de ritmo de subsidencia con el nivel de abatimiento del líquido:

Esta relación es entre el ritmo de subsidencia de la superficie de la tierra y la caída del nivel (subterráneo) del líquido en cuestión, dentro de los estratos permeables de los acuíferos que tienen partículas de tamaño medias a grandes, en un intervalo de tiempo dado. Esta relación representa un cambio en el espesor debido a un cambio en el esfuerzo efectivo y es útil para predecir el máximo asentamiento que se puede dar para un incremento de esfuerzos (estando en el tramo virgen de la curva de compresibilidad). Cuando la presión de poro en los estratos compresibles poco permeables alcanza el equilibrio con la presión de poro de los estratos permeables, entonces la compactación se detiene y es cuando se debe medir la relación, antes de alcanzar dicho equilibrio este índice es transitorio.

Un ejemplo se puede ver en la Figura III.5 (antes presentada) en donde sacan una relación de la subsidencia con el abatimiento del nivel igual $1/27$ en el periodo de 1962 a 1967.

Se debe tener en cuenta que el nivel freático medido tiene que parecerse al promedio del nivel a escala regional.

Si los mapas de subsidencia y abatimiento están disponibles para un periodo de tiempo dado, durante el cual la subsidencia y el abatimiento se han dado sin interrupción, entonces la relación puede trazarse en un mapa de líneas de igual relación. La Figura III.10 es uno de esos mapas, trazado de mapas que muestran la subsidencia y el abatimiento entre 1943 y 1959 en un área de 4000 km^2 en el oeste del Valle de San Joaquín, California (después de Bull y Poland, 1975, figura 32) los índices en este mapa varían de 0.08 a 0.01, indicando que para producir un metro de subsidencia se debe abatir el nivel entre 12 y 100 metros dependiendo el lugar, estos índices representan también el valor mínimo del coeficiente de almacenamiento (S) para una compactación en el tramo virgen del acuífero libre. El coeficiente de almacenamiento es un indicador del volumen de agua que un

acuífero cede o toma en almacenamiento por unidad de área, es decir, es el volumen de agua que el acuífero puede contener en una unidad de área.

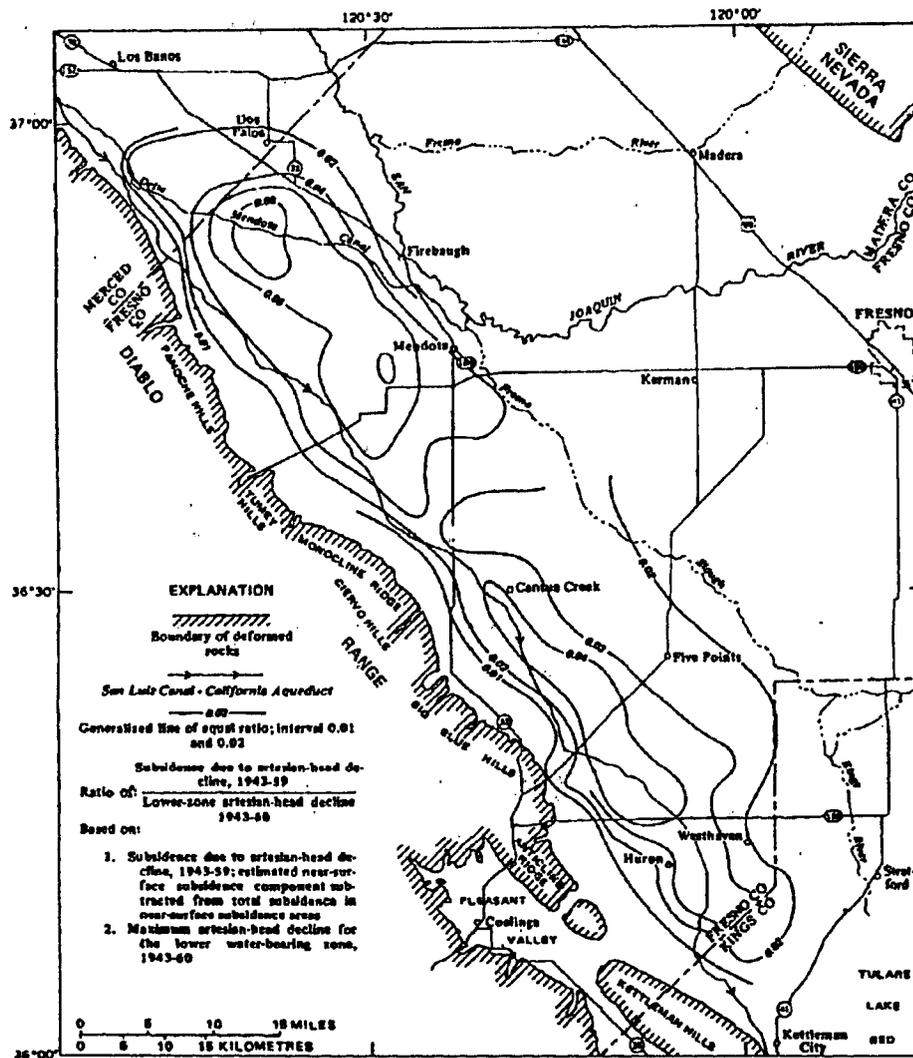


Figura III.10. Relación de subsidencia con abatimiento al oeste del valle de San Joaquín (Bull y Poland, 1975, figura 32)

Relación entre contenido de arcilla y subsidencia:

La Figura III.11 muestra una relación general, en el área de Houston-Galveston, Texas, entre el porcentaje de estratos de arcilla y el índice de subsidencia – abatimiento. De acuerdo con Gabrysch (1969), el porcentaje de estratos arcillosos fue determinado de la interpretación de registros eléctricos, el abatimiento de la presión fue medido de los niveles

de agua en pozos, y los valores de subsidencia fueron tomados de los cambios de elevación de testigos cercanos.

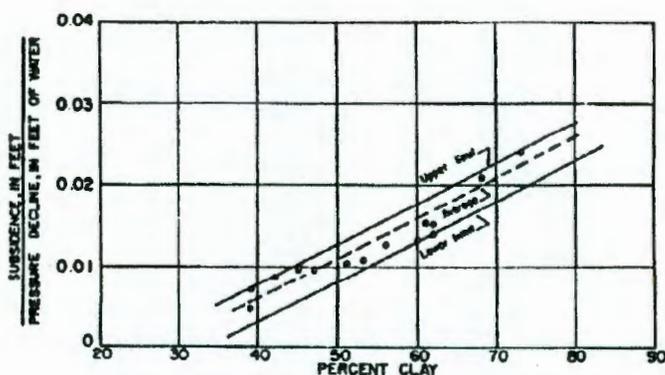


Figura III.11. Relación entre el porcentaje de arcilla y índice de subsidencia con abatimiento de presión (Gabrysch 1969).

III.3. Modelos teóricos.

Los modelos teóricos son modelos que incluyen propiedades mecánicas de los suelos para predecir su comportamiento, como se mencionó ya en el capítulo II. estas propiedades son muy difíciles de obtener y analizar de manera que sean representativas de toda una región, además que el incluir todas las variables en un solo modelo puede resultar muy complicado. Por lo que generalmente, los modelos teóricos hacen una serie de hipótesis con la finalidad de simplificar el análisis, la idea es que estas hipótesis hagan que el proceso sea práctico intentando afectar lo menos posible a los resultados; nunca hay que perder de vista cual es el nivel de precisión necesario. Así podemos considerar algunas o todas las suposiciones siguientes:

- No hay materia orgánica presente,
- existen solo dos fases (sólida – líquida),
- no hay viscosidad,
- no existe plasticidad,
- no hay anisotropía,
- la estructura del suelo se comporta de manera elástica,
- sólidos y líquidos son incompresibles,

- los parámetros son constantes (al menos dentro de zonas predefinidas ej. compresión virgen, recompresión, descarga)

Estas suposiciones se dan para el comportamiento de mecánica de los suelos, otras suposiciones relativas a la composición de los acuíferos también se hacen:

- Estratos horizontales,
- flujo horizontal en estratos permeables y vertical en estratos poco permeables,
- la subsidencia es debida principalmente por 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, etc.

Existen principalmente dos tipos de modelos teóricos que he encontrado para analizar la subsidencia: (1) Los que relacionan la compresibilidad de los materiales con el potencial de subsidencia y (2) Los que usan ecuaciones diferenciales para modelar el flujo de agua subterránea en sistemas permeables-poco permeables.

Relación entre la compresibilidad con la subsidencia potencial:

Con la prueba de consolidación desarrollada por Karl Terzaghi en la que se puede obtener una relación más o menos lineal de la relación de vacíos (e) con el $\log \sigma'/\sigma_0'$ (cambio en la presión efectiva), también se puede obtener un coeficiente de variación volumétrica m_v que representa el grado de variación de volumen unitario que se produce a consecuencia de un aumento unitario del esfuerzo efectivo. Conocido m_v y teniendo el cambio del esfuerzo efectivo (debido a el abatimiento del nivel freático) así como el espesor inicial de un estrato, se puede calcular el asentamiento total para un estrato. En el caso de varios estratos se realiza una sumatoria de todos los asentamientos para conocer el asentamiento total que es igual a la subsidencia.

En esta sección no se abunda mucho sobre el tema ya que sobre la teoría de consolidación se habla más en el capítulo IV.

Ecuaciones diferenciales de flujo de agua subterránea :

El flujo laminar establecido del agua intersticial en cualquier lugar de un suelo saturado debe cumplir dos reglas básicas, la ley de conservación de la masa y la ley de Darcy:

Ecuación III.1. Ley de la conservación de la masa.

$$\text{div}(\gamma \bar{v}) = 0$$

Donde:

- div = operador de divergencia,
- γ = densidad del agua,
- \bar{v} = vector de velocidad de flujo.

Que simplemente nos dice que la masa de agua dentro de la porción de un suelo saturado permanece constante.

Ecuación III.2. Ley de Darcy.

$$v = -k \cdot i$$

Donde:

- k = conductividad hidráulica,
- i = gradiente hidráulico (gradiente de la carga hidráulica h).

Combinando estas dos leyes y despreciando la variabilidad de γ y de k tenemos:

Ecuación III.3. Ecuación de Laplace.

$$\nabla^2 h = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Pero cuando tenemos un flujo no establecido, la Ecuación III.1 ya no es válida, por que cierta cantidad de agua es almacenada o extraída de un volumen específico de suelo y la Ecuación III.3 de Laplace tiene que ser modificada lo que da como resultado:

Ecuación III.4. Flujo no establecido.

$$k\nabla^2 h = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Donde:
 S_s = representa el almacenamiento específico y la relación de compresibilidad lineal asumido para el agua y la estructura de suelo.

En un acuífero horizontal, homogéneo de espesor constante "b" con flujo horizontal la Ecuación III.4 se reduce a:

Ecuación III.5. Acuífero horizontal, homogéneo, de espesor "b" y flujo horizontal.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S_s}{k} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{\nu} \frac{\partial h}{\partial t}$$

S = $b S_s$ Coeficiente de almacenamiento,
 T = $b k$ Trasmisibilidad,
 ν = T / S Difusividad hidráulica.

En un estrato compresible de baja permeabilidad, donde el flujo se supone vertical la Ecuación III.5 se reduce a:

Ecuación III.6. Flujo vertical.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{\nu} \frac{\partial h}{\partial t}$$

Que puede ser escrita en términos de abatimiento en vez de carga hidráulica h. La Ecuación III.5 es la ecuación diferencial clásica para acuíferos de Theis (Theis 1935), y la Ecuación III.6 es la ecuación clásica de consolidación de Terzaghi (Terzaghi 1923). Ambas ecuaciones deben resolverse dependiendo de sus propias condiciones iniciales. En un sistema con estratos permeables y poco permeables se debe tener una ecuación del tipo III.5 para cada estrato permeable donde el flujo es horizontal y para cada estrato poco permeable una ecuación del tipo III.6 donde el flujo es vertical. La resolución de los sistemas con este tipo de ecuaciones conectadas entre sí implican avanzados sistemas matemáticos que den solución simultánea para cada estrato por cada incremento de tiempo. Modelos como estos son los que más se pueden encontrar en la literatura especializada. Mencionando algunos

modelos que utilizan soluciones parecidas a ésta: “Nonlinear Modeling of Groundwater Flow and Total Subsidence of the Mexico City Aquifer-Aquitard System” de A., Rivera, E., Ledoux y G., de Marsily 1991; “Computing the Land Subsidence of Shanghai by Finite Element Method” de A., Dassargues, X. L. Li 1999; “A numerical model to calculate land subsidence, applied at Hangu in China” T. R., Shearer; “Analysis of Shanghai Land Subsidence” X. L. Gu, S. I. Tsien, H. C. Huang, Y. Liu. Entre muchos otros. Varios de estos métodos se basan en modelos anteriores de flujo de agua, algunos tienen también la capacidad de representar el cambio de presión y compactación a través del tiempo ya que la consolidación puede tardar varios años. De manera general estos modelos lo que obtienen es una predicción del hundimiento a través de un análisis del flujo de agua subterránea.

II.4. Comentarios sobre los modelos analizados

De los modelos mencionados en este capítulo podemos apreciar que en todos los casos el objeto principal de análisis ha sido el hundimiento de la superficie de la tierra. Sin embargo como se mencionó en el capítulo II.1. el hundimiento no es el único problema sino también la aparición de agrietamientos, los cuales pueden causar más daño a las estructuras y obras civiles que el hundimiento por si solo.

Como los agrietamientos son provocados por la aparición de esfuerzos de tensión dentro de la masa del suelo, para analizar la aparición y desarrollo de dichos agrietamientos entonces es necesario un modelo que pueda establecer ya sea los desplazamientos, deformaciones o esfuerzos dentro de todo el acuífero sujeto a subsidencia y no solamente en la superficie.

En el siguiente capítulo se explicará el contexto teórico en el cual se basa este trabajo para lograr lo anterior.

IV. MARCO TEÓRICO

IV.1. Teoría de la pérdida de volumen

En este trabajo se utiliza el desarrollo teórico realizado por Sagaseta (1987) sobre la pérdida volumétrica, a partir del cual es posible calcular los desplazamientos y deformaciones generados por una pérdida de volumen. El propone considerar las partículas sólidas del suelo como incompresibles para así poder analizar las deformaciones superficiales provocados por una sustracción de material dentro del medio.

- Primero plantea las ecuaciones para determinar los desplazamientos provocados por la sustracción de un volumen finito de material dentro de un medio infinito. El análisis se hace desde el punto de vista de la mecánica de fluidos, se toman los desplazamientos absolutos como variables en lugar de las velocidades- (Figura IV.1(a)) lo que provoca, junto con deformaciones, esfuerzos en el lugar donde se supone la superficie libre, o en este caso la superficie del terreno (Figura IV.1(b)).

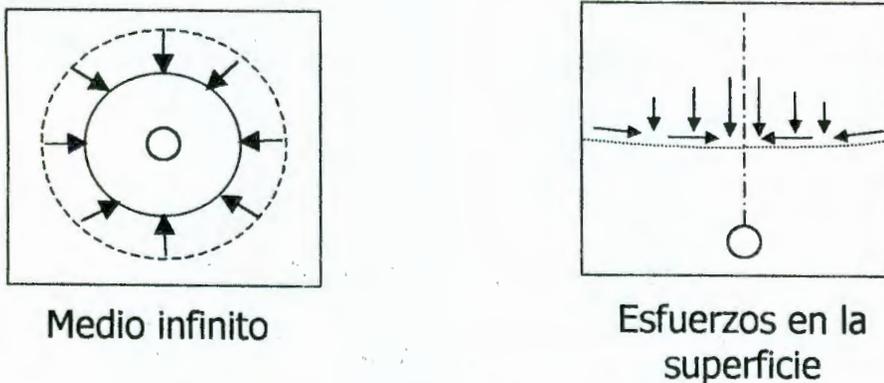


Figura IV.1. (a) deformaciones dentro de un medio infinito, (b) esfuerzos generados en una superficie considerada.

- Suponiendo que en la superficie libre no debería haber esfuerzos, se crea –dentro del medio infinito- una imagen simétrica del hundimiento con respecto al lugar donde se encontraría la superficie libre, esta imagen puede ser negativa o positiva

(expansión u hundimiento), lo que cancelaría los esfuerzos normales o cortantes respectivamente y crearía una nueva deformación.

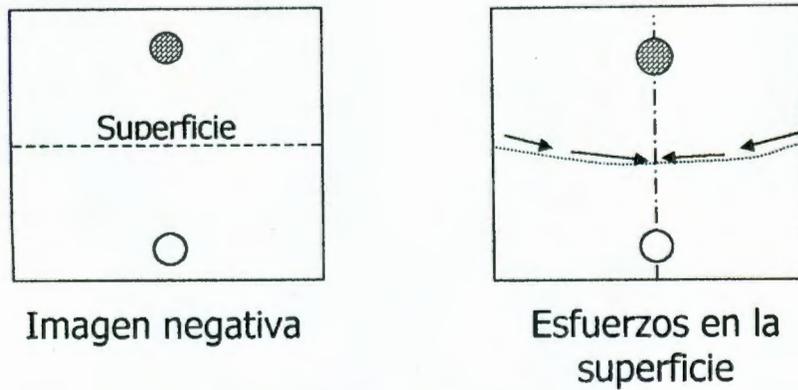


Figura IV.2. (a) Imagen negativa de la extracción simétrica a la superficie; (b) Cancelación de esfuerzos normales en la superficie.

Tomando en cuenta lo anterior presenta las siguientes formulas:

Ecuación IV.1. Desplazamiento en la dirección x debido a una extracción y su imagen.

$$S_x = -\frac{a^2}{2} \cdot \left(\frac{x}{r_1^2} - \frac{x}{r_2^2} \right)$$

Ecuación IV.2. Desplazamiento en la dirección y debido a una extracción y su imagen.

$$S_z = -\frac{a^2}{2} \cdot \left(\frac{z-h}{r_1^2} - \frac{z+h}{r_2^2} \right)$$

Donde:

S_x = Deformación horizontal en punto P,

S_z = deformación vertical en punto P,

r_1 = $[x^2 + (z-h)^2]^{1/2}$

r_2 = $[x^2 + (z+h)^2]^{1/2}$

Del esquema siguiente (P es el punto donde se calcula la deformación):

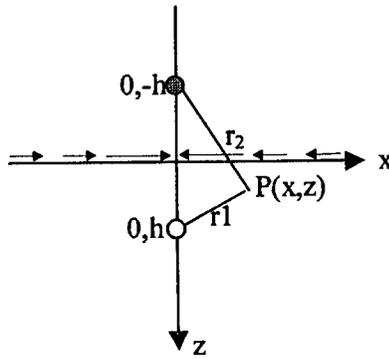


Figura IV.3. Punto “P” donde se calcula el desplazamiento debido a una extracción y su imagen.

- Las deformaciones de los primeros dos puntos se suman, con las necesarias para cancelar los esfuerzos que todavía afectan la superficie, esto se logra superponiendo soluciones de la teoría de elasticidad (específicamente la solución de Cerruti para una fuerza que actúa en la superficie de un medio semi-infinito), y se obtienen las deformaciones totales debidas al hundimiento dejando la superficie libre de esfuerzos, en el caso de una imagen negativa las ecuaciones necesarias para calcular las deformaciones debidas a liberación de esfuerzos son:

Ecuación IV.3. Deformación en la dirección x debida a la liberación de esfuerzos en la superficie

$$S_{xT} = -a^2 \cdot \frac{x}{r_2^2} \cdot \left[1 - \frac{2 \cdot z \cdot (z + h)}{r_2^2} \right]$$

Ecuación IV.4. Deformación en la dirección z debida a la liberación de esfuerzos en la superficie

$$S_{zT} = a^2 \cdot \frac{z}{r_2^2} \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{x^2}{r_2^2} \right)$$

Además de poder hacer el análisis con una frontera libre (para tener un medio semi – infinito) Sagaseta menciona en su trabajo el procedimiento cuando se quiere tomar en cuenta una frontera rígida, esto es importante debido a que la aparición de grietas en la superficie de un suelo que presenta el fenómeno de subsidencia se ha relacionado con la forma de un basamento incompresible que subyace a este (Sandoval y Bartlett, 1991; E. Rojas y colaboradores, 2001).

Sagasetta propone que para modelar una frontera rígida con la teoría de pérdida de volumen se puede generar una imagen de la extracción del suelo que sea simétrica con respecto a esta frontera y que tenga el mismo signo, esto restringirá el movimiento normal a la extracción en el lugar donde se supone la frontera y permitirá el desplazamiento a lo largo de esta, creando así el efecto de una pared rígida y lisa.

El problema de esta consideración es que entonces se deberán crear series infinitas de imágenes respecto a las fronteras que se tengan teniendo en cuenta la imagen de la superficie libre y las de las paredes rígidas (Figura IV.4).

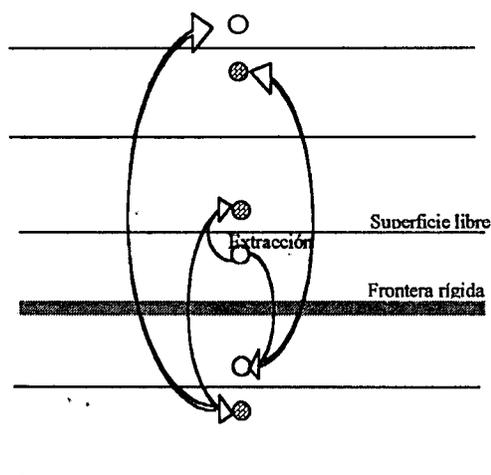


Figura IV.4. Series infinitas de imágenes para considerar una frontera rígida.

IV.2. Teoría de la consolidación

Como se menciona en el capítulo II. y en el III.3. dada la complejidad del suelo es que surge la necesidad de hacer análisis simplificados, tomando en cuenta materiales idealizados y homogéneos. Para el comportamiento volumétrico se toma básicamente que éste está regido por el “esfuerzo efectivo” explicado por Terzaghi como el esfuerzo que actúa sobre el esqueleto sólido del suelo, este esfuerzo es afectado por la presión del agua que se encuentra en los poros del material.

- Abatimiento total:

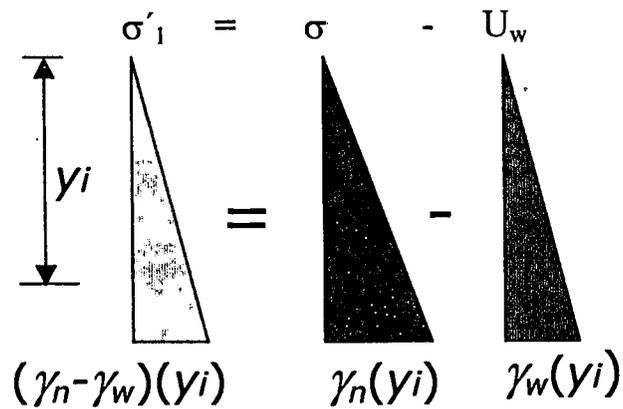


Figura V.2. Esfuerzo efectivo inicial.

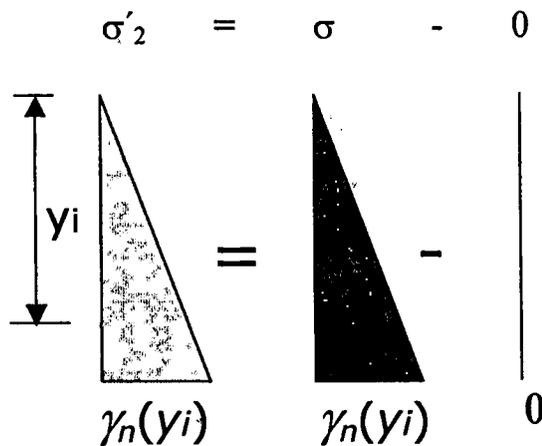


Figura V.3. Esfuerzo efectivo final en el caso de abatimiento total.

Donde:

γ_n = peso específico del suelo,

γ_w = peso específico del agua.

Por lo que en este caso la relación de esfuerzo efectivo inicial y final es:

Ecuación V.5. Relación de esfuerzos efectivos en abatimiento total.

$$\frac{\sigma'_2}{\sigma'_1} = \frac{\gamma_n}{\gamma_n - \gamma_w}$$

- Abatimiento parcial:

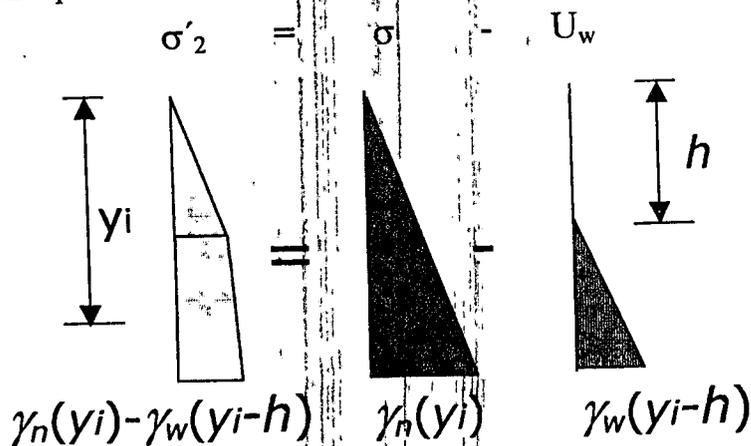


Figura V.4. Esfuerzo efectivo final en el caso de abatimiento parcial.

Como σ'_1 es igual en ambos casos tenemos que el cambio en las presiones efectivas para un abatimiento parcial es:

Ecuación V.6. Relación de esfuerzos efectivos en abatimiento parcial.

$$\frac{\sigma'_2}{\sigma'_1} = \frac{\gamma_n \cdot (y_i - h) \gamma_w}{(\gamma_n - \gamma_w) \cdot y_i} = 1 + \frac{h \gamma_w}{(\gamma_n - \gamma_w) \cdot y_i}$$

Podemos apreciar aquí que este cambio para el caso de un abatimiento parcial depende de la profundidad a la que nos encontremos " y_i " y de la magnitud del abatimiento " h "

Para obtener el C_f correspondiente en algún lugar abajo del nivel freático el programa toma de los valores dados a este, el γ_n del suelo y el C_f para el caso de abatimiento total y se toma $\gamma_w = 1$. De la Ecuación IV.7 podemos despejar:

Ecuación V.7. Valores constantes para el cálculo de C_f en caso de abatimiento parcial.

$$\frac{C_c}{1 + e_0} = \frac{C_f}{\log \frac{\gamma_n}{\gamma_n - 1}}$$

Con este valor podemos calcular el C_f para el caso de abatimiento parcial por medio de la fórmula:

Ecuación V.8. Calculo de C_f abajo del nivel freático.

$$C_f = \frac{C_c}{1+e_0} \cdot \log \left[1 + \frac{h}{(\gamma_n - 1) \cdot \gamma_i} \right]$$

Extracción de varias filas de “pilotes”:

Teniendo en cuenta todo lo anterior el programa se ha desarrollado con la finalidad de hacerlo lo más flexible posible, por lo que como una primer manera de funcionar se desarrolló para que se le de como entrada un número de filas de pilotes donde se va a extraer o consolidar, su posición superior e inferior en ambos ejes para cada fila de pilotes y el valor del factor de compresión C_f (en caso de abatimiento total) que está relacionado con el espesor e de cada pilote que se extrae por cada espesor unitario de material ver Figura V.4.

Por supuesto otra entradas del programa será el área donde se quiere conocer la deformación.

El programa da como salida los desplazamientos verticales y horizontales, las deformaciones en ambos sentidos y los cambios volumétricos totales (los cambios volumétricos se obtienen de la diferencia en los desplazamientos).

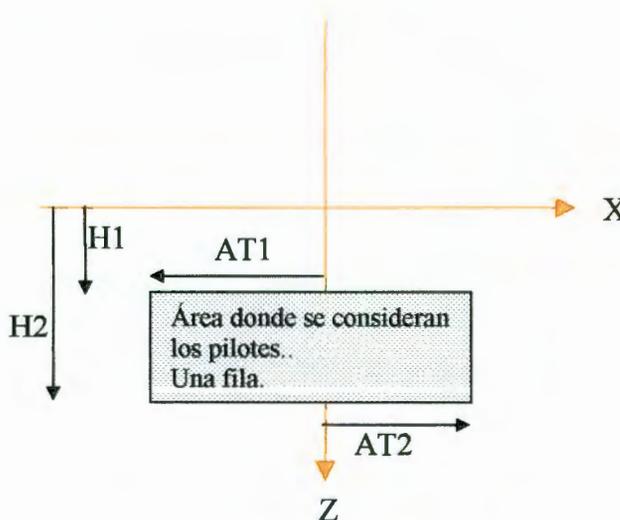


Figura V.5. Entrada del programa, para cada fila de pilotes: H_1 , H_2 , AT_1 , AT_2 , C_f .

Basamento con forma irregular:

Como la finalidad del programa es conocer el comportamiento de la masa de suelo dentro de basamentos irregulares, es necesario hacer la consideración de poner fronteras rígidas de diferentes formas y tamaños. Ya en el trabajo de E. Rojas, J. Arzate y M. Arroyo (mencionado en el apartado V.1.) se usaron curvas sinusoidales y doble sinusoidales para hacer la forma de la frontera incompresible. En este trabajo se ha considerado el poder combinar diferentes tipos de curvas para modelar el basamento, específicamente se han usado las curvas sinusoidales, exponenciales y líneas rectas.

Para hacer los cálculos es necesario conocer la profundidad del basamento en cualquier punto, para logra esto se de manera práctica se consideró oportuno obtener las funciones de las curvas empezando en un punto (X_1, Z_1) y terminando en otro punto (X_2, Z_2) , ver Figura V.6, de manera que éstas curvas puedan ser combinadas de cualquier manera, Figura V.7. Así fácilmente se puede calcular la profundidad Z para cualquier lugar X si conocemos cual es la curva usándose en esa X .

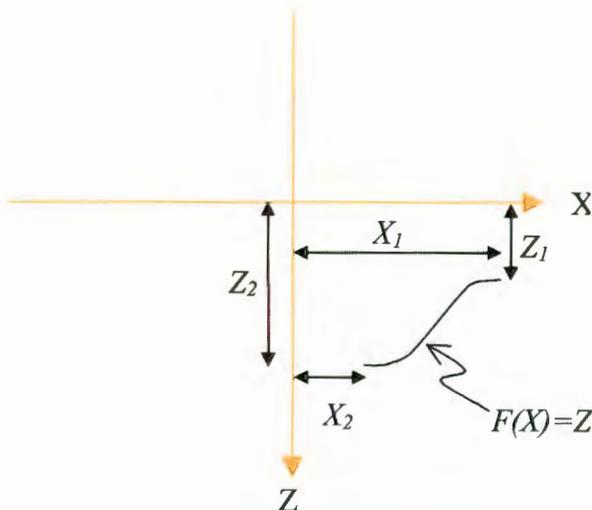


Figura V.6. Ecuación de una línea con forma de la frontera rígida.

Ecuaciones utilizadas:

Subrutinas creadas:

El código cuenta con las siguientes subrutinas:

- Entrada Lee los datos de entrada,
- Doblesinusoidal2 Para abatimiento total,
- Sinuparcial Para abatimiento parcial,
- Fronteras Calcula la profundidad Z en un punto X,
- Extrabasa Calcula la deformación cuando hay estratos,
- Pila Deformación debida a la extracción de una pila, su imagen con relación a la superficie libre y la liberación de esfuerzos,
- Pilasincerutis Deformación debida a la extracción de una pila y su imagen con relación a la superficie,
- Unapilasola Deformación debida a la extracción de una pila,
- Defvol Calcula las deformaciones a partir de los desplazamientos.

V.4. Ejemplos con el código de computadora

Para conocer el funcionamiento del programa, así como su versatilidad se realizaron diferentes ejemplos, que también sirven para comprobar de manera fácil

Basamento de forma rectangular:

Para el caso de la subsidencia de un suelo dentro de un basamento incompresible de forma rectangular, lo primero que se hizo fue el conceptualizar el modelo que mejor se adaptara a la existencia de una frontera superior libre de esfuerzos, una inferior rígida y dos laterales también rígidas como en la Figura V.8, en esta figura es fácil ver que deben de hacer filas consecutivas de un espesor del doble del que tenga el basamento y que van cambiando de signo alternadamente. Además, si consideramos que las formulas usadas ya

contemplan las imágenes superiores al de la superficie libre; entonces al programa hay que hacerle una entrada de múltiples filas con signo alternado, empezando por extracción, y que tengan el doble de ancho que la zona a calcular y un largo muy superior a este. Ya que las imágenes son de un numero infinito, cosa imposible de reproducir, se realizó el análisis con diferentes números de imágenes aumentado éste numero hasta que los resultados variaron poco.

La salida de este programa para un coeficiente $C_f = 0.08$ fue lo observado en las Figura V.10 y Figura V.11. En la Figura V.10 se muestran los desplazamientos, los cuales fueron significativamente verticales debido a que se modelo una consolidación igual en toda el área. En la parte superficial se tuvieron valores de asentamientos de 1.27 unidades.

En la Figura V.11 se observan las deformaciones volumétricas totales que, aunque presentan una configuración extraña, todas son prácticamente iguales al C_f utilizado (0.08) lo que nos sirve para revisar que el programa funciona correctamente.

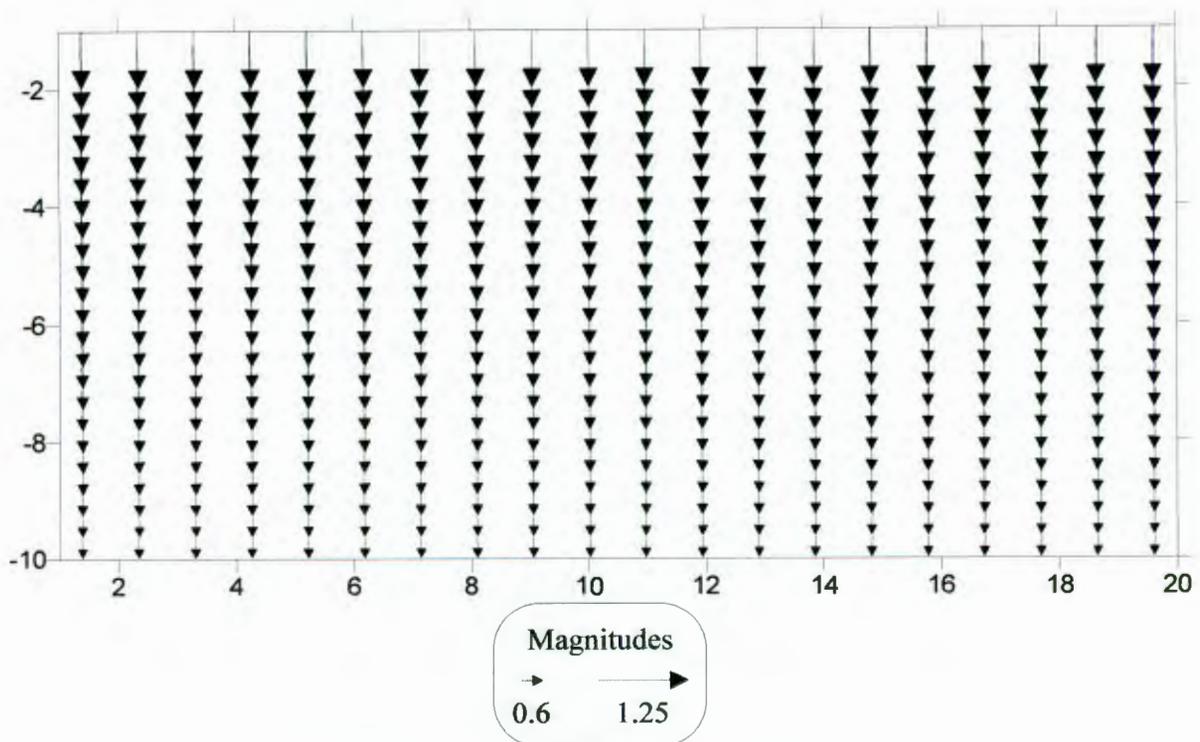


Figura V.10. Hundimiento en basamento rectangular.

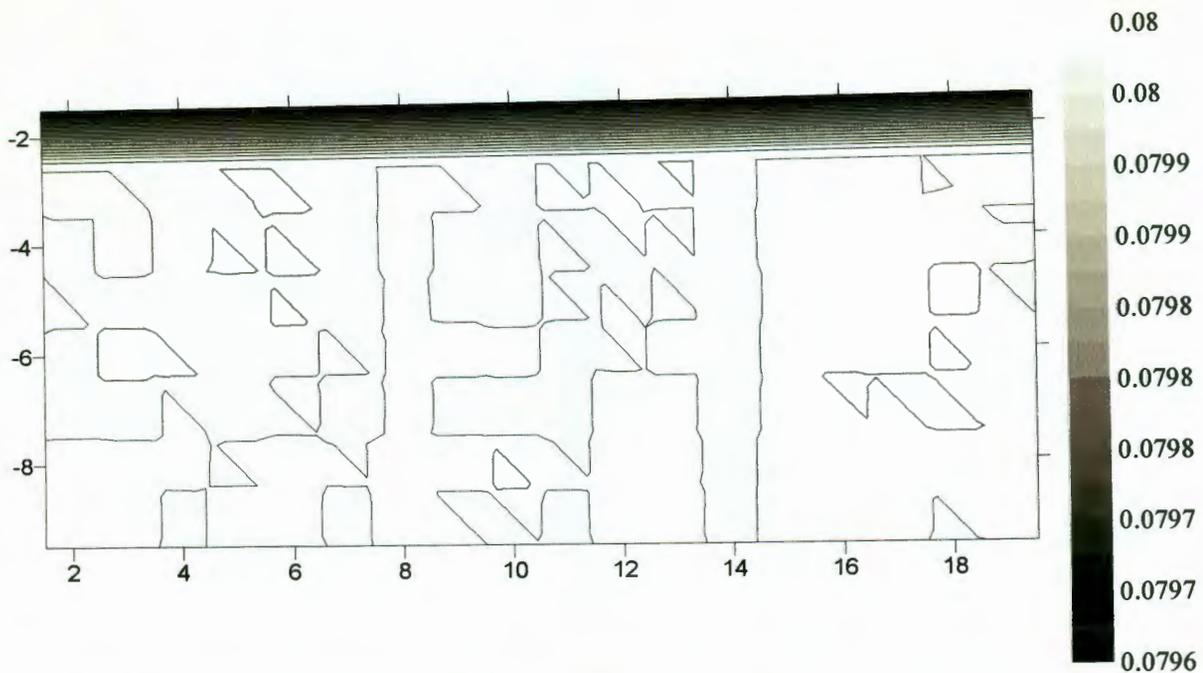


Figura V.11. Deformación volumétrica en basamento rectangular prácticamente igual a C_f (0.08).

Excavación profunda:

Otro caso para el que se utilizó el programa fue para ver si se podía reproducir matemáticamente las deformaciones y cambios volumétricos presentados por Ou, Liao y Cheng (2000) en su artículo "Building response and ground movements induced by a deep excavation". En ese trabajo se midieron los esfuerzos y las deformaciones en el suelo debidas a la excavación que se realizó al construir el Taipei National Enterprising Center. Se exhiben los datos de las deformaciones en las paredes de la excavación, los asentamientos en la parte superior de la excavación y las deformaciones volumétricas atrás de las paredes de dicha excavación.

Para poder comparar los datos del artículo con los datos obtenidos con el programa, se ha supuesto que las deformaciones en la pared de la excavación son equivalentes a una pérdida de volumen del suelo ver Figura V.12.

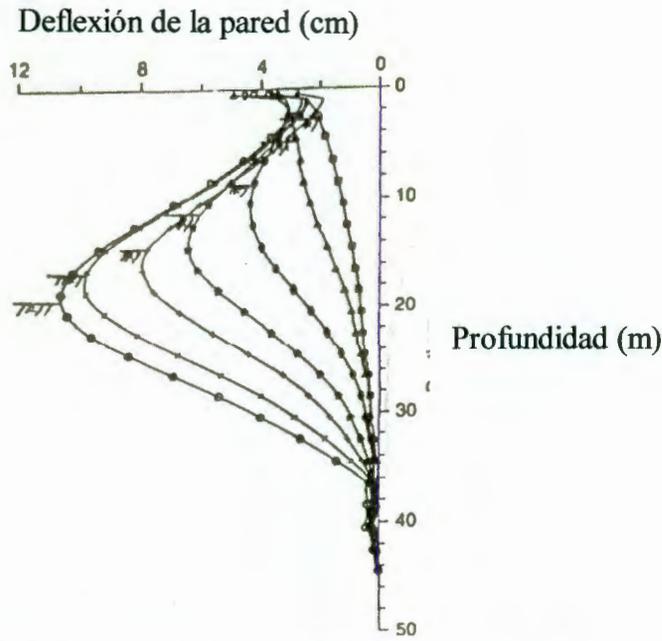


Figura V.12. Deformaciones en la pared de la excavación (Ou, Liao y Cheng, 2000).

Aquí se consideró la máxima deformación en la pared, de la cual, en el programa se sustituyó por un cierto número de pilotes que tienen longitudes que van desde la parte superior donde se midió la deformación (H_1) hasta la parte inferior (H_2), y se consideró que el espesor del pilote era del mismo espesor que la zona medida, con el fin de recrear una pérdida de volumen igual en área a la deformación de la pared ver Figura V.13.

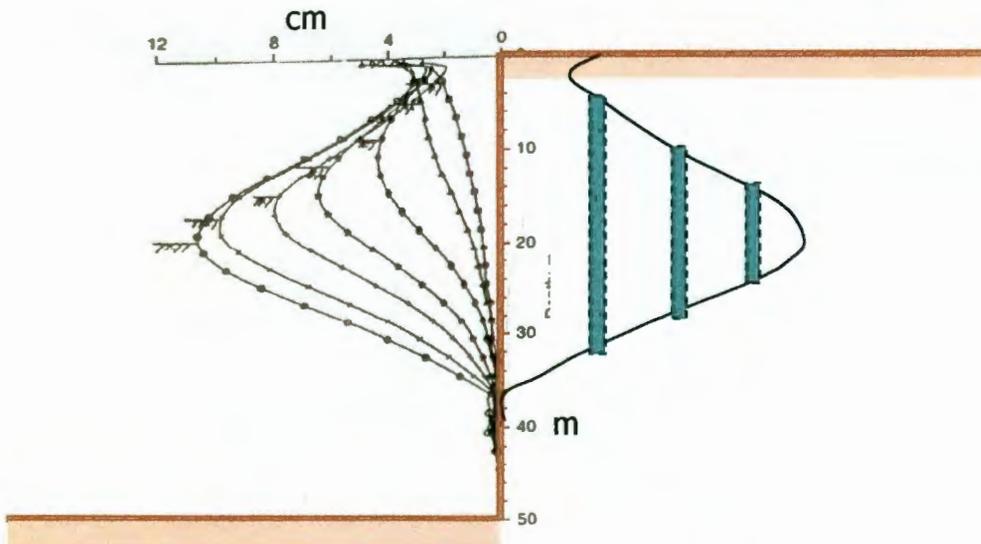


Figura V.13. Modelado de la excavación.

La comparación de los hundimientos y de los cambios de volumen, medidos y calculados, se muestran en la Figura V.14.

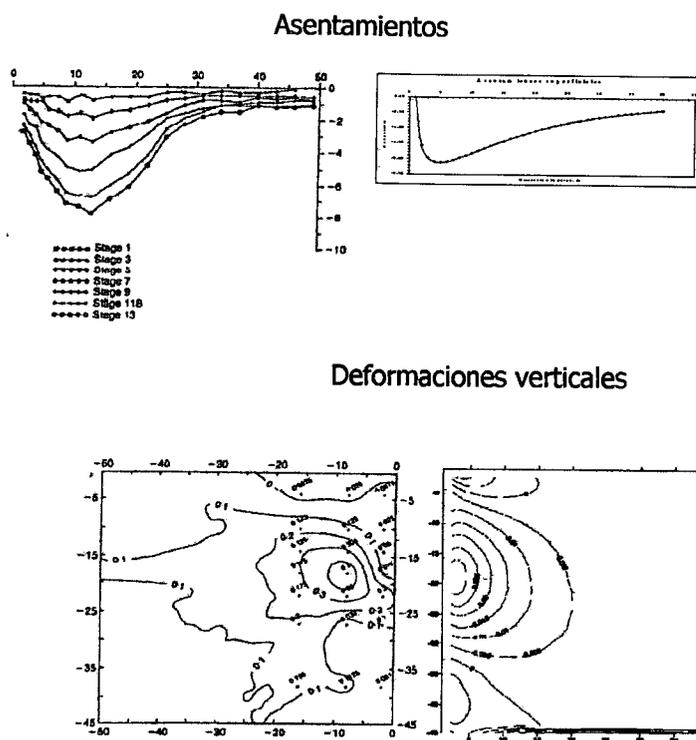


Figura V.14. Hundimientos y deformaciones verticales medidas y calculadas.

Se puede apreciar el parecido de las figuras medidas y calculadas, cabe también mencionar que los valores de las figuras son parecidos, aunque no iguales. La figura de deformaciones verticales medida tiene el valor máximo un poco más alejado de la pared que en el caso calculado, esto se puede deber a las condiciones locales de la excavación, como construcciones aledañas, maquinaria, etc.

Cabe mencionar que para el caso del TNEC se incluyó en el cálculo la deformación que inducida si la fricción en la pared detuviera los el movimiento del suelo inmediato a ésta. Para lograr esto se tomaron las soluciones de Cerutti para una carga horizontal a lo largo de una superficie de un espacio semi-infinito. En este caso la frontera a considerar será la de la pared por lo que sería mejor decir que es una carga que actúa a lo largo de la frontera.

Comparación con la metodología de elementos finitos:

Aquí se presenta, a manera de comparación, algunas figuras que representan los diferentes valores encontrados con el método de elementos finitos y con el método de la teoría de la pérdida volumétrica, ambos para un abatimiento total del nivel freático y dentro de un basamento de forma sinusoidal.

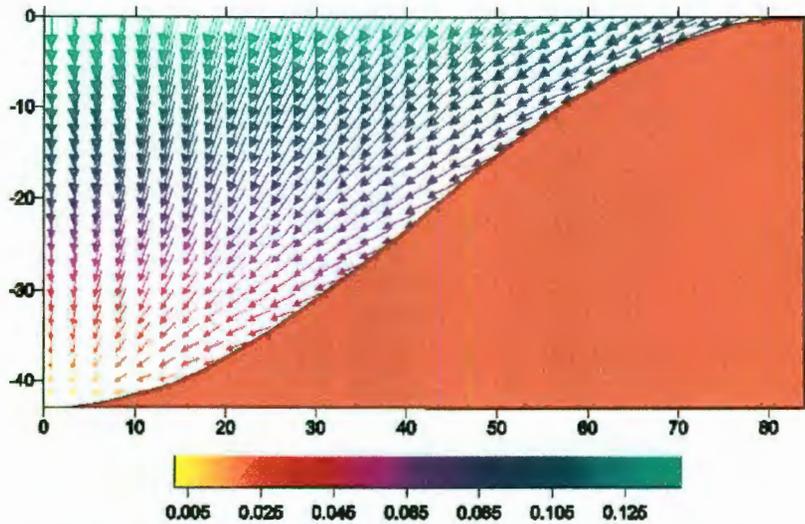


Figura V.15. Desplazamientos obtenidos con la teoría de pérdida volumétrica.

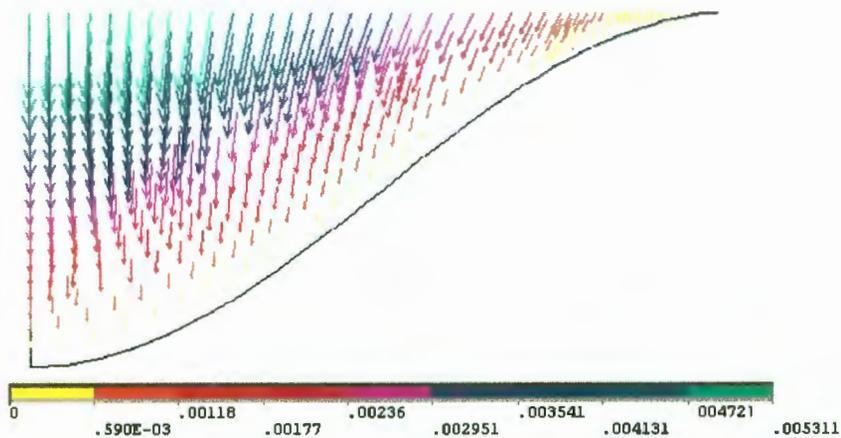


Figura V.16. Desplazamientos calculados con el método de elementos finitos (Eduardo Rojas, Com. Personal)

Si comparamos estas figuras podemos observar que los máximos se ubican en la misma zona; que las direcciones son similares en ambos casos y que las magnitudes son

aproximadamente correspondientes, más no iguales esto por las características que se usaron en la modelación con elementos finitos. También hay que decir que con elementos finitos es mucho más fácil lograr que la frontera rígida se comporte como un lugar de cero desplazamientos, sin embargo con la teoría de pérdida volumétrica se pudo reducir los valores a muy cercanos a cero aunque no iguales.

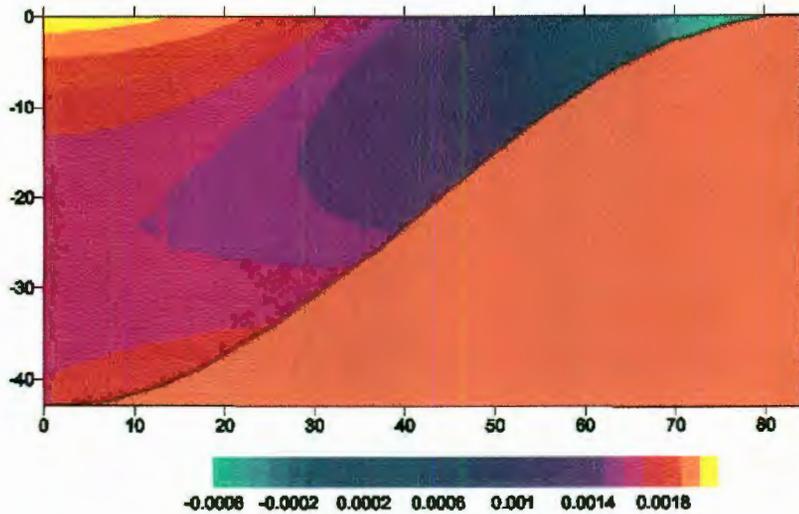


Figura V.17. Deformaciones horizontales obtenidas con la Teoría de la pérdida volumétrica.

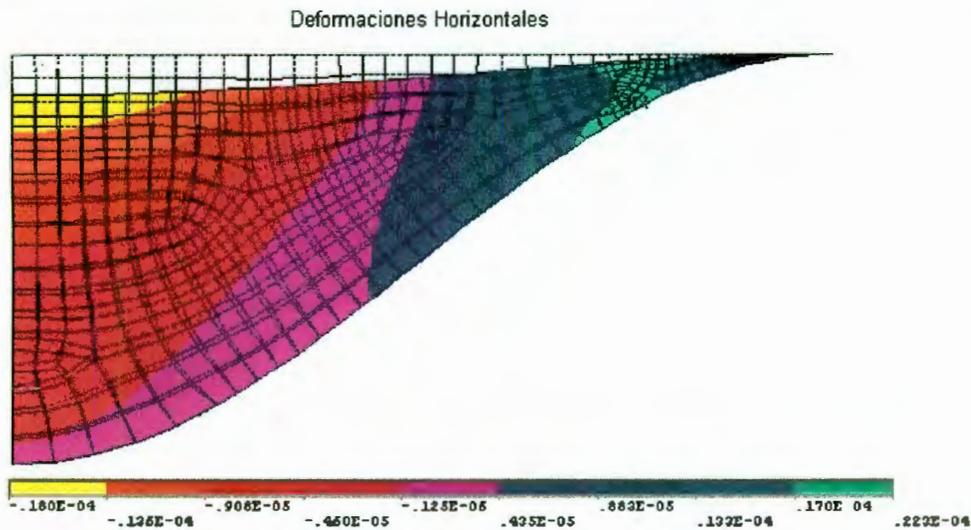


Figura V.18. Deformaciones horizontales por medio de elementos finitos (Eduardo Rojas, com. Personal).

Las zonas de tensión o cero compresión se presentan en ambos casos con los colores azules y en ambos casos éstas empiezan cerca del punto de inflexión de la curva sinusoidal,

aunque con elementos finitos (Figura V.18) la zona de máxima tensión se encuentra un poco más a la izquierda que la calculada con la teoría de la pérdida volumétrica.

En estas zonas de tensión pudieran aparecer agrietamientos como el presentado en la Figura V.19

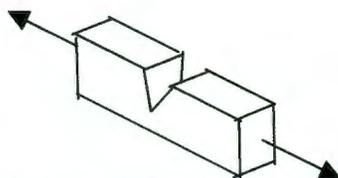


Figura V.19. Grieta de apertura según la mecánica de fracturas.

En las siguientes figuras se presentan los resultados obtenidos para la deformación volumétrica, se puede apreciar la diferencia entre las deformaciones finales obtenidas. La compresibilidad usada en pérdida volumétrica fue de 0.005 y en elementos finitos se obtuvo una compresibilidad final de entre aproximadamente 0.005 a 0.007, se observa que la deformación que se obtiene con el método de la teoría de la pérdida volumétrica es varia mucho menos, lo anterior debido a las diferentes consideraciones hechas en cada modelo, en el caso de elementos finitos importan también las características de elasticidad introducidas. Sin embargo ambas nos reflejan que el comportamiento general obtenido en ambos casos es similar y por lo tanto comparable sobre todo en magnitud.

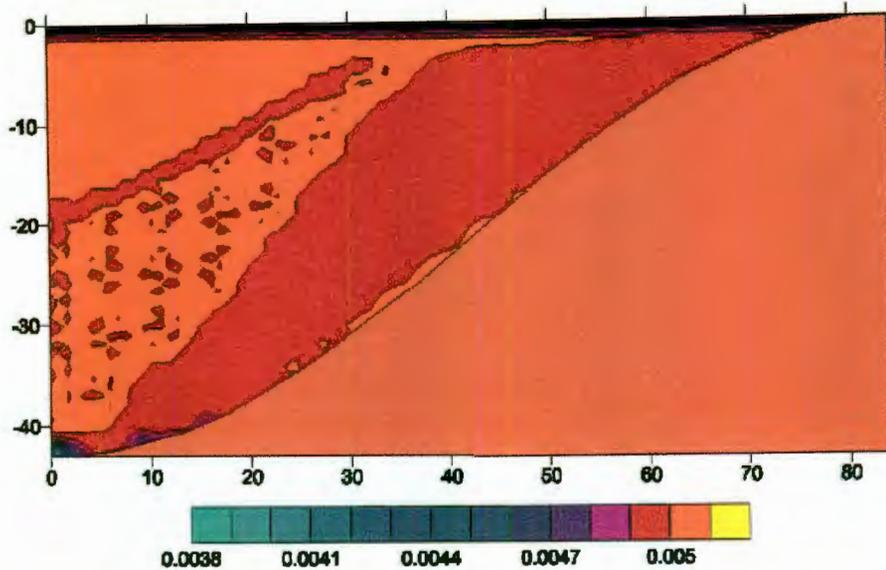


Figura V.20. Deformaciones volumétricas obtenidas con la teoría de la pérdida volumétrica.

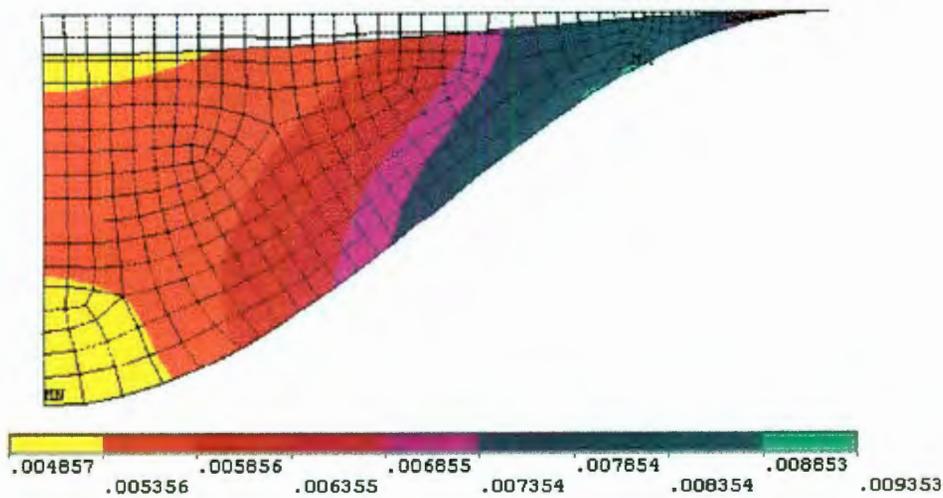


Figura V.21. Deformaciones volumétricas por elementos finitos (Eduardo Rojas, Com. Personal).

Abatimiento parcial en basamento de forma sinusoidal:

Un ejemplo que se realizó con la finalidad de ver el comportamiento de los asentamientos en el caso de los abatimientos parciales del nivel freático son los que se muestran a continuación.

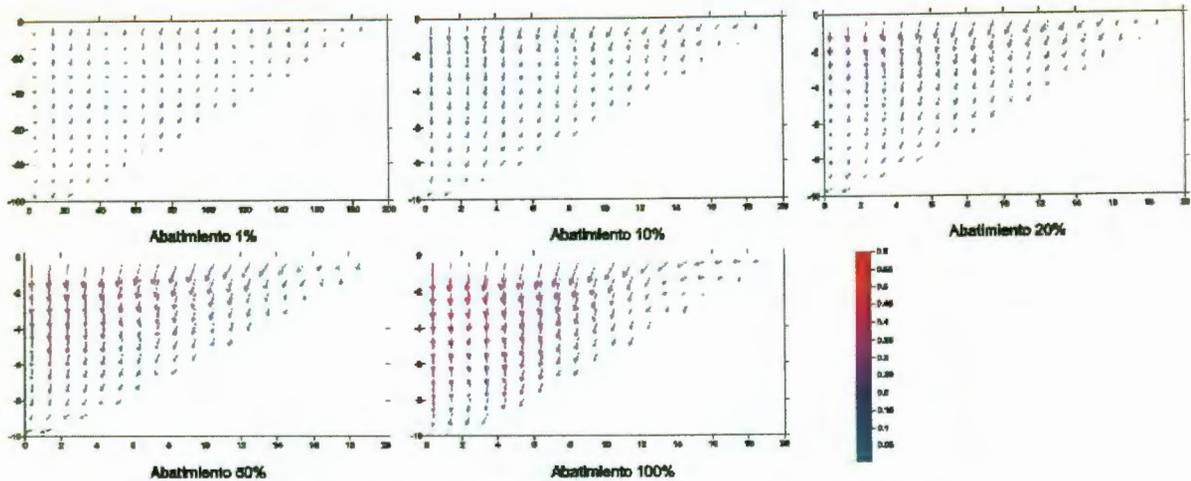


Figura V.22. Desplazamientos para diferentes abatimientos.

En las figuras de vectores de desplazamientos (Figura V.22) podemos observar estos crecen en magnitud, sobre todo en la parte alta de la zona central, conforme aumenta el abatimiento.

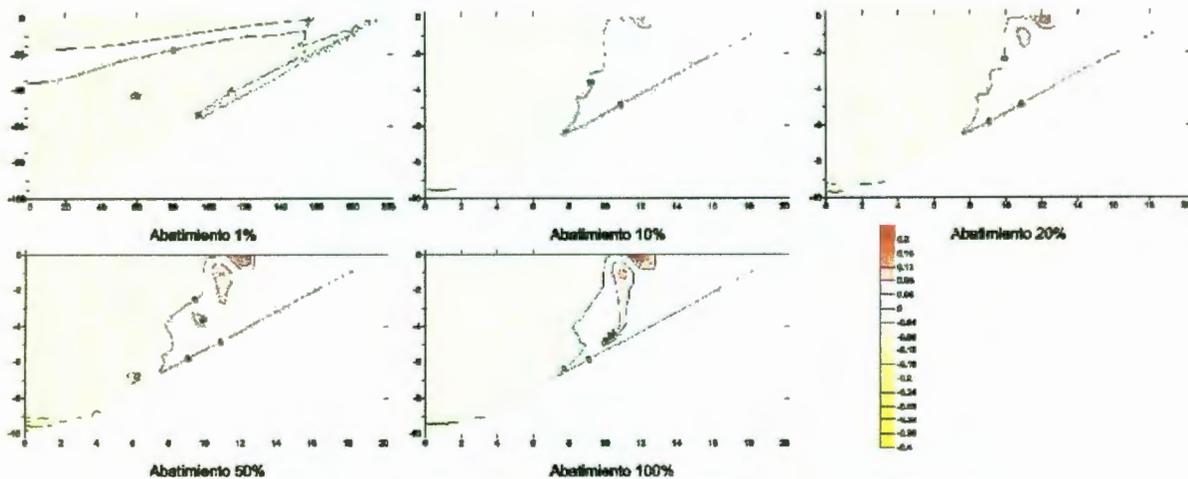


Figura V.23. Deformaciones horizontales para diferentes abatimientos.

En las deformaciones horizontales también se puede observar como van creciendo éstas conforme el abatimiento es mayor. En la Figura V.23 de deformaciones horizontales, las cuales tienen signos positivos (rojos) y negativos (amarillos), tensiones y compresiones respectivamente, las zonas de tensión son zonas donde potencialmente pueden aparecer

grietas del tipo apertura definidas por la mecánica de fractura como se muestra en la Figura V.19.

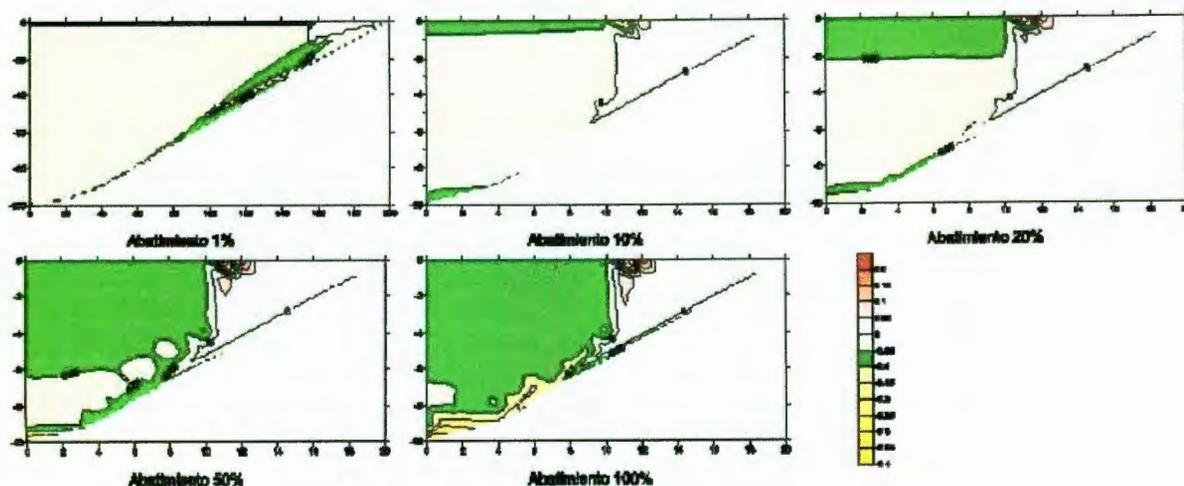


Figura V.24. Deformaciones volumétricas para diferentes abatimientos.

En Figura V.24 se presentan las deformaciones volumétricas, la compresibilidad del material, se alcanza a ver (por el color verde) la compresibilidad de abatimiento total conforme avanza el nivel de abatimiento, lo que sirve para validar el modelo de abatimiento parcial, también se observan zonas de extensión (color rojo).

Diferentes estratos:

En el caso de varios estratos el programa tiene capacidad para tres con diferentes C_f , en la Figura V.25 se muestran las deformaciones volumétricas con un abatimiento total dentro de una configuración basamental del tipo que tiene la Figura V.7, donde se consideraron los estratos superior e inferior como compresibles $C_f = 0.08$ y el estrato intermedio como no compresible $C_f = 0.0$ este estrato en el archivo de entrada esta considerado de la profundidad de 15 hasta 20 unidades. Se puede ver que la respuesta del programa es bastante buena, aunque en el estrato intermedio la deformación volumétrica cambia de signo, esto se puede deber a que la introducida esta muy cerca de cambiar de signo ($C_f = 0$).

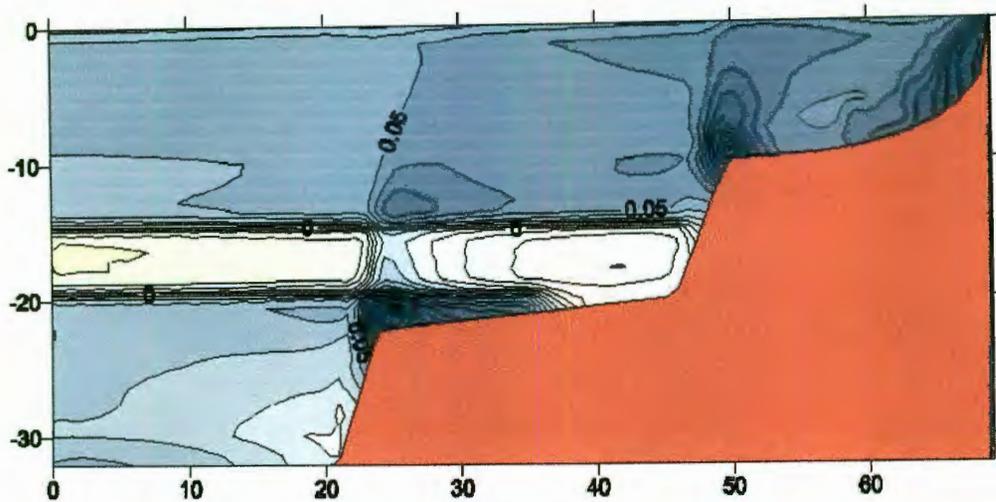


Figura V.25. Deformación volumétrica con tres estratos diferentes.

V.5. Validación teórica del modelo

El modelo y el código computacional realizados arrojan resultados que son los esperados, además al cambiar los parámetros de entrada los resultados cambian también de la manera que se supone de antemano, por lo que se puede afirmar que las consideraciones para realizarlo son correctas y éste funciona de manera adecuada.

V.6. Comentarios sobre la calibración

Los datos de las observaciones del fenómeno de la subsidencia, de las propiedades mecánicas del suelo así como lo arrojado por la geología y la geofísica son de igual importancia que el modelo matemático y el código de computadora; ya que todos estos datos sirven para calibrar el programa, ver si su funcionamiento refleja lo observado hasta el momento. Por ejemplo los modelos empíricos y semi - teóricos presentados en los capítulos 3.1. y 3.2. necesariamente tienen que partir de datos observados.

En la calibración de los modelos teóricos pasa algo similar que en los modelos empíricos y semi - teóricos. La calibración de los modelos teóricos implica introducir todas

las variables de entrada conocidas y ajustar dentro de un rango admisible las que se tienen con incertidumbres, todo esto para conseguir que el modelo refleje el fenómeno en la actualidad o en un momento pasado (variables de salida), entonces a partir de eso poder hacer predicciones a futuro.

En este caso particular las variables de entrada consideradas son:

- Propiedades mecánicas del suelo, específicamente C_f y γ_n ;
- Cambio en el nivel freático a través del tiempo;
- Forma y dimensiones de los materiales geológicos, basamento incompresible y estratos del suelo.

Y las variables de salida:

- Desplazamientos y deformaciones, con las cuales se pueden comparar con:
 - Magnitudes de los hundimientos a través del tiempo,
 - Comportamiento y ubicación de los agrietamientos a través del tiempo.

Teniendo estos datos con la mejor exactitud posible y durante periodos de tiempo largos es como se lograría una mejor calibración, a falta de estos datos hay que mover las variables de entrada dentro de rangos razonables para que el modelo nos arroje la variables de salida que mejor se ajusten a las observaciones en campo.

En el caso particular de C_f y γ_n son propiedades que tienen que tomarse como un promedio, ya que el área de análisis llega a ser grande, por lo cual también puede ser una variable que nos puede ayudar a la calibración. Son propiedades que se pueden obtener en el laboratorio o en el caso de C_f con extensómetros colocados en los estratos compresibles. En todos los casos de análisis presentados posteriormente se utilizó un $C_f = 0.08$ que es un valor medido en la ciudad de Querétaro y que se considera representativo.

Los cambios en el nivel freático, de tenerlos, nos sirven para verificar el comportamiento hasta el día de hoy, y para predecir el comportamiento en el caso de que el nivel llegue cierta profundidad. Si se tiene la finalidad de averiguar cuales con las áreas potenciales de riesgo sin importar el tiempo o el nivel freático, éste ultimo se puede tomar como totalmente abatido al final del proceso de subsidencia. Los niveles freáticos se pueden obtener de la observación directa en los pozos, con el cuidado de que el nivel tiene que reflejar un promedio regional no solamente el nivel de un pozo.

La forma y dimensiones del basamento es el dato más importante que se utiliza, ya que la configuración del basamento se relaciona estrechamente (capítulo 2.) con la aparición de agrietamientos en el proceso de subsidencia. Para obtener estos datos se tiene que hacer uso de levantamientos e interpretaciones geológicas y geofísicas. En este trabajo la forma del basamento es algo que no se calibra, es decir lo que nos ha reportado la geofísica, por ejemplo, es un dato que no se cambia para hacer ajustes en las corridas. Sin embargo en los ejemplos y pruebas del programa es uno de los datos que más varía, esto por que así se puede observar el comportamiento de la masa de suelo dependiendo de diferentes formas de basamento incompresible.

Los otros datos importantes son los de hundimiento y la localización de agrietamientos a través del tiempo. Son datos de suma importancia para comprobar el funcionamiento del modelo, comprobando la concordancia de éstos con lo que se calcule con el código. En el análisis de subsidencia son datos de mucha utilidad ya que nos pueden decir si existe tal subsidencia y a que ritmo esta sucediendo. Estos datos se pueden obtener estudios de topográficos realizados cada cierto tiempo durante un periodo de varios años y si se relacionan con el abatimiento del nivel freático se puede obtener lo mencionado en el siguiente párrafo.

En ejemplo de cómo se podría hacer una calibración es adecuando las características del modelo para que los resultados calculados sean similares a los datos observados. Estos datos pueden ser los presentados en seguida.

Un comentario importante es que no hay que olvidar que la consolidación no es instantánea, sino que lleva su tiempo. Utilizando la teoría de la pérdida volumétrica se introduce un factor C_f que pudiera ser modificado, tomando las consideraciones necesarias, para reflejar lo anterior.

En la Figura V.27 podemos observar el desarrollo de dos posibles escalonamientos, tomando en cuenta solamente la magnitud de hundimiento en diferentes puntos ya que en estos lugares podrá ocurrir un agrietamiento del tipo desplazamiento según la mecánica de fracturas.

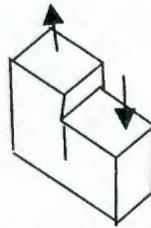


Figura V.26. Grieta tipo desplazamiento según la mecánica de fracturas.

Los escalonamientos y hundimientos pueden ser monitoreados en campo de manera sencilla por medio de perfiles topográficos o con herramientas como GPS.

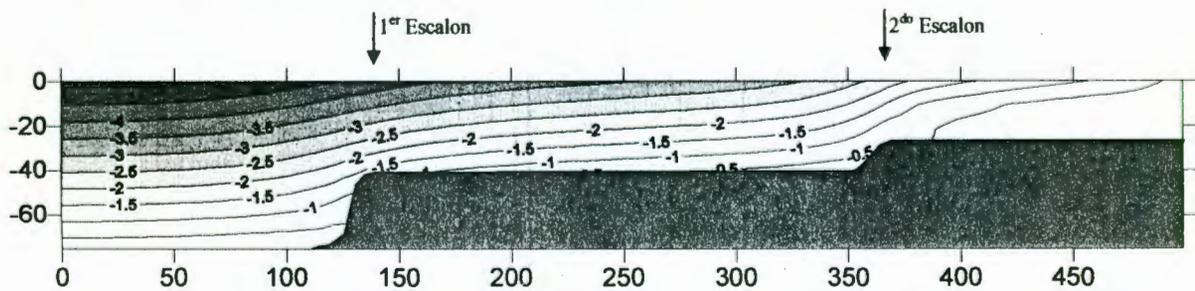


Figura V.27. Hundimientos, perfil Tlacote (a escala numérica de 1:2, una unidad = 2 metros).

A partir de los datos con los que se realizó la Figura V.27, pero además tomando en cuenta diferentes etapas del abatimiento del nivel freático, podemos construir una grafica de nos refleje las magnitudes de los hundimientos en diferentes puntos y con diferentes condiciones de abatimiento, el resultado es la Figura V.28. Estos datos pueden ser analizados también en forma de tabla (Tabla V-1). Ambas se crearon con los datos de los

hundimientos (desplazamiento vertical en la superficie) en el centro del perfil, y a diferentes distancias de éste 200m, 300m, 600m y 800m.

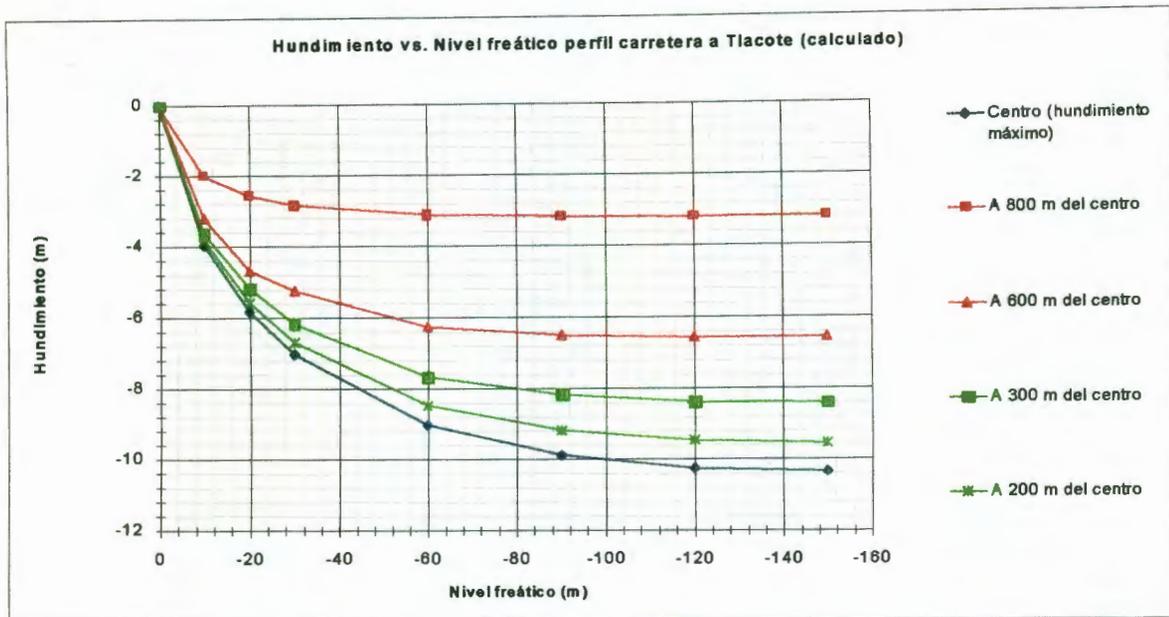


Figura V.28. Desarrollo de hundimientos conforme se incrementa el abatimiento.

Tabla V-1. Desarrollo de hundimientos conforme se incrementa el abatimiento.

Abatimiento	COORDENADAS					Abatimiento	Dif. 1er.	Dif. 2do.
	centro	200 m	300 m	600 m	800 m			
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-10	-3.98	-3.82	-3.62	-3.2	-2	-10	-0.2	-1.2
-20	-5.82	-5.56	-5.18	-4.68	-2.54	-20	-0.38	-2.14
-30	-7.02	-6.68	-6.16	-5.22	-2.82	-30	-0.52	-2.4
-60	-9	-8.46	-7.66	-6.24	-3.1	-60	-0.8	-3.14
-90	-9.88	-9.18	-8.16	-6.5	-3.16	-90	-1.02	-3.34
-120	-10.24	-9.46	-8.36	-6.54	-3.2	-120	-1.1	-3.34
-150	-10.34	-9.54	-8.4	-6.56	-3.18	-150	-1.14	-3.38

Con estos datos se puede calcular el desarrollo de los escalones (tomando en cuenta solamente el hundimiento) conforme se aumenta la profundidad del nivel freático ver Figura V.29. Los escalonamientos aquí presentados no son más que diferencias de nivel topográfico superficial en una distancia muy corta.

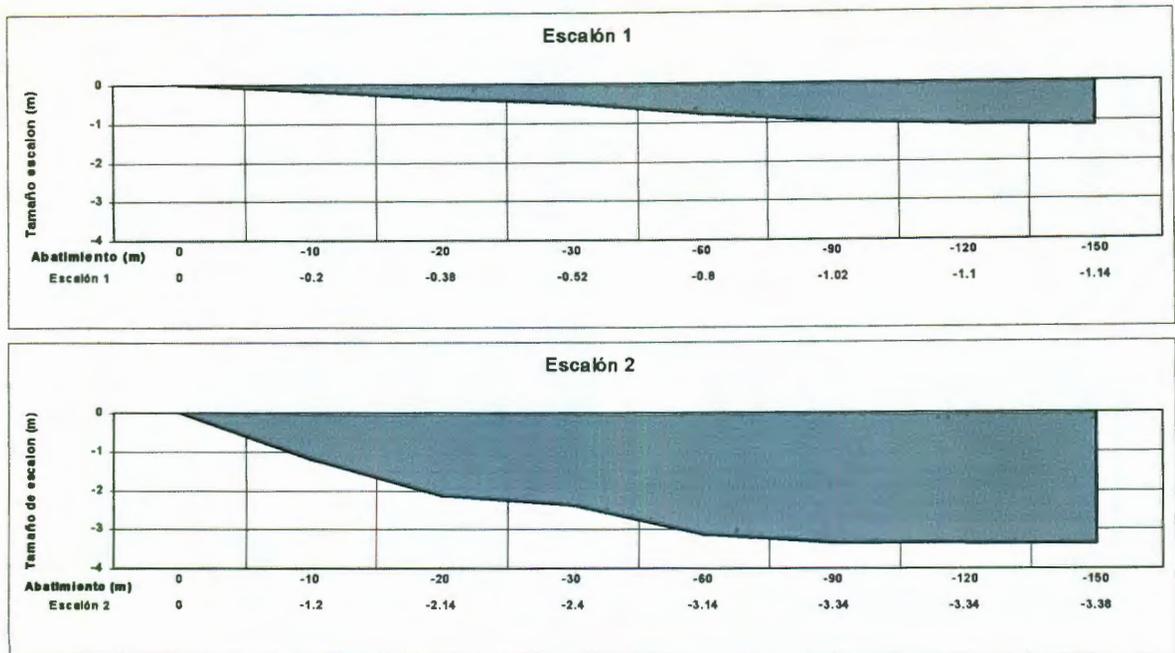


Figura V.29. Desarrollo de los escalonamientos conforme se incrementa el abatimiento.

VI. ANÁLISIS USANDO EL CÓDIGO COMPUTACIONAL

VI.1. Aguascalientes:

La ciudad de Aguascalientes es una de las ciudades mexicanas en las que han aparecido agrietamientos superficiales en la superficie presumiblemente atribuidos al fenómeno de la subsidencia, a continuación se presentan varios análisis de la subsidencia utilizando del Valle de Aguascalientes.

VI.1.1. Perfil Geofísico:

A continuación se presenta un caso de modelación mas real, en el que la forma de las fronteras incompresibles (basamento) es el de un perfil presentado por la geofísica del valle de Aguascalientes.

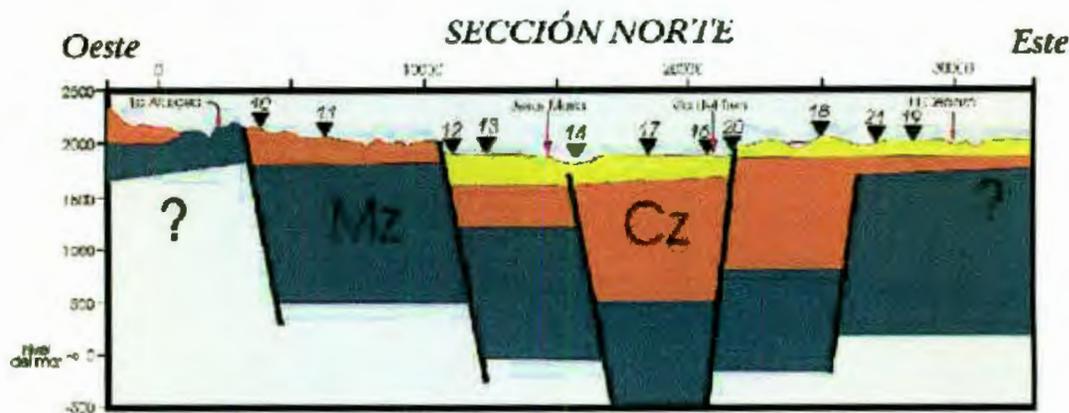


Figura VI.1. Perfil Geofísico en el valle de Aguascalientes. (JORGE ARZATE, com. Personal)

Quitando la distorsión que tiene la figura y tomando el perfil del lado derecho se tiene la siguiente figura, que es la que se va a introducir al modelo.



Figura VI.2. Perfil que se introdujo al modelo.

Los resultados que arrojaron los cálculos se presentan en las siguientes figuras.

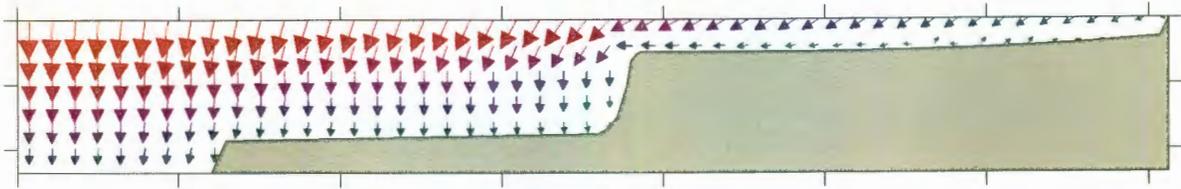


Figura VI.3. Desplazamientos, Aguascalientes.

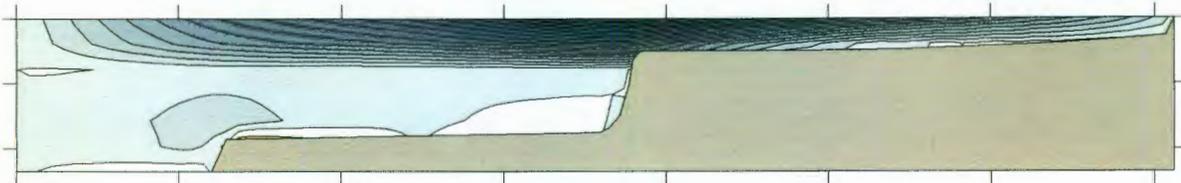


Figura VI.4. Curvas de igual desplazamiento en x, Aguascalientes.

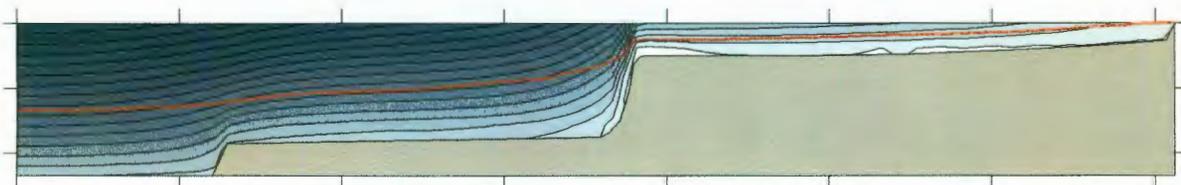


Figura VI.5. Curvas de igual desplazamiento en y, también se presenta un perfil de la superficie, Aguascalientes.

Aquí se observan los hundimientos totales y donde se juntan en la superficie las líneas de igual hundimiento se puede ver claramente en el perfil final superficial la forma de un escalón.

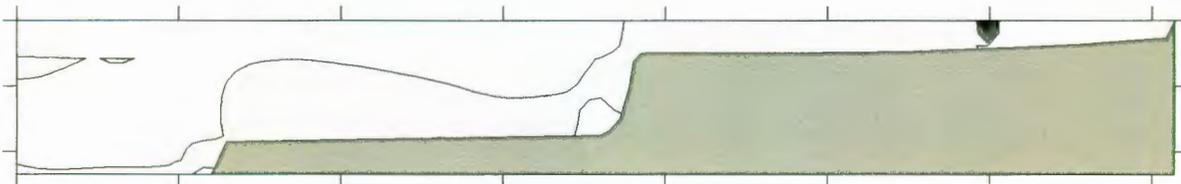


Figura VI.6. Deformaciones horizontales, Aguascalientes.

Esta figura de deformaciones horizontales en este caso particular refleja áreas extensas de tensión (color café-rojizo) y una zona de alta tensión a la derecha del perfil, que por la forma puede tratarse de una singularidad que no representa la realidad.

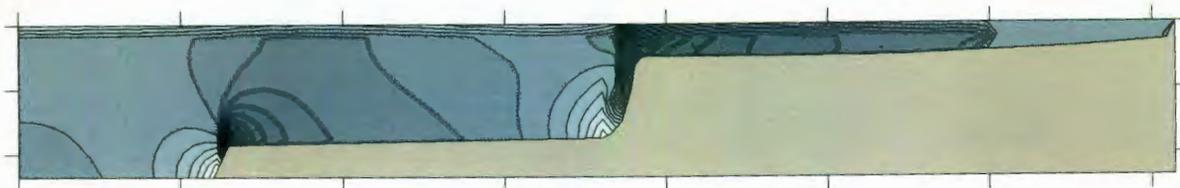


Figura VI.7. Deformaciones verticales, Aguascalientes.

En las deformaciones verticales podemos observar, que en el mismo lugar donde se perfila el escalón, sufren cambios de magnitud muy bruscos, lo que podría ocasionar un agrietamiento de desplazamiento.

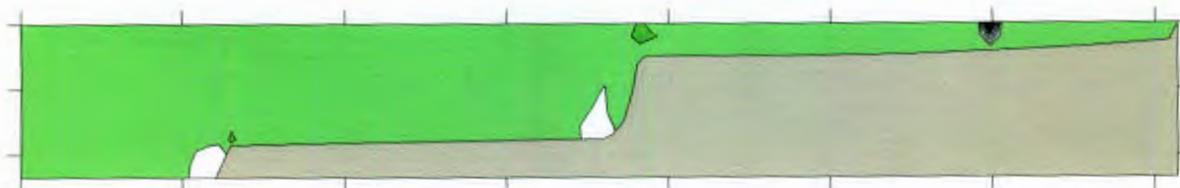


Figura VI.8. Deformaciones volumétricas, Aguascalientes.

Para comprobar se presentan las deformaciones volumétricas todas de manera muy pareja, salvo una disminución al pie de los escalones del basamento (lo que se ha observado también en algunos casos con la técnica de elementos finitos) y la singularidad mencionada en el caso de deformaciones horizontales.

VI.1.2. Perfiles a partir de observación en los pozos:

Otro análisis fue el realizado a partir de unas curvas topográficas del basamento (Figura VI.9), sobre las cuales están localizados los agrietamientos. Gracias a estas curvas se obtuvieron 5 perfiles del material que se considera incompresible y se hicieron corridas con esas formas. No hay que olvidar que las curvas de nivel de basamento presentadas fueron obtenidas a partir de las profundidades observadas en los pozos, los cuales no alcanzan a llegar a la profundidad del basamento en el centro del valle por lo tanto no existen datos en estos lugares y las profundidades aquí son susceptibles a refinamiento con datos obtenidos gracias a observaciones directas e indirectas provenientes de la geología y la geofísica respectivamente.

Se presentan diferentes resultados del análisis, considerando los más representativos. Estos resultados pueden ser curvas de igual desplazamiento vertical (hundimiento); curvas

de igual deformación horizontal, en las cuales el color azul representa compresión y el naranja tensión; otra figura que se presenta es la de deformaciones verticales que sigue el mismo código de colores que las deformaciones horizontales, en todos los casos solamente se presentan compresiones; en el perfil C-C' se presenta también la figura correspondiente a las deformaciones volumétricas, esta figura es representativa de todos los casos analizados, allí el color verde es el valor de 0.08 el cual es igual al introducido como parámetro para el modelo.

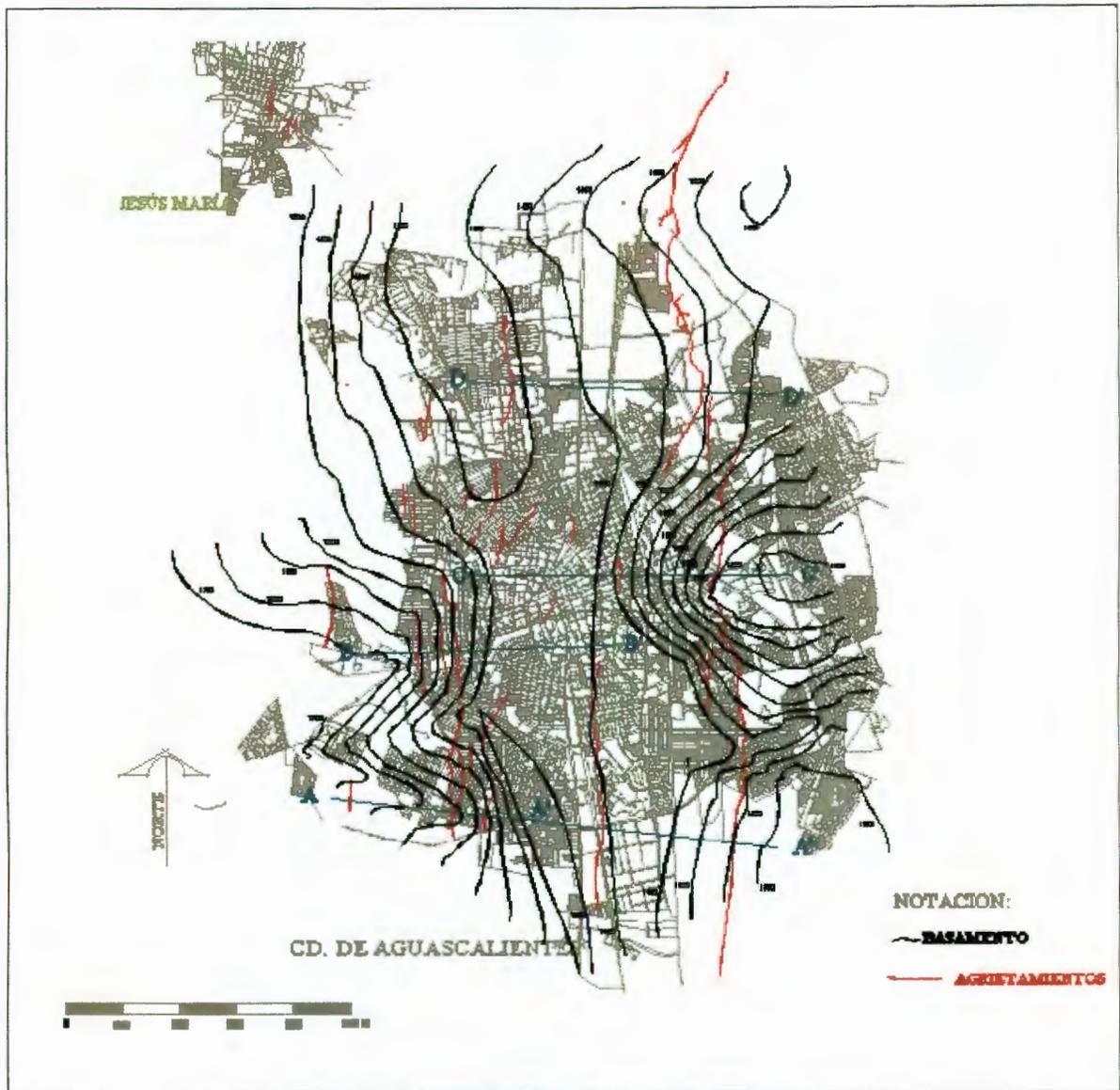


Figura VI.9. Curvas de nivel de basamento y perfiles.

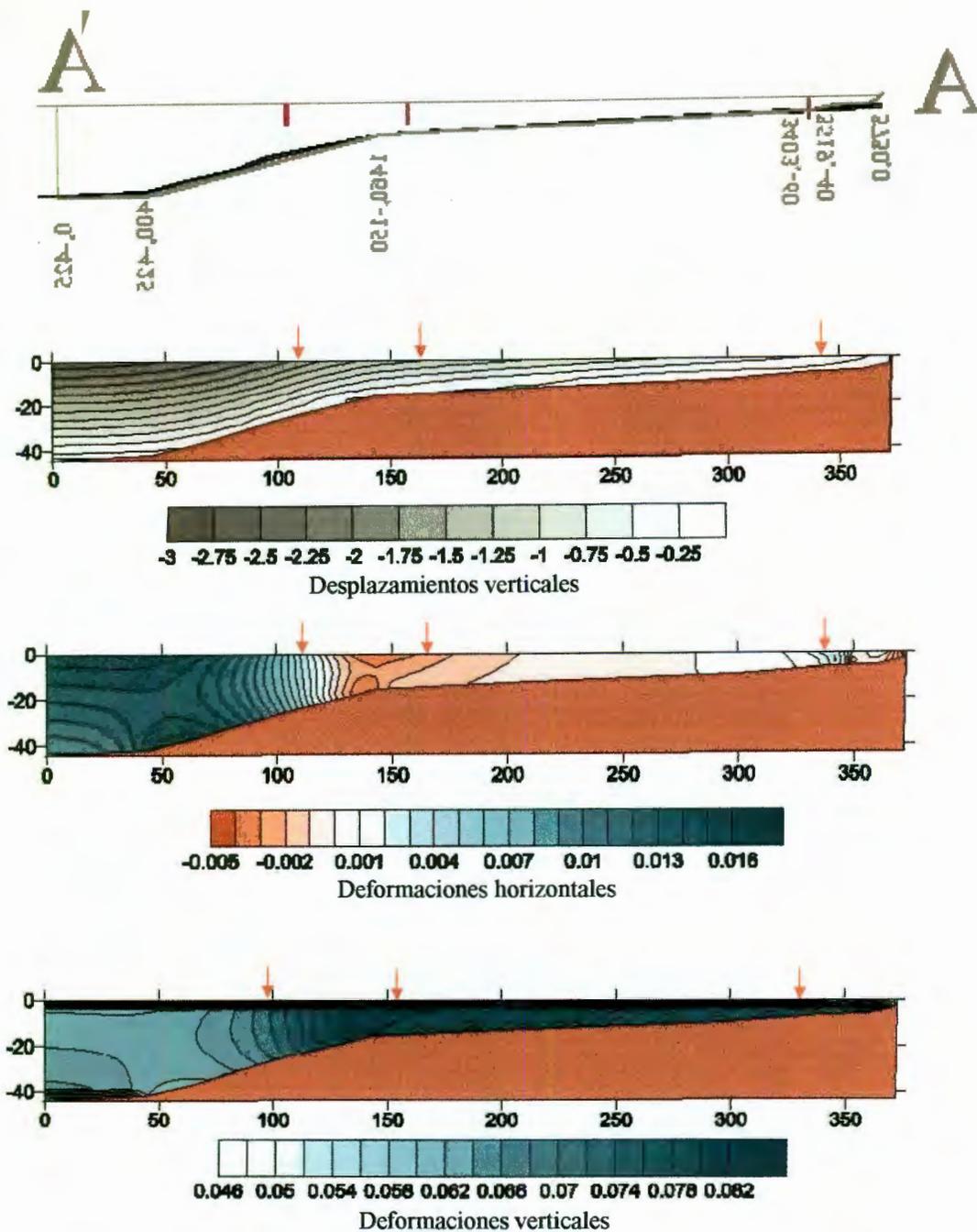


Figura VI.10. Resultados perfil A-A'.

En el perfil A-A' aquí se presenta de manera invertida. En este perfil se puede observar claramente como las zonas de tensión (en las deformaciones horizontales) corresponden a los lugares donde han aparecido agrietamientos. Los agrietamientos también están dentro de la zona donde las curvas de igual desplazamiento vertical se acercan unas con otras en la superficie.

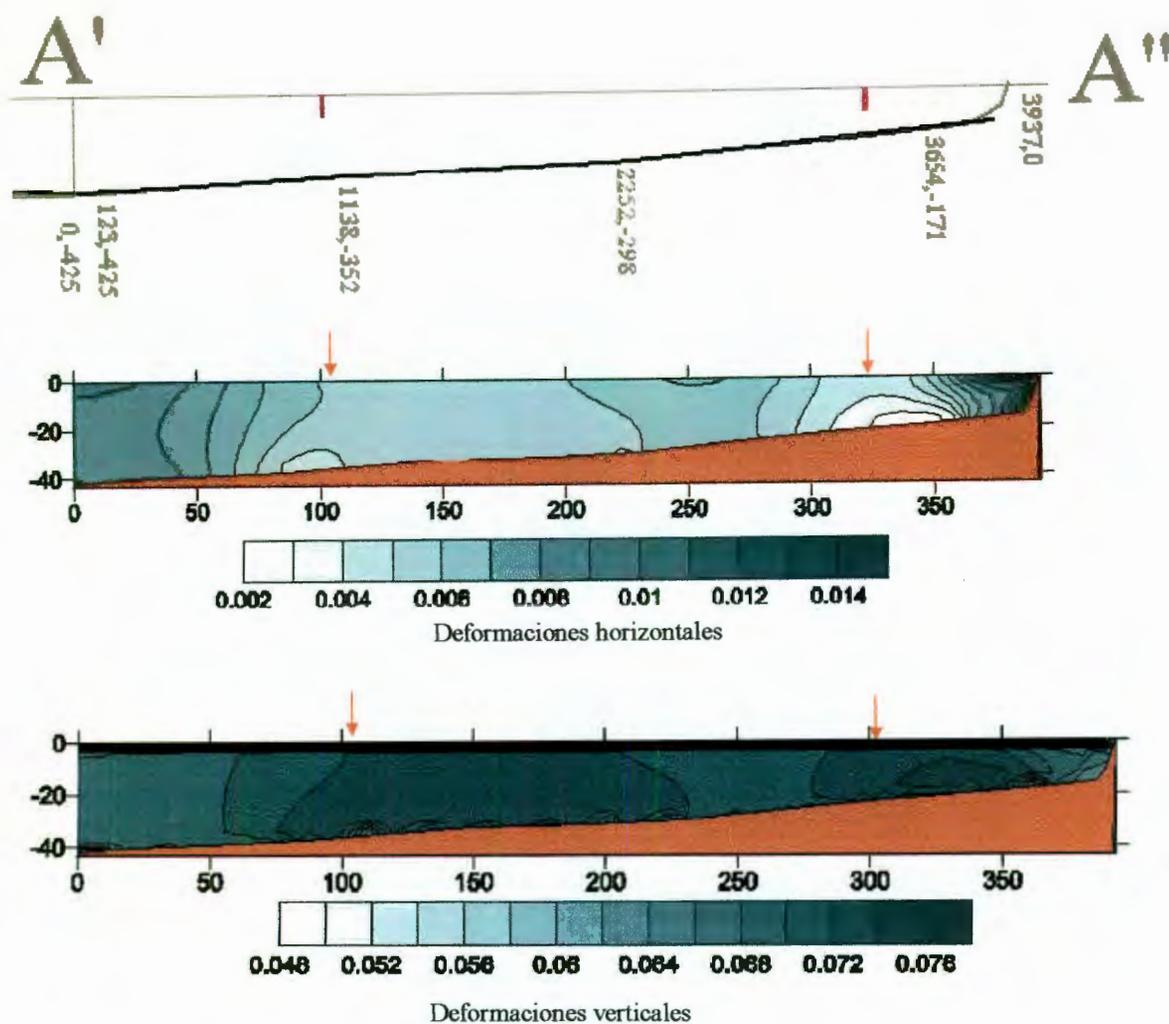


Figura VI.11. Resultados perfil A'-A''.

En este perfil no aparecen claramente zonas de tensión horizontal, pero los agrietamientos observados están justo donde la compresión es casi nula, por lo que si por alguna razón de ajuste del modelo aparecieran zonas de tensión lo más probable sería que fuera en estos lugares. También se puede apreciar que los agrietamientos se ubican en zonas donde la deformación horizontal es mayor.

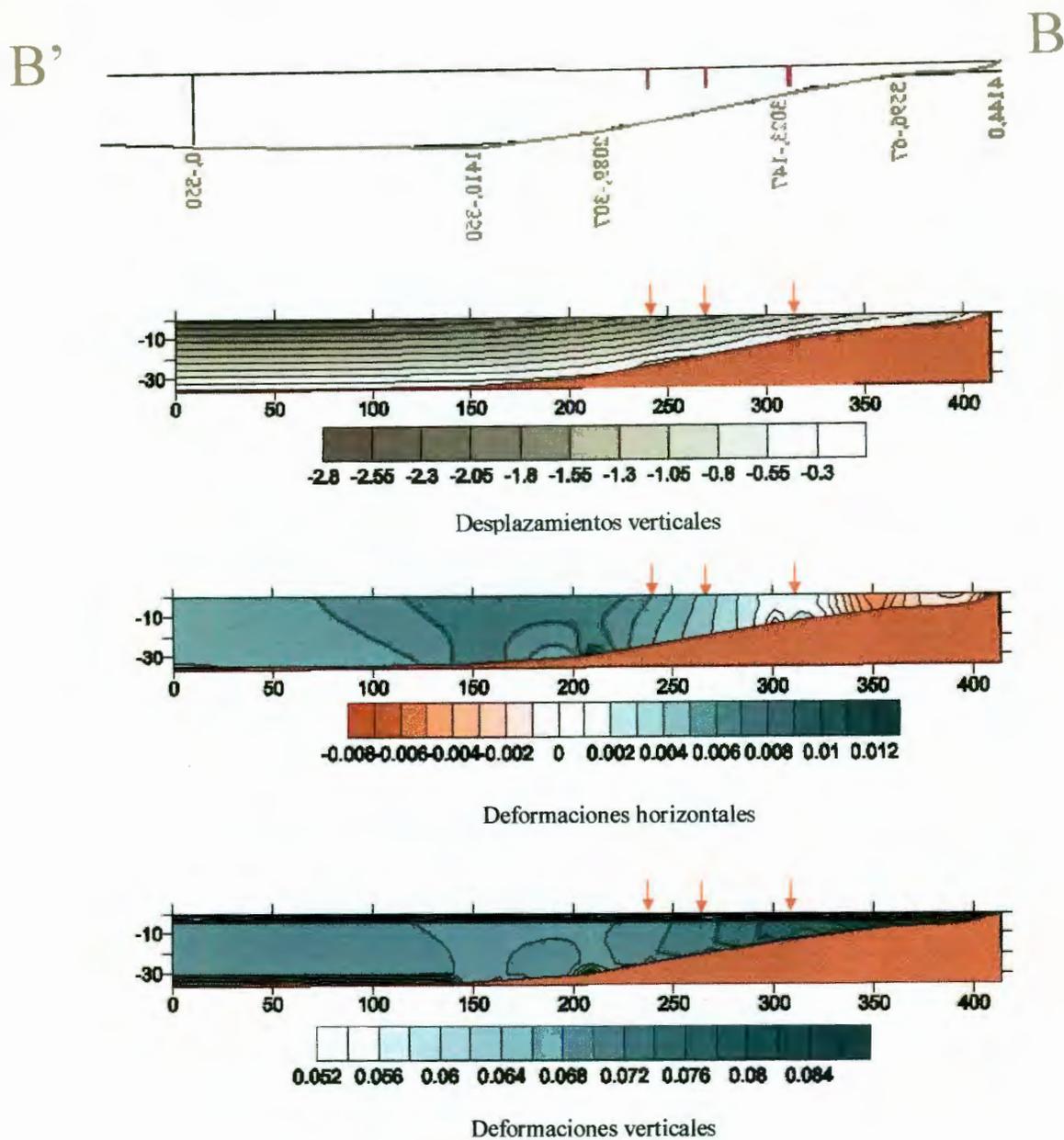


Figura VI.12. Resultado perfil B-B'.

El perfil B-B' también se presenta invertido. Aquí es muy claro que todos los agrietamientos se ubican en la zona donde las diferencias del hundimiento son más pronunciadas, que corresponde al lugar donde mayor son los cambios en las deformaciones verticales. En la figura de deformaciones horizontales se ve una zona de tensión que no corresponde con los agrietamientos observados, aunque hay uno que se acerca mucho a esta zona.

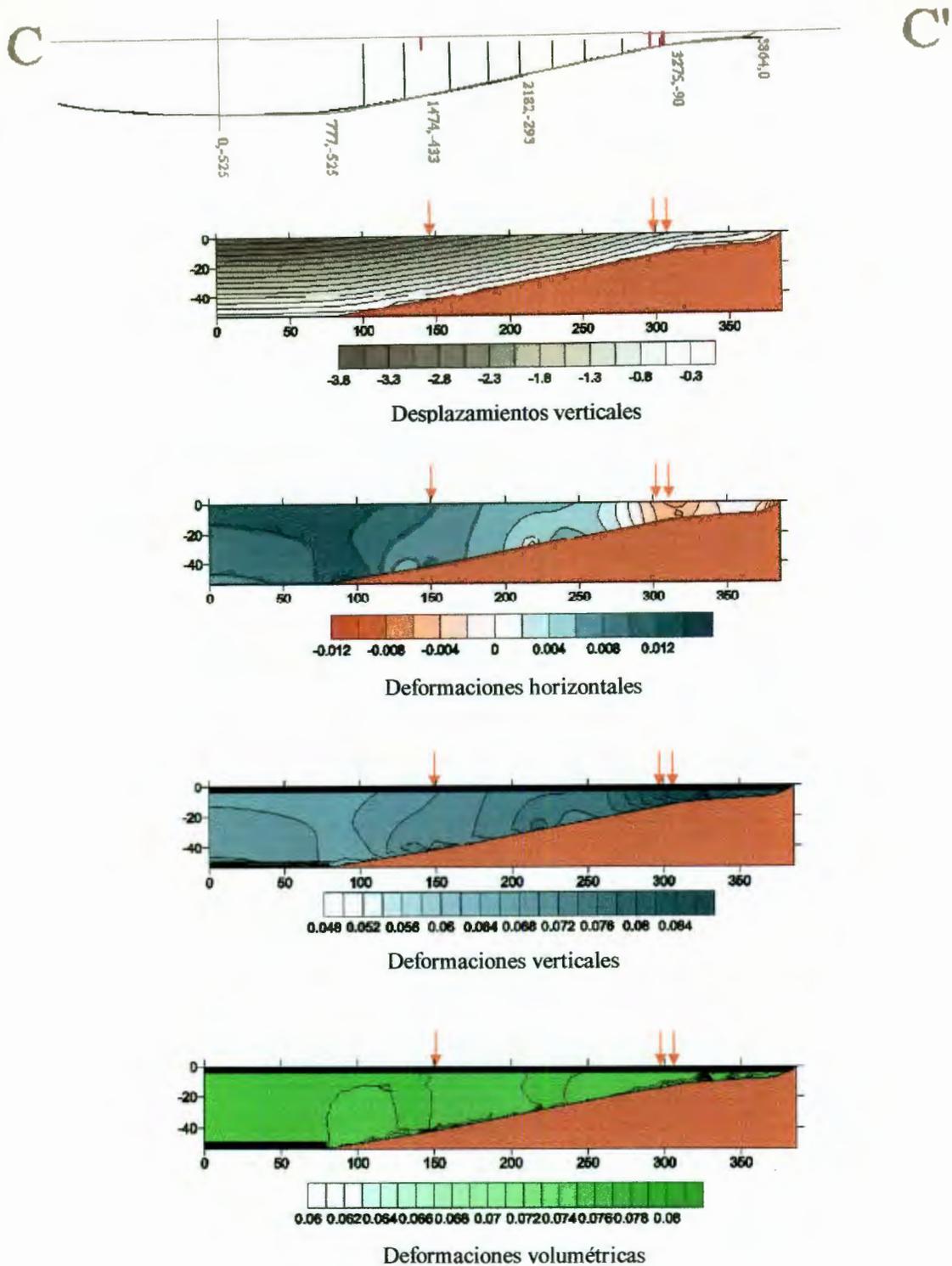
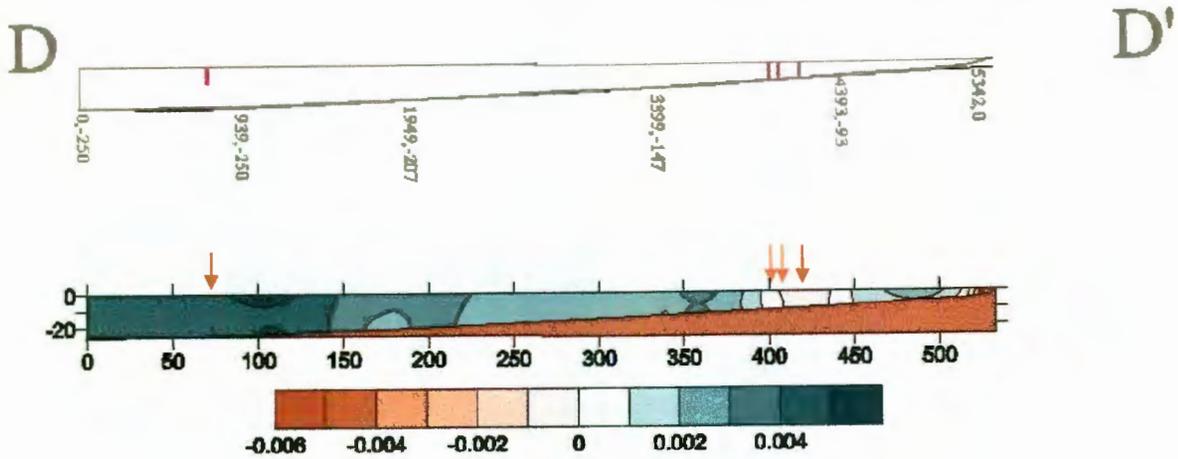


Figura VI.13. Resultado perfil C-C'.

En el perfil C-C' se puede observar como los agrietamientos del lado derecho corresponden de manera muy evidente a la zona de tensiones horizontales, pero se observa

un agrietamiento al centro del valle del cual se hablará en los comentarios generales de este caso.



Deformaciones horizontales

Figura VI.14. Resultado perfil D-D'.

En este perfil también se puede observar claramente como la zona de tensión (en las deformaciones horizontales) corresponden al lugar donde han aparecido agrietamientos.

En los perfiles A-A', B-B', C-C' y D-D' existen agrietamientos entre la zona de tensión y el lugar de más profundidad del basamento, agrietamientos que no están en la mencionada zona de tensión y que aparentemente tampoco están en zonas donde el cambio de la magnitud de asentamiento no es tan grande. Esto puede deberse a la falta de datos de los niveles del basamento al centro del valle, por ejemplo si se encontrara un escalón en ese lugar eso podría explicar los agrietamientos.

VI.2. Querétaro:

En el caso de la ciudad de Querétaro los perfiles que se presentan han sido obtenidos con el método geofísico de gravimetría en total se presentan perfiles de cuatro lugares diferentes dentro de la zona urbana de Querétaro la localización es la siguiente:

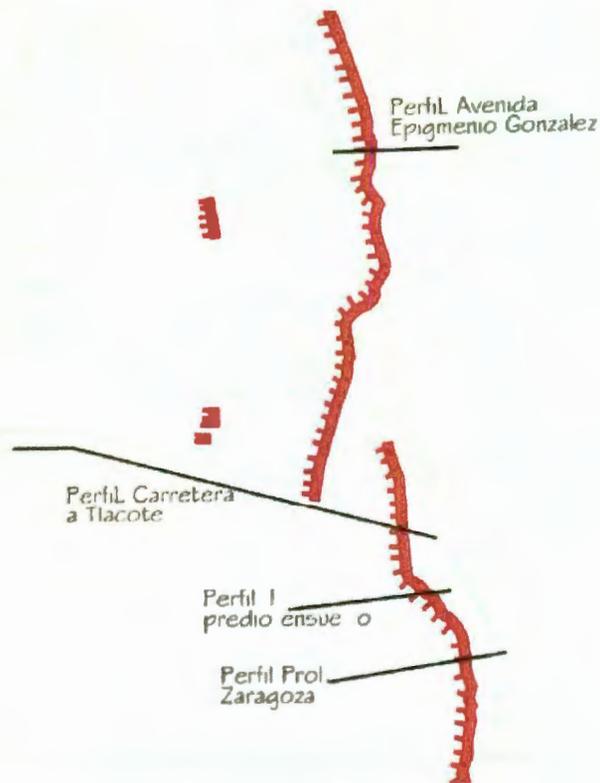


Figura VI.15. Ubicación de perfiles geofísicos en la ciudad de Santiago de Querétaro (Jesús Pacheco, Com. Personal).

VI.2.1. Carretera a Tlacote modelo uno:

Una corrida se hizo en el caso de la ciudad de Querétaro, más específicamente en la carretera a Tlacote, primeramente se presenta un modelo geofísico de el basamento incompresible Figura VI.16 (Jesús Pacheco, comunicación personal).

A partir de este modelos del basamento, se realizó el análisis con el modelo computacional, se presentan todas las figuras obtenidas, primero son los desplazamientos las siguientes figuras que en orden son: Figura VI.19 curvas de igual desplazamiento en horizontal, Figura VI.20: curvas de igual desplazamiento vertical y perfil final de superficie, Figura VI.21: curvas de igual deformación horizontal, Figura VI.23: Curvas de igual deformación vertical, Figura VI.25: Curvas de igual deformación volumétrica.

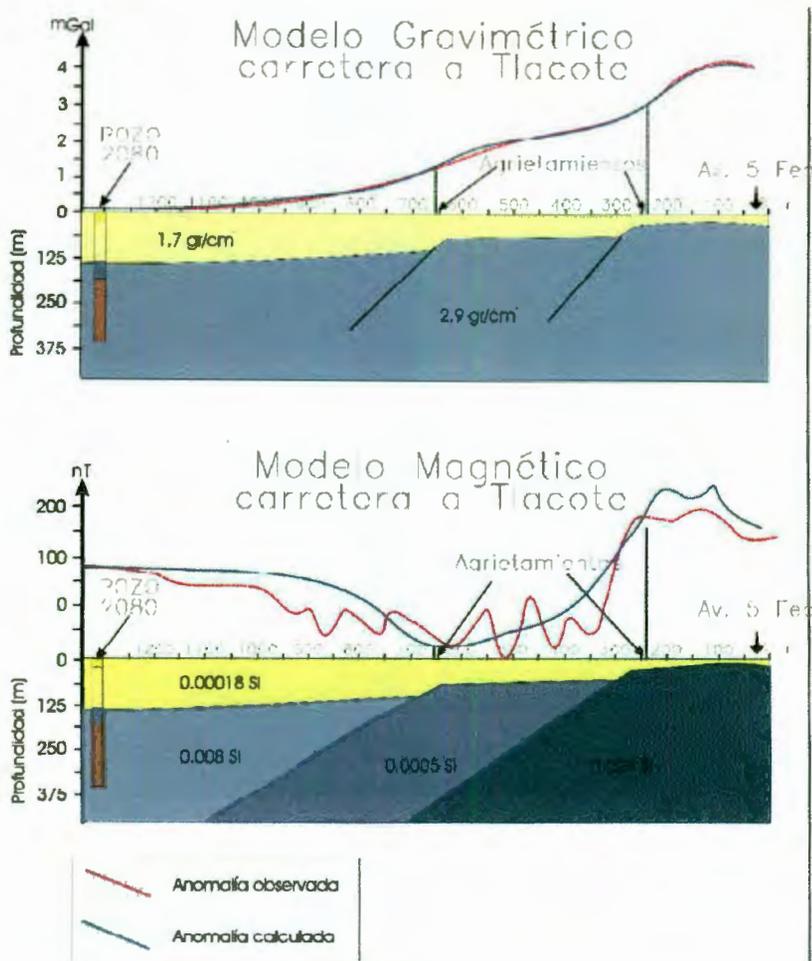


Figura VI.16. Modelo Geofísico del basamento en carretera a Tlacote (Jesús Pacheco)

Modelo geofísico construido a partir de mediciones gravimétricas y magnéticas en la carretera a Tlacote. Por economía en tiempo de análisis éste se realizó a escala numérica de 1:2 (una unidad = 2 metros) que es la escala que se presenta en las figuras.

Aquí se presenta el resultado obtenido con la teoría de pérdida volumétrica y en algunos casos su comparación con resultados siguiendo el método de elementos finitos.

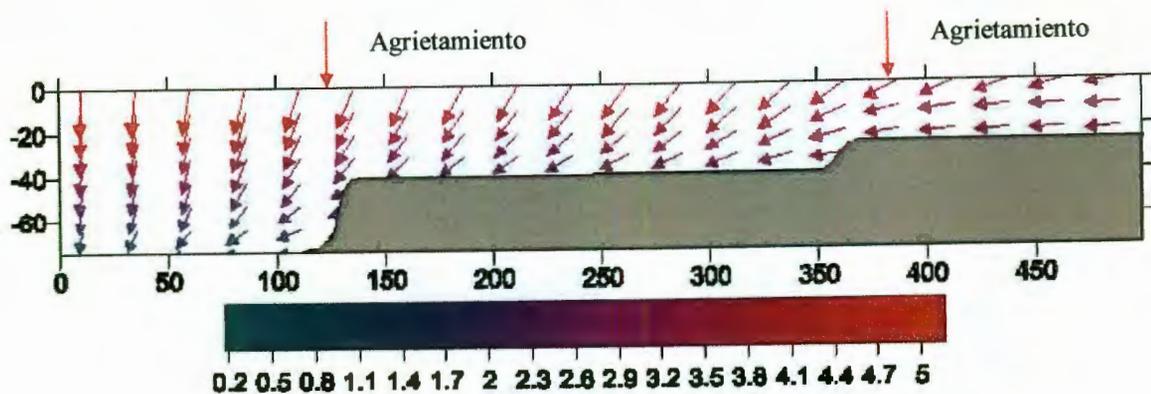


Figura VI.17. Desplazamientos, carretera a Tlacote.

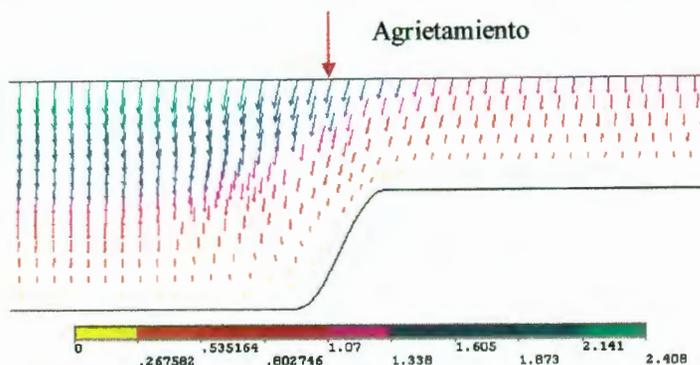


Figura VI.18. Vectores de desplazamientos con métodos de elementos finitos (Eduardo Rojas, com. Personal).

De los vectores de desplazamiento se presentan en el caso de el análisis con elemento finito solo la zona cercana al escalón basamental más profundo. Zona en la que se aprecia un buen parecido con los resultados obtenidos con la teoría de pérdida volumétrica.

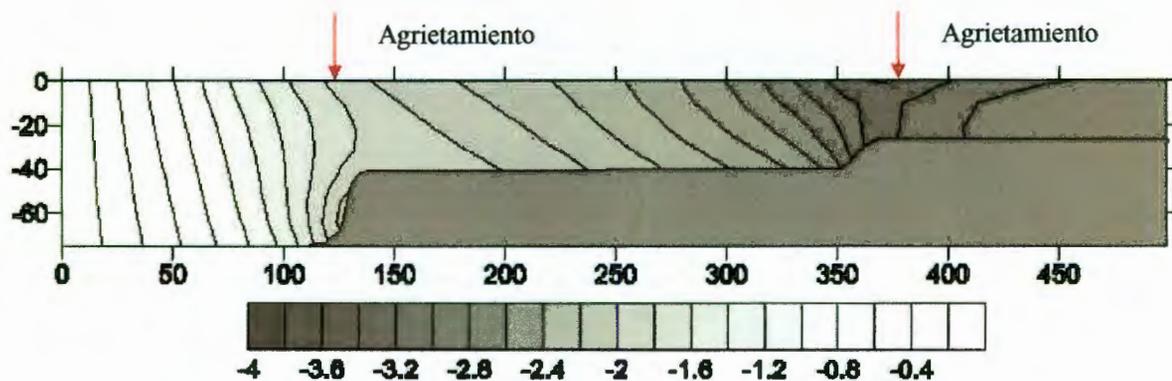


Figura VI.19. Curvas de igual desplazamiento horizontal, carretera a Tlacote.

En esta figura de desplazamientos horizontales se puede apreciar que el agrietamiento derecho coincide con la zona donde el desplazamiento es mayor.

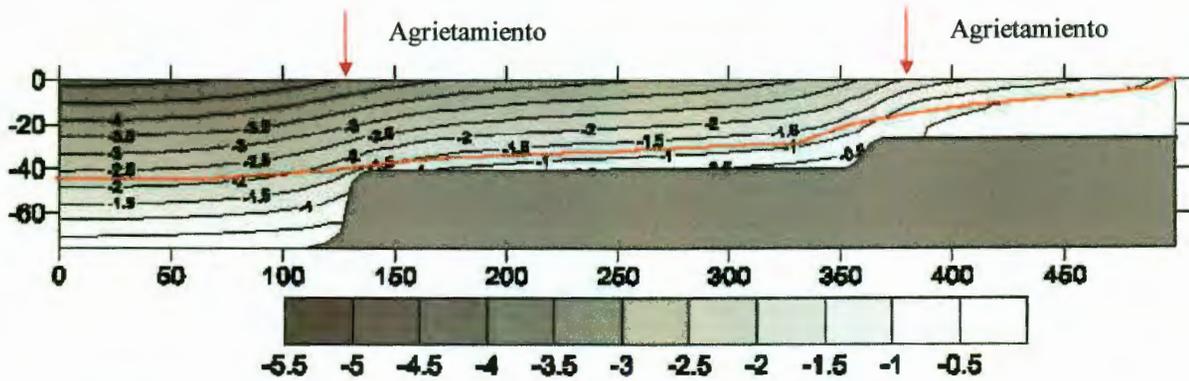


Figura VI.20. Curvas de igual desplazamiento vertical y perfil de nivel superficial, carretera a Tlacote.

En la figura de desplazamientos verticales se puede apreciar de manera rápida una relación de las zonas de donde más cambia el valor de estos desplazamientos con los agrietamientos, pero un análisis un poco más concienzudo, el dibujo del perfil superficial final, nos refleja que esta relación es cercana más no coincidente.

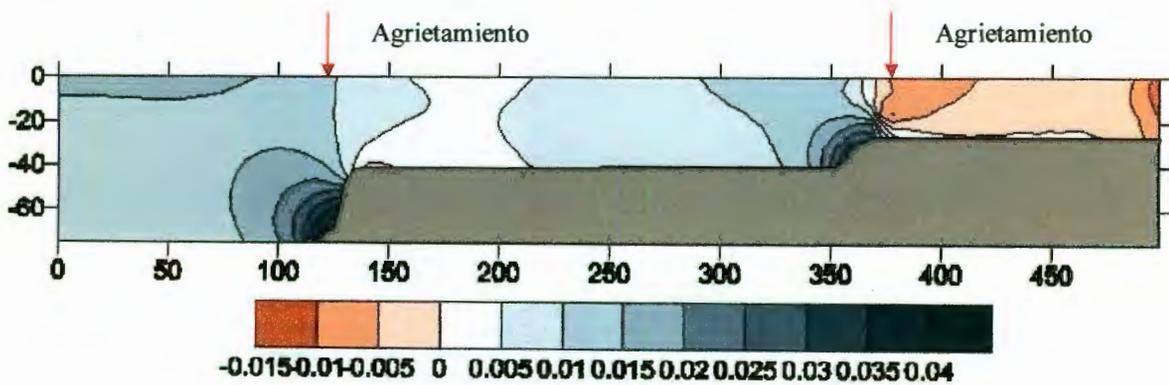


Figura VI.21. Curvas de igual deformación horizontal, carretera a Tlacote.

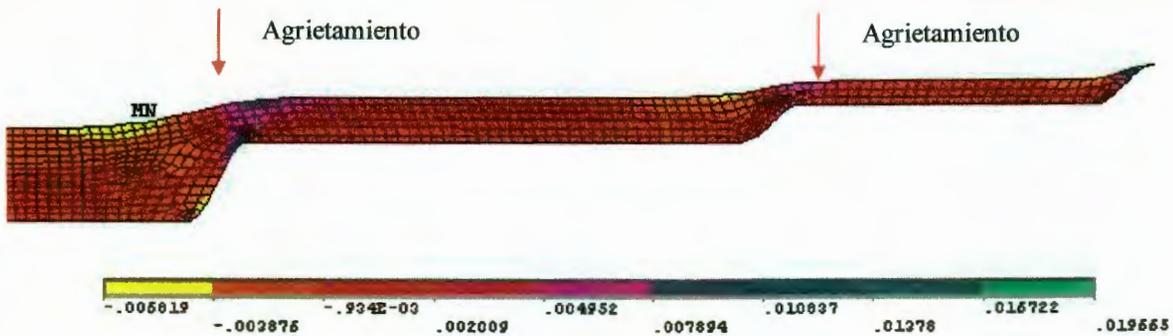


Figura VI.22. Deformaciones horizontales con métodos de elementos finitos (Eduardo Rojas, com. Personal).

En estos perfiles de deformación horizontal se ve claramente la coincidencia del agrietamiento derecho con la zona de tensión, esto en ambos análisis. El agrietamiento izquierdo esta mejor representado con el método de elementos finitos, aunque la coincidencia no es exacta, esta zona de tensión en elementos finitos coincide con una incipiente zona de tensión calculada con la teoría de perdida volumétrica, que de hecho en la frontera con el basamento el suelo si se halla en tensión.

También es digno de mencionar que ambos modelos reflejan una zona de tensión (o en el caso de pérdida volumétrica, cercana a ésta) hacia arriba (derecha) de cada escalón y una zona donde es mayor la compresión abajo (izquierda) del escalón del basamento. La magnitud de los valores presentan una buena relación en casi todo el perfil, salvo al pie de los escalones del basamento donde la compresión es relativamente mayor con pérdida volumétrica.

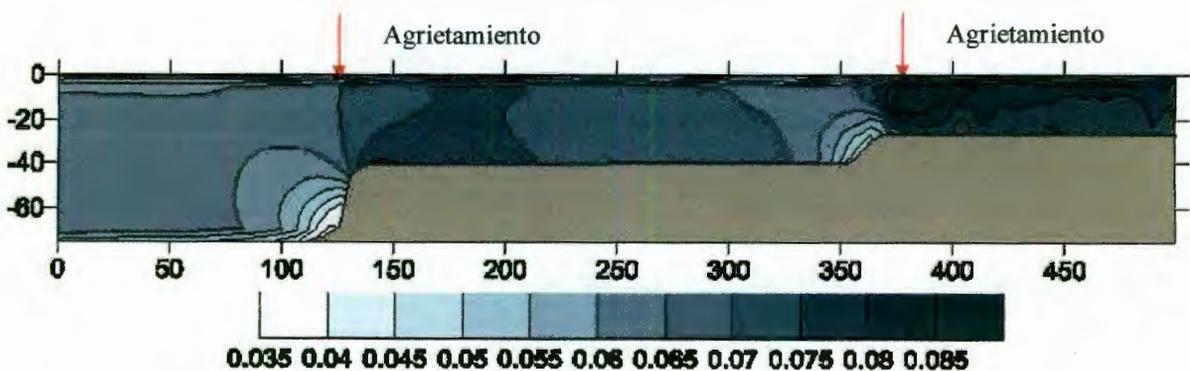


Figura VI.23. Curvas de igual deformación vertical, carretera a Tlacote.

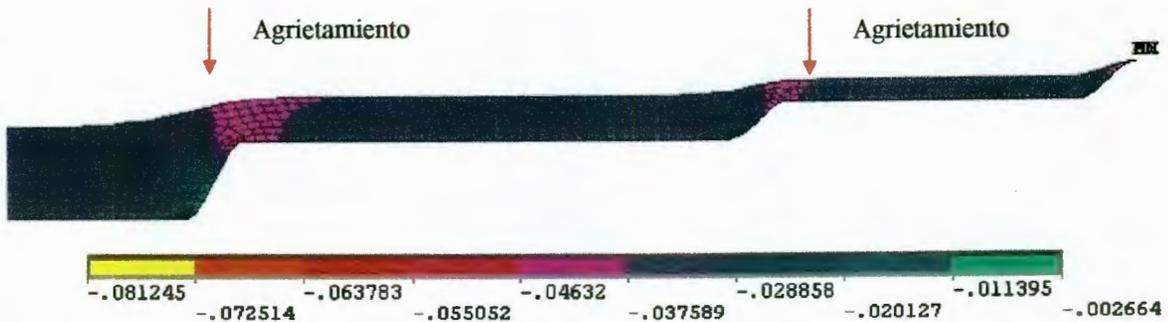


Figura VI.24. Deformaciones verticales con métodos de elementos finitos (Eduardo Rojas, com. Personal).

En los perfiles de deformaciones verticales se observa una coincidencia parecida de éstas con los agrietamientos que la que tienen las deformaciones horizontales, sin olvidar que aquí todas representan compresión y la coincidencia se da en las zonas de máxima deformación, o tal vez las zonas donde el cambio de deformación es mayor.

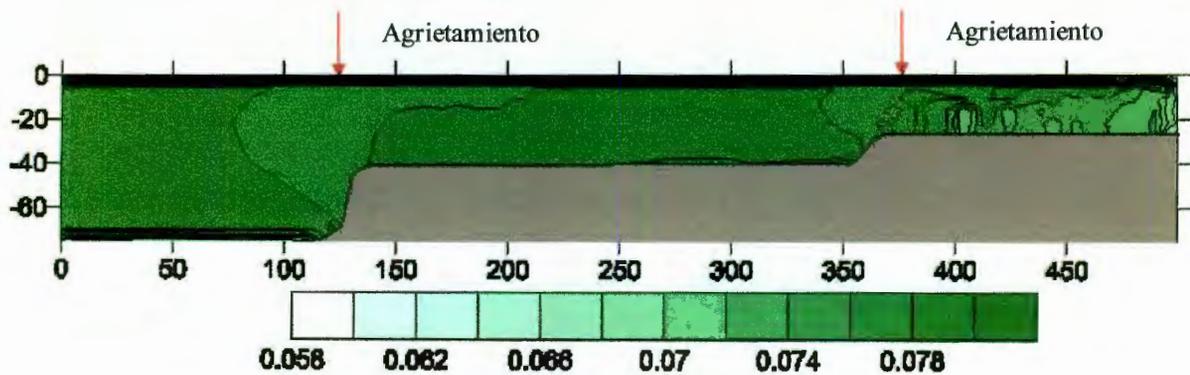


Figura VI.25. Curvas de igual deformación volumétrica, carretera a Tlacote.

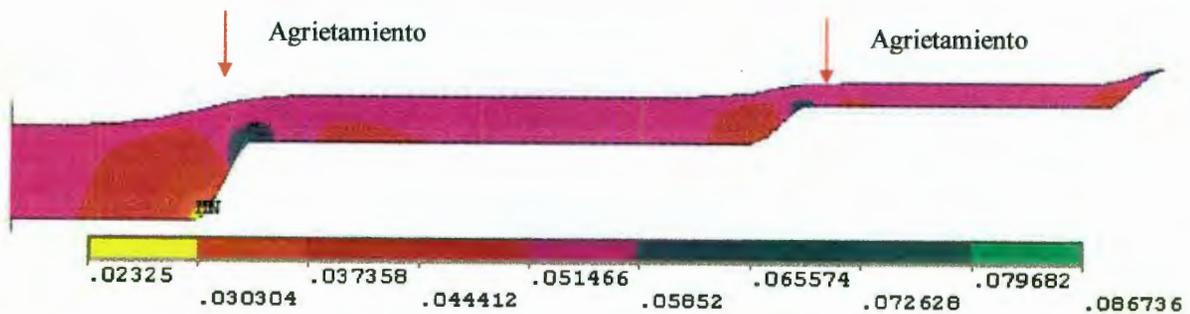


Figura VI.26. Deformaciones volumétricas con métodos de elementos finitos (Eduardo Rojas, com. Personal).

En las deformaciones volumétricas podemos observar que el valor promedio alcanzado con el método de pérdida volumétrica es de aproximadamente 0.08 y con elementos finitos es de aproximadamente 0.05, esto puede explicar por que las magnitudes en los perfiles presentados tienen relaciones parecidas pero a veces los valores son un poco diferentes.

Es notable aquí que los agrietamientos se ubican en zonas donde la deformación volumétrica disminuye más, y que en toda la zona de manera volumétrica se presenta solamente compresión.

VI.2.2. Carretera a Tlacote modelo dos:

Otro modelo geofísico de la carretera a Tlacote es el que se presenta a continuación. Este modelo difiere del anterior ya que se realizó utilizando solamente los datos de gravimetría, y no como el anterior que se utilizaron datos de gravimetría y magnetometría.

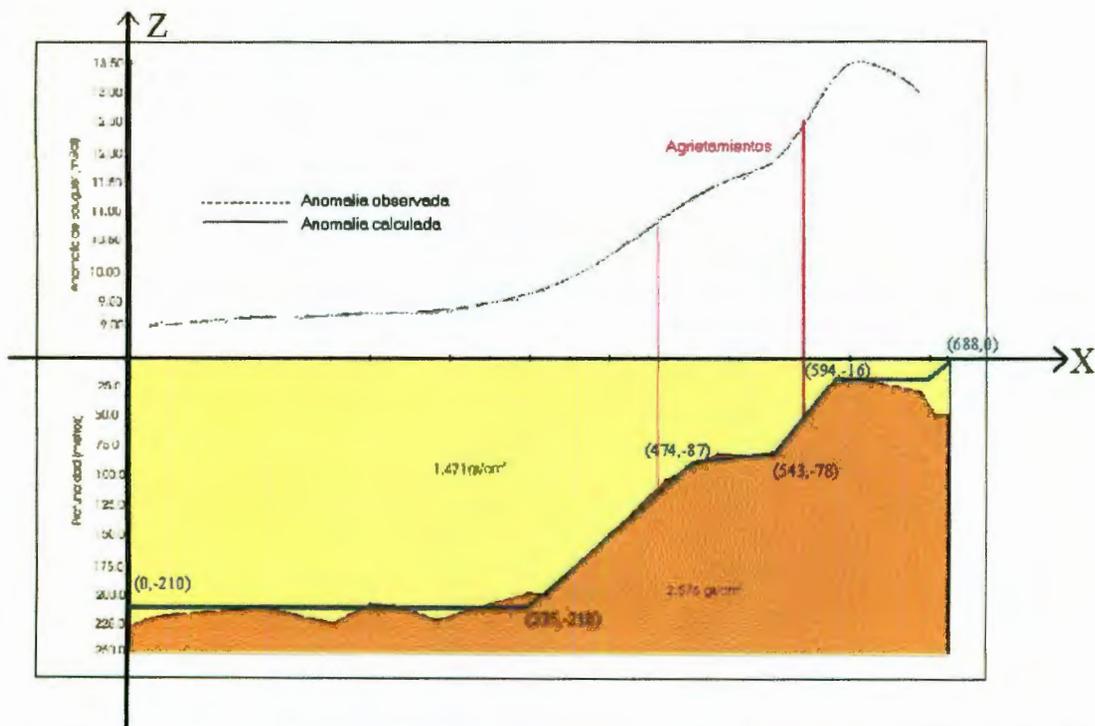


Figura VI.27. Modelo Gravimétrico de la carretera a Tlacote (Jesús Pacheco, Com. Personal)

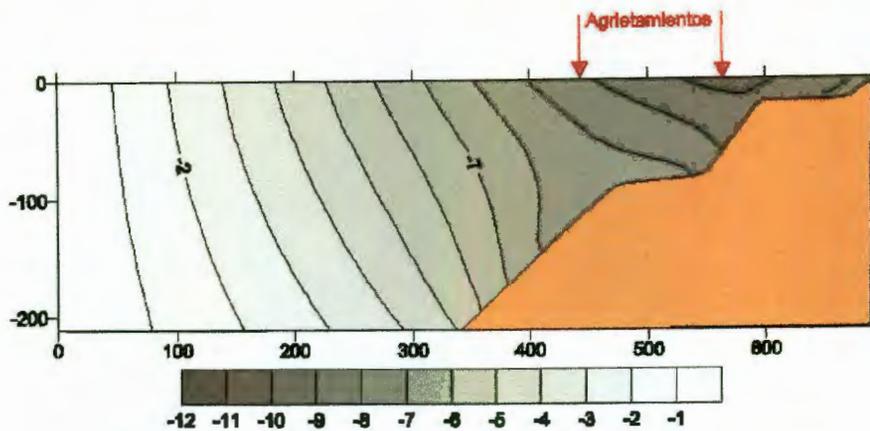


Figura VI.28. Desplazamientos horizontales en carretera a Tlacote.

En este perfil se puede apreciar que los dos agrietamientos coinciden con estar en la cara del talud del basamento, el perfil de la izquierda esta en la zona donde los desplazamientos horizontales son máximos.

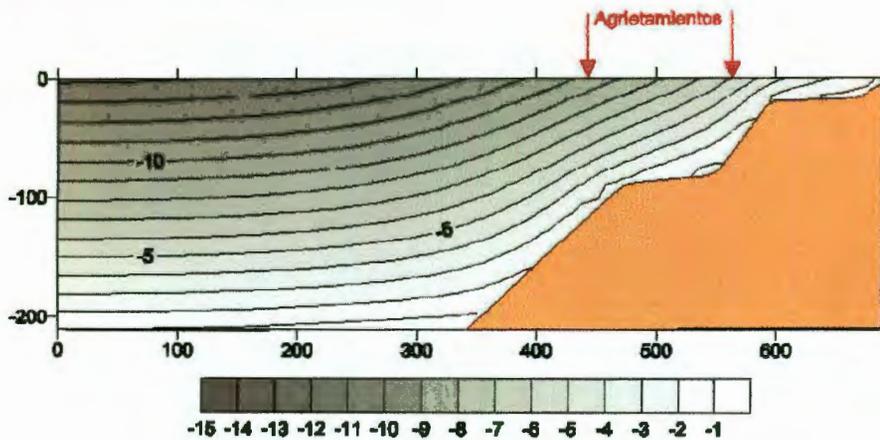


Figura VI.29. Desplazamientos verticales en carretera a Tlacote.

Aquí se puede observar como los agrietamientos se ubican en donde las curvas de igual desplazamiento vertical se juntan en la superficie.

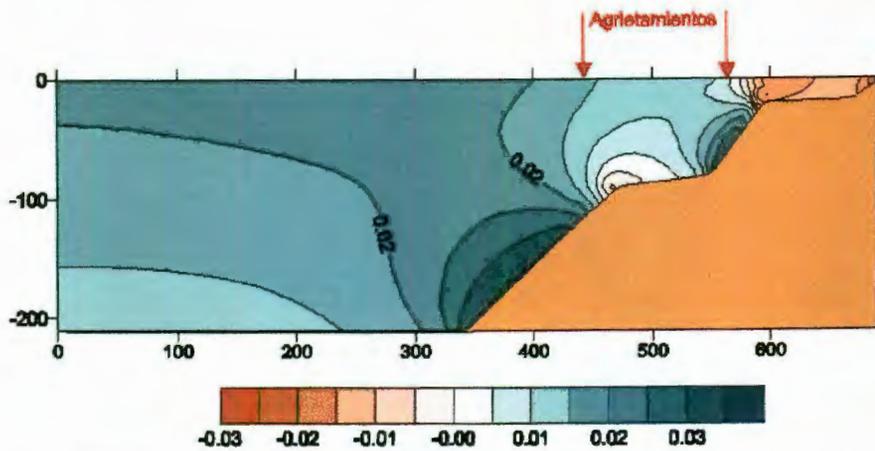


Figura VI.30. Deformaciones horizontales en carretera a Tlacote.

En esta figura se aprecia como el agrietamiento de la izquierda esta muy cerca de la zona de tensión, y el agrietamiento de la derecha esta arriba de una zona que a nivel basamental también tiene tensiones.

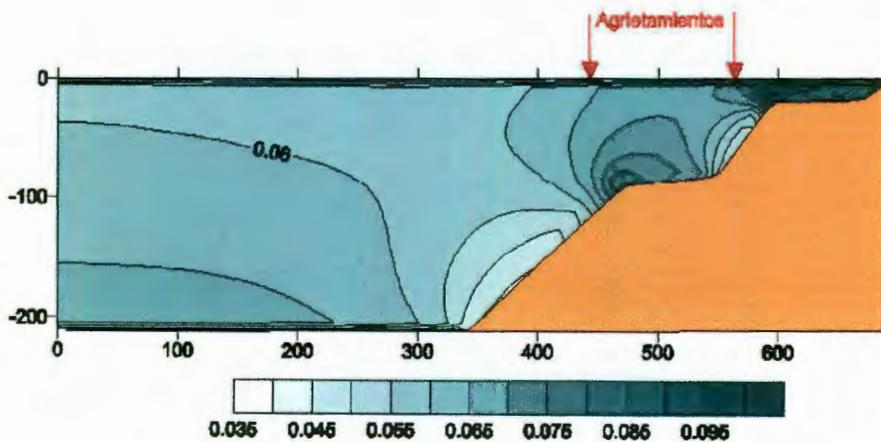


Figura VI.31. Deformaciones verticales en carretera a Tlacote.

Se puede observar aquí, las coincidencias de los agrietamientos donde los cambios de deformación vertical son mayores.

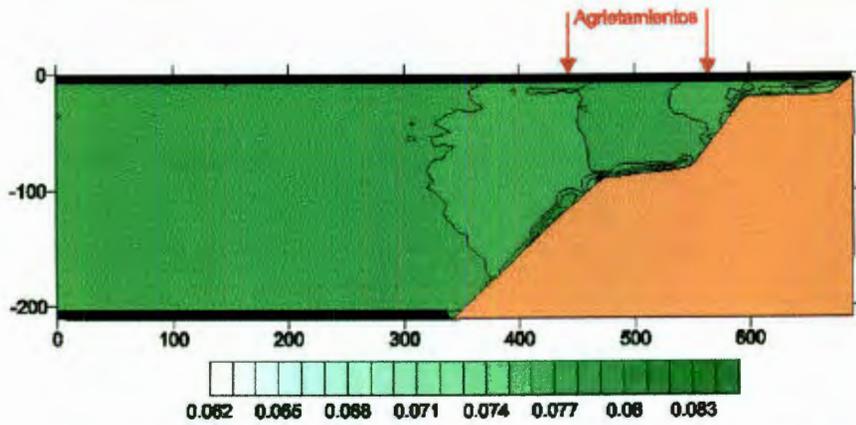


Figura VI.32. Deformaciones volumétricas en carretera a Tlacote.

Se puede observar que los agrietamientos coinciden con las zonas donde el cambio volumétrico disminuye un poco.

VI.2.3. Predio Ensueño perfil No 1

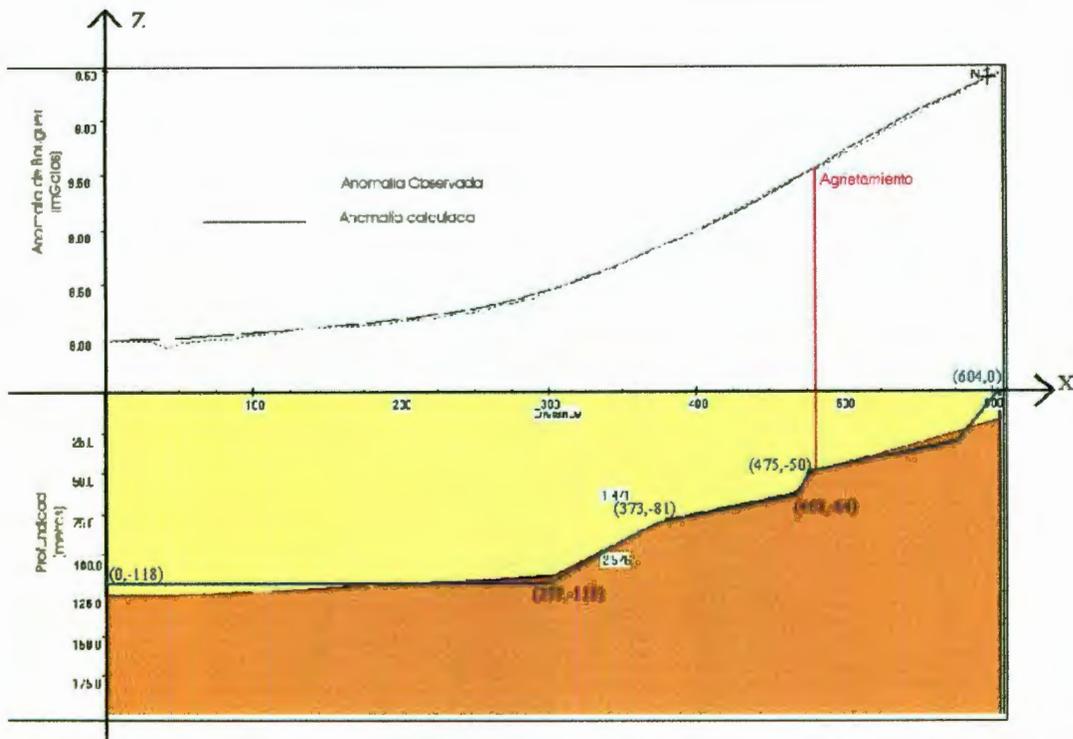


Figura VI.33. Modelo gravimétrico en el predio ensueño, perfil 1 (Jesús Pacheco, com. Personal).

A partir de este perfil se obtuvieron los siguientes resultados:

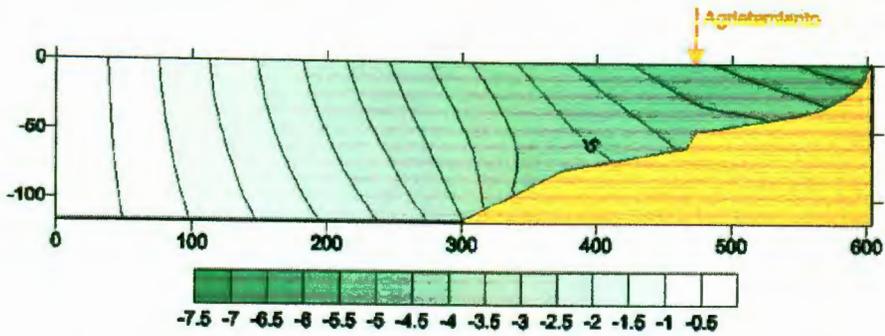


Figura VI.34. Desplazamientos horizontales perfil Ensueño 1.

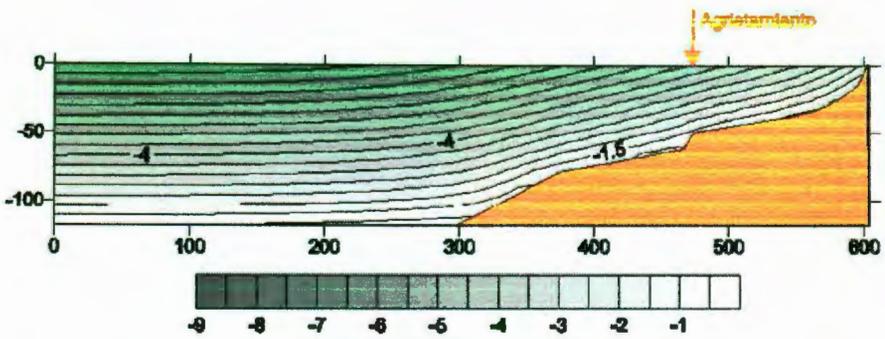


Figura VI.35. Desplazamientos verticales perfil Ensueño 1.

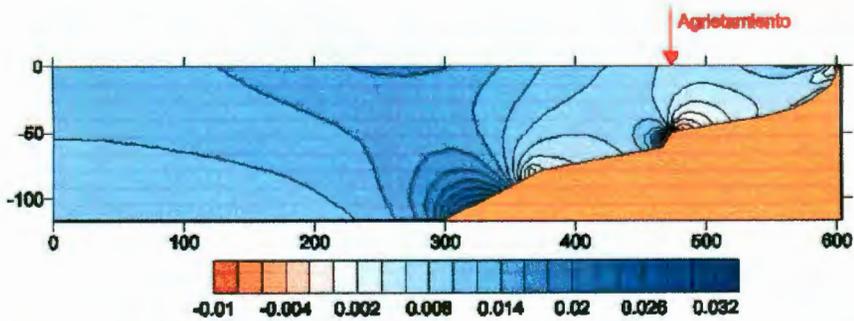


Figura VI.36. Deformaciones horizontales perfil ensueño 1.

Aquí se puede observar que el agrietamiento coincide en una zona donde a nivel basamental existen tensiones, no así en la superficie.

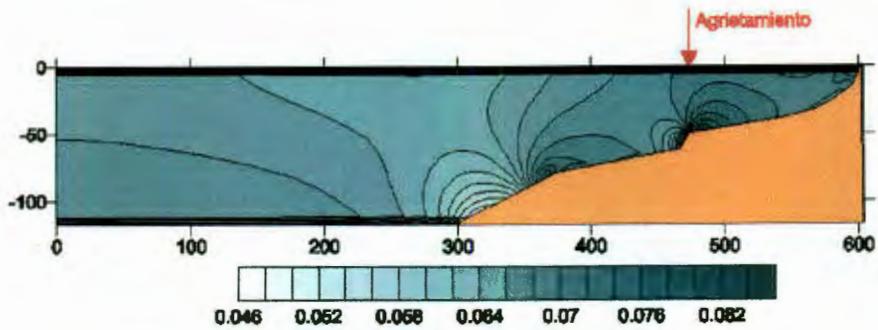


Figura VI.37. Deformaciones verticales perfil Ensueño 1.

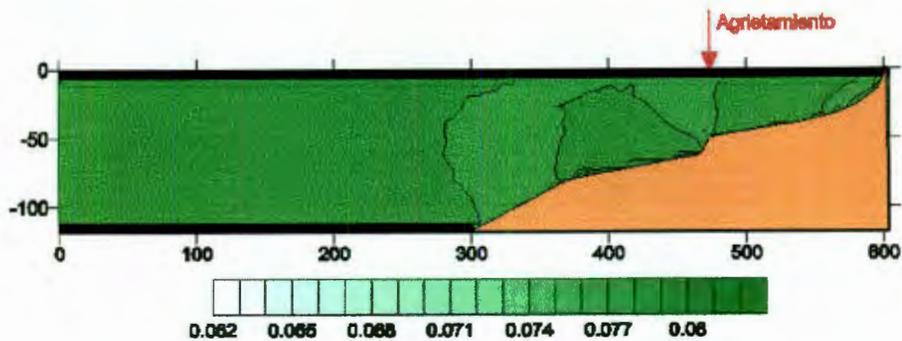


Figura VI.38. Deformaciones volumétricas perfil Ensueño 1.

Aquí también se puede observar que el agrietamiento coincide en el lugar donde el cambio volumétrico disminuye un poco.

Observando los resultados obtenidos en este perfil uno pudiera suponer que cerca del sitio correspondiente a los 350 metros horizontales, existe un agrietamiento incipiente, ya que se cumplen casi todas las características observadas con agrietamientos ya desarrollados cambio en la magnitud de hundimiento, zona de tensión horizontal (aunque sea pequeña y a nivel del basamento), cambios en la deformación vertical y disminución en las deformaciones volumétricas. Tal vez la única característica observada en otros lugares y aquí no es la de desplazamientos horizontales máximos.

VI.2.4. Prolongación Zaragoza:

En el mismo predio se realizó otro perfil, el cual se muestra a continuación.

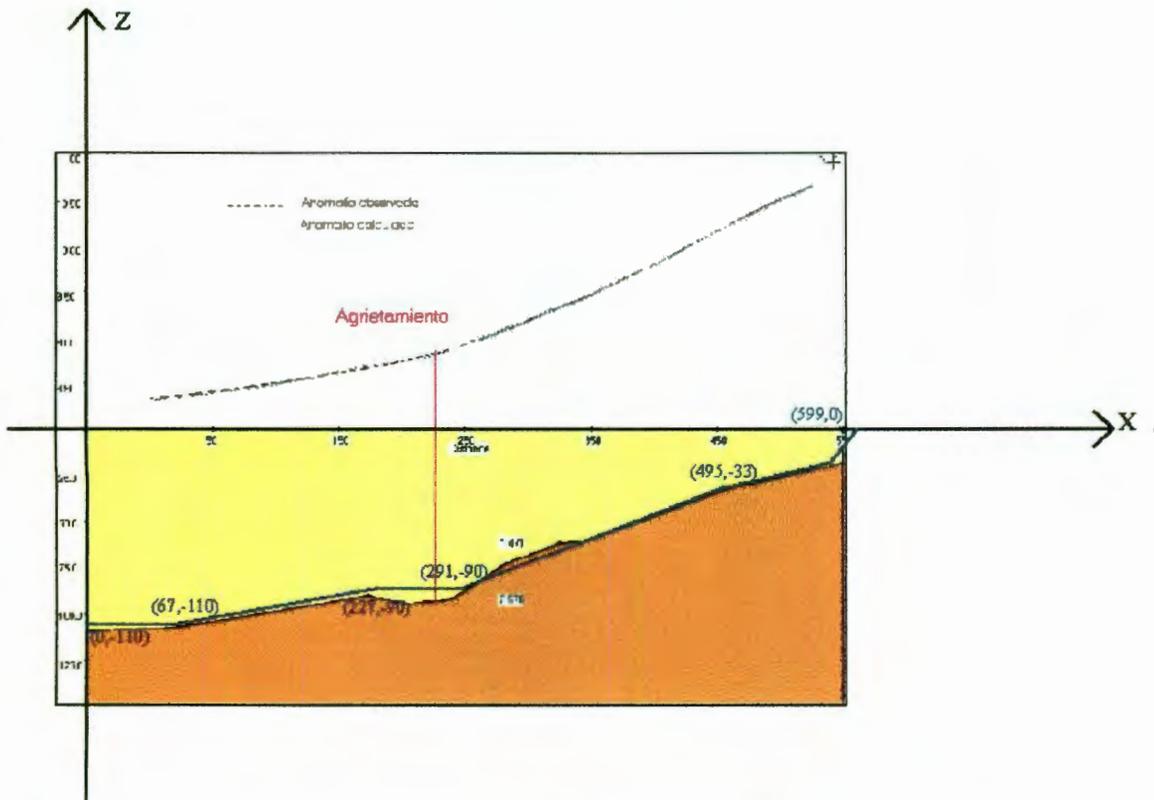


Figura VI.39. Modelo gravimétrico en el predio ensueño (prolongación Zaragoza), perfil 2 (Jesús Pacheco, com. Personal).

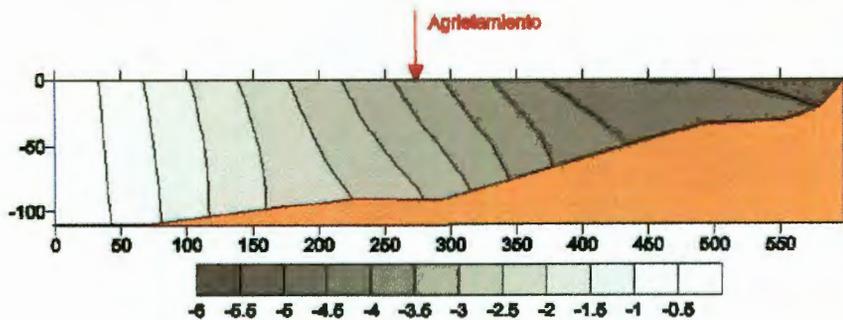


Figura VI.40. Desplazamientos horizontales perfil Ensueño 2.

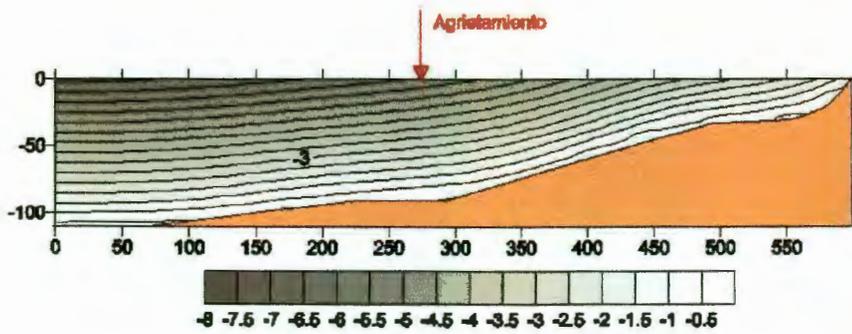


Figura VI.41. Desplazamientos verticales perfil Ensueño 2.

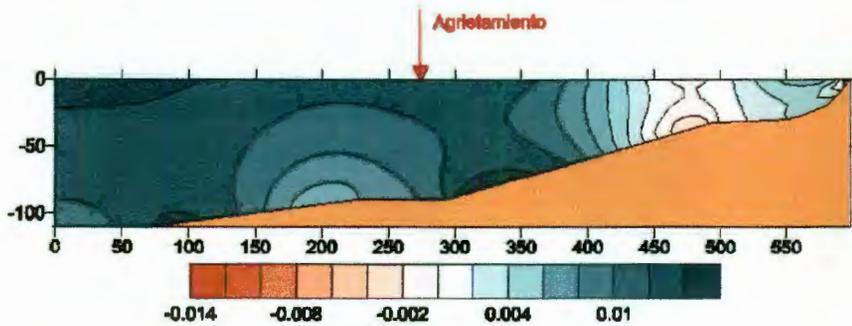


Figura VI.42. Deformaciones horizontales perfil ensueño 2.

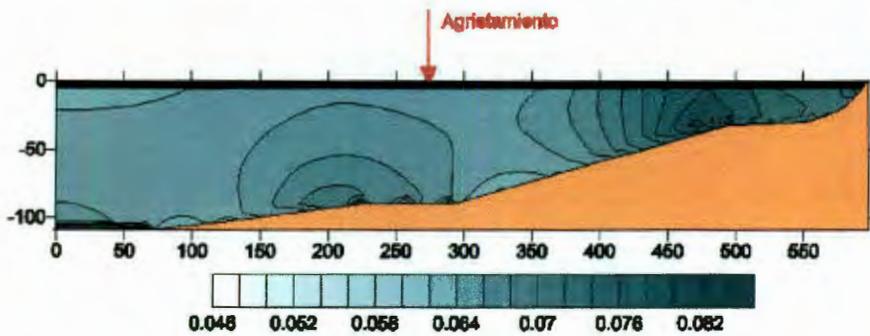


Figura VI.43. Deformaciones verticales perfil Ensueño 2.

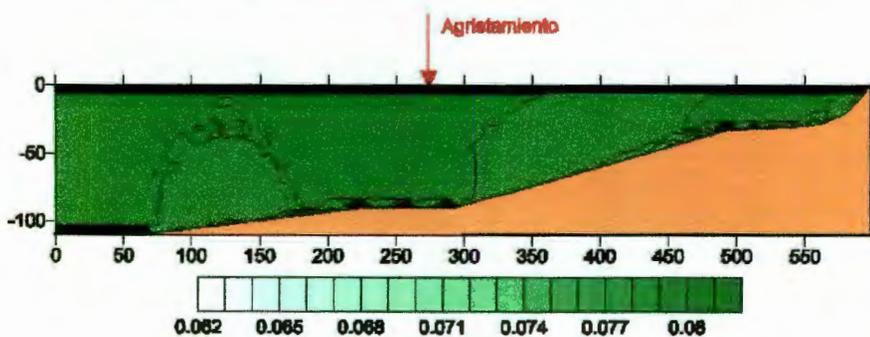


Figura VI.44. Deformaciones volumétricas perfil Ensueño 2.

En este caso no existe ninguna evidencia clara de que el modelo refleje la aparición del agrietamiento. Lo cual tal vez se puede explicar debido al gran número de variables y

procesos necesarios para llegar hasta aquí, desde el levantamiento en campo de los datos usados, hasta las suposiciones de las características del suelo. Por ello cabe la posibilidad de errores o muy probablemente de situaciones que no se estén tomando en cuenta, como características geológicas de la zona, heterogeneidad del suelo, etc.

VI.2.5. Calle Epigmenio González:

Otro caso analizado fue el de la calle Epigmenio González, en la realización del perfil gravimétrico se utilizó una calibración con pozo que se muestra en la siguiente figura.

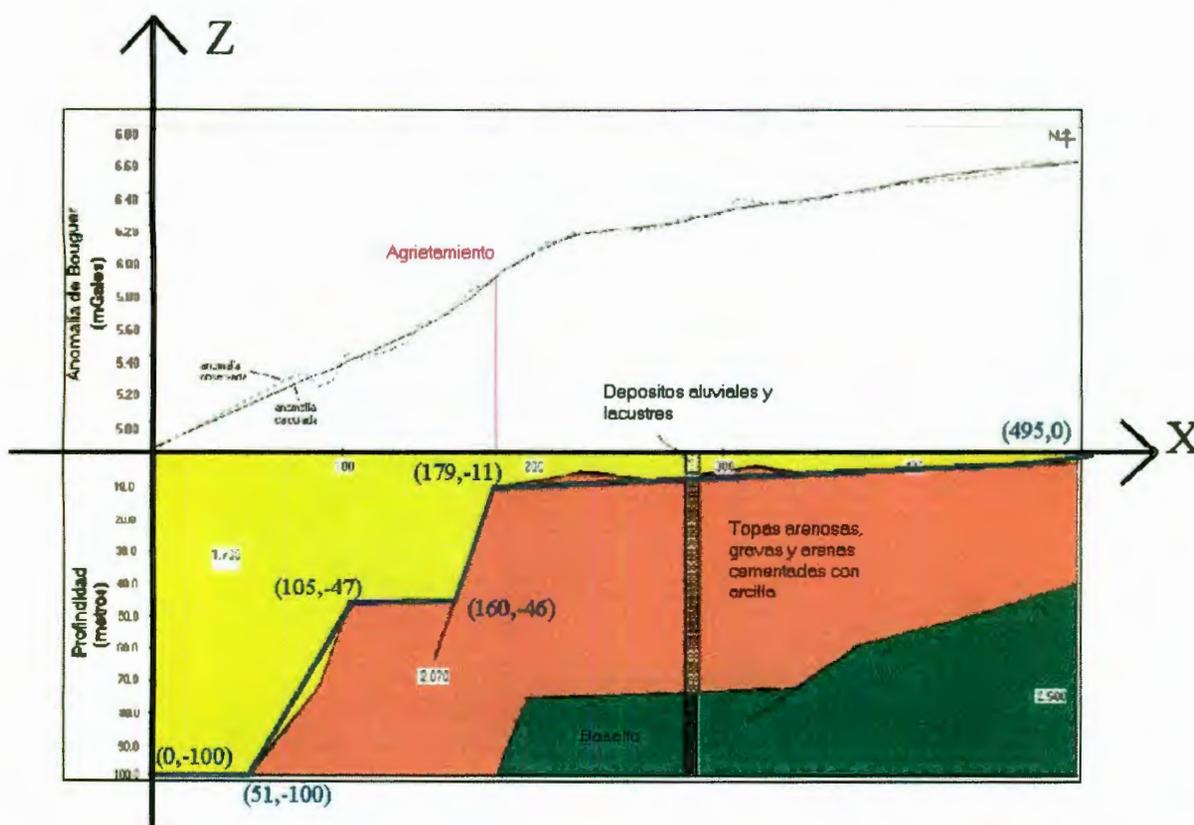


Figura VI.45. Modelo gravimétrico de la calle Epigmenio González (Jesús Pacheco, Com. Personal).

Los resultados se muestran a continuación:

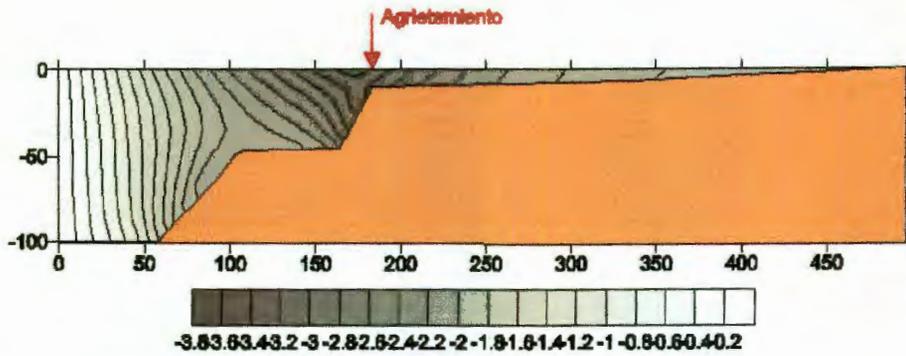


Figura VI.46. Desplazamientos horizontales Epigmenio González.

En la figura de desplazamientos horizontales se puede apreciar que el agrietamiento coincide con la zona de máximo desplazamiento.

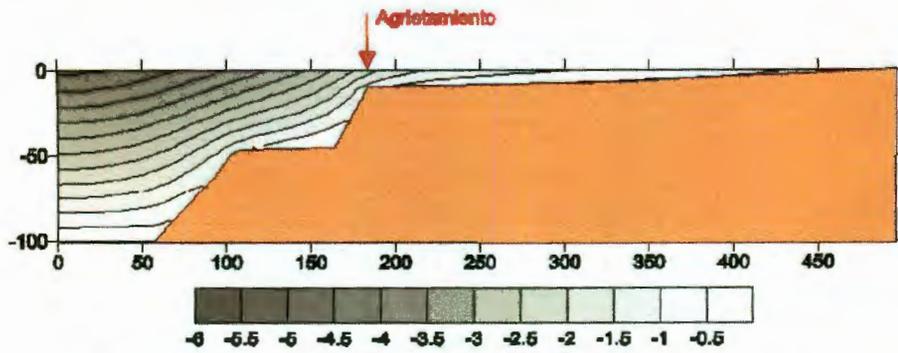


Figura VI.47 . Desplazamientos verticales Epigmenio González.

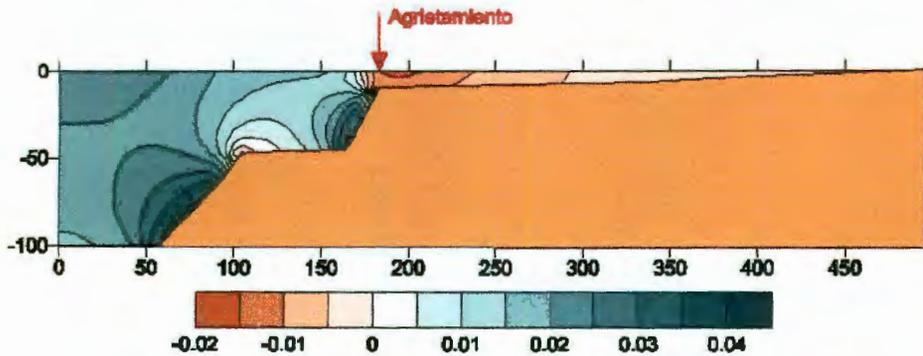


Figura VI.48 . Deformaciones horizontales Epigmenio González.

En lo correspondiente a las deformaciones horizontales se puede observar que el agrietamiento coincide con la zona de tensión.

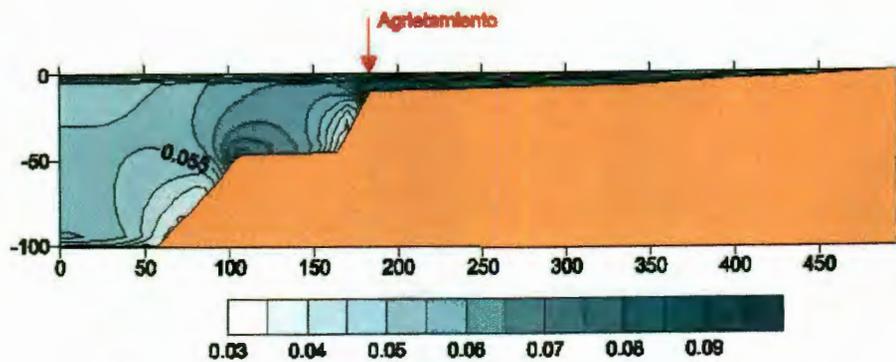


Figura VI.49 . Deformaciones verticales Epigmenio González.

En las deformaciones verticales del perfil de Epigmenio González también coincide el agrietamiento en la zona donde los cambios en las deformaciones son mayores.

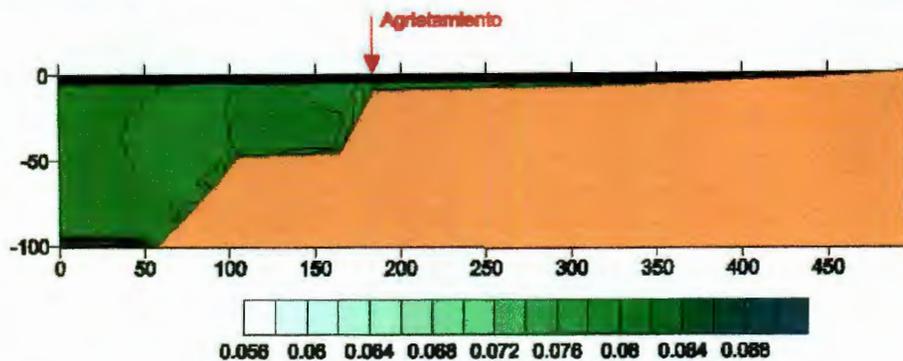


Figura VI.50 . Deformaciones volumétricas Epigmenio González.

Relativo a las deformaciones volumétricas se puede observar que el agrietamiento coincide en una zona donde la deformación disminuye un poco.

En este perfil como en el perfil de Ensueño No 1 yo considero que una posible zona de riesgo para un futuro agrietamiento esta entre los 50 y 125 metros, ya que esta zona reúne varios requisitos observados en otros perfiles como de riesgo, específicamente la zona de tensión horizontal, la poca distancia entre líneas de diferente compresión vertical y también la disminución de las compresiones volumétricas.

Hasta aquí se ha comentado brevemente los resultados obtenidos con el análisis de la subsidencia utilizando la teoría de pérdida volumétrica. En las conclusiones se intenta ahondar un poco más.

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VII.1. Conclusiones

Se observó que el código desarrollado presenta un gran potencial en el análisis de los casos reales de subsidencia y agrietamiento de suelo. Sin embargo, esta capacidad está estrechamente relacionada con los datos que se tienen como la forma del basamento, la compresibilidad de los estratos, los niveles piezométricos, los hundimientos y agrietamientos observados; con estos datos se alimenta y calibra el programa. Para casos teóricos en los que los datos son configurados con el propósito de observar determinado comportamiento se han obtenido muy buenos resultados.

Asimismo este código ha demostrado su capacidad para estudiar otro tipo de fenómenos que también están relacionados con una pérdida de volumen en el suelo, como ejemplo podemos mencionar el caso de excavación profunda presentado.

El programa diseñado puede usarse en un sinnúmero de casos y situaciones, ya sea variando los datos de entrada o el programa en sí.

Han hecho falta datos para una mejor calibración en los casos manejados, principalmente la magnitud del hundimiento así como los niveles freáticos a través del tiempo para poder relacionarlos entre sí. Sin embargo teóricamente el modelo se comporta de manera correcta, y la interpretación de los datos arrojados por éste se puede realizar de manera sencilla haciendo figuras con los resultados y observándolas, de esta manera es notable la coincidencia que de algunos agrietamientos observados con las zonas de tensión obtenidas con el modelo de pérdida volumétrica, así como también se nota cierta coincidencia observando otras medidas como lo son el hundimiento diferencial, el cambio en de la deformación vertical y la disminución en las compresibilidades volumétricas.

Los análisis se ha realizado solamente para el caso de un abatimiento total, que es el que nos indica las zonas potenciales para la aparición de agrietamientos ya sea en el

presente o en el futuro. Esto debido a la falta de información a través del tiempo (serían de utilidad varias décadas) de los hundimientos, la aparición y desarrollo de agrietamientos y de las variaciones del nivel de aguas freáticas. Aún así modelando de esta manera, se logra analizar las zonas donde potencialmente puedan aparecer agrietamientos que a la fecha no existen siendo esta una primer acercamiento a la predicción de futuros agrietamientos. Algunos ejemplos pueden ser los casos de los perfiles de Ensueño No. 1 y el de la calle Epigmenio González. Sin embargo el análisis con una sola metodología no es suficientemente consistente para poder afirmar o descartar de manera categórica ciertas localizaciones de riesgo de aparición de agrietamientos, es útil el comparar los resultados obtenidos con la teoría de la pérdida volumétrica con otros métodos de análisis como es el de elementos finitos y como se ha visto que las zonas de riesgo localizadas con la teoría de pérdida volumétrica pueden ser de centenas de metros y no siempre coinciden los agrietamientos observados con la localización puntual de mayor riesgo (por ejemplo en casi todos los casos donde coinciden los agrietamientos y las zonas de tensión horizontal, los primeros están en la orilla izquierda de las dichas zonas y no en el lugar de máxima tensión). Entonces para una localización más puntual de los agrietamientos se pueden usar otras metodologías como los métodos geofísicos. El método geofísico de gravimetría ha mostrado ser una herramienta útil para la localización precisa del trazo de los agrietamientos, por lo que se puede usar un instrumento como éste en las zonas potenciales de riesgo localizadas a partir de un análisis realizado con la teoría de pérdida volumétrica; además de la comprobación de resultados puede ser posible una localización más exacta de la zona de riesgo. Otros métodos que se pueden utilizar en el trazo de agrietamientos son los de radar de penetración terrestre y refracción sísmica, estos en el caso de que se quiera conocer el estado y localización de la continuidad de agrietamientos conocidos que en sus límites se desvanezcan o en el caso de agrietamientos incipientes.

Tampoco hay que olvidar que otros fenómenos diferentes pueden estar relacionados un ejemplo de esto es el rol que puede jugar la actividad tectónica, si las fallas geológicas presentes son activas entonces esta actividad también es una fuente de esfuerzos que van a influir en el suelo. Otro ejemplo es simplemente la heterogeneidad de los materiales

geológicos que como una masa compleja pueden presentar zonas de debilidad donde sean más propicios los agrietamientos.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores se puede afirmar que esta herramienta de análisis, la teoría de pérdida volumétrica, puede ser de gran utilidad al estudiar el fenómeno de subsidencia.

VII.2. Recomendaciones

- El código computacional puede ampliarse para que por si mismo realice las graficas de presentación de resultados ya que a la fecha la salida de éste son archivos de texto que incluyen las coordenadas y los desplazamientos o deformaciones de cada punto y puede llegar a ser muy grande y difícil de analizar sin hacer las graficas correspondientes.
- Se puede también buscar la manera de que los desplazamientos en la frontera rígida se minimicen aún mas.
- Una mejora importante seria optimizar ya sean las operaciones o los recursos de la computadora; para que, en los casos de hacer el análisis de un abatimiento parcial o cuando se tenga una configuración de estratos con diferentes compresibilidades, el análisis sea más económico en lo que al tiempo se refiere.
- En el caso de la subsidencia, sería de gran utilidad contar con un ejemplo del cuál se tengan suficientes datos como para calibrar el modelo y hacer una comparación del comportamiento de los agrietamientos y hundimientos a la fecha y una predicción más fiable a futuro, y junto con esto realizar un análisis con modelo diferente, como elementos finitos, con la finalidad de que esta predicción sea lo más acertada posible.
- El la teoría de pérdida volumétrica se puede usar para realizar análisis de otros fenómenos diferentes de la subsidencia, además de lo presentado aquí (Subsidencia, Excavación profunda). Otro caso en el que podría aplicarse es el de suelos no saturados, donde una mayor succión dentro del suelo puede provocar una reducción

en su volumen y una “relajación” de ésta junto con el aumento del contenido de agua puede provocar una expansión, cosas que se podrían analizar usando la teoría de la pérdida volumétrica.

VIII. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

Referencias:

- BARTLETT S. R. Y SANDOVAL J. P. 1991. "Land subsidence and earth fissuring in the Central Arizona Project, Arizona", Fourth Int. Symp. Land Subsidence. IAHS pub. No 200: 249-260
- BULL, W. B., and POLAND, J. F. 1975. "Land subsidence due to ground-water withdrawal in the Los Banos-Kettleman City area, California, Part 3. Interrelations of water-level change, change in aquifer-system thickness, and subsidence." U. S. Geological Survey Professional Paper 437-G, 62 p.
- C. – Y. Ou, J. – T. Liao y W. – L. Cheng (2000) "Building response and ground movements induced by a deep excavation".
- CASTLE, R. Ö., YERKES, R. F., y RILEY, F. S. 1969. "A linear relationship between liquid production and oil-field subsidence, in Tison", L. J. (ed.), Land subsidence, Vol. 1. Internat. Assoc. Sci. Hydrology Pub. 88, p. 162-173.
- DASSARGUES, A., LI, X. L. 1991. "Computing the Land Subsidence of Shanghai by Finite Element Method". Land Subsidence, Proceedings of the Fourth Int. Symp. Land Subs. IAHS Publ. 200, 613-624
- GABRYSCH, R. K. 1969. "Land surface subsidence in the Houston-Galveston region, Texas, in Tison", L. J., ed., Land subsidence, Vol. 1. Internat. Assoc. Sci. Hydrology, Pub. 88, p. 43-54.
- GALLOWAY, D., JONES, D. R., INGEBRITSEN, S.E., 1999. "Land Subsidence in the United Estates" Circular 1182, U.S. Department of Interior, U.S. Geological Survey. ISBN 0-607-92696-1.
- GU, X. Y., TSIEN, S. I., HUANG, H. C., LIU, Y. 1991. "Analysis if Shanghai Land Subsidence". Land Subsidence, Proceedings of the Fourth Int. Symp. Land Subs. IAHS Publ. 200, 603-612
- H., SUN, D., GRANDSTAFF, R., SHANGAM, 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
- HWANG, JUI-MING, y WU, CHIAU-MIN. 1969, "Land subsidence problems in Taipei Basin, in Tison", L. J., ed., Land Subsidence, Vol. 1. Internat. Assoc. Sci. Hydrology, Pub. 88, p. 21-734.
- RIVERA, A., LEDOUX, E. MARSILY, de G. 1991. "Nonlinear Modeling of Groundwater Flow and Total Subsidence of the Mexico City Aquifer-Aquitard System". Land Subsidence, Proceedings of the Fourth Int. Symp. Land Subs. IAHS Publ. 200, 45-58
- ROJAS, E., ARZATE, J., ARROYO, M., 2002. "A method to predict the group fissuring and faulting caused by regional groundwater decline", Engineering Geology 65. Elsevier. 245 – 260
- SAGASETA C. 1987. "Analysis of undrained soil deformation due to ground loss". Géotechnique 37, 301-320.
- SHEARER, T. R. 1998. "A numerical model to calculate land subsidence, applied at Hangu in China". Engineering Geology 49. Elsevier. 85 – 93

- TERZAGHI, KARL. 1923. "Die Berechnung der Durchlässigkeitsziffer des Tones aus dem Verlauf der hydrodynamischen Spannungserscheinungen". Sitzber, Akad. Wiss. Wien, Abt. IIa, v. 132.
- THEIS, C. V. 1935. "The relation between the lowering of piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage". Trans. American Geophysics. Union, v. 16, p. 519-524.
- WADACHI, K. 1940. "Ground sinking in west Osaka" (second rept.) Rept. Disaster Prevention Research Institute, No. 3.

Bibliografía:

- "Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal". Prepared for the International Hydrological Programmed Working Group 8.4 Joseph F. Poland, Chairman and Editor, UNESCO – 1984, ISBN 92-3-102213-X.
- Fundamentos de Mecánica de Suelos. Roy Whitlow (trad. Zamora, F., González, V.) comp. Editorial Continental 2000, ISBN 968-26-1239-X.
- "Land Subsidence in the United States" GALLOWAY, D., JONES, D. R., INGEBRITSEN, S.E., 1999. Circular 1182, U.S. Department of Interior, U.S. Geological Survey. ISBN 0-607-92696-1.

IX. ANEXO (CÓDIGO COMPUTACIONAL)

Archivo_de_entrada_de_EsGeo
Tipo_de_analisis_abatimiento_(T)otal_(P)arcial
T
Abatimiento
20
Profundidades_4
10
20
22
32
Anchos_5
20
25
35
40
50
Profundidades_estratos_2
5
20
CV_estratos_3
0.05
0.1
0.05
Gamma
1.25
Numero_de_imagenes
5

```
PROGRAM EsGeo
PARAMETER (pi=3.14159)
PARAMETER (j=1000)
INTEGER H, A, FREATICO, DIS1, DIS2, DIS3, DIS4, DIS5
INTEGER ESTRA1, ESTRA2, NoIMAG
REAL PROF1, PROF2, PROF3, PROF4
CHARACTER (LEN=1) TIPOA
REAL CV1, CV2, CV3, GAMA, CV
OPEN(1, file='entrada.txt', status='unknown')
OPEN(2, file='salida.txt', status='unknown')
OPEN(3, FILE='CAMB_VOL.TXT', STATUS='UNKNOWN')
C FREATICO = ABATIMIENTO DEL NIVEL FREATICO
C CV=CONSOLIDACION
C X=COORDENADA X DE DONDE SE CALCULA LA DEFORMACION
C Z=COORDENADA Y DE DONDE SE CALCULA LA DEFORMACION
C XLOCAL=DISTANCIA X ENTRE EL LUGAR DONDE SE CALCULA LA DEFORMACION Y
C XP
C R=DISTANCIA DESDE LA SUPERFICIE EN EL LUGAR DE LA PILA A (X0,Y0)
C R's otras distancias
C TETHA=SUMA DE FACTORES CON ATAN
C XP=POSICION X DE LA PILA
C SM=MATRIZ PARA PASAR RESULTADOS A ARCHIVOS EN FORMA MATRICIAL
C SMX, SMY=MATRICES PARA CALCULAR LOS CAMBIOS VOLUMETRICOS
C EX, EY, E=DEFORMACIONES VOLUMETRICAS
C LLAMA A SURUTINA DE ENTRADA DE DATOS
CALL ENTRADA (TIPOA, FREATICO, DIS1, DIS2, DIS3, DIS4, DIS5,
1PROF1, PROF2, PROF3, PROF4, ESTRA1, ESTRA2, CV1, CV2, CV3, GAMA, NoIMAG)
C BASAMENTO SINUSOIDAL
IF (TIPOA.EQ.'T') THEN
CALL DOBLESINUSOIDAL2 (DIS1, DIS2, DIS3, DIS4, DIS5,
1PROF1, PROF2, PROF3, PROF4, ESTRA1, ESTRA2, CV1, CV2, CV3, NoIMAG)
ELSE
CV=CV1
CALL SINUPARCIAL (PROF1, PROF2, PROF3, PROF4, DIS1, DIS2, DIS3, DIS4,
1DIS5, FREATICO, GAMA, NoIMAG, CV)
END IF
C CALCULA LAS DEFORMACIONES VOLUMETRICAS
```

```

CALL DEFVOL (PROF4,DIS5)
CLOSE(1,STATUS='KEEP')
CLOSE(2,STATUS='KEEP')
CLOSE(3,STATUS='KEEP')
END

```

1

```

SUBROUTINE ENTRADA (TIPOA,FREATICO,DIS1,DIS2,DIS3,DIS4,DIS5,
1PROF1,PROF2,PROF3,PROF4,ESTRA1,ESTRA2,CV1,CV2,CV3,GAMA,NoIMAG)
!
! A=DIS5
! H=PROF3
! B=H
C LEE ARCHIVO ENTRADA.TXT
INTEGER FREATICO, DIS1, DIS2, DIS3, DIS4, DIS5
INTEGER ESTRA1,ESTRA2,NoIMAG
REAL PROF1, PROF2, PROF3,PROF4
REAL CV1, CV2, CV3, GAMA
CHARACTER (LEN=1) TIPOA
READ(1,*)
READ(1,*)
READ(1,*)TIPOA
READ(1,*)
READ(1,*)FREATICO
READ(1,*)
READ(1,*)PROF1
READ(1,*)PROF2
READ(1,*)PROF3
READ(1,*)PROF4
READ(1,*)
READ(1,*)DIS1
READ(1,*)DIS2
READ(1,*)DIS3
READ(1,*)DIS4
READ(1,*)DIS5
READ(1,*)
READ(1,*)ESTRA1
READ(1,*)ESTRA2
READ(1,*)
READ(1,*)CV1
READ(1,*)CV2
READ(1,*)CV3
READ(1,*)
READ(1,*)GAMA
READ(1,*)
READ(1,*)NoIMAG
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE DOBLESINUSOIDAL2 (DIS1,DIS2,DIS3,DIS4,DIS5,
1PROF1,PROF2,PROF3,PROF4,ESTRA1,ESTRA2,CV1,CV2,CV3,NoIMAG)
C con fronteras reflejadas a la distancia desde el punto que se
C extrae hasta la base de la curva sinusoidal
C VERSION QUE USA EXPONENCIAL, SUNUSOIDAL, RECTA INCLINADA,
C SINUSOIDAL Y HORIZONTAL
C
PARAMETER(J=1000, PI=3.14159265)
REAL SX,SY
REAL X,Z,XFRO
INTEGER DIS1,DIS2,DIS3,DIS4,DIS5,NoI
INTEGER ESTRA1,ESTRA2,NoIMAG
REAL PROF1,PROF2,PROF3,PROF4
REAL XEXT,Z1,Z2,XLOCAL,ZLOCAL,CV1,CV2,CV3
REAL CV
REAL CURVA1,CURVAH,CURVAIH,CURVAV,IMAGENH
INTEGER BANDERA
C BANDERA = DICE A SUBRUTINA ESTRABASA QUE CASO ES
C EXTRACCION DENTRO DEL BASAMENTO O IMAGEN
C VERTICAL 1 O 2
C
POSICION DE LA X
DO 10 X=-DIS5,DIS5,1

```

```

PRINT*, 'TOTAL ', X
C POSICION DE LA FRONTERA
XFRO=X
CALL FRONTERAS (DIS1,DIS2,DIS3,DIS4,DIS5,PROF1,
1PROF2,PROF3,PROF4,XFRO,CURVAFRO)
CURVA1=CURVAFRO
C POSICION VERTICAL Z
DO 20 Z=0,CURVA1
SX=0
SY=0
C EXTRACCION DENTRO DEL BASAMENTO
DO 30 XEXT=-DIS5,DIS5,1
XFRO=XEXT
CALL FRONTERAS (DIS1,DIS2,DIS3,DIS4,DIS5,PROF1,PROF2,PROF3
1,PROF4,XFRO,CURVAFRO)
CURVAH=CURVAFRO
XLOCAL=(X-XEXT)+0.5
ZLOCAL=Z
BANDERA=1
CALL ESTRABASA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY,
1ESTRA1,ESTRA2,CV1,CV2,CV3,BANDERA,CURVAH,CURVAIH,
2CURVAV,CURVA1,NoI,NoIMAG)
SX=SX+DESX
SY=SY+DESY
30 CONTINUE
C IMAGENES HORIZONTALES
C FORMULAS PARA CALCULAR LA DISTANCIA (X) DESDE 0 HASTA LA CURVA
C A UNA PROFUNDIDAD Z; IMAGENH
C EXPONENCIAL
IF ((Z.LT.PROF1).OR.(Z.EQ.PROF1)) THEN
IMAGENH=((LOG(PROF1-Z+1)*(DIS5-DIS4+1))/LOG(PROF1+1))+DIS4
END IF
C SINUSOIDAL SUPERIOR
IF (((Z.GT.PROF1).AND.(Z.LT.PROF2)).OR.(Z.EQ.PROF2)) THEN
IMAGENH=((ASIN((2*(Z-PROF1)/(-(PROF2-PROF1)))+1))+PI/2)*
1(DIS4-DIS3)/PI)+DIS3
ENDIF
C LINEA RECTA
IF (((Z.GT.PROF2).AND.(Z.LT.PROF3)).OR.(Z.EQ.PROF3)) THEN
IMAGENH=(DIS2-DIS3)/(PROF3-PROF2)*Z+DIS3-(DIS2-DIS3)/
1(PROF3-PROF2)*PROF2
ENDIF
C SINUSOIDAL INFERIOR
IF (Z.GT.PROF3) THEN
IMAGENH=((ASIN((2*(Z-PROF3)/(-(PROF4-PROF3)))+1))+PI/2)*
1(DIS2-DIS1)/PI)+DIS1
ENDIF
C COMO SE CONSIDERA SOLAMENTE LA IMAGEN DE UN SOLO LADO SE SEPARA EN IZQ Y DER
C SE USA EL IF
DO 100 NoI=1,NoIMAG
! IF (X.LT.0) THEN
DO 110 XEXT=(-DIS5-(NoI*2*IMAGENH)),(DIS5-(NoI*2*IMAGENH)),1
C =(XEXT+(NoI*2*IMAGENH))
XFRO=(XEXT+(NoI*2*IMAGENH))
CALL FRONTERAS (DIS1,DIS2,DIS3,DIS4,DIS5,PROF1,PROF2,PROF3
1,PROF4,XFRO,CURVAFRO)
CURVAIH=CURVAFRO
XLOCAL=(X-XEXT)+0.5
ZLOCAL=Z
BANDERA=2
CALL ESTRABASA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY,
1ESTRA1,ESTRA2,CV1,CV2,CV3,BANDERA,CURVAH,CURVAIH,
2CURVAV,CURVA1,NoI,NoIMAG)
C PARA DISMINUIR LA INFLUENCIA DE LA ULTIMA FRONTERA
IF ((NoI.EQ.NoIMAG).AND.(X.GT.0)) THEN
DESX=DESX*(1-(X/(INT(IMAGENH))))
END IF
C
SX=SX+DESX
110 CONTINUE
! END IF

```

```

!   IF (X.GT.0) THEN
DO 120 XEXT=(-DIS5+(NoI*2*IMAGENH)), (DIS5+(NoI*2*IMAGENH)), 1
C   =(XEXT-(NoI*2*IMAGENH)
XFRO=(XEXT-(NoI*2*IMAGENH))
CALL FRONTERAS (DIS1,DIS2,DIS3,DIS4,DIS5,PROF1,PROF2,PROF3
1,PROF4,XFRO,CURVAFRO)
CURVAIH=CURVAFRO
XLOCAL=(X-XEXT)+0.5
ZLOCAL=Z
BANDERA=2
CALL ESTRABASA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY,
1ESTRA1,ESTRA2,CV1,CV2,CV3,BANDERA,CURVAH,CURVAIH,
2CURVAV,CURVA1,NoI,NoIMAG)
C   PARA DISMINUIR LA INFLUENCIA DE LA ULTIMA FRONTERA
IF ((NoI.EQ.NoIMAG).AND.(X.LT.0)) THEN
DESX=DESX*(1-(-X/INT(IMAGENH)))
END IF
C
SX=SX+DESX
120 CONTINUE
!   END IF
100 CONTINUE
C   IMAGENES VERTICALES
DO 200 NoI=1,NoIMAG
DO 210 XEXT=-DIS5,DIS5,1
XFRO=XEXT
CALL FRONTERAS (DIS1,DIS2,DIS3,DIS4,DIS5,PROF1,PROF2,PROF3
1,PROF4,XFRO,CURVAFRO)
CURVAV=CURVAFRO
XLOCAL=(X-XEXT)+0.5
ZLOCAL=Z
BANDERA=3
CALL ESTRABASA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY,
1ESTRA1,ESTRA2,CV1,CV2,CV3,BANDERA,CURVAH,CURVAIH,
2CURVAV,CURVA1,NoI,NoIMAG)
SY=SY+DESY
C   segunda imagen (NEGATIVA)
CV1=-CV1
CV2=-CV2
CV3=-CV3
BANDERA=4
CALL ESTRABASA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY,
1ESTRA1,ESTRA2,CV1,CV2,CV3,BANDERA,CURVAH,CURVAIH,
2CURVAV,CURVA1,NoI,NoIMAG)
CV1=-CV1
CV2=-CV2
CV3=-CV3
SY=SY+DESY
210 CONTINUE
CV1=-CV1
CV2=-CV2
CV3=-CV3
200 CONTINUE
CV1=ABS(CV1)
CV2=ABS(CV2)
CV3=ABS(CV3)
C   TERMINAN IMAGENES VERTICALES
WRITE(2,*)X,-Z,SX,SY
20 CONTINUE
10 CONTINUE
RETURN
END

SUBROUTINE SINUPARCIAL (PROF1,PROF2,PROF3,PROF4,DIS1,DIS2,DIS3,
1DIS4,DIS5,FREATICO,GAMA,NoIMAG,CV)
C   con fronteras reflejadas a la distancia desde el punto que se
C   extrae hasta la base de la curva sinusoidal
C   ABATIMIENTO PARCIAL HASTA FREATICO
C
PARAMETER(J=1000, PI=3.14159265)

```

```

REAL SX,SY
REAL X,Z
INTEGER DIS1,DIS2,DIS3,DIS4,DIS5
REAL PROF1,PROF2,PROF3,PROF4
INTEGER NoIMAG,NoI,SIGNO
REAL XEXT,Z1,Z2,XLOCAL,ZLOCAL
REAL CURVA1,CURVAH,CURVAIH,CURVAV,IMAGENH
C VARIABLES PARA PARCIAL
INTEGER FREATICO
REAL CCEO,GAMA,CV,CVENTRADA,CVAUX
C AQUI HAY QUE PONER LOS DATOS PARA ABATIMIENTO PARCIAL
C CCEO = Cc / 1 + Eo
C GAMA ES LA DENSIDAD SECA DEL SUELO
C CVENTRADA=CV
C COMO CAMBIA EN MUCHOS LADOS
CCEO=CV/LOG(GAMA/(GAMA-1))
C POSICION DE LA X
DO 10 X=-DIS5,DIS5,1
PRINT*,'PARCIAL ',X
C POSICION DE LA FRONTERA
XFRO=X
CALL FRONTERAS (DIS1,DIS2,DIS3,DIS4,DIS5,PROF1,PROF2,PROF3
1,PROF4,XFRO,CURVAFRO)
CURVA1=CURVAFRO
C POSICION VERTICAL Z
DO 20 Z=0,CURVA1
SX=0
SY=0
C EXTRACCION DENTRO DEL BASAMENTO
DO 30 XEXT=-DIS5,DIS5,1
XFRO=XEXT
CALL FRONTERAS (DIS1,DIS2,DIS3,DIS4,DIS5,PROF1,PROF2,PROF3
1,PROF4,XFRO,CURVAFRO)
CURVAH=CURVAFRO
XLOCAL=(X-XEXT)+0.5
ZLOCAL=Z
Z1=0
Z2=CURVAH
CV=CVENTRADA
IF (CURVAH.GT.FREATICO) THEN
DO 100 Z1=FREATICO,CURVAH-1
Z2=Z1+1
CV=CCEO*LOG(1+(FREATICO/((GAMA-1)*Z2)))
CALL PILA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY)
SX=SX+DESX
SY=SY+DESY
100 END DO
Z1=0
Z2=FREATICO
CV=CVENTRADA
END IF
CALL PILA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY)
SX=SX+DESX
SY=SY+DESY
30 CONTINUE
C IMAGENES HORIZONTALES
C FORMULA PARA CALCULAR LA DISTANCIA (X) DESDE 0 HASTA LA CURVA
C A UNA PROFUNDIDAD Z; IMAGENH
C EXPONENCIAL
IF ((Z.LT.PROF1).OR.(Z.EQ.PROF1)) THEN
IMAGENH=((LOG(PROF1-Z+1)*(DIS5-DIS4+1))/LOG(PROF1+1))+DIS4
END IF
C SINUSOIDAL SUPERIOR
IF (((Z.GT.PROF1).AND.(Z.LT.PROF2)).OR.(Z.EQ.PROF2)) THEN
IMAGENH=((ASIN((2*(Z-PROF1)/(-(PROF2-PROF1))+1))+PI/2)*
1(DIS4-DIS3)/PI)+DIS3
ENDIF
C LINEA RECTA
IF ((Z.GT.PROF2).AND.(Z.LT.PROF3)).OR.(Z.EQ.PROF3)) THEN
IMAGENH=(DIS2-DIS3)/(PROF3-PROF2)*Z+DIS3-(DIS2-DIS3)/
1(PROF3-PROF2)*PROF2

```

```

ENDIF
C SINUSOIDAL INFERIOR
IF (Z.GT.PROF3) THEN
IMAGENH=(( (ASIN((2*(Z-PROF3)/(-(PROF4-PROF3)))+1))+PI/2)*
1 (DIS2-DIS1)/PI)+DIS1
ENDIF
C COMO SE CONSIDERA SOLAMENTE LA IMAGEN DE UN SOLO LADO SE SEPARA EN IZQ Y DER
DO 200 NoI=1, NoIMAG
C IF (X.LT.0) THEN
DO 210 XEXT=(-DIS5-(NoI*2*IMAGENH)), (DIS5-(NoI*2*IMAGENH)), 1
C (XEXT+(NoI*2*IMAGENH))
XFRO=(XEXT+(NoI*2*IMAGENH))
CALL FRONTERAS (DIS1, DIS2, DIS3, DIS4, DIS5, PROF1, PROF2, PROF3
1, PROF4, XFRO, CURVAFRO)
CURVAIH=CURVAFRO
XLOCAL=(X-XEXT)+0.5
ZLOCAL=Z
Z1=0
Z2=CURVAIH
CV=CVENTRADA
C CUANDO SE ESTA ABAJO DEL NIVEL FREATICO
IF (CURVAIH.GT.FREATICO) THEN
DO 211 Z1=FREATICO, CURVAIH-1
Z2=Z1+1
CV=CCEO*LOG(1+(FREATICO/((GAMA-1)*Z2)))
CALL PILA (XLOCAL, ZLOCAL, Z1, Z2, CV, DESX, DESY)
C PARA DISMINUIR LA INFLUENCIA DE LA ULTIMA FRONTERA
IF ((NoI.EQ.NoIMAG).AND.(X.GT.0)) THEN
DESX=DESX*(1-(X/(INT(IMAGENH))))
END IF
SX=SX+DESX
211 END DO
Z1=0
Z2=FREATICO
CV=CVENTRADA
END IF
CALL PILA (XLOCAL, ZLOCAL, Z1, Z2, CV, DESX, DESY)
C PARA DISMINUIR LA INFLUENCIA DE LA ULTIMA FRONTERA
IF ((NoI.EQ.NoIMAG).AND.(X.GT.0)) THEN
DESX=DESX*(1-(X/(INT(IMAGENH))))
END IF
SX=SX+DESX
210 CONTINUE
C END IF
C IF (X.GT.0) THEN
DO 220 XEXT=(-DIS5+(NoI*2*IMAGENH)), (DIS5+(NoI*2*IMAGENH)), 1
C (XEXT-(NoI*2*IMAGENH))
XFRO=(XEXT-(NoI*2*IMAGENH))
CALL FRONTERAS (DIS1, DIS2, DIS3, DIS4, DIS5, PROF1, PROF2, PROF3
1, PROF4, XFRO, CURVAFRO)
CURVAIH=CURVAFRO
XLOCAL=(X-XEXT)+0.5
ZLOCAL=Z
Z1=0
Z2=CURVAIH
CV=CVENTRADA
IF (CURVAIH.GT.FREATICO) THEN
DO 221 Z1=FREATICO, CURVAIH-1
Z2=Z1+1
CV=CCEO*LOG(1+(FREATICO/((GAMA-1)*Z2)))
CALL PILA (XLOCAL, ZLOCAL, Z1, Z2, CV, DESX, DESY)
C PARA DISMINUIR LA INFLUENCIA DE LA ULTIMA FRONTERA
IF ((NoI.EQ.NoIMAG).AND.(X.GT.0)) THEN
DESX=DESX*(1-(X/(INT(IMAGENH))))
END IF
SX=SX+DESX
221 END DO
Z1=0
Z2=FREATICO
CV=CVENTRADA
END IF

```

```

CALL PILA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY)
C PARA DISMINUIR LA INFLUENCIA DE LA ULTIMA FRONTERA
  IF ((NoI.EQ.NoIMAG).AND.(X.GT.0)) THEN
    DESX=DESX*(1-(X/(INT(IMAGENH))))
  END IF
  SX=SX+DESX
220 CONTINUE
C END IF
200 CONTINUE
C IMAGENES VERTICALES
  CV=CVENTRADA
C CON "SIGNO" SE HACEN UNA POSITIVA, DOS NEG, DOS POSITIVAS ETC.
  SIGNO=1
  DO 300 NoI=1,NoIMAG
    DO 310 XEXT=-DIS5,DIS5,1
      XFRO=XEXT
      CALL FRONTERAS (DIS1,DIS2,DIS3,DIS4,DIS5,PROF1,PROF2,PROF3
        1,PROF4,XFRO,CURVAFRO)
      CURVAV=CURVAFRO
      XLOCAL=(X-XEXT)+0.5
      ZLOCAL=Z
      Z1=NoI*2*CURVA1-CURVAV
      Z2=NoI*2*CURVA1
      IF (CURVAV.GT.FREATICO) THEN
        CVAUX=CV
        DO 311 Z1=(NoI*2*CURVA1-CURVAV),(NoI*2*CURVA1-FREATICO-1)
          Z2=Z1+1
C EL IF ES POR QUE SALEN LOG(NUMERO NEG)
! IF (1+(FREATICO/((GAMA-1)*(2*CURVA1-Z2))).GT.0) THEN
! CV=SIGNO*CCEO*LOG(1+(FREATICO/((GAMA-1)*(NoI*2*
1 CURVA1-Z2))))
C SI ES LA ULTIMA IMAGEN SOLO TOMA UNA PILA SOLA
  IF (NoI.EQ.NoIMAG) THEN
    CALL UNAPILASOLA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY)
  ELSE
    CALL PILA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY)
  END IF
  SY=SY+DESY
! END IF
311 END DO
  Z1=NoI*2*CURVA1-FREATICO
  Z2=NoI*2*CURVA1
  CV=CVAUX
  END IF
  IF (NoI.EQ.NoIMAG) THEN
    CALL UNAPILASOLA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY)
  ELSE
    CALL PILA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY)
  END IF
  SY=SY+DESY
C segunda imagen (NEGATIVA)
  Z1=NoI*2*CURVA1
  Z2=NoI*2*CURVA1+CURVAV
  CV=-CV
  SIGNO=-SIGNO
  IF (CURVAV.GT.FREATICO) THEN
    CVAUX=CV
    DO 312 Z1=(NoI*2*CURVA1+FREATICO),(NoI*2*CURVA1+CURVAV-1)
      Z2=Z1+1
      CV=SIGNO*(CCEO*LOG(1+(FREATICO/((GAMA-1)*(
1 Z2-NoI*2*CURVA1))))))
      IF (NoI.EQ.NoIMAG) THEN
        CALL UNAPILASOLA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY)
      ELSE
        CALL PILA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY)
      END IF
      SY=SY+DESY
312 END DO
  Z1=NoI*2*CURVA1
  Z2=NoI*2*CURVA1+FREATICO
  CV=CVAUX

```

```

        END IF
            IF (NoI.EQ.NoIMAG) THEN
                CALL UNAPILASOLA (XLOCAL, ZLOCAL, Z1, Z2, CV, DESX, DESY)
            ELSE
                CALL PILA (XLOCAL, ZLOCAL, Z1, Z2, CV, DESX, DESY)
            END IF
        SY=SY+DESY
310    CONTINUE
300    CONTINUE
C     TERMINAN IMAGENES VERTICALES
        WRITE (2, *) X, -Z, SX, SY
20    CONTINUE
10    CONTINUE
        RETURN
        END

SUBROUTINE FRONTERAS (DIS1, DIS2, DIS3, DIS4, DIS5, PROF1, PROF2, PROF3
1, PROF4, XFRO, CURVAFRO)
C     ESTA SUBRUTINA CALCULA LA PROFUNDIDAD VERTICAL DE LA
C     FRONTERA (CURVA) DEPENDIENDO LA POSICION X
        PARAMETER (PI=3.14159265)
        REAL XFRO
        INTEGER DIS1, DIS2, DIS3, DIS4, DIS5
        REAL PROF1, PROF2, PROF3, PROF4
        REAL CURVAFRO
C     POSICION DE LA FRONTERA
C     DIS1 RECTA HORIZONTAL
        IF ((ABS(XFRO)).LT.(DIS1)) THEN
            CURVAFRO=PROF4
        END IF
C     DIS2 SINUSOIDAL
        IF ((ABS(XFRO).EQ.DIS1).OR.((ABS(XFRO).GT.DIS1).AND.
1(ABS(XFRO).LT.DIS2))) THEN
            CURVAFRO=((PROF3-PROF4)*(SIN((PI/2)*((2*(ABS(XFRO)-DIS1))/
1(DIS2-DIS1)+3))-1)/2)+PROF3
        END IF
C     DIS3 RECTA INCLINADA
        IF ((ABS(XFRO).EQ.DIS2).OR.((ABS(XFRO).GT.DIS2).AND.
1(ABS(XFRO).LT.DIS3))) THEN
            CURVAFRO=(PROF2-PROF3)/(DIS3-DIS2)*ABS(XFRO)+PROF3-(PROF2-PROF3)/
1(DIS3-DIS2)*DIS2
        END IF
C     DIS4 SINUSOIDAL
        IF ((ABS(XFRO).EQ.DIS3).OR.((ABS(XFRO).GT.DIS3).AND.
1(ABS(XFRO).LT.DIS4))) THEN
            CURVAFRO=((PROF1-PROF2)*(SIN((PI/2)*((2*(ABS(XFRO)-DIS3))/
1(DIS4-DIS3)+3))-1)/2)+PROF1
        END IF
C     DIS 5 EXPONENCIAL
        IF ((ABS(XFRO).EQ.DIS4).OR.(ABS(XFRO).GT.DIS4)) THEN
            CURVAFRO=-(EXP(LOG(PROF1+1)*(ABS(XFRO)-DIS4)/(DIS5-DIS4))-1)+PROF1
        END IF
        RETURN
        END
SUBROUTINE ESTRABASA (XLOCAL, ZLOCAL, Z1, Z2, CV, DESX, DESY,
1ESTRA1, ESTRA2, CV1, CV2, CV3, BANDERA, CURVAH, CURVAIH,
2CURVAV, CURVA1, NoI, NoIMAG)
C     CALCULA LA DEFORMACION DEBIDA A LA EXTRACCION DENTRO DEL
C     BASAMENTO "DEF" TOMANDO EN CUENTA 3 ESTRATOS DE DIFERENTES CV
C     SUSTITUYE A:
C     Z1=0
C     Z2=CURVAH
C     CALL PILA (XLOCAL, ZLOCAL, Z1, Z2, CV, DESX, DESY)
C     DEL CASO DE UN ESTRATO
        REAL XLOCAL, ZLOCAL, Z1, Z2, CV, DESX, DESY
        INTEGER ESTRA1, ESTRA2, BANDERA, NoI
        REAL CV1, CV2, CV3, NoIMAG
        REAL TEMPX, TEMPY, BASAMENTO
        REAL CURVA1, CURVAH, CURVAIH, CURVAV
C     BASAMENTO = LA DISTANCIA AL BASAMENTO Y COMODIN EN DISTANCIAS

```

```

C   BANDERA=1 EXTRACCION DENTRO DEL BASAMENTO
C   BANDERA=2 EXTRACCION IMAGEN HORIZONTAL
C   BANDERA=3 PRIMERA IMAGEN VERTICAL
C   BANDERA=4 SEGUNDA IMAGEN VERTICAL
C   TEMPX=0
C   TEMPY=0
C   CASO BANDERA 1 ó 2
IF ((BANDERA.NE.3).AND.(BANDERA.NE.4)) THEN
  IF (BANDERA.EQ.1) THEN
    BASAMENTO=CURVAH
  END IF
  IF (BANDERA.EQ.2) THEN
    BASAMENTO=CURVAIH
  END IF
C   PARA EL CASO EN EL QUE SOLO HAY UN ESTRATO
C   PROFUNDIDAD DEL BASAMENTO <= QUE LA DEL ESTRATO1
  IF (BASAMENTO.LE.ESTRA1) THEN
    Z1=0
    Z2=BASAMENTO
    CV=CV1
    CALL PILA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY)
  END IF
C   PARA EL CASO EN EL QUE HAY DOS ESTRATOS
C   ESTRA1 < PROFUNDIDAD DEL BASAMENTO <= ESTRATO2
  IF ((BASAMENTO.LE.ESTRA2).AND.(BASAMENTO.GT.ESTRA1)) THEN
    Z1=0
    Z2=ESTRA1
    CV=CV1
    CALL PILA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY)
    TEMPX=DESX
    TEMPY=DESY
    Z1=ESTRA1
    Z2=BASAMENTO
    CV=CV2
    CALL PILA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY)
    DESX=TEMPX+DESX
    DESY=TEMPY+DESY
  END IF
C   PARA EL CASO EN EL QUE HAY TRES ESTRATOS
C   PROFUNDIDAD DEL BASAMENTO > ESTRA2
  IF (BASAMENTO.GT.ESTRA2) THEN
    Z1=0
    Z2=ESTRA1
    CV=CV1
    CALL PILA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY)
    TEMPX=DESX
    TEMPY=DESY
    Z1=ESTRA1
    Z2=ESTRA2
    CV=CV2
    CALL PILA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY)
    TEMPX=TEMPX+DESX
    TEMPY=TEMPY+DESY
    Z1=ESTRA2
    Z2=BASAMENTO
    CV=CV3
    CALL PILA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY)
    DESX=TEMPX+DESX
    DESY=TEMPY+DESY
  END IF
  END IF
C
C   FIN DEL CASO BANDERA 1 ó 2
C
C   CASO BANDERA 3
C
  IF (BANDERA.EQ.3) THEN
    BASAMENTO=NoI*2*CURVA1-CURVAV
C   PARA EL CASO EN EL QUE SOLO HAY UN ESTRATO
    IF (BASAMENTO.GE.NoI*2*CURVA1-ESTRA1) THEN

```

```

Z1=(NoI*2*CURVA1)-CURVAV
Z2=NoI*2*CURVA1
CV=CV1
C SI ES LA ULTIMA IMAGEN SOLO TOMA UNA PILA SOLA
  IF (NoI.EQ.NoIMAG) THEN
    CALL UNAPILASOLA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY)
  ELSE
    CALL PILA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY)
  END IF
END IF
C PARA EL CASO EN EL QUE HAY DOS ESTRATOS
  IF ((BASAMENTO.LT.NoI*2*CURVA1-ESTRA1).AND.
1(BASAMENTO.GE.NoI*2*CURVA1-ESTRA2)) THEN
Z1=BASAMENTO
Z2=NoI*2*CURVA1-ESTRA1
CV=CV2
C SI ES LA ULTIMA IMAGEN SOLO TOMA UNA PILA SOLA
  IF (NoI.EQ.NoIMAG) THEN
    CALL UNAPILASOLA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY)
  ELSE
    CALL PILA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY)
  END IF
TEMPX=DESX
TEMPY=DESY
Z1=NoI*2*CURVA1-ESTRA1
Z2=NoI*2*CURVA1
CV=CV1
C SI ES LA ULTIMA IMAGEN SOLO TOMA UNA PILA SOLA
  IF (NoI.EQ.NoIMAG) THEN
    CALL UNAPILASOLA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY)
  ELSE
    CALL PILA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY)
  END IF
DESX=TEMPX+DESX
DESY=TEMPY+DESY
END IF
C PARA EL CASO EN EL QUE HAY TRES ESTRATOS
  IF (BASAMENTO.LT.NoI*2*CURVA1-ESTRA2) THEN
Z1=BASAMENTO
Z2=NoI*2*CURVA1-ESTRA2
CV=CV3
C SI ES LA ULTIMA IMAGEN SOLO TOMA UNA PILA SOLA
  IF (NoI.EQ.NoIMAG) THEN
    CALL UNAPILASOLA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY)
  ELSE
    CALL PILA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY)
  END IF
TEMPX=DESX
TEMPY=DESY
Z1=NoI*2*CURVA1-ESTRA2
Z2=NoI*2*CURVA1-ESTRA1
CV=CV2
C SI ES LA ULTIMA IMAGEN SOLO TOMA UNA PILA SOLA
  IF (NoI.EQ.NoIMAG) THEN
    CALL UNAPILASOLA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY)
  ELSE
    CALL PILA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY)
  END IF
TEMPX=TEMPX+DESX
TEMPY=TEMPY+DESY
Z1=NoI*2*CURVA1-ESTRA1
Z2=NoI*2*CURVA1
CV=CV1
C SI ES LA ULTIMA IMAGEN SOLO TOMA UNA PILA SOLA
  IF (NoI.EQ.NoIMAG) THEN
    CALL UNAPILASOLA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY)
  ELSE
    CALL PILA (XLOCAL,ZLOCAL,Z1,Z2,CV,DESX,DESY)
  END IF
DESX=TEMPX+DESX
DESY=TEMPY+DESY

```

```

END IF
END IF
C
C
C   FIN BANDERA 3 PRIMERA IMAGEN VERTICAL
C
C   INICIO BANDERA 4 SEGUNDA IMAGEN VERTICAL
C
IF (BANDERA.EQ.4) THEN
BANDERA=NoI*2*CURVA1+CURVAV
C
C   PARA EL CASO EN EL QUE SOLO HAY UN ESTRATO
C   PROFUNDIDAD DEL BASAMENTO <= QUE LA DEL ESTRATO1
IF (BASAMENTO.LE.NoI*2*CURVA1+ESTRA1) THEN
Z1=NoI*2*CURVA1
Z2=BASAMENTO
CV=CV1
C
SI ES LA ULTIMA IMAGEN SOLO TOMA UNA PILA SOLA
IF (NoI.EQ.NoIMAG) THEN
CALL UNAPILASOLA (XLOCAL, ZLOCAL, Z1, Z2, CV, DESX, DESY)
ELSE
CALL PILA (XLOCAL, ZLOCAL, Z1, Z2, CV, DESX, DESY)
END IF
END IF
C
PARA EL CASO EN EL QUE HAY DOS ESTRATOS
IF ((BASAMENTO.LE.NoI*2*CURVA1+ESTRA2).AND.
1(BASAMENTO.GT.NoI*2*CURVA1+ESTRA1)) THEN
Z1=NoI*2*CURVA1
Z2=NoI*2*CURVA1+ESTRA1
CV=CV1
C
SI ES LA ULTIMA IMAGEN SOLO TOMA UNA PILA SOLA
IF (NoI.EQ.NoIMAG) THEN
CALL UNAPILASOLA (XLOCAL, ZLOCAL, Z1, Z2, CV, DESX, DESY)
ELSE
CALL PILA (XLOCAL, ZLOCAL, Z1, Z2, CV, DESX, DESY)
END IF
TEMPX=DESX
TEMPY=DESY
Z1=NoI*2*CURVA1+ESTRA1
Z2=BASAMENTO
CV=CV2
C
SI ES LA ULTIMA IMAGEN SOLO TOMA UNA PILA SOLA
IF (NoI.EQ.NoIMAG) THEN
CALL UNAPILASOLA (XLOCAL, ZLOCAL, Z1, Z2, CV, DESX, DESY)
ELSE
CALL PILA (XLOCAL, ZLOCAL, Z1, Z2, CV, DESX, DESY)
END IF
DESX=TEMPX+DESX
DESY=TEMPY+DESY
END IF
C
PARA EL CASO EN EL QUE HAY TRES ESTRATOS
IF (BASAMENTO.GT.ESTRA2) THEN
Z1=NoI*2*CURVA1
Z2=NoI*2*CURVA1+ESTRA1
CV=CV1
C
SI ES LA ULTIMA IMAGEN SOLO TOMA UNA PILA SOLA
IF (NoI.EQ.NoIMAG) THEN
CALL UNAPILASOLA (XLOCAL, ZLOCAL, Z1, Z2, CV, DESX, DESY)
ELSE
CALL PILA (XLOCAL, ZLOCAL, Z1, Z2, CV, DESX, DESY)
END IF
TEMPX=DESX
TEMPY=DESY
Z1=NoI*2*CURVA1+ESTRA1
Z2=NoI*2*CURVA1+ESTRA2
CV=CV2
C
SI ES LA ULTIMA IMAGEN SOLO TOMA UNA PILA SOLA
IF (NoI.EQ.NoIMAG) THEN
CALL UNAPILASOLA (XLOCAL, ZLOCAL, Z1, Z2, CV, DESX, DESY)
ELSE
CALL PILA (XLOCAL, ZLOCAL, Z1, Z2, CV, DESX, DESY)
END IF

```

```

TEMPX=TEMPX+DESX
TEMPY=TEMPY+DESY
Z1=NOI*2*CURVAL+ESTRA2
Z2=BASAMENTO
CV=CV3
C SI ES LA ULTIMA IMAGEN SOLO TOMA UNA PILA SOLA
  IF (NOI.EQ.NOIMAG) THEN
    CALL UNAPILASOLA (XLOCAL, ZLOCAL, Z1, Z2, CV, DESX, DESY)
  ELSE
    CALL PILA (XLOCAL, ZLOCAL, Z1, Z2, CV, DESX, DESY)
  END IF
  DESX=TEMPX+DESX
  DESY=TEMPY+DESY
END IF
END IF
C FIN DE BANDERA IGUAL A 4
RETURN
END

SUBROUTINE PILA (XLOCAL, ZLOCAL, Z1, Z2, CV, DESX, DESY)
C RUTINA PARA CALCULAR DEFORMACION DEBIDA A
C EXTRACCION DE PILOTE DESDE H1 HASTA H2
REAL XLOCAL, ZLOCAL, Z1, Z2, CV, DESX, DESY
PARAMETER (PI=3.14159265)
REAL R, R11, R12, R21, R22, TETHA
REAL R12R22, R11R21, R22CUA, R21CUA
C CALCULO DE DISTANCIAS (R's)
  R=SQRT (XLOCAL*XLOCAL+ZLOCAL*ZLOCAL)
  R11=SQRT (XLOCAL*XLOCAL+ (ZLOCAL-Z1) * (ZLOCAL-Z1))
  R12=SQRT (XLOCAL*XLOCAL+ (ZLOCAL-Z2) * (ZLOCAL-Z2))
  R21=SQRT (XLOCAL*XLOCAL+ (ZLOCAL+Z1) * (ZLOCAL+Z1))
  R22=SQRT (XLOCAL*XLOCAL+ (ZLOCAL+Z2) * (ZLOCAL+Z2))
  R12R22=R12*R22
  R11R21=R11*R21
  R22CUA=R22*R22
  R21CUA=R21*R21
C CALCULO DE ANGULO TEHTA
  TETHA=-ATAN ( (-Z2+ZLOCAL) /XLOCAL)
  1 +ATAN ( (Z2+ZLOCAL) /XLOCAL)
  2 +ATAN ( (-Z1+ZLOCAL) /XLOCAL)
  3 -ATAN ( (Z1+ZLOCAL) /XLOCAL)
C CALCULO DE DEFORMACION EN EL PUNTO X Y
  DESX=- (CV*0.5/PI) * (TETHA+2*XLOCAL*ZLOCAL
  1 * (1/R22CUA-1/R21CUA))
  DESY=- (CV*0.5/PI) * (LOG ( (R12*R22) / (R11*R21) ) -2*
  1 ZLOCAL* ( (ZLOCAL+Z2) /R22CUA- (ZLOCAL+Z1) /R21CUA))
RETURN
END

SUBROUTINE PILASINCERUTIS (XLOCAL, ZLOCAL, Z1, Z2, CV, DESX, DESY)
C RUTINA PARA CALCULAR DEFORMACION DEBIDA A
C EXTRACCION DE PILOTE DESDE H1 HASTA H2
REAL XLOCAL, ZLOCAL, Z1, Z2, CV, DESX, DESY
PARAMETER (PI=3.14159265)
REAL R, R11, R12, R21, R22, TETHA
REAL R12R22, R11R21, R22CUA, R21CUA
C CALCULO DE DISTANCIAS (R's)
  R=SQRT (XLOCAL*XLOCAL+ZLOCAL*ZLOCAL)
  R11=SQRT (XLOCAL*XLOCAL+ (ZLOCAL-Z1) * (ZLOCAL-Z1))
  R12=SQRT (XLOCAL*XLOCAL+ (ZLOCAL-Z2) * (ZLOCAL-Z2))
  R21=SQRT (XLOCAL*XLOCAL+ (ZLOCAL+Z1) * (ZLOCAL+Z1))
  R22=SQRT (XLOCAL*XLOCAL+ (ZLOCAL+Z2) * (ZLOCAL+Z2))
  R12R22=R12*R22
  R11R21=R11*R21
  R22CUA=R22*R22
  R21CUA=R21*R21
C CALCULO DE ANGULO TEHTA
  TETHA=-ATAN ( (-Z2+ZLOCAL) /XLOCAL)
  1 +ATAN ( (Z2+ZLOCAL) /XLOCAL)
  2 +ATAN ( (-Z1+ZLOCAL) /XLOCAL)
  3 -ATAN ( (Z1+ZLOCAL) /XLOCAL)

```

```

C      CALCULO DE DEFORMACION EN EL PUNTO X Y
          DESX--(CV*0.5/PI)*(TETHA)
          DESY--(CV*0.5/PI)*(LOG((R12*R22)/(R11*R21)))
RETURN
END

SUBROUTINE UNAFILASOLA (XLOCAL, ZLOCAL, Z1, Z2, CV, DESX, DESY)
C      RUTINA PARA CALCULAR DEFORMACION DEBIDA A
C      EXTRACCION DE PILOTE DESDE H1 HASTA H2
C      PERO SIN TOMAR EN CUENTA LA IMAGEN NI LA RELAJACION DE
C      ESFUERZOS
REAL XLOCAL, ZLOCAL, Z1, Z2, CV, DESX, DESY
PARAMETER (PI=3.14159265)
REAL R11, R12, TETHA
C      CALCULO DE DISTANCIAS (R's)
          R11=SQRT(XLOCAL*XLOCAL+(ZLOCAL-Z1)*(ZLOCAL-Z1))
          R12=SQRT(XLOCAL*XLOCAL+(ZLOCAL-Z2)*(ZLOCAL-Z2))
C      CALCULO DE ANGULO TEHTA
          TETHA=-ATAN((Z2-ZLOCAL)/XLOCAL)
          +ATAN((Z1-ZLOCAL)/XLOCAL)
1
C      CALCULO DE DEFORMACION EN EL PUNTO X Y
          DESX--(CV*0.5/PI)*TETHA
          DESY--(CV*0.5/PI)*LOG(R12/R11)
RETURN
END

SUBROUTINE DEEVAL (PROF4, DIS5)
C      DEFORMACIONES VOLUMETRICAS
PARAMETER(j=300)
REAL PROF4
INTEGER DIS5
REAL X, Y, UNO, DOS, TRES, CUATRO
real SMX(J, J), SMY(J, J), EX, EY, E
REWIND(2)
DO I=1, (PROF4*DIS5)
READ(2, *) UNO, DOS, TRES, CUATRO
IF (UNO.LT.1) THEN
X=-UNO+1
Y=-DOS+1
SMX(X, Y)=TRES
SMY(X, Y)=CUATRO
END IF
END DO
DO 10 Y=1, PROF4+1
DO 20 X=1, DIS5+1
C      LOS IFs SON PARA SINUSOIDAL U OTRAS FORMAS RARAS
IF ((SMX(X+1, Y).NE.0).AND.(SMX(X, Y).NE.0)) THEN
EX=SMX(X+1, Y)-SMX(X, Y)
IF ((SMY(X, Y+1).NE.0).AND.(SMY(X, Y).NE.0)) THEN
EY=SMY(X, Y+1)-SMY(X, Y)
E=EX+EY
WRITE(3, 9001) (X-1), (1-Y), EX, EY, E
END IF
END IF
9001  FORMAT(400(F11.5):/)
20  CONTINUE
10  CONTINUE
RETURN
END

```